

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SANEAMENTO,
MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS

FERRAMENTA DE AUXÍLIO À EMISSÃO DE ALERTA
DE INUNDAÇÕES URBANAS: METODOLOGIA
ASSOCIANDO AS CARACTERÍSTICAS DAS
PRECIPITAÇÕES COM A PROBABILIDADE DE
OCORRÊNCIA DE ALERTA

Luísa Almeida Ventura

Belo Horizonte

2018

**FERRAMENTA DE AUXÍLIO À EMISSÃO DE ALERTA
DE INUNDAÇÕES URBANAS: METODOLOGIA
ASSOCIANDO AS CARACTERÍSTICAS DAS
PRECIPITAÇÕES COM A PROBABILIDADE DE
OCORRÊNCIA DE ALERTA**

Luísa Almeida Ventura

Luísa Almeida Ventura

**FERRAMENTA DE AUXÍLIO À EMISSÃO DE ALERTA
DE INUNDAÇÕES URBANAS: METODOLOGIA
ASSOCIANDO AS CARACTERÍSTICAS DAS
PRECIPITAÇÕES COM A PROBABILIDADE DE
OCORRÊNCIA DE ALERTA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito à obtenção do título de Mestre em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos.

Área de concentração: Recursos Hídricos

Linha de pesquisa: Hidrologia Urbana e Drenagem

Orientadora: Priscilla Macedo Moura

Coorientador: Wilson dos Santos Fernandes

Belo Horizonte

Escola de Engenharia da UFMG

2018

V468f

Ventura, Luísa Almeida.

Ferramenta de auxílio à emissão de alerta de inundações urbanas [manuscrito] : metodologia associando as características das precipitações com a probabilidade de ocorrência de alerta / Luísa Almeida Ventura. – 2018.

xvii, 160 f., enc.: il.

Orientadora: Priscilla Macedo Moura.

Coorientador: Wilson dos Santos Fernandes.

Dissertação (mestrado) Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Apêndices: f.142-160.

Bibliografia: f. 130-141.

1. Engenharia sanitária - Teses. 2. Recursos hídricos - Desenvolvimento - Teses. 3. Inundações - Arrudas, Bacia, Rio (MG) - Teses. 4. Precipitação (Meteorologia) - Probabilidades - Teses. I. Moura, Priscilla Macedo. II. Fernandes, Wilson dos Santos. III. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. IV. Título.

CDU: 628(043)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

Escola de Engenharia

Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos

Avenida Antônio Carlos, 6627 - 4º andar - 31270-901 - Belo Horizonte - BRASIL

Telefax: 55 (31) 3409-1882 - posgrad@desa.ufmg.br

<http://www.smarh.eng.ufmg.br>

FOLHA DE APROVAÇÃO

Ferramenta de Auxílio À Emissão de Alerta de Inundações Urbanas: Metodologia Associando As Características das Precipitações Com A Probabilidade de Ocorrência de Alerta

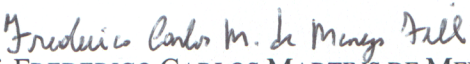
LUÍSA ALMEIDA VENTURA

Dissertação defendida e aprovada pela banca examinadora constituída pelos Senhores:


Profª. PRISCILLA MACEDO MOURA (ORIENTADORA)


Prof. WILSON DOS SANTOS FERNANDES (COORIENTADOR)


Profª. ALINE DE ARAÚJO NUNES


Prof. FREDERICO CARLOS MARTINS DE MENEZES FILHO

Aprovada pelo Colegiado do PG SMARH

Versão Final aprovada por


Prof. Antonio Teixeira de Matos
Coordenador


Profª. Priscilla Macedo Moura
Orientadora

Belo Horizonte, 29 de junho de 2018.

AGRADECIMENTOS

Seria impossível concluir mais essa etapa de minha vida sozinha. Assim, agradeço a meu pai, minha mãe e minha irmã que foram incentivadores imprescindíveis para que eu corresse atrás desse sonho.

Gostaria de agradecer a minha orientadora e coorientador que foram presentes em todas as etapas dessa dissertação. Obrigada pelas palavras de incentivo e por todo apoio recebido.

Gostaria de agradecer ao pessoal da Sudecap, do Centro de Operações e da Defesa Civil de Belo Horizonte, em especial a equipe do Centro de Monitoramento e Alerta de Risco pela disponibilidade e interesse demonstrado na pesquisa.

Agradeço também aos meus amigos, tanto os de longa data como os que vieram nessa nova fase. Vocês foram essenciais para essa conquista.

Por fim, gostaria de agradecer ao CNPq.

“Oh! Deus, perdoe este pobre coitado
Que de joelhos rezou um bocado
Pedindo pra chuva cair sem parar

Oh! Deus, será que o Senhor se zangou
E só por isso o sol se arretirou
Fazendo cair toda chuva que há”

(Luiz Gonzaga)

RESUMO

As inundações urbanas ocorrem quando as águas saem do seu leito de escoamento devido à falta de capacidade de transporte dos sistemas de drenagem e ocupam os locais utilizados pela população. Ainda que sejam acontecimentos naturais, esses desastres são fenômenos sociais vinculados aos modelos de desenvolvimento social e econômico vigentes. Desse modo, sua gestão requer uma abordagem interdisciplinar e intersetorial para a formulação de políticas de prevenção, mitigação e melhor resposta em ocorrências futuras. Os sistemas de alerta são importantes ferramentas de gestão de áreas urbanas consolidadas. Estes são capazes de proporcionar redução nos danos causados pelas inundações, porém diversos fatores influenciam na sua eficácia, como: tempo de antecedência, confiabilidade do alerta e preparo dos envolvidos quanto às ações a serem tomadas.

Dado que a confiabilidade do sistema de previsão e alerta perante a população é de extrema importância para sua eficácia, essa pesquisa apresenta diferentes frentes cujos objetivos são garantir essa confiabilidade através da melhoria e entendimento das diversas etapas envolvidas na emissão do alerta. A área de estudo é a bacia do ribeirão Arrudas, localizada ao sul do município de Belo Horizonte, que sofre todos os anos os efeitos dos eventos de inundação. O foco principal do trabalho é apresentar uma metodologia que permita relacionar as características das chuvas com a probabilidade de ocorrência do alerta de modo que essa relação seja mais uma ferramenta para embasar a decisão do gestor frente a uma determinada previsão de chuva. Para isso, chuvas sintéticas, geradas a partir de um gerador estocástico, foram simuladas no SWMM e suas características como duração e total precipitado foram relacionadas com a probabilidade de ocorrência dos alertas. Da comparação dessas relações com os registros de alertas feito pela PMBH, nota-se a tendência dos resultados simulados em subestimar a probabilidade do alerta. Esse resultado está de acordo com a dificuldade em representar de forma acurada os níveis de pico no processo de calibração e validação do SWMM. Dessa forma, apesar dos resultados obtidos nessa pesquisa não serem satisfatórios do ponto de vista operacional, eles são extremamente promissores do ponto de vista metodológico já que a análise apresentada aqui pode ser feita para outras regiões e outros modelos hidrológico e hidráulico.

Além disso, como outra maneira de garantir a confiabilidade do sistema é assegurar a qualidade dos dados utilizados. Dessa forma, um dos objetivos específicos dessa dissertação é avaliar os valores de vazão obtidos de curvas-chave sintéticas, ou seja, elaboradas apenas com informações da geometria da calha e do coeficiente de rugosidade de Manning. Essas relações sintéticas foram geradas no HEC-RAS através das informações de geometria do atlas de drenagem urbana de Belo Horizonte e confrontadas com a curva-chave do SWMM após calibração e validação do modelo. Assim, apesar da comparação ter sido feita entre modelos, foi possível verificar se as curvas-chave sintéticas, obtidas a partir de uma metodologia subjetiva, se aproximam das geradas por um modelo calibrado e validado. A diferença entre as duas relações foi grande e, embora esse resultado não seja conclusivo, ele serve como um alerta para que uma atenção maior seja dada ao uso de curvas geradas a partir da geometria e definição do coeficiente de rugosidade.

O último objetivo específico dessa pesquisa relaciona-se à verificação dos valores de antecedência que possibilitem a mobilização por parte dos órgãos e pessoas responsáveis pela execução das ações previstas no plano de contingência, ou seja, definir um tempo de antecedência ideal do ponto de vista operacional, dado à forma como o sistema é estruturado na área de estudo. Como esse tempo é intimamente relacionado ao local do sistema, para responder a esse objetivo foi feito um levantamento junto à Defesa Civil de Belo Horizonte das atividades realizadas no instante seguinte à emissão do alerta, através do entendimento da situação, como ela é desenvolvida e de que maneira os participantes envolvidos agem. A dificuldade em definir um tempo de antecedência ótimo está refletida na complexidade das ações levantadas. O número de variáveis envolvidas desde a etapa de previsão, comunicação do alerta até as distâncias entre as equipes mobilizadas e o local do evento reflete o caráter imprevisível da forma de desenvolvimento das ações de resposta ao evento, o que impossibilitou a definição de uma antecedência operacional mínima para Belo Horizonte.

Palavras-chave: sistema de previsão e alerta; curva-chave; antecedência do alerta; probabilidade de ocorrência de alerta.

ABSTRACT

Urban floods occur when a natural or artificial channel can no longer accommodate increased discharges caused by storm events and overflows to its banks affecting areas occupied by the population. Although floods are natural events, these disasters in an urban environment are directly related to the current social and economic development system. Thus, its management requires an interdisciplinary and intersectoral approach to formulate policies for prevention, mitigation and response to future disasters. Early warning alert systems are important management tools for consolidated urban areas, allowing a potential reduction of the damage caused by floods. However, the effectiveness of this system is influenced by several factors, including the available time to send the warning prior to the event, reliability of the alert and expertise of the involved personnel to perform the correct course of action.

Given that the reliability of the early warning alert system is extremely important for its effectiveness, this research presents different approaches whose objectives are to guarantee this reliability through the improvement and understanding of the numerous steps involved in this process. The main objective of this work is to present a methodology that allows the correlation between the rainfall characteristics and the probability of alert occurrence, serving as a tool to support decision-making by the competent authorities given a rain forecast. To achieve this goal, synthetic rainfall datasets, generated by a stochastic generator were simulated in the SWMM model, enabling the development of a correlation between the duration and total precipitation volume with probability of occurrence of the alerts. Comparison of these relations with the council's alert records, evidence the tendency of the simulated results to underestimate the probability of the alert. This result shows the difficulty to represent the peak levels accurately in the SWMM calibration and validation process. Although the results obtained in this research are not satisfactory from the operational point of view, they are extremely promising from the methodological perspective. Therefore, the analysis presented here can be applied for other regions and hydrological and hydraulics models.

Another way of guaranteeing the reliability of the system is to ensure the quality of the data used. Thus, one of the specific objectives of this dissertation is to evaluate the discharge values obtained from synthetic rating curves, elaborated only channel geometry information and

Manning's roughness coefficients. These synthetic relations were obtained by modeling the aforementioned data for a range of discharge values with the software HEC-RAS, and confronted with SWMM's rating curve, elaborated after the calibration and validation process. Although the comparison was made between models, it was possible to verify if the synthetic rating curves, obtained from a subjective methodology, were similar to those generated by a calibrated model. The results of the analysis showed that the SWMM's rating curve resulting of a Manning coefficient of 0.028 adjusted to the HEC-RAS' rating curve corresponding to the roughness coefficient of 0.034. Although the difference between these two relations was significant and not conclusive, it indicates that greater attention should be given to the use of synthetic stage-discharge relationships.

The last specific objective of this research regards the verification of the time required from the issuing the alert to allow proper mobilization by the agencies and people responsible for the actions foreseen in the contingency plan. In other words, the goal is to set an ideal lead time from the operational point of view given the way the system is structured in the study region. As this variable is intimately related to the system location, a survey was carried out with the Civil Defense of Belo Horizonte, aiming to understand the actions undertaken shortly after an early warning alert was issued. It was observed that the difficulties arise due to the complexity of the actions required. The number of factors constraining the local operation, since the forecast analysis to the alert issuing and team mobilization reflect the unpredictable character presented in the selected course of action, preventing the definition of an optimal time interval to provide an early alert of an imminent danger within the study area.

Keywords: early warning alert system; rating curve; lead time; probability of alert occurrence.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	ix
LISTA DE TABELAS	xiv
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	xv
1. INTRODUÇÃO	18
2. OBJETIVOS	21
2.1. Objetivo Geral.....	21
2.2. Objetivos Específicos	21
3. REVISÃO DE LITERATURA.....	22
3.1. Inundações	22
3.2. Medidas de Gestão de Inundações.....	24
3.2.1. <i>Medidas Estruturais</i>	25
3.2.2. <i>Medidas Não Estruturais</i>	26
3.3. Sistema de Previsão e Alerta	28
3.4. Modelos de Previsão Meteorológica.....	33
3.5. Antecedência no Alerta.....	37
3.6. Monitoramento de Variáveis Hidrológicas.....	39
3.6.1. <i>Medição de Velocidade</i>	40
3.6.2. <i>A Técnica de Traçadores</i>	42
3.6.3. <i>Elaboração de Curvas-chave</i>	43
3.7. Modelagem Hidrológica	47
3.7.1. <i>Storm Water Management Model (SWMM)</i>	49
3.7.2. <i>Calibração de Modelos</i>	52
3.7.3. <i>Avaliação de Desempenho</i>	53
4. MATERIAL E MÉTODOS	55
4.1. Caracterização da Área de Estudo	55
4.1.1. <i>Inundações em Belo Horizonte</i>	58
4.1.2. <i>Dados Levantados</i>	64
4.1.3. <i>Eventos Selecionados</i>	67
4.2. Modelo SWMM.....	74
4.2.1. <i>Embasamento Teórico</i>	74
4.2.2. <i>Modelo Desenvolvido</i>	76
4.2.3. <i>Análise de Sensibilidade</i>	77
4.2.4. <i>Calibração e Validação</i>	78

4.3.	Modelo HEC-RAS	81
4.3.1.	<i>Embasamento Teórico</i>	81
4.3.2.	<i>Elaboração das Curvas-Chave Sintética</i>	82
4.4.	Avaliação das Curvas-Chave	83
4.5.	Verificação da Antecedência do Alerta	83
4.6.	Verificação dos Eventos de Alerta.....	84
4.6.1.	<i>Geradores Estocásticos de Séries Sintéticas</i>	85
5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	87
5.1.	Modelo SWMM.....	87
5.1.1.	<i>Análise de Sensibilidade</i>	87
5.1.2.	<i>Calibração e Validação</i>	88
5.2.	Elaboração e Avaliação das Curvas-Chave	101
5.2.1.	<i>Verificação da Condição de Contorno no HEC-RAS</i>	101
5.2.2.	<i>Avaliação das Curvas-Chave</i>	102
5.3.	Verificação da Antecedência do Alerta para Belo Horizonte.....	104
5.4.	Avaliação das Chuvas Sintéticas	108
5.4.1.	<i>Gerador Estocástico</i>	108
5.4.2.	<i>Análise das Características da Chuva</i>	115
6.	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	126
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	130
	APÊNDICE 1 – USO DO SOLO NA BACIA DO RIBEIRÃO ARRUDAS POR SUB-BACIA	142
	APÊNDICE 2 – HISTOGRAMAS DAS PRECIPITAÇÕES ACUMULADAS POR DURAÇÃO.....	145
	APÊNDICE 3 – PROBABILIDADE DE OCORRÊNCIA DE ALERTA AMARELO DADO O TOTAL PRECIPITADO E A DURAÇÃO	149
	APÊNDICE 4 – PROBABILIDADE DE OCORRÊNCIA DE ALERTA LARANJA DADO O TOTAL PRECIPITADO E A DURAÇÃO	153
	APÊNDICE 5 – PROBABILIDADE DE OCORRÊNCIA DE ALERTA VERMELHO DADO O TOTAL PRECIPITADO E A DURAÇÃO	157

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - RISCO COMO RESULTADO DA INTERAÇÃO ENTRE PERIGO E VULNERABILIDADE.....	24
FIGURA 2 – ETAPAS DA OPERAÇÃO DA GESTÃO DO RISCO.....	25
FIGURA 3 - COMPONENTES BÁSICOS DE UM SISTEMA DE PREVISÃO E ALERTA DE INUNDAÇÕES.....	29
FIGURA 4 - FLUXO DE INFORMAÇÕES EM UM SISTEMA TÍPICO DE PREVISÃO HIDROMETEOROLÓGICA..	34
FIGURA 5- FLUXOGRAMA DAS ETAPAS METODOLÓGICAS E INDICAÇÃO DOS OBJETIVOS A SEREM ALCANÇADOS.....	55
FIGURA 6 – MAPA DAS GRANDES BACIAS HIDROGRÁFICAS DE BELO HORIZONTE.....	56
FIGURA 7 - MANCHA DE INUNDAÇÃO E GRÁFICO DE RISCO PARA CÓRREGO BARREIRO DA CARTA DE INUNDAÇÃO DA REGIONAL BARREIRO.	60
FIGURA 8 - DIAGRAMA DO ARRANJO DO SISTEMA DE PREVISÃO E ALERTA DO MUNICÍPIO DE BELO HORIZONTE.....	61
FIGURA 9 – DELIMITAÇÃO DAS SUB-BACIAS DA BACIA DO ARRUDAS SEGUNDO AS ÁREAS DE DRENAGEM DAS ESTAÇÕES FLUVIOMÉTRICAS 24, 30, 32, 33 E 35.....	66
FIGURA 10 – LOCALIZAÇÃO DAS ESTAÇÕES FLUVIOMÉTRICAS 24, 30, 32, 33 E 35.	67
FIGURA 11 – DIAGRAMA DO PROCESSO DE CÁLCULO DO SWMM.....	74
FIGURA 12 – MODELO DE RESERVATÓRIO NÃO LINEAR DA BACIA.	75
FIGURA 13 - VARIAÇÃO DO COEFICIENTE DE NASH-SUTCLIFFE EM RELAÇÃO AO VALOR DE REFERÊNCIA PARA A ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DOS PARÂMETROS.	87
FIGURA 14 - VARIAÇÃO DO VALOR DO NÍVEL D'ÁGUA MÁXIMO EM RELAÇÃO AO VALOR DE REFERÊNCIA PARA A ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DOS PARÂMETROS.	88
FIGURA 15 - VALORES DOS NÍVEIS D'ÁGUA SIMULADOS E OBSERVADOS NO EXUTÓRIO DA SUB-BACIA 24 PARA O EVENTO 1 DA CALIBRAÇÃO 4.	90
FIGURA 16 - VALORES DOS NÍVEIS D'ÁGUA SIMULADOS E OBSERVADOS NO EXUTÓRIO DA SUB-BACIA 24 PARA O EVENTO 2 DA CALIBRAÇÃO 4.	90
FIGURA 17 - VALORES DOS NÍVEIS D'ÁGUA SIMULADOS E OBSERVADOS NO EXUTÓRIO DA SUB-BACIA 24 PARA O EVENTO 3 DA CALIBRAÇÃO 4.	91
FIGURA 18 - VALORES DOS NÍVEIS D'ÁGUA SIMULADOS E OBSERVADOS NO EXUTÓRIO DA SUB-BACIA 24 PARA O EVENTO 4 DA CALIBRAÇÃO 4.	91
FIGURA 19 - VALORES DOS NÍVEIS D'ÁGUA SIMULADOS E OBSERVADOS NO EXUTÓRIO DA SUB-BACIA 24 PARA O EVENTO 1 DA VALIDAÇÃO.	93
FIGURA 20 - VALORES DOS NÍVEIS D'ÁGUA SIMULADOS E OBSERVADOS NO EXUTÓRIO DA SUB-BACIA 24 PARA O EVENTO 2 DA VALIDAÇÃO.	93

FIGURA 21 - VALORES DOS NÍVEIS D'ÁGUA SIMULADOS E OBSERVADOS NO EXUTÓRIO DA SUB-BACIA 24 PARA O EVENTO 3 DA VALIDAÇÃO.	94
FIGURA 22 - VALORES DOS NÍVEIS D'ÁGUA SIMULADOS E OBSERVADOS NO EXUTÓRIO DA SUB-BACIA 24 PARA O EVENTO 4 DA VALIDAÇÃO.	94
FIGURA 23 - VALORES DOS NÍVEIS D'ÁGUA SIMULADOS E OBSERVADOS NO EXUTÓRIO DA SUB-BACIA 24 PARA O EVENTO 1 DO AJUSTE MANUAL.	96
FIGURA 24 - VALORES DOS NÍVEIS D'ÁGUA SIMULADOS E OBSERVADOS NO EXUTÓRIO DA SUB-BACIA 30 PARA O EVENTO 1 DO AJUSTE MANUAL.	97
FIGURA 25 - VALORES DOS NÍVEIS D'ÁGUA SIMULADOS E OBSERVADOS NO EXUTÓRIO DA SUB-BACIA 24 PARA O EVENTO 2 DO AJUSTE MANUAL.	97
FIGURA 26 - VALORES DOS NÍVEIS D'ÁGUA SIMULADOS E OBSERVADOS NO EXUTÓRIO DA SUB-BACIA 30 PARA O EVENTO 2 DO AJUSTE MANUAL.	98
FIGURA 27 - VALORES DOS NÍVEIS D'ÁGUA SIMULADOS E OBSERVADOS NO EXUTÓRIO DA SUB-BACIA 24 PARA O EVENTO 3 DO AJUSTE MANUAL.	98
FIGURA 28 - VALORES DOS NÍVEIS D'ÁGUA SIMULADOS E OBSERVADOS NO EXUTÓRIO DA SUB-BACIA 30 PARA O EVENTO 3 DO AJUSTE MANUAL.	99
FIGURA 29 - VALORES DOS NÍVEIS D'ÁGUA SIMULADOS E OBSERVADOS NO EXUTÓRIO DA SUB-BACIA 24 PARA O EVENTO 4 DO AJUSTE MANUAL.	99
FIGURA 30 - VALORES DOS NÍVEIS D'ÁGUA SIMULADOS E OBSERVADOS NO EXUTÓRIO DA SUB-BACIA 30 PARA O EVENTO 4 DO AJUSTE MANUAL.	100
FIGURA 31 - RELAÇÃO COTA-VAZÃO PARA DIFERENTES CONDIÇÕES DE CONTORNO PARA AS ESTAÇÕES 24 E 35.	101
FIGURA 32 - CURVAS-CHAVE PARA ESTAÇÃO 24 GERADAS PELO HEC-RAS E PELO SWMM, ONDE N É O COEFICIENTE DE RUGOSIDADE DE MANNING.	103
FIGURA 33 - FLUXOGRAMA DOS MACROPROCESSOS DO MONITORAMENTO METEOROLÓGICO PARA EMISSÃO DE ALERTAS.	106
FIGURA 34 - RELAÇÃO DO NÚMERO DE EVENTOS SELECIONADOS POR DURAÇÃO.	110
FIGURA 35 - RELAÇÃO DA INTENSIDADE MÉDIA POR DURAÇÃO PARA OS EVENTOS SELECIONADOS.	110
FIGURA 36 - HISTOGRAMA DA DURAÇÃO DOS EVENTOS SELECIONADOS.	111
FIGURA 37 - DISTRIBUIÇÃO DO TOTAL PRECIPITADO POR DURAÇÃO.	112
FIGURA 38 - RELAÇÃO DA PRECIPITAÇÃO COM A DURAÇÃO PARA 10.000 ANOS DE PERÍODO DE RETORNO PARA O POSTO MINA ÁGUAS CLARAS.	113
FIGURA 39 - DIVERSOS FORMATOS DA DISTRIBUIÇÃO BETA CONFORME DIFERENTES PARÂMETROS.	114
FIGURA 40 - HISTOGRAMA DA DURAÇÃO PARA OS EVENTOS QUE GERARAM ALERTA AMARELO.	116
FIGURA 41 - HISTOGRAMA DA DURAÇÃO PARA OS EVENTOS QUE GERARAM ALERTA LARANJA.	116

FIGURA 42 - HISTOGRAMA DA DURAÇÃO PARA OS EVENTOS QUE GERARAM ALERTA VERMELHO.	116
FIGURA 43 - RELAÇÃO DA PRECIPITAÇÃO ACUMULADA E A DURAÇÃO PARA OS EVENTOS DOS TRÊS ALERTAS.	117
FIGURA 44 - RELAÇÃO DA INTENSIDADE MÉDIA POR DURAÇÃO PARA OS EVENTOS DOS TRÊS ALERTAS.	117
FIGURA 45 - HISTOGRAMA DA INTENSIDADE MÉDIA DOS EVENTOS QUE GERARAM ALERTA AMARELO.	118
FIGURA 46 - HISTOGRAMA DA INTENSIDADE MÉDIA DOS EVENTOS QUE GERARAM ALERTA LARANJA.	118
FIGURA 47 - HISTOGRAMA DA INTENSIDADE MÉDIA DOS EVENTOS QUE GERARAM ALERTA VERMELHO.	118
FIGURA 48 - HISTOGRAMA DO PARÂMETRO ALFA PARA OS EVENTOS QUE GERARAM ALERTA AMARELO.	119
FIGURA 49- HISTOGRAMA DO PARÂMETRO ALFA PARA OS EVENTOS QUE GERARAM ALERTA LARANJA.	119
FIGURA 50- HISTOGRAMA DO PARÂMETRO ALFA PARA OS EVENTOS QUE GERARAM ALERTA VERMELHO.	120
FIGURA 51 - HISTOGRAMA DO PARÂMETRO BETA PARA OS EVENTOS QUE GERARAM ALERTA AMARELO.	120
FIGURA 52 - HISTOGRAMA DO PARÂMETRO BETA PARA OS EVENTOS QUE GERARAM ALERTA LARANJA.	120
FIGURA 53 - HISTOGRAMA DO PARÂMETRO BETA PARA OS EVENTOS QUE GERARAM ALERTA VERMELHO.	121
FIGURA 54 - PROBABILIDADE DE OCORRÊNCIA DE ALERTA AMARELO PARA EVENTOS DE ATÉ 1 HORA.	121
FIGURA 55 - PROBABILIDADE DE OCORRÊNCIA DO ALERTA AMARELO.	122
FIGURA 56 - PROBABILIDADE DE OCORRÊNCIA DO ALERTA LARANJA.	122
FIGURA 57 - PROBABILIDADE DE OCORRÊNCIA DO ALERTA VERMELHO.	123
FIGURA 58 - PROBABILIDADE DE ALERTA AMARELO ASSOCIADO AO PERÍODO DE RETORNO.	123
FIGURA 59 - PROBABILIDADE DE ALERTA LARANJA ASSOCIADO AO PERÍODO DE RETORNO.	124
FIGURA 60 - PROBABILIDADE DE ALERTA VERMELHO ASSOCIADO AO PERÍODO DE RETORNO.	124
FIGURA 61 - USO E OCUPAÇÃO DO SOLO PARA A SUB-BACIA 24.	143
FIGURA 62 - USO E OCUPAÇÃO DO SOLO PARA A SUB-BACIA 30.	143
FIGURA 63 - USO E OCUPAÇÃO DO SOLO PARA A SUB-BACIA 32.	143
FIGURA 64 - USO E OCUPAÇÃO DO SOLO PARA A SUB-BACIA 33.	144

FIGURA 65 - USO E OCUPAÇÃO DO SOLO PARA A SUB-BACIA 35.	144
FIGURA 66 - HISTOGRAMAS DA PRECIPITAÇÃO ACUMULADA POR DURAÇÃO PARA OS EVENTOS COM ALERTA AMARELO.	146
FIGURA 67 - HISTOGRAMAS DA PRECIPITAÇÃO ACUMULADA POR DURAÇÃO PARA OS EVENTOS COM ALERTA LARANJA.	147
FIGURA 68 - HISTOGRAMAS DA PRECIPITAÇÃO ACUMULADA POR DURAÇÃO PARA OS EVENTOS COM ALERTA VERMELHO.	148
FIGURA 69 - PROBABILIDADE DE OCORRÊNCIA DE ALERTA AMARELO PARA EVENTOS DE 1 A 2 HORAS.	150
FIGURA 70 - PROBABILIDADE DE OCORRÊNCIA DE ALERTA AMARELO PARA EVENTOS DE 2 A 3 HORAS.	150
FIGURA 71 - PROBABILIDADE DE OCORRÊNCIA DE ALERTA AMARELO PARA EVENTOS DE 3 A 4 HORAS.	151
FIGURA 72 - PROBABILIDADE DE OCORRÊNCIA DE ALERTA AMARELO PARA EVENTOS DE 4 A 5 HORAS.	151
FIGURA 73 - PROBABILIDADE DE OCORRÊNCIA DE ALERTA AMARELO PARA EVENTOS DE 5 A 6 HORAS.	152
FIGURA 74 - PROBABILIDADE DE OCORRÊNCIA DE ALERTA LARANJA PARA EVENTOS DE ATÉ 1 HORA.	154
FIGURA 75 - PROBABILIDADE DE OCORRÊNCIA DE ALERTA LARANJA PARA EVENTOS DE 1 A 2 HORAS.	154
FIGURA 76 - PROBABILIDADE DE OCORRÊNCIA DE ALERTA LARANJA PARA EVENTOS DE 2 A 3 HORAS.	155
FIGURA 77 - PROBABILIDADE DE OCORRÊNCIA DE ALERTA LARANJA PARA EVENTOS DE 3 A 4 HORAS.	155
FIGURA 78 - PROBABILIDADE DE OCORRÊNCIA DE ALERTA LARANJA PARA EVENTOS DE 4 A 5 HORAS.	156
FIGURA 79 - PROBABILIDADE DE OCORRÊNCIA DE ALERTA LARANJA PARA EVENTOS DE 5 A 6 HORAS.	156
FIGURA 80 - PROBABILIDADE DE OCORRÊNCIA DE ALERTA VERMELHO PARA EVENTOS DE ATÉ 1 HORA.	158
FIGURA 81 - PROBABILIDADE DE OCORRÊNCIA DE ALERTA VERMELHO PARA EVENTOS DE 1 A 2 HORAS.	158
FIGURA 82 - PROBABILIDADE DE OCORRÊNCIA DE ALERTA VERMELHO PARA EVENTOS DE 2 A 3 HORAS.	159

FIGURA 83 - PROBABILIDADE DE OCORRÊNCIA DE ALERTA VERMELHO PARA EVENTOS DE 3 A 4 HORAS.	159
FIGURA 84 - PROBABILIDADE DE OCORRÊNCIA DE ALERTA VERMELHO PARA EVENTOS DE 4 A 5 HORAS.	160
FIGURA 85 - PROBABILIDADE DE OCORRÊNCIA DE ALERTA VERMELHO PARA EVENTOS DE 5 A 6 HORAS.	160

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - VALORES TÍPICOS DE ANTECEDÊNCIA E RESOLUÇÃO PARA OS DIFERENTES MODELOS DE PREVISÃO METEOROLÓGICA.	37
TABELA 2 – VALORES DE ANTECEDÊNCIA DO SACE (CPRM).	38
TABELA 3 - TRABALHOS DE MODELAGEM DA ÁREA URBANA COM O SWMM E SUAS PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS.	51
TABELA 4 - DIMENSÕES E FORMATO DAS SEÇÕES NAS ESTAÇÕES DE INTERESSE.	64
TABELA 5 - EVENTOS SEM ALERTA SELECIONADOS E SUAS CARACTERÍSTICAS.	68
TABELA 6 - EVENTOS COM ALERTA SELECIONADOS E SUAS CARACTERÍSTICAS.	69
TABELA 7 - VALORES DO COEFICIENTE DE MANNING PARA CONCRETO.	83
TABELA 8 – VALORES DOS PARÂMETROS MANTIDOS DA CALIBRAÇÃO PRELIMINAR.	77
TABELA 9 - EVENTOS SELECIONADOS PARA CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DAS SUB-BACIAS.	79
TABELA 10 – CARACTERIZAÇÃO DAS ESTRATÉGIAS DE CALIBRAÇÃO ADOTADAS.	79
TABELA 11 - DISTRIBUIÇÃO DOS PESOS SEGUNDO OS NÍVEIS DE ÁGUA.	80
TABELA 12 - DESCRIÇÃO DOS INTERVALOS UTILIZADOS.	81
TABELA 13 - RESULTADOS DOS NÍVEIS MÁXIMOS E COEFICIENTE DE NASH-SUTCLIFFE DAS TENTATIVAS DE CALIBRAÇÃO POR EVENTO PARA SUB-BACIA 24.	89
TABELA 14 - RESULTADOS DOS NÍVEIS MÁXIMOS E COEFICIENTE DE NASH-SUTCLIFFE DA VALIDAÇÃO POR EVENTO PARA SUB-BACIA 24.	92
TABELA 15 - RESULTADOS DOS NÍVEIS MÁXIMOS E COEFICIENTE DE NASH-SUTCLIFFE DO AJUSTE MANUAL POR EVENTO PARA SUB-BACIA 24 E 30.	96
TABELA 16 - CARACTERÍSTICAS E NÚMERO DE EVENTOS SELECIONADOS POR DURAÇÃO.	108
TABELA 17 - RESUMO DAS CARACTERÍSTICAS ESTATÍSTICAS DA DURAÇÃO, TOTAL ACUMULADO, VARIÂNCIA E TEMPO DE PICO DOS EVENTOS SELECIONADOS.	110
TABELA 18 - VALORES DOS LIMITES SUPERIORES DA DISTRIBUIÇÃO UNIFORME PARA AS DIFERENTES DURAÇÕES.	113

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- AG - Algoritmos Genéticos.
- AGMB - Australian Government Bureau of Meteorology.
- ARIMA- Modelo Autoregressivo de Médias Móveis
- ARMAX - Modelo Autoregressivo de Médias Móveis com Variáveis Exógenas.
- BHTrans - Empresa de Transportes e Trânsito de Belo Horizonte.
- CEMIG - Companhia Mineira de Energia Elétrica.
- CEOPS - Centro de Operações do Sistema de Alerta.
- CEPED - Centro Universitário de Estudos e Pesquisas sobre Desastres.
- CMAR - Centro de Monitoramento e Alerta de Risco.
- CN - Curve Number.
- CNS - Coeficiente de Nash-Sutcliffe.
- Cobrade - Classificação e Codificação Brasileira de Desastres.
- Cobrape - Companhia Brasileira de Projetos e Empreendimentos.
- COMDEC - Coordenadoria Municipal de Defesa Civil.
- COP - Centro de Operações da Prefeitura.
- Copasa - Companhia de Saneamento de Minas Gerais.
- COSMO - Consortium for Small-scale Modelling.
- CPRM -Serviço Geológico Nacional.
- CPTEC - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos.
- DAO - Data Assimilation Office.
- DDS - Dynamically Dimensioned Search.
- DKKV - Deutsches Komitee Katastrophenvorsorge e.V.
- Drenurbs - Programa de Recuperação Ambiental de Belo Horizonte.
- DWD - Deutscher Wetterdienst.
- EPIC - European Precipitation Index based on Climatology.
- FCTH - Fundação Centro Tecnológico de Hidráulica.
- FURB - Fundação Universidade Regional de Blumenau.
- FWRBP - Flood Warning Response and Benefit Pathways.
- GEAR - Grupo Executivo de Áreas de Risco.
- GEFS - Global Ensemble Forecasting System.

GEP - Gene-Expression Programming.
GGRN - Gerência de Gestão de Riscos Naturais.
GPRS - General Packet Radio Services.
GRP - Génie Rural de Prévision de Crue.
HEC-HMS - Hydrologic Engineering Center - Hydrologic Modeling System.
HEC-RAS - Hydrologic Engineering Center - River Analysis Systems.
ICMOD - International Center for Integrated Mountain Development.
IDF - Intensidade-Duração-Frequência.
IGAM - Instituto Mineiro de Gestão das Águas.
INMET - Instituto Nacional de Meteorologia.
INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.
LEPS - Limited-Area Ensemble Prediction System.
MCG - Modelos Atmosféricos de Circulação Global.
MCR - Modelos Atmosféricos de Circulação Regional.
MDT - Modelo Digital de Terreno.
MLP - Multilayer Perceptron.
MRF - Medium Range Forecast.
MT - Model Tree
NA - Nível d'Água.
NACs - Núcleos de Alerta de Chuva.
NCEP - National Center for Environmental Prediction.
NRCS - Natural Resources Conservation Service.
NWP - Numerical Weather Prediction.
PDDrU - Plano Diretor de Drenagem Urbana.
PFFGS - Probabilistic Flash Flood Guidance System.
PMBH - Prefeitura Municipal de Belo Horizonte.
PMSP- Prefeitura Municipal de São Paulo.
PSAS - Physical-space Statistical Analysis System.
PUC-MG - Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais.
RLM - Regressão Linear Múltipla.
SACE - Sistema de Alerta de Eventos Críticos.
SAD - South American Datum.

SAISP - Sistema de Alerta a Inundação do Estado de São Paulo.
SAMU - Serviço de Atendimento Móvel de Urgência.
SCE-UA - Shuffled Complex Evolution da Universidade do Arizona
SCM - Stormwater Control Measure.
SCS - Serviço de Conservação do Solo.
SIG - Sistema de Informação Geográfica.
SIG-Drenagem - Sistema de Informações Geográficas para drenagem urbana.
SIMDEC - Sistema Municipal de Defesa Civil.
SIMGE - Sistema Mineiro de Meteorologia.
SISMONPAN - Sistema de Monitoramento do Pantanal.
SUDECAP - Superintendência de Desenvolvimento da Capital.
SWAT - Soil and Water Assessment Tool.
SWMM - Storm Water Management Model.
TR - Tempo de Retorno.
Urbel - Companhia Urbanizadora e de Habitação de Belo Horizonte.
USACE - U. S. Army Corps of Engineers.
USEPA - United States Environmental Protection Agency.
VPMD - Variable Parameter Muskingum Discharge.
VPMS - Variable Parameter Muskingum Stage.
WMO - World Meteorological Organization.
WRF - The Weather Research and Forecasting.

1. INTRODUÇÃO

As inundações urbanas ocorrem quando as águas saem do seu leito de escoamento devido à falta de capacidade de transporte dos sistemas de drenagem e ocupam os locais utilizados pela população. Esses eventos têm seus efeitos ampliados pelo processo de urbanização devido à impermeabilização do solo e canalização dos rios o que aumenta o volume de água e acelera o escoamento sobrecarregando os canais existentes (Tucci, 2003).

Em Belo Horizonte, o processo de urbanização teve um caráter higienista, baseado na canalização e rápido escoamento das águas, onde o traçado planejado para as ruas e avenidas desconsiderava os cursos d'água existentes. A crescente urbanização, somada às canalizações e às altas declividades da capital mineira contribuem para a evolução desses eventos ao longo do processo de ocupação. No início da construção da cidade, quando as obras de canalização e alargamento do ribeirão Arrudas ainda estavam começando e apenas 10% do seu trajeto encontrava-se canalizado, mortes causadas pelas inundações à jusante dos trechos em canal já eram comuns nos períodos chuvosos (Borsagli, 2016).

A bacia do ribeirão Arrudas é uma das principais do município de Belo Horizonte. Localizada na porção sul da cidade, é uma bacia densamente urbanizada e que possui altas declividades principalmente nas regiões próximas a Serra do Curral, limite natural ao sul. Os registros de inundações nessa região são antigos, Nunes (2016) lista os eventos associados às inundações no município de Belo Horizonte desde 1979 até 2014 e é possível observar a alta frequência com que a bacia do ribeirão Arrudas aparece nesses registros. Cavalcanti (2011) faz uma análise temporal e espacial das inundações na bacia do ribeirão Arrudas desde o primeiro registro publicado em 1932 até o ano de 2005 relacionando o aumento do número de eventos com o aumento da mancha urbana, do processo de impermeabilização e de canalização.

Apesar dos diversos registros antigos desses eventos, somente a partir da década de 1990, medidas alternativas que buscavam antecipar os efeitos negativos das chuvas extremas foram adotadas (Paolucci, 2012). O sistema de previsão e alerta foi um dos produtos do Plano Diretor de Drenagem Urbana que visava alertar à população afetada a tempo de medidas serem tomadas, buscando evitar perdas humanas e reduzir danos materiais. Sua operação teve início em setembro de 2011 juntamente com o sistema de monitoramento composto de estações fluviométricas, pluviométricas e meteorológicas.

Dado que a confiabilidade do sistema de previsão e alerta perante a população é de extrema importância para sua eficácia, essa pesquisa apresenta diferentes frentes cujos objetivos são garantir essa confiabilidade através da melhoria e entendimento das diversas etapas envolvidas na emissão do alerta. O foco principal do trabalho é apresentar uma metodologia que permita relacionar as características das chuvas com a frequência de alerta gerado de modo que essa relação seja mais uma ferramenta para embasar a decisão do gestor frente a uma determinada previsão de chuva. Para isso, utilizaram-se chuvas sintéticas com características semelhantes aos eventos registrados e um modelo hidrológico e hidráulico para simulação do nível d'água máximo atingido para cada uma das chuvas geradas. Sendo assim, a adequada relação entre os alertas, dado pelo nível d'água simulado, e as características da chuva é função da modelagem adotada.

Outra maneira de garantir a confiabilidade do sistema de previsão é assegurar a qualidade dos dados utilizados. Como o monitoramento hidrológico realizado na maioria das cidades brasileiras é apenas de nível d'água, devido à dificuldade na medição de vazão e velocidade, as informações referentes às vazões que alimentam os modelos hidrológicos e hidráulicos são obtidas através de uma relação empírica entre nível d'água e vazão chamada curva-chave. Com isso, uma das frentes desse trabalho se justifica como uma tentativa de avaliar os valores de vazão obtidos de curvas-chave sintéticas, ou seja, elaboradas apenas com informações da geometria da calha e do coeficiente de rugosidade de Manning obtido a partir da literatura.

O último ponto de análise dessa pesquisa relaciona-se à antecedência do alerta que é de grande importância no sistema uma vez que alertas gerados com grandes antecedências possuem uma menor confiabilidade inerente aos modelos de previsão meteorológicas, mas por outro lado, alertas emitidos com pouca antecedência não permitem a aplicação, a nível operacional, do plano de contingência nem da mobilização de pessoal. Dessa forma, o último objetivo da pesquisa é verificar valores de antecedência que possibilitem a mobilização por parte dos órgãos e pessoas responsáveis pela execução das ações previstas no plano de contingência. Ou seja, definir um tempo de antecedência ideal do ponto de vista operacional dado à forma como o sistema é estruturado na região de estudo.

Visando facilitar o entendimento do trabalho desenvolvido, a dissertação foi dividida em 6 capítulos, incluindo o presente tópico e mais 5 apêndices ao final do documento que completam as informações apresentadas ao longo do texto. No capítulo 2, Objetivos, são apresentados os objetivos gerais e específicos que direcionaram a pesquisa.

No capítulo 3, Revisão de Literatura, são apresentados os principais conceitos relacionados ao tema. O capítulo aborda primeiramente aspectos mais amplos como as inundações e medidas de gestão, detalhando o sistema de previsão e alerta como uma medida importante em centros urbanos. Em seguida, são apresentados importantes componentes e auxiliares do sistema como: a previsão meteorológica, a antecedência do alerta, o monitoramento hidrológico e as ferramentas de modelagem hidrológica.

No capítulo 4, Materiais e Métodos, são apresentadas a área de estudo, as ferramentas utilizadas para alcançar os objetivos e as etapas metodológicas propostas para o trabalho. Um fluxograma sintetiza as etapas desenvolvidas mostrando sua ordem e relações para facilitar o entendimento do desenvolvimento do trabalho. No capítulo 5, Resultados, são apresentados e discutidos os resultados obtidos na pesquisa respeitando a ordem das etapas desenvolvidas.

No capítulo 6, Conclusão e Recomendações, uma síntese das principais discussões é apresentada em conjunto com as conclusões inferidas a partir dos resultados obtidos. Além disso, são feitas sugestões para futuros trabalhos relacionados ao tema. Na sequência a esse capítulo, são listadas as referências bibliográficas utilizadas para embasar a pesquisa e os apêndices que complementam informações apresentadas ao longo do texto.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo Geral

O objetivo geral desse trabalho é desenvolver uma metodologia para criação de ferramenta de auxílio à emissão de alerta de inundações urbanas associando as características das precipitações à probabilidade de ocorrência de alerta, tendo como estudo de caso a bacia do ribeirão Arrudas – MG.

2.2. Objetivos Específicos

Os objetivos específicos desta pesquisa são:

- a. Ajustar modelo hidrológico e hidráulico pré-elaborado para calibração e validação, com base nos níveis d'água de eventos de chuva.
- b. Elaborar curvas-chave para as estações fluviométricas 24, 30, 32, 33 e 35 do ribeirão Arrudas.
- c. Avaliar as curvas-chave sintéticas em comparação às curvas-chave geradas pelo modelo calibrado no *Storm Water Management Model* (SWMM).
- d. Verificar a antecedência mínima do alerta, do ponto de vista operacional, considerando as características locais e o plano de contingência existente.

3. REVISÃO DE LITERATURA

De modo a construir o raciocínio necessário à elaboração da pesquisa foram abordados nesse capítulo os conceitos relacionados às inundações e risco. Em seguida foram explanadas as medidas existentes de gestão de inundações com uma atenção especial aos sistemas de previsão e alerta, foco do trabalho. Na sequência foram apresentados pontos fundamentais do sistema que são os modelos de previsão meteorológica que servem de suporte à previsão dos eventos e o tempo de antecedência com que o alerta é dado, que é fundamental para garantir que as ações adequadas sejam implantadas. Por fim, foram abordadas as diversas formas de monitoramento das variáveis hidrológicas que garantem a base de dados necessária para o acompanhamento e análise desses eventos e os modelos hidrológicos que servem como uma ferramenta de auxílio no estudo e simulação de situações de interesse.

3.1. Inundações

Os diversos termos relacionados ao fenômeno das inundações, que muitas vezes são usados erroneamente, surgiram em virtude de traduções equivocadas e adaptações malfeitas de termos de língua inglesa e espanhola. As palavras cheia e enchente têm como origem o verbo encher que significa ocupar, tornar cheio ou repleto, ou seja, indica a elevação das águas do rio porém sem transbordamento. A partir do momento em que ocorre o transbordamento, denomina-se inundação (Goerl e Kobiyama, 2005). Esse conceito coincide com o dado pela Classificação e Codificação Brasileira de Desastres (COBRADE), que afirma que inundação é a submersão de áreas fora dos limites normais de um curso de água em zonas que normalmente não se encontram submersas, conforme apresenta o Centro Universitário de Estudos e Pesquisas sobre Desastres (CEPED, 2013).

Existem diversas categorias de inundação na literatura. Para Kron (2005), os três principais tipos são: *storm surges* ou *coastal flood* (Eleutério, 2012), *river flood* (inundações de rios) e *flash flood* (inundações bruscas). O primeiro grupo engloba os eventos que ocorrem ao longo da costa marítima e de grandes lagos devido à condições climáticas extremas, e segundo o autor, possui o maior potencial de danos dentre os tipos de inundações.

As inundações de rios ocorrem quando o escoamento superficial resultante causa elevação e transbordamento do rio sobre a planície de inundação devido às fortes e/ou intensas chuvas. Na literatura é possível encontrar esse conceito de *river flood* englobado ao das inundações graduais, conforme apresentam Goerl e Kobiyama (2005). Em seu artigo, os autores

descrevem alguns conceitos utilizados para definir as inundações graduais nos quais estão inclusas as inundações de rios.

Por fim, as inundações bruscas são as que ocorrem de maneira repentina devido às chuvas intensas em pequenas áreas, o solo não atinge seu estado saturado, porém a taxa de infiltração é bem menor que a precipitação (Goerl e Kobiyama, 2005; Kron, 2005). Eleutério (2012) classifica as inundações bruscas em duas categorias, as que ocorrem em rios torrenciais, onde a água excede a capacidade do rio; e as que ocorrem em bacias com áreas urbanas, onde a redução da infiltração do solo contribui para rápida saturação dos sistemas de drenagem.

As inundações causam efeitos diretos e indiretos nas regiões atingidas e as medidas de gestão buscam reduzir esses danos. Isso é feito através da redução do risco, entendendo o perigo e/ou reduzindo a vulnerabilidade dos bens e pessoas expostas (Eleutério, 2012). Para isso é necessário compreender os significados desses termos que muitas vezes se confundem, porém apresentam conceitos diferentes. *Flood hazard* ou o perigo de inundação é o fenômeno propriamente dito que ocorre em determinadas épocas e regiões causando consequências. Estas podem ser tanto positivas, como a fertilização de uma planície de inundação numa área de rural ou a manutenção da biodiversidade, como negativas. Enquanto o risco é a probabilidade de perda devido à presença de um perigo (Kobiyama *et al.*, 2006; Eleutério, 2012).

Eleutério (2012) caracteriza o risco como um conceito que envolve o fenômeno da inundação com a vulnerabilidade do sistema atingido (Figura 1), onde a vulnerabilidade é dada pelos bens, seres humanos e todo tipo de valores, incluindo ambiental, expostos ao risco. Assim o risco se apresenta como o conjunto das consequências da inundação no sistema e a sua probabilidade de ocorrência. A determinação do risco em termos econômicos é dada por uma curva que relaciona a frequência de ocorrência do ponto de vista hidrológico com a estimativa dos danos associados aos diferentes períodos de retorno.

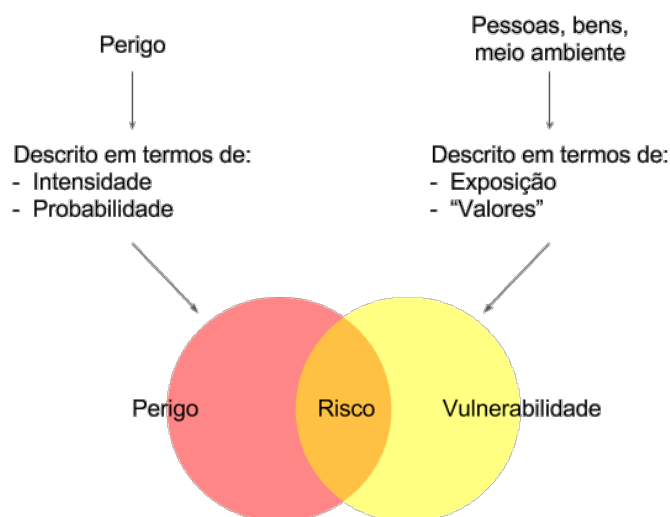


Figura 1 - Risco como resultado da interação entre perigo e vulnerabilidade.

Fonte: Adaptado de *Deutsches Komitee Katastrophenvorsorge e.V.* (DKKV, 2004).

3.2. Medidas de Gestão de Inundações

Ainda que chuvas fortes e inundações sejam fenômenos naturais, os desastres são fenômenos sociais vinculados aos modelos de desenvolvimento social e econômico vigentes. Desse modo, a gestão de desastres requer uma abordagem interdisciplinar e intersetorial para a formulação de políticas de prevenção, mitigação e melhor resposta em ocorrências futuras (Freitas *et al.*, 2014; Minervino e Duarte, 2016).

Para que um plano de emergência obtenha êxito, é essencial conhecer o local de implantação e considerar fatores físicos, sociais, econômicos e ambientais. As diferentes medidas de proteção existentes devem ser adotadas segundo a urgência na necessidade de proteção e os recursos tecnológicos e financeiros disponíveis. Dessa forma, a gestão se apresenta como um processo circular que varia conforme novas demandas e avanços tecnológicos surgem (Plate, 2002; Sene, 2013).

Ainda segundo esses autores, a gestão do risco de inundações em um sistema existente representa um conjunto de ações que busca o controle da inundação no sentido de estar preparado e minimizar seus impactos. Essas ações, que compõem o processo de gestão, são separadas em quatro grupos conforme apresenta a Figura 2.

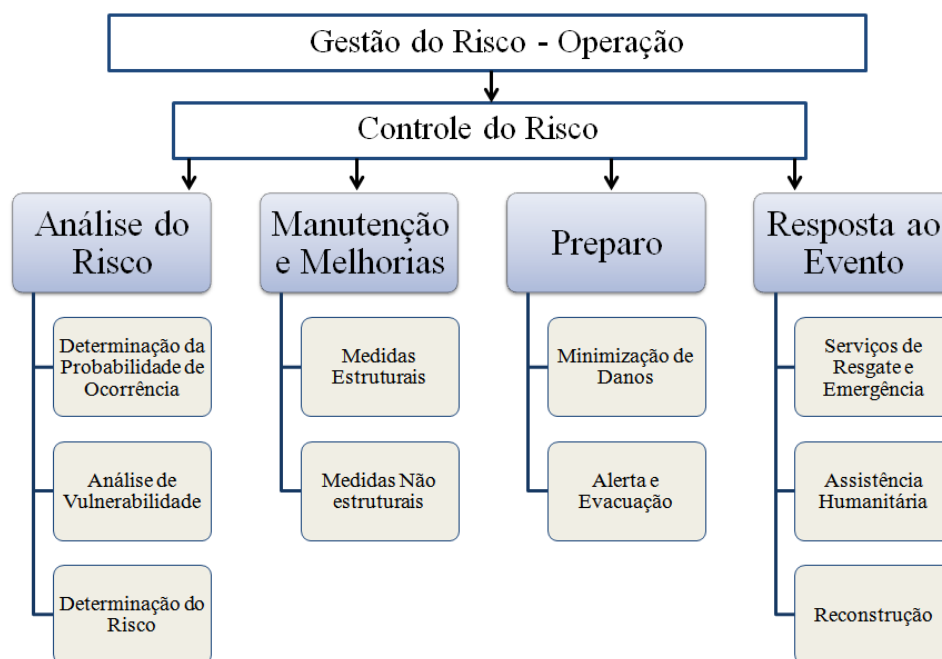


Figura 2 – Etapas da operação da gestão do risco.
 Fonte: Adaptado de Eikenberg (1998) *apud* Plate (2002).

A análise do risco compreende a determinação da magnitude e frequência do fenômeno natural e vulnerabilidade dos elementos afetados. A combinação desses dois aspectos representa o risco de determinada região. A construção de mapas de risco permite a identificação de pontos vulneráveis no sistema de proteção auxiliando na tomada de decisões relativas à manutenção e melhoria do sistema vigente, que corresponde ao segundo grupo de ações e estão relacionadas às medidas estruturais e não estruturais de gestão. A terceira parte do processo corresponde à preparação para enfrentar um evento de inundação cujo objetivo é reduzir o risco residual através dos sistemas de alerta (Plate, 2002).

Por fim, a última etapa compreende as ações que devem ser tomadas durante e após o evento fornecendo suporte às vítimas e promovendo a reconstrução do local afetado (Plate, 2002). Sene (2013) destaca que a situação pós-desastre deve englobar também as lições aprendidas, atualização do cenário e análise de impactos socioeconômicos e ambientais. A seguir serão conceituadas e detalhadas as medidas estruturais e não estruturais existentes na gestão do risco com uma atenção maior sobre as não estruturais devido ao foco do trabalho.

3.2.1. Medidas Estruturais

As medidas estruturais são obras de engenharia implementadas para reduzir o risco das enchentes, alterando as características das inundações, como nível máximo, tempo de subida, duração e extensão das áreas afetadas. Sua implantação normalmente está associada à custos

elevados e pode criar uma falsa sensação de segurança, o que permite a ocupação de áreas inundáveis, aumentando os danos potenciais futuros (Tucci, 1997; Travassos, 2012).

Essas medidas podem se subdividir em estruturais intensivas que são implantadas nos locais onde ocorrem as inundações, por exemplo, retificação de cursos d'água e construção de diques, e medidas estruturais extensivas que abrangem toda a bacia, como medidas de conservação do solo, reflorestamento, restrições à impermeabilização, construção de parques e áreas verdes e implantação de técnicas compensatórias de drenagem (Lima, 2003; Machado, 2005; Baptista *et al.*, 2011).

Righetto (2009) e Baptista *et al.* (2011) classificam as técnicas compensatórias estruturais como bacias (detenção, retenção e infiltração), obras lineares (trincheiras, valas e valetas, revestimentos permeáveis e pavimentos reservatórios) e pontuais (poços de infiltração, telhados e técnicas adaptadas à parcela). A aplicação dessas técnicas requer uma análise das suas características físicas e implicações sobre as áreas adjacentes para garantir a viabilidade de implantação. Além disso, deve-se conhecer as restrições ao uso inerentes à cada técnica assim como suas vocações e possibilidades.

3.2.2. Medidas Não Estruturais

As medidas não estruturais buscam minimizar os impactos negativos da inundação, melhorando a convivência da população com o evento, através da implantação de normas, regulamentos e programas que visam, por exemplo, o disciplinamento do uso e ocupação do solo e a conscientização da população para a manutenção dos dispositivos de drenagem. São exemplos dessas medidas: os sistemas de previsão e alerta, planos de evacuação e contingência, regulamentação do uso do solo, instalação de vedação temporária ou permanente, elevação das estruturas existentes e os seguros de proteção contra inundações (Lima, 2003; Machado, 2005; Canholi, 2015). Além das citadas, Tucci (1997) apresenta como principais medidas não estruturais: incentivos fiscais para uso prudente da área de inundação e política de desenvolvimento adequada ao município.

A elaboração de mapas de inundação que delimitem as áreas sujeitas a esses fenômenos e os respectivos riscos associados permite calcular os seguros enchentes além de possibilitar o estabelecimento do zoneamento, que consiste em um conjunto de regras de ocupação das áreas de risco visando a minimização das perdas humanas e materiais. Além disso, a delimitação das áreas inundáveis auxilia na regulamentação para construção de proteções

individuais como instalação de comportas e portas-estanques. As ações que regulamentam o uso e ocupação do solo buscam prevenir a ocorrência de fatores que ampliem os deflúvios, principalmente a impermeabilização intensa e a ocupação de áreas ribeirinhas (Tucci, 1997; Canholi, 2015).

Canholi (2015) apresenta também a educação ambiental como uma importante medida voltada ao controle da poluição difusa, erosão e lixo cujo objetivo é restabelecer a harmonia entre a sociedade e os corpos hídricos. O autor ressalta que o planejamento eficiente deve prever uma combinação adequada de recursos humanos e materiais, além do balanço harmonioso entre as medidas estruturais e não estruturais. A implantação de medidas não estruturais ajudam a reduzir os danos estimados a curto prazo com menores investimentos financeiros e maiores horizontes de aplicação.

Os planos de contingência contra desastres apresentam um conjunto de atividades destinadas a reduzir as perdas materiais e humanas frente a situações de risco de deslizamentos de terra e inundações. É um plano preventivo com base na tomada de ações apoiado no acompanhamento de parâmetros como previsão hidrometeorológica e observações de campo. Deve ser elaborado antes da ocorrência de desastres de modo a nortear os procedimentos de prevenção e preparação que os responsáveis deverão tomar no momento de crise. O plano de contingência é um instrumento de defesa civil que procura fornecer maior segurança aos moradores de áreas de risco de deslizamentos e inundações (Balbi, 2008; COMDEC, 2012; Chaib *et al.*, 2013).

Esses planos se enquadram nas chamadas medidas não estruturais, no entanto podem incorporar ações de caráter estrutural, como a operação de dispositivos hidráulicos, e ações que busquem a resiliência do espaço, como comportas em residências e adaptação das instalações elétricas e hidráulicas prediais. No plano de contingência de inundações são descritas ações relacionadas à preparação para crise (antes), à gestão da crise (durante) e à recuperação e reparação (depois). Além disso, o plano define procedimentos, lista equipamentos incluindo a localização, lista pessoas chave e seus respectivos telefones e outras informações de contato e indica locais para abrigo e hospitais (Nascimento, 2011).

Chaib *et al.* (2013) realizaram uma comparação entre um conjunto de planos de contingência de cidades brasileiras, incluindo o Plano de Contingência para Desastres Decorrentes das Precipitações Pluviométricas no Município de Belo Horizonte (PMBH, 2011), por meio de critérios propostos que abordam as três fases do gerenciamento de riscos: mitigação, resposta

e recuperação. Os autores concluíram que apesar de atender à maioria dos critérios, o plano de Belo Horizonte de 2011/2012 apresentou falhas principalmente na fase de reconstrução e na fiscalização de novas construções em áreas de risco. Por outro lado, a criação dos Núcleos de Alerta de Chuva (NACs) foi um dos destaques do plano, funcionando como canal de diálogo direto com a população em zona de risco e com a população efetivamente atingida.

3.3. Sistema de Previsão e Alerta

Dentre as medidas não estruturais, os sistemas de alerta são importantes ferramentas de gestão de áreas urbanas consolidadas. Estes são capazes de proporcionar redução nos danos causados pelas inundações, porém diversos fatores influenciam na sua eficácia, como: tempo de antecedência, confiabilidade do alerta e preparo dos envolvidos quanto às ações a serem tomadas (Priest *et al.*, 2011). WMO (2013) ressalta a importância do envolvimento das agências gestoras de água e autoridades locais, além das operadoras dos serviços de transporte, comunicação e emergência.

Nascimento (2011) destaca que os principais objetivos dos sistemas de previsão e alerta são: prover à defesa civil e aos serviços de emergência uma antecedência para evacuação de pessoas e proteção de bens expostos; reduzir os riscos de morte; localizar áreas com probabilidade elevada de ocorrência de inundação e caracterizar esses eventos (profundidade, duração e outras informações relevantes aos serviços de emergência); orientar ações emergenciais como operação de dispositivos de controle de inundações (por exemplo, comportas, canais de desvio, bacias de retenção) e gestão do trânsito para bloqueio e desocupação de vias onde há risco.

Para elaboração de um sistema eficiente é necessário considerar as características hidrológicas da bacia em estudo, a habilidade do modelo em prever os tempos e magnitudes das cheias, a perda potencial de danos e o tempo de antecedência. As etapas do sistema consistem na coleta e análise de dados, modelos de previsão hidrológica e meteorológica, transmissão das informações para os órgãos responsáveis e para a população em tempo hábil, para que estes tomem as medidas necessárias (Figura 3). É necessário assegurar o funcionamento efetivo de seus componentes e também a qualidade dos dados monitorados para garantir a confiabilidade do sistema (Lima, 2003; Machado, 2005).

Segundo Priest *et al.* (2011), estimar o potencial e os benefícios que o sistema de alerta pode proporcionar é importante para verificar a viabilidade de investimentos nessa medida de

proteção. Dessa forma, os autores definiram de maneira abrangente as respostas e benefícios do sistema para gerar um modelo denominado *Flood Warning Response and Benefit Pathways* (FWRBP) que fornece uma avaliação holística dos potenciais benefícios do sistema de alerta de inundações na Europa. Este é aplicado em dois estudos de caso, um em escala nacional e outro local, tendo como foco a estimativa de redução de danos diretos à propriedade. Rogers e Tsirkunov (2010) apresentam os custos e benefícios do sistema de alerta levando em conta os falsos alertas e expondo diversos exemplos de sistemas viáveis em diferentes países.

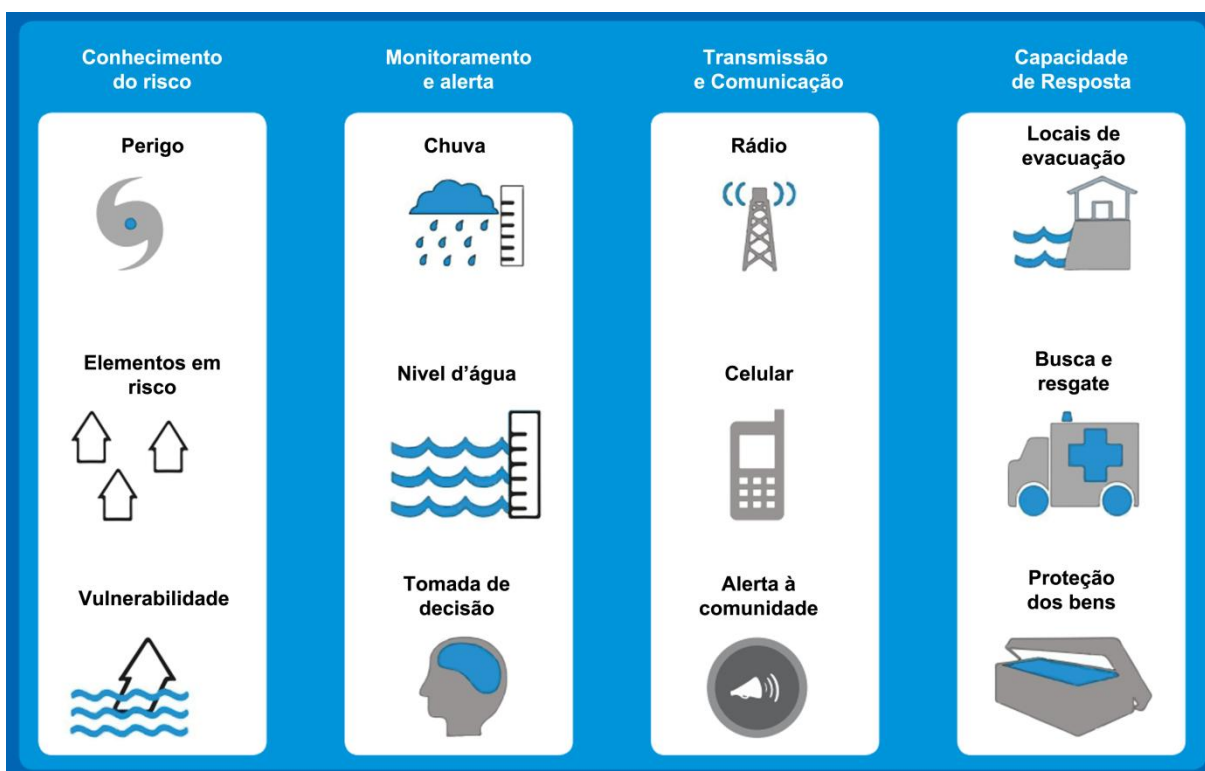


Figura 3 - Componentes básicos de um sistema de previsão e alerta de inundações.
 Fonte: Traduzido de Shrestha *et al.* (2016) elaborado segundo de Neussner (2009).

Visando aprimorar um modelo utilizado operacionalmente há anos na França, Furusho *et al.* (2015) partiram de uma análise pós-evento para realizar um diagnóstico de falhas de previsão para o modelo GRP (*Génie Rural de Prévision de Crue*). Este se baseou primeiro na verificação da qualidade dos dados históricos usados na calibração do modelo e da qualidade dos dados de previsão em tempo real. A segunda verificação baseou-se na análise da calibração do modelo, que apresentava vazões subestimadas quando alimentado com os valores de precipitação medidos no evento. A análise da calibração foi realizada utilizando três conjuntos de dados: todos os dados do período completo disponível, dados de vazões superiores à média e dados de vazões em período ascendente dos hidrogramas. Os resultados

da última estratégia de calibração apresentaram melhor representação da vazão dos picos das cheias.

Na Austrália, o serviço de meteorologia (*Bureau of Meteorology*) é responsável por emitir os avisos e alertas diretamente ao público através da internet e às organizações de serviços de emergência através de canais digitais e telefonemas (Dufty, 2014). Um aviso com informações qualitativas ou quantitativas de inundações menores, moderadas e maiores são fornecidas para áreas que possuem sistema de previsão e alerta especializado. Nesse caso, além da provável classe da inundação, são informadas também a áreas onde se espera o evento, quando e níveis máximos atingidos. Quando os dados não são suficientes para previsões específicas são fornecidas previsões generalizadas sobre inundações esperadas em determinado rio, mas sem precisar local e classe atingida. Esse tipo de previsão normalmente se baseia no conhecimento da resposta histórica da bacia a eventos passados (AGBM, 2017).

A Agência Meteorológica do Japão opera um sistema de previsão por conjunto de intervalo de tempo de 6 horas, um horizonte de 1 semana e resolução horizontal de 60km. Buscando uma previsão de curto prazo (1 ou 2 dias), Yu *et al.* (2016) estudaram a aplicabilidade de um sistema de previsão por conjunto a partir de um modelo numérico de previsão com resolução horizontal de 2km em conjunto com um modelo hidrológico distribuído para antecipação de eventos de inundação. Os autores escolheram como área de estudo a bacia Katsura, onde a barragem Hiyoshi é importante no controle do nível d'água e sua operação é feita segundo previsões. Eles concluíram que o modelo numérico conseguiu prever bem os níveis de água no rio Katsura e a diminuição da resolução espacial melhorou a confiabilidade operacional da barragem.

Na Alemanha, o serviço meteorológico (*Deutscher Wetterdienst - DWD*) é uma autoridade federal no âmbito do Ministério Federal dos Transportes e Infraestrutura. Por lei, a DWD é responsável pelo monitoramento e previsão do tempo, bem como pela detecção de situações climáticas extremas, que se restringe a fenômenos meteorológicos como chuvas intensas, em todo o país e emissão de avisos quando necessário. Conseqüentemente, são necessários serviços adicionais para previsão e alerta de inundações. Assim, são responsabilidades de cada estado a organização da previsão e alerta, bem como a organização da proteção civil e gestão de emergência (Kreibich *et al.*, 2017).

No Brasil, mais especificamente no estado de São Paulo, uma parceria entre a Prefeitura Municipal (PMSP) e a Fundação Centro Tecnológico de Hidráulica (FCTH) mantém

atividades de monitoramento atmosférico de precipitações usando radar e estações de monitoramento, assim como o acompanhamento dos níveis de canais e reservatórios através de redes telemétricas e previsões climáticas. O sistema de alerta da região metropolitana de São Paulo (SAISP) é abastecido de três conjuntos de informação, são eles: a rede telemétrica com 345 estações para monitoramento hidrológico, monitoramento atmosférico com o radar METEOR 600 S e a previsão hidrológica com o modelo SWMM para a transformação chuva-vazão (Barros *et al.* 2016).

Oliveira *et al.* (2014) apresentam a metodologia utilizada na modelagem de seis bacias piloto em São Paulo e seu uso *online* para emissão de alerta em tempo real de pontos de inundações monitorados com o software PCSWMM, que consiste numa combinação do processo de cálculo do SWMM com ferramentas avançadas de geoprocessamento. As séries de precipitação obtidas combinando informações de imagens de radar com dados de estações pluviométricas serviram como dados de entrada no modelo. Os resultados calculados de nível d'água foram bastante similares aos dados observados, com exceção de uma bacia, a Cabuçu de Baixo, devido à falta de dados consistentes por causa de frequente vandalismo.

Ainda para o SAISP, Sosnoski *et al.* (2015) descrevem o processo de calibração e validação do modelo da bacia do Morro S, zona sul do município de São Paulo, e discute a validade do procedimento. A calibração do modelo foi feita a partir de dados históricos, dado que a interface do PCSWMM não permite correções em tempo real dos parâmetros, e a acurácia da calibração foi verificada comparando-se os valores de nível d'água observados com os simulados em tempo real. Os autores concluíram que o procedimento de calibração simplificada se mostrou válido para o estudo de caso e o resultado apresentou potencial na previsão de inundações. Eles ressaltam ainda a importância do monitoramento e manutenção do banco de dados para atualização periódica dos parâmetros do modelo.

Padovani *et al.* (2011) propõem um sistema de monitoramento e alerta para inundações e secas no Pantanal (SISMONPAN) para previsão de nível dos rios, que permite agregar informações espaciais e estimar cenários. O objetivo dos autores é disponibilizar o sistema na internet de modo a facilitar a emissão de alertas por diversos meios de comunicação e tornar os resultados da pesquisa acessíveis à sociedade. Já Reis (2014) utiliza técnicas estatísticas com base em informações do nível d'água de estações a montante para a previsão do nível no município de Itajubá – MG. O sistema desenvolvido possui 5 níveis de alerta: normal, observação, atenção, alerta e alerta máximo; e produz alertas consistentes com 3 e 4 horas de antecedência, que apresentam alta correlação entre a série prevista e a observada. O autor

destaca a vantagem de utilizar modelos matemáticos que exigem menos informações hidrológicas da bacia.

A modelagem matemática também é utilizada por Cordeiro *et al.* (2011) através de um modelo estacionário estocástico do tipo ARMAX para o rio Itajaí-Açu na cidade de Rio do Sul, SC. Para a previsão, os autores utilizam como variáveis de entrada os níveis d'água medidos com uma frequência de 2 horas em dois postos fluviométricos a montante do ponto de interesse e também os dados do posto no local de interesse. O tempo de percurso da onda de cheia entre o posto mais a montante e o de estudo é de 8 horas e do posto mais próximo é de 6 horas. Assim, as simulações realizadas utilizaram antecedência de 6 e 8 horas e os resultados obtidos foram satisfatórios podendo auxiliar na tomada de decisão em eventos relacionados a alertas.

O Sistema de Alerta de Eventos Críticos (SACE), desenvolvido pela Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM), coleta, armazena, analisa e divulga dados de estações automáticas coletados por diversos equipamentos hidrometeorológicos localizados em diferentes bacias do Brasil. Alguns exemplos de bacias monitoradas pelo SACE são a bacia do rio Amazonas, do rio Doce, rio Acre, rio Parnaíba e a bacia do rio Xingu. Os dados são transmitidos via GPRS ou satélite para o servidor da empresa, onde passam por uma análise preliminar composta por filtros de: variações bruscas em pequenos espaços de tempo, permanência de valor ao longo de um período grande, valores máximos e mínimos admitidos e comparação entre sensores. Esses dados monitorados são disponibilizados no site da CPRM, em forma de tabela e gráfico. Além disso, o sistema permite o armazenamento de equações de previsão hidrológica de baixa complexidade, bem como publica os boletins na página e os transmite via e-mail para os interessados (CPRM, 2017).

Righetto (2009) apresenta de modo sucinto três importantes sistemas de alerta voltados a regiões vulneráveis a grandes impactos. O primeiro é o SAISP operado pelo FCTH, o segundo é o Sistema de Meteorologia e Recursos Hídricos de Minas Gerais (SIMGE), localizado na bacia do rio Doce e operado sob a responsabilidade do Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM) e por fim o sistema do rio Itajaí denominado Centro de Operações do Sistema de Alerta (CEOPS) coordenado pela Fundação Universidade Regional de Blumenau (FURB). O autor descreve os dados telemétricos utilizados, a operacionalização e os resultados gerados por esses sistemas.

Segundo Moore *et al.* (2005), os avanços na previsão de inundação são limitados pela dificuldade em estimar a precipitação em determinada região. Apesar dos progressos apresentados no uso de radares meteorológicos combinados com estações pluviométricas e na utilização de satélites e modelos numéricos de previsão, ainda existem problemas significativos que restringem a adoção de modelos distribuídos complexos que visam aumentar a precisão das previsões. Esses autores abordam em seu artigo os principais problemas relacionados à estimativa de chuva, à formulação de modelos matemáticos para os sistemas hídricos e à construção de modelos de previsão e alerta de inundações. A abordagem foca no progresso em pesquisas no Reino Unido que resultou em melhorias operacionais na previsão e alerta de inundações, identificando, também, alguns desafios futuros na área.

A busca pelo aumento na precisão dos modelos de previsão leva ao uso de diferentes técnicas combinadas conforme apresentam Alfieri *et al.* (2011), que utilizam um sistema de alerta probabilístico multiestágio, sem parâmetros, baseado em limites de excedência, para eventos de grandes precipitações. O sistema proposto é composto de duas etapas principais: o contínuo monitoramento da Europa através da *European Precipitation Index based on Climatology* (EPIC) que utiliza as previsões fornecidas pelo Sistema de Previsão por Conjunto de Área Limitada (*Limited-Area Ensemble Prediction System – LEPS*) do modelo COSMO (*Consortium for Small-scale Modelling*) e a previsão que utiliza um sistema chamado *Probabilistic Flash Flood Guidance System* (PFFGS) baseado em estimativas de precipitação em alta resolução fornecidas por medições de redes regionais de radar. Por trabalhar em escala regional, esse segundo estágio usa dados de entrada mais precisos com o objetivo de reduzir as incertezas na estimativa e apresentou bons resultados na detecção de áreas de risco e no monitoramento da evolução dos eventos de chuva.

3.4. Modelos de Previsão Meteorológica

A base para gerar alertas são os sistemas de previsões que permitem identificar e quantificar uma inundação iminente (Plate, 2002). A capacidade de prever inundações evoluiu lentamente durante as décadas de 1970 e 1980, porém avanços tecnológicos recentes permitiram o aprimoramento de metodologias de previsão (Elsafi, 2014). WMO (2011) acrescenta que a consideração dos sistemas de alerta e previsão de inundações como atividades com foco no setor de hidrometeorologia é recente, a Figura 4 apresenta o fluxo de informações em um sistema de previsão hidrometeorológica.

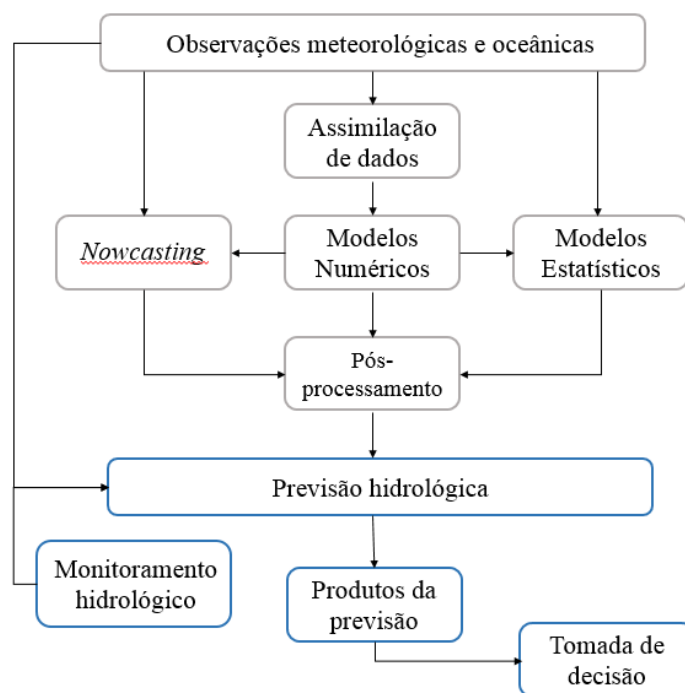


Figura 4 - Fluxo de informações em um sistema típico de previsão hidrometeorológica.
Fonte: Adaptado de Sene (2010)

O conhecimento meteorológico associado ao alerta de inundações engloba duas grandes áreas: a climatologia e a meteorologia operacional. Compreender os tipos de sistemas climáticos que originam as inundações contribui para tomada de decisão sobre os tipos de sistemas observacionais e previsões necessárias. Da mesma maneira, a compreensão da sazonalidade dos sistemas de chuva é importante nas organizações dos padrões de trabalho e atribuições da equipe (WMO, 2013). As técnicas utilizadas para previsão meteorológica incluem o *nowcasting*, os modelos numéricos (*Numerical Weather Prediction - NWP*) e os métodos estatísticos que normalmente são utilizados em conjunto para que os resultados de um melhorem a acurácia da simulação de outro (Sene, 2010).

Nowcasting é uma previsão de curto prazo local ou regional baseada na situação atual do local, que pode ser obtida através de radares, satélites e estações meteorológicas e pluviométricas. Essa técnica visa estimar a localização, extensão e características futuras da atmosfera como tempestades e nuvens, utilizando diversas informações atuais como localização, velocidade e taxa de crescimento ou decaimento. Outra aplicação do *nowcasting* é a previsão da formação de ciclones tropicais, tufões e furacões já que as características desses eventos dificultam o uso dos modelos numéricos (Sene, 2010).

Modelos estatísticos são as principais formas de realizar a previsão sazonal, ou seja, de longo prazo. Esses modelos utilizam técnicas de regressão e outros artifícios estatísticos para

relacionar os parâmetros (variáveis dependentes) da região de interesse, como temperatura ou chuva acumulada, com os índices dos fenômenos atmosféricos ou oceânicos. Esses métodos possuem bons resultados, as vezes superando os modelos numéricos, especialmente nas regiões onde essas relações são fortes. Porém, uma importante limitação é o fato de assumir que os dados históricos são representativos das condições futuras, desconsiderando, assim, as variações climáticas (Sene, 2010).

Os modelos numéricos simulam o comportamento da atmosfera, a qual é representada por um sistema complexo de equações matemáticas e alguns processos físicos como radiação, precipitação, nuvens, trocas de energia e trocas de massa à superfície são representados através de parâmetros. Esses modelos dividem-se em camadas verticais e a superfície em uma malha horizontal com diversos nós onde as equações são calculadas, obtendo-se dessa forma uma malha tridimensional (Fernandes, 2009; Sampaio e Dias, 2014).

Quanto à resolução do modelo, este se divide em microescala, mesoescala e macroescala. Os Modelos Atmosféricos de Circulação Global (MCGs) trabalham na macroescala, com resolução na ordem de várias dezenas a centenas de quilômetros e simulam o comportamento da atmosfera de todo o planeta. Já os Modelos de Circulação Regional (MCRs) permitem uma melhor representação das características locais uma vez que possuem resolução de poucas dezenas de quilômetros, assim, a melhor resolução espacial captura melhor detalhes regionais ou locais (Fernandes, 2009). Os MCRs surgiram a partir da experiência adquirida com os MCGs, com intuito de resolver os problemas associados às escalas de fenômenos e de movimentos locais e regionais. A vantagem do modelo regional é a possibilidade de detalhar os resultados simulados pelos MCGs com menor custo computacional (Sampaio e Dias, 2014).

Moura *et al.* (2010) comparam as previsões de 24 a 120 horas utilizando duas configurações de modelos regionais operacionais do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (CPTEC/INPE), somente para as rodadas inicializadas as 12Z. Os autores utilizaram o modelo regional Eta_40km, desenvolvido na Universidade de Belgrado, com resolução horizontal de 40 km e 38 níveis na vertical. As análises do *National Center for Environmental Prediction* (NCEP) foram utilizadas como condição inicial e as previsões do modelo global T126128 do CPTEC como condição de contorno. O segundo modelo para comparação foi o sistema Rpsas_40 que utiliza o mesmo modelo Eta_40km mas com condição inicial gerada pelo *Physical-space Statistical Analysis System* (PSAS), desenvolvida pelo *Data Assimilation Office* (DAO). A partir dos resultados

concluiu-se que a confiabilidade do Rpsas_40 para a previsão de 24 horas é superior ao do Eta_40km, isso implica que o uso mais racional de cada modelo no que tange ao melhor prazo de integração possibilitará melhorias na qualidade da previsão de precipitação sobre o Brasil.

Da mesma forma, Saad et al. (2010) comparam três modelos utilizados na CLIMATEMPO com o propósito de auxiliar a tomada de decisão do meteorologista na elaboração da previsão do tempo, são eles: o modelo global MRF (*Medium Range Forecast*), que em 2002 passou a se chamar GFS (*Global Forecast System*); o modelo regional MM5 (*The Fifth-Generation NCAR/ Penn State Mesoscale Model*) que utiliza o GFS como condição inicial e de contorno; e o WRF (*The Weather Research and Forecasting*). Os resultados mostraram que o modelo WRF apresentou alguns valores extremos irrealistas de precipitação e um viés sistemático de mais de 2° C para a região norte do Brasil em previsões de mais de 24 horas, o que indica a necessidade de um ajuste nos parâmetros utilizados. Já os modelos MM5 e MRF apresentaram uma performance satisfatória, apesar de problemas pontuais como em algumas cidades costeiras de altas declividades.

Fan et al. (2015) realizam uma comparação entre os modelos de previsão determinístico regional Eta_15km e por conjunto GEFS (*Global Ensemble Forecasting System VII*) para o maior evento de 2012/2013 do rio Tocantins. O modelo regional Eta_15km com um horizonte de até 7 dias superestimou as descargas em diversos casos o que, segundo os autores, pode ser considerado um viés sistemático do modelo para a região. A previsão por conjunto do GEFS com um horizonte de até 16 dias apresentou resultados bons, mas também com uma leve tendência de superestimar as descargas. Dessa forma, os autores sugerem a verificação de metodologias de remoção de viés para melhorar os resultados dos modelos.

Cuo et al. (2011) apresentam uma revisão da previsão numérica, seu nível de acurácia na previsão de precipitação e seu uso nas previsões de vazões de curto e médio prazo. Os autores abordam o estado da arte da integração dos resultados dos modelos numéricos com as previsões de vazão tanto na literatura de pesquisa quando no ambiente operacional para diferentes tempos de antecedência utilizados. As antecedências, em inglês *lead time*, variam segundo o modelo, o fenômeno observado e influencia na resolução espacial adotada. A Tabela 1 detalha os valores típicos de antecedência e resolução para os diferentes modelos de previsão meteorológica. No próximo tópico será abordada a antecedência do ponto de vista do sistema de previsão e alerta, considerando suas vantagens e desafios.

Tabela 1 - Valores típicos de antecedência e resolução para os diferentes modelos de previsão meteorológica.

Método	Antecedência	Resolução Horizontal	Intervalo de tempo das saídas do modelo	Observações
<i>Nowcasting</i>	0 - 6 horas (chuva)	1 - 5 km	5 ou 10 min	Para tempestades e outros eventos do tipo a antecedência é de 0 - 2 horas
	0 - 10 dias (ciclones tropicais)	100 - 1000 km	Horária ou mais	Valores típicos para a previsão de ciclones tropicais, tufões e furação
Modelos numéricos	0 - 3 dias	1 - 25 km	1 - 6 horas	Modelos de resolução mais alta podem ter uma extensão espacial mais limitada
	3 - 10 dias	25 - 100 km	6 - 12 horas	Modelos tipicamente globais
	10 dias +	25 - 100 km	12 horas - mensal	Pode ser operado para um horizonte de vários meses
Modelos Estatísticos	Semanas ou meses	Depende da aplicação	Depende da aplicação	Estimativas probabilísticas de tempo, magnitude e localização

Fonte: Sene (2010)

3.5. Antecedência no Alerta

A antecedência no alerta, ou seja, o tempo entre o instante em que o alerta é gerado e o início da inundação é um fator extremamente importante, pois este condiciona a quantificação dos benefícios que o sistema pode trazer. Esta antecedência depende do local para onde a previsão é feita, da quantidade de dados disponíveis e da complexidade dos modelos usados na previsão (Lima, 2003; WMO, 2013).

O serviço meteorológico alemão (DWD) foi aprimorado após o evento ocorrido na região do rio Elbe em 2002 para incorporar medidas que foram falhas neste evento. Dentre as mudanças encontram-se melhorias na previsão da chuva através da modelagem numérica e uso de radares meteorológicos e expansão da rede de monitoramento de modo a melhorar a caracterização espacial das precipitações. Além disso, a gestão do alerta foi ampliada com a implantação de 4 níveis de aviso: o *early warning* com antecedência de 48 a 120 horas; o

advanced warning de 12 a 48 horas e o *weather warning* e o *storm warning* que possuem uma antecedência de até 12 horas (DKKV, 2004).

Em sua dissertação, Lima (2003) analisou o que poderia ser salvo caso o alerta fosse dado com 3, 6, 12 e 24 horas de antecedência através de questionários aplicados em Itajubá e Santa Rita do Sapucaí, MG. As respostas eram coletadas em valores percentuais e classificadas segundo o tipo de estabelecimento: habitação, comércio e serviço e indústria. Os resultados obtidos mostraram que os sistemas de alerta podem ser bastante eficientes uma vez que os prejuízos evitados foram elevados. A autora concluiu que o alerta dado com 12 horas de antecedência seria plenamente suficiente para a redução de até um terço do valor total do prejuízo.

A depender da localização do sistema de alerta, o tempo de antecedência pode variar significativamente. Na cidade de Blumenau, Santa Catarina, o sistema CEOPS realiza previsões hidrológicas com até 8 horas de antecedência. A Tabela 2 apresenta os tempos adotados pelo SACE para diversas bacias brasileiras, estes são de meses, dias ou horas segundo as características locais. A bacia do rio Amazonas, por exemplo, possui uma área de drenagem muito grande e leitos principais de baixa declividade, resultando em cheias de longo tempo de percurso. A bacia do rio Acre, por outro lado, possui características de resposta rápida às chuvas, o que reflete na menor antecedência.

Tabela 2 – Valores de antecedência do SACE (CPRM).

Bacia	Localização	Antecedência
Rio Amazonas	Amazonas	75, 45 e 15 dias
Rio Paraguai	Região do Pantanal	Semanal
Rio Doce	Minas Gerais e Espírito Santo	24, 12, 10, 9, 7 e 6 horas
Rio Caí	Rio Grande do Sul	10 horas
Rio Acre	Acre	12, 6 e 3 horas
Rio Madeira	Rondônia	Semanal
Rio Parnaíba	Piauí e Maranhão	8 e 12 horas
Rio Taquari	Rio Grande do Sul	12 e 8 horas

Fonte: CPRM (2017).

3.6. Monitoramento de Variáveis Hidrológicas

O monitoramento não é apenas o conhecimento de um sistema, pois inclui o seu acompanhamento no tempo e no espaço e a produção de informações para embasar a tomada de decisão. A precipitação, os níveis e as vazões podem ser monitorados com diferentes objetivos. O acompanhamento de longo prazo para a obtenção de séries hidrológicas auxilia no planejamento do uso dos recursos hídricos, enquanto um monitoramento em tempo real, para acompanhamento de eventos de cheia, auxilia na gestão desses. Apesar dos processos hidrológicos variarem continuamente no tempo e no espaço, as medições são feitas de maneira pontual (Righetto, 2009).

As precipitações podem ser monitoradas quantitativamente de maneira pontual através de pluviômetros, que realizam o registro da chuva total acumulada diária ou em curtos espaços de tempo de maneira contínua através de pluviógrafos. Outra forma de monitoramento é através de radares meteorológicos que permitem, além da informação quantitativa, a verificação qualitativa dada pela análise visual da formação do evento. Esses equipamentos, apesar de complexos e caros, possuem um princípio de funcionamento simples baseado na emissão de pulsos eletromagnéticos (Righetto, 2009; Sene, 2010).

Já as informações de nível d'água incluem tanto o nível máximo atingido como a variação em função do tempo. Estas podem ser coletadas de maneira manual, através de leituras diárias em placas graduadas ou réguas limnimétricas nas margens dos rios, ou de maneira automática e contínua através de aparelhos de boia ou de pressão (Chow *et al.*, 1988; Righetto, 2009).

A vazão, embora seja a variável hidrológica mais importante, não pode ser medida diretamente, sendo necessário recorrer à medições de nível, velocidade ou à técnicas de traçador para sua estimativa (Chow *et al.*, 1988). A escolha do método varia com diversos fatores como conhecimento e qualificação do operador, custo de implantação, tempo de medição, nível de precisão exigida e características do curso d'água. Segundo Sene (2010), as formas de monitoramento de vazão mais comuns são utilizando aparelhos eletromagnéticos e ultrassônicos que possibilitam a medição de velocidade, estruturas de medição de rio que permitem a utilização de relações teóricas por definir um regime de fluxo conhecido em uma área determinada, e relações cota-vazão determinadas de maneira empírica. Tradicionalmente, estabelecem-se entre a vazão e a altura da superfície livre a partir de determinada cota de referência relações matemáticas que permitem a determinação da vazão a partir dessas alturas, cujo registro contínuo é mais acessível (Hipólito e Vaz, 2013).

A escolha do local de medição deve atender alguns pré-requisitos necessários para garantir qualidade e confiabilidade dos dados medidos, como por exemplo: ser um local de trecho reto, com margens bem definidas e estáveis, e preferencialmente em um trecho de leito estável, localizado logo a montante de controles hidráulicos (Righetto, 2009). A seguir serão apresentadas três maneiras distintas de se estimar a vazão. Primeiro através da medição de velocidade, em seguida através do uso de traçadores e por fim, através da elaboração de uma relação cota-vazão, conhecida como curva-chave.

3.6.1. Medição de Velocidade

A velocidade em uma seção transversal de um curso d'água varia segundo a posição analisada e por isso para estimá-la é necessário integrar a velocidade ao longo da seção transversal (Chow *et al.*, 1988). Flutuadores e molinetes fluviométricos são instrumentos convencionais utilizados na medição de velocidade. Mais recentemente, os molinetes eletromagnéticos, com recursos ao princípio da indução de Faraday, e os acústicos, com recursos ao efeito de Doppler, têm tido crescente aplicação (Hipólito e Vaz, 2013).

O método do flutuador, bastante utilizado pela sua simplicidade, consiste em determinar a velocidade de deslocamento de um objeto flutuante, medindo o tempo necessário para que o mesmo se desloque em um trecho de rio de comprimento conhecido. Essa velocidade obtida é a superficial que deve ser transformada em velocidade média através do uso de um fator de correção e a vazão é dada pelo produto dessa velocidade com a área molhada. Como está exposta a diversos fatores externos, como turbulência e vento, esse método pode apresentar erros significativos (Righetto, 2009; Bonifácio e Freire, 2013). O molinete hidrométrico, equipamento tradicional nas medições de vazão, mede a velocidade em diversos pontos da seção transversal através da rotação da hélice em relação ao fluxo d'água. Essas medições permitem o cálculo da velocidade média em subseções ou na seção inteira e sua utilização é recomendada para cursos d'água de todos os portes (Righetto, 2009; Bonifácio e Freire, 2013).

Os perfiladores acústicos Doppler utilizam a variação aparente na frequência da onda quando há movimento relativo entre o emissor e o receptor para a medição de velocidade. O perfil de velocidade é feito dividindo-se a profundidade em células uniformes, de tamanho definido pelo usuário, que possuem várias medidas de velocidade (RDI, 2011). A vazão é calculada por célula utilizando a média das velocidades. Eles possuem algumas vantagens em relação aos métodos convencionais como, por exemplo, rapidez na medição e maior detalhamento e

quantidade de informações hidráulicas como dados geométricos e perfis hidrodinâmicos, todavia o equipamento é frágil, de alto custo, e inadequado para rios rasos (Righetto, 2009; Vilanova e Balestieri, 2013).

Bonifácio e Freire (2013) compararam os resultados de medição de vazão por três métodos: flutuador, molinete hidrométrico e método acústico; em dois cursos d'água localizados no município de Maringá-PR. Os autores verificaram cada uma das metodologias levando em consideração o custo, tempo e eficiência e perceberam que apesar dos desvios-padrão para cada método serem baixos, não houve proximidade dos resultados obtidos entre eles. Tomando como base o método acústico devido à elevada precisão, o molinete apresentou um menor erro relativo em comparação ao flutuador.

Buscando atestar a qualidade dos dados obtidos por perfiladores Doppler, Vilanova e Balestieri (2013) realizaram uma análise de incertezas de medição utilizando dois perfiladores distintos. Os autores realizaram 10 medições consecutivas com cada equipamento seguidas de uma análise estatística que indicou incertezas-padrão baixas e boa coerência entre os resultados. Dessa forma, concluiu-se que os perfiladores acústicos Doppler produzem dados fluviométricos de alta qualidade e confiabilidade que podem ser utilizados na geração de séries hidrológicas consistentes.

Maldonado e Wendland (2013) e Maldonado *et al.* (2015) utilizaram dois métodos não-convencionais de baixo custo para medição de vazão no Ribeirão do Onça, São Paulo, com o intuito de avaliar suas vantagens e desvantagens operativas comparando-os ao molinete, adotado como referência por ser um método de medição convencional. No primeiro trabalho, foram aplicados os métodos eletromagnético e vertedor circular móvel, sendo as estimativas de vazão do primeiro superiores ao segundo. De acordo com os autores, os resultados inferiores do vertedor circular ocorreram devido às dificuldades práticas, por ser do tipo móvel, o que ocasionou perdas de água entre a interface parede/vertedor. No segundo trabalho, foram utilizados os métodos eletromagnéticos e do bueiro, ambos com bons resultados, porém o método do bueiro apresentou limitações em situações de cheia. Os dois trabalhos concluíram que o medidor eletromagnético apresentou a vantagem de medir velocidade em condições de turbulência e remanso, não sendo influenciado pela proximidade das paredes do canal.

3.6.2. A Técnica de Traçadores

O método de traçador consiste em inserir uma determinada quantidade do traçador no curso d'água e, após certa distância que garanta sua mistura homogênea, realizar a medida da concentração. Comparando a concentração de jusante com a quantidade inserida a montante é possível estimar a vazão (Chow *et al.*, 1988; Sene, 2010). Os traçadores podem ser classificados como naturais ou artificiais. Os naturais, também chamado de ambientais, são os constituintes naturais do sistema hídrico e geralmente dividem-se em químicos e isotópicos. Os traçadores artificiais são aqueles introduzidos pelo homem e podem ser corantes, sais ou isótopos radioativos (Drumond, 2004).

Segundo Lepot *et al.* (2014), para garantir a confiabilidade da medição é necessário verificar as condições hidráulicas e químicas locais. As condições e premissas fundamentais à medição são: sinais de fluorescência e turbidez constantes no trecho medido; vazão constante, estimada através do nível d'água e considerando o escoamento permanente e uniforme durante o experimento; adsorção desprezível do marcador; inexistência de vazões de entrada ou saída no trecho considerado para que o balanço de massa do traçador não seja afetado. Drumond (2004) reforça que para que uma substância seja usada como traçador artificial, ela deve ser inofensiva para os seres vivos, estável biologicamente, quimicamente e fisicamente e não deve estar presente nas águas naturais.

Esse processo possui dois parâmetros chave: o primeiro é o comprimento de mistura, dado pela distância entre o ponto de injeção do traçador e o ponto de medição, de modo que garanta uma mistura homogênea. Esse valor varia de 75 a 150 vezes a maior dimensão hidráulica, a depender da posição do ponto de injeção. O segundo parâmetro é a quantidade de traçador a ser injetada que varia segundo a velocidade da água e as características geométricas do canal como declividade, raio hidráulico e largura (ISO, 1994 *apud* Lepot *et al.*, 2014).

Lepot *et al.* (2014) propõem, testam e aplicam um protocolo operacional baseado no uso do traçador fluorescente Rodamina WT para medição de vazão em vários estudos de caso. O protocolo inclui avaliação e redução de incertezas e processamento completo dos dados. As vantagens do uso da Rodamina WT incluem baixo volume de injeção necessário, ausência desse componente em águas residuais e facilidade da aquisição de dados *online* em intervalos curtos através de um fluorímetro portátil. Os resultados mostraram que o protocolo apresenta valores de vazão próximos aos obtidos com o método eletromagnético e a técnica de traçador com sal.

3.6.3. Elaboração de Curvas-chave

A importância da curva-chave ocorre devido à confiabilidade dos dados de descarga depender diretamente da qualidade dessa relação (Braca, 2008). Porém, a relação cota-vazão para uma dada seção transversal não é necessariamente única, uma vez que as descargas dos rios são influenciadas por diversos fatores que nem sempre são compreendidos e quantificáveis (Sefe, 1996). A vazão não é função apenas da cota, mas também da geometria, declividade longitudinal e rugosidade do canal.

As curvas-chave geralmente são definidas usando uma série de medidas de nível e vazão (Pinto *et al.*, 1976; Jaccon e Cudo, 1989; Herschy, 1993), sendo a estabilidade da sua relação o fator que define o número de medições de descargas necessárias. O intervalo limitado pelas cotas mínimas e máximas observadas é definido como intervalo de calibragem, portanto a problemática da definição da curva-chave corresponde ao ajuste nesse intervalo e à extrapolação para valores inferiores e superiores aos observados (Filho *et al.*, 2003).

Convencionalmente, a curva-chave pode ser obtida por métodos matemáticos (Pinto *et al.*, 1976; Ghimire e Reddy, 2010). Todavia, devido à complexidade dessa relação que muitas vezes é variável no tempo, e não necessariamente única, nem sempre é possível definir uma curva-chave simples, mesmo com o auxílio de técnicas tradicionais de modelagem. Assim, diversos trabalhos buscam aperfeiçoar curvas-chave utilizando modelos, além de procurar entender e quantificar as incertezas inerentes ao processo. Propostas que incorporam a complexidade da relação cota-vazão são apresentadas em substituição às tradicionais curvas-chave. Um exemplo é o uso de modelos hidrodinâmicos, que tem aumentado nos últimos anos (Perumal e Sahoo, 2007; Bao *et al.*, 2009).

Segundo Pinto *et al.* (1976), em um rio de morfologia pouco variável, em que a declividade da linha de água é aproximadamente a mesma nas enchentes e vazantes, a relação cota-descarga é unívoca e estável, o que permite a definição de uma curva-chave única. Diversos autores publicaram orientações a calibragem de estações fluviométricas e definição de relação cota-vazão tradicional (Jaccon e Cudo, 1989; Herschy, 1993). Existem trabalhos que apresentam técnicas de ajuste alternativas às convencionais como o de Sefe (1996) que estuda a definição de uma curva-chave para o rio Okavango em Botsuana a partir de dados observados. Foram utilizados processos de regressão linear através de transformações *Power* e *Box and Cox* que desconsiderou os *outliers*, uma vez que a transformação logarítmica tradicional falhou, e modelagem com o modelo ARIMA incorporando os *outliers*. O autor

ênfatiza a importância de identificar medições incorretas na definição de curvas-chave mais realistas.

No Brasil nem sempre existe uma série longa de medições para a geração da curva-chave, e esse é um fator extremamente limitante. Por esse motivo, Barros *et al.* (2014) estudaram o rio Tracunhaém, PE, apresentando um histórico das medições e os fatores que afetam a qualidade destas, e analisaram as incertezas nas vazões estimadas com uso de curvas-chave geradas com poucos dados. Os autores concluem que a pequena quantidade de medições está fortemente relacionada às adversidades ligadas à logística de operação hidrométrica que não prioriza as medições e como consequência, as curvas-chave da região são pouco precisas e até mesmo inconsistentes.

Buscando quantificar os erros inerentes à extrapolação da curva-chave, Brusa e Clarke (1999) e Clarke e Brusa (2001) ajustaram uma curva-chave considerando a diferença em altura entre o zero da régua e nível de descarga nula conhecido e outra considerando-o desconhecido para a bacia do Ibicuí - RS. Os resultados mostram que, para as estimativas de vazões máximas, a amplitude dos limites de confiança superior e inferior não é pequena, mesmo considerando o parâmetro conhecido. Em ambos os trabalhos, quando a incerteza da determinação desse parâmetro é incluída, o intervalo de confiança fica muito maior. Os autores afirmam que o aumento da precisão quando desconsiderada a incerteza na estimativa do terceiro parâmetro é apenas aparente e não real. Visando diminuir essas incertezas, Filho *et al.* (2003) extrapolaram as curvas-chave, com o *software* STEVENS, para três estações no estado do Paraná. Os resultados mostram que o traçado e a extrapolação das curvas foram bons mesmo com poucas medições disponíveis e que o ajuste melhora à medida que aumenta o número de medições realizadas e o intervalo de cotas representado por elas.

Marcuzzo (2015) utiliza quatro tipos de equações disponíveis no programa HIDRO para representar a curva-chave: linear, parabólica, cúbica e potencial para uma estação localizada na bacia do rio Uruguai, RS. Utilizando o princípio da soma dos quadrados dos erros para a comparação entre as equações, o resultado apontou que a regressão cúbica apresentou o melhor desempenho, seguida da regressão parabólica, potencial e, por fim, a linear. O autor ênfatiza a importância desse resultado no contexto brasileiro uma vez que a maioria das curvas-chave é gerada por regressão potencial mesmo não sendo a mais adequada.

Ghimire e Reddy (2010) compararam diferentes técnicas para o ajuste da curva-chave. Os autores utilizam algoritmos genéticos (AG), uma técnica de busca que utiliza conceitos da

biologia evolutiva e *Model Tree* (MT), uma técnica que apresenta uma representação estrutural dos dados e realiza o ajuste linear por partes, em comparação com métodos mais convencionais como *gene-expression programming* (GEP), uma extensão da programação genética, regressão linear múltipla (RLM) e a relação cota vazão clássica (RC) obtida por mínimos quadrados. Eles concluem que os modelos desenvolvidos pelos AG e MT apresentaram melhor ajuste que os métodos convencionais e quando comparados entre si, o modelo do AG apresentou uma leve vantagem, pois se ajustou melhor para vazões mais altas. Em outro estudo realizado por Al-Abadi (2014), comparou-se a modelagem da relação cota-descarga utilizando a rede *perceptron* multicamada (MLP), uma rede neural artificial em conjunto com o algoritmo de aprendizado *backpropagation*, um *Model Tree* chamado M5 *decision tree* e o modelo Takagi-Sugeno (TS) de lógica *fuzzy*. O resultado mostrou que o modelo MLP apresentou o pior desempenho dentre os analisados, já os modelos M5 e TS apresentam resultados muito similares sendo que o modelo M5 supera o TS.

Doherty (2010) retrata em seu trabalho alguns métodos disponíveis para calibração de modelos teóricos com dados disponíveis utilizando o *software* HEC-RAS. A calibração do coeficiente de rugosidade de Manning foi feita com o nível de água, buscando o alinhamento paralelo das linhas de energia e do perfil d'água. No caso de estações que já possuíam uma curva-chave, uma segunda calibração foi realizada com dados da curva existente e de vazões medidas. Através de seis estudos de caso na região semiárida do oeste australiano, conclui-se que as curvas-chave desenvolvidas pela modelagem com o HEC-RAS são confiáveis, apresentando um nível aceitável de incerteza. Outro trabalho utilizando o HEC-RAS foi elaborado por Reistad *et al.* (2007) verificando a eficiência do desenvolvimento da relação cota-descarga com o *software* através da modelagem de quatro estações de medição norueguesas. Para cada estação foram feitos três testes: pré-selecionando um valor do coeficiente de Manning segundo observação local e comparação com a literatura, utilizando um valor do coeficiente obtido pela calibração com a superfície da água medida e calibrando com a curva-chave existente. A calibração utilizando a superfície de água medida apresentou vazões significativamente subestimadas enquanto para os testes com o coeficiente de rugosidade pré-selecionado estimou bem as vazões para níveis elevados, porém para níveis baixos a vazão foi superestimada.

Uma alternativa à tradicional relação cota-vazão é apresentada por Perumal e Sahoo (2007) que estudam e quantificam a aplicabilidade de dois métodos de propagação simplificados derivados diretamente das equações de Saint-Venant. O modelo *Variable Parameter*

Muskingum Stage Hydrograph (VPMS) e o *Variable Parameter Muskingum Discharge Hydrograph* (VPMD) são utilizados na propagação de séries de nível hipotéticas e suas respectivas vazões em canais uniformes retangulares e trapezoidais com diferentes combinações do coeficiente de Manning, declividade do canal, nível e tempo de pico. Ambos os modelos apresentaram resultados satisfatórios, sendo o desempenho do VPMS melhor que o do VPMD, o que corrobora a afirmação dos autores que considerar linear a variação da vazão ao longo do trecho é mais restritiva que a consideração de linearidade da variação do nível usada no desenvolvimento do modelo VPMS.

Utilizando uma extensão do VPMS, Perumal *et al.* (2007) apresentam uma metodologia para estimativa de vazão e determinação de uma relação cota-vazão em canais trapezoidais com seção transversal composta sem medições de descarga. Para verificação do desempenho do modelo utilizam-se diversos conjuntos de dados hipotéticos gerados pelo modelo MIKE-11. Além disso, o desempenho também foi verificado utilizando dois conjuntos de dados de teste de estudo em laboratório do fluxo não estacionário em canais compostos e seis séries de medições de duas estações do Rio Tiber, na Itália, das quais apenas uma foi utilizada na calibração do coeficiente de Manning. Os autores concluem que o modelo é capaz de produzir resultados muito próximos aos observados, quando não é considerada contribuição lateral de vazão, apresentando apenas algumas dificuldades na propagação em canais de baixa declividade.

Aricò *et al.* (2010) utilizam a medição sincronizada do nível em duas seções separadas por alguns quilômetros de distância para estimar a vazão na estação a montante. O método consiste na calibração do coeficiente de Manning através da resolução das equações de Saint-Venant de forma difusa e completa. Experimentos realizados na *Polytechnic of Bari University*, utilizando canais com duas rugosidades diferentes, mostraram que o modelo difuso apresentou melhores resultados, principalmente para canais com rugosidade mais elevada, devido à independência dos termos inerciais em relação ao coeficiente de Manning.

Oliveira *et al.* (2016) e Formiga *et al.* (2016) utilizam um modelo hidrodinâmico baseado nas equações de Saint-Venant para a determinação de vazão em canais abertos com calibração feita com auxílio de algoritmos genéticos multiobjetivo. Ambos os trabalhos utilizaram apenas informações de nível e características geométricas com um bom nível de detalhamento. Os resultados obtidos foram considerados muito bons, segundo Oliveira *et al.* (2016) os valores do coeficiente de Nash-Sutcliffe foram superiores a 0,99 tanto para

calibração como para validação, já Formiga *et al.* (2016) obtiveram valores do coeficiente superiores a 0,96 também para calibração e validação.

A busca da determinação do coeficiente de Manning nos modelos hidrodinâmicos dos trabalhos supracitados ocorre, segundo Bao *et al.* (2009), devido à alta sensibilidade desse parâmetro. Os autores objetivam melhorar o desempenho de modelos hidrodinâmicos usados na previsão de cheias em rios que sofrem influência de maré através da correção dinâmica da rugosidade estudando o caso do rio Caoe na China. Os resultados mostram que essa correção melhora a precisão da simulação, principalmente nos níveis de pico.

3.7. Modelagem Hidrológica

Segundo Tucci (2005), o modelo hidrológico é uma das ferramentas que a ciência desenvolveu para melhor representar o comportamento de uma bacia hidrográfica e prever condições diferentes das observadas. Estes podem ser classificados como modelos de comportamento, que descrevem o funcionamento do sistema, modelos de otimização, utilizados na obtenção das soluções ótimas de projeto e modelos de planejamento, que incorporam a busca por soluções hidráulicas, hidrológicas e econômicas em conjunto com uma quantificação socioeconômica e ambiental. Outros critérios também são usados para classificação, os modelos podem ser concentrados ou distribuídos a depender da variabilidade espacial das variáveis e parâmetros; estáticos ou dinâmicos, segundo a existência de dependência temporal; discretos ou contínuos segundo a forma de representação dos dados; estocásticos ou determinísticos de acordo com o tipo de variável utilizada; e conceitual ou empírico, a depender das relações entre as variáveis.

As modificações antrópicas causam impactos no ciclo hidrológico cujo conhecimento e entendimento é indispensável para uma boa gestão dos recursos hídricos. A simulação matemática envolve o uso de modelos que utilizam a analogia físico-matemática para representar o comportamento de um sistema que, no caso urbano, é dado pelo ciclo hidrológico na bacia e os processos relacionados aos escoamentos pluviais que ocorrem nos componentes da drenagem (Amaral, 2014). Para Nascimento (2011), a modelagem matemática hidrológica e hidráulica de bacias urbanas atende a diferentes objetivos, como: caracterização do risco de inundação o que contribui para sua compreensão e diagnóstico do sistema de drenagem fluvial, avaliação de diferentes cenários, estimativa de danos e zonas inundáveis.

A modelagem da drenagem urbana permite o controle em tempo real, análise das interações entre os subsistemas e a avaliação das respostas da bacia e da poluição, o que contribui para gestão operacional e planejamento estratégico do sistema (Maksimovic, 2001). De maneira geral, esses modelos podem ser entendidos como o conjunto de um módulo para a transformação chuva-vazão e um módulo para a propagação do escoamento em canais ou galerias (Righetto, 2009).

Os módulos chuva-vazão representam a parte do ciclo hidrológico entre precipitação e vazão descrevendo a distribuição da precipitação, as perdas por interceptação, evaporação, depressão no solo e infiltração, o escoamento superficial, sub-superficial e no rio (Tucci, 2005). Os módulos de propagação são considerados modelos de armazenamento quando consideram esses efeitos na atenuação e no deslocamento da onda de cheia, desprezando os efeitos de atrito levados em conta pela equação do momento. Já os que utilizam as equações de Saint Venant são chamados de hidrodinâmicos e se subdividem em completos ou simplificados segundo a consideração ou não dos termos da equação do momento. No modelo da onda cinemática, as parcelas de inércia e pressão são desprezadas impossibilitando a simulação de alguns fenômenos como efeitos de jusante sobre o escoamento. Os modelos completos representam com mais precisão os fenômenos, mas possuem a desvantagem de exigir maior esforço computacional (Righetto, 2009).

Diante dos diversos métodos existentes, cada um com suas vantagens e limitações, Tucci (2005) e Maksimovic (2001) enfatizam a importância da escolha do método utilizado que depende dos objetivos da modelagem, características da bacia, disponibilidade dos dados, tecnologia disponível e familiaridade do usuário com o modelo. Singh e Woolhiser (2002) apresentam uma revisão e síntese de diversos modelos hidrológicos, enquanto Elliot e Trowsdale (2007) e Elga *et al.* (2015) realizam uma revisão focada em modelos usados em áreas urbanas. Em sua dissertação, Amaral (2014) e Collodel (2009) resumem vários modelos computacionais utilizados na simulação hidrológica e hidráulica, destacando os *softwares* cujo foco é a modelagem urbana. Por fim, Righetto (2009) apresenta de maneira sucinta os modelos mais utilizados na drenagem urbana, descrevendo-os brevemente e em seguida expõe com mais detalhes o modelo SWMM da USEPA, Estados Unidos. Esse será detalhado no próximo item por ser o modelo de interesse dessa pesquisa. Além de descrever sobre sua aplicação na literatura, serão abordadas também técnicas de calibração e de análise de desempenho do modelo.

3.7.1. *Storm Water Management Model (SWMM)*

O SWMM da *United States Environmental Protection Agency* (US EPA) é um modelo dinâmico de chuva-vazão usado para um único evento chuvoso ou para simulações contínuas de longo prazo da quantidade e qualidade da água, especialmente em áreas urbanas. O SWMM possui um componente relativo ao escoamento superficial e ao transporte hidráulico o que permite o acompanhamento da evolução da quantidade e qualidade do escoamento nas sub-bacias, assim como da vazão, altura do escoamento e qualidade da água dentro das tubulações e canais (Rossman e Huber, 2016).

O uso do SWMM para a modelagem de áreas urbanas é amplo e crescente ao longo dos últimos anos, conforme apresenta a Tabela 3. Nessa tabela são descritos trabalhos que aplicaram o SWMM em áreas urbanas em diversos países indicando os locais de aplicação, a área da bacia estudada, grau de subdivisão, método de infiltração utilizado e característica da simulação, se por eventos ou contínua. Alguns desses trabalhos são descritos em mais detalhes nos parágrafos a seguir.

A compreensão da sensibilidade dos parâmetros do modelo é fundamental para a realização de simulações detalhadas. Zaghoul (1983) apresenta uma análise de sensibilidade dos principais parâmetros do SWMM, utilizando bacias hipotéticas, além de verificar os efeitos da discretização espacial. O autor conclui que a porcentagem de área impermeável e a largura representativa da bacia são os parâmetros mais sensíveis para o módulo do escoamento superficial. Em relação ao módulo do transporte hidráulico, os parâmetros mais significativos foram o comprimento e o coeficiente de rugosidade de Manning dos condutos. Quanto ao nível de subdivisão, o autor afirma que uma representação menos detalhada da bacia fornece uma boa aproximação, principalmente em bacias pequenas, porém esta serve apenas como uma análise preliminar.

Uma avaliação dos efeitos da discretização espacial no SWMM também foi feita por Garcia *et al.* (2004) e Garcia (2005) para a bacia urbana do Arroio Cancela, no município de Santa Maria - RS. Na análise de sensibilidade, para o módulo do escoamento superficial, os parâmetros da porcentagem da área impermeável, da largura representativa da bacia e do coeficiente de rugosidade de Manning para as sub-bacias foram os mais sensíveis para a vazão de pico. Quando analisado o módulo do transporte hidráulico, o parâmetro mais significativo foi o coeficiente de rugosidade de Manning dos condutos. Quando comparado quanto ao grau de subdivisão, não houve diferenças significativas, portanto, os autores

concluíram que uma maior divisão da bacia, sem um aumento no detalhamento dos parâmetros, nem sempre significa melhorias no ajuste dos hidrogramas. Além disso, os autores alertam para os cuidados que devem ser tomados no uso de simulações com discretização espacial simplificada uma vez que apesar de terem apresentado bons resultados, os valores de vazão pico foram superestimados.

Krebs *et al.* (2013) apresentam a configuração, calibração, validação e os resultados de uma análise de sensibilidade de um modelo SWMM de alta resolução para uma pequena bacia altamente urbanizada localizada no sul da Finlândia. A alta resolução espacial resultou em uma insensibilidade do modelo à porcentagem da área impermeável. Os parâmetros mais sensíveis, armazenamento em depressões e coeficiente de Manning para os condutos, foram calibrados utilizando o algoritmo de otimização genético multi-objetivo NSGAI. O uso de dados de alta resolução simplificou o processo de calibração uma vez que este foi realizado apenas para os parâmetros supracitados e os resultados obtidos foram considerados bons tanto para o processo de calibração como para validação.

Faria *et al.* (2014) e Xu e Zhao (2016) avaliam diferentes cenários de urbanização com auxílio da modelagem no SWMM. No primeiro trabalho, os autores realizaram o monitoramento da chuva e vazão para aquisição dos dados para calibração, realizada manualmente para dois eventos e os ajustes obtidos foram considerados bons, segundo ajuste visual, coeficiente de determinação, coeficiente de Nash-Sutcliffe e erro da vazão de pico. Já Xu e Zhao (2016) utilizam a calibração automática para o ajuste do modelo e a análise de desempenho foi feita segundo coeficiente de Nash-Sutcliffe, erro relativo da vazão de pico e erro absoluto do nível de pico. O modelo apresentou bom ajuste tanto nos eventos da calibração como da validação.

Li *et al.* (2016) modelaram quantitativa e qualitativamente o escoamento em uma pequena bacia altamente urbanizada na cidade de Shenyang, China. Os autores obtiveram um bom resultado com o uso do SWMM, segundo o coeficiente de Nash-Sutcliffe, erro relativo e coeficiente de determinação. Os eventos usados no processo de calibração e validação foram utilizados também para a análise de sensibilidade que resultou nos parâmetros de armazenamento em áreas impermeáveis e coeficiente de rugosidade de Manning como os mais sensíveis nos módulos hidrológico e hidráulico, respectivamente.

Tabela 3 - Trabalhos de modelagem da área urbana com o SWMM e suas principais características.

Referência	Local	Área da Bacia (km²)	Número de Sub-bacias	Método de Infiltração	Tipo de Simulação
Selvalingam <i>et al.</i> (1987)	Upper Bukit Timah, Singapura	6,11	19	Horton	Por eventos
Garcia <i>et al.</i> (2004)	Bacia do Arroio Cancela, Rio Grande do Sul	4,95	Concentrada, 7 e 11	Horton	Por eventos
Garcia (2005)	Bacia do Arroio Cancela, Rio Grande do Sul	4,95	18 e 6	Horton	Por eventos
Barco <i>et al.</i> (2008)	Upper Ballona Creek, Califórnia	217	1579	Horton	Por eventos
Krebs <i>et al.</i> (2013)	Taapelipilki, Finlândia	0,0587	690	Green-Ampt	Por eventos
Petrucci e Bonhomme (2014)	Sucy-en-Brie, França	2,3	19	-	Contínuo
Walsh <i>et al.</i> (2014)	Chollas Creek, EUA	30,7	78	Green-Ampt	Contínuo
Oliveira <i>et al.</i> (2014)	Água Espraiada, São Paulo	11,3	4	Método SCS	Contínuo
	Aricanduva, São Paulo	101,5	23		
	Cabuçu de Baixo, São Paulo	42,5	12		
	Mandaqui, São Paulo	18,5	5		
	Morro do S, São Paulo	22,6	7		
Pirajuçara, São Paulo	65,8	11			
Faria <i>et al.</i> (2014)	Bacia de Estudo do Córrego Barbado, Mato Grosso	10,71	9	Horton	Por eventos
Bi <i>et al.</i> (2015)	Rolland-Therrien, Canadá	14,20	820	-	Por eventos
Aryal <i>et al.</i> (2016)	Sheepstation Creek, Austrália	1,9	De 3 a 37	-	Contínuo
	Stable Swamp Creek, Austrália	4,42			
	Blunder Creek Durack, Austrália	5,63			
Xu e Zhao (2016)	Dahongmen Catchment, China	131	-	Horton	Por eventos
Li <i>et al.</i> (2016)	Shenyang, China	0,242	38	Horton	Por eventos

3.7.2. *Calibração de Modelos*

A calibração é o processo de identificar valores de parâmetros que produzam saídas que se aproximem de fenômenos observados (Muleta, 2012). Devido às incertezas inerentes aos dados e às simplificações adotadas na modelagem, não existe um único conjunto de valores de parâmetros capaz de representar os processos hidrológicos. Existem diversas combinações que apresentam resultados semelhantes entre si e relativamente próximos aos observados (Collischonn e Tucci, 2003).

Essa calibração pode ser realizada manualmente, através da tentativa e erro, de forma automatizada, utilizando métodos de otimização, ou combinando essas duas maneiras. A vantagem da calibração automática é que ela consome menos tempo e evita o processo de diversas simulações sucessivas por parte do usuário. Por outro lado, a calibração manual permite que o operador agregue seu conhecimento e experiência ao processo. Apesar de ser um processo lento e repetitivo, a calibração manual é usada com frequência na literatura para modelagens com o SWMM e os resultados obtidos são satisfatórios (Garcia, 2005; Collodel, 2009; Beling *et al.*, 2011; Faria *et al.*, 2014; Rosa, 2017; Siqueira, 2017).

Alternativas à calibração manual surgiram através das técnicas de otimização (Tucci, 2005). Collischonn e Tucci (2003) descrevem as principais desvantagens da calibração automática como: a solução pode convergir para parâmetros irrealistas do ponto de vista físico, apresentando resultados absurdos principalmente quando existem muitas incertezas nos dados observados; o mínimo obtido pode ser local e não global. Porém, principalmente em situações onde a bacia é grande e complexa, com vários parâmetros a serem calibrados, a calibração automática atua como um facilitador na estimação dos parâmetros (Barco *et al.*, 2008).

Os exemplos do uso de calibração automática com o SWMM também são extensos, Barco *et al.* (2008) listam alguns casos que utilizaram diferentes métodos. Os autores utilizam um método de otimização conhecido como método complexo desenvolvido por Box (1965) *apud* Barco *et al.* (2008). Aryal *et al.* (2016) utiliza o método de otimização global *Shuffled Complex Evolution* da Universidade do Arizona (SCE-UA), Krebs *et al.* (2013), Petrucci e Bonhomme (2014) e Xu e Zhao (2016) aplicam a técnica de algoritmo genético (AG).

O algoritmo estocástico *Dynamically Dimensioned Search*, conhecido por DDS e desenvolvido por Tolson (2005) teve sua eficiência e eficácia confirmada por Tolson e Shoemaker (2007) e Muleta (2010). Ambos utilizaram o modelo *Soil and Water Assessment*

Tool (SWAT) para comparar o desempenho do DDS com outros métodos de otimização comumente utilizados como AG e SCE-UA. Muleta *et al.* (2013) utilizam o DDS para calibração do SWMM usando esse resultado como referência para verificar a eficácia de uma abordagem bayesiana na análise de incertezas e calibração do modelo.

O DDS é um algoritmo heurístico de busca global o que significa que soluções aceitáveis, satisfatórias ou otimizadas, são geradas como opções às soluções globalmente ótimas por serem mais fáceis de serem implementadas computacionalmente. Esse algoritmo possui como critério de finalização o número máximo de iterações da função-objetivo. Assim, a busca pela solução inicia de forma global e se torna local à medida que se aproxima do número máximo de tentativas. O ajuste da busca de global para local é conseguido por redução dinâmica e probabilística do número de dimensões na vizinhança, ou seja, o conjunto de variáveis de decisão (parâmetros) modificadas a partir da melhor iteração encontrada até o momento (Tolson e Shoemaker, 2007; Pinheiro, 2009).

Segundo Tolson e Shoemaker (2007), o algoritmo DDS é único em relação aos outros devido à forma como a vizinhança é ajustada alterando a dimensão da busca. A experiência dos responsáveis pela elaboração foi determinante na definição de reduzir o número de variáveis de decisão perturbadas à medida que se aproxima do número máximo de tentativas. O único parâmetro r refere-se ao desvio-padrão do tamanho da perturbação da variável de decisão, os autores recomendam utilizar o valor de 0,2 pois este permite que o algoritmo escape de mínimos locais. Por fim, a quantidade máxima de avaliações da função objetivo é considerada um dado de entrada e deve ser definida segundo os objetivos da modelagem e recursos computacionais disponíveis.

3.7.3. Avaliação de Desempenho

A verificação do bom ajuste do modelo aos dados observados é feita de forma gráfica, através da análise visual, e através de medidas estatísticas conhecidas como critérios de desempenho ou função objetivo (Muleta, 2012). Segundo Gupta *et al.* (2009), o coeficiente de Nash-Sutcliffe (CNS) e o erro médio quadrático são os critérios mais utilizados na calibração e avaliação de modelos hidrológicos, os autores analisam esses dois critérios e ressaltam suas limitações.

Dawson *et al.* (2007), Moriasi *et al.* (2007) e Muleta (2012) apresentam uma revisão de literatura dos critérios existentes, apresentando as formulações, vantagens e desvantagens de

cada um. Moriasi *et al.* (2007) recomendam três critérios estatísticos (CNS, porcentagem de viés e a relação entre o erro quadrático médio e o desvio padrão dos dados medidos) juntamente com a análise visual para a verificação do desempenho dos modelos. Os autores apresentam uma tabela síntese com valores do CNS e a classificação do desempenho segundo diversos trabalhos, e concluem que para $CNS > 0,50$ o modelo é considerado satisfatório. Os autores ressaltam que esses critérios são aplicáveis a modelos contínuos, com longo período de simulação e intervalos de tempos mensais. Para modelos calibrados por eventos, a verificação de desempenho deve refletir os objetivos de cada caso, além disso, os autores complementam que simulações para intervalos de tempo mais curtos normalmente apresentam desempenho piores quando comparadas às simulações com intervalos de tempo mais longos.

Muleta (2012) analisa a sensibilidade do desempenho do modelo segundo a função objetivo utilizada durante a calibração automática. O autor divide os critérios em três grupos: I – minimiza os desvios absolutos; II – minimiza o quadrado dos resíduos; III – utiliza o log dos valores observados e simulados de fluxo; e conclui que os resultados da calibração automática são sensíveis à variação do grupo mas não da função objetivo dentro de um grupo. O grupo I apresentou melhores resultados em simulações de vazões altas e baixas, sendo que seu desempenho e o do grupo II se complementam.

Dawson *et al.* (2007) também categoriza os critérios utilizados em três grupos, são eles: parâmetros estatísticos dos conjuntos de dados observados e modelados; parâmetros estatísticos do erro residual; e coeficientes adimensionais para avaliação de desempenho. Esses critérios apresentados são utilizados em um site de acesso livre que permite o usuário avaliar os resultados simulados através de uma coleção consistente de critérios de desempenho. O autor resalta também a importância de não basear a análise em uma única medida de desempenho.

4. MATERIAL E MÉTODOS

Neste capítulo são apresentadas e detalhadas todas as etapas metodológicas que envolvem desde a definição da área de estudo e levantamento de dados até os modelos utilizados para se atingir os objetivos propostos. A Figura 5 apresenta um fluxograma detalhado dessas etapas, mostrando a relação de dependência entre elas. Seguindo a ordem do fluxograma, primeiro são apresentadas informações e características sobre a área onde o estudo foi aplicado e os dados levantados fundamentais para o desenvolvimento da pesquisa. Em seguida, breves descrições dos modelos computacionais HEC-RAS e SWMM são feitas considerando os aspectos teóricos e as características da modelagem realizada. A partir desse ponto as atividades desenvolvidas na pesquisa são realizadas em paralelo uma vez que elas são dependentes apenas da elaboração dos modelos. Uma vertente da pesquisa leva à resposta dos segundo e terceiro objetivos específicos que são relacionados à análise das curvas-chave sintéticas. A outra vertente é sobre a análise das características dos eventos que geraram alerta, objetivo geral do trabalho. Nessa etapa da pesquisa, as atividades de geração, simulação e análise dos eventos sintéticos ocorreram simultaneamente à verificação da antecedência do alerta, último objetivo específico.

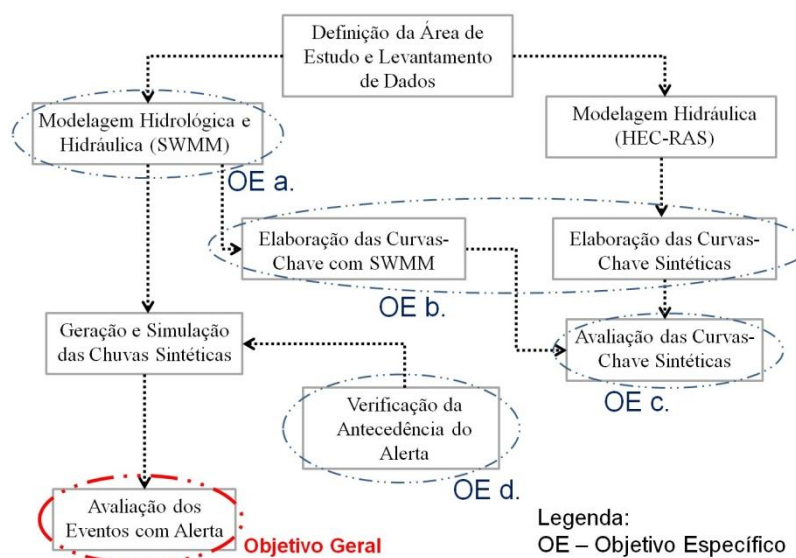


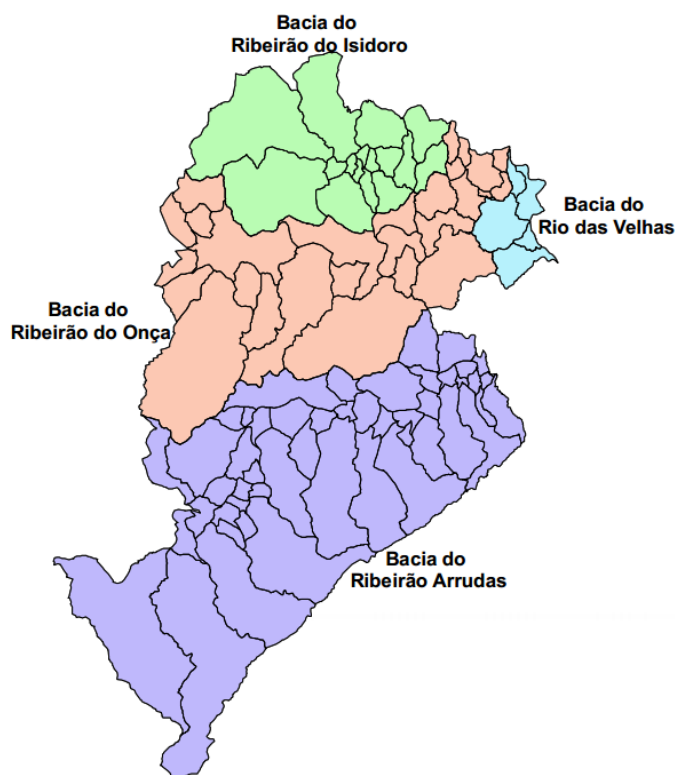
Figura 5- Fluxograma das etapas metodológicas e indicação dos objetivos a serem alcançados.

4.1. Caracterização da Área de Estudo

No município de Belo Horizonte encontram-se quatro bacias hidrográficas: a do ribeirão Arrudas, ribeirão do Onça, ribeirão do Isidoro e a bacia do rio das Velhas, conforme apresenta a Figura 6. A bacia do ribeirão Arrudas é uma das principais da cidade, não só por sua

extensão, mas também por ser onde começou o processo de urbanização do município (Cavalcanti, 2011). Ela se localiza na região sul de Belo Horizonte com uma área de 207,76 km² e engloba também os municípios de Contagem e Sabará, sendo que sua maior parte, aproximadamente 85%, encontra-se em Belo Horizonte (SUDECAP, 2015; Reis, 2011).

O ribeirão Arrudas é um dos afluentes do rio das Velhas, que por sua vez deságua no rio São Francisco. Sua nascente encontra-se em Belo Horizonte na Serra do Cachimbo e seu leito principal é formado pelo encontro das águas dos córregos Jatobá e Barreiro, com uma extensão até a foz de 30,6 km e declividade de 7m/km, o que ocasiona escoamentos em altas velocidades (SUDECAP, 2015). Utilizando a formulação de Kirpich e segundo os dados de extensão e declividade da SUDECAP (2015) é possível estimar o tempo de concentração da bacia do ribeirão Arrudas em 6,23 horas, ou seja, 6 horas e 14 minutos.



Escala 1:300.000

Figura 6 – Mapa das Grandes Bacias Hidrográficas de Belo Horizonte.
Fonte: SMOBI (2010).

Quanto à geologia, segundo Reis (2011), a bacia do ribeirão Arrudas está situada sobre os terrenos do Complexo de Belo Horizonte em sua porção norte e de Sequência Metassedimentar do Supergrupo Minas na parte sul. O primeiro grupo compreende as rochas gnáissicas do período Arqueano, em geral de médio a alto grau metamórfico, enquanto o

segundo se caracteriza pelas rochas paleoproterozóicas metassedimentares, que apresentam boa resistência ao intemperismo ocasionando o relevo acidentado.

A morfologia da região relaciona-se fortemente com sua geologia. As áreas do domínio geológico do Complexo de Belo Horizonte correlacionam-se à Depressão de Belo Horizonte e as rochas metassedimentares do Supergrupo Minas ao Quadrilátero Ferrífero (Cajazeiro, 2012). A Depressão de Belo Horizonte, na parte norte da bacia, é delimitada ao sul pela Serra do Curral e possui um relevo predominantemente composto por colinas suaves com altitude média entre 800 e 900 metros. A declividade da região aumenta em direção aos eixos de drenagem e possui valores médios de 0 a 12%. Por outro lado, a região do Quadrilátero Ferrífero apresenta altitudes elevadas com a máxima atingindo o valor de 1.510 metros e declividades altas, entre 45 e 90%, em quase toda a sua extensão (Cavalcanti, 2011; Cajazeiro, 2012).

A capital mineira possui um período seco, entre abril e setembro, e o outro chuvoso, de outubro a março, sendo o trimestre mais chuvoso os meses de novembro, dezembro e janeiro. Parizzi *et al.* (2010) atribuem o início das pancadas de chuva em outubro à elevação da temperatura. No mês de abril, é comum a ocorrência de chuvas intermitentes devido às frentes frias. Os autores ainda enfatizam o aumento de ocorrência das chuvas convectivas de forte intensidade proveniente da elevação da temperatura. A precipitação total anual é 1.491,3 mm e a umidade relativa média anual é de 77,3%.

Os sistemas atmosféricos são exemplos de fatores climáticos dinâmicos que afetam o clima de uma região. De acordo com Assis (2010), no município de Belo Horizonte se destacam os seguintes sistemas: o Anticiclone Subtropical Atlântico Sul (ASAS), o Anticiclone Subpolar Atlântico Sul (APAS), os Sistemas Frontais (SF), as Linhas de Instabilidade (LI), a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) e em menor recorrência a Alta da Bolívia (AB) e a Baixa do Chaco (BC). Cavalcanti (2011) enfatiza que os sistemas responsáveis pelas inundações em Belo Horizonte são os que geram clima de tempo instável com ocorrência de precipitação como os SF, especialmente as Frentes Frias, as LI, a ZCAS e esporadicamente AB e BC.

A ocupação da bacia do ribeirão Arrudas remete ao século XIX, com uma concepção de projeto higienista, ordenadora e estática. Com isso, a relação da cidade com seus recursos hídricos foi baseada na canalização dos seus córregos (Cavalcanti, 2011). A ocupação na região é predominantemente urbana acarretando alta impermeabilização do solo e grandes

modificações do ciclo hidrológico natural. As áreas mais densamente ocupadas encontram-se no município de Belo Horizonte, enquanto as regiões referentes aos municípios de Contagem e Sabará, a noroeste e leste, respectivamente, assim como a Serra do Curral a sudeste apresentam menos modificações. Esse intenso crescimento urbano favorece a ocorrência de inundações e em Belo Horizonte esses eventos vêm aumentando tanto em número como em intensidade (Nunes *et al.*, 2018).

4.1.1. Inundações em Belo Horizonte

A capital do estado de Minas Gerais sofre todos os anos com os efeitos das inundações. Sua característica de grandes declividades, somada ao fato de ser uma das maiores cidades do Brasil com uma população estimada em 2.513.451 segundo IBGE (2017), contribui para maximizar os impactos das chuvas. Para contornar essa situação, a Prefeitura de Belo Horizonte diversas vezes recorreu à abordagem clássica da drenagem que busca a rápida evacuação das águas através de canalizações. Somente a partir da década de 1990, medidas alternativas que buscavam antecipar os efeitos negativos das chuvas extremas foram adotadas (Paolucci, 2012).

Devido à demanda ambiental para inclusão dos cursos d'água no ambiente urbano, e também aos altos custos e às crises de funcionamento dos sistemas convencionais, a Lei Municipal de Nº 7.165/1996 instituiu o Plano Diretor Municipal de Belo Horizonte com um indicativo para elaboração do plano de drenagem. O PDDU, Plano Diretor de Drenagem Urbana, na sua primeira fase, incluía as ações de caracterização das bacias hidrográficas, cadastro da micro e macrodrenagem e a criação do Sistema de Informação Georreferenciado (SIG) de drenagem (Aroeira, 2010). A segunda etapa desse plano tinha como objetivo a modelagem matemática hidrológica e hidráulica dos córregos canalizados, o monitoramento da qualidade das águas, ampliação e atualização do SIG de drenagem, elaboração da Carta de Inundação, proposição de um novo modelo de gestão e a implantação do programa de monitoramento hidrológico e alerta contra inundações. A seguir serão descritos as cartas de inundações e o sistema de previsão e alerta desenvolvidos a partir do PDDU, assim como o plano de contingência que define as medidas a serem adotadas durante e depois as ocorrências de eventos de inundações.

4.1.1.1. Cartas de Inundações

A Carta de inundações do município de Belo Horizonte identifica as áreas potencialmente susceptíveis à inundações, auxiliando os gestores na tomada de decisão quanto à ocupação do solo nessas regiões. Além disso, fornece informações que subsidiam as decisões de

implantação de sistemas de previsão e alerta e estabelecem planos de rotas de fuga para a população local (Siqueira, 2017).

A carta foi desenvolvida com base em resultados de modelagem matemática, hidrológica e hidráulica dos sistemas de macrodrenagem realizada pela Companhia Brasileira de Projetos e Empreendimentos (Cobrape). Nesses estudos foram identificados os trechos de canais revestidos da macrodrenagem com insuficiência hidráulica, os quais foram verificados através de vistorias “*in loco*” e informações de moradores locais. Além disso, consideraram-se as manchas de inundação desenvolvidas pelo Programa de Recuperação Ambiental de Belo Horizonte, DRENURBS, para córregos com calha em situação natural (PMBH, 2009).

Através da equação IDF para a Região Metropolitana de Belo Horizonte foi possível atribuir períodos de retorno às precipitações que geravam extravasamento. Assim, foram construídos gráficos de risco para as áreas identificadas como susceptíveis, que associam a duração e altura da chuva ao risco de inundação. Nesse gráfico foram definidas as faixas de risco crítico, emergencial, alerta e normal segundo o tempo de retorno de extravasamento obtido através da modelagem matemática 1-D em regime de escoamento permanente (PMBH, 2009; Nascimento, 2011). A Figura 7 mostra um exemplo retirado da carta de inundação onde é possível observar para o córrego Barreiro (afluente do ribeirão Arrudas) a mancha de inundação e o gráfico de risco relacionando duração e altura de chuva.

Siqueira (2017) comparou os gráficos de risco da carta de inundação existentes, elaborados a partir de uma modelagem sem calibração, para a bacia do córrego Cachoeirinha, no município de Belo Horizonte, com os eventos observados e constatou que estes não representavam bem as faixas de risco observadas. A partir de uma nova modelagem, calibrada com níveis d’água observados, com o *Storm Water Management Model* (SWMM) a autora elaborou novos gráficos de risco que conseguiram representar bem os eventos observados no local principalmente para os que atingiram 50% da altura da calha, localizados na faixa de alerta.

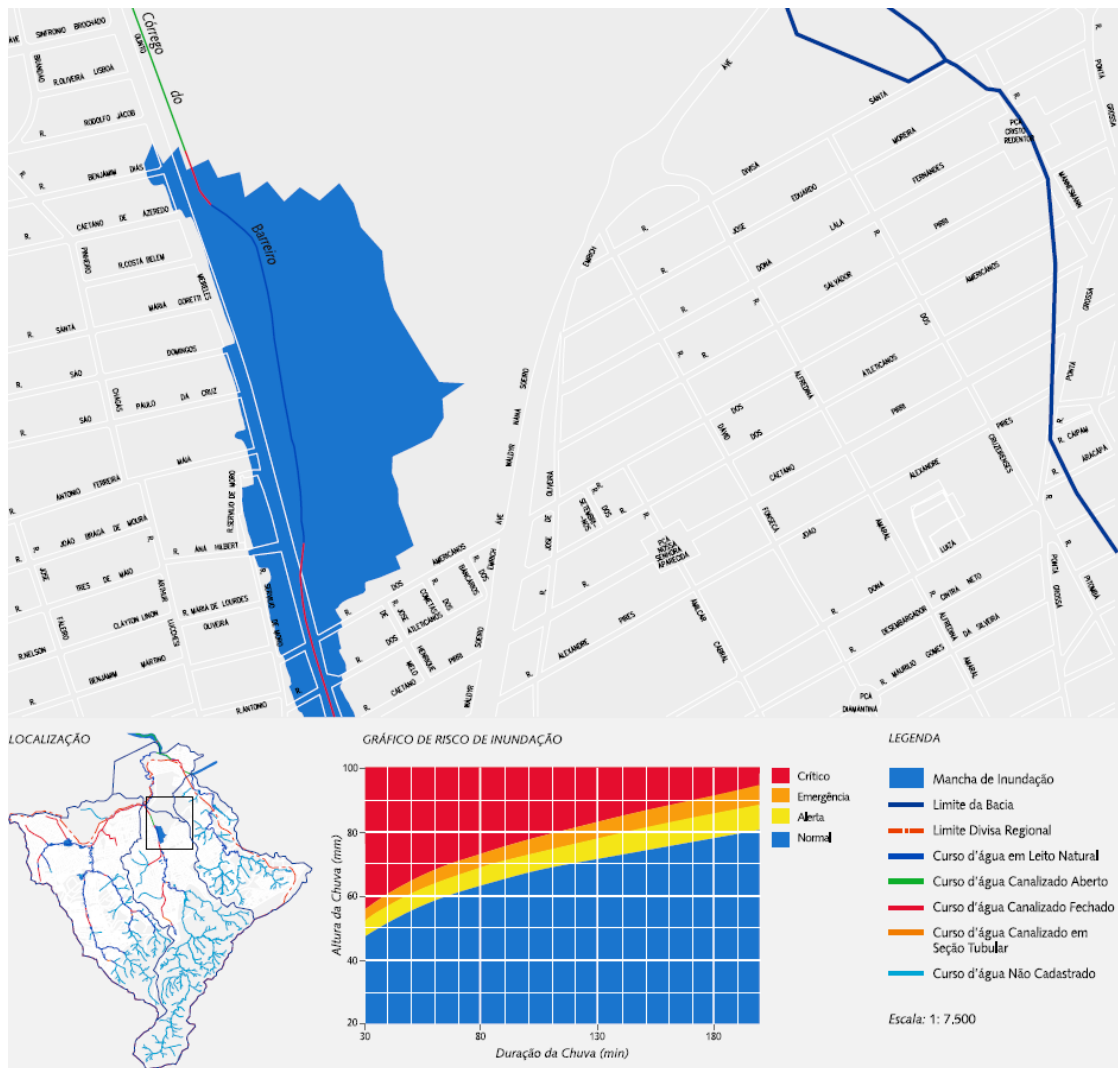


Figura 7 - Mancha de inundação e gráfico de risco para córrego Barreiro da carta de inundação da regional Barreiro.
Fonte: PMBH (2009).

4.1.1.2. Sistema de Previsão e Alerta

Em Belo Horizonte, o Sistema Municipal de Defesa Civil (SIMDEC) unifica os órgãos da Prefeitura de Belo Horizonte para atender às ações de proteção da população (PMBH, 2017). Esse sistema é articulado pelo GEAR (Grupo Executivo de Áreas de Risco), coordenado pela COMDEC (Coordenadoria Municipal de Defesa Civil), Urbel (Companhia Urbanizadora e de Habitação de Belo Horizonte), SUDECAP (Superintendência de Desenvolvimento da Capital) e COP (Centro de Operações de Belo Horizonte). Além desses, o grupo é composto por representantes de múltiplas instituições que compõem o SIMDEC (PMBH, 2016) e apresentam competências específicas dentro dos planos de contingência. A Figura 8 sintetiza as etapas envolvidas no sistema de previsão e alerta de Belo Horizonte, que são descritas a seguir.

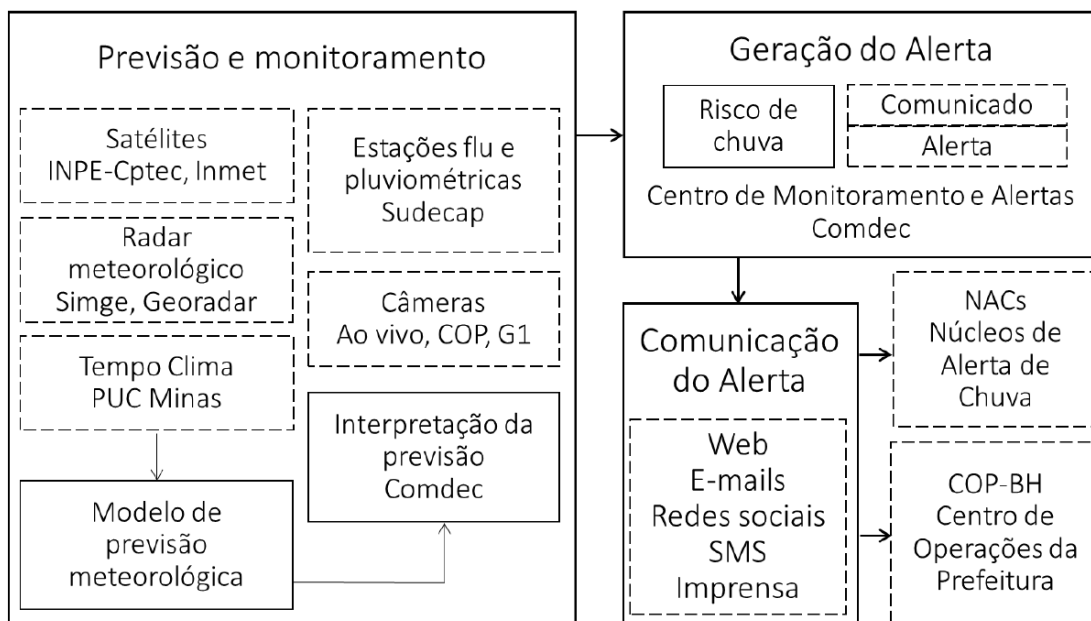


Figura 8 - Diagrama do arranjo do sistema de previsão e alerta do município de Belo Horizonte.

Fonte: Rosa (2017).

A COMDEC é responsável por manter o Centro de Monitoramento e Alerta de Risco (CMAR) e tem como um dos objetivos operacionalizar o sistema de monitoramento hidrológico e alerta contra inundações. Para o monitoramento são utilizadas informações de imagem de satélite, radar meteorológico, modelos numéricos de previsão de tempo e estações hidrometeorológicas (PMBH, 2016). O CMAR recebe a previsão meteorológica do Sistema Mineiro de Meteorologia (SIMGE) e do TempoClima, da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais (PUC-MG). Quando um evento é identificado, este passa a ser monitorado em tempo real por meio de câmeras localizadas em diversos pontos da cidade e a partir da interpretação desse conjunto de informações, a equipe técnica do COMDEC decide sobre a emissão do alerta (Rosa, 2017).

Os alertas emitidos em Belo Horizonte têm três funções básicas: difundir para toda a sociedade a possibilidade de precipitações para permitir a adoção de medidas individuais; alertar moradores de áreas que compõem os Núcleos de Alerta de Chuva (NACs), devidamente treinados e capacitados, para adotar medidas preventivas de redução de prejuízos financeiros e preservação da vida; e alertar os órgãos da PMBH para que possam se posicionar nos locais de maior risco em tempo oportuno. A informação pode ser difundida da forma de Comunicado, quando o volume esperado de chuva acumulada for inferior a 20 mm, ou na forma de Alerta, quando o volume acumulado esperado for superior a 20 mm. Essas informações são divulgadas via e-mail e telefone aos gestores da PMBH, via SMS aos

membros dos NACs e via redes sociais (Twitter e Facebook) e sites oficiais à toda sociedade (PMBH, 2016).

Os NACs foram estruturados em 2009 e são constituídos por grupos comunitários formados por representantes de moradores ou trabalhadores situados nas regiões de risco. Ao todo existem mais de 40 NACs, com mais de 400 voluntários envolvidos (SUDECAP, 2010). Eles têm a função de consolidar o sistema de alerta através do planejamento de ações preventivas e de socorro, como a criação de dinâmicas de comunicação para disseminação dos alertas, criação de rotas de fuga e localização de pontos de apoio. Todas essas ações são subsidiadas por uma equipe técnica da SUDECAP através de eventos de capacitação e vistorias conjuntas às áreas inundáveis (ABCP, 2017). Em setembro de 2011, teve início a operação do sistema de monitoramento e alerta proposto pelo PDDU e para fins de ações da defesa civil foram definidos os níveis de alerta das estações fluviométricas da seguinte maneira (PMBH, 2013):

- Alerta Amarelo: 50% da altura do canal fechado ou da restrição, no canal aberto.
- Alerta Laranja: 80% da altura do canal fechado ou da restrição, no canal aberto.
- Alerta Vermelho: extravasamento.

O sistema de monitoramento hidrológico foi um dos produtos da segunda etapa do Plano Diretor de Drenagem Urbana, instituído na Lei de Nº 7.165/1996. Ao todo são 42 estações, sendo 04 climatológicas, 11 pluviométricas e 27 fluviométricas, implantadas em áreas estratégicas do Município (Siqueira *et al.*, 2013). Na bacia do ribeirão Arrudas localizam-se 20 dessas estações, dentre as quais 02 climatológicas, 06 pluviométricas e 15 fluviométricas, além de 08 estações pluviográficas da Urbel. A escolha da localização dessas estações foi baseada no diagnóstico do sistema de drenagem que gerou as Cartas de Inundações, na caracterização das bacias, considerando a melhor representatividade dos dados e na segurança dos equipamentos (Siqueira, 2017).

As estações dispõem de sensores tipo báscula para medição de precipitação, sensores de nível piezoresistivo ou ultrassônico e sensores climatológicos para medição de temperatura, pressão atmosférica, umidade relativa do ar e direção e velocidade do vento. As estações são conectadas à internet via redes *General Packet Radio Services* (GPRS) e 3G de diversas operadoras de telefonia e enviam os dados em tempo real, de 10 em 10 minutos (Rosa, 2017; Siqueira, 2017).

4.1.1.3. Plano de Contingência

O Plano de Contingência para Enfrentamento de Desastres no Município de Belo Horizonte (PMBH, 2016) objetiva orientar ações que vão desde prevenção até etapas pós-desastre. Nele é apresentado um breve diagnóstico das áreas de risco do município e uma descrição do Sistema Municipal de Defesa Civil (SIMDEC) indicando os órgãos que o compõe e suas atribuições. Segundo o plano, o SIMDEC é um conjunto de ações que busca minimizar os efeitos dos desastres de maneira sistêmica envolvendo todos os órgãos públicos, entidades privadas e também a comunidade.

No plano são detalhados os critérios para emissão do alerta assim como sua forma de divulgação. Além disso, são definidos os critérios para mobilização diante da possibilidade de inundação. De maneira geral com a confirmação da previsão de chuvas de 20 mm em 10 minutos, equipes disponíveis são enviadas aos locais estratégicos para monitoramento visual e realização de medidas preventivas. Algumas localidades possuem critério próprio de mobilização, o plano apresenta 7 locais com critérios que variam de 10 a 15 mm de chuva em 10 minutos e/ou nível d'água do córrego no nível de alerta amarelo. Para a desmobilização das equipes também são apresentados critérios por região.

A comunicação operacional da Defesa Civil é feita através de todo tipo de tecnologia disponível, sendo que em casos de colapso nas redes de telefones celulares serão utilizados linhas de telefones fixos ou a rede de rádio da Guarda Municipal. O Centro de Operações de Belo Horizonte (COP-BH) serve como principal canal de articulação das instituições envolvidas na resposta a uma situação de emergência. As ações tomadas durante um desastre vão de acordo com sua magnitude e tipo. Em casos de inundações, o plano prevê dentre outras ações, a evacuação, delimitação e isolamento das áreas alagadas e comprometidas e o acionamento da BHTrans, Guarda Municipal e Corpo de Bombeiros (PMBH, 2016).

Com o objetivo de avaliar a última versão do plano de Belo Horizonte, Fernandes *et al.* (2017) analisam o Plano de Contingência para Enfrentamento de Desastres no Município de Belo Horizonte (PMBH, 2016) segundo critérios propostos por Chaib *et al.* (2013), verificando quais falhas apontadas pelos autores para o plano anterior foram atendidas e quais ainda persistem. Além disso, foi realizada uma descrição dos pontos inéditos e das novas atribuições dos diferentes órgãos envolvidos. Os autores observam que a etapa de reconstrução recebeu mais destaque quando comparada à anterior, mas ainda assim são necessárias delimitações mais precisas para as ações. Conclui-se que as atualizações do novo

plano são significativas e importantes, mas alguns pontos importantes ainda foram negligenciados como regulamentação do uso do solo segundo o risco de inundação e a análise e mapeamento de vulnerabilidade à inundação e ao risco geotécnico, que caberiam na fase de prevenção/mitigação.

4.1.2. Dados Levantados

As estações fluviométricas utilizadas nesse trabalho localizam-se na calha principal do ribeirão Arrudas, são elas as estações 24, 30, 32, 33 e 35. A calha do ribeirão encontra-se canalizada, revestida de concreto e com seções regulares que variam ao longo do seu curso. Nas estações 24 e 30 as seções são do tipo retangular triangular, a estação 32 apresenta uma seção retangular enquanto as estações 33 e 35 se apresentam como uma combinação de formas geométricas conforme mostra a Tabela 4. Além disso, a tabela apresenta as dimensões de cada seção e a profundidade de cada tipo de alerta por estação, visto que esse é função da profundidade e por isso varia conforme varia a geometria da seção.

Tabela 4 - Dimensões e formato das seções nas estações de interesse.

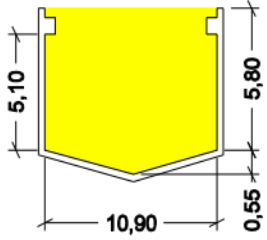
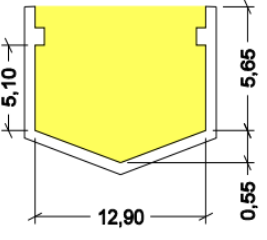
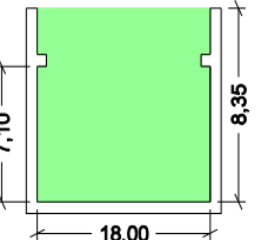
	Estação 24	Prof. (m)	6,35	
	Alertas	% da Seção	Prof (m)	
	Amarelo	50	3,175	
	Laranja	80	5,08	
	Vermelho	100	6,35	
	Estação 30	Prof. (m)	6,2	
	Alertas	% da Seção	Prof (m)	
	Amarelo	50	3,1	
	Laranja	80	4,96	
	Vermelho	100	6,2	
	Estação 32	Prof. (m)	8,35	
	Alertas	% da Seção	Prof (m)	
	Amarelo	50	4,175	
	Laranja	80	6,68	
	Vermelho	100	8,35	

Tabela 4 – Continuação.

Estação 33	Prof. (m)	8,4	
	Alertas	% da Seção	Prof (m)
	Amarelo	50	4,2
	Laranja	80	6,72
	Vermelho	100	8,4
Estação 35	Prof. (m)	7,8	
	Alertas	% da Seção	Prof (m)
	Amarelo	50	3,9
	Laranja	80	6,24
	Vermelho	100	7,8

Fonte: Elaborado a partir do atlas do PDD (PMBH, 2002).

Os dados da bacia utilizados na modelagem, como uso do solo, declividade e a divisão em sub-bacias foram obtidos com Lima (2018). Para representação da bacia do ribeirão Arrudas foi utilizada uma divisão em 6 sub-bacias segundo as áreas de contribuição das estações de monitoramento. Dessa forma foram selecionadas 5 sub-bacias que contribuem para cada uma das estações 24 a 35 e mais uma sub-bacia representando o exutório, conforme Figura 9.

Segundo Ramos (1998), a classificação dos solos de Belo Horizonte relaciona-se com os grupos litológicos do território do município. Dessa forma, os solos do Complexo de Belo Horizonte enquadram-se no grupo hidrológico B, enquanto os do Supergrupo Minas são considerados do grupo D, sendo estabelecida a calha do ribeirão Arrudas como divisor dos dois grupos. Assim, na porção norte da bacia encontra-se solo tipo B e na porção sul do tipo D.

O uso do solo na bacia do ribeirão Arrudas é predominantemente constituído por área construída. Observa-se também a presença de vegetação arbórea e rasteira, principalmente na parte sul, próximo à Serra do Curral e em menor quantidade, solo exposto e cursos d'água. As distribuições do uso e ocupação do solo, assim como suas porcentagens em função da área por sub-bacia definida para modelagem são apresentadas no Apêndice 1. Essa definição foi feita através de imagens de satélite (*Rapideye*) com uma malha de 5 x 5 metros. Conforme descrito

no item anterior, a declividade da região é bastante variável apresentando valores acentuados a medida que se aproxima do limite sul da bacia onde se localiza a Serra do Curral.

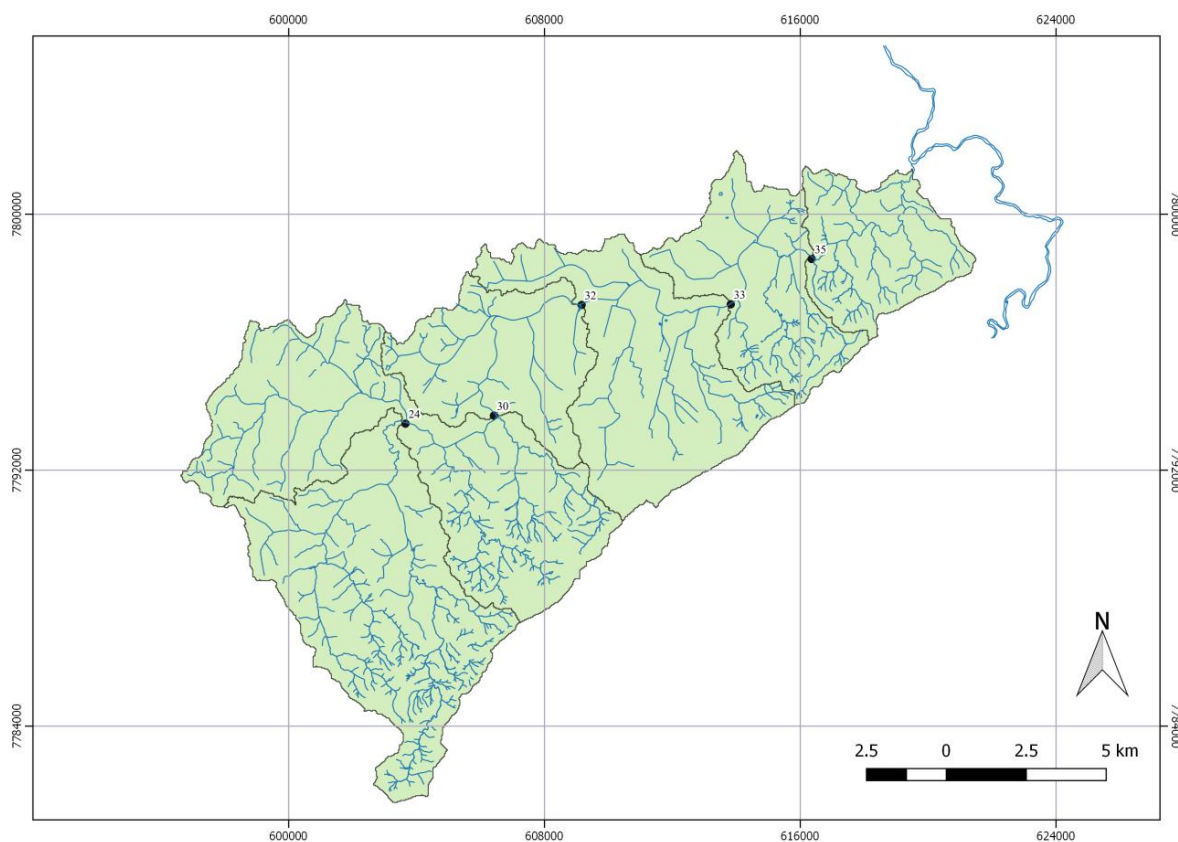


Figura 9 – Delimitação das sub-bacias da bacia do Arrudas segundo as áreas de drenagem das estações fluviométricas 24, 30, 32, 33 e 35.

Nesse trabalho foram utilizadas as medições fornecidas por 05 estações fluviométricas indicadas anteriormente que fornecem medições de precipitação e nível em intervalos de 10 minutos. As estações estão espaçadas ao longo do ribeirão com uma distância média de 5,60 km, sendo que a estação mais a montante, a 24, está instalada no bairro Vila São Paulo, e as demais estão nos bairros Betânia, Barro Preto, Santa Efigênia e São Geraldo, respectivamente (Figura 10). Os eventos selecionados a partir dos dados obtidos nessas estações estão detalhados a seguir.

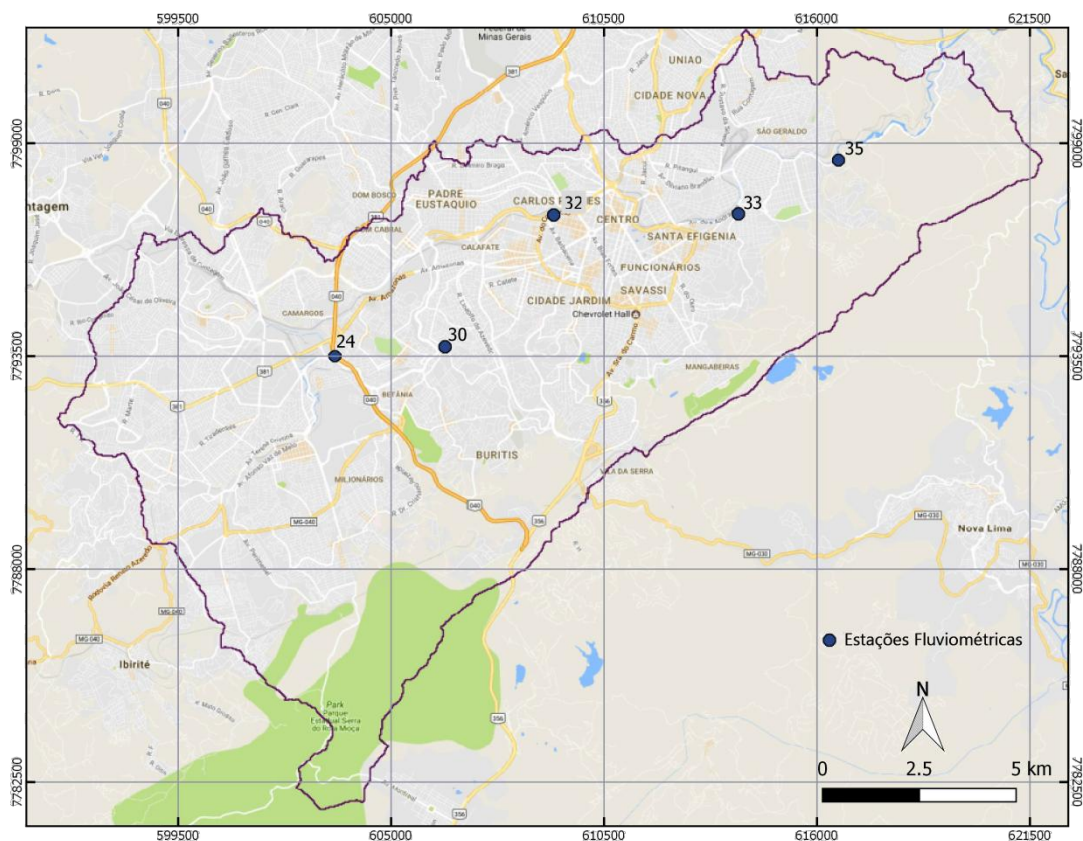


Figura 10 – Localização das estações fluviométricas 24, 30, 32, 33 e 35.

4.1.3. Eventos Selecionados

Os dados de precipitação e nível foram separados em eventos segundo duas categorias: eventos que geraram alerta e eventos que não geraram. Ao todo foram selecionados 25 eventos que geraram quaisquer um dos alertas em pelo menos uma das estações analisadas e 5 eventos que não geraram alerta mas que registraram um nível d'água relativamente alto, na faixa de 1,5 metros para pelo menos uma das estações. Para os eventos selecionados que geraram alerta, também foi feita a conferência do alerta do sistema, ou seja, foi comparado o alerta dado com a altura máxima atingida para verificar se o emitido correspondeu ao que realmente aconteceu.

A seleção foi feita considerando eventos simples que geraram o pico de profundidade observada considerando o intervalo sem chuva máximo de 30 minutos. A Tabela 5 mostra os eventos sem alerta juntamente com duração (min), a precipitação acumulada (mm), intensidade máxima (mm/h) e profundidade máxima atingida (m). A intensidade máxima foi obtida considerando a maior precipitação medida no intervalo de 10 minutos, as estações que estão destacadas em negrito apresentaram falhas no evento considerado e as estações sem registro para o evento selecionado foram indicadas com a sigla SR. Na Tabela 6 são

apresentados os eventos com alerta, além das informações existentes na tabela anterior são apresentados os tipos de alerta gerados para cada estação e a verificação em relação ao alerta ocorrido. Para os eventos simulados, foram utilizados dados de um dia antes e um dia depois, assim para o evento do dia 23/11/2011, por exemplo, utilizou-se os registros de 22/11/2011 as 00:00 até 24/11/2011 as 23:50.

Tabela 5 - Eventos sem alerta selecionados e suas características.

Evento	Estação	Duração (min)	Precipitação Acumulada (mm)	Precipitação Máxima (mm)	Intensidade Máxima (mm/h)	Profund. Máxima (m)
29/10/2012	24	30	0,8	0,4	2,4	0,78
	30	40	2,0	0,8	4,8	0,67
	32	30	1,4	0,6	3,6	0,91
	33	50	1,0	0,4	2,4	1,21
	35	-	0	0	0	1,50
29/09/2013	24	-	0	0	0	1,40
	30	50	11,4	3,6	21,6	1,74
	32	50	4,2	1,8	10,8	1,85
	33	50	5,2	2,8	16,8	1,98
	35	40	10,8	7,0	42,0	1,75
02/10/2013	24	-	0	0	0	2,08
	30	40	13,0	8,6	51,6	2,25
	32	50	12,4	5,0	30,0	2,78
	33	40	8,6	4,8	28,8	2,28
	35	5	15,4	8,0	48,0	2,17
09/10/2013	24	420	18,6	1,0	6,0	1,10
	30	400	19,0	1,2	7,2	0,91
	32	470	18,2	1,2	7,2	1,39
	33	490	16,6	0,8	4,8	1,55
	35	550	18,6	1,0	6,0	1,54
17/11/2013	24	50	9,4	5,2	31,2	1,87
	30	40	10,4	4,6	27,6	1,54
	32	20	2,2	1,2	7,2	2,68
	33	-	0	0	0	2,22
	35	-	0	0	0	2,00

Nota: A intensidade máxima foi obtida considerando a maior precipitação medida no intervalo de 10 minutos.

Tabela 6 - Eventos com alerta selecionados e suas características.

Evento	Estação	Duração (min)	Precipitação Acumulada (mm)	Precipitação Máxima (mm)	Intensidade Máxima (mm/h)	Profund. Máxima (m)	Alerta Emitido	Verificação do Alerta
14/11/2011	24	180	43,2	20,0	120,0	6,66	Vermelho	Vermelho
	30	200	36,6	17,8	106,8	4,33	Amarelo	Amarelo
	32	SR	SR	SR	SR	SR	-	-
	33	230	27,4	4,6	27,6	3,21	-	-
	35	230	45,0	9,8	58,8	2,82	-	-
23/11/2011	24	90	70,4	19,4	116,4	3,59	Amarelo	Amarelo
	30	100	78,8	17,0	102,0	4,54	Amarelo	Amarelo
	32	SR	SR	SR	SR	SR	-	-
	33	90	43,6	16,2	97,2	4,01	-	-
	35	100	50,2	16,0	96,0	1,40	-	-
01/12/2011	24	80	17,4	6,4	38,4	2,01	-	-
	30	30	12,8	11,6	69,6	2,98	Amarelo	-
	32	SR	SR	SR	SR	SR	-	-
	33	50	24,6	12,4	74,4	3,05	-	-
	35	300	15,8	0,8	4,8	3,17	-	-
12/12/2011	24	60	24,0	17,8	106,8	1,57	-	-
	30	90	71,0	26,8	160,8	3,16	Amarelo	Amarelo
	32	SR	SR	SR	SR	SR	-	-
	33	80	10,6	3,4	20,4	3,77	Amarelo	-
	35	20	0,4	0,2	1,2	3,67	-	-
14/12/2011	24	240	54,2	5,8	34,8	3,69	Amarelo	Amarelo
	30	230	53,0	7,2	43,2	4,16	Amarelo	Amarelo
	32	SR	SR	SR	SR	SR	-	-
	33	550	74,6	8,2	49,2	3,79	Amarelo	-
	35	700	88,2	2,4	14,4	3,58	-	-

Tabela 6 - Continuação.

Evento	Estação	Duração (min)	Precipitação Acumulada (mm)	Precipitação Máxima (mm)	Intensidade Máxima (mm/h)	Profund. Máxima (m)	Alerta Emitido	Verificação do Alerta
26/12/2011	24	230	43,2	10,6	63,6	3,05	Amarelo	-
	30	240	53,6	13,4	80,4	3,18	Amarelo	Amarelo
	32	SR	SR	SR	SR	SR	-	-
	33	180	31,2	7,8	46,8	3,04	-	-
	35	580	17,6	0,6	3,6	2,76	-	-
27/12/2011	24	130	39,0	9,8	58,8	4,04	Amarelo	Amarelo
	30	140	33,0	8,4	50,4	4,45	Laranja	Amarelo
	32	SR	SR	SR	SR	SR	-	-
	33	130	28,8	8,6	51,6	3,50	Amarelo	-
	35	-	0	0	0	3,33	-	-
29/01/2012	24	100	33,0	8,2	49,2	3,71	Amarelo	Amarelo
	30	110	34,6	6,6	39,6	3,96	Amarelo	Amarelo
	32	SR	SR	SR	SR	SR	-	-
	33	180	45,0	21,0	126,0	3,96	Amarelo	-
	35	200	38,6	12,6	75,6	4,23	Amarelo	Amarelo
30/01/2012	24	50	33,6	14,2	85,2	3,93	Amarelo	Amarelo
	30	60	33,8	13,2	79,2	4,16	Amarelo	Amarelo
	32	SR	SR	SR	SR	SR	-	-
	33	70	31,4	10,4	62,4	3,87	Amarelo	-
	35	70	21,0	7,2	43,2	4,09	Amarelo	Amarelo
15/11/2012	24	160	59,6	15,4	92,4	7,19	Vermelho	Vermelho
	30	140	65,6	25,2	151,2	4,51	Amarelo	Amarelo
	32	150	79,8	32,2	193,2	6,23	Amarelo	Amarelo
	33	160	64,2	21,4	128,4	4,27	Amarelo	Amarelo
	35	150	63,4	26,6	159,6	4,44	Amarelo	Amarelo

Tabela 6 - Continuação.

Evento	Estação	Duração (min)	Precipitação Acumulada (mm)	Precipitação Máxima (mm)	Intensidade Máxima (mm/h)	Profund. Máxima (m)	Alerta Emitido	Verificação do Alerta
03/12/2012	24	140	34,4	7,0	42,0	3,88	Amarelo	Amarelo
	30	30	8,8	4,0	24,0	3,30	Amarelo	Amarelo
	32	40	4,4	2,4	14,4	4,35	Amarelo	Amarelo
	33	-	0	0	0	3,02	-	-
	35	-	0	0	0	2,76	-	-
12/12/2012	24	140	44,1	17,6	105,6	3,47	Amarelo	Amarelo
	30	50	6,6	3,2	19,2	3,30	Amarelo	Amarelo
	32	50	6,0	2,6	15,6	4,41	Amarelo	Amarelo
	33	90	11,8	6,8	40,8	3,02	-	-
	35	30	1,2	0,8	4,8	2,74	-	-
07/01/2013	24	60	1,4	0,6	3,6	1,44	Amarelo	-
	30	240	33,0	3,6	21,6	1,79	-	-
	32	220	69,8	20,8	124,8	3,57	-	-
	33	220	27,2	5,0	30,0	3,05	-	-
	35	80	56,4	16,6	99,6	3,16	-	-
11/04/2013	24	50	3,0	1,0	6,0	0,92	Laranja	-
	30	50	2,0	0,6	3,6	0,78	Amarelo	-
	32	SR	SR	SR	SR	SR	Amarelo	-
	33	50	1,4	0,4	2,4	1,53	Amarelo	-
	35	30	4,4	3,2	19,2	1,43	Amarelo	-
13/04/2013	24	170	20,8	12,2	73,2	3,53	Amarelo	Amarelo
	30	170	15,2	6,2	37,2	3,23	Amarelo	Amarelo
	32	SR	SR	SR	SR	SR	-	-
	33	160	11,8	3,4	20,4	2,72	-	-
	35	160	10,0	3,8	22,8	2,35	-	-

Tabela 6 - Continuação.

Evento	Estação	Duração (min)	Precipitação Acumulada (mm)	Precipitação Máxima (mm)	Intensidade Máxima (mm/h)	Profund. Máxima (m)	Alerta Emitido	Verificação do Alerta
06/12/2013	24	60	25,6	15,2	91,2	3,83	Amarelo	Amarelo
	30	50	29,0	17,0	102,0	3,63	Amarelo	Amarelo
	32	SR	SR	SR	SR	SR	-	-
	33	50	26,0	16,4	98,4	3,10	Amarelo	-
	35	-	0	0	0	1,48	-	-
07/12/2013	24	180	54,6	23,4	140,4	4,06	Amarelo	Amarelo
	30	180	41,0	10,4	62,4	3,43	Amarelo	Amarelo
	32	SR	SR	SR	SR	SR	-	-
	33	170	41,4	9,2	55,2	3,55	Amarelo	-
	35	180	29,8	9,0	54,0	3,33	-	-
11/12/2013	24	600	104,4	16,6	99,6	5,15	Laranja	Laranja
	30	500	81,6	14,2	85,2	4,22	Amarelo	Amarelo
	32	SR	SR	SR	SR	SR	-	-
	33	600	89,8	12,4	74,4	3,66	Amarelo	-
	35	190	56,4	13,8	82,8	4,07	Amarelo	Amarelo
23/12/2013	24	220	35,8	7,8	46,8	3,69	Amarelo	Amarelo
	30	190	37,8	6,0	36,0	3,05	Amarelo	-
	32	SR	SR	SR	SR	SR	-	-
	33	200	37,0	5,0	30,0	2,98	-	-
	35	230	41,2	5,0	30,0	2,86	-	-
25/12/2013	24	270	75,2	16,2	97,2	6,74	Vermelho	Vermelho
	30	SR	SR	SR	SR	SR	-	-
	32	SR	SR	SR	SR	SR	Laranja	-
	33	SR	SR	SR	SR	SR	-	-
	35	30	1,8	0,8	4,8	1,59	-	-

Tabela 6 - Conclusão.

Evento	Estação	Duração (min)	Precipitação Acumulada (mm)	Precipitação Máxima (mm)	Intensidade Máxima (mm/h)	Profund. Máxima (m)	Alerta Emitido	Verificação do Alerta
26/12/2013	24	110	27,8	7,6	45,6	3,99	Amarelo	Amarelo
	30	SR	SR	SR	SR	SR	-	-
	32	SR	SR	SR	SR	SR	-	-
	33	SR	SR	SR	SR	SR	-	-
	35	80	42,4	16,8	100,8	2,55	-	-
17/01/2014	24	100	20,8	8,8	52,8	4,10	Amarelo	Amarelo
	30	SR	SR	SR	SR	SR	-	-
	32	SR	SR	SR	SR	SR	-	-
	33	80	4,0	1,8	10,8	2,83	-	-
	35	SR	SR	SR	SR	SR	-	-
18/01/2014	24	200	24,1	8,8	52,8	2,82	Amarelo	-
	30	270	21,6	6,4	38,4	2,48	-	-
	32	SR	SR	SR	SR	SR	-	-
	33	30	5,8	3,6	21,6	2,38	-	-
	35	SR	SR	SR	SR	SR	-	-
14/02/2014	24	40	1,4	0,6	3,6	2,87	Amarelo	-
	30	SR	SR	SR	SR	SR	-	-
	32	-	0	0	0	2,52	-	-
	33	-	0	0	0	2,30	-	-
	35	SR	SR	SR	SR	SR	-	-
02/04/2014	24	120	27,8	4,4	26,4	4,09	Amarelo	Amarelo
	30	130	75,8	25,2	151,2	3,62	-	Amarelo
	32	SR	SR	SR	SR	SR	-	-
	33	190	28,2	5,2	31,2	3,42	-	-
	35	SR	SR	SR	SR	SR	-	-

Nota: A intensidade máxima foi obtida considerando a maior precipitação medida no intervalo de 10 minutos, as estações que estão destacadas em negrito apresentaram falhas no evento considerado e as estações que não apresentaram registro para o evento selecionado estão destacadas com a sigla SR.

4.2. Modelo SWMM

4.2.1. Embasamento Teórico

O *Storm Water Management Model* – SWMM da *United State Environmental Protection Agency* (US EPA) foi desenvolvido no ano de 1971 e se mantém em contínua atualização encontrando-se na versão 5. O modelo dinâmico de chuva-vazão é usado para um único evento chuvoso ou para simulações contínuas de longo prazo da quantidade e qualidade da água, especialmente em áreas urbanas (Rossman e Huber, 2016).

O SWMM representa o sistema de drenagem urbana através de fluxos de água e materiais entre diversos componentes ambientais que se dividem em produção, transferência e propagação. A componente de produção é responsável pela transformação da precipitação total em precipitação efetiva. Em seguida, o módulo de transferência recebe essa precipitação efetiva e transforma em escoamento superficial e por último, o módulo de propagação formado pelos elementos da rede como canais, tubulações, estações elevatórias, e por unidades de armazenamento e tratamento de águas, transporta a água para a saída do sistema.

Segundo Rossman e Huber (2016), o SWMM é um modelo distribuído e discreto que computa suas variáveis em intervalos de tempo, onde a cada intervalo novos valores de entrada são acrescentados ao sistema. Assim, à medida que as variáveis de estado são atualizadas, as variáveis de saída relacionadas são calculadas, conforme apresenta a Figura 11.

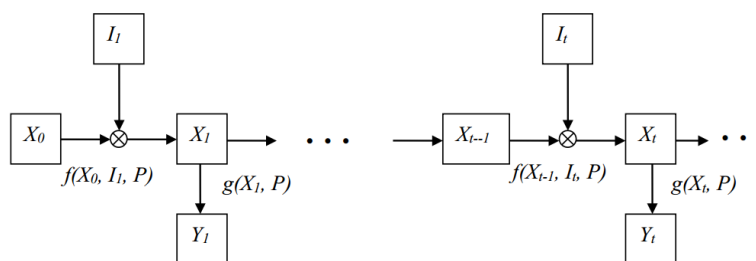


Figura 11 – Diagrama do processo de cálculo do SWMM.

Fonte: Rossman e Huber, 2016.

As letras X_t e Y_t representam os vetores das variáveis de estado e de saída no tempo t , respectivamente, I_t é o vetor de entradas no tempo t , P representa os vetores de parâmetros constantes e f e g são as funções de transformação dos vetores das variáveis de estado e de saída.

A bacia hidrográfica é representada como um conjunto de sub-bacias e canais de propagação interconectados divididas em subáreas impermeáveis com armazenamento, e permeáveis com e sem armazenamento. A transformação da precipitação em escoamento ocorre com base nos dados de precipitação, assim como infiltração nas áreas permeáveis, detenção em pontos de armazenamento e escoamento superficial e em canais (Amaral, 2014). Como o modelo é distribuído, a área de estudo pode ser subdividida para que a variabilidade espacial topográfica, de drenagem, cobertura e características do solo sejam melhor representadas.

Comumente, a infiltração corresponde à maior parcela de perdas nas regiões permeáveis. O SWMM permite ao usuário selecionar um método de cálculo de infiltração dentre cinco opções: método do NRCS, Horton e Horton modificado e o método de Green-Ampt e Green-Ampt modificado. Todos os cinco métodos utilizam parâmetros que dependem diretamente das características do solo (Rossman e Huber, 2016).

A bacia é retratada de forma retangular com inclinação constante e uma largura que drena toda a água para uma única saída. A estimativa do escoamento superficial é feita através da modelagem da bacia como um reservatório não linear fictício, combinando as equações de Manning e da continuidade resolvidas pelo processo iterativo de Newton-Raphson (Amaral, 2014). A entrada é dada pela precipitação, e as perdas por evaporação e infiltração, conforme demonstrado na Figura 12. A diferença entre a entrada e as perdas é depositada na bacia a uma altura d , parte dessa água depositada é armazenada em depressões (d_s) que representa as abstrações iniciais, como, por exemplo, interceptação em telhados e vegetação, e a parte acima da profundidade d_s se torna escoamento superficial.

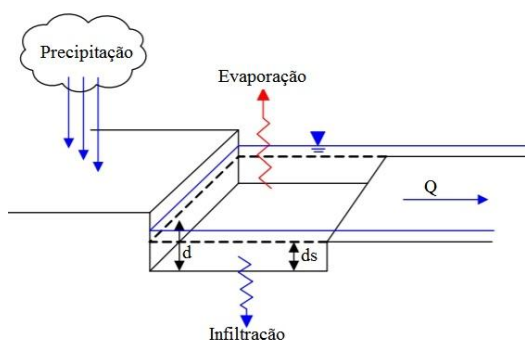


Figura 12 – Modelo de reservatório não linear da bacia.

Fonte: Adaptado de Autodesk (2013).

O método de propagação do escoamento nos elementos da rede de drenagem também pode ser definido pelo usuário dentre as opções de fluxo permanente, onda cinemática e onda

dinâmica. As redes são representadas por nós, que possuem características de armazenamento e por ligações entre eles, onde ocorre a propagação do fluxo.

Conforme Autodesk (2013), o fluxo permanente é o mais simples e assume que o escoamento é uniforme e permanente ao longo do tempo, simplesmente deslocando os hidrogramas de montante para jusante do canal. Esse método somente pode ser usado para redes nas quais cada nó possua apenas uma ligação de saída, sendo apropriado apenas em análises preliminares para redes muito grandes ou simulações contínuas de longo prazo.

O método da onda cinemática utiliza a equação da continuidade em conjunto com a equação da quantidade de movimento simplificada em cada canal ou tubulação. A equação do momento requer que a inclinação da superfície de água seja igual à do conduto, além disso, o máximo de água que pode ser transportado é o valor referente à seção plena na equação de Manning. Em compensação, esse método consegue manter estabilidade numérica com intervalos de tempo relativamente grandes, na ordem de 5 a 15 minutos (Autodesk, 2013; Rossman, 2015).

Embora eficiente, a onda cinemática não consegue representar situações de remanso, perdas nas entradas e saída e nem, principalmente, situações de escoamento forçado. Para isso, é necessário utilizar o método da onda dinâmica que utiliza as equações unidimensionais completas de Saint Venant, aplicando a equação da continuidade aos nós e a equação da quantidade de movimento às ligações. Por ser um método mais complexo, exige intervalos de tempo menores para manter a estabilidade numérica (Amaral, 2014; Rossman, 2015).

4.2.2. Modelo Desenvolvido

A modelagem no SWMM requer a inserção das principais características das estruturas hidráulicas e componentes hidrológicos da bacia, assim como dos pluviômetros. Esta foi feita por Lima (2018)¹ através da representação da porção canalizada da calha principal do ribeirão Arrudas, sendo necessárias algumas correções e adaptações e conseqüentemente, uma nova calibração para o presente estudo. O método de infiltração adotado foi o do NRCS que requer informações sobre a condição de umidade antecedente e do *curve number* (CN). A propagação foi feita utilizando o método da onda cinemática que, embora apresente algumas simplificações, é eficiente para a configuração final do modelo desenvolvido e consegue

¹ Doutorado em desenvolvimento no Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos da UFMG.

manter a estabilidade numérica com intervalos relativamente grandes, diminuindo o esforço computacional. A configuração final do modelo, após modificações, apresentou 192 nós e 6 sub-bacias.

As áreas das sub-bacias foram obtidas através do ArcGIS e as estações pluviométricas utilizadas são as que dão nome a elas. Os armazenamentos em depressões das áreas permeáveis e impermeáveis (S-Perv e S-Imperv), assim como a porcentagem de área impermeável que não possui armazenamento em depressões (PctZero) foram obtidos a partir de uma calibração preliminar realizada por Lima (2018) e seus valores foram mantidos devido à baixa sensibilidade do modelo a esses parâmetros. A Tabela 7 apresenta os valores adotados. Todo o escoamento de ambas as áreas impermeáveis e permeáveis vão direto para a saída da bacia (*outlet*). Quanto às características dos nós, adotou-se a profundidade máxima igual à profundidade do conduto, a inicial como sendo zero e no nó mais a montante adotou-se um escoamento de base de 2 m /s. Não foi considerada contribuição de esgoto uma vez que a partir da análise visual foram observadas apenas oscilações graduais da ordem de 5 a 10 cm.

A declividade e largura característica da bacia foram parâmetros calibrados novamente sendo o intervalo de calibração obtido através de estimativas no ArcGIS. Através de imagem de satélite, também foi possível definir intervalos de calibração para a porcentagem de área impermeável. Os valores do coeficiente de Manning para as superfícies impermeáveis e permeáveis, assim como para o canal, e o CN da bacia, obtidos pelo novo processo de calibração, foram estimados segundo características do local de estudo e informações encontradas na literatura, conforme descrito a seguir.

Tabela 7 – Valores dos parâmetros mantidos da calibração preliminar.

	S-Imperv (mm)	S-Perv (mm)	PctZero (%)
Sub-bacia 24	6,00	12,82	61,50
Sub-bacia 30	5,24	8,37	76,90
Sub-bacia 32	2,00	3,82	64,50
Sub-bacia 33	5,45	13,67	10,00
Sub-bacia 35	6,03	11,08	96,40

Fonte: Elaborado a partir de Lima (2018).

4.2.3. Análise de Sensibilidade

A influência dos parâmetros no resultado final do modelo foi verificada através da análise de sensibilidade. Os parâmetros analisados foram a declividade, largura característica da bacia, porcentagem da área impermeável, coeficiente de Manning das áreas impermeáveis e

permeáveis da bacia, assim como do canal e o CN e a influência na resposta do modelo foi analisada em termos de variação do nível de pico e coeficiente de Nash-Sutcliffe.

Essa análise foi realizada para a sub-bacia 24, utilizando um dos eventos da calibração. Os valores iniciais dos parâmetros foram os obtidos em uma calibração preliminar, que depois foi desconsiderada do processo de calibração do modelo pelo fato de um dos eventos utilizados alcançar nível de transbordamento. A variação foi feita individualmente para cada parâmetro utilizando valores majorados em 25%, 50% e 75% e minorados nas mesmas proporções em relação ao inicial utilizado. Esta análise de sensibilidade serviu para embasar a escolha dos três parâmetros utilizados na tentativa de ajuste fino da calibração.

4.2.4. Calibração e Validação

A calibração do modelo foi realizada de maneira automática através da função objetivo do erro relativo médio quadrático e a verificação do desempenho da calibração foi feita a partir da análise dos níveis observados em comparação com os simulados por meio da análise visual dos níveis de pico e do coeficiente de Nash-Sutcliffe. O algoritmo utilizado na calibração automática foi o *Dynamically Dimensioned Search*, um algoritmo estocástico conhecido por DDS e desenvolvido por Tolson (2005), incorporado ao modelo pela equipe do Departamento de Engenharia Hidráulica e Recursos Hídricos da Escola de Engenharia da UFMG e a estratégia adotada foi a da calibração individual das sub-bacias devido à falta de eventos com dados completos para toda a bacia. Para essa etapa, buscaram-se eventos que registraram altos níveis d'água, porém sem ter sido registrado extravasamento, ou seja, eventos que geraram alertas amarelos e laranjas. Os alertas vermelhos foram desconsiderados devido ao fato de os parâmetros se alterarem quando a água sai da calha e o modelo perde o controle da água extravasada.

A validação foi realizada para mesma quantidade de eventos da calibração e também buscando altos níveis d'água registrados, sendo considerados os eventos que geraram alertas vermelhos, ou seja, que extravasaram. Para essas situações, além de analisar o coeficiente de Nash-Sutcliffe, foi verificado de maneira qualitativa, se o modelo também indica o extravasamento, sem buscar a igualdade do nível de pico. A Tabela 8 apresenta os eventos escolhidos para os processos de calibração e validação das sub-bacias. Devido à falta de eventos com alerta suficientes para calibração e validação das bacias mais a jusante, foram utilizados os eventos sem alerta selecionados buscando sempre os de maiores profundidades registradas.

Tabela 8 - Eventos selecionados para calibração e validação das sub-bacias.

Sub-Bacia	Nº	Eventos Calibração	Nº	Eventos Validação
24	1	11/12/2013	1	14/11/2011
	2	12/12/2012	2	15/11/2012
	3	23/11/2011	3	07/12/2013
	4	18/01/2014	4	26/12/2013
30	1	23/11/2011	1	14/11/2011
	2	27/12/2011	2	15/11/2012
	3	30/01/2012	3	07/12/2013
	4	11/12/2013	4	12/12/2012
32, 33 e 35	1	12/12/2012	1	29/10/2012
	2	07/01/2013	2	15/11/2012
	3	02/10/2013	3	29/09/2013
	4	17/11/2013	4	09/10/2013

Foram realizados testes na sub-bacia 24, a mais a montante, para definir o processo de calibração que apresentaria melhores resultados e então utilizá-lo para a calibração das demais bacias. A Tabela 9 apresenta o resumo de cada uma das tentativas. O primeiro teste de calibração realizado considerou os eventos de maneira individual, sendo utilizados 7 parâmetros na calibração, são eles: porcentagem impermeável (IMP), largura da bacia (W), declividade (SLOPE), coeficiente de Manning das áreas impermeáveis (NIMP), das áreas permeáveis (NPERM) e do canal (N) e *Curve Number* (CN) do método da NRCS. A verificação do ajuste foi feita considerando o valor médio dos parâmetros obtidos por evento.

Tabela 9 – Caracterização das estratégias de calibração adotadas.

Teste	Número de parâmetros	Consideração dos eventos	Intervalo por parâmetro	Consideração de pesos
Calibração 1	7	Separados	Amplio I	Não
Calibração 2	7	Juntos	Restrito	Sim
Calibração 3	3	Juntos	Amplio I	Sim
Calibração 4	7	Juntos	Amplio II	Sim

Na segunda tentativa foram calibrados os mesmos 7 parâmetros da anterior, mas os eventos foram considerados de maneira conjunta. Dessa forma, ao final do processo de calibração, um único conjunto de parâmetros foi obtido para todos os eventos. Nesta tentativa, os intervalos de variação dos valores de alguns parâmetros foram reduzidos de modo a restringir sua variação e com isso alcançar um melhor resultado.

A partir dessa calibração, foram definidos coeficientes multiplicadores da função objetivo com o intuito de atribuir maior peso aos níveis d'água mais elevados. A Tabela 10 apresenta a distribuição de pesos por nível d'água definida após análise visual dos níveis registrados nos

eventos utilizados. O terceiro teste foi feito apenas com 3 parâmetros considerados mais sensíveis após a análise de sensibilidade, os demais parâmetros foram fixados com o valor obtido na Calibração 1, ou seja a Calibração 3 é uma etapa dependente da Calibração 1, e os intervalos utilizados foram mais amplos. Por fim, o último teste foi feito da mesma forma da Calibração 2, mudando apenas os intervalos dos parâmetros.

Tabela 10 - Distribuição dos pesos segundo os níveis de água.

Nível d'água	Peso (coeficiente multiplicador)
Até 1 m	0
De 1 a 2 m	1
Acima de 2 m	2

Os valores máximos e mínimos para IMP, SLOPE e CN foram definidos com base nos dados do local. O coeficiente de Manning para superfície impermeável e permeável (NIMP e NPERM) foram definidos segundo valores apresentados por McCuen *et al.* (1996) *apud* Rossman (2015) sendo considerado uma faixa ampla para superfície desde o tipo cimento com superfície de pedregulho até grama densa, para o primeiro, e até vegetação rasteira densa para o segundo.

O intervalo referente ao parâmetro N foi adotado considerando desde um concreto pré-moldado em boas condições até uma rugosidade alta que representa um revestimento em rocha ou espécies vegetais (Baptista e Lara, 2016). Por fim, para largura da bacia foram adotados dois tipos de intervalo, são eles: intervalo amplo, devido ao fato desse parâmetro não ter um valor físico real e apresentar valores muito variados; e um restrito, sendo adotado 2.000 metros como valor de referência, obtido pela fórmula empírica da largura do retângulo equivalente fornecida por Garcia *et al.* (2004), conforme Equação 1, sendo a área 48,12 km e o perímetro 52,08 km da bacia. A Tabela 11 apresenta os valores que compõem os intervalos utilizados nas calibrações,

$$le = \frac{k_c \sqrt{A}}{1,12} \left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{1,128}{k_c} \right)^2} \right] \rightarrow k_c = 0,282 \frac{P}{\sqrt{A}} \quad \text{Equação 1}$$

Onde le é a largura do retângulo equivalente, neste trabalho abreviado como W (m), A é a área da bacia (m²), k_c é o coeficiente de compacidade e P o perímetro da bacia (m).

Tabela 11 - Descrição dos intervalos utilizados.

Intervalos	Tipo Amplo I		Tipo Restrito		Tipo Amplo II	
	Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final
IMP	40	60	40	50	35	65
W	100	16000	1000	3000	100	20000
SLOPE	8	20	8	20	8	20
NIMP	0,025	0,25	0,025	0,25	0,025	0,25
NPERM	0,02	0,9	0,02	0,9	0,02	0,9
CN	40	95	35	75	40	95
N	0,01	0,035	0,01	0,035	0,01	0,035

4.3. Modelo HEC-RAS

4.3.1. Embasamento Teórico

O HEC-RAS (*Hydrologic Engineering Center - River Analysis Systems*), desenvolvido pela *U.S. Army Corps of Engineers*, é um *software* gratuito que tem como funções principais a modelagem do escoamento permanente unidimensional e pseudo-bidimensional, do escoamento não permanente, além da análise de transporte de sedimentos, contornos móveis e qualidade da água (USACE, 2016a).

A modelagem para obtenção do perfil de linha d'água para escoamentos permanentes permite a consideração do fluxo uniforme, gradualmente variado ou bruscamente variado, para os regimes supercrítico e subcrítico. O cálculo é feito através da equação da energia, utilizando um processo de resolução iterativo chamado *standard step* e as perdas de energia entre duas seções são compostas por duas parcelas: as perdas por atrito, calculadas pela equação de Manning, e pela utilização dos coeficientes de contração e expansão. Já a modelagem não permanente é feita através do método hidrodinâmico, com a resolução das equações completas de Saint Venant, as quais são resolvidas através de um método numérico de discretização por diferenças finitas em um esquema implícito (USACE, 2016a).

Decina (2012) apresenta os principais dados de entrada do modelo como sendo a geometria do canal, a vazão que varia de valores fixos para o escoamento permanente a hidrograma para o não permanente, as condições de contorno e os valores do coeficiente de Manning. Os dados de geometria consistem em informações de conectividade dos cursos d'água, dados da seção transversal e de estruturas hidráulicas. As condições de contorno são importantes para o procedimento de cálculo e podem ser definidas como profundidade normal ou crítica, curva-chave ou hidrogramas sendo que segundo o regime de escoamento é necessário acrescentar apenas a informação da condição de montante, de jusante ou ambas (USACE, 2016b).

Assim como em qualquer modelagem hidráulica, as seções transversais devem ser tais que consigam descrever de maneira satisfatória a geometria do canal. Para isso, o número de seções deve ser suficiente para descrever variações na geometria, declividade, rugosidade e na vazão da calha, além de serem necessárias seções imediatamente a montante e jusante de afluências, reservatórios, pontes e bueiros. Ademais, USACE (2016a) enfatiza que seções muito espaçadas e muito próximas podem desrespeitar a condição de Courant, o que causa instabilidade e erros numéricos que aumentam a partir do ponto de instabilidade.

O HEC-RAS permite a construção de um modelo topológico georreferenciado a partir da plataforma HEC-GeoRAS. Este consiste em uma série de ferramentas para o software ArcGIS com o intuito de processar dados geográficos para serem utilizados no HEC-RAS. Um arquivo com dados geométricos extraídos de um modelo digital do terreno (MDT) é importado para o HEC-RAS e após a modelagem, é possível exportar os resultados possibilitando uma análise espacial da simulação (Decina, 2012).

4.3.2. Elaboração das Curvas-Chave Sintética

O modelo hidráulico desenvolvido no HEC-RAS dentro do âmbito da pesquisa de Lima (2018) considera apenas a calha principal do Arrudas. Para isso, utilizaram-se as seções georreferenciadas e os trechos canalizados foram adicionados conforme geometria e declividade do atlas do Plano Diretor de Drenagem de Belo Horizonte (PMBH, 2002). Para os canais fechados, foi necessário inserir uma laje de cobertura e para isso utilizou-se a ferramenta que adiciona um “*lid*”, ou seja, uma cobertura que representa a rodovia sobre o canal (Rosa, 2017). Devido aos espaçamentos das seções inseridas, foi necessário interpolar seções intermediárias de modo a melhorar a representação do canal.

Para efeito de comparação, foi considerado um coeficiente de rugosidade único para todo o canal de concreto, considerando a faixa de valores apresentados na Tabela 12. Os valores máximos e mínimos do coeficiente de Manning para o concreto apresentados por Baptista e Lara (2016) foram simulados no HEC-RAS com o intuito de comparar com a curva-chave do modelo SWMM. Além disso, buscou-se o valor do coeficiente simulado no HEC-RAS que apresentava a curva mais próxima da obtida no SWMM.

Tabela 12 - Valores do Coeficiente de Manning para Concreto.

Revestimento Concreto	Rugosidade		
	Mínima	Usual	Máxima
Pré-moldado	0,011	0,013	0,015
Com acabamento	0,013	0,015	0,018
Sem acabamento	0,014	0,017	0,020
Projetado	0,018	0,020	0,022

Fonte: Baptista e Lara (2016).

4.4. Avaliação das Curvas-Chave

As equações que governam a propagação hidráulica no SWMM para o método da onda cinemática são as equações de Saint Venant de conservação de massa e momento assim como no método da onda dinâmica. Porém, para onda cinemática, a resolução considera as equações incompletas, sendo a declividade da linha d'água igual à do fundo do canal. Para esse método, a relação entre a vazão e área é dada pela equação de Manning para escoamentos uniformes (Rossmam, 2017).

As relações cota-vazão sintéticas geradas no HEC-RAS foram confrontadas com a curva-chave do SWMM após calibração e validação do modelo. Assim, apesar da comparação ser realizada entre modelos, foi possível verificar se as curvas-chave sintéticas, obtidas a partir de uma metodologia subjetiva, se aproximam das geradas por um modelo calibrado e validado da bacia. Ao final desta etapa, o terceiro objetivo específico foi respondido, e os resultados servirão como embasamento para futuros trabalhos que utilizem as curvas-chave sintéticas na calibração de modelos hidrológicos.

4.5. Verificação da Antecedência do Alerta

A verificação da antecedência mínima do alerta a nível operacional corresponde à investigação na literatura e junto aos órgãos responsáveis do tempo necessário entre a emissão do alerta e o início da inundação. Esse intervalo de tempo tem que ser suficiente para que seja possível a mobilização de pessoal e reordenamento do trânsito, além disso, deve ser suficiente para que a população local seja avisada e consiga se prevenir. A antecedência necessária para garantir uma aplicação de ações efetivas é diretamente influenciada pelo local do sistema de alerta. Um capítulo do plano de contingência de Belo Horizonte dedica-se a listar as ações de socorro desenvolvidas segundo as principais ameaças e vulnerabilidades da cidade de Belo Horizonte. Apesar disso, o plano não apresenta a relação entre elas nem a forma como elas

são postas em prática e esse entendimento é fundamental para determinar o tempo necessário para suas realizações.

Diante disso, para a definição de um tempo de antecedência ótimo para a área de estudo, optou-se por um levantamento junto à Defesa Civil das atividades realizadas no instante seguinte à emissão do alerta, através do entendimento da situação, como ela é desenvolvida e de que maneira os participantes envolvidos agem. Essa metodologia de pesquisa que parte do interacionismo do pesquisador com o objeto estudado e se conceitua na maior proximidade possível à realidade prática é conhecida como *Grounded Theory* e apresenta algumas traduções para o português como Teoria Enraizada ou Teoria Fundamentada em Dados (Glaser, 2009; Gonçalves, 2016).

Esse método de pesquisa qualitativa, relativamente recente, surgiu na década de 60 e foi elaborada pelos sociólogos Barney Glaser e Anselm Staruss (Glaser e Strauss, 1967). Apesar de ter aplicações em diversas áreas, a metodologia é bastante comum em pesquisas relacionadas à educação, enfermagem, negócios e sociologia. Essa metodologia pode ser empregada em qualquer abordagem, desde em pesquisas que se inserem em hipóteses realistas e objetivas até as de perspectivas interpretativas e construtivas. Charmaz (1996) enfatiza que os estudos baseados na *Grounded Theory* são empíricos, independente da fonte de dados, que podem ser autobiografias, registros públicos, romances, entrevistas, estudos de caso, observação em campo. Para a teoria fundamentada em dados, tudo com que o pesquisador tem contato durante o estudo é considerado dado e os processos de coleta e análise são realizados de forma simultânea, assim a coleta se torna cada vez mais direcionada.

4.6. Verificação dos Eventos de Alerta

O conhecimento do meteorologista quanto às características das precipitações com potencial de gerar inundações agrega confiabilidade ao sistema de previsão e alerta quando somado às ferramentas de previsão e modelagem disponíveis. Uma forma de adquirir sensibilidade com esses dados é através da análise em conjunto das respostas de modelos hidrológicos e hidráulicos aos dados de previsão e dados medidos.

A dificuldade de se obter dados de previsão de eventos antigos, uma vez que os modelos de previsão meteorológica geram um grande volume computacional de dados, somado ao fato de que a quantidade de eventos para análise não seria suficiente para conclusões, levou a busca

de uma alternativa para o presente trabalho que resultou na decisão de usar chuvas sintéticas para análise das características dos eventos.

As chuvas sintéticas, geradas a partir de um gerador estocástico, foram produzidas segundo características de eventos e informações retiradas da literatura e em seguida foram simuladas no modelo hidrológico. O acoplamento deste com o gerador foi feito através da linguagem de programação Visual Basic utilizando o pacote Microsoft Visual Studio. A seguir serão abordadas informações sobre geradores estocásticos de séries de precipitação sintéticas

4.6.1. Geradores Estocásticos de Séries Sintéticas

As séries sintéticas são alternativas às series históricas quando essas não são suficientemente longas para os estudos hidrológicos. Elas são geradas a partir de características estatísticas dos dados observados e dessa forma apresentam eventos tão prováveis de acontecer quanto a série histórica. Costa (2015) apresenta um pouco do desenvolvimento dos modelos de geração de série sintética e uma breve descrição das principais técnicas de geração estocástica de chuva, contemplando as abordagens paramétricas e não paramétricas para estimação das alturas precipitadas.

Srikanthan e McMahon (2001) apresentam uma revisão de gerações estocásticas de dados de chuvas anuais, mensais e diários. Segundo os autores, os modelos de geração diária podem ser divididos em 4 grandes grupos, são eles: modelos bipartidos, modelos de matriz de probabilidade de transição (MPT), de reamostragem e de séries temporais do tipo ARMA. Dentre esses, o bipartido é o mais simples e difundido e sua estrutura consiste basicamente em uma primeira fase de definição de ocorrência ou não de chuva e a segunda parte de determinação do volume precipitado nos dias chuvosos (Chowdhury *et al.*, 2017). Na primeira fase, os modelos comumente utilizados baseiam-se em Cadeias de Markov e processos de renovação alternada, já na segunda fase são utilizados modelos probabilísticos distributivos contínuos, os autores citam alguns exemplos como a distribuição exponencial e a gama de dois parâmetros com suas aplicações na literatura.

Algumas desvantagens dos modelos bipartidos incluem a inaptidão de reproduzir intervalos de tempo de maior duração (meses ou anos) e a independência das chuvas geradas em dias consecutivos, modeladas pela mesma distribuição (Srikanthan e McMahon, 2001; Furrer e Katz, 2008). Costa (2015) ressalva que a inexistência da correlação entre as alturas de chuva em um dado intervalo compromete as estimativas de chuva uma vez que a persistência

verificada nesses eventos não é capturada. Os modelos híbridos são alternativas à esse problema ao considerar de maneira explícita chuvas moderadas e extremas como processos físicos distintos, sendo assim modeladas por diferentes distribuições de probabilidade contínuas no ponto de junção (Furrer e Katz, 2008; Li *et al.*, 2012; Papalexiou *et al.*, 2013). Porém, esses modelos possuem um grande problema que é a definição do que seria uma chuva moderada ou uma chuva extrema.

Os geradores MPT são semelhantes aos modelos bipartidos, baseado também nas cadeias de Markov, porém utilizam mais de dois estados discretos para os dias chuvosos (Filho, 2016). A definição de faixas de valores por quantidade precipitada permite uma modelagem mais precisa quanto aos valores estimados, porém a definição dos limites entre os estados intermediários é um dos grandes entraves do modelo (Costa, 2015). Por fim, as técnicas não paramétricas simulam as alturas de chuva por meio de modelos de reamostragem que em geral, são mais flexíveis que a modelagem paramétrica, por realizarem pequenas suposições relativas à propriedade da distribuição dos dados observados e da estrutura de dependência. Filho (2016) ainda ressalta que modelos estocásticos de precipitação que utilizam técnicas não paramétricas têm a capacidade de reproduzir as propriedades estatísticas das séries históricas.

Os modelos supracitados são utilizados na geração de séries contínuas, porém para satisfazer os objetivos dessa pesquisa foram gerados eventos simples em conformidade com os estudos e a calibração do modelo que utiliza eventos isolados. Dessa forma, o gerador estocástico elaborado difere dos explanados, mas apresenta algumas semelhanças com os modelos paramétricos e bipartido e tem como características a estocasticidade, simplicidade e etapas semi-independentes.

De maneira geral, a geração dos eventos possui 3 fases, a determinação da duração, altura e distribuição do volume no tempo. A duração da chuva foi definida segundo uma distribuição de probabilidade teórica cujos parâmetros foram obtidos da amostra de eventos selecionados entre os anos de 2013 e 2016. A definição da altura precipitada, também definida por uma função de distribuição de probabilidade dado uma determinada duração previamente determinada, é a etapa dependente do processo. Por fim, a última etapa é a definição da distribuição das alturas precipitadas no tempo a qual já não possui dependência com as etapas anteriores.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Modelo SWMM

5.1.1. Análise de Sensibilidade

A análise de sensibilidade foi realizada para a sub-bacia 24 após uma calibração preliminar também com 4 eventos e o evento 1 da calibração (11/12/2013) foi o escolhido para realização das simulações para análise. A partir dos resultados, foi possível observar que as majorações dos parâmetros têm pouca influência no valor do coeficiente de Nash-Sutcliffe (CNS), enquanto para as minorações apenas o N (coeficiente de Manning) e IMP (porcentagem de área impermeável) produzem significativa variação CNS. Quanto à variação da profundidade máxima, também as maiores variações foram para as minorações dos parâmetros, sendo o W (largura da bacia), IMP e N os que apresentaram as variações mais significativas. O menor valor de nível d'água atingido corresponde a aproximadamente 40% do valor base obtido na minoração em 75% do valor de N. A partir desses resultados, foram selecionados os parâmetros IMP, W e N para a tentativa de calibração 3 utilizando os parâmetros mais sensíveis. A Figura 13 e Figura 14, apresentadas a seguir, mostram a variação do valor do coeficiente Nash-Sutcliffe e do nível d'água máximo, respectivamente, para as simulações realizadas.

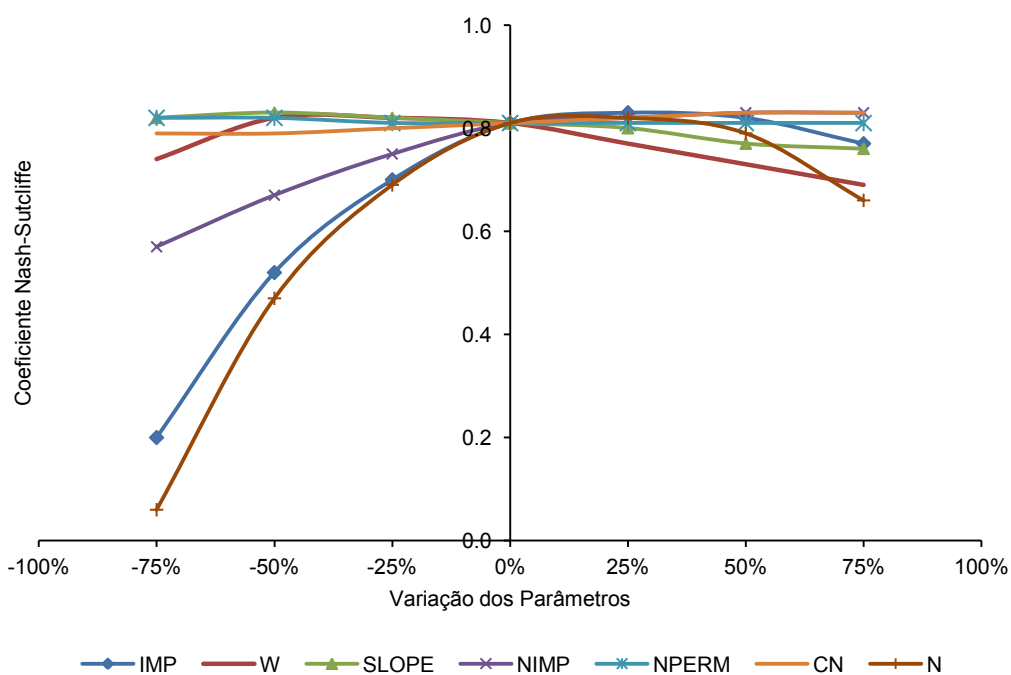


Figura 13 - Variação do coeficiente de Nash-Sutcliffe em relação ao valor de referência para a análise de sensibilidade dos parâmetros.

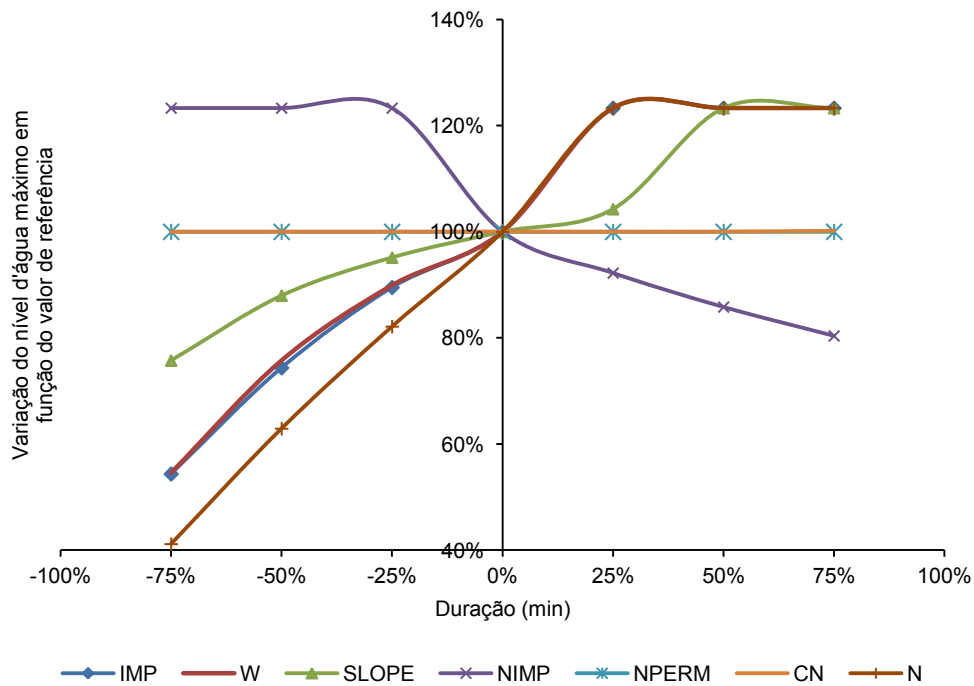


Figura 14 - Variação do valor do nível d'água máximo em relação ao valor de referência para a análise de sensibilidade dos parâmetros.

5.1.2. Calibração e Validação

Diante das estratégias de calibração apresentadas na metodologia foram feitos testes de modo a verificar sua eficiência. Para isso, utilizou-se a sub-bacia 24 por esta ser a mais a montante e pelo fato das demais bacias serem calibradas individualmente a partir de um bom resultado a montante. A seguir são apresentados os resultados obtidos nas etapas de calibração e validação das sub-bacias delimitadas.

5.1.2.1. Sub-bacia 24

Segundo as características da sub-bacia 24, foi possível definir intervalos mais amplos ou restritos para calibração dos parâmetros de modo a compor cada tentativa de calibração. Neste capítulo de resultados, as tentativas de calibração foram chamadas Calib. A Tabela 13 apresenta para cada tentativa de calibração os níveis d'água máximos observados e simulados, a diferença entre eles e o valor do coeficiente de Nash-Sutcliffe (CNS) de cada evento para sub-bacia 24. De maneira geral, o evento 1 apresentou um bom ajuste, tanto em relação ao nível de pico quanto ao CNS. O evento 2 apresentou valores de CNS menores, porém os níveis máximos simulados foram próximos aos observados, com exceção da Calibração 1 (as estratégias de calibração estão detalhadas na Tabela 9, na página 81). Os eventos 3 e 4 apresentaram piores ajustes dos níveis d'água máximos quando comparado aos eventos 1 e 2.

Considerando todos os eventos, as Calibrações 2, 3 e 4 apresentaram resultados muito parecidos. Como a Calib 3 demanda maior esforço computacional e a Calib 2 possui intervalos para os parâmetros mais restritivos, a Calib 4 foi a estratégia adotada para a calibração das próximas sub-bacias. As Figuras 15, 16, 17 e 18 mostram os gráficos dos níveis simulados e observados para os eventos 1 a 4 da calibração selecionada. É possível observar, para estratégia de calibração adotada, que o modelo conseguiu representar bem os eventos, principalmente em termos de tempo de pico. Quanto aos níveis d'água de pico, somente para o evento 2 o modelo conseguiu obter um valor próximo ao observado, para os demais eventos houve uma superestimação ou subestimação desse valor. O CNS mínimo obtido foi de 0,5 (evento 3), considerado satisfatório, e o máximo foi de 0,87 (evento 1), considerado muito bom, segundo Moriasi *et al.* (2007). Considerando os quatro eventos, o CNS médio obtido foi de 0,66, considerado bom (Moriasi *et al.*, 2007)

Tabela 13 - Resultados dos níveis máximos e coeficiente de Nash-Sutcliffe das tentativas de calibração por evento para sub-bacia 24.

		Calib 1	Calib 2	Calib 3	Calib 4
Evento 1 (11/12/13)	NA_{máx-sim}	5,35	4,54	4,5	4,54
NA_{máx-obs}	Obs - Sim	-0,2	0,61	0,65	0,61
5,15	CNS	0,84	0,89	0,87	0,87
Evento 2 (12/12/12)	NA_{máx-sim}	4,51	3,64	3,64	3,68
NA_{máx-obs}	Obs - Sim	-1,04	-0,17	-0,17	-0,21
3,47	CNS	0,72	0,56	0,61	0,61
Evento 3 (23/11/11)	NA_{máx-sim}	6,35	5,44	5,39	5,38
NA_{máx-obs}	Obs - Sim	-2,76	-1,85	-1,8	-1,79
3,59	CNS	0,23	0,45	0,48	0,5
Evento 4 (18/01/14)	NA_{máx-sim}	2,04	1,78	1,78	1,79
NA_{máx-obs}	Obs - Sim	2,06	2,32	2,32	2,31
4,1	CNS	0,63	0,65	0,63	0,64

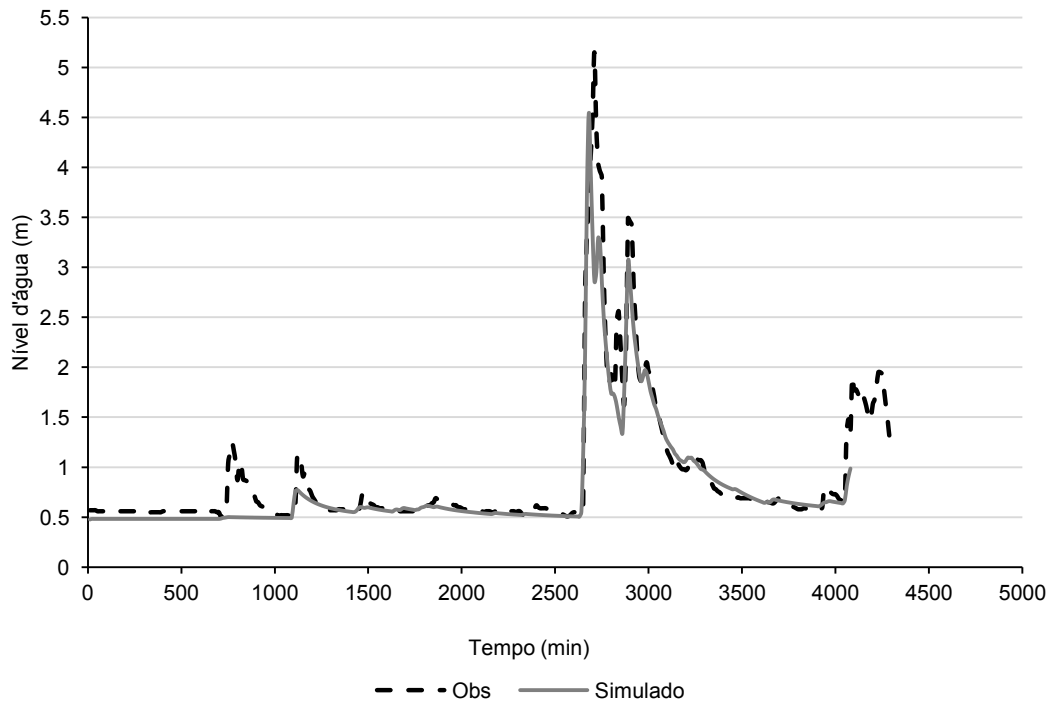


Figura 15 - Valores dos níveis d'água simulados e observados no exutório da sub-bacia 24 para o evento 1 da calibração 4.

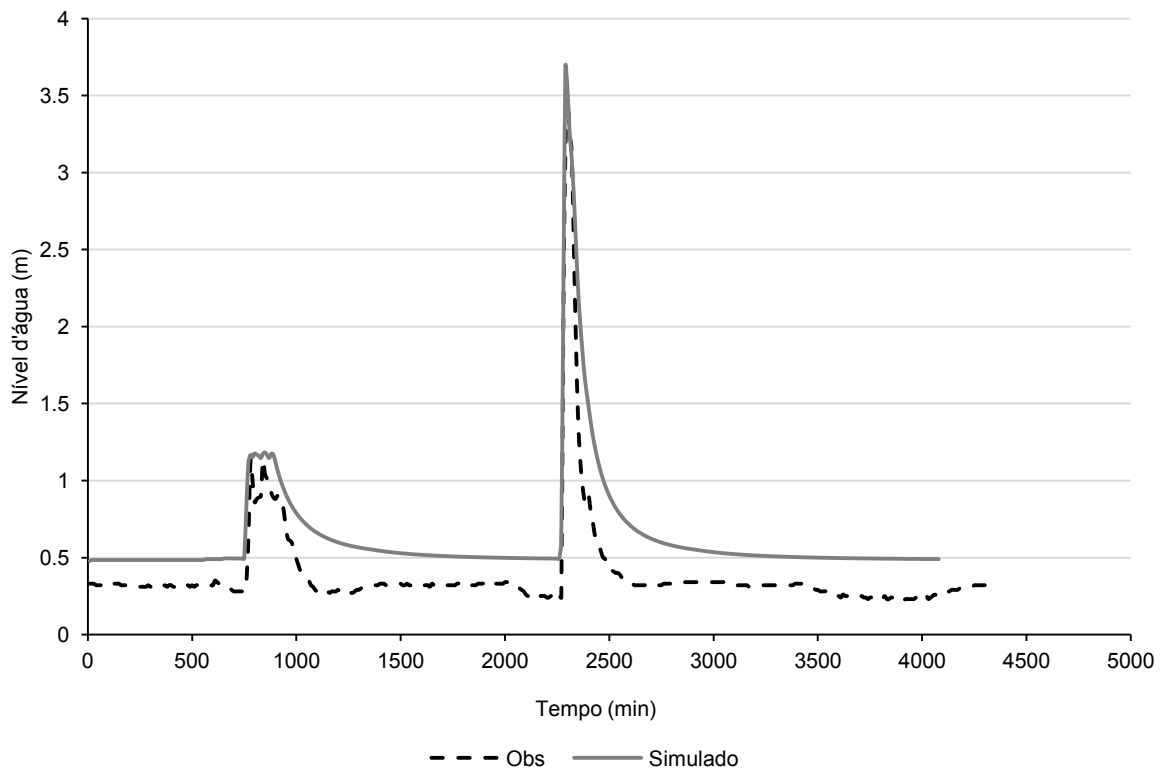


Figura 16 - Valores dos níveis d'água simulados e observados no exutório da sub-bacia 24 para o evento 2 da calibração 4.

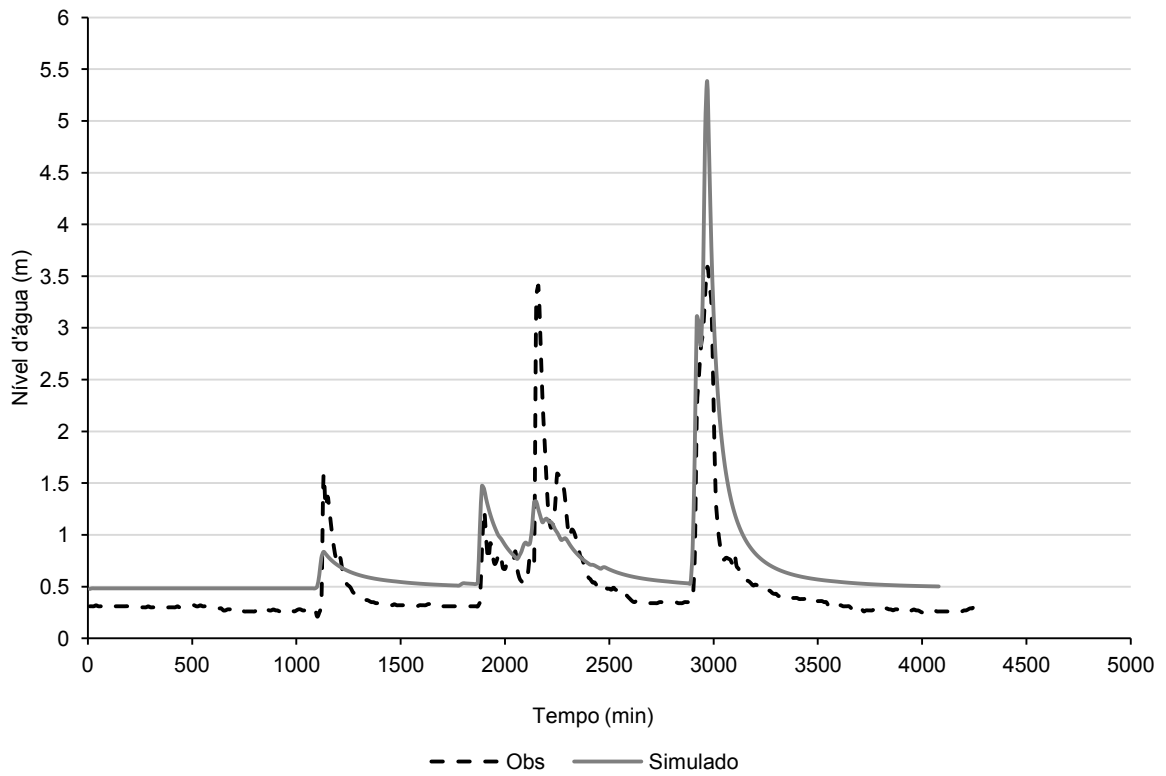


Figura 17 - Valores dos níveis d'água simulados e observados no exutório da sub-bacia 24 para o evento 3 da calibração 4.

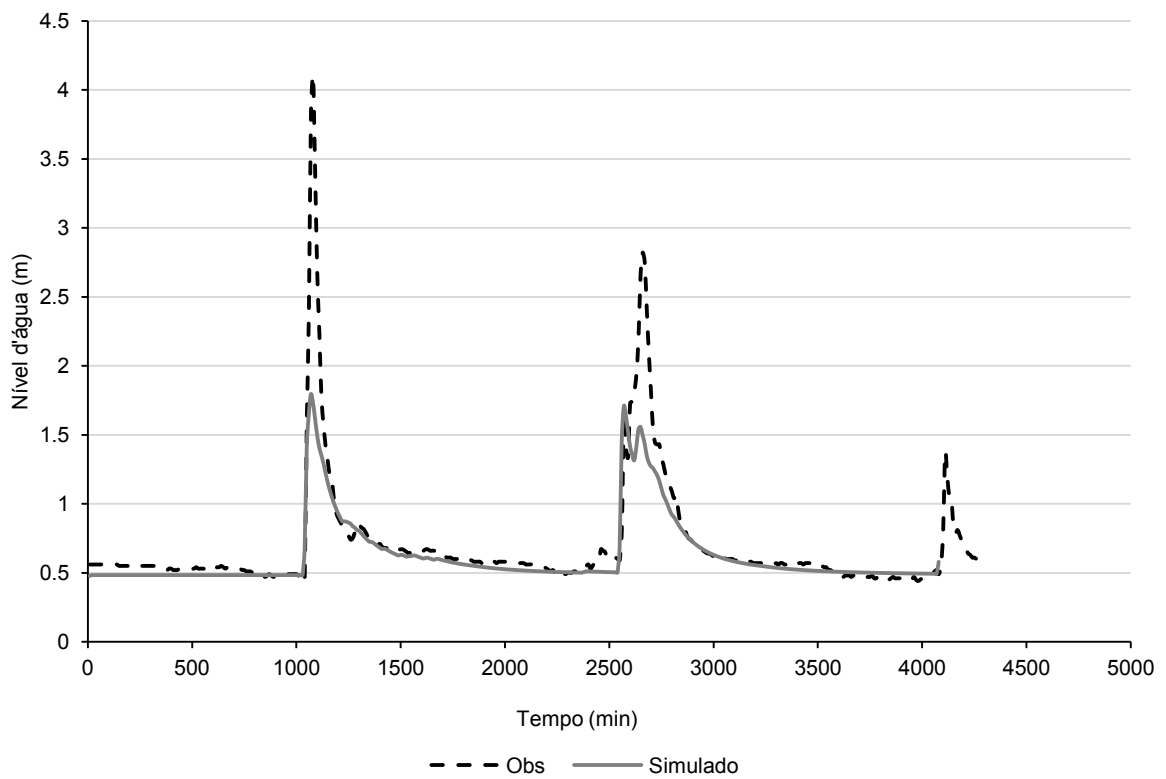


Figura 18 - Valores dos níveis d'água simulados e observados no exutório da sub-bacia 24 para o evento 4 da calibração 4.

Com o modelo calibrado, seguiu-se a etapa de validação onde os parâmetros calibrados foram usados na simulação de novos eventos, que nessa etapa incluíram os de alerta vermelho, ou seja, que extravasaram. A Tabela 14, da mesma forma que a tabela de calibração acima, apresenta os níveis d'água máximos observados e simulados, a diferença entre eles e o valor do coeficiente de Nash-Sutcliffe (CNS) de cada evento para sub-bacia 24. É possível observar que as simulações apresentaram resultados bons para todos os eventos, com CNS acima de 0,60 apesar dos níveis de pico terem sido subestimados. O evento 3, único que não possui cota de extravasamento, foi o que apresentou melhor ajuste com uma profundidade simulada próxima à observada e CNS de 0,89. O modelo não conseguiu indicar o extravasamento para os eventos em que isso foi observado. As Figuras 19, 20, 21 e 22 mostram os gráficos dos níveis simulados e observados para os eventos 1 a 4 da validação.

Apesar de o modelo conseguir representar bem a forma do evento, que pode ser observado pelos gráficos e CNS satisfatórios, os picos foram subestimados para todos os eventos de validação. Isso pode ser explicado pela representação da chuva no modelo, já que os eventos que geram alerta são em sua maioria convectivos e concentrados e na modelagem eles são representados uniformemente distribuídos na bacia. Além disso, esses resultados estão de acordo com as conclusões de Garcia *et al.* (2004) de que simulações com discretização espacial simplificada apesar de apresentarem bons resultados, não conseguem representar os valores de pico.

Tabela 14 - Resultados dos níveis máximos e coeficiente de Nash-Sutcliffe da validação por evento para sub-bacia 24.

		Validação
Evento 1 (14/11/11)	NA_{máx-sim}	3,58
NA_{máx-obs}	Obs - Sim	3,08
6,66	CNS	0,64
Evento 2 (15/11/12)	NA_{máx-sim}	3,65
NA_{máx-obs}	Obs - Sim	3,54
7,19	CNS	0,66
Evento 3 (07/12/13)	NA_{máx-sim}	3,78
NA_{máx-obs}	Obs - Sim	0,28
4,06	CNS	0,89
Evento 4 (26/12/13)	NA_{máx-sim}	4,01
NA_{máx-obs}	Obs - Sim	2,73
6,74	CNS	0,66

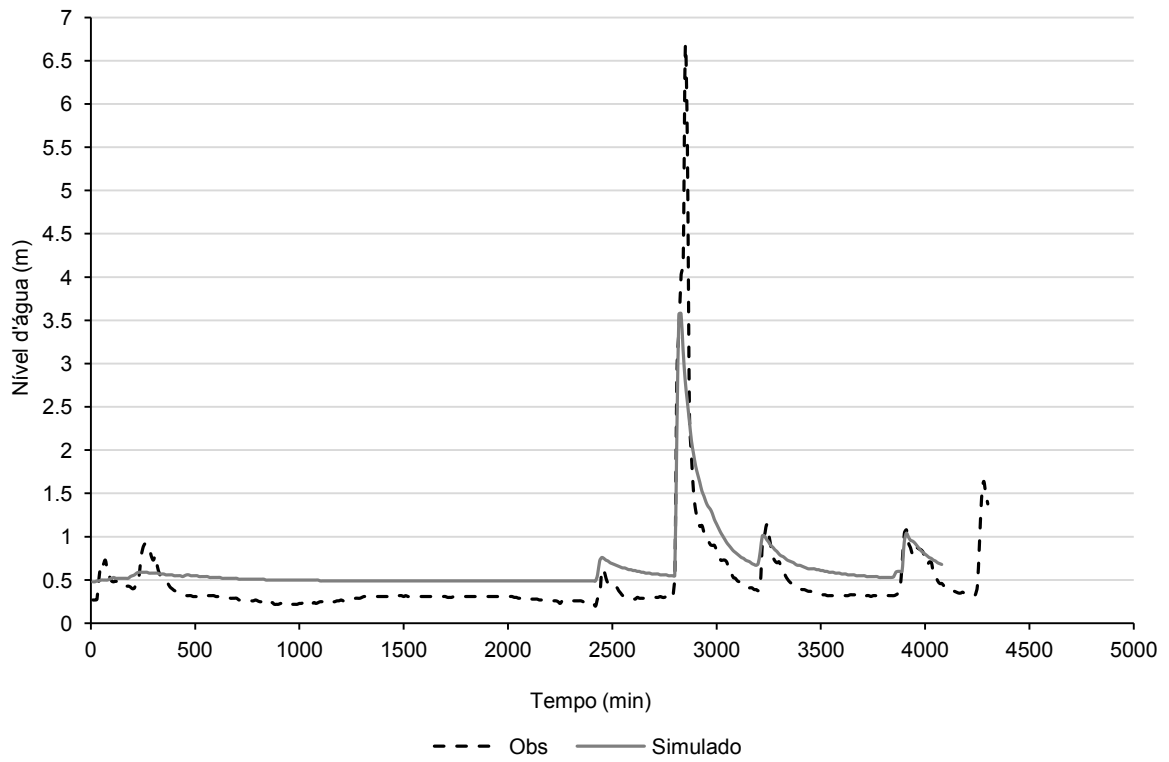


Figura 19 - Valores dos níveis d'água simulados e observados no exutório da sub-bacia 24 para o evento 1 da validação.

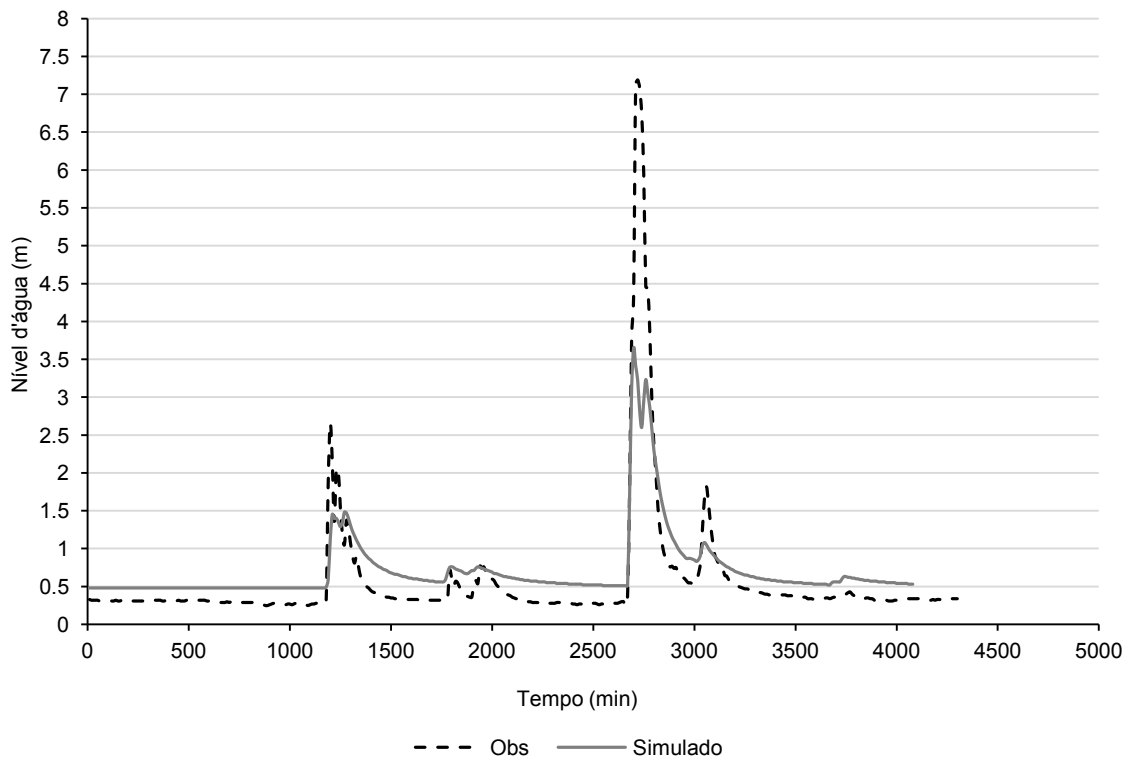


Figura 20 - Valores dos níveis d'água simulados e observados no exutório da sub-bacia 24 para o evento 2 da validação.

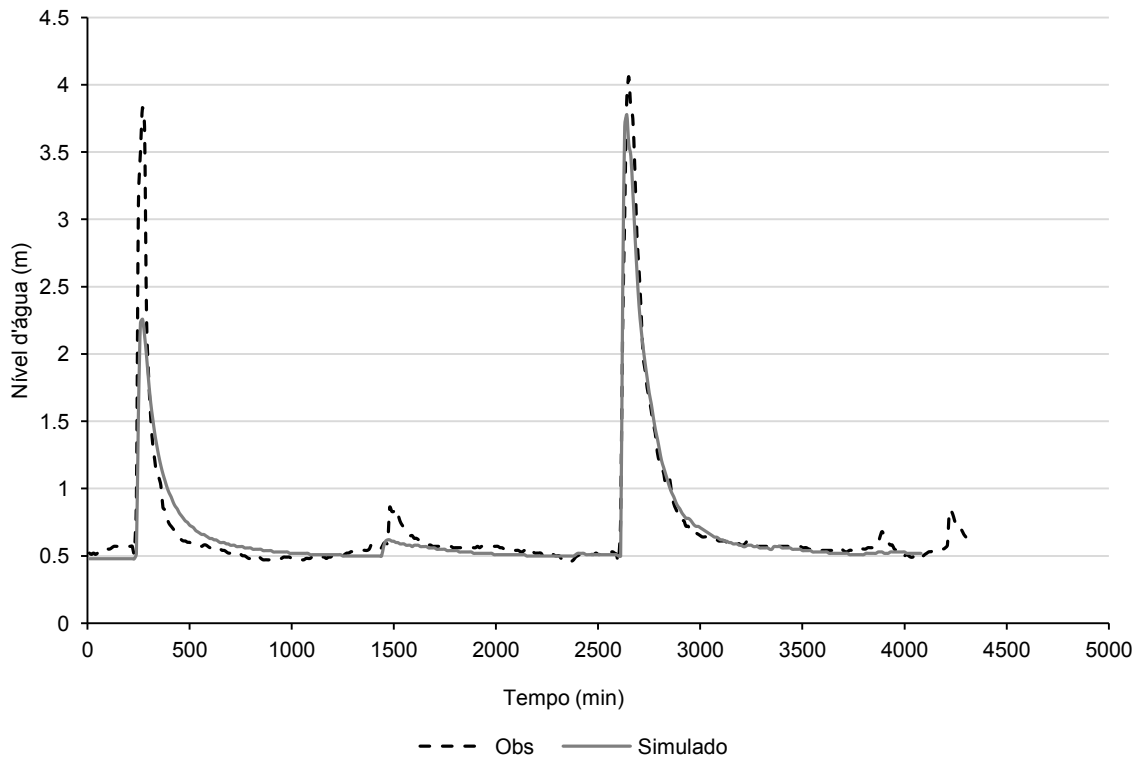


Figura 21 - Valores dos níveis d'água simulados e observados no exutório da sub-bacia 24 para o evento 3 da validação.

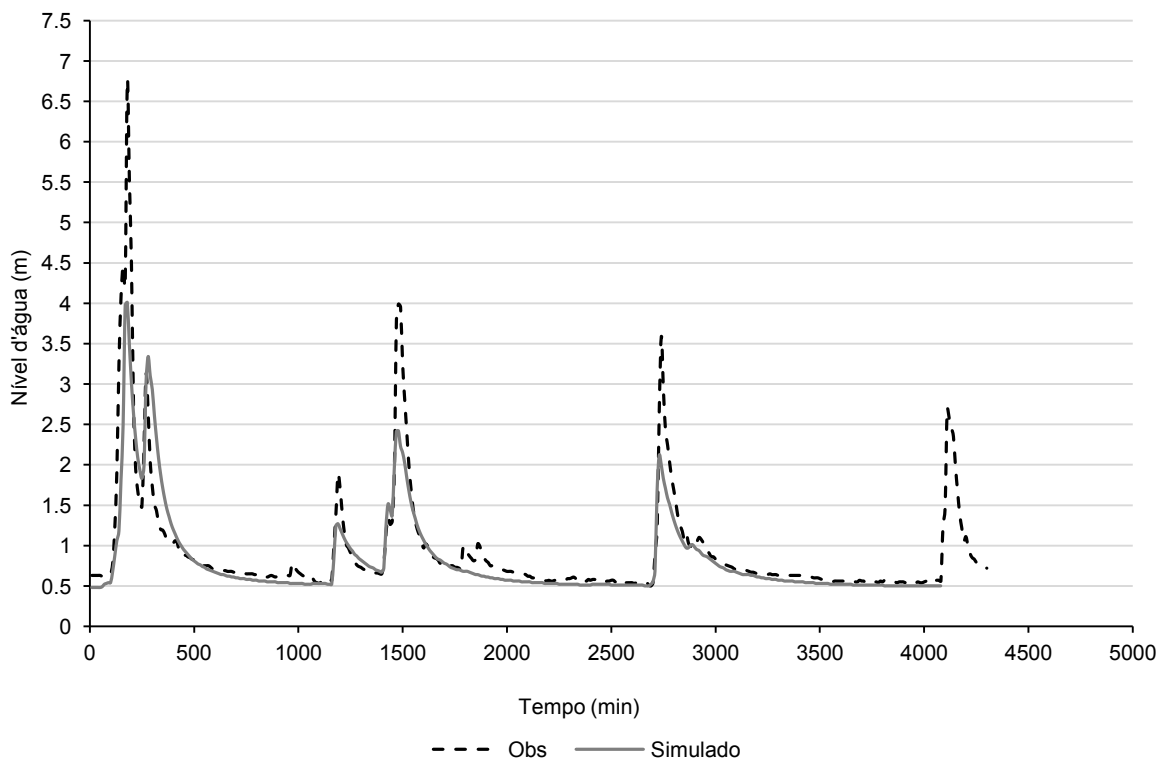


Figura 22 - Valores dos níveis d'água simulados e observados no exutório da sub-bacia 24 para o evento 4 da validação.

5.1.2.1. Sub-bacia 30

Seguindo a partir da tentativa de calibração 4, que considera os eventos juntos para a calibração dos 7 parâmetros utilizando um intervalo de calibração amplo e pesos segundo os níveis d'água, foi feita a tentativa para a bacia seguinte denominada sub-bacia 30. Para essa calibração foram mantidos fixos os parâmetros obtidos para sub-bacia 24. Devido à semelhança de característica entre essa sub-bacia e a anterior, os intervalos dos parâmetros foram os mesmos.

Os resultados ótimos obtidos do calibrador automático para os eventos de calibração não foram satisfatórios e o modelo não conseguiu representar nenhum dos eventos. Dessa forma, foram feitas tentativas de alterar os intervalos dos parâmetros, considerando tanto mais amplo como mais restrito, e em seguida foram testadas as demais tentativas de calibração aplicadas para sub-bacia 24. Porém, nenhuma dessas alternativas conseguiu fazer a segunda bacia representar os eventos da calibração.

Uma hipótese levantada foi de que a calibração por nível estaria dificultando a calibração individual das sub-bacias já que para um mesmo nível, diferentes vazões são possíveis. Assim, o passo seguinte foi a tentativa de calibração conjunta das sub-bacias 24 e 30. Para essa tentativa, foi desconsiderada a calibração prévia da sub-bacia 24 e novamente recalibraram-se os 7 parâmetros para esta simultaneamente com os parâmetros da 30. Conforme supracitado, devido à semelhança de características das bacias, os intervalos de calibração dos parâmetros foram os mesmos. Para a calibração conjunta, foi necessário definir eventos que possuíssem dados tanto para a sub-bacia 24 como para 30, dessa forma, foram utilizados os eventos previamente selecionados para sub-bacia 30.

Os resultados obtidos com a calibração simultânea foram melhores que os anteriores das tentativas com as sub-bacias independentes, uma vez que o modelo conseguiu representar o formato dos eventos, porém ainda não foram alcançados resultados considerados satisfatórios ou aceitáveis. Como os resultados obtidos nessa etapa apresentaram certo padrão, ou seja, para cada uma das bacias os resultados se apresentaram todos acima ou todos abaixo do observado para os eventos analisados, foi feita uma última tentativa de ajuste manual para melhorar as respostas. Ao final desse ajuste, foi possível obter resultados melhores que os observados anteriormente, porém ainda fora do aceitável com alguns coeficientes Nash-Sutcliffe negativos conforme mostra a Tabela 15 e as Figura 23 a Figura 30.

Tabela 15 - Resultados dos níveis máximos e coeficiente de Nash-Sutcliffe do ajuste manual por evento para sub-bacia 24 e 30.

		Sub-bacia 24	Sub-bacia 30
Evento 1 (23/11/11)	$NA_{máx}^{obs}$	3,59	4,54
	$NA_{máx}^{sim}$	3,93	6,20
	Obs - Sim	-0,34	-1,66
	CNS	0,60	-0,80
Evento 2 (27/12/11)	$NA_{máx}^{obs}$	4,04	4,45
	$NA_{máx}^{sim}$	1,98	5,03
	Obs - Sim	2,06	-0,58
	CNS	0,54	-0,09
Evento 3 (30/01/12)	$NA_{máx}^{obs}$	3,93	4,16
	$NA_{máx}^{sim}$	2,03	6,20
	Obs - Sim	1,9	-2,04
	CNS	0,57	0,23
Evento 4 (11/12/13)	$NA_{máx}^{obs}$	5,15	4,51
	$NA_{máx}^{sim}$	2,81	6,20
	Obs - Sim	2,34	-1,69
	CNS	0,44	-0,88

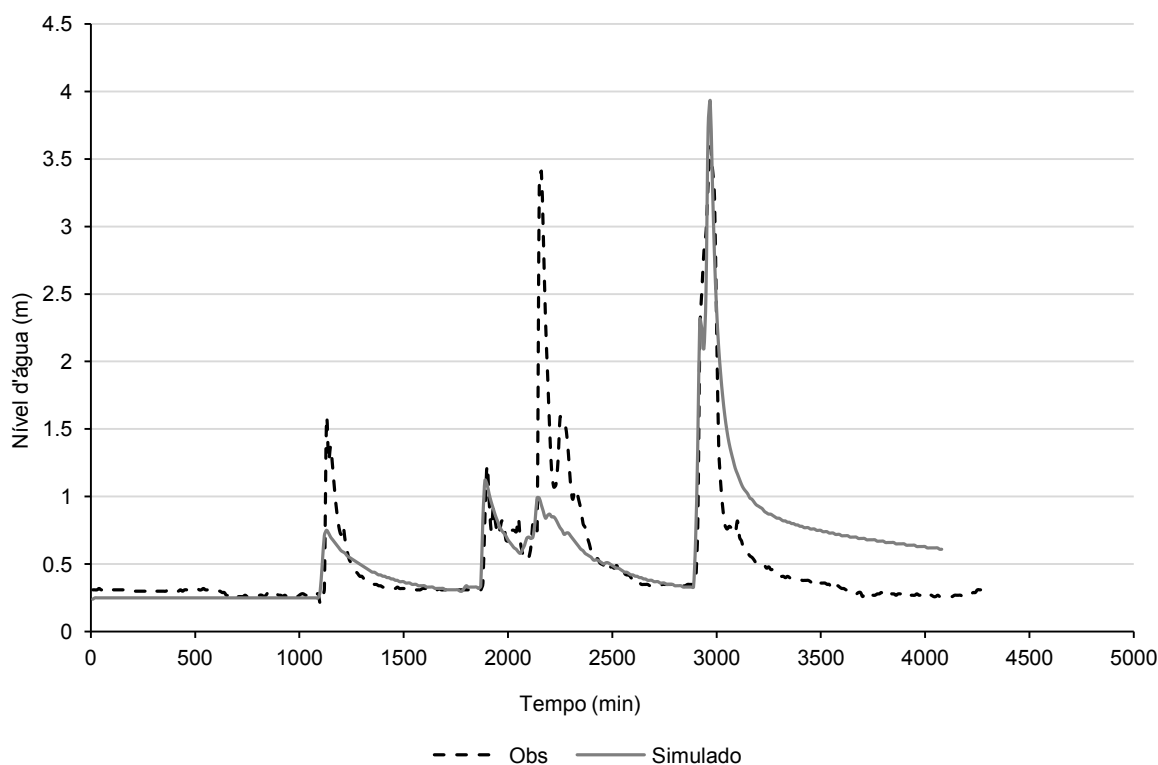


Figura 23 - Valores dos níveis d'água simulados e observados no exutório da sub-bacia 24 para o evento 1 do ajuste manual.

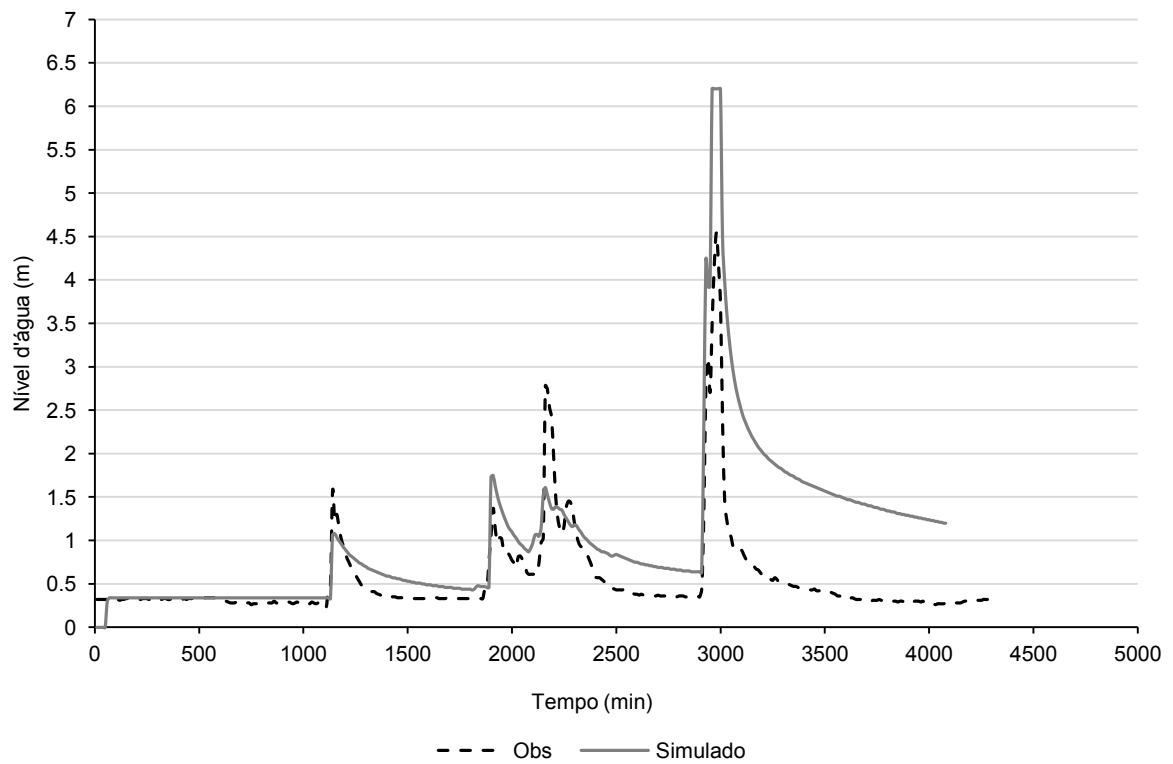


Figura 24 - Valores dos níveis d'água simulados e observados no exutório da sub-bacia 30 para o evento 1 do ajuste manual.

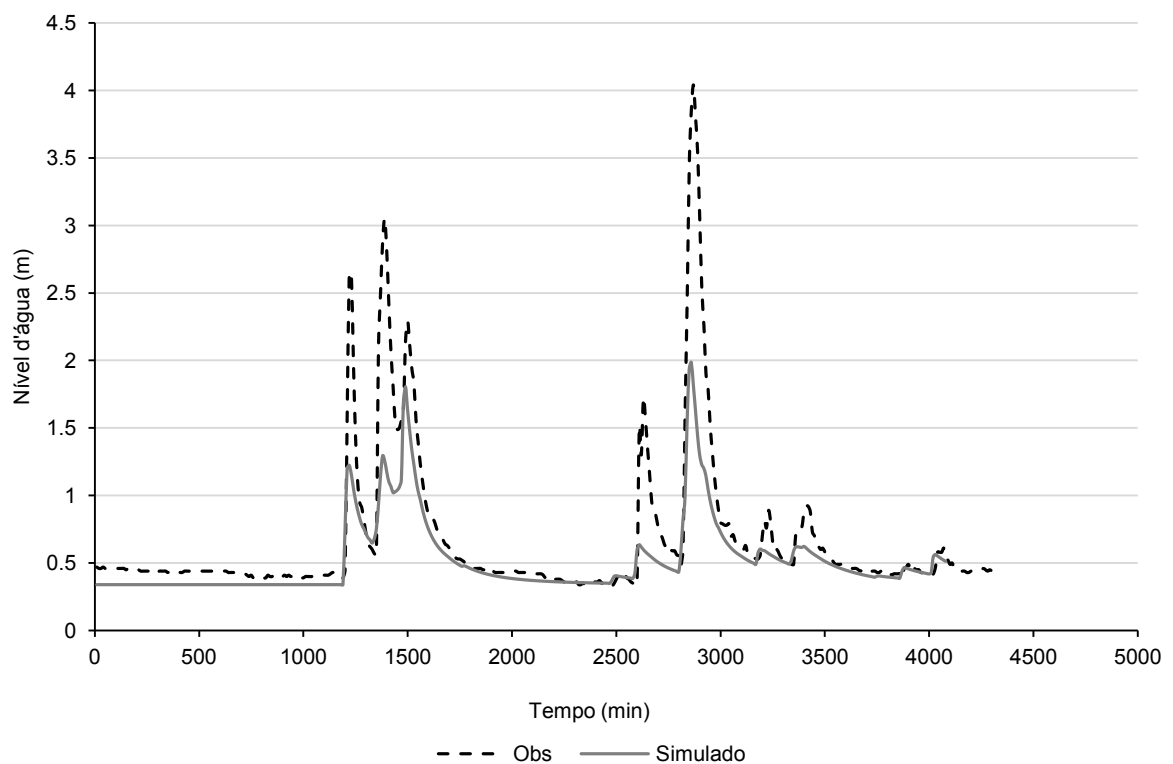


Figura 25 - Valores dos níveis d'água simulados e observados no exutório da sub-bacia 24 para o evento 2 do ajuste manual.

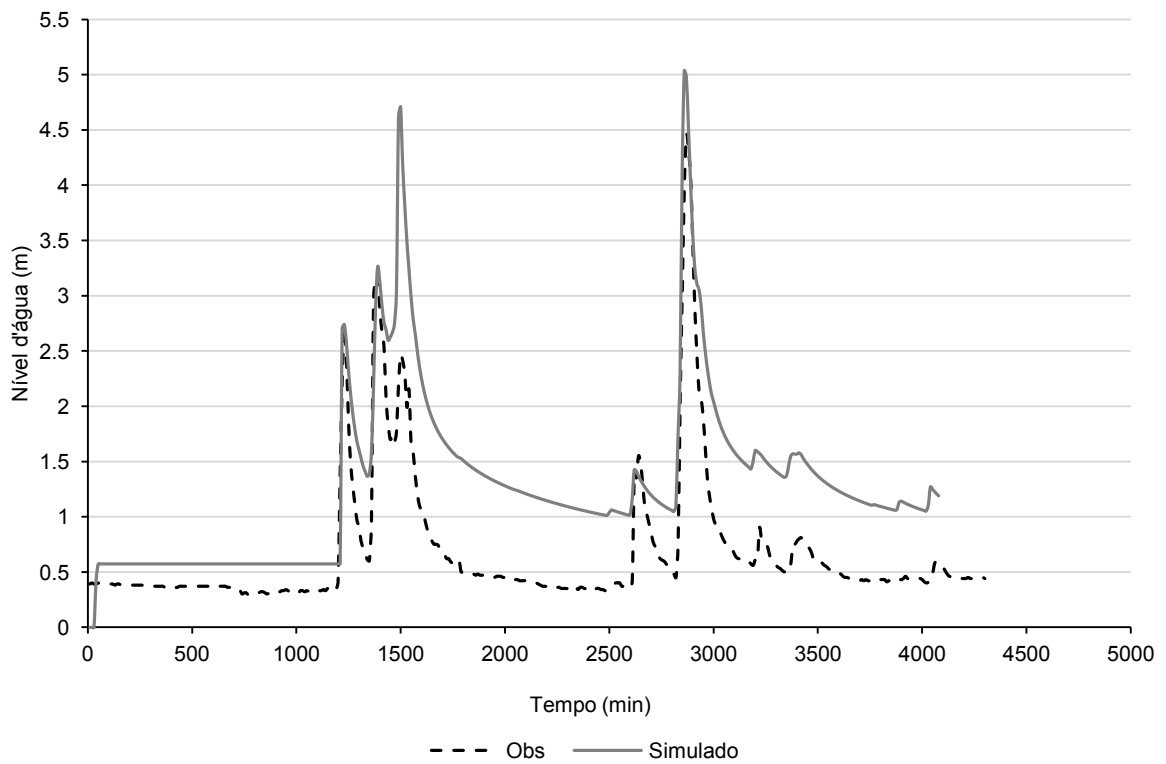


Figura 26 - Valores dos níveis d'água simulados e observados no exutório da sub-bacia 30 para o evento 2 do ajuste manual.

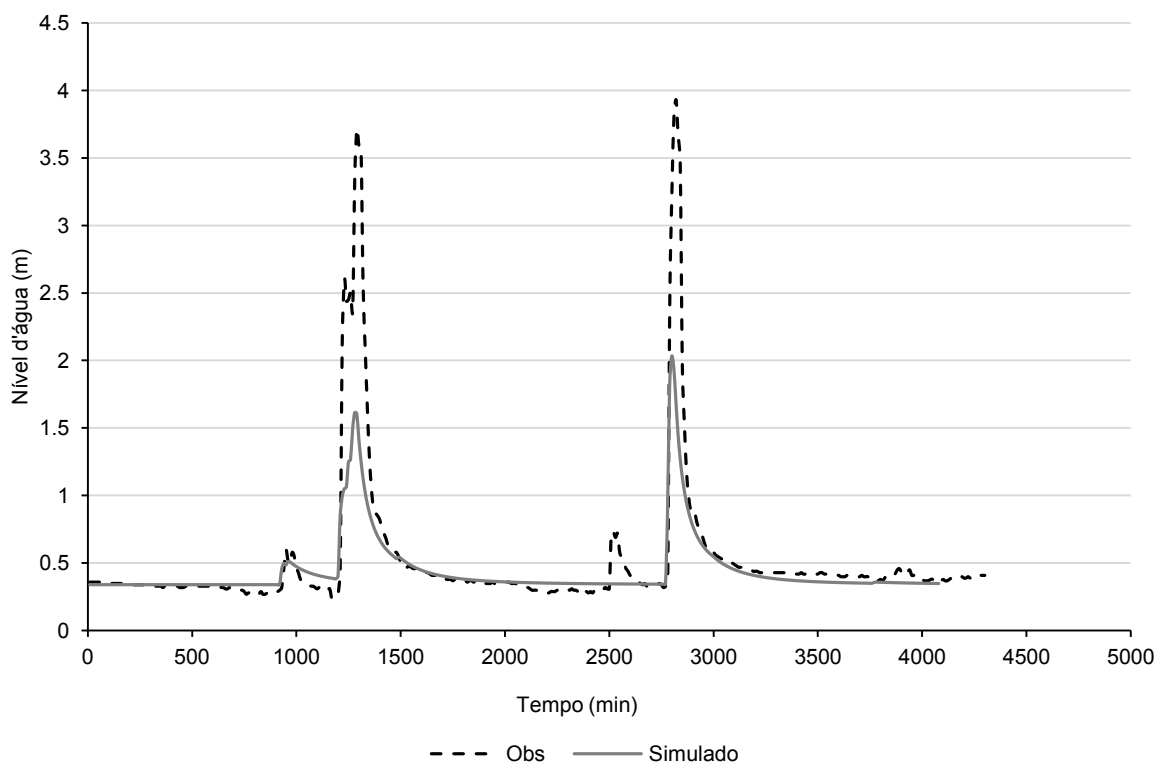


Figura 27 - Valores dos níveis d'água simulados e observados no exutório da sub-bacia 24 para o evento 3 do ajuste manual.

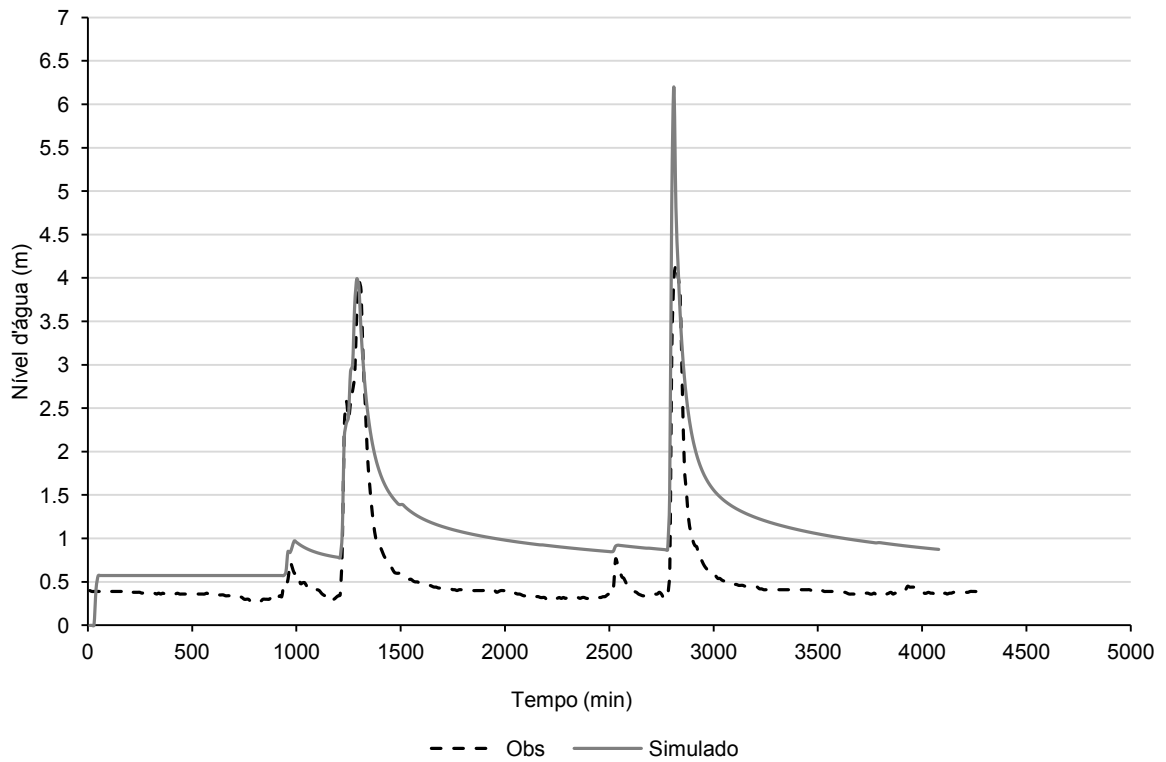


Figura 28 - Valores dos níveis d'água simulados e observados no exutório da sub-bacia 30 para o evento 3 do ajuste manual.

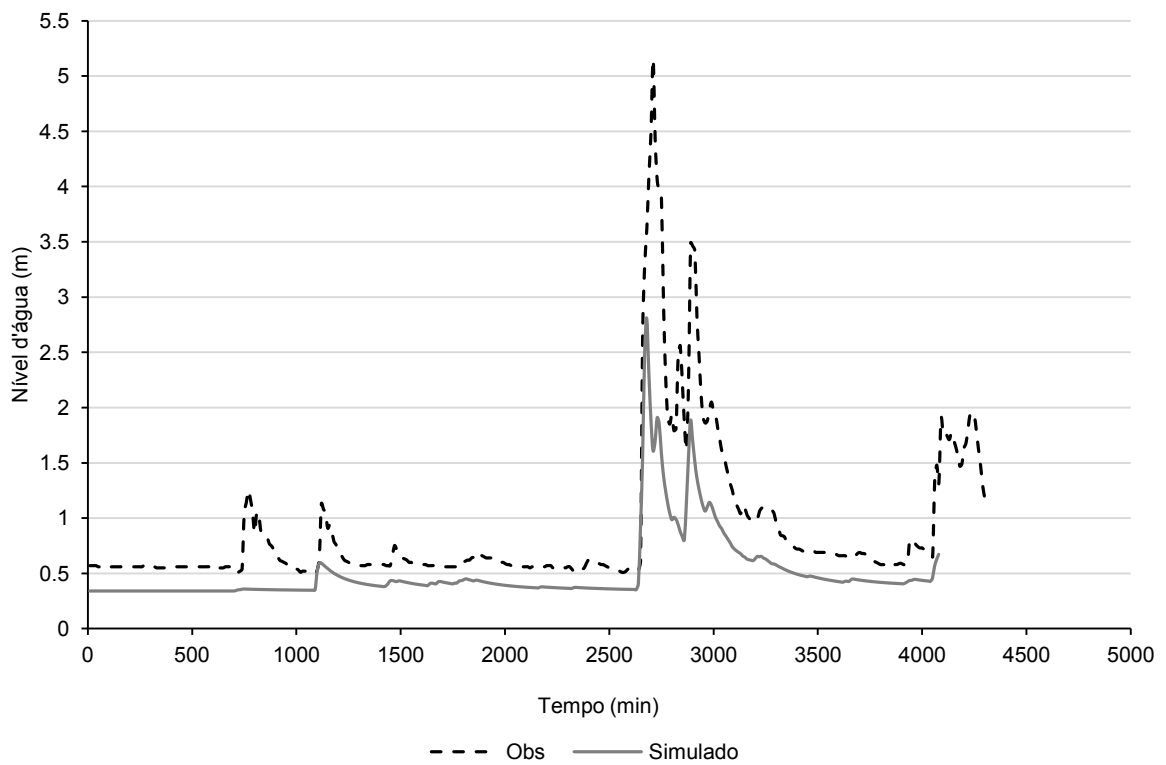


Figura 29 - Valores dos níveis d'água simulados e observados no exutório da sub-bacia 24 para o evento 4 do ajuste manual.

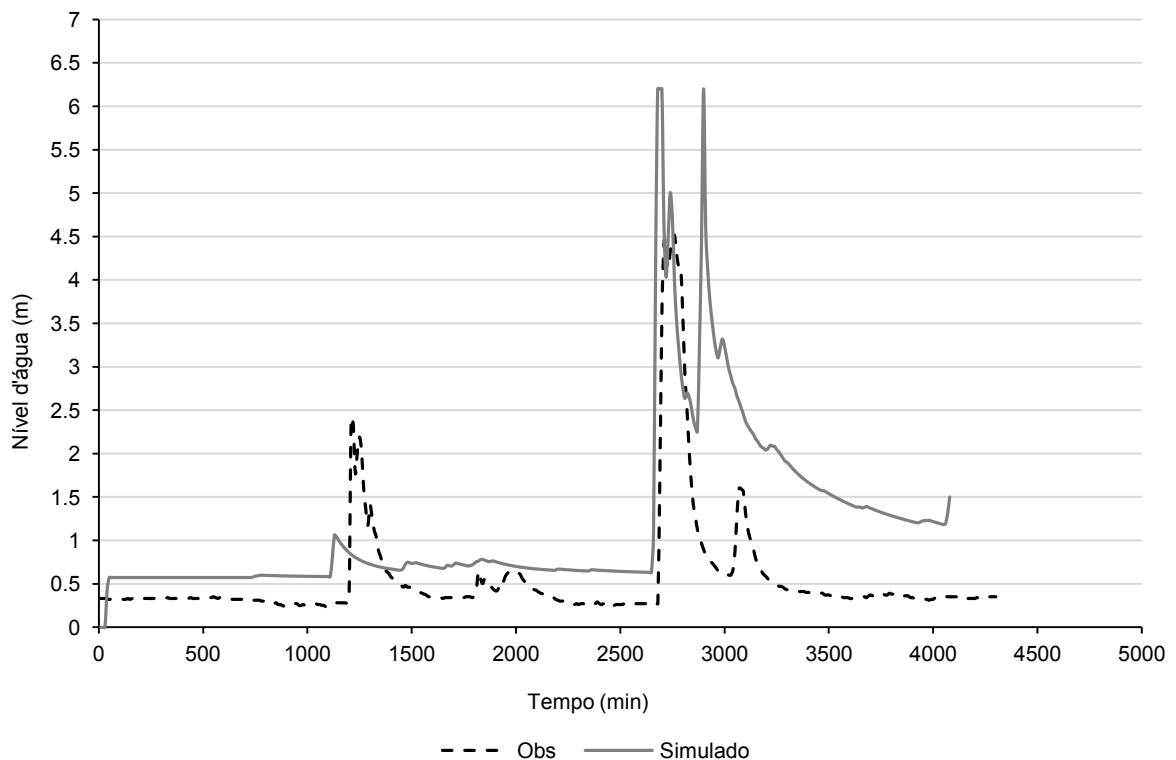


Figura 30 - Valores dos níveis d'água simulados e observados no exutório da sub-bacia 30 para o evento 4 do ajuste manual.

Conforme mostrado nos resultados acima, não foi possível calibrar a sub-bacia 30 para os dados de 10 em 10 minutos. A dificuldade do modelo em representar dados com essa discretização pode ter ocorrido devido a diversos fatores tanto relacionado aos dados de entrada como às características do modelo utilizado. Dado as dimensões da bacia e rapidez de resposta, uma chuva pontual pode acarretar grandes diferenças quando considerada uniformemente distribuída. Além disso, considerando as características da bacia, o grau de simplificação e a divisão em grandes sub-bacias podem ter sido fundamental para a não representação de eventos curtos. É sabido que à medida que a área de estudo aumenta, as simplificações e incertezas relacionadas aos dados e ao modelo aumentam, isso pode explicar os resultados da calibração da primeira sub-bacia terem sido muito bons enquanto para sub-bacia seguinte os resultados não serem aceitáveis.

5.1.2.2. Demais sub-bacias

Com a impossibilidade de calibração da sub-bacia 30, não foi viável seguir com a calibração das demais sub-bacias. Porém, dado o perfil metodológico do objetivo do trabalho, isso não foi um empecilho e de modo a testar a metodologia proposta foi utilizada apenas a sub-bacia 24. Essa bacia é a mais de montante da região de estudo cuja área é de 48,12 km² e o ponto de referência (estação fluviométrica) e exutório encontram-se na Avenida Teresa Cristina. Essa

região costuma sofrer com inundações nos períodos chuvosos, sendo o trânsito interrompido na Avenida Teresa Cristina nessas situações.

5.2. **Elaboração e Avaliação das Curvas-Chave**

5.2.1. **Verificação da Condição de Contorno no HEC-RAS**

Como o ribeirão Arrudas é muito grande em termos de comprimento, as condições de contorno não afetam as seções de interesse, que correspondem às seções referentes às estações 24, 30, 32, 33 e 35. Essa verificação foi realizada mantendo-se as informações de entrada e modificando-se apenas a condição de contorno de profundidade crítica para normal, considerada como a declividade do trecho de montante e de jusante. A análise considerou apenas as seções 24 e 35, ou seja, a mais a montante e mais a jusante, respectivamente, por serem as mais influenciáveis. O resultado da verificação está apresentado na Figura 31. Apesar da verificação da influência da condição de contorno ter sido feita para todo o canal, devido à impossibilidade de calibração do SWMM para todas as sub-bacias e consequentemente de geração de curvas-chave, a avaliação apresentada a seguir será feita apenas para a sub-bacia 24.

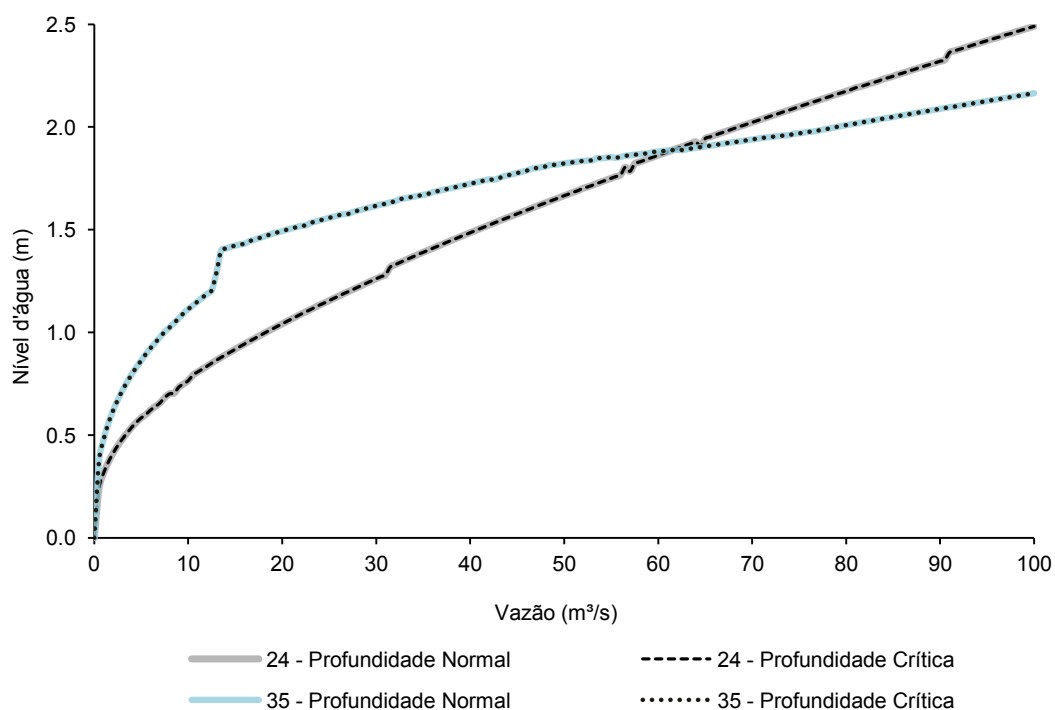


Figura 31 - Relação cota-vazão para diferentes condições de contorno para as estações 24 e 35.

5.2.2. Avaliação das Curvas-Chave

A Figura 32 apresenta as curvas-chave sintéticas geradas pelo HEC-RAS e a gerada pelo SWMM após calibração e validação da sub-bacia 24. Os valores do coeficiente de rugosidade de Manning mostrados são aqueles comumente indicados para o concreto na literatura, de 0,011 a 0,022 (Baptista e Lara, 2016), simulados no modelo hidráulico para fins comparativos. Além desses, foram simulados também o valor de 0,028, que corresponde ao coeficiente de Manning obtido na calibração do SWMM e o valor cuja curva-chave mais se aproxima daquela gerada pelo SWMM. A partir da análise visual, observa-se que a curva-chave do modelo calibrado no SWMM, gerada a partir de um coeficiente de rugosidade para o canal de 0,028, se ajustou à curva-chave do HEC-RAS correspondente ao coeficiente de rugosidade de Manning de 0,034.

Esse valor, fora da faixa esperada para o concreto, pode ser em parte explicado pelo regime de escoamento da simulação realizada no HEC-RAS, que foi o permanente. Formiga *et al.* (2016) ressalva que nos hidrogramas naturais dos rios os regimes são caracterizados por apresentar escoamento não permanente, com os termos de aceleração local e convectiva das equações de Saint-Venant com valores que não podem ser negligenciados, especialmente nas situações de cheias. Porém, observa-se que esse valor, apesar de alto para o concreto, encontra-se dentro do intervalo definido para calibração ou seja, é um valor considerado aceitável para região. Isso ocorre devido às condições locais, como presença de vegetação crescendo na calha principal, concreto velho e com diversas irregularidades.

Essas modificações das condições locais requerem atenção na hora da definição de valores tabelados do coeficiente de rugosidade de Manning mesmo para canais regulares. Segundo Porto (2009), para escoamento em rios e canais este coeficiente de rugosidade pode ser estimado em função do tamanho da rugosidade da parede o que traria um valor físico real a essa estimativa já que este pode ser medido. Utilizando essa relação Nascimento (2017) obteve um valor de coeficiente de Manning de 0,025 para um canal retangular em concreto na Região Metropolitana de Belo Horizonte.

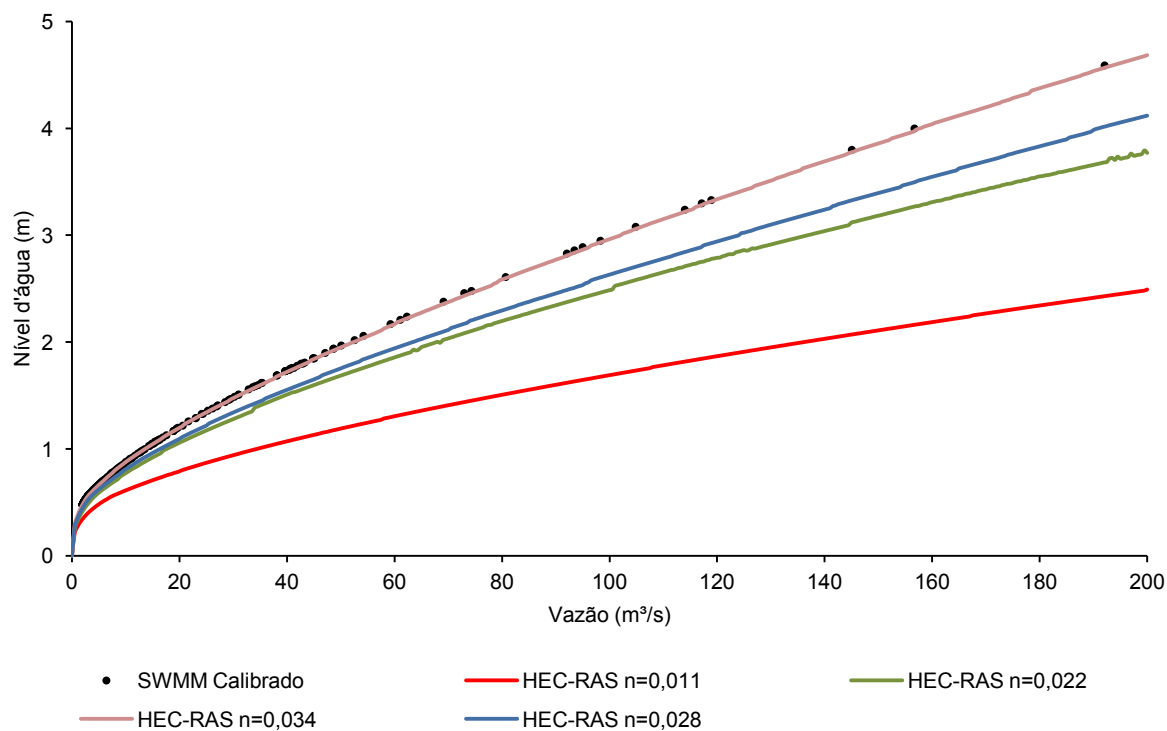


Figura 32 - Curvas-chave para estação 24 geradas pelo HEC-RAS e pelo SWMM, onde n é o coeficiente de rugosidade de Manning.

No modelo do SWMM, além das características hidrológicas da bacia serem consideradas, a propagação no canal é feita no regime não permanente. Dessa forma, espera-se que seu resultado seja mais próximo à realidade. Para confirmar esses valores, seriam necessárias medições de vazão ou velocidade no local. Mesmo uma estimativa de velocidade utilizando flutuadores já permitiria uma melhora no ajuste quanto à ordem de grandeza das vazões no ribeirão. Porém, como a bacia do ribeirão Arrudas não apresenta vazões nem velocidades medidas, a comparação foi feita entre modelos, tomando como referência o modelo que além de ter apresentado um bom ajuste na calibração para a região, também considera mais variáveis no processo de cálculo.

Apesar da falta de dados medidos para a realização de uma comparação mais completa e que possibilitasse uma análise do HEC-RAS na condição não permanente, essa análise permite uma reflexão inicial sobre a consideração de curvas-chave sintéticas como dados observados para calibração de modelos hidrológicos. Dadas as diferenças entre os valores de coeficiente de rugosidade de Manning obtidos em cada um dos modelos, uma atenção maior deve ser dada ao uso desse artifício em locais onde não há medições de vazão.

5.3. Verificação da Antecedência do Alerta para Belo Horizonte

A Coordenadoria Municipal de Defesa Civil (COMDEC) por meio da sua Gerência de Gestão de Riscos Naturais (GGRN) mantém o Centro de Monitoramento e Alerta de Risco (CMAR) que é responsável pelo monitoramento hidrometeorológico diário sendo que nos meses chuvosos, esse monitoramento é feito de forma ininterrupta. A Figura 33 apresenta o fluxograma das principais atividades realizadas pelo CMAR e as ações a serem tomadas no caso da emissão de um alerta. Como todo o monitoramento depende das ferramentas de consulta disponíveis, radar meteorológico, imagens de satélites e informações das estações de monitoramento da RMBH, é necessário primeiramente verificar o bom funcionamento dessas ferramentas disponíveis. A partir daí iniciam-se as atividades diárias do acompanhamento atmosférico e dos níveis d'água nos córregos de BH.

O acompanhamento das condições do tempo é feito através de imagens de satélite, radar meteorológico, modelos numéricos de previsão de alta resolução espacial e temporal, dados de aeroportos, estações meteorológicas e hidrometeorológicas além de dados coletados com agentes em campo e informações dos Centros Estaduais, da União e do TempoClima da PUC Minas. Diariamente, ainda no período da manhã, é feita uma resenha para os gestores da capital mineira com informação descritiva sobre o tempo, com a previsão do TempoClima para o dia em Belo Horizonte e Minas Gerais, além da previsão estendida com um horizonte de 2 dias, somente para Belo Horizonte. Também são inseridas nessa resenha informações sobre ações da Defesa Civil e notícias relacionadas ao tema. Esse documento permite que os gestores tenham um primeiro contato com as condições atmosféricas e dessa forma ter uma noção do que pode ocorrer nas horas seguintes.

Em paralelo com o monitoramento atmosférico, é realizado o monitoramento hidrometeorológico através da rede do município e dessa análise conjunta é verificada a possibilidade de ocorrência de eventos severos. Confirmada essa possibilidade, é feita uma verificação com a equipe de meteorologistas do TempoClima da PUC Minas para em seguida liberar um alerta ou comunicado que possui um caráter preventivo e objetiva deixar as equipes de sobreaviso. A decisão de emissão de um alerta ou comunicado se baseia no plano de contingência que afirma que um comunicado deve ser dado para chuva esperada inferior a 20 mm enquanto a emissão do alerta é para superior a 20 mm, durante a vigência do alerta (PMBH, 2016).

O comunicado/alerta preventivo é divulgado via SMS aos NACs além da divulgação via rede social: Twitter, Facebook e Telegram para a população geral. Neste último uma mensagem é enviada especificamente ao Centro de Operações de Belo Horizonte (COP-BH), aos servidores da prefeitura e a um grupo dedicado à população geral. Dentro da rede social Telegram, a COMDEC está testando a adoção de grupos direcionados à áreas específicas com o intuito de melhorar e garantir o recebimento da informação por parte do interessados, no momento essa experiência está sendo realizada para a área do Vilarinho, localizada na regional Venda Nova no norte do município. Os gestores regionais recebem esse aviso através de um documento enviado via e-mail e por fim, a imprensa (jornais, rádios e portais) também é alertada via e-mail e através do assessor de imprensa do COMDEC.

A partir desse momento, todos os envolvidos estão de sobreaviso e no CMAR o monitoramento é feito de maneira minuciosa com o objetivo de verificar se o evento previsto é confirmado. Apesar de serem divulgados da mesma maneira, o comunicado tem um caráter mais ameno e embora a equipe do CMAR mantenha o monitoramento mais frequente da mesma forma que se um alerta fosse emitido, as equipes e gestores não ficam de sobreaviso. A confirmação ou não do evento corresponde ao início das chuvas e consequente modificações no nível dos córregos e ribeirões. Caso o evento não seja confirmado, mantém-se a rotina operacional de monitoramento, caso seja, diversas atividades são executadas conforme itens 9 a 13 da Figura 33.

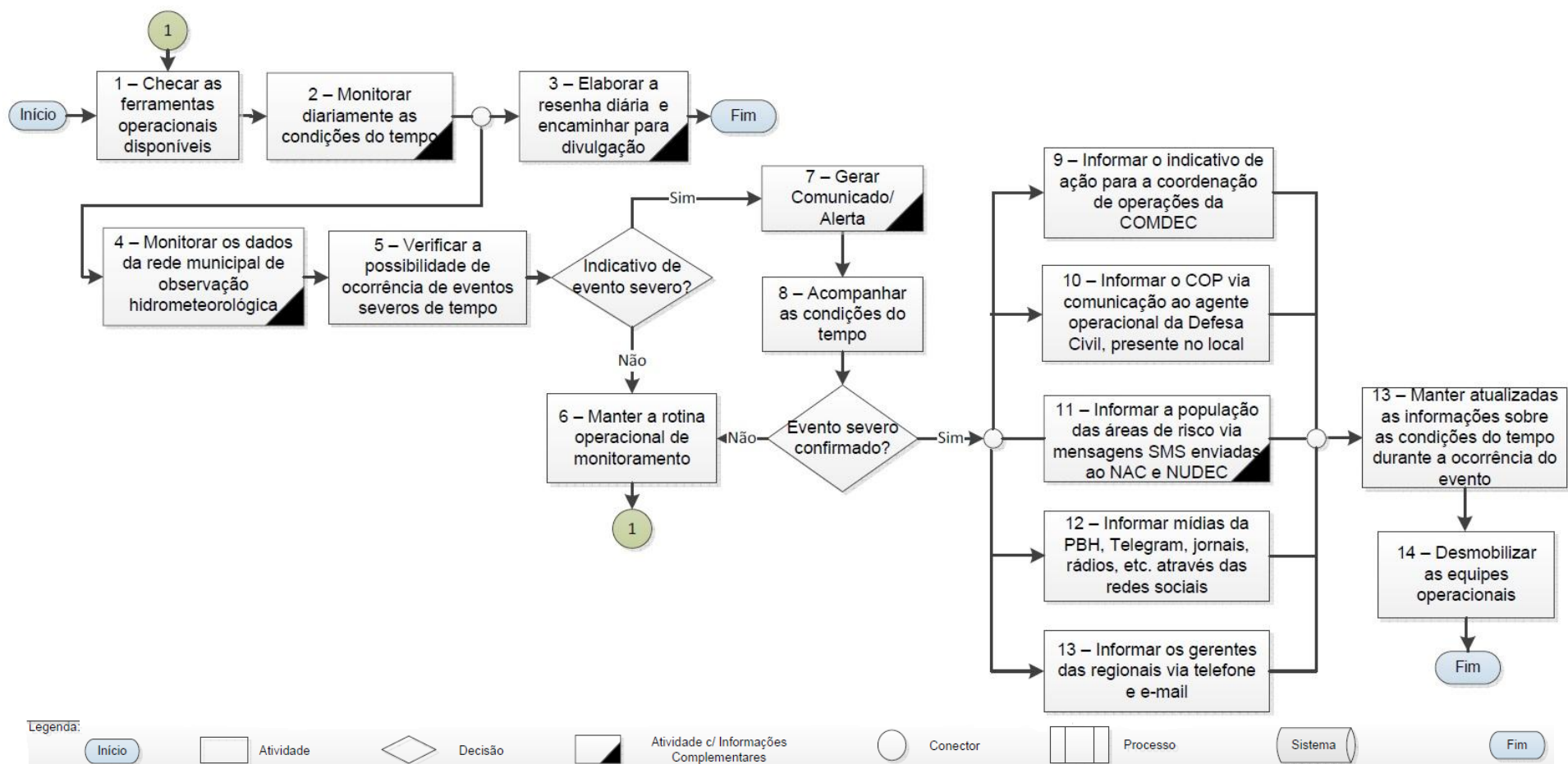


Figura 33 - Fluxograma dos macroprocessos do monitoramento meteorológico para emissão de alertas.

Fonte: COMDEC (2016).

A primeira atividade a ser feita é informar à coordenação de operações da COMDEC sobre o local do evento e sua magnitude para que as equipes, já de sobreaviso, sejam enviadas ao local. Em seguida, entra-se em contato com o agente da Defesa Civil no COP e esse agente serve como link repassando a informação às gerências vinculadas, como a BHTrans e a Guarda Municipal. Essas equipes já se encontram em campo e as mais próximas ao local do evento são redirecionadas. Um novo SMS é enviado aos NACs confirmando o risco de transbordamento e as redes sociais são constantemente atualizadas com informações recentes durante todo o evento de chuva.

O COP funciona como um ambiente integrador sem hierarquias cuja comunicação é feita de maneira horizontal. Em um ambiente integrado, a comunicação é facilitada e as respostas aos eventos conseguem ser dadas de maneira mais eficiente e completa. Representantes de diferentes órgãos estão inseridos no COP com o intuito de servir como um elo entre o órgão que representa e os demais órgãos de modo que as soluções sejam adotadas de forma holística.

Todos os envolvidos nesse processo de resposta aos eventos de inundações seguem protocolos e ações previstas no plano de contingência. A mobilização das equipes também é feita conforme critérios de volume de chuva e nível d'água apresentados no plano, porém alguns critérios são conservadores para algumas regiões e por isso na prática é necessário intervir antes. Isso mostra a precisão de se atualizar esses critérios do plano segundo o conhecimento de cada local. Percebe-se assim que cada localidade tem um tempo de resposta diferente e que a antecedência necessária é variável.

A dificuldade em definir um tempo de antecedência de alerta ótimo para que as ações sejam tomadas e a previsão seja assertiva está refletida na complexidade das ações explicitadas. O número de variáveis envolvidas desde a previsão, passando pela comunicação e até as distâncias entre as equipes mobilizadas e o local da inundação reflete em diferentes cenários com diferentes tempos de ação necessários. Assim, seria necessário analisar cada um desses cenários para definir assertivamente um tempo de antecedência ótimo que englobasse os piores casos. Apesar da impossibilidade de responder esse questionamento, as ferramentas propostas nessa pesquisa buscam fornecer subsídios para diminuir o grau de subjetividade ligado à decisão de emissão do alerta e com isso melhorar a assertividade do sistema.

5.4. Avaliação das Chuvas Sintéticas

5.4.1. Gerador Estocástico

Conforme introduzido na metodologia, o gerador estocástico semi independente foi elaborado em três etapas sendo a amostra utilizada para sua geração, os eventos selecionados entre os anos de 2013 e 2016. A grande dificuldade em separar eventos de dados contínuos é definir qual o tamanho do período sem chuvas que tornam dois eventos independentes, Ferreira (2015) apresenta alguns critérios utilizados nessa seleção. Dunkerley (2008) ressalta que, a depender dos intervalos entre chuvas adotados, o número de eventos selecionados assim como suas características variam consideravelmente.

Ainda segundo Dunkerley (2008), o tempo entre eventos utilizados na literatura varia de 3 minutos a 24 horas, sendo que esse deve ser definido segundo a região estudada e os objetivos do trabalho. Para a seleção foram considerados apenas eventos simples de pelo menos 20 minutos onde os intervalos sem chuva não ultrapassassem 30 minutos, já que os eventos de interesse são convectivos. A definição de eventos dessa natureza foi um facilitador na separação deles assim como na geração dos eventos sintéticos, além disso, devido às características da bacia, eventos curtos e intensos costumam gerar alertas e causar inundações.

No total foram selecionados 541 eventos dentro do período analisado para todas as 5 estações fluviométricas da calha principal do Ribeirão Arrudas, destacando de cada um a duração, total precipitado, intensidade média, variância e tempo de pico, que foi considerado como o tempo para a ocorrência do primeiro valor máximo de chuva. A Tabela 16 exemplifica as características do total precipitado e da intensidade por duração dos eventos selecionados, além do número de eventos em cada duração.

Tabela 16 - Características e número de eventos selecionados por duração.

Duração (min)	Nº	P _{Total} Médio (mm)	P _{Total} Máximo (mm)	P _{Total} Mínimo (mm)	Intens. Média (mm/h)	Intens. Máxima (mm/h)	Intens. Mínima (mm/h)
20	43	4,86	15,80	1,40	14,57	47,40	4,20
30	70	5,64	24,20	1,40	11,27	48,40	2,80
40	69	6,69	31,60	1,40	10,03	47,40	2,10
50	43	9,72	38,00	1,60	11,66	45,60	1,92
60	28	8,76	25,80	1,80	8,76	25,80	1,80
70	24	9,04	26,40	1,80	7,75	22,63	1,54
80	27	13,71	56,40	2,60	10,28	42,30	1,95

Tabela 16 - Continuação.

Duração (min)	Nº	P_{Total} Médio (mm)	P_{Total} Máximo (mm)	P_{Total} Mínimo (mm)	Intens. Média (mm/h)	Intens. Máxima (mm/h)	Intens. Mínima (mm/h)
90	19	13,71	28,80	2,40	9,14	19,20	1,60
100	21	12,03	36,20	1,80	7,22	21,72	1,08
110	18	15,67	56,00	3,60	8,55	30,55	1,96
120	14	13,57	27,80	4,40	6,79	13,90	2,20
130	12	15,07	75,80	3,60	6,95	34,98	1,66
140	11	9,36	15,20	3,80	4,01	6,51	1,63
150	15	13,57	34,60	4,80	5,43	13,84	1,92
160	19	14,09	38,60	5,20	5,29	14,48	1,95
170	16	19,26	45,20	5,00	6,80	15,95	1,76
180	8	23,65	62,60	5,00	7,88	20,87	1,67
190	7	15,23	28,20	6,60	4,81	8,91	2,08
200	2	24,10	37,00	11,20	7,23	11,10	3,36
210	3	46,27	68,40	6,80	13,22	19,54	1,94
220	7	44,06	69,80	4,20	12,02	19,04	1,15
230	7	36,94	93,60	6,80	9,64	24,42	1,77
240	11	26,24	54,20	9,00	6,56	13,55	2,25
250	4	16,05	21,60	11,20	3,85	5,18	2,69
260	3	8,80	10,00	7,00	2,03	2,31	1,62
270	5	28,76	75,20	13,40	6,39	16,71	2,98
280	2	23,00	29,20	16,80	4,93	6,26	3,60
290	5	40,32	99,20	16,20	8,34	20,52	3,35
300	4	21,45	33,80	16,20	4,29	6,76	3,24
310	2	18,10	19,40	16,80	3,50	3,75	3,25
320	1	21,40	21,40	21,40	4,01	4,01	4,01
330	2	25,40	27,40	23,40	4,62	4,98	4,25
340	2	39,60	40,40	38,80	6,99	7,13	6,85
350	1	14,80	14,80	14,80	2,54	2,54	2,54
370	2	29,80	41,00	18,60	4,83	6,65	3,02
380	3	47,07	68,20	20,00	7,43	10,77	3,16
400	1	19,00	19,00	19,00	2,85	2,85	2,85
410	2	33,00	50,80	15,20	4,83	7,43	2,22
420	2	30,90	43,20	18,60	4,41	6,17	2,66
460	1	8,80	8,80	8,80	1,15	1,15	1,15
470	1	18,20	18,20	18,20	2,32	2,32	2,32
480	1	52,20	52,20	52,20	6,53	6,53	6,53
600	1	89,80	89,80	89,80	8,98	8,98	8,98
620	1	104,60	104,60	104,60	10,12	10,12	10,12
770	1	21,20	21,20	21,20	1,65	1,65	1,65

Como é possível perceber da Tabela 16, essa seleção buscou englobar eventos com diferentes características de modo a permitir que o gerador simulasse diferentes situações. A duração dos eventos variou de 20 minutos, mínimo adotado, a 770 min (12 horas e 50 minutos) sendo a média das durações 107 minutos. O número de eventos selecionados para durações acima de 180 minutos foi muito menor que os de curta duração (Figura 34), dessa forma não foi possível caracterizar de maneira satisfatória os eventos de duração mais alta, conforme apresenta a Figura 35. Um resumo dos valores máximos e mínimos, assim como a média e variância das durações, precipitação acumulada, variância da precipitação e tempo de pico são apresentadas na Tabela 17.

Tabela 17 - Resumo das características estatísticas da duração, total acumulado, variância e tempo de pico dos eventos selecionados.

	Duração (min)	P _{TOTAL} (mm)	Variância	Tempo de Pico (min)
Mínimo	20,0	1,4	0,01	10,0
Máximo	770,0	104,6	98,65	260,0
Variância	9.686,72	215,82	90,10	1083,66
Média	107,0	13,2	4,84	34,0

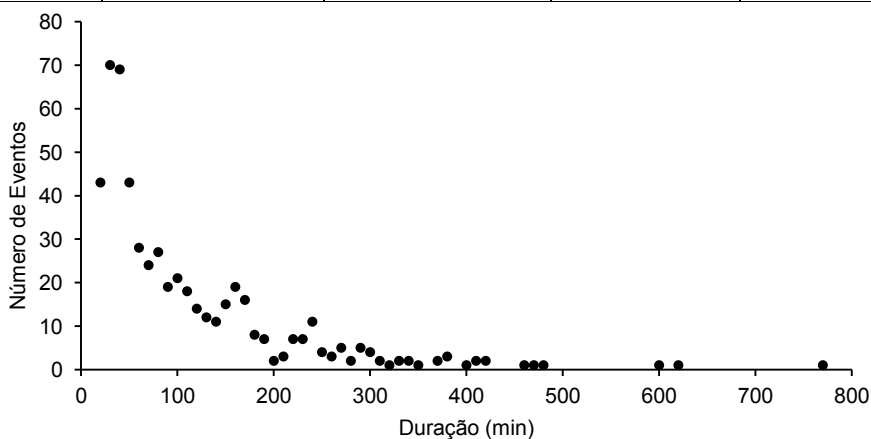


Figura 34 - Relação do número de eventos selecionados por duração.

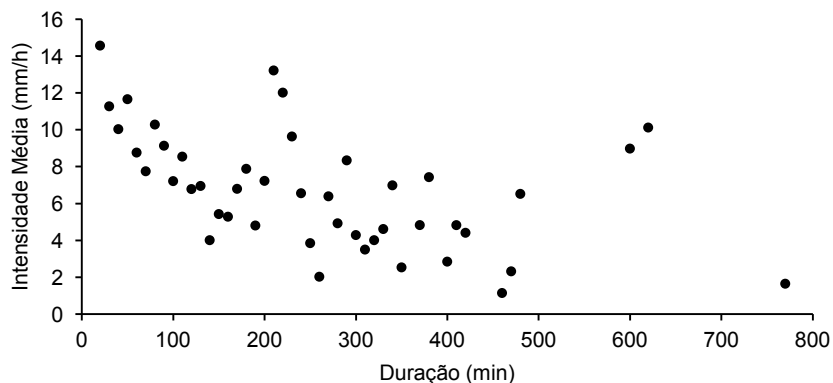


Figura 35 - Relação da intensidade média por duração para os eventos selecionados.

A etapa de implantação do gerador tem como primeira parte a determinação da duração. Para definir a melhor distribuição de probabilidade para essa característica foi necessária a elaboração de um histograma das durações selecionadas (Figura 36). Observou-se que a distribuição mais adequada foi a exponencial (Equação 2) cujo único parâmetro (Θ) é dado pela média amostral segundo o método dos momentos (Naghetini e Pinto, 2007). Foram adotados blocos de chuva de 20 minutos e a duração máxima foi de 6 horas devido ao tempo de concentração da bacia, que é de 6,23 horas, conforme já mencionado.

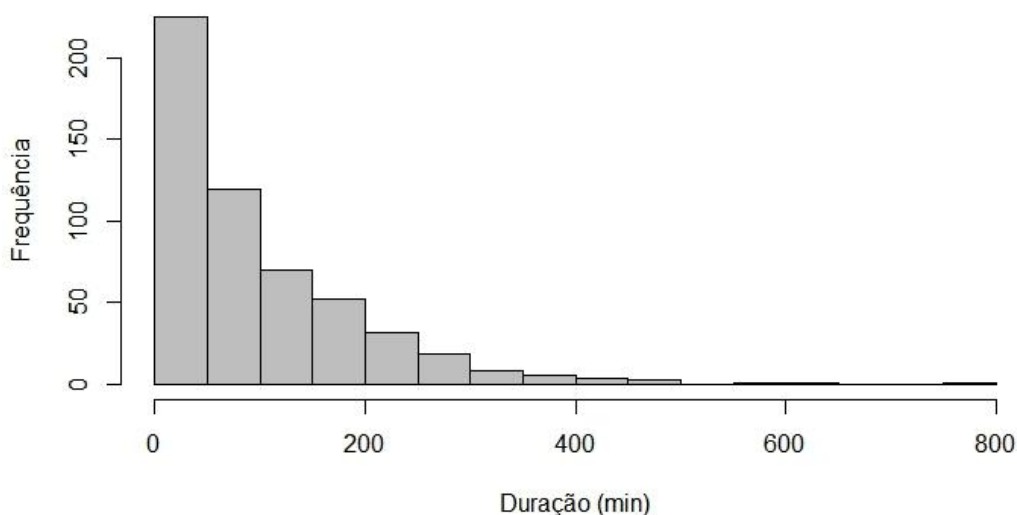


Figura 36 - Histograma da duração dos eventos selecionados.

$$f_x(x) = \frac{1}{\theta} \exp\left(-\frac{x}{\theta}\right) \text{ para } x \geq 0 \rightarrow \theta = \bar{x} = 107 \text{ min} \quad \text{Equação 2}$$

A segunda parte do gerador corresponde à definição do total precipitado e é a única etapa dependente do processo. A Figura 37 mostra a relação da precipitação acumulada com a duração para os eventos selecionados, no qual é possível observar para cada duração a distribuição do total acumulado. Para a precipitação acumulada, este trabalho não buscou ajustar os valores observados à uma distribuição pois o objetivo nesta etapa foi conseguir gerar igualmente todos os valores de total precipitado possíveis para cada duração e, dessa forma, analisar todas as possibilidades. Assim, optou-se por distribuir a precipitação uniformemente (Equação 3) por cada duração.

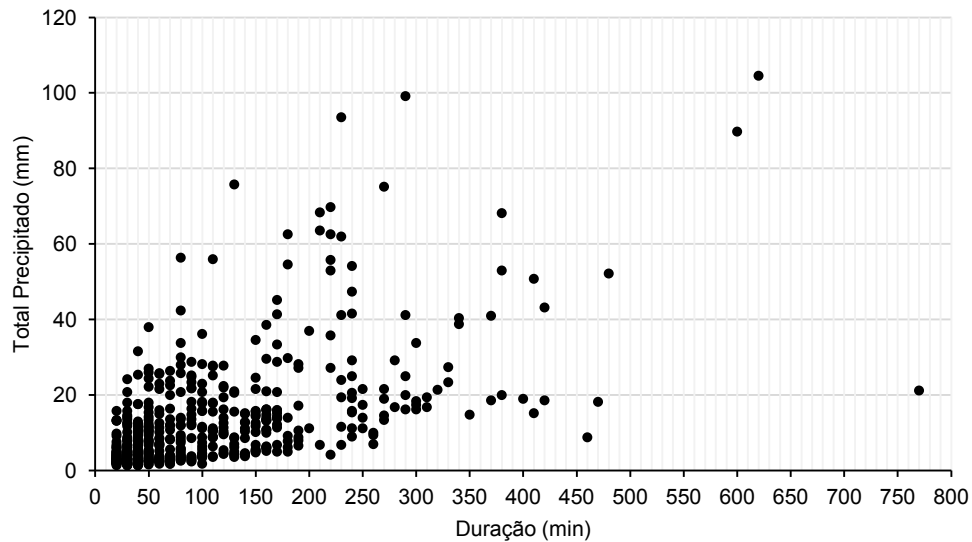


Figura 37 - Distribuição do total precipitado por duração.

Foi necessário definir um limite superior para evitar a geração de valores irreais, problema comum em geradores estocásticos (Costa *et al.*, 2014). Como o número de eventos selecionados para durações altas não foi suficiente para uma boa caracterização, adotou-se como critério para limite superior a estimativa da precipitação de 10.000 anos de período de retorno do posto Minas Águas Claras localizado na região metropolitana de Belo Horizonte, próximo à área de estudo, apresentada por Pinheiro (2011). A definição desse quantil para limite permite a ocorrência de valores altos de precipitação, o que garante a abrangência de eventos extremos e não se limita aos máximos observados. Além disso, com essa definição foi possível definir diferentes limites para cada uma das durações, mesmo as que não possuíam dados observados.

$$f(x) = \frac{1}{b - a}, \text{ para } a \leq x \leq b \quad \text{Equação 3}$$

O estudo de Pinheiro (2011) não apresenta a precipitação acumulada para todas as durações discretizadas em 10 minutos. Dessa forma, os valores apresentados pelo autor para 6, 10, 15, 20, 30, 60, 120, 180, 240, 360 e 480 minutos foram utilizados para interpolar os demais valores através de relação logarítmica, apresentada na Figura 38. A Tabela 18 apresenta os valores interpolados da precipitação acumulada por duração utilizados como limite superior do gerador estocástico para essa segunda etapa.

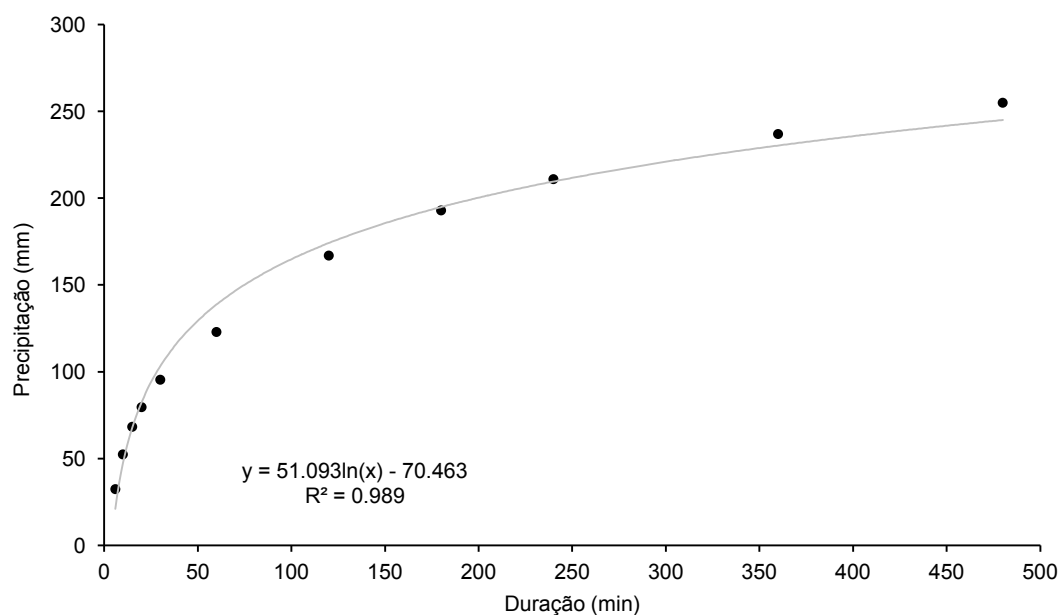


Figura 38 - Relação da precipitação com a duração para 10.000 anos de período de retorno para o Posto Mina Águas Claras.

Fonte: Elaborado a partir de Pinheiro (2011).

Tabela 18 - Valores dos limites superiores da distribuição uniforme para as diferentes durações.

Duração (min)	Limite Superior (mm)	Duração (min)	Limite Superior (mm)
20	82,60	200	200,24
30	103,31	210	202,74
40	118,01	220	205,11
50	129,41	230	207,38
60	138,73	240	209,56
70	146,61	250	211,65
80	153,43	260	213,65
90	159,45	270	215,58
100	164,83	280	217,44
110	169,70	290	219,23
120	174,14	300	220,96
130	178,23	310	222,64
140	182,02	320	224,26
150	185,55	330	225,83
160	188,84	340	227,36
170	191,94	350	228,84
180	194,86	360	230,28
190	197,62		

Finalizadas as etapas de definição da distribuição da duração e do total precipitado, a última parte do gerador é dada pela determinação da discretização temporal da precipitação ao longo da duração definida. Essa etapa é independente das anteriores e uma vez que a distribuição da chuva no tempo é um importante fator do potencial da inundação, buscou-se não restringir o gerador a uma forma específica de evento, de modo que a chuva gerada englobasse as diversas possibilidades de ocorrência.

Dessa forma, apesar dos diversos métodos de determinação de hietogramas citados na literatura como, por exemplo, o método dos blocos alternados, o método de Chicago e o método de Huff (1967), optou-se por utilizar a distribuição de probabilidade beta que é bastante flexível quanto à forma, a depender dos parâmetros adotados (Figura 39) e é naturalmente limitada tanto inferiormente como superiormente (Naghetini e Pinto, 2007).

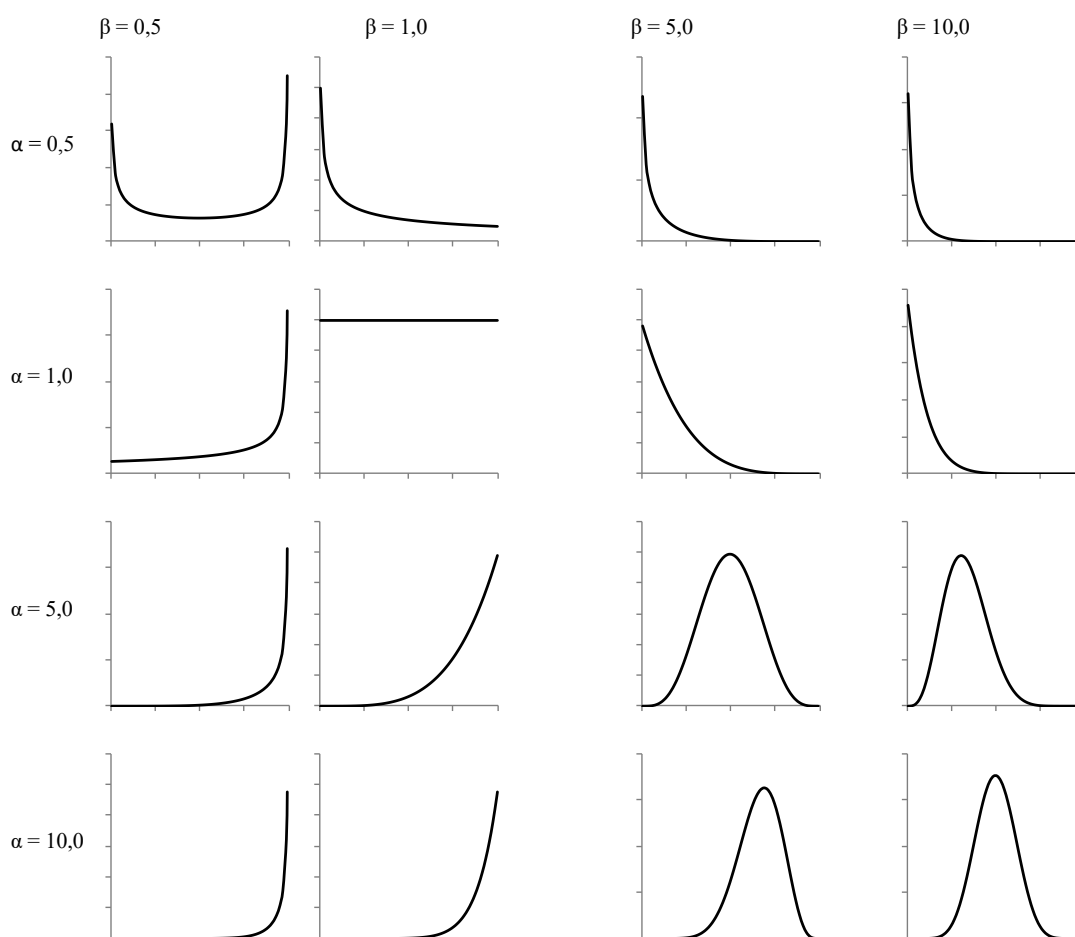


Figura 39 - Diversos formatos da distribuição beta conforme diferentes parâmetros.

A Equação 4 expressa a função de densidade beta na qual α e β são os parâmetros. O parâmetro α controla os valores relacionados ao limite inferior, enquanto o limite superior é

controlado por β e quando os parâmetros têm valores iguais a função é simétrica. Assim, os parâmetros devem ser definidos de modo a englobar as diferentes formas oferecidas pela distribuição beta. Após alguns testes, adotou-se o intervalo de variação de 0,5 a 10 tanto para α como para β , uma vez que com esses valores foi possível englobar diferentes formatos para distribuição da chuva.

$$f_x(x) = \frac{1}{B(\alpha, \beta)} x^{\alpha-1} (1-x)^{\beta-1} \text{ para } 0 \leq x \leq 1, \alpha > 0, \beta > 0 \quad \text{Equação 4}$$

5.4.2. Análise das Características da Chuva

A partir das características definidas acima, foram gerados e em seguida simulados 150.000 eventos no SWMM. Os resultados apresentados após a simulação de todos os eventos foram a relação dos eventos que geraram cada um dos alertas e os que não geraram e algumas características desses eventos como duração, precipitação acumulada, precipitação máxima em 10 min e parâmetros alfa e beta da distribuição. Dos 150.000 eventos simulados, 25.574 geraram alertas amarelos, 12.348 geraram alertas laranjas, 72.724 geraram alertas vermelhos e 39.354 não geraram alerta. Devido ao foco do trabalho, nesse tópico serão analisados apenas os eventos que geraram algum tipo de alerta.

Conforme esperado, a distribuição das durações simuladas apresenta comportamento exponencial para todos os alertas (Figura 40 a Figura 42). A precipitação média acumulada apresenta caráter crescente com a duração devido aos limites superiores definidos conforme apresenta a Figura 43. No Apêndice 2 são apresentados histogramas das precipitações acumuladas para algumas durações dos três alertas. As intensidades médias simuladas para cada um dos alertas também apresentam comportamento esperado com a relação intensidade e duração coerente com a da literatura como é possível observar na Figura 44.

A partir da análise dessas figuras verifica-se que os resultados gerados pelo conjunto gerador estocástico mais as simulações no SWMM apresentam resultados coerentes já que a distribuição das durações adotadas foi a exponencial e que como esperado as intensidades e alturas das chuvas são maiores para os eventos com alerta vermelho e são menores para os de alerta amarelo. Da Figura 45 a Figura 47 são apresentados os histogramas da intensidade média para cada alerta, onde é possível observar mais uma vez a coerência dos resultados obtidos uma vez que a intensidade diminui com o aumento da duração.

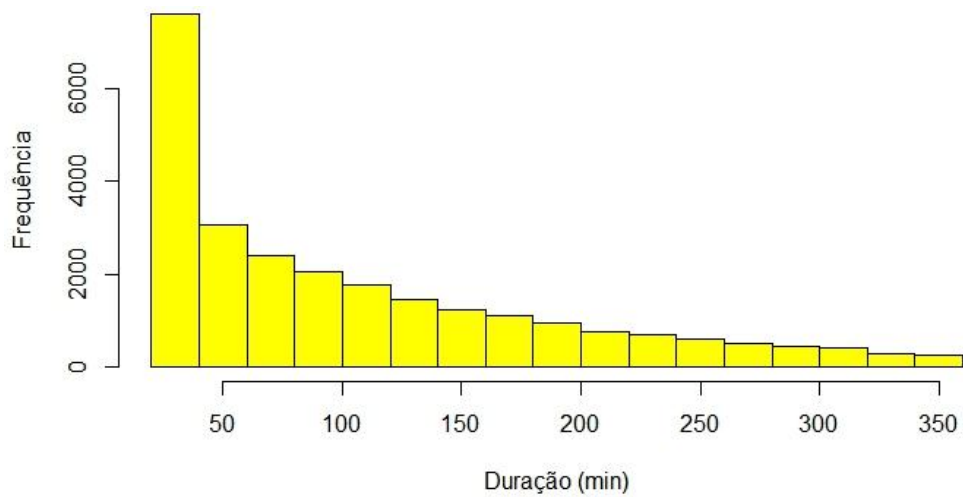


Figura 40 - Histograma da duração para os eventos que geraram alerta amarelo.

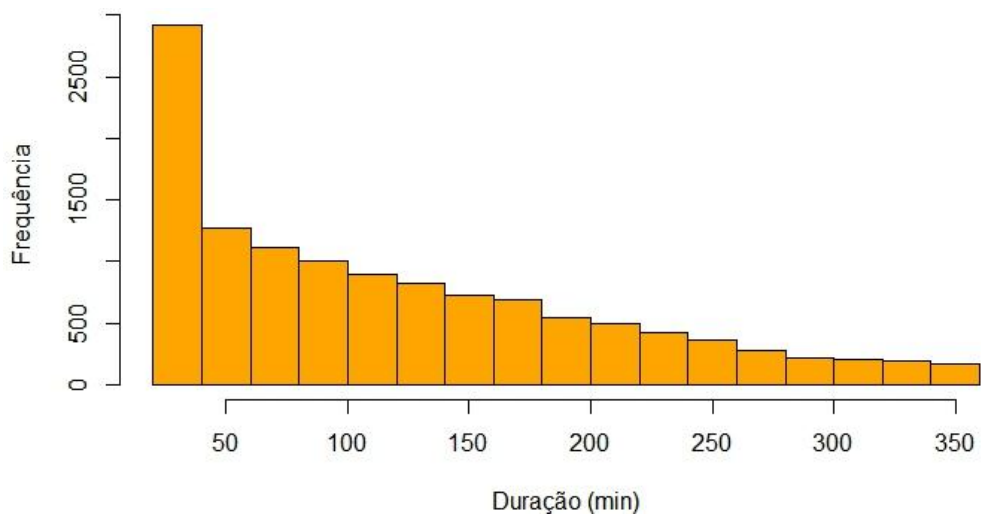


Figura 41 - Histograma da duração para os eventos que geraram alerta laranja.

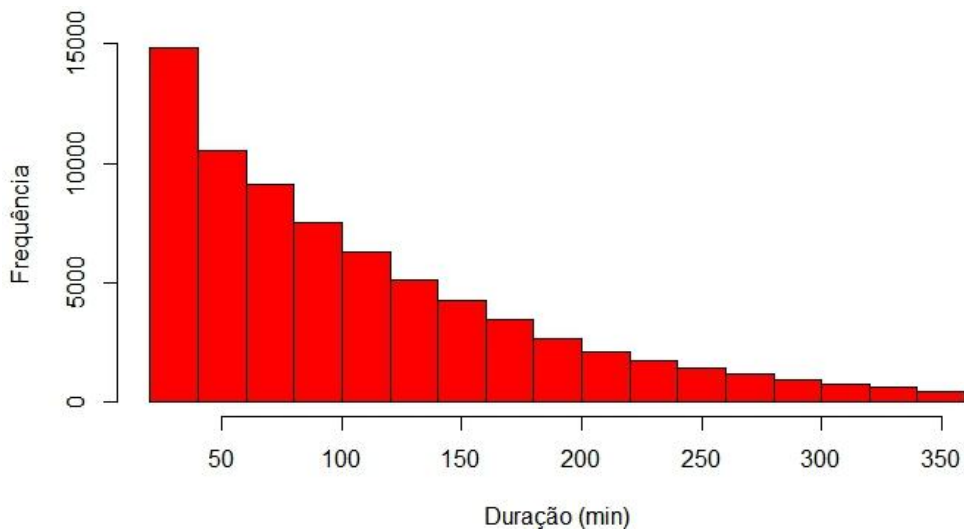


Figura 42 - Histograma da duração para os eventos que geraram alerta vermelho.

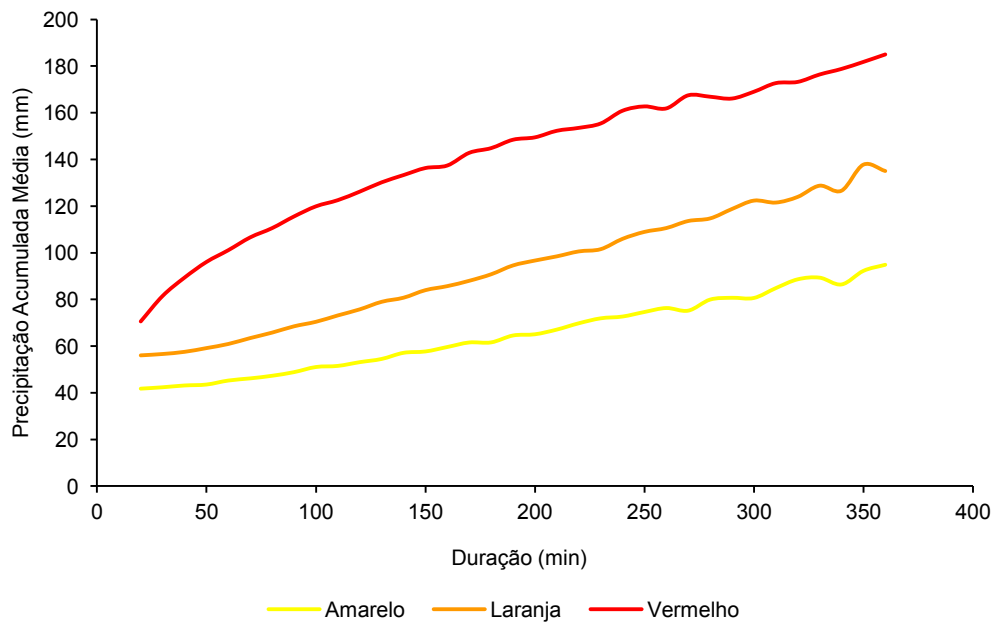


Figura 43 - Relação da precipitação acumulada e a duração para os eventos dos três alertas.

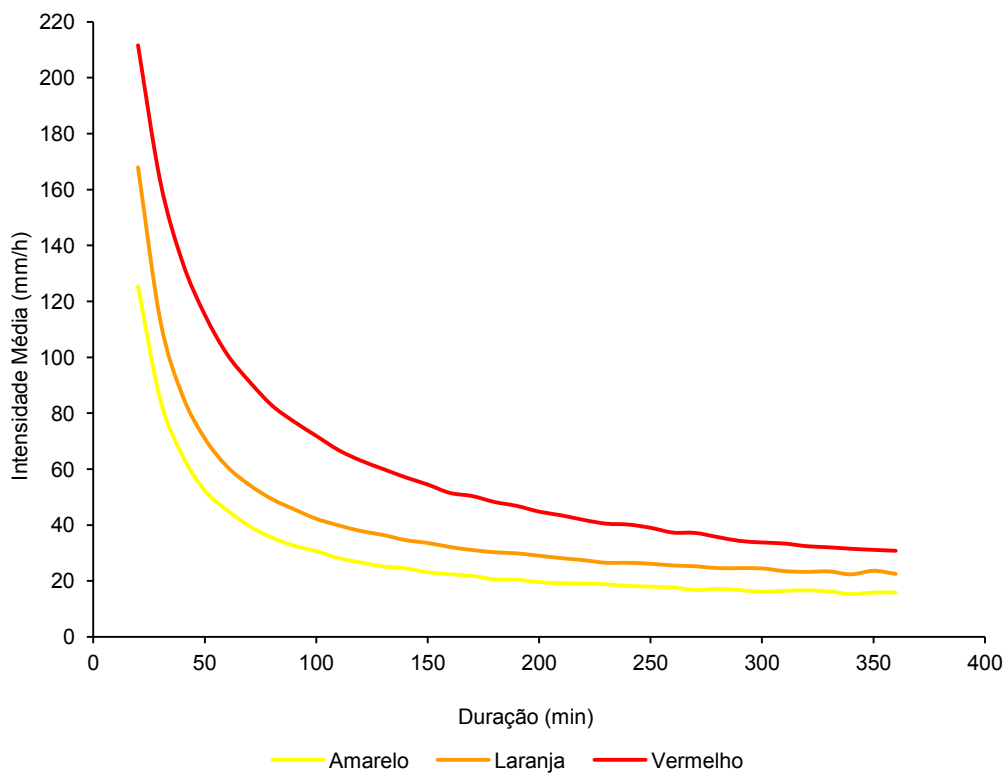


Figura 44 - Relação da intensidade média por duração para os eventos dos três alertas.

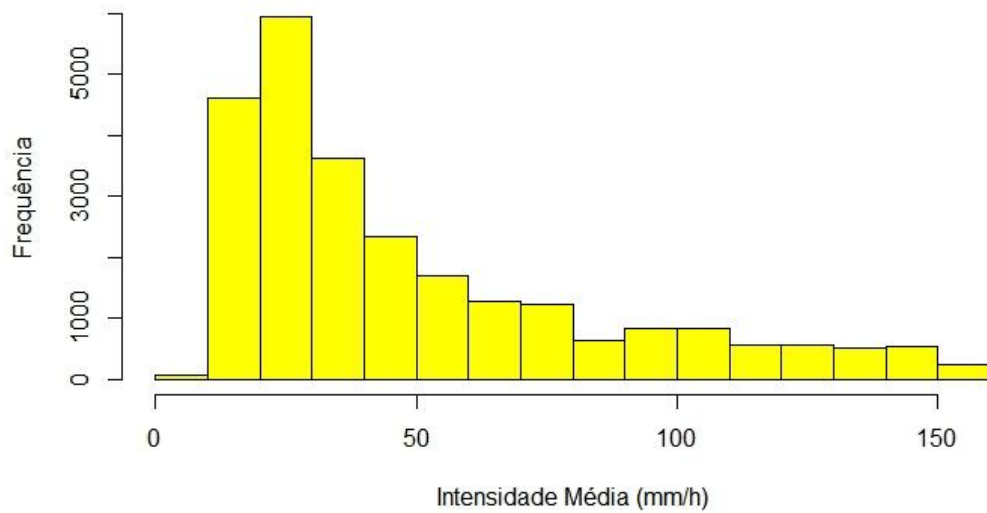


Figura 45 - Histograma da intensidade média dos eventos que geraram alerta amarelo.

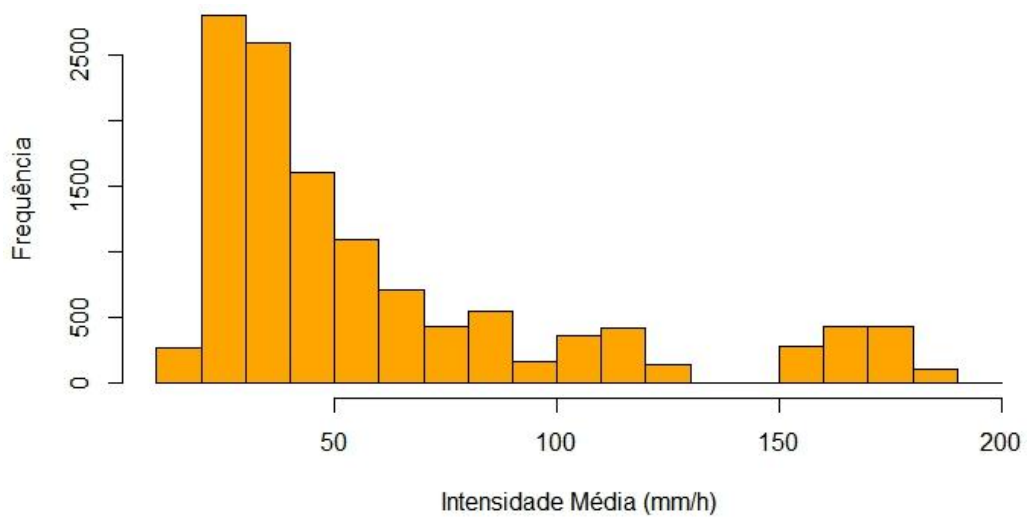


Figura 46 - Histograma da intensidade média dos eventos que geraram alerta laranja.

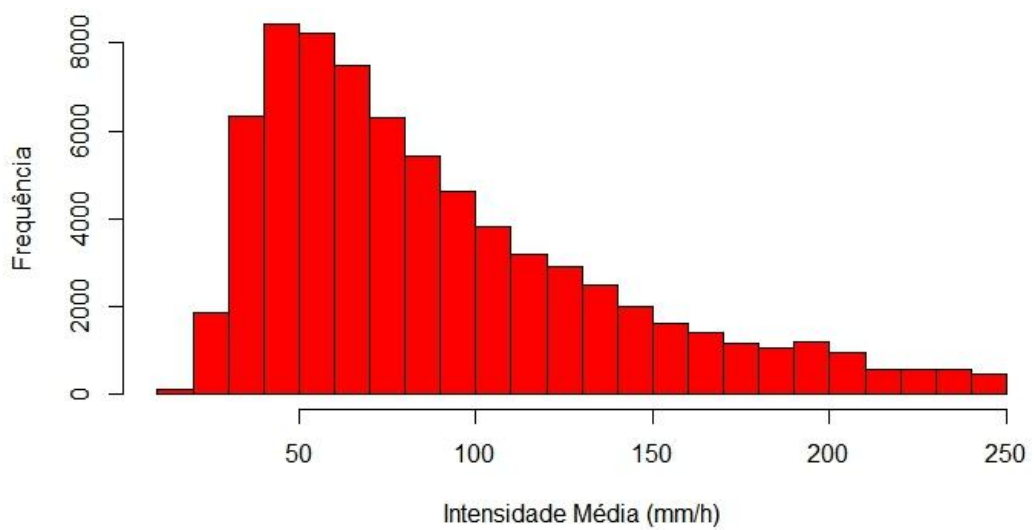


Figura 47 - Histograma da intensidade média dos eventos que geraram alerta vermelho.

A partir da análise dos histogramas dos parâmetros alfa e beta (Figura 48 a Figura 53) é possível observar que ambos os parâmetros para todos os alertas apresentaram uma distribuição de frequência uniforme, o que indica que não houve um formato preferencial de chuva para gerar nenhum dos alertas. Uma explicação para esse resultado diferente do esperado é que a distribuição beta pode não ter sido a melhor forma de representar e analisar a distribuição temporal da chuva. Outra explicação pode estar relacionada à pouca sensibilidade do modelo à forma da chuva. Como para este trabalho eram variadas diversas características da chuva simultaneamente, não é possível afirmar que a forma da chuva não tem influência na geração de alertas. Para essa verificação seria necessário fixar volume e duração e variar apenas a forma de modo a observar qual a consequência dessa variação nos resultados, porém isso não faz parte do âmbito desse trabalho.

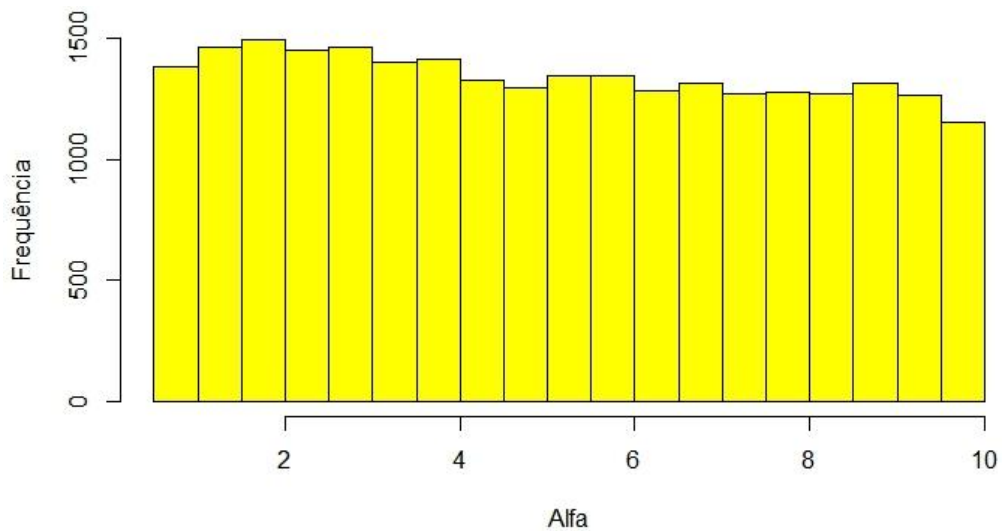


Figura 48 - Histograma do parâmetro alfa para os eventos que geraram alerta amarelo.

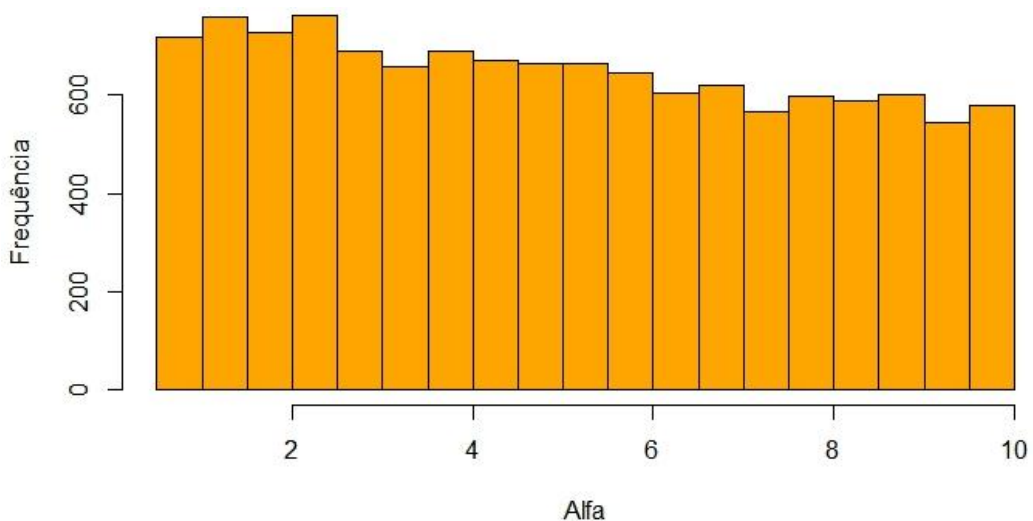


Figura 49- Histograma do parâmetro alfa para os eventos que geraram alerta laranja.

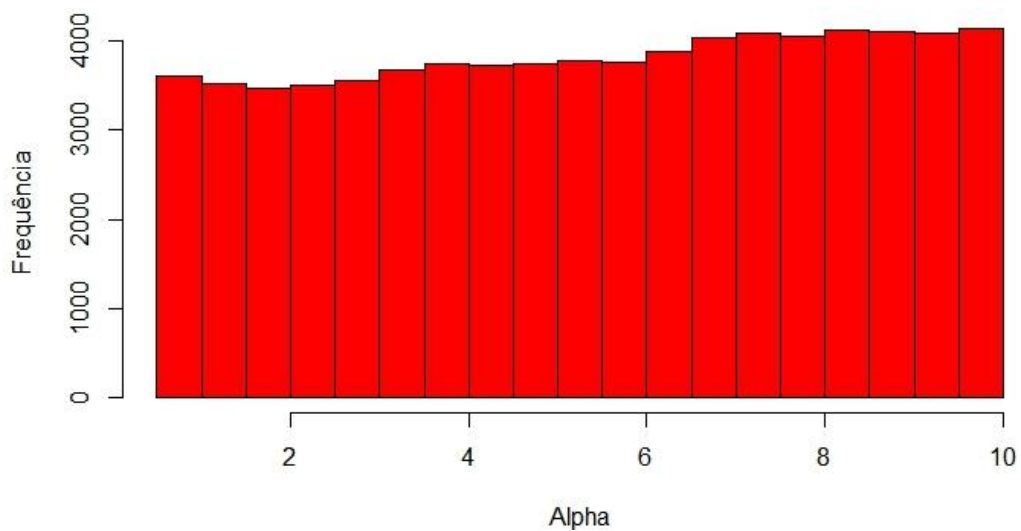


Figura 50- Histograma do parâmetro alfa para os eventos que geraram alerta vermelho.

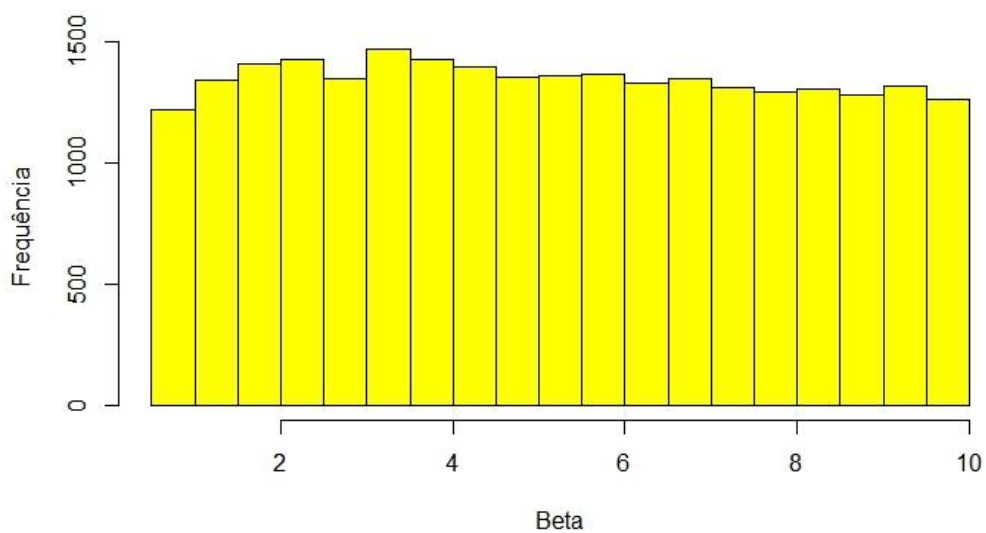


Figura 51 - Histograma do parâmetro beta para os eventos que geraram alerta amarelo.

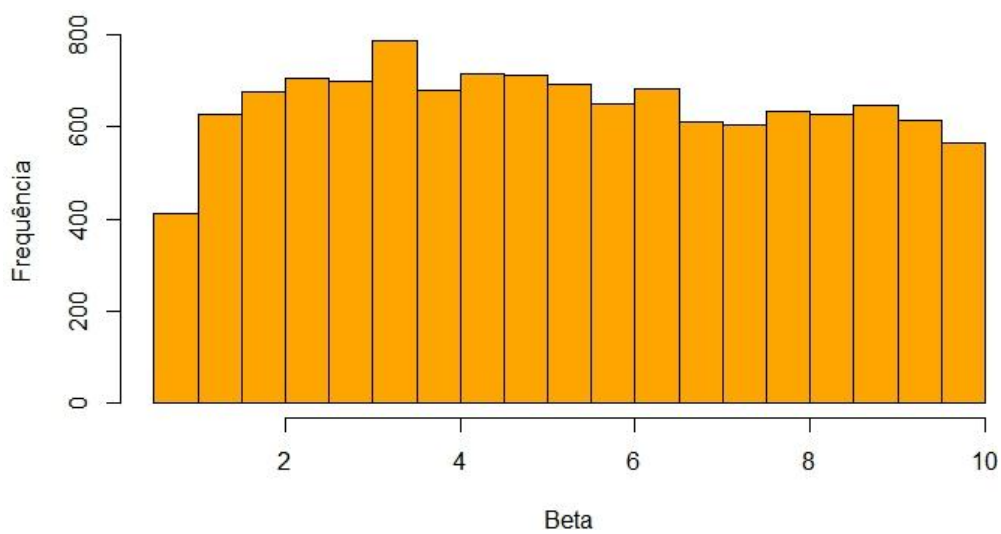


Figura 52 - Histograma do parâmetro beta para os eventos que geraram alerta laranja.

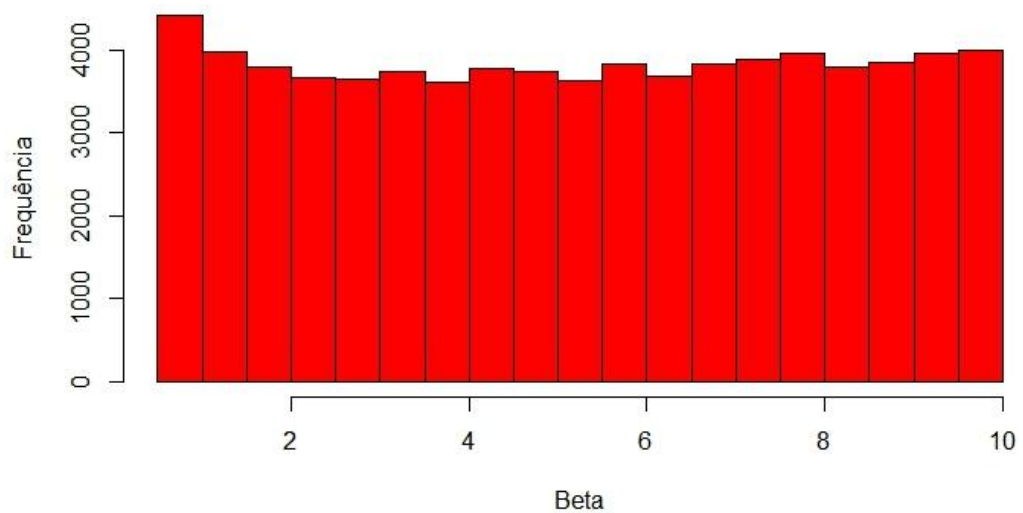


Figura 53 - Histograma do parâmetro beta para os eventos que geraram alerta vermelho.

5.4.2.1. Análise das Probabilidades de Ocorrência

De posse dos valores do total precipitado para cada alerta foi possível ajustar uma probabilidade empírica de ocorrência do alerta dado a altura precipitada por duração. Com essa informação foram gerados gráficos como o apresentado na Figura 54, onde cada curva representa a relação entre o total precipitado e a probabilidade do alerta para determinada duração. A Figura 54 apresenta as probabilidades de alerta amarelo para eventos de até 1 hora, por exemplo, a probabilidade de ocorrer um alerta amarelo para uma precipitação de 50 mm em 20 minutos é de 92% enquanto que para uma duração de 60 minutos é de 75%.

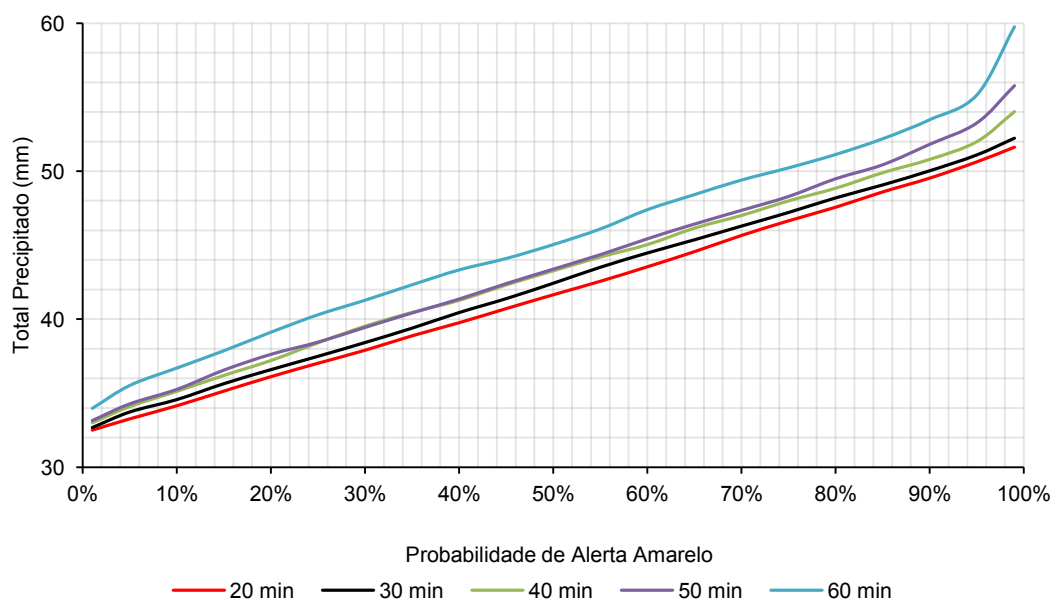


Figura 54 - Probabilidade de ocorrência de alerta amarelo para eventos de até 1 hora.

Esses gráficos foram gerados por hora para facilitar a leitura das probabilidades. Assim, 6 gráficos por alerta foram gerados para representar as 6 horas definidas como duração máxima da chuva. Eles possuem a mesma interpretação explicada acima e encontram-se apresentados no Apêndice 3, os referentes ao alerta amarelo, no Apêndice 4, os do alerta laranja e no Apêndice 5, os referentes ao alerta vermelho.

De maneira análoga, foram gerados gráficos de calor por alerta onde as curvas representam as probabilidades de ocorrência do alerta dado uma altura precipitada e uma determinada duração. Dessa forma é possível sintetizar em apenas um gráfico por alerta a probabilidade de ocorrência do alerta dada todas as durações e totais precipitados simulados. Esses gráficos são apresentados nas Figura 55 a Figura 57 a seguir.

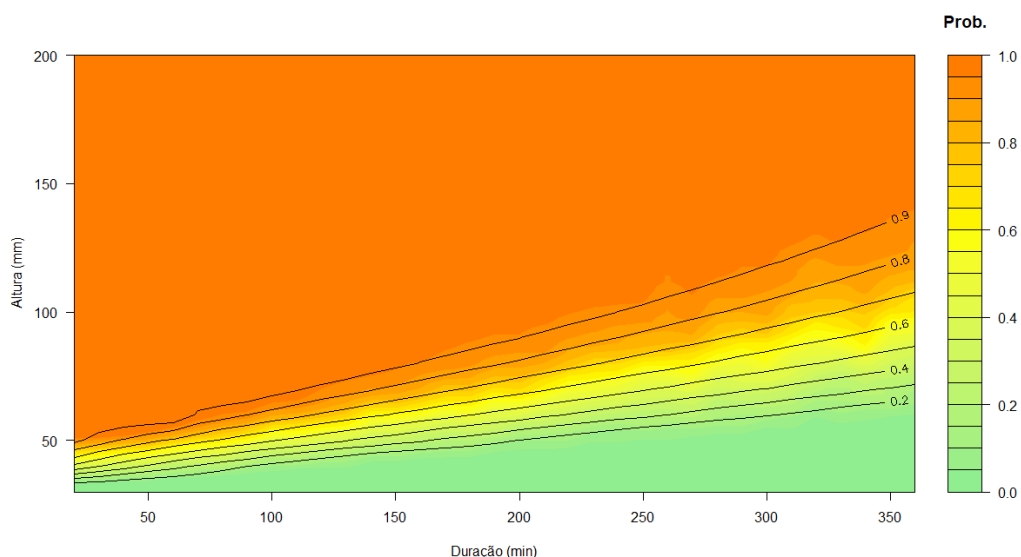


Figura 55 - Probabilidade de ocorrência do alerta amarelo.

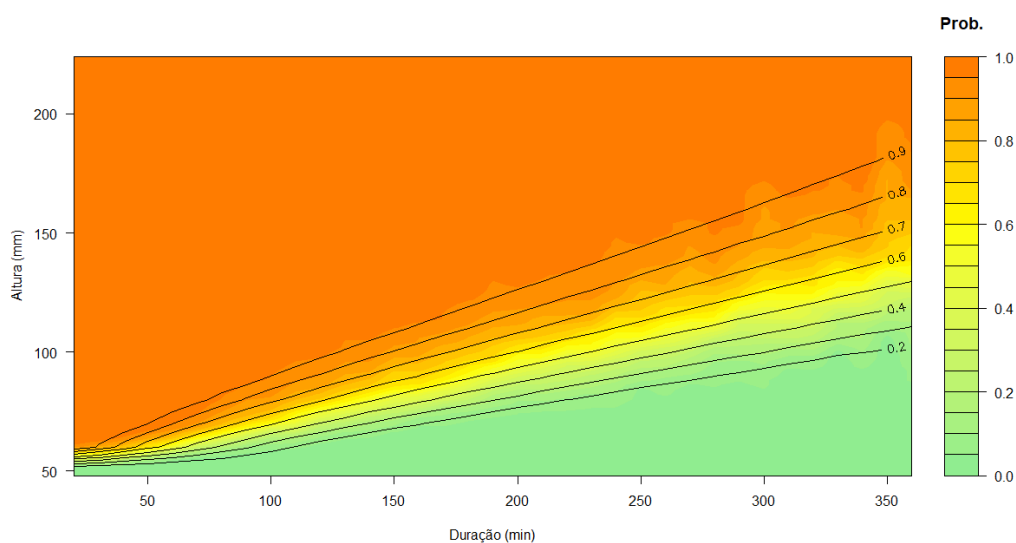


Figura 56 - Probabilidade de ocorrência do alerta laranja.

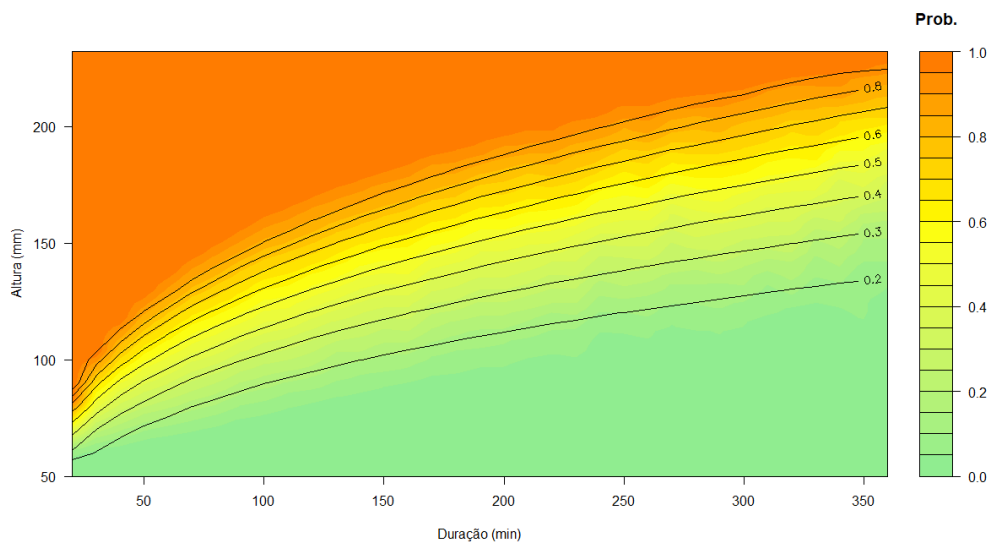


Figura 57 - Probabilidade de ocorrência do alerta vermelho.

Por fim, tendo os valores das probabilidades associadas aos eventos de determinada duração e magnitude foi possível relacionar os tempos de retorno desses eventos às probabilidades de ocorrência dos alertas. Para a determinação dos tempos de retorno foi utilizada a relação de intensidade-duração-frequência para a região metropolitana de Belo Horizonte proposta por Pinheiro e Naghettini (1998). Como os tempos de retorno são utilizados como critério de projeto de obras hidráulicas, conhecer sua relação com a probabilidade de ocorrência dos alertas é fundamental para o conhecimento das condições às quais a obra estará sujeita. As Figura 58 a Figura 60 abaixo apresentam as curvas que relacionam a probabilidade de determinado alerta e o tempo de retorno associado ao evento para cada um dos alertas.

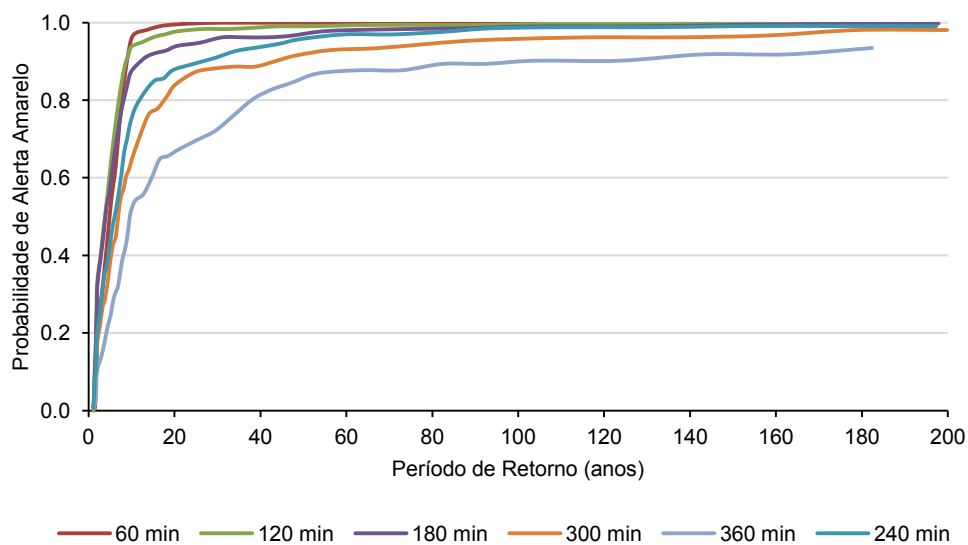


Figura 58 - Probabilidade de alerta amarelo associado ao período de retorno.

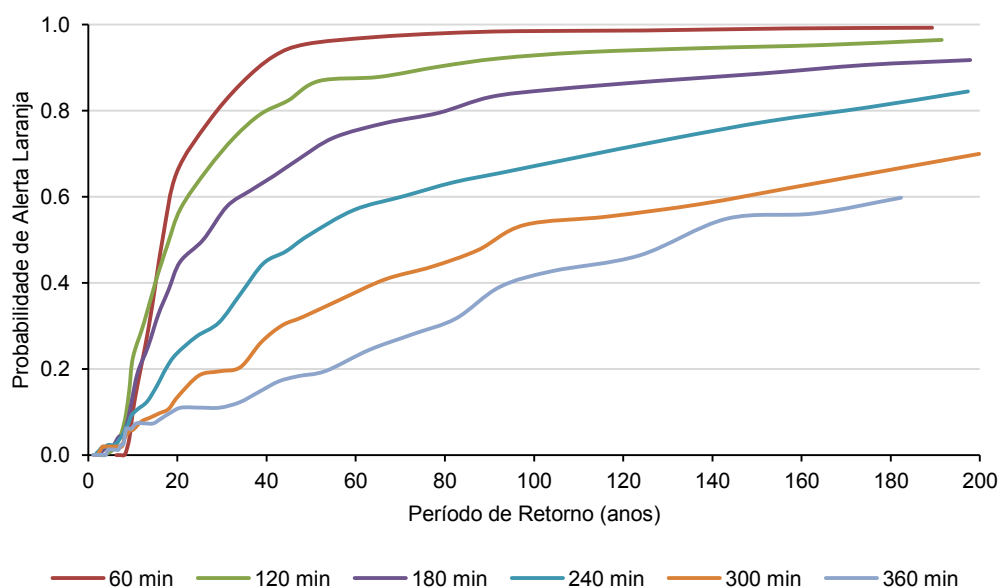


Figura 59 - Probabilidade de alerta laranja associado ao período de retorno.

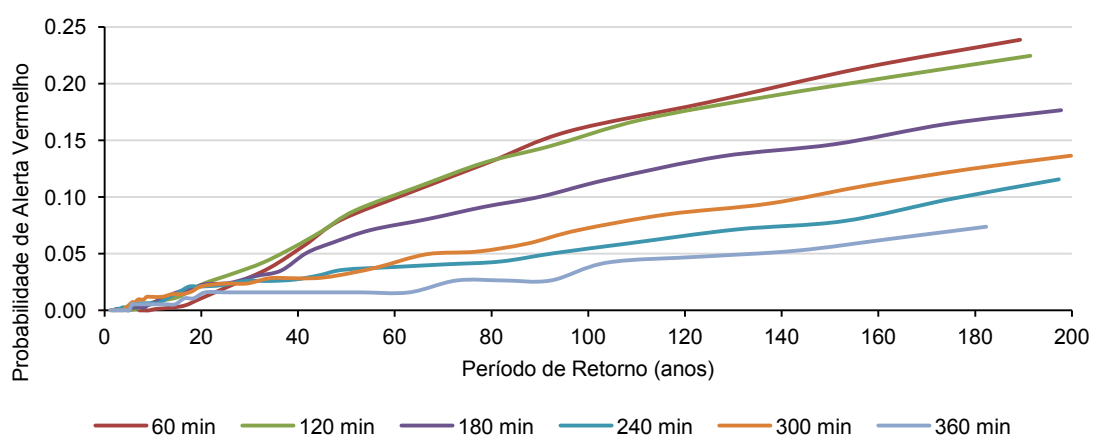


Figura 60 - Probabilidade de alerta vermelho associado ao período de retorno.

Essas probabilidades de ocorrência relacionadas às durações, aos totais precipitados e aos períodos de retorno podem servir de ferramenta no auxílio à tomada de decisão sendo mais uma forma de consulta para embasar a escolha do tomador de decisão como também na hora de definir critérios de projeto em regiões inundáveis. É possível perceber, principalmente a partir das relações com o período de retorno, que as probabilidades de ocorrência se apresentam muito abaixo das esperadas para a região.

Fazendo uma comparação dessas probabilidades com os eventos que geraram alertas selecionados, apresentados na Tabela 6, é possível corroborar essa tendência otimista dos resultados da pesquisa. Pegando como exemplo o evento do dia 14/12/2011 que gerou um alerta amarelo, considerando a duração de 240 minutos e o total precipitado de 54,2 mm é

possível extrair de ambos os gráficos para o alerta amarelo a probabilidade de apenas 10% de ocorrência. Para o evento com alerta vermelho do dia 15/11/2012, com um total precipitado de 75, 2 mm e duração de 270 minutos, a probabilidade obtida dos gráficos é de menos de 1%.

Para o evento do dia 07/12/2013 cujo alerta gerado foi amarelo e que apresentou um bom resultado na validação, a probabilidade de alerta amarelo é de aproximadamente 35%. Para o evento de alerta vermelho do dia 14/11/2011 também usado na validação porém, tendo apresentado nível máximo simulado muito abaixo do observado, a probabilidade obtida para esse alerta foi de 0%. Os eventos que atingiram cota de extravasamento foram os que apresentaram maiores diferenças entre o nível d'água máximo observado e simulado na etapa de validação.

Dessa forma, pode-se inferir que as subestimações dos valores de pico observadas no processo de calibração e validação do modelo podem explicar essas probabilidades baixas de ocorrência do alerta para as chuvas analisadas. Isso mostra que a metodologia aplicada apresentou resultados satisfatórios dentro das limitações encontradas na modelagem e que ela possui potencial de aplicação para outros modelos ou localidades onde a representação da simulação seja mais próxima ao observado.

6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Este trabalho apresentou maneiras de garantir, sobre diferentes aspectos, a confiabilidade do sistema de previsão e alerta de inundações através do estudo de caso de uma área localizada na região de montante da bacia do ribeirão Arrudas. O principal foco do trabalho foi apresentar uma metodologia para elaboração de uma relação entre probabilidade de ocorrência dos alertas e características da chuva e com isso, permitir que o gestor responsável pela emissão do alerta tenha mais uma fonte de consulta para embasar sua decisão.

Além disso, com o intuito de garantir a confiabilidade do sistema de previsão e alerta do ponto de vista dos dados utilizados na modelagem, foi feita uma análise das relações cota-vazão empíricas. Essas curvas-chave são comumente utilizadas para obtenção de valores de vazão em meio urbano onde não há medições diretas, uma vez que as vazões são importantes informações de entrada dos estudos hidrológicos. Apesar de a comparação ter sido feita entre modelos, sem nenhum valor medido para validar os resultados, espera-se que ela sirva de embasamento para futuros trabalhos que façam uso dessas relações empíricas e também desperte para a importância de se analisar mais atentamente o uso das vazões obtidas a partir das curvas-chave sintéticas como dado de entrada na modelagem.

Por fim, foi feita uma verificação do tempo de antecedência ótimo para os sistemas de previsão e alerta junto à literatura e aos órgãos responsáveis. Visto que esse tempo determina a possibilidade de implantação de ações e os danos, em termos monetários, que podem ser reduzidos, ele é fundamental para eficiência do sistema. Um alerta dado com uma antecedência muito curta, mesmo que assertivo, não permite que as medidas necessárias sejam tomadas, enquanto, por outro lado, um alerta gerado com uma antecedência grande possui as incertezas inerentes aos modelos de previsão meteorológica.

As modelagens hidrológica e hidráulica com o SWMM e o HEC-RAS foram essenciais para o desenvolvimento da pesquisa. Dessa forma, o primeiro objetivo do trabalho foi dado pelo ajuste, calibração e validação do modelo pré-desenvolvido no SWMM para a região, de modo a aproximar as simulações da realidade observada. O processo de calibração adotado foi por sub-bacias e por eventos, sendo a variável de comparação o nível d'água. Apesar dos diversos casos exitosos de calibração no SWMM, inclusive com o nível d'água, somente a primeira sub-bacia, a sub-bacia 24, foi calibrada com sucesso.

Algumas hipóteses podem ser levantadas a respeito da incapacidade de calibração de toda a bacia do ribeirão Arrudas tanto relacionadas aos dados de entrada como às características do modelo utilizado. As características convectiva e concentrada das chuvas que geram alerta em Belo Horizonte podem causar diferentes respostas quando consideradas uniformemente distribuídas na modelagem. Além disso, pelo fato de ser concentrada podem ocorrer situações onde a chuva ocorre em outros locais e não no pluviômetro, que, dessa forma, não registra o evento. Considerando a representação da bacia no modelo, é possível inferir que o grau de simplificação, onde apenas o canal principal foi representado pode ter sido um fator limitante, dado que o SWMM é muito bom na representação da microdrenagem e possui bons resultados quando utilizado com maior detalhamento.

O segundo e terceiro objetivos específicos relacionaram-se ao estudo das curvas-chave sintéticas comumente utilizadas para obtenção de dados de vazão em regiões urbanas, dado o caráter subjetivo de sua obtenção e falta de valores de vazão medida para sua validação. A verificação das relações cota-vazão foi feita através da análise comparativa das curvas geradas pelo modelo calibrado e validado através de dados observados de nível d'água no SWMM e as curvas obtidas no HEC-RAS através de informações da geometria do canal e coeficiente de rugosidade de Manning da literatura.

As curvas-chave geradas no HEC-RAS são bastante utilizadas na calibração de modelos hidrológicos. A comparação das curvas geradas com um modelo calibrado, que se espera que apresente um valor mais próximo à realidade, buscou fornecer subsídio a futuros trabalhos que utilizem desse artifício. Os resultados mostraram que a curva-chave do SWMM gerada para um coeficiente de Manning de 0,028, se ajustou à curva-chave do HEC-RAS correspondente ao coeficiente de rugosidade de Manning de 0,034. Embora esse resultado não seja conclusivo, já que a única forma de descobrir a curva-chave mais ajustada à realidade seria fazendo campanhas de medição de vazão, ele serve como um alerta para que uma atenção maior seja dada ao uso de curvas geradas a partir da geometria e definição do coeficiente de rugosidade segundo conhecimento das condições locais.

A verificação do tempo de antecedência do alerta necessário para que todas as ações previstas no plano de contingência sejam implantadas foi o último objetivo específico desta pesquisa. Após análise da literatura sobre o assunto, observou-se que esse tempo está intimamente relacionado ao local de implantação do sistema, tanto devido às características físicas como aos recursos disponíveis. Assim, foi realizado um acompanhamento junto à Defesa Civil para

entender o desenvolvimento das ações adotadas no qual foi possível observar e questionar os agentes a respeito das ações previstas no plano e sua relação com a prática.

A partir da forma como são organizadas e desenvolvidas as atividades, é possível observar que inúmeras variáveis influenciam o tempo de resposta necessário. Como a comunicação é feita via ligações telefônicas e mensagens de texto, tanto via SMS como via Telegram, qualquer falha nas linhas de internet ou telefone irá prejudicar e atrasar a comunicação. Além disso, no momento das mobilizações, as equipes mais próximas são direcionadas, seja da BHTrans ou Guarda Municipal, otimizando o tempo de deslocamento. Como é impossível prever a distância da equipe mais próxima ao local do evento, a definição de um tempo fixo é inviável.

Também foi possível observar, das visitas à Defesa Civil, que o sistema de previsão e alerta de Belo Horizonte, apesar de bastante eficiente, ainda possui um caráter subjetivo muito grande. As decisões partem da experiência do gestor que utiliza as informações de modelos de previsão meteorológica, radares e imagens de satélite juntamente com as informações das estações fluviométricas e pluviométricas para emitir o alerta. Com isso, a metodologia desenvolvida nesse trabalho contribui nesse aspecto, fornecendo mais uma ferramenta de consulta que relaciona as características das chuvas à probabilidade de ocorrência dos alertas para locais específicos.

Com esse auxílio, o gestor pode agregar uma informação quantitativa proveniente de modelagem às interpretações qualitativas das ferramentas existentes e dessa forma melhorar a assertividade da emissão do alerta. A relação entre as características da chuva e a probabilidade de ocorrência do alerta foi obtida através da simulação das chuvas sintéticas no SWMM. Os resultados da simulação responderam às expectativas nos quesitos intensidade média, duração e total precipitado para os três alertas, porém, as dificuldades enfrentadas no processo de calibração refletiram nas relações obtidas. Apesar dos bons ajustes de calibração e validação, os valores de níveis d'água de pico simulados foram abaixo dos observados. Dado que o alerta gerado é diretamente relacionado ao nível máximo atingido, as probabilidades de ocorrência de alerta obtidas foram subestimadas para os três alertas.

Quanto à característica de forma da chuva, ou seja, a distribuição temporal dos blocos de precipitação, esperava-se que fosse identificado um formato crítico na geração dos alertas. Porém, dos histogramas de frequência dos parâmetros alfa e beta para cada um dos alertas é

possível observar que os valores apresentaram uma distribuição uniforme. Como a variação das características de forma, duração e total precipitado ocorreram simultaneamente, não se pode afirmar que se fixando as demais variáveis, o fator forma não seria influente. Como recomendação futura a novos trabalhos acerca do tema, sugere-se analisar individualmente a influência da variação de cada um desses aspectos. Dessa forma, seria possível identificar como cada uma das variáveis afeta a geração de alerta.

Da comparação das relações obtidas entre duração, total precipitado e probabilidade de ocorrência para a área de estudo com os registros de alertas feitos pela PMBH, nota-se a tendência dos resultados simulados em subestimar a probabilidade do alerta. Esse resultado está de acordo com a dificuldade em representar de forma acurada os níveis de pico no processo de calibração e validação. Dessa forma, apesar dos resultados obtidos nessa pesquisa não serem satisfatórios do ponto de vista operacional, eles são extremamente promissores do ponto de vista metodológico.

A metodologia defendida nessa pesquisa apresentou resultados consistentes com os dados disponíveis e adequabilidade do modelo utilizado. A análise apresentada aqui pode ser feita para outras regiões que sofrem com as inundações e com o auxílio de outros modelos hidrológico e hidráulico para obtenção dos níveis d'água. Quanto mais próximo à realidade forem os resultados modelados, mais acurada e representativa será a relação entre as probabilidades de ocorrência do alerta e as características da chuva. Assim, para diferentes pontos de uma mesma cidade, o agente responsável pela emissão do alerta poderá ter em mãos uma relação quantitativa entre a informação recebida da previsão meteorológica, quantidade precipitada no tempo, com a chance de ocorrência de determinado tipo de alerta. Além disso, essa informação pode ser transformada em relação entre o período de retorno de um evento e sua probabilidade de ocorrer alerta servindo assim como importante auxílio na definição de critérios de projeto de obras hidráulicas para regiões sujeitas a inundações.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland. **Programa DRENURBS: uma concepção inovadora dos recursos hídricos no meio urbano**. Belo Horizonte – MG. Disponível em: <<http://solucoesparacidades.com.br/saneamento/programa-drenurbs/>>. Acesso em: 17 de outubro de 2017.
- AGBM – *Australian Government – Bureau of Meteorology. Flood warning services*. Disponível em: <<http://www.bom.gov.au/water/floods/floodWarningServices.shtml>>. Acesso em 11 de dezembro de 2017.
- AI-ABADI, A. M. *Modeling of stage-discharge relationship for Gharraf River, southern Iraq, using backpropagation artificial neural networks, M5 decision trees, and Takagi-Sugeno inference system technique: a comparative study*. *Applied Water Science*, p. 407-420. 2014.
- ALFIERI, L.; VELASCO, D.; THIELEN, J. *Flash flood detection through a multi-stage probabilistic warning system for heavy precipitation events*. *Advances in Geosciences*, p 69-75. 2011.
- AMARAL, D. P. B. **Aplicação do modelo hidrológico SMWW na gestão das águas pluviais urbanas: estudo de caso da bacia hidrográfica do Rio Morto, Rio de Janeiro**. 2014. 153f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- ARICÒ, C.; CORAO, G.; TUCCIARELLI, T.; MEFTAH, M. B.; PETRILLO, A. F.; MOSSA, M. *Discharge estimation in open channels by means of water level hydrograph analysis*. *Journal of Hydraulic Research*, v. 48, n. 5, p. 612-619. 2010.
- AROEIRA, R. M. Recuperação ambiental de bacias hidrográficas, Belo Horizonte, Brasil. In: MACHADO, Antônio Thomaz Gonzaga da Matta *et al.* (Org.). **Revitalização de rios no mundo: América, Europa e Ásia**. Belo Horizonte: Projeto Manuelzão, 2010, p. 221-240. (Palestra do gerente executivo do Programa DRENURBS apresentada no II Seminário de Revitalização de Rios no Mundo em 2010).
- ARYAL, S. K.; ASHBOLT, S.; MCINTOSH, B. S.; PETRONE, K. P.; MAHEEPALA, S.; CHOWDHURY, R. K.; GARDENER, T.; GARDINER, R. *Assessing and mitigating the hydrological impacts of urbanisation in semi-urban catchments using the storm water management model*. *Water Resources Management*, v. 30, n. 14, p. 5437-5454. 2016.
- ASSIS, W. L. **O sistema clima urbano do município de Belo Horizonte na perspectiva tempo-espacial**. 2010. 319 f. Tese (Doutorado em Geografia) – Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais.
- AUTODESK. **Storm and Sanitary Analysis 2014 User's Guide**. 2013.
- BALBI, D. A. F. **Metodologias para a elaboração de planos de ações emergenciais para inundações induzidas por barragens: estudo de caso: Barragem de Peti – MG**. 2008. 336f. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.
- BAO, W. M.; ZANG, X. Q.; QU, S. M. *Dynamic correction of roughness in the hydrodynamic model*. *Journal of Hydrodynamics*, v. 21, n. 2, p. 255-263. 2009.
- BAPTISTA, M. B.; LARA, M. M. **Fundamentos de engenharia hidráulica**. Editora UFMG, 4ª ed. Belo Horizonte, 2016.

- BAPTISTA, M.; NASCIMENTO, N.; BARRAUD, S. **Técnicas compensatórias em drenagem urbana**. 2ª ed. Porto Alegre: ABRH, 318p. 2011.
- 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 .2008.
- BARROS, M. M. F.; MELO, C. R.; MELO, S. C.; COSTA, F. A.; GUEDES, P. A. **Análise dos efeitos da redução de medições de descarga líquida sobre a qualidade das curvas-chaves no rio Tracunhaém: um estudo de caso**. In: XII Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste, 2014, Natal. Anais do XII Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste, 2014.
- BARROS, M. T. L.; CONDE, F.; ANDRIOLI, C. P.; ZAMBOM, R. C. *Flood forecasting system in a mega city: challenges and results for the São Paulo metropolitan region*. In: *World Environmental and Water Resources Congress*, 2016, Florida. Anais do World Environmental and Water Resources congress, 2016.
- BELING, F. A.; GARCIA, J. I. B.; PAIVA, E. M. C. D.; BASTOS, G. A. P.; PAIVA, J. B. D. *Analysis of the SWMM model parameters for runoff evaluation in periurban basins from southern Brazil*. In: *12nd International Conference on Urban Drainage*, 2011, Porto Alegre. Anais do *12nd International Conference on Urban Drainage*, 2011.
- BELO HORIZONTE. Lei nº 7.165, de 27 de agosto de 1996. Instituiu o Plano Diretor do Município de Belo Horizonte. **Diário Oficial do Município de Belo Horizonte**, Belo Horizonte, 27 de agosto de 1996.
- BI, E. G.; MONETTE, F.; GACHON, P.; GASPÉRI, J.; PERRODIN, Y. *Quantitative and qualitative assessment of the impact of climate change on a combined sewer overflow and its receiving water body*. *Environmental Science and Pollution Research*, v. 22, p. 11905-11921. 2015.
- BONIFÁCIO, C. M.; FREIRE, R. **Comparação de três métodos para medição da vazão e velocidade aplicados em dois cursos d'água da bacia do Ribeirão Maringá**. Periódico Eletrônico Fórum Ambiental da Alta Paulista, v. 9, n. 2, p. 406-415. 2013.
- BORSAGLI, A. **Rios invisíveis da metrópole mineira**. Ed. do Autor, Belo Horizonte. 2016.
- BRACA, G. *Stage-discharge relationship in open channels: practices and problems*. FORALPS Technical Report, 11. *Università degli Studi di Trento*, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Trento, 2008.
- BRUSA, L. C.; CLARKE, R. T. **Erros envolvidos na estimativa da vazão máxima utilizando curva-chave. Caso de estudo: Bacia do rio Ibicuí, RS**. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 4, n. 3, p. 91-95, jul./set. 1999.
- CAJAZEIRO, J. M. D. **Análise da susceptibilidade à formação de inundações nas bacias e áreas de construção do ribeirão Arrudas e córrego da Onça em termos de índices morfométricos e impermeabilização**. 2012. 101 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais.
- CANHOLI, A. P. **Drenagem urbana e controle de enchentes**. 2ª ed. ampliada e atualizada São Paulo: Oficina de Textos, 2015.
- CAVALCANTE, L. V. B. **A bacia do rio Arrudas: Análise das inundações entre 1930 a 2005 no município de Belo Horizonte/MG**. 2011. 146 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais.

- CEPED – Centro Universitário de Estudos e Pesquisas sobre Desastres. **Atlas Brasileiro de Desastres Naturais 1991 a 2012: Volume Minas Gerais**. Florianópolis, UFSC, 2013.
- CHAIB, E.B.D.; LIMA, F.N.; TENÓRIO, K.; MOURA, P.; BAPTISTA, M.B. (2013). **Avaliação de planos de contingência para inundações no Brasil**. In: XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2013, Bento Gonçalves. Anais do XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2013.
- CHARMAZ, K. *The search for meanings – Grounded Theory*. In: SMITH, J. A.; HARRÉ, R.; LANGENHOVE, L. V. *Rethinking methods in psychology*. Londres: SAGE Publication, 1996, p. 27-49.
- CHOWDHURY, K.; LOCKART, N.; WILLGOOSE, G.; KUCZERA, G.; KIEM, A. S.; MANAGE, N. P. *Development and evaluation of a stochastic daily rainfall model with long term variability*. *Hydrology & Earth System Sciences*. 2017.
- CHOW, V. T.; MAIDMENT, D. R.; MAYS, L. W. *Applied Hydrology*. McGraw-Hill International Editions, Estados Unidos. 1988.
- CLARKE, R. T. BRUSA, L. C. *The precision of low flows estimated from rating curves: a case of study from Brazil*. *Integrated Water Resources Management*, v. 272, p. 296-275. 2001.
- COLLISCHONN, W.; TUCCI, C.E.M. **Ajuste multiobjetivo dos parâmetros de um modelo hidrológico**. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v 8, n 3, p. 27-39, 2003.
- COLLODEL, M. G. **Aplicação do modelo hidrológico SWMM na avaliação de diferentes níveis de detalhamento da bacia hidrográfica submetida ao processo de transformação chuva-vazão**. 2009. 225f. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) – Universidade de São Paulo, São Carlos.
- COMDEC – Coordenadoria Municipal de Defesa Civil. **Macroprocesso: monitoramento de riscos naturais**. Prefeitura Municipal de Belo Horizonte. Belo Horizonte, 2016.
- COMDEC – Coordenadoria Municipal de Defesa Civil. **Plano Preventivo de Defesa Civil (Plano de Contingência) para o período chuvoso de outubro de 2012 a março de 2013**. Prefeitura Municipal de Muriaé. Muriaé-MG, set. 2012.
- CORDEIRO, A.; MOMO, M. R.; SEVERO, D. L. **Previsão de cheia em tempo atual, com um modelo ARMAX, para a cidade de Rio do Sul – SC**. In: XIX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2011, Maceió. Anais do XIX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2011.
- COSTA, V. A. F. **Estimação indireta de quantis de enchentes extremas a partir de modelos chuva-vazão com emprego conjunto de um gerador estocástico de precipitação diária, análise bayesiana e distribuições limitadas superiormente**. 2015. 180 f. Tese (Doutorado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais.
- COSTA, V.; FERNANDES, W.; NAGHETTINI, M. *A bayesian model for stochastic generation of daily precipitation using an upper-bounded distribution function*. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, v. 29, p. 563-576. 2014.
- CPRM. **Sistema de Alerta de Eventos Críticos: Bacias Monitoradas**. Disponível em: <<http://www.cprm.gov.br/sace/>>. Acesso: 22 de maio de 2017.

- CUO, L.; PAGANO, T. C.; WANG, Q. J. *A review of quantitative precipitation forecast and their use in short to medium range streamflow forecasting*. *Journal of Hydrometeorology*, v. 12, p 713-728. 2011.
- DAWSON, C. W.; ABRAHART, R. J.; SEE, L. M. *Hydro Test: a web-based toolbox of evaluation metrics for the standardised assessment of hydrological forecasts*. *Environmental Modelling & Software*, v. 22, p. 1034-1052. 2007.
- DECINA, T. G. T. **Análise de medidas de controle de inundações a partir da avaliação de cenários de uso e ocupação do solo na bacia hidrográfica do Córrego do Gregório, São Carlos – SP**. 2012. 176 f. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) – Universidade Federal de São Paulo, São Paulo.
- DKKV – *German Committee for Disaster Reduction*. **Flood risk reduction in Germany: Lessons learned from the 2002 disaster in the Elbe Region**. Bonn, 2004.
- DOHERTY, R. **Calibration of HEC-RAS models for rating curve development in semi arid regions of Western Australia**. In: AHA Conference, 2010, Perth. Anais do AHA Conference, 2010.
- DRUMOND, M. M. **A técnica de traçadores e seu potencial para ampliar o conhecimento hidrológico sobre as bacias brasileiras: um estudo aplicado à bacia representativa de Juatuba – MG**. 2004. 199 f. Tese (Doutorado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais.
- DUFTY, N. *An evaluation of the effectiveness of early warning systems used in Australia*. Bepress, 2014.
- DUNKERLEY, D. **Identifying individual rain events from pluviograph records: a review with analysis of data from an Australian dryland site**. *Hydrological Processes*, v. 22, p. 5024-5036. 2008.
- ELEUTÉRIO, J. **Flood risk analysis: impact of uncertainty in hazard modeling and vulnerability assessments on damage estimations**. 2012. 243 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - University of Strasbourg, França.
- ELGA, S.; JAN, B.; OKKE, B. **Hydrological modelling of urbanized catchments: a review and future directions**. *Journal of Hydrology*, v. 529, p. 62-81. 2015.
- ELLIOT, A. H.; TROWSDALE, S. A. **A review of models for low impact urban stormwater drainage**. *Environmental Modelling & Software*, v. 22, p. 394-405. 2007.
- ELSAFI, S. H. **Artificial Neural Networks (ANNs) for flood forecasting at Dongola Station in the River Nile, Sudan**. *Alexandria Engineering Journal*, p. 655-662. 2014.
- FAN, F. M.; COLLISCHONN, W.; QUIROZ, K. J.; SORRIBAS, M. V.; BUARQUE, D. C.; SIQUEIRA, V. A. **Flood forecasting on the Tocantins River using ensemble rainfall forecasts and real-time satellite rainfall estimates**. *Journal of Flood Risk Management*, 2015.
- FARIA, N. O.; BARBASSA, A. P.; SILVEIRA, A. **Monitoramento, modelagem e simulação de cenários para a bacia do córrego Barbado - Cuiabá/MT**. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 19, n. 1, p. 165 - 176. 2014.
- FERNANDES, C. Y.; VENTURA, L. A.; MOURA, P. M.; NASCIMENTO, N. O.; BAPTISTA, M. B. **Avaliação do plano de contingência para desastres de Belo Horizonte 2016/2017**. In: XXII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2017, Florianópolis. Anais do XXII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2017.

- FERNANDES, R. O. **Avaliação de simulações de precipitação e vazão por um modelo atmosférico em bacias do semiárido brasileiro**. 2009. 109 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Campina Grande, Paraíba.
- FERREIRA, M. G. B. **Análise regional da distribuição temporal de precipitações sub diárias para o estado de Minas Gerais**. 2015. 86 f. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais.
- FILHO, D. P.; SANTOS, I.; FILL, H. D. **Sistema de ajuste e extrapolação de curva de descarga – Stevens**. In: XV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2003, Curitiba. Anais do XV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2003.
- FILHO, J. V. R. **Gerador estocástico de precipitação diária bipartido condicionado às fases enos aplicado à região sul do Brasil**. 2016. 222 f. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais.
- FORMIGA, K. T. M.; OLIVEIRA, F. A.; PEREIRA, T. S. R.; SOARES, A. K. **Calibração de um modelo hidrodinâmico em um canal urbano utilizando algoritmos genéticos multiobjetivo**. Revista Ciência e Engenharia, v. 25, n. 2, p. 19-28, jul./dez. 2016.
- FREITAS, C. M.; SILVA, D. R. X.; SENA, A. R. M.; SILVA, E. L.; SALES, L. B. F.; CARVALHO, M. L.; MAZOTO, M. L.; BARCELLOS, C.; COSTA, A. M.; OLIVEIRA, M. L. C.; CORVALÁN, C. **Desastres naturais e saúde: uma análise da situação do Brasil**. Ciência & Saúde Coletiva, v. 19, n. 9, p. 3645-3656. 2014.
- FURRER, E. M.; KATZ, R. W. *Improving the simulation of extreme precipitation events by stochastic weather generators*. *Water Resources Research*, v. 44. 2008.
- FURUSHO, C.; STOMP, Q.; PERRIN, C.; RAMOS, M. H. **Como as falhas das previsões podem ajudar a melhorar os modelos hidrológicos? Caso dos eventos de cheia de 2013 na França**. Águas Urbanas: v. 1. Porto Alegre: ABRH, 2015.
- GARCIA, J. I. B. **Monitoramento hidrológico e modelagem da drenagem urbana da bacia hidrográfica do Arroio Cancela**. 2005. 169 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Rio Grande do Sul.
- GARCIA, J. I. B.; PAIVA, E. M. C.; BRITES, A. P. Z.; PAIVA, R. C. D. **Avaliação da discretização em uma bacia hidrográfica urbana, através do modelo SWMM**. In: XXI Congresso Latinoamericano de Hidráulica, 2004, São Pedro. Anais do XXI Congresso Latinoamericano de Hidráulica, 2004.
- GHIMIRE, B. N. S., REDDY, M. J. *Development of stage-discharge rating curve in river using genetic algorithms and model tree*. In: *International Workshop Advances in Statistical Hydrology*, 2010, Taormina. Anais do *International Workshop Advances in Statistical Hydrology*, 2010.
- GLASER, B. G.; STRAUSS, A. L. *The discovery of Grounded Theory: strategies for qualitative research*. Aldine, 1967.
- GLASER, B. G. *The novice GT researcher*. *The Grounded Theory Review Journal*, v. 8, n.2, p. 1-21. 2009.
- GOERL, R. F.; KOBIYAMA, M. **Considerações sobre as inundações no Brasil**. In: XV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2005, João Pessoa. Anais do XV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2005.

- GONÇALVES, W. A. **O método *Grounded Theory*: um norte teórico segundo o estado-da-arte do último biênio.** Revista Conbrad, v. 1, n. 2, p. 117-134. 2016.
- GUPTA, H. V.; KLING, H.; YILMAZ, K. K.; MARTINEZ, G. F. **Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: implications for improving hydrological modeling.** *Journal of Hydrology*, n. 377, p. 80-91. 2009.
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, Minas Gerais, Belo Horizonte. Disponível em: <<http://cidades.ibge.gov.br/xtras/perfil.php?codmun=310620>>. Acesso em: 15 de janeiro de 2017.
- SHRESTHA, M. S.; GOODRICH, C. G., UDAS, P.; RAI, D. M.; GURUNG, M. B.; KHADGI, V.. **Flood early warning system in Bhutan: a gendered perspective.** ICIMOD Working Paper, Kathmandu, 2016.
- HERSCHY, R. **The stage-discharge relation.** *Elsevier Applied Science*, p. 11-15. 1993.
- HIPÓLITO, J. R.; VAZ, A. C. **Hidrologia e recursos hídricos.** 2ª edição. IST Press, 2013.
- HUFF, F. A. **Time distribution of rainfall in heavy storms.** *Water Resources Research*, v. 3, n.4, p. 1007-1019. 1967.
- JACCON, G.; CUDO, K. J. **Curva-chave: análise e traçado.** Brasília: DNAEE, 1989.
- KOBIYAMA, M.; MENDONÇA, M.; MORENO, D. A.; MARCELINO, I. P. V. O.; GONÇALVES, E. F.; BRAZETTI, L. L. P. GOERL, R. F.; MOLLERI, G. S. F.; RUDORFF, F. M. **Prevenção de desastres naturais. Conceitos básicos.** Editora *Organic Trading*, Florianópolis-SC. 2006.
- KREBS, G.; KOKKONEN, T.; VALTANEN, M.; KOIVUSALO, H.; SETÄLÄ, H. **A high resolution application of a storm water management model (SWMM) using genetic parameter optimization.** *Urban Water Journal*, v. 10, n. 6, p. 394-410. 2013.
- KREIBICH, H.; MÜLLER, M.; SCHRÖTER, K.; THIEKEN, A. H. **New insights into flood warning reception and emergency response by affected parties.** *Natural Hazards and Earth System Sciences*, v. 17, p. 2015-2092. 2017.
- KRON, W. **Flood risk = hazard•values•vulnerability.** *International Water Resources Association*, v. 30, n. 1, p. 58-68. 2005.
- LEPOT, M.; MOMPLOT, A.; KOUYI, G. L.; KRAJEWSKI, J. L. B. **Rhodamine WT tracer experiments to check flow measurements in sewers.** *Flow Measurement and Instrumentation Journal*, v. 40, p. 28-38. 2014.
- LI, C.; LIU, M.; HU, Y.; GONG, J.; XU, Y. **Modeling the quality and quantity of runoff in a highly urbanized catchment using storm water management model.** *Polish Journal of Environmental Studies*, v. 25, n. 4, p. 1573-1581. 2016.
- LI, C.; SINGH, V. P.; MISHRA, A. **Simulation of the entire range of daily precipitation using a hybrid probability distribution.** *Water Resources Research*, v. 48. 2012.
- LIMA, F. N. **Análise de eventos críticos (flash floods) para áreas urbanas em modelagem hidrológica.** 2018. 113 f. Qualificação de Doutorado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos – Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais.
- LIMA, J. C. **Avaliação dos riscos e danos de inundação e do impacto da adoção de medidas não estruturais em Itajubá/MG.** 2003. 160 f. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais.

- MACHADO, M. L. **Curvas de danos de inundação versus profundidade de submersão: desenvolvimento de metodologia – estudo de caso bacia do rio Sapucaí, Itajubá – MG.** 2005. Vol 1, 217 f. Tese (Doutorado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais.
- MAKSIMOVIC, C. *General Overview of urban drainage principles and practice.* In: _____. **Urban drainage on specific climates.** Paris: UNESCO, Vol. 1. 2001, p. 1-21.
- MALDONADO, L. H.; WENDLAND, E. C. **Aplicação de medidores de vazão não convencionais em rios: eletromagnético e vertedor circular móvel.** In: XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2013, Bento Gonçalves. Anais do XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2013.
- MALDONADO, L. H.; WENDLAND, E. C.; PORTO, R. M. **Avaliação de métodos de baixo custo para medição de vazão em córregos.** Revista Ambiente & Água, v. 10, n. 2, abr./jun. 2015.
- MARCUZZO, F. F. N. **Curva-chave traçada pelo MATLAB com diferentes tipos de equações suportadas pelo programa HIDRO.** In: 26º Encontro Técnico AESABESP – Congresso Nacional de Saneamento e Meio Ambiente, 2015, São Paulo. Anais do 26º Encontro Técnico AESABESP – Congresso Nacional de Saneamento e Meio Ambiente, 2015.
- MINERVINO, A.C.; DUARTE, E.C. **Danos materiais causados à Saúde Pública e à sociedade decorrentes de inundações e enxurradas no Brasil, 2010-2014: dados originados dos sistemas de informação global e nacional.** Ciência & Saúde Coletiva, v. 21, n. 3, p. 685-694. 2016.
- MOORE, R. J.; BELL, V. A.; JONES, D. A. *Forecasting for flood warning.* *Comptes Rendus Geoscience*, p. 203-217. 2005.
- MORIASI, D. N.; ARNOLD, J. G.; VAN LIEW, M. W.; BINGNER, R. L.; HARMEL, R. D.; VEITH. *Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations.* *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, v. 50, n. 3, p. 885-900. 2007.
- MOURA, R. G.; HERDIES, D. L.; MENDES, D.; DAMIÃO, M. C. **Avaliação da precipitação do modelo regional Eta utilizando as análises do CPTEC e NCEP.** Revista Brasileira de Meteorologia, v. 25, n. 1, p. 46-53. 2010.
- MULETA, M. K. *Comparison of model evaluation methods to develop a comprehensive watershed simulation model.* *World Environmental and Water Resources Congress 2010: Challenges of Change*, ASCE, 2010, p. 2492-2501.
- MULETA, M. K. *Model performance sensitivity to objective function during automated calibrations.* *Journal of Hydrologic Engineering*, v. 17, p. 756-767, junho. 2012.
- MULETA, M. K.; MCMILLAN, J.; AMENU, G. G.; BURIAN, S. J. *Bayesian Approach for uncertainty analysis of an urban storm water model and its application to a heavily urbanized watershed.* *Journal of Hydrologic Engineering*, v. 18, p. 1360-1371. 2013.
- NAGHETTINI, M.; PINTO, E. J. A. **Hidrologia estatística.** CPRM - Serviço Geológico do Brasil. 2007.
- NASCIMENTO, F. A. **Comparação das respostas hidrológicas de modelos chuva-vazão concentrados, distribuídos e semi-distribuídos aplicados à área urbana.** 2017. 166 f. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais.

- NASCIMENTO, N. O. **Escopo para elaboração do plano de contingência de inundações para a Bacia Hidrográfica do Ribeirão Arrudas**. Escola de Engenharia - Departamento de Engenharia Hidráulica e Recursos Hídricos - UFMG. Belo Horizonte, 2011. Rev. 1.
- NEUSSNER, O. *Local flood early warning system*. *Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit*. Filipinas, 2009.
- NUNES, A. A. **Tendências em eventos extremos de precipitação na região metropolitana de Belo Horizonte: detecção, impactos e adaptabilidade**. 2016. 151 f. Qualificação de Doutorado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos – Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais.
- NUNES, A. A.; PINTO, E. J. A.; BAPTISTA, M. B. **Deteção de tendências para eventos extremos de precipitação na Região Metropolitana de Belo Horizonte a partir métodos estatísticos**. . Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 23, e9, jan. 2018.
- OLIVEIRA, C. P. M.; SILVA, C. V. F.; SOSNOSKI, A. S. K. B.; BOZZINI, P. L.; ROSSI, D. M.; UEMURA, S. CONDE, F. *Warning System Based on Real-time Flood Forecasts in São Paulo, Brazil*. In: *6th International Conference on Flood Management*, 2014, São Paulo. Anais do *6th International Conference on Flood Management*, 2014.
- OLIVEIRA, F. A.; PEREIRA, T. S. R.; SOARES, A. K.; FORMIGA, K. T. M. **Uso de modelo hidrodinâmico para determinação da vazão a partir de medições de nível**. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 21, n. 4, p. 707-718, out./set. 2016.
- PADOVANI, C. R.; JÚNIOR, L. C.; BONAFE, P.; VETTORAZZI, C. A.; DIAS, R. A. P.; DIAS, C. T. S.; SHIMABUKURO, Y. E.; GIRARD, P. **Sistema de monitoramento e alerta de inundações e secas no Pantanal**. In: XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2011, Curitiba. Anais do XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2011.
- PAOLUCCI, C. O. **Risco hidrometeorológico no município de Belo Horizonte: eficiências e deficiências desde os anos 1990**. 2012. 147 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais.
- PAPALEXIOU, S. M.; KOUTSOYIANNIS, D.; MAKROPOULOS, C. *How extreme is extreme? An Assessment of daily rainfall distribution tails*. *Hydrology & Earth System Sciences*, v. 17, p. 851-862. 2013.
- PARIZZI, M. G.; SEBASTIÃO, C. S.; VIANA, C. S.; PFLUEGER, M. C.; CAMPOS, L. C.; CAJAZEIRO, J. M. D.; TOMICH, R. S.; GUIMARÃES, R. N.; ABREU, M. L.; SOBREIRA, F. G. REIS, R. **Correlações entre chuvas e movimentos de massa no município de Belo Horizonte, MG**. *Geografias*, p. 48-69. 2010.
- PERUMAL, M. MORAMARCO, T. SAHOO, B BARBETTA, S. *A methodology for discharge estimation and rating curve development at ungauged river site*. *Water Resources Research*, v. 43. 2007.
- PERUMAL, M.; SAHOO, B. *Applicability criteria of the variable parameter Muskingum stage and discharge routing methods*. *Water Resources Research*, v. 43. 2007.
- PETRUCCI, G.; BONHOMME, C. *The dilemma of spatial representation for urban hydrology semi-distributed modelling: trade-offs among complexity, calibration and geographical data*. *Journal of Hydrology*, v. 517, p. 997-1007. 2014.
- PINHEIRO, M. C. **Diretrizes para elaboração de estudos hidrológicos e dimensionamentos hidráulicos em obras de mineração**. 1ª edição. Porto Alegre: ABRH, 2011.

- PINHEIRO, M. M. G.; NAGHETTINI, M. **Análise regional de frequência e distribuição temporal das tempestades na região metropolitana de Belo Horizonte – RMBH**. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 3, n. 4, p. 73-88. 1998.
- PINHEIRO, V. B. **Calibração de um modelo chuva-vazão em bacias sem monitoramento fluviométrico a partir de curvas de permanência sintéticas**. 2009. 303 f. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais.
- PINTO, N. L. S.; HOLTZ, A. C. T.; MARTINS, J. A.; GOMIDE, F. L. S. **Hidrologia Básica**. São Paulo, E. Blücher, 1976.
- PLATE, E. J. **Flood risk and flood management**. *Journal of Hydrology*, p. 2-11. 2002.
- PMBH. **Atlas dos Diagramas dos Canais Revestidos do Sistema de Macrodrenagem – Bacia do Ribeirão Arrudas**. Plano Diretor de Drenagem de Belo Horizonte, Prefeitura Municipal de Belo Horizonte, 2002.
- PMBH – Prefeitura Municipal de Belo Horizonte. **Cartas de Inundações de Belo Horizonte: identificação de áreas potencialmente suscetíveis**. Belo Horizonte, 2009.
- PMBH – Prefeitura Municipal de Belo Horizonte. **Plano de contingência para desastres decorrentes das precipitações pluviométricas no município de Belo Horizonte**. Belo Horizonte, 2011.
- PMBH – Prefeitura Municipal de Belo Horizonte. **Plano de contingência para enfrentamento de desastres no município de Belo Horizonte 2016/2017**. Belo Horizonte, 2016.
- PMBH – Prefeitura Municipal de Belo Horizonte. **Plano municipal de saneamento de Belo Horizonte 2012/2015**. Belo Horizonte, 2013.
- PMBH. Portal Prefeitura de Belo Horizonte. **Segurança Urbana**. 2017. Disponível em <http://portalpbh.pbh.gov.br/pbh/ecp/comunidade.do?evento=portlet&pIdPlc=ecpTaxonomiaMenuPortal&app=seguranca&tax=25106&lang=pt_BR&pg=6200&taxp=0>. Acesso em: 09 de junho de 2017.
- PORTO, R. M. **Hidráulica básica**. EESC-USP, São Carlos. 4ª Edição, 2009.
- PRIEST, S. J.; PARKER, D. J.; TAPSELL, S. M. **Modelling the potential damage-reducing benefits of flood warnings using European cases**. *Environmental Hazards Journal*, v. 10, p. 101-120. 2011.
- RAMOS, M. H. D. **Drenagem Urbana: Aspectos Urbanísticos, Legais e Metodológicos em Belo Horizonte**. 1998. 91 f. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais.
- RD INSTRUMENTS. **Acoustic Doppler Current Profiler: principles of operation a practical primer: Teledyne RD Instruments**. California. 2011.
- REIS, J. B. C. **Monitoramento e alerta de inundação no município de Itajubá (MG) através de modelos matemáticos**. 2014. 95 f. Dissertação (Mestrado em Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá.
- REIS, P. E. **O escoamento superficial como condicionante de inundação em Belo Horizonte, MG: estudo de caso da sub-bacia córrego do Leitão, bacia do ribeirão Arrudas**. 2011. 148 f. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais.

- REISTAD, K. S.; ØVERLEIR, A. P.; BOGETVEIT, L. J. **Setting up rating curves using HEC-RAS**. VANN, p. 20-30. 2007.
- RIGHETTO, A. M. **Manejo de águas pluviais urbanas**. Programa de Pesquisa em Saneamento Básico. Editora ABES, 2009.
- ROGERS, D.; TSIRKUNOV, V. *Costs and benefits of early warning systems. Global Assessment Report on Disaster Risk Reduction*. 2010.
- ROSA, D. W. B. **Resposta hidrológica de uma bacia hidrográfica urbana à implantação de técnicas compensatórias de drenagem urbana – bacia do córrego do Leitão, Belo Horizonte, Minas Gerais**. 2017. 215 f. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais.
- ROSSMAN, L. A.; HUBER, W. C. *Storm Water Management Model Reference Manual. Volume I – Hydrology (Revised)*. United States Environmental Protection Agency. 2016.
- ROSSMAN, L. A. *Storm Water Management Model Reference Manual. Volume II – Hydraulics*. United States Environmental Protection Agency. 2017.
- ROSSMAN, L., A. *Storm Water Management Model User's Manual Version 5.1*. United States Environmental Protection Agency. 2015.
- SAAD, S. I.; PALMEIRA, R.; PALMA, G. **Avaliação dos modelos de previsão de tempo utilizados na CLIMATEMPO baseado no dia de antecedência da previsão**. In: XVI Congresso Brasileiro de Meteorologia, 2010, Belém. Anais do XVI Congresso Brasileiro de Meteorologia, 2010.
- SAMPAIO G.; DIAS. P. L. S. **Evolução dos modelos climáticos e de previsão de tempo e clima**. Revista USP, n 103, p. 41-54. 2014.
- SEFE, F. T. K. *A study of the stage-discharge relationship of the Okavango River at Mhembo, Botswana*. *Hydrologic Science Journal*, p 97-116. 1996.
- SELVALINGAM, S. LIONG, S. Y. MANOHARAN, P. C. *Use of RORB and SWWW models to an urban catchment in Singapore*. *Adv. Water Resources*, v. 10. 1987.
- SENE, K. *Flash floods: forecasting and warning*. Springer Science, United Kingdom, 386p. 2013.
- SENE, K. *Hydrometeorology: forecasting and applications*. Springer Science, United Kingdom, 356p. 2010.
- SINGH, V. P.; WOOLHISER, D. A. *Mathematical modeling of watershed hydrology*. *Journal of Hydrologic Engineering*, v. 7, n. 4, p. 270-292, jul./ago. 2002.
- SIQUEIRA, R. C. **Proposição de metodologia para construção de gráfico de risco de inundações em bacias urbanas: estudo de caso bacia do córrego Cachoeirinha**. 2017. 146 f. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais.
- SIQUEIRA, R.; AGUIAR, I.; MOURA, P. **Monitoramento hidrológico de Belo Horizonte: estudo de caso**. In: XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2013, Bento Gonçalves. Anais do XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2013.
- SMOBI. **Plano Municipal de Saneamento 2008/2011**. Prefeitura Municipal de Belo Horizonte. 2010.
- SOSNOSKI, A. S. K. B.; PION, S. M.; UEMURA, S. CONDE, F. **Calibração e validação de modelo de previsão de inundações em tempo real do município de São Paulo**. In: XXI

- Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2015, Brasília. Anais do XXI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2015.
- SRIKANTHAN, R.; MCMAHON, T. A. *Stochastic generation of annual, monthly and daily climate data: A review*. *Hydrology & Earth System Sciences*, v. 5, n. 4, p. 653-670. 2001.
- SUDECAP – Superintendência de Desenvolvimento da Capital. **Plano municipal de saneamento de Belo Horizonte – 2012/2015**. Belo Horizonte, vol. I/II, 2015.
- SUDECAP – Superintendência de Desenvolvimento da Capital. **Formação dos núcleos de alerta de chuva**. Prefeitura Municipal de Belo Horizonte, 2010.
- TOLSON, B. A. *Automatic Calibration, Management and Uncertainty Analysis: Phosphorus Transport in the Cannonsville Watershed*. Tese de Doutorado, *Faculty of the Graduate School of Cornell University, Ithaca, EUA*, 2005.
- TOLSON, B. A.; SHOEMAKER, C.A. *Dynamically dimensioned search algorithm for computationally efficient watershed model calibration*. *Water Resources Research*, v. 43. 2007.
- TRAVASSOS, L. **Inundações urbanas: uma questão socioambiental**. *Revista de Gestão Ambiental e Sustentabilidade*, v. 1, n.1, p. 88-105, jan./jun. 2012.
- TUCCI, C. E. M. **Água no meio urbano: Livro da água doce**. Instituto de Pesquisa hidráulica. UFRGS, Porto Alegre, 1997, cap. 14.
- TUCCI, C. E. M. **Inundações e drenagem urbana: Inundações urbanas na América do Sul**. 1ª Ed., Porto Alegre. Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2003, cap. 3.
- TUCCI, C. E. M. **Modelos hidrológicos**. 2ª Ed., Porto Alegre: Editora da Universidade Federal do Rio Grande do Sul: ABRH, 2005.
- USACE – U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS. *HEC-RAS River Analysis System – Hydraulic Reference Manual*. Versão 5.0. 547p. 2016a.
- USACE – U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS. *HEC-RAS River Analysis System – User’s Manual*. Versão 5.0. 960p. 2016b.
- VIEIRA, L. C.; GONÇALVES, I. L. A. P. **Proposição de plano de contingenciamento e sistema de alerta para o gerenciamento de risco de inundações: estudo de caso no município de Belo Horizonte – MG**. In: Congresso ABES FENASAN, 2017, São Paulo. Anais do Congresso ABES FENASAN, 2017.
- VILANOVA, M. R. N.; BALESTIERI, J. A. P. **Qualidade de dados fluviométricos obtidos através de perfilamento acústico**. *Revista Árvore*, v. 37, n. 3, mai./jun. 2013.
- WALSH, T.; C. POMEROY, C.; A. BURIAN, S. J. *Hydrologic modeling analysis of a passive, residential rainwater harvesting program in an urbanized, semi-arid watershed*. *Journal of Hydrology*, v. 508, p. 240-253. 2014.
- WMO. *Flood forecasting and early warning*. World Meteorological Organization. 2013.
- WMO. *Manual on flood forecasting and warning*. World Meteorological Organization. 2011.
- XU, Z.; ZHAO, G. *Impact of urbanization on rainfall-runoff processes: case study in the Liangshui River Basin in Beijing, China*. *International Association of Hydrological Sciences*, v. 373, p. 7 - 12. 2016.

YU, W.; NAKAKITA, E.; JUNG, K. *Flood forecast and early warning with high-resolution ensemble rainfall from numerical weather prediction model*. *Procedia Engineering Journal*, v. 154, p. 498-503. 2016.

ZAGHLOUL, N. A. *Sensitivity analysis of the SWMM Runoff-Transport parameters and the effects of catchment discretization*. *Adv. Water Resources*, v. 6. 1983.

APÊNDICE 1 – USO DO SOLO NA BACIA DO RIBEIRÃO ARRUDAS POR SUB-BACIA

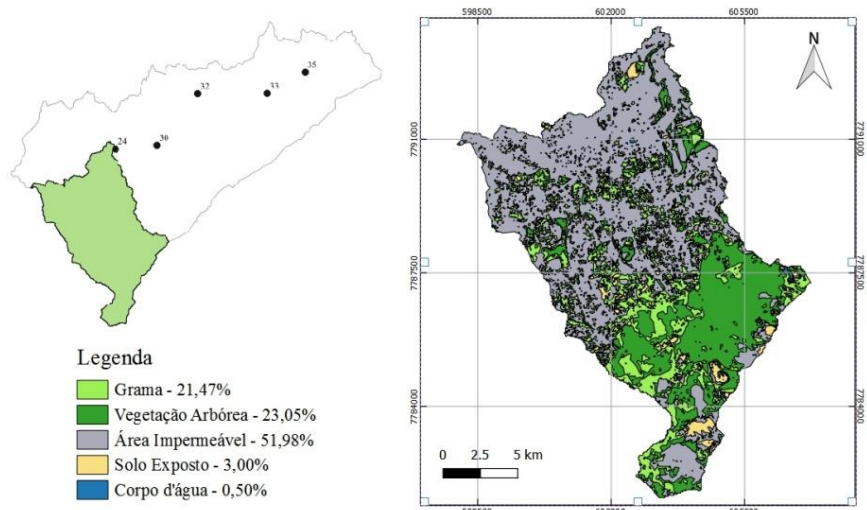


Figura 61 - Uso e ocupação do solo para a sub-bacia 24.

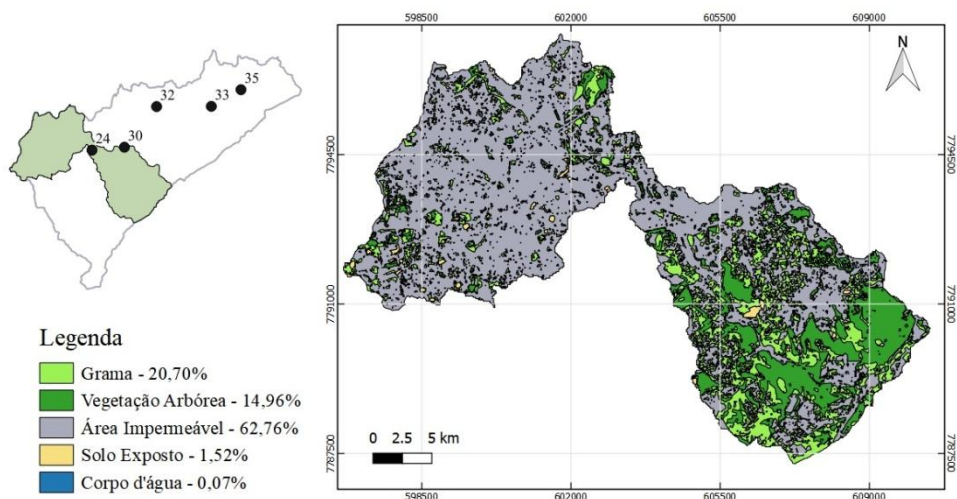


Figura 62 - Uso e ocupação do solo para a sub-bacia 30.

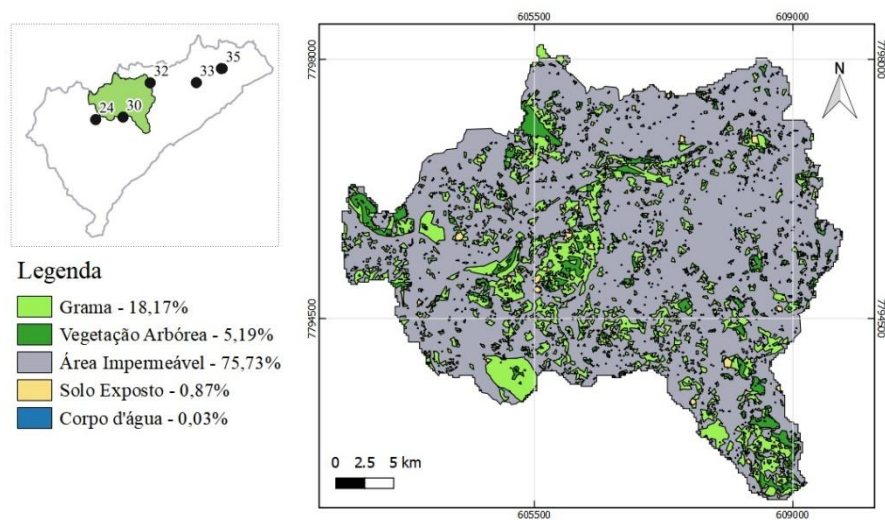


Figura 63 - Uso e ocupação do solo para a sub-bacia 32.

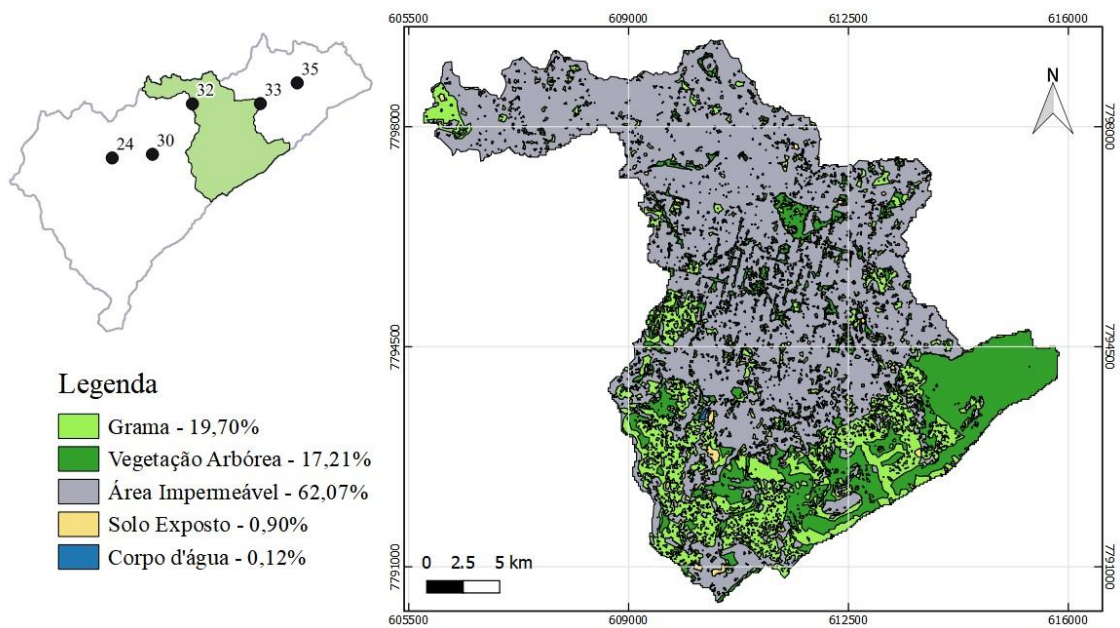


Figura 64 - Uso e ocupação do solo para a sub-bacia 33.

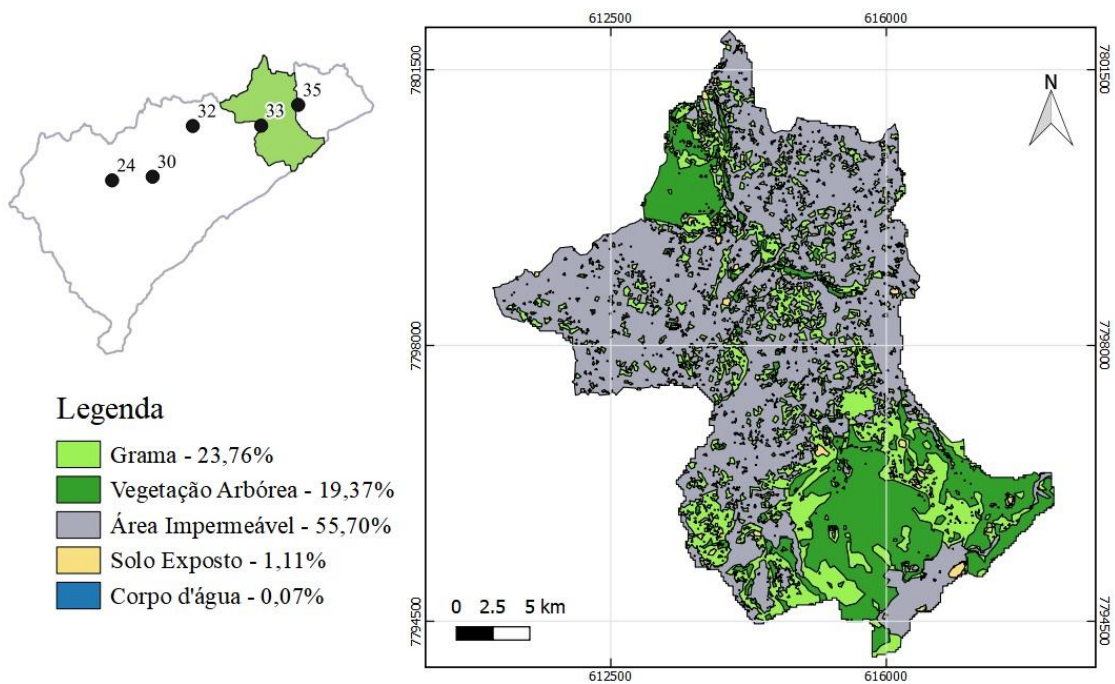
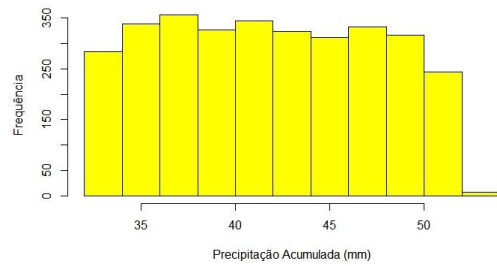


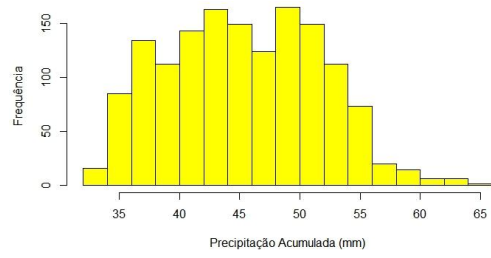
Figura 65 - Uso e ocupação do solo para a sub-bacia 35.

APÊNDICE 2 – HISTOGRAMAS DAS PRECIPITAÇÕES ACUMULADAS POR DURAÇÃO

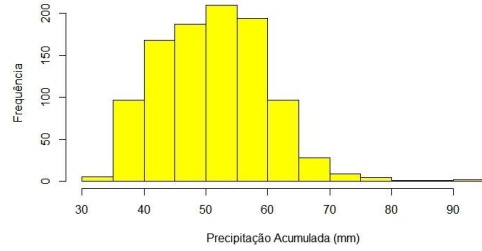
Duração = 20 min



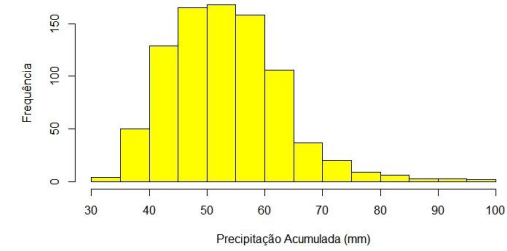
Duração = 60 min



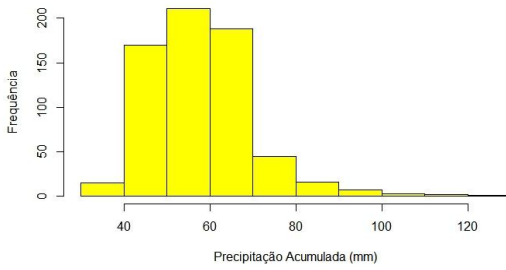
Duração = 100 min



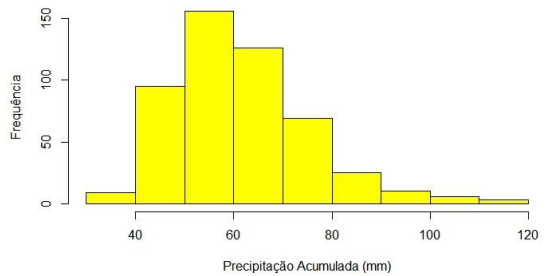
Duração = 120 min



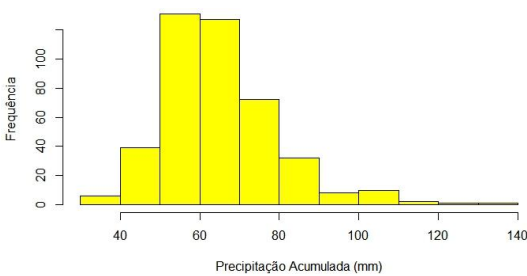
Duração = 150 min



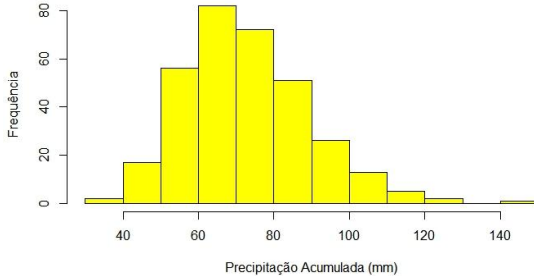
Duração = 180 min



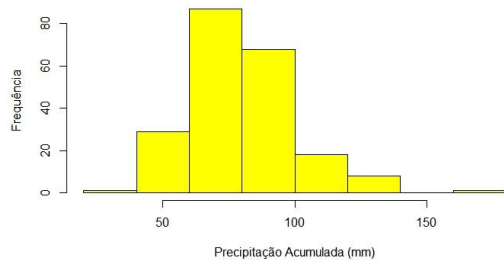
Duração = 200 min



Duração = 240 min



Duração = 300 min



Duração = 360 min

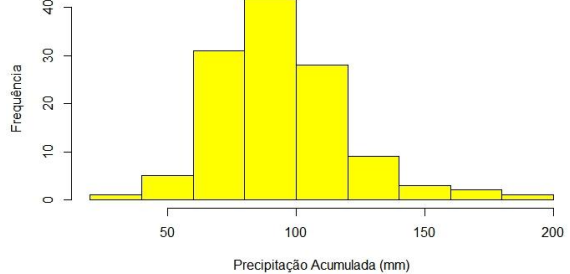
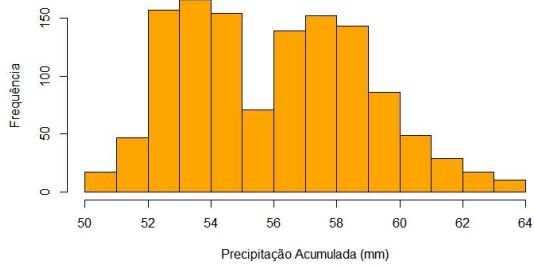
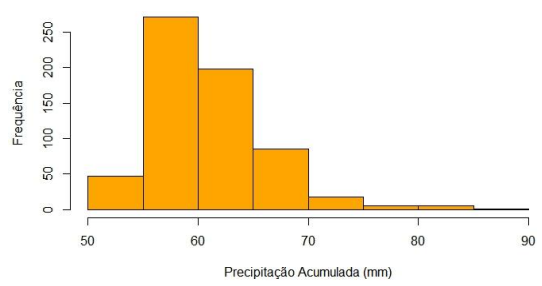


Figura 66 - Histogramas da precipitação acumulada por duração para os eventos com alerta amarelo.

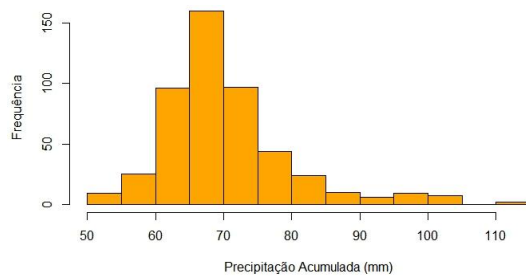
Duração = 20 min



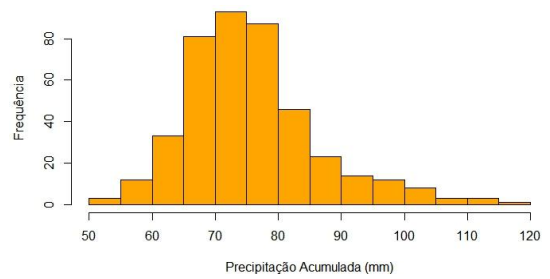
Duração = 60 min



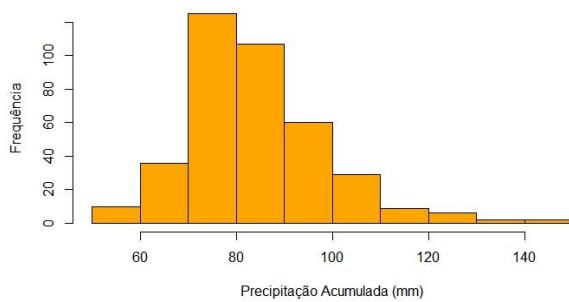
Duração = 100 min



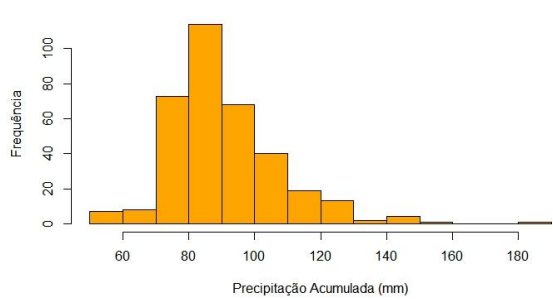
Duração = 120 min



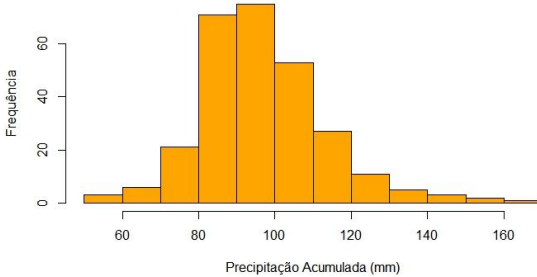
Duração = 150 min



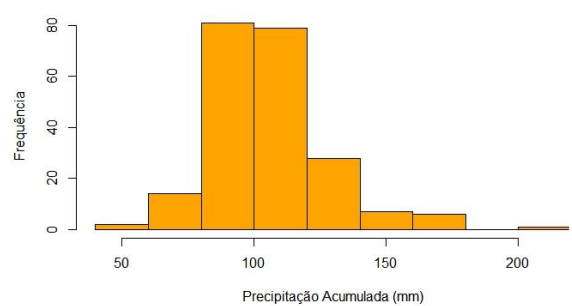
Duração = 180 min



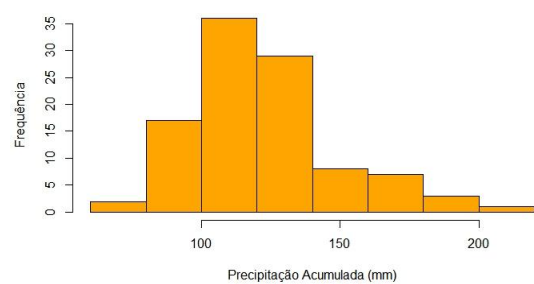
Duração = 200 min



Duração = 240 min



Duração = 300 min



Duração = 360 min

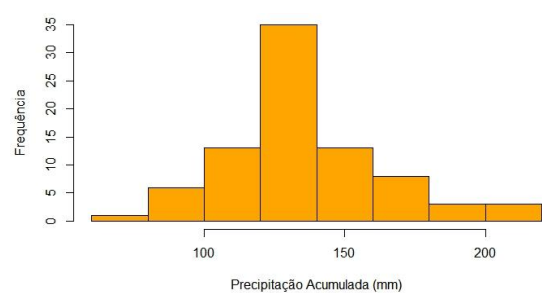
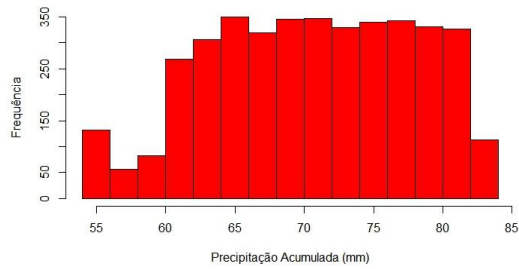
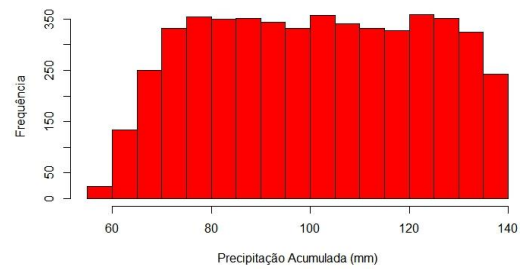


Figura 67 - Histogramas da precipitação acumulada por duração para os eventos com alerta laranja.

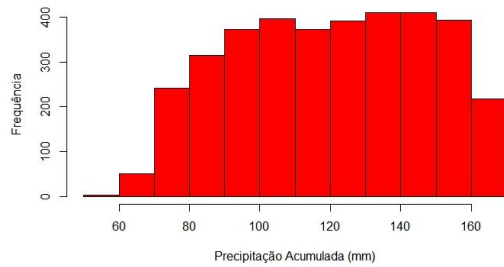
Duração = 20 min



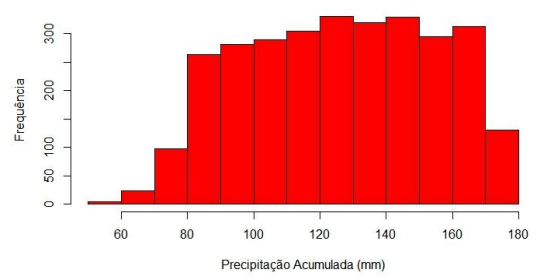
Duração = 60 min



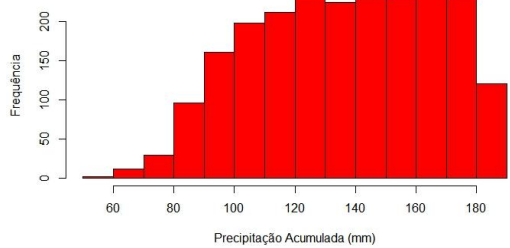
Duração = 100 min



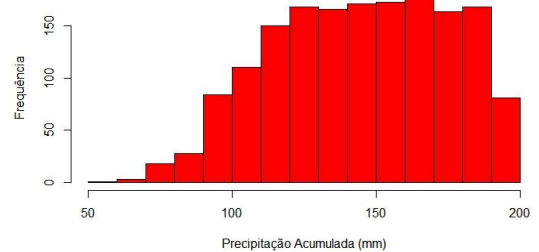
Duração = 120 min



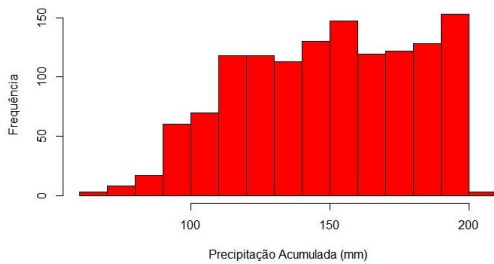
Duração = 150 min



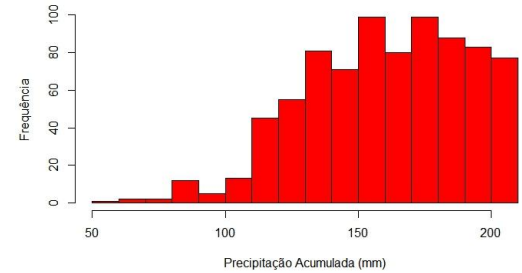
Duração = 180 min



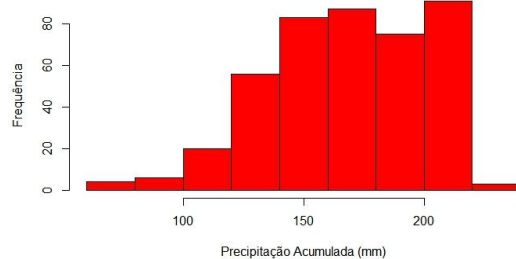
Duração = 200 min



Duração = 240 min



Duração = 300 min



Duração = 360 min

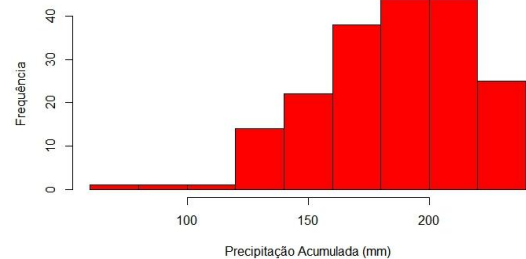


Figura 68 - Histogramas da precipitação acumulada por duração para os eventos com alerta vermelho.

**APÊNDICE 3 – PROBABILIDADE DE OCORRÊNCIA DE ALERTA
AMARELO DADO O TOTAL PRECIPITADO E A DURAÇÃO**

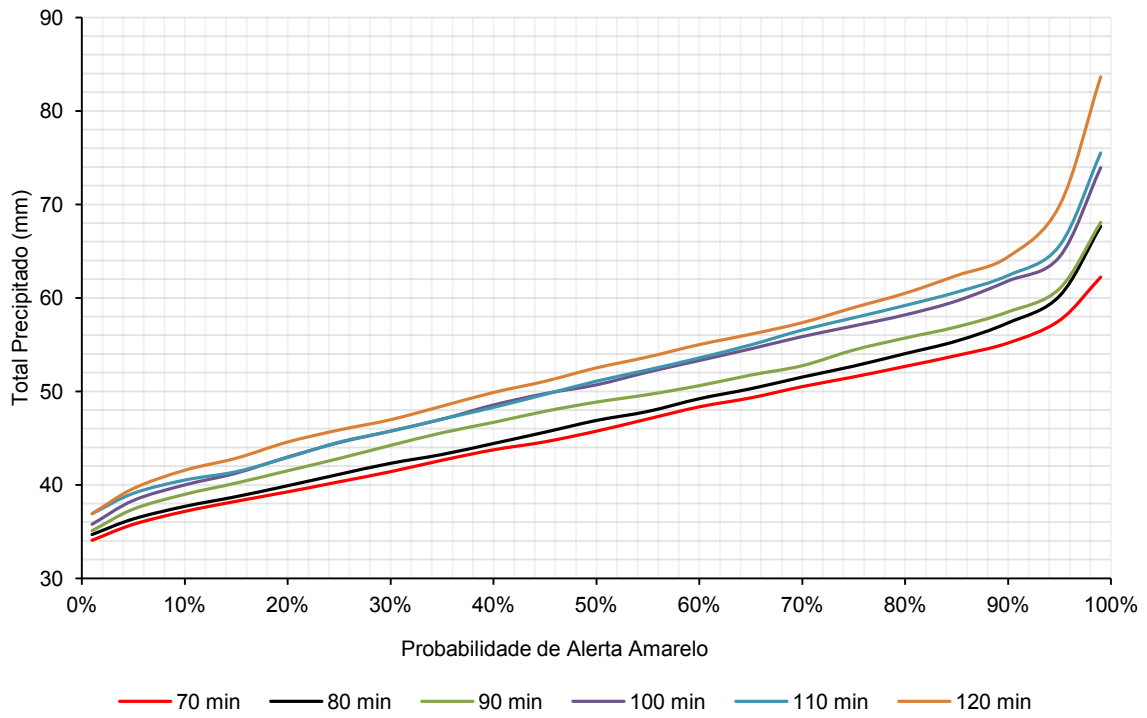


Figura 69 - Probabilidade de ocorrência de alerta amarelo para eventos de 1 a 2 horas.

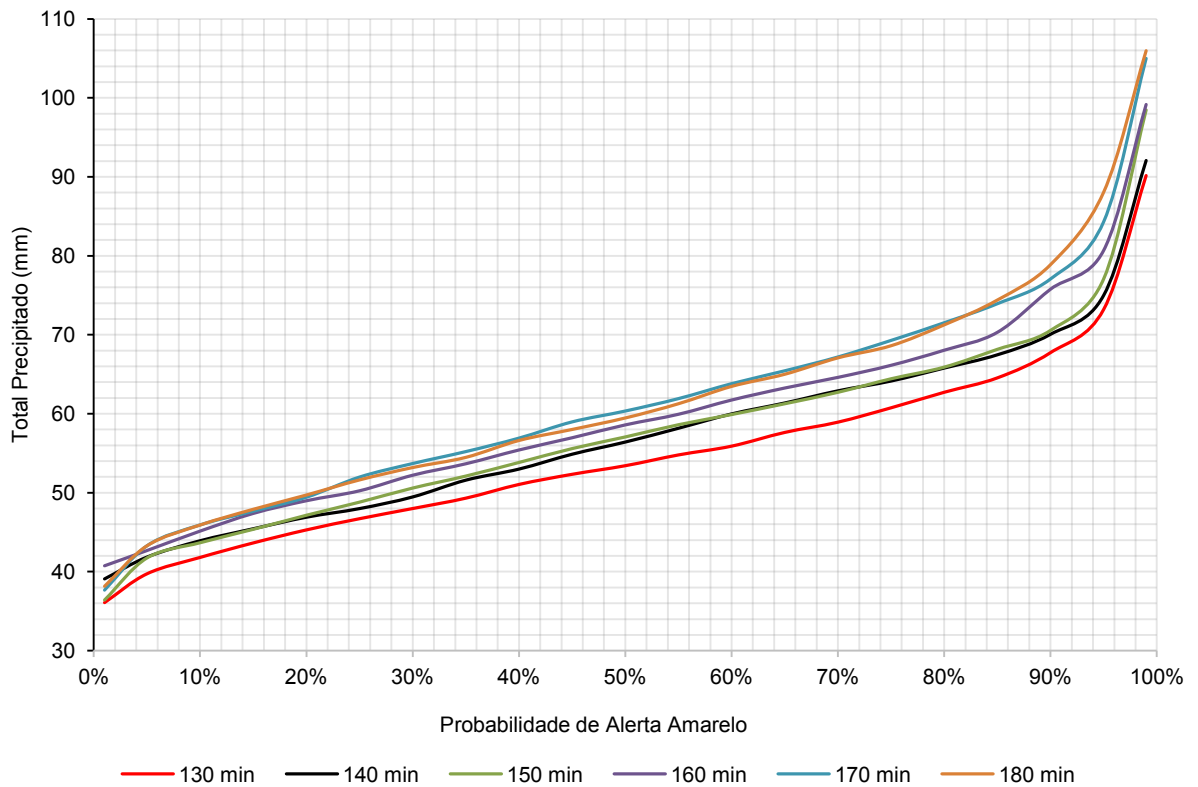


Figura 70 - Probabilidade de ocorrência de alerta amarelo para eventos de 2 a 3 horas.

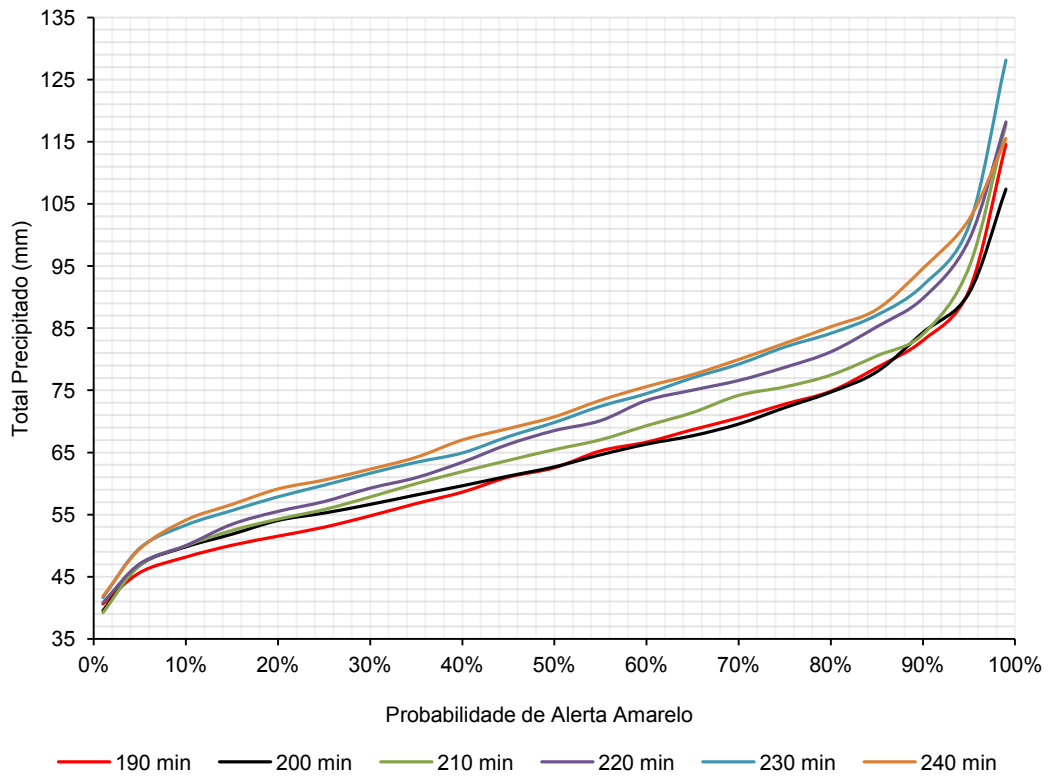


Figura 71 - Probabilidade de ocorrência de alerta amarelo para eventos de 3 a 4 horas.

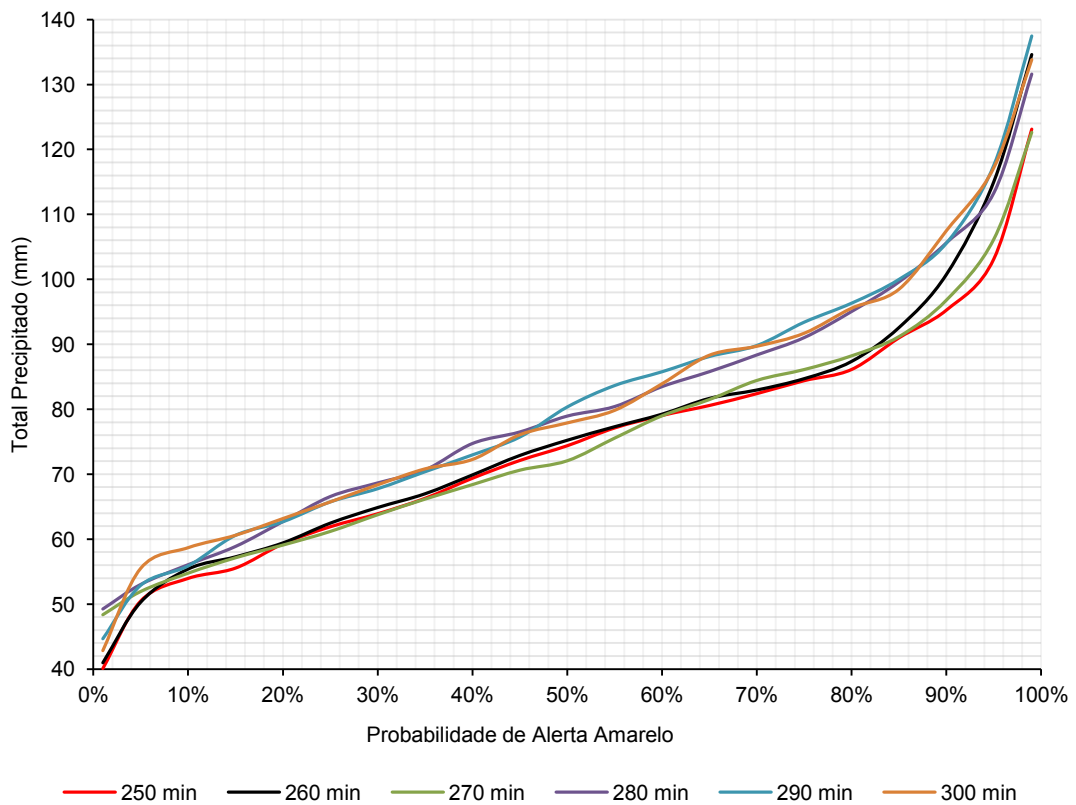


Figura 72 - Probabilidade de ocorrência de alerta amarelo para eventos de 4 a 5 horas.

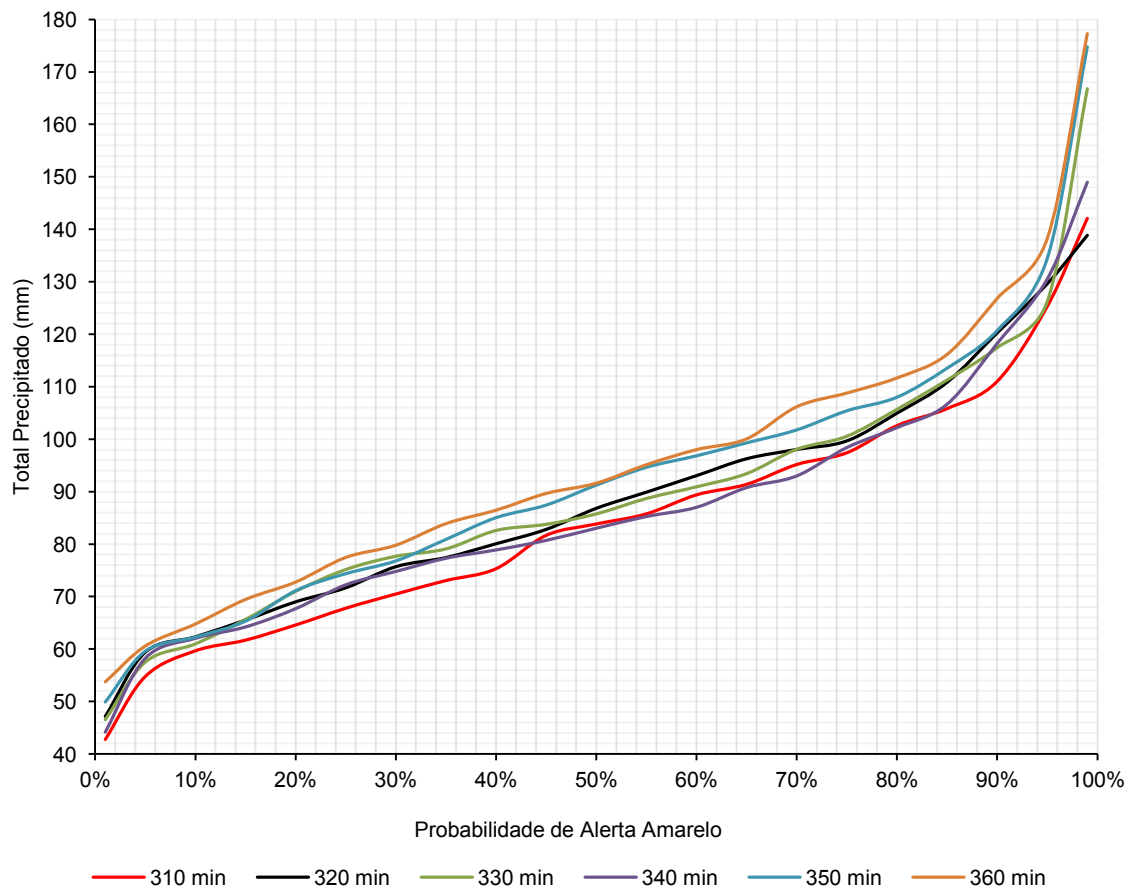


Figura 73 - Probabilidade de ocorrência de alerta amarelo para eventos de 5 a 6 horas.

**APÊNDICE 4 – PROBABILIDADE DE OCORRÊNCIA DE ALERTA
LARANJA DADO O TOTAL PRECIPITADO E A DURAÇÃO**

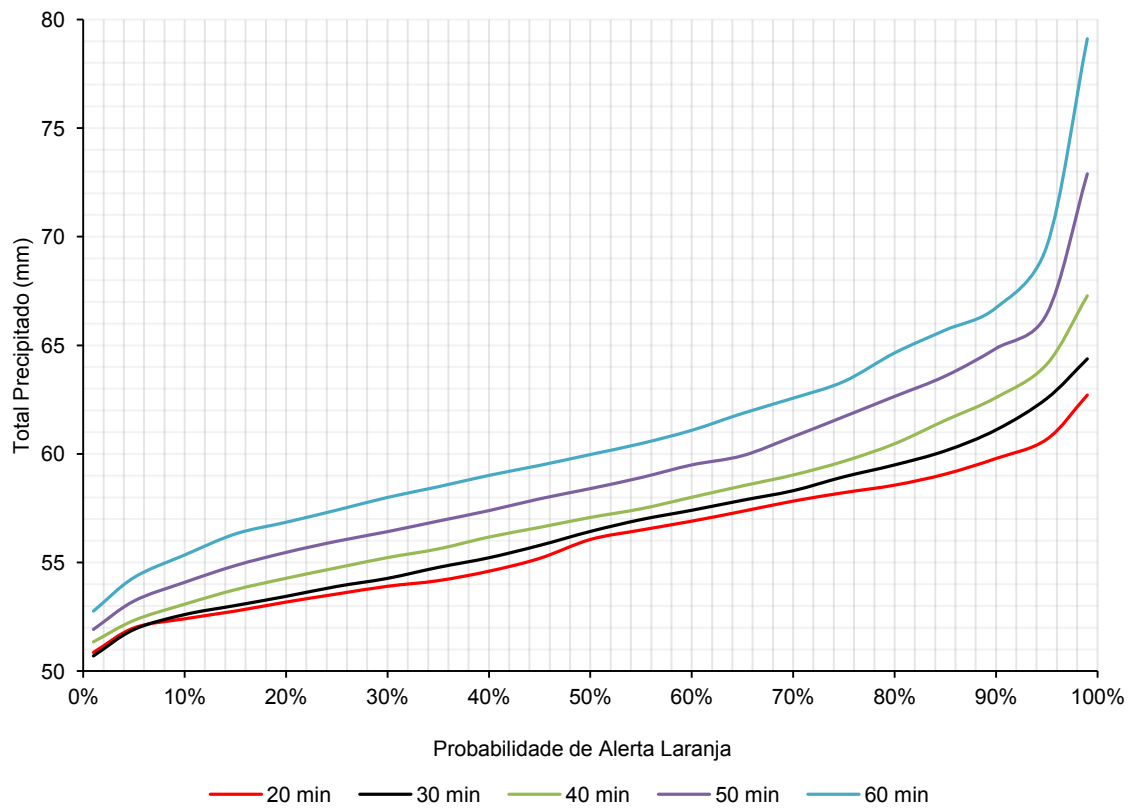


Figura 74 - Probabilidade de ocorrência de alerta laranja para eventos de até 1 hora.

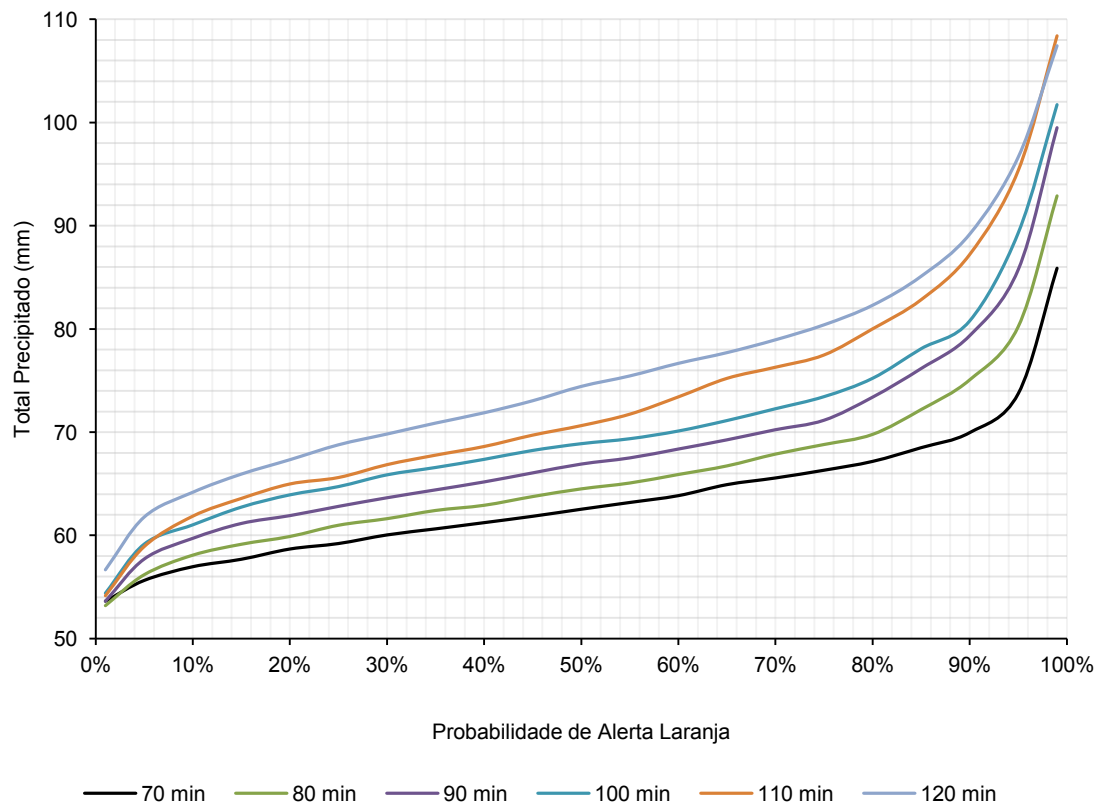


Figura 75 - Probabilidade de ocorrência de alerta laranja para eventos de 1 a 2 horas.

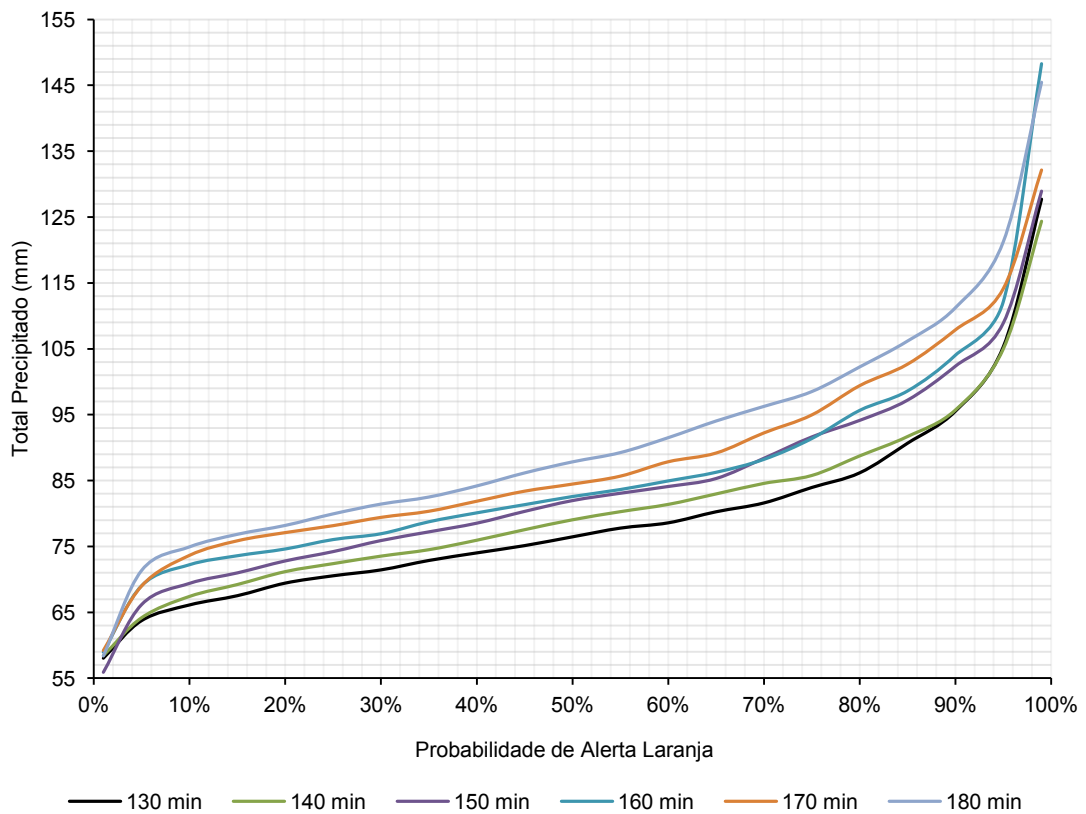


Figura 76 - Probabilidade de ocorrência de alerta laranja para eventos de 2 a 3 horas.

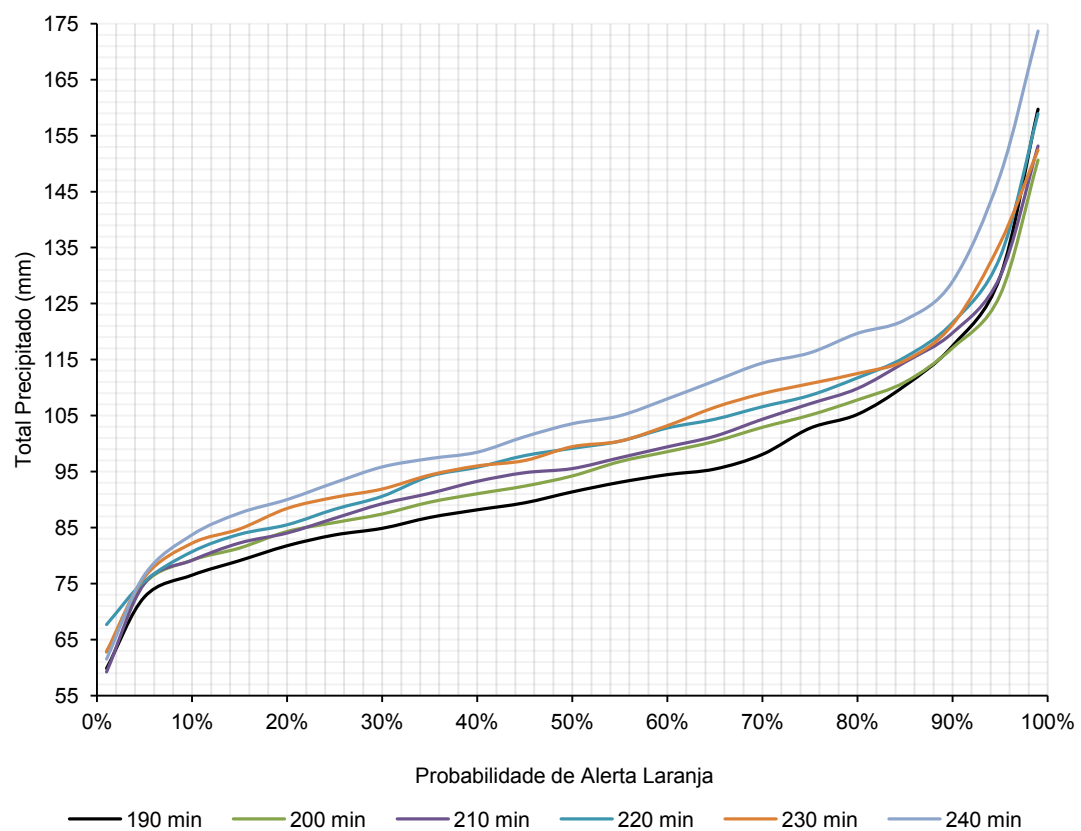


Figura 77 - Probabilidade de ocorrência de alerta laranja para eventos de 3 a 4 horas.

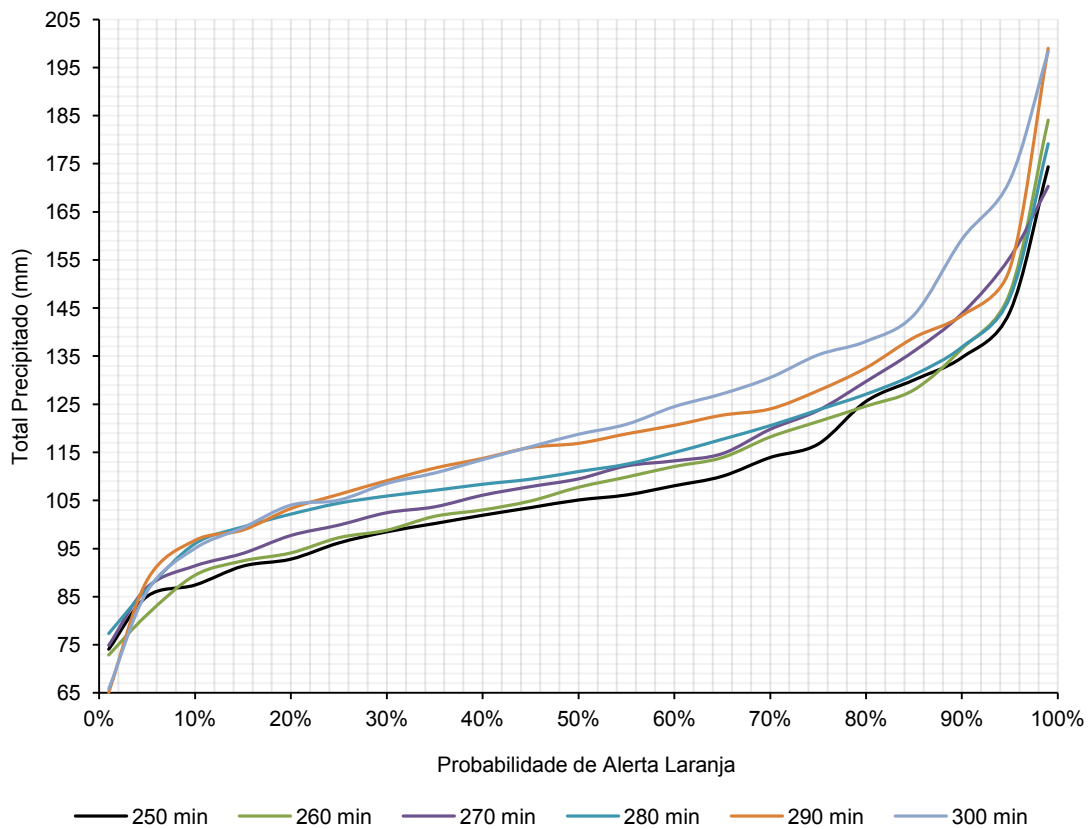


Figura 78 - Probabilidade de ocorrência de alerta laranja para eventos de 4 a 5 horas.

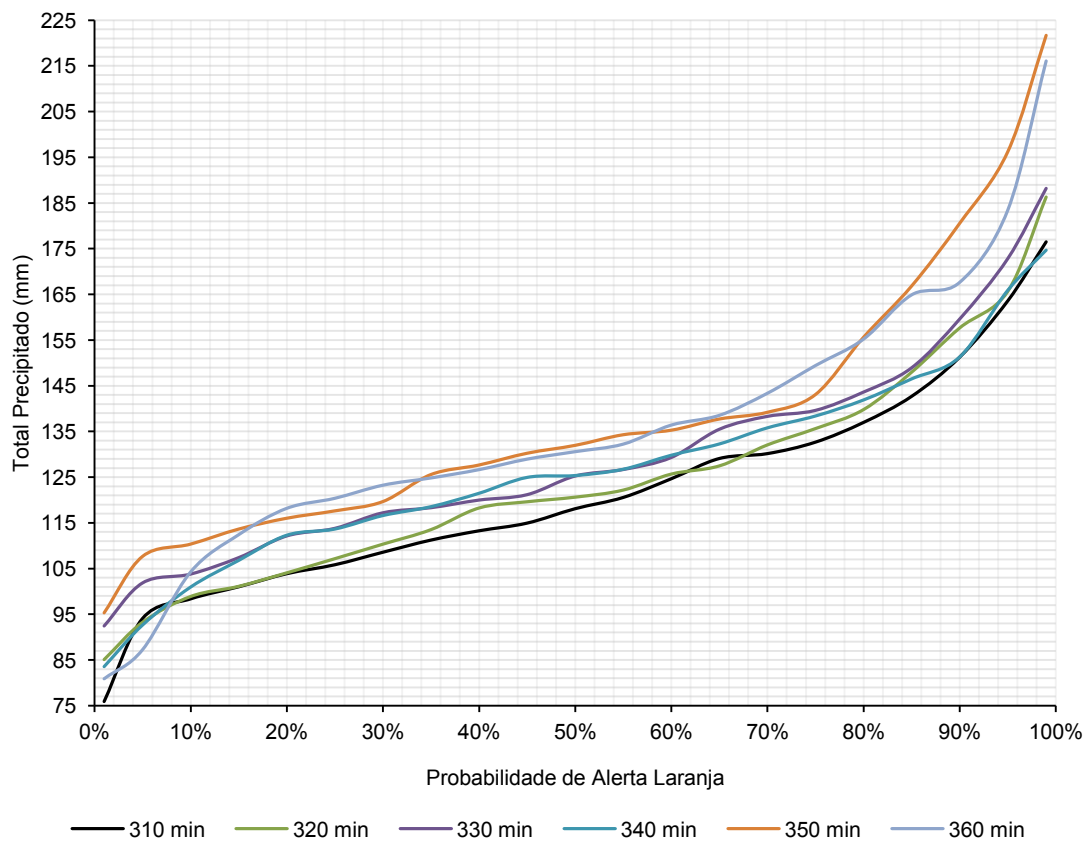


Figura 79 - Probabilidade de ocorrência de alerta laranja para eventos de 5 a 6 horas.

**APÊNDICE 5 – PROBABILIDADE DE OCORRÊNCIA DE ALERTA
VERMELHO DADO O TOTAL PRECIPITADO E A DURAÇÃO**

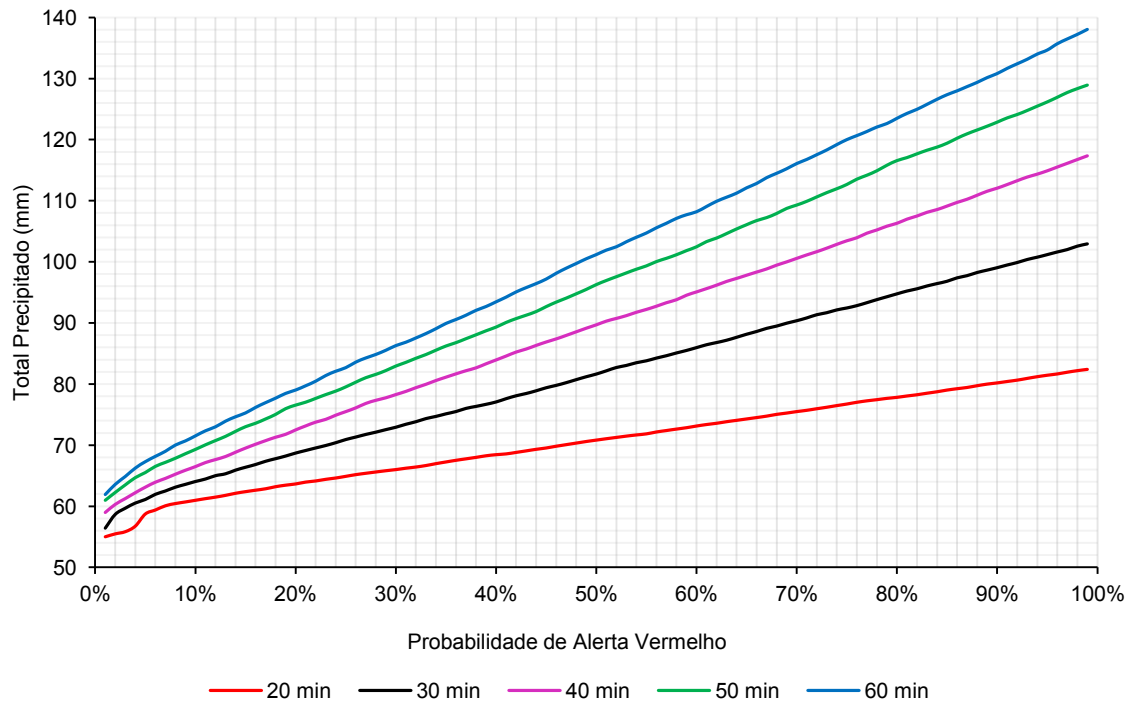


Figura 80 - Probabilidade de ocorrência de alerta vermelho para eventos de até 1 hora.

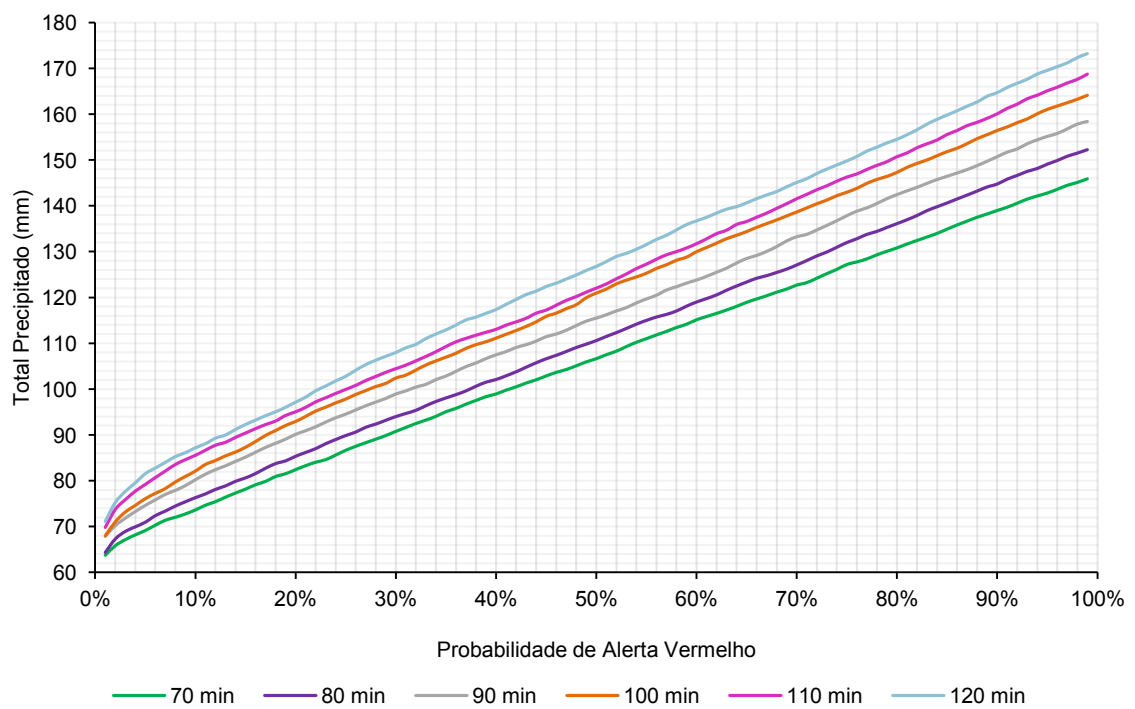


Figura 81 - Probabilidade de ocorrência de alerta vermelho para eventos de 1 a 2 horas.

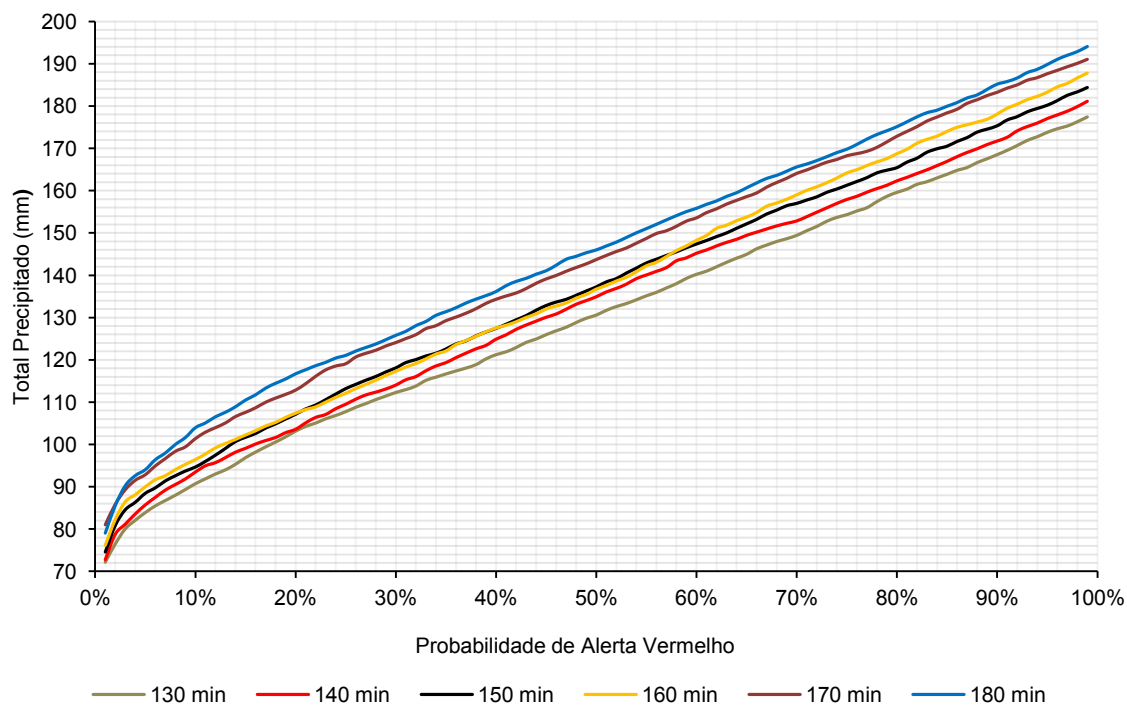


Figura 82 Probabilidade de ocorrência de alerta vermelho para eventos de 2 a 3 horas.

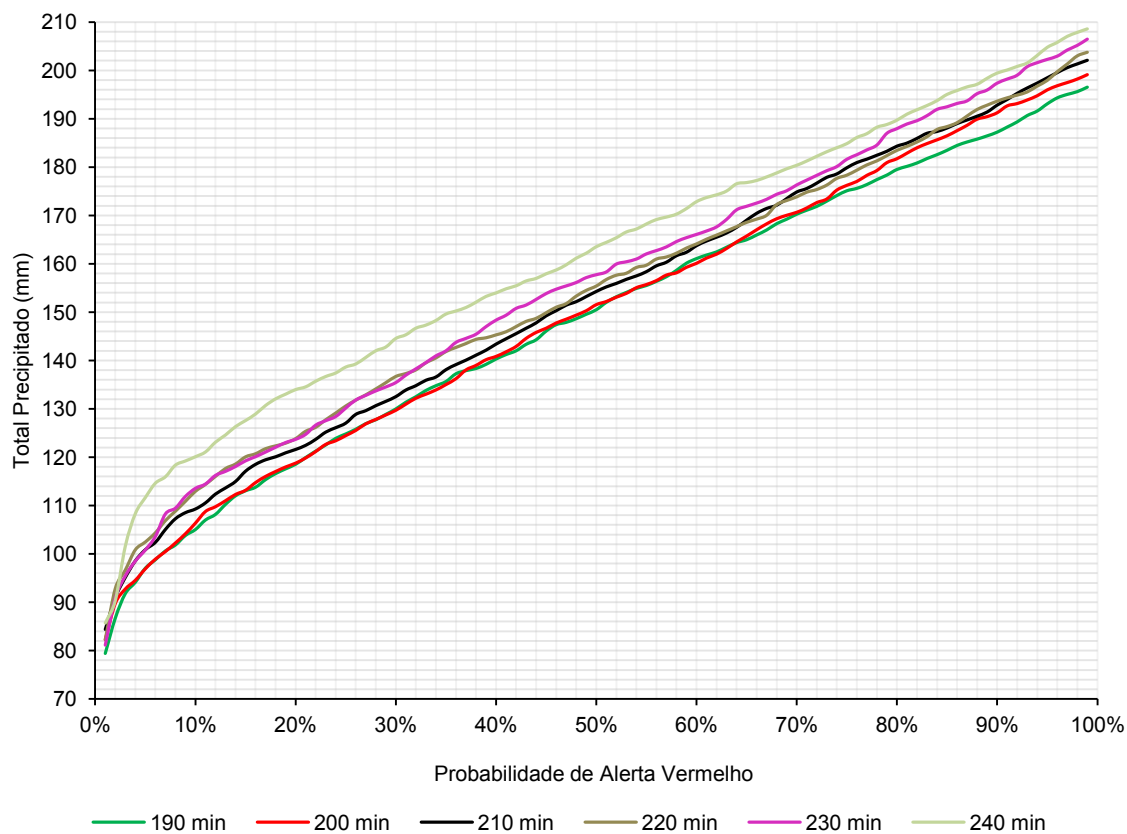


Figura 83 - Probabilidade de ocorrência de alerta vermelho para eventos de 3 a 4 horas.

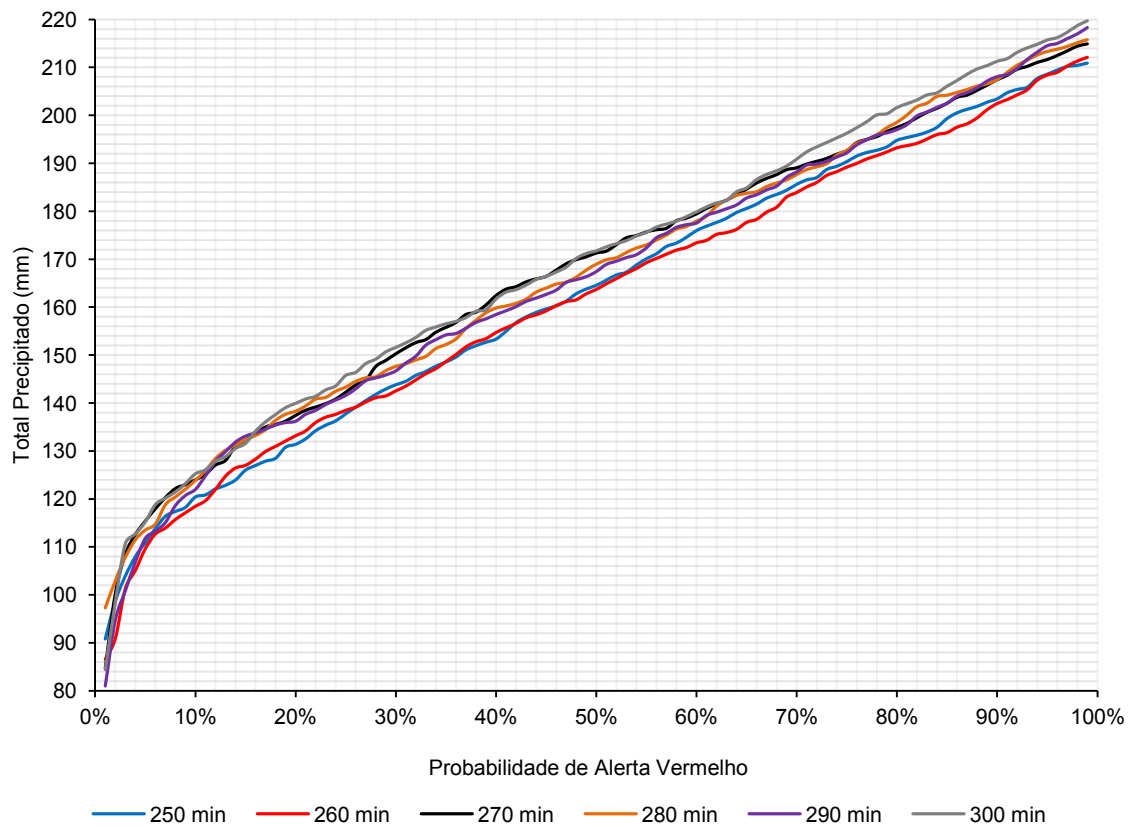


Figura 84 - Probabilidade de ocorrência de alerta vermelho para eventos de 4 a 5 horas.

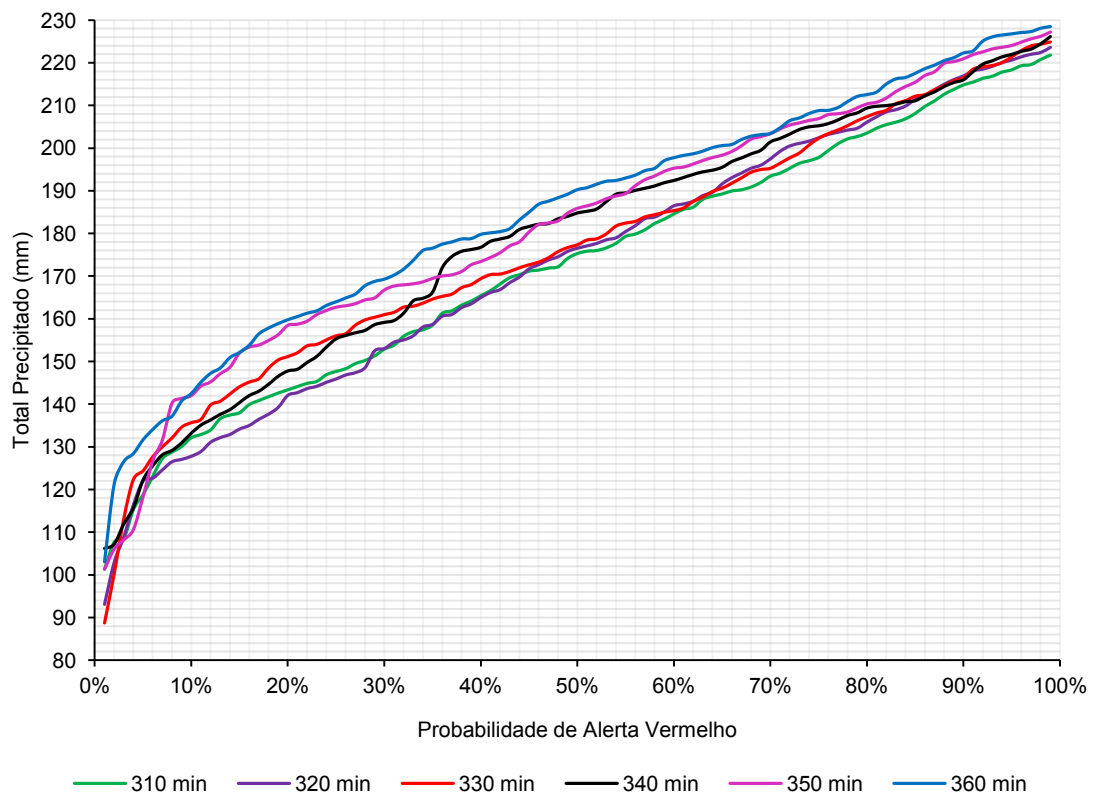


Figura 85 - Probabilidade de ocorrência de alerta vermelho para eventos de 5 a 6 horas.