

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



TAINARA RAMOS DA ROCHA LINS DE BRITO

**Modelagem hidrológica e hidráulica a partir de dados TRMM aplicada
a análise de risco em áreas inundáveis: estudo de caso no município de
Atalaia**

Maceió - AL

2017

TAINARA RAMOS DA ROCHA LINS DE BRITO

**Modelagem hidrológica e hidráulica a partir de dados TRMM aplicada
a análise de risco em áreas inundáveis: estudo de caso no município de
Atalaia**

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

Orientadora: Prof.^a Dra. Rosangela Sampaio Reis

Coorientador: Dr. Samuellson Lopes Cabral

Maceió - AL

2017

Catálogo na fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca Central

Bibliotecário Responsável: Valter dos Santos Andrade

- B863m Brito, Tainara Ramos da Rocha Lins de.
Modelagem hidrológica e hidráulica a partir de dados TRMM aplicada a análise de risco em áreas inundáveis: estudo de caso no município de Atalaia / Tainara Ramos da Rocha Lins de Brito. – 2017.
78 f. : il.
- Orientadora: Rosangela Sampaio Reis.
Coorientador: Samuellson Lopes Cabral.
- Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento) – Universidade Federal de Alagoas. Centro de Tecnologia. Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento. Maceió, 2017.
- Bibliografia: f. 72-76.
Apêndice: f. 76-78.
1. Áreas inundadas – Atalaia, AL. 2. Análise de risco. 2. HEC-HMS.
3. HEC-RAS. I. Título.

CDU: 556.166



Folha de Aprovação

TAINARA RAMOS DA ROCHA LINS DE BRITO

Modelagem hidrológica e hidráulica a partir de dados TRMM aplicada à análise de risco em áreas inundáveis: estudo de caso no município de Atalaia

Dissertação apresentada em 28 de março de 2017 ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento, Centro de Tecnologia da Universidade Federal de Alagoas, como requisito para obtenção do título de Mestre em Recursos Hídricos e Saneamento.

Profª. Drª. Rosângela Sampaio Reis
(Orientadora- PPGRHS)

Dr. Samuelson Lopes Cabral
(Coorientador- CEMADEN)

Banca examinadora:

Profª. Drª. Cleuda Custódio Freire
(Examinadora interna – PPGRHS-UFAL)

Prof. Dr. José Roberto Gonçalves de Azevedo
(Examinador externo – UFPE)

SECRETARIA DE PÓS-GRADUAÇÃO
DO CTEC/UFAL

CONFERE COM O ORIGINAL

EM 29/05/2017

Rosângela de O. Toledo
Téc. em Assuntos Educacionais
SIAPE 1755266

A Deus por me dar forças e me permitir chegar até aqui.

A minha mãe, pelo exemplo de mulher e mãe guerreira, que nunca me deixou faltar nada, sempre me apoiando e incentivando. Te amo.

E ao meu marido e companheiro Hugo, pelo seu amor, conselhos e apoio incondicional. A você todo meu amor e admiração.

AGRADECIMENTOS

A minha família por todos ensinamentos, carinho e compreensão durante todo o tempo em que estive ausente e, principalmente, por todo amor. Agradeço em especial a tia Nana, minha avó Eunice e meu avô Antônio, sem vocês eu não estaria aqui hoje.

A minha orientadora Prof^a. Dra. Rosangela, por toda ajuda e confiança depositada desde o primeiro dia.

Ao meu coorientador Dr. Samuellson por toda ajuda durante a elaboração da dissertação e, principalmente, pela oportunidade de vivenciar e conhecer o trabalho do CEMADEN.

Ao professor Christopher e seu antigo grupo de pesquisa, em especial ao Cléber e Sofia pela ajuda.

Ao Prof. PhD. Ruberto pela disponibilização de alguns dados.

Ao PPGRHS e todos os professores e técnicos responsáveis.

Aos colegas da turma de 2014, em especial a Schay pela companhia e paciência durante as voltas para casa cheias de emoção e ao Abel pela ajuda e apoio no início do mestrado.

Aos amigos da minha turma de mestrado pelas angústias, aflições e bons momentos compartilhados, principalmente nas pausas sagradas para o café: Renata, Camila, Tardelly, Juliana, Stephane e Marconi. Em especial a Alane e ao Cristiano, pela parceria nos trabalhos acadêmicos e, principalmente, pelo convívio diário e bons momentos vividos em nossa sala de permanência. Muito obrigada.

À CAPES pela concessão da bolsa de mestrado.

A todos que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho.

RESUMO

Este trabalho consistiu na análise do acoplamento “*off-line*” de modelos hidrológico e hidráulico a partir de dados de precipitação observada e nas estimativas de intensidade de precipitação do satélite TRMM em relação à bacia hidrográfica do rio Paraíba do Meio (AL/PE), tendo como objetivo final o mapeamento das áreas inundáveis e análise de risco do município de Atalaia-AL, ao considerar o evento de cheia ocorrido em 2010. Os principais programas computacionais empregados foram: o HEC-HMS na modelagem hidrológica e o HEC-RAS na modelagem hidráulica, além de suas respectivas extensões integradas ao ArcMap na etapa do pré-processamento, HEC-GeoHMS e HEC-GeoRAS. Os resultados mostraram que as intensidades pluviométricas estimadas pelo satélite TRMM apresentaram boa correlação com a série de dados dos pluviômetros, com valores de 0,90 (“TRMM” x Postos) e de 0,94 (“TRMM+Postos” x Postos). O modelo hidrológico demonstrou uma boa representatividade em relação a eventos de cheia na bacia, a partir de dados da cheia ocorrida em 2000 e da cheia de 2010. A validação do modelo hidrológico demonstrou resultados satisfatórios no posto Atalaia (39870000) para a série corrigida do satélite (“TRMM+Postos”), exibindo um coeficiente de eficiência de Nash Sutcliffe – COE – de 0,91. A modelagem hidráulica teve sua calibração baseada no ajuste do coeficiente de Manning (n) para as margens e fundo do canal, com base nas marcas de cheia levantadas em campo pela ENGEMAP e pela vazão de pico registrada no posto Atalaia (39870000) durante o evento de 2010, já a validação do modelo partiu do coeficiente de Manning (n) calibrado e do hidrograma gerado na simulação hidrológica a partir da série corrigida do satélite TRMM (“TRMM+Postos”). Por fim, o mapeamento das áreas inundadas, permitiu uma Análise de Risco no município de Atalaia baseada na análise da vulnerabilidade social e das ameaças às quais a população residente às margens do rio está exposta diante da ocorrência de eventos de inundação.

Palavras-chave: HEC-HMS. HEC-RAS. Áreas inundadas. Análise de risco.

ABSTRACT

This work consisted in the analysis of the off-line coupling of hydrological and hydraulic models from observed rainfall data and in the TRMM satellite precipitation intensity estimates in the Paraíba do Meio watershed (AL/PE), with the final objective the mapping of flooded areas and risk analysis of Atalaia-AL city, when considering the flood event occurred in 2010. The main computational programs used were: HEC-HMS in hydrological modeling and HEC-RAS in hydraulic modeling, in addition to their respective extensions integrated with ArcMap in the preprocessing stage, HEC-GeoHMS and HEC-GeoRAS. The results showed that the rainfall intensity data estimated by the TRMM satellite presented a good correlation with the rainfall data series, presenting values of 0.90 ("TRMM" x Postos) and 0.94 ("TRMM + Postos" x Postos). The hydrological model presented a good representation in relation to flood events in the Paraíba do Meio watershed, from data the flood occurred in 2000 and the flood of 2010. The validation of the model presented satisfactory results in the Atalaia post (39870000) in relation to the corrected satellite series ("TRMM + Postos"), evidencing with a Nash Sutcliffe coefficient - COE of 0.91. The hydraulic modeling was calibrated based on the Manning coefficient (n) adjustment for the banks and bottom of the channel, based on the ENGEMAP field markings and the peak flow recorded during the 2010 event by the fluvimetric Atalaia post (39870000), already the model validation was done from the calibrated Manning coefficient (n) and the hydrograph generated in the hydrological simulation based on the corrected satellite series TRMM ("TRMM + Postos"). Thus, the mapping of the flooded areas made based on the 2010 flood data allowed a Risk Analysis in Atalaia city, based on the threat and vulnerability of the resident population in the riverine region to the occurrence of floods.

Keywords: HEC-HMS. HEC-RAS. Flooded areas. Risk analysis.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Elementos da equação de energia com representação das linhas de água e energia – Equação (4).	21
Figura 2 – Representação do leito do rio.	21
Figura 3 - Metodologia empregada no mapeamento das áreas inundáveis e análise de risco do município de Atalaia (AL).	24
Figura 4 - Localização da bacia do rio Paraíba do Meio (AL/PE) e representação do município de Atalaia na bacia.	25
Figura 5 – Tipos de solo ao longo da bacia do rio Paraíba do Meio (AL/PE).	26
Figura 6 – Hietograma dos totais e das máximas mensais do posto Atalaia (00936110) em 2010.	28
Figura 7 - Distribuição dos postos pluviométricos e fluviométricos na bacia e representação dos pontos de grade com resolução do satélite TRMM (0,25° x 0,25°)..	30
Figura 8 – Layout do modelo hidrológico (HEC-HMS) com representação de algumas junções*.	33
Figura 9 – Representação dos setores censitários urbanos às margens do rio Paraíba do Meio no município de Atalaia-AL.	38
Figura 10 – Comparação entres os dados pluviométricos disponíveis para a região da bacia hidrográfica do rio Paraíba do Meio em junho de 2010.	43
Figura 11 – Hidrograma da cheia de 2000.	44
Figura 12 – Hidrograma da cheia de 2010.	45
Figura 13 – Representação das cotas máximas do posto Atalaia (39870000) entre 1988 e 2010.	45
Figura 14 – (a) Representação do índice de vegetação (NDVI) na bacia e (b) Representação dos valores de CN ao longo da bacia.	46
Figura 15 – Extração das precipitações médias de cada sub-bacia em 19/06/2010 – Postos Pluviométricos.	47
Figura 16 – Extração das precipitações médias de cada sub-bacia em 19/06/2010 – “TRMM”.	48
Figura 17 – Comportamento das vazões simuladas e observadas na validação do modelo hidrológico para os postos Quebrangulo e Viçosa – Cenários 1 e 2.	50
Figura 18 – Comportamento das vazões simuladas na etapa de validação do modelo hidrológico para o posto Atalaia (39870000) – Cenário 1.	51

Figura 19 – Comportamento das vazões simuladas na etapa de validação do modelo hidrológico para o posto Atalaia (39870000) – Cenário 2.	51
Figura 20 – Diagramas de dispersão entre as vazões observadas (Atalaia – 39870000) e as vazões simuladas (“TRMM+Postos”) da cheia de 2010 para o a) Cenário 1 e o b) Cenário 2.	53
Figura 21 – a) Representação do terreno através de curvas de nível e pontos cotados levantados pela ENGEMAP às margens do rio em Atalaia-AL e b) Representação do TIN criado a partir das curvas de nível e pontos cotados.	54
Figura 22 – Representação da geometria do canal e seções transversais no HEC-RAS.	54
Figura 23 – Representação da mancha de inundação gerada na calibração do modelo hidráulico ($Q_{ATALAIA}$) e das marcas de cheia levantadas em campo no dia de pico do evento – 19/06/2010.	56
Figura 24 – Comparação entre as cotas observadas e simuladas – Calibração.	57
Figura 25 – Representação da mancha de inundação gerada na validação do modelo hidráulico ($Q_{TRMM+Postos}$) comparada às manchas geradas na calibração e na mancha proveniente dos dados do satélite (Q_{TRMM}).	58
Figura 26 – Comparação entre as cotas observadas e simuladas – Validação	58
Figura 27 – Mapeamento da vulnerabilidade social nos setores censitários urbanos às margens do rio Paraíba do Meio no município de Atalaia.	65
Figura 28 – Representação da mancha de inundação referente à Zona 1 ($Q_{Zona\ 1} = 424\ m^3/s$) comparada à mancha de inundação da Zona 2 ($Q_{Zona\ 2} = 948,01\ m^3/s$).	66
Figura 29 – Mapeamento e classificação dos riscos existentes para a população residente nos setores censitários urbanos às margens do rio no município de Atalaia – AL.	67

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Informações dos postos pluviométricos.	27
Tabela 2 - Informações dos postos fluviométricos.	29
Tabela 3 – Descrição das variáveis utilizadas na análise da vulnerabilidade social.	39
Tabela 4 – Classificação de vulnerabilidade segundo agrupamento das variáveis.	40
Tabela 5 – Classificação de vulnerabilidade segundo levantamento dos elementos essenciais.	40
Tabela 6 – Classificação de vulnerabilidade segundo levantamento e estimativa das unidades de resposta – Equação (9).	41
Tabela 7 – Classificação segundo cálculo da vulnerabilidade social dos setores censitários.	41
Tabela 8 – Critérios utilizados na classificação do risco durante a Análise de Risco no município de Atalaia-AL.	42
Tabela 9 – Parâmetros otimizados – Cenário 1.	49
Tabela 10 – Parâmetros otimizados – Cenário 2.	49
Tabela 11 – Análise estatística da validação do modelo hidrológico – Posto Atalaia (39870000).	52
Tabela 12 – Coeficientes de Manning (n) obtidos na calibração do modelo hidráulico.	55
Tabela 13 – Informações das variáveis utilizadas na definição da vulnerabilidade social dos setores censitários às margens do rio Paraíba do Meio - Atalaia/AL.	61
Tabela 14 – Variáveis classificadas segundo sua vulnerabilidade para cada setor censitário.	61
Tabela 15 – Quantificação e classificação dos elementos essenciais para cada setor censitário.	62
Tabela 16 – Detalhamento e resultado do cálculo ponderado das unidades de resposta, bem como classificação de vulnerabilidade para cada setor censitário.	64
Tabela 17 – Vulnerabilidade social por setor censitário – Equação (8).	64

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CEMADEN – Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais

CN – *Curve Number*

COE – Coeficiente de eficiência de Nash Sutcliffe

DP – Desvio padrão

ES – Elementos essenciais

GDEM – *Global Digital Elevation Model*

GPM – *Global Precipitation Measurement*

GPS – *Global Position System*

HEC-HMS – *Hydrologic Engineering Center - Hydrologic Modeling System*

HEC-RAS – *Hydrologic Engineering Center- River Analysis System*

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

MDE – Modelo Digital de Elevação

MDS – Modelo Digital de Superfície

NDVI – *Normalized Difference Vegetation Index*

NRCS – *Natural Resources Conservation Service*

SCS – *Soil Conservation Service*

SEMARH – Secretaria de Estado do Meio Ambiente e Recursos Hídricos

SIG – Sistemas de Informações Geográficas

SRTM – *Shuttle Radar Topography Mission*

TIN – *Triangulated Irregular Network*

TRMM – *Tropical Rainfall Measuring Mission*

UR – Unidades de resposta

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
2	OBJETIVOS	16
2.1	Geral	16
2.2	Específicos	16
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	17
3.1	TRMM.....	17
3.2	Modelagem.....	18
3.2.1	Modelagem Hidrológica.....	19
3.2.2	Modelagem Hidráulica.....	20
3.3	Análise de Risco	22
4	METODOLOGIA	24
4.1	Área de Estudo	24
4.2	Eventos	26
4.3	Levantamento de dados	27
4.3.1	Dados Pluviométricos	27
4.3.2	Dados Fluviométricos	29
4.3.3	Representação do terreno	30
4.4	Modelagem.....	31
4.4.1	Modelagem Hidrológica.....	31
4.4.2	Modelagem Hidráulica.....	35
4.5	Análise de Risco	37
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	43
5.1	Levantamento de dados	43

5.1.1	Dados Pluviométricos	43
5.1.2	Dados Fluviométricos	44
5.2	Modelagem.....	46
5.2.1	Modelagem Hidrológica.....	46
5.2.2	Modelagem Hidráulica.....	53
5.3	Análise de Risco.....	60
6	CONCLUSÕES	69
	REFERÊNCIAS	71
	APÊNDICE	75

1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento da infraestrutura das cidades não acompanhou o crescimento demográfico que vem intensificando o grau de urbanização em áreas ribeirinhas, expondo a população à ocorrência de desastres ambientais e/ou prejuízos econômicos decorrentes dos elevados índices pluviométricos registrados nos últimos anos (TUCCI, 2012).

A frequência na qual os desastres ocorrem é um dos fatores limitantes no processo de urbanização, visto que, quando a frequência é baixa a população despreza os riscos de haver um novo desastre e acaba ocupando progressivamente áreas mais vulneráveis à ocorrência de desastres. Assim, a urbanização desordenada se torna um dos agravantes na dinâmica hídrica de uma bacia hidrográfica, devido principalmente à impermeabilização do solo e ao aumento do volume e velocidade do escoamento superficial, provocando a ascensão da vazão dos rios e dos seus níveis, de modo a atingirem o seu leito maior geralmente ocupado pela população ribeirinha.

Esse cenário de ocupação desordenada e consequente alteração do regime hidrológico, vem sendo objeto de estudo em diversos trabalhos realizados em bacias hidrográficas localizadas no estado de Alagoas, como nas bacias do rio Mundaú (MONTE et al, 2016; OLIVEIRA et al., 2014; FRAGOSO JR et al., 2010), do rio Jacarecica (PEPLAU, 2005) e do rio Paraíba do Meio (SANTOS, 2016; OLIVEIRA et al., 2014; GAMA, 2011; FRAGOSO JR et al., 2010).

Na bacia hidrográfica do rio Paraíba do Meio, ocorreram grandes inundações ribeirinhas, como as registradas em 1969, 1988, 1989, 2000 e 2010 com registros de óbitos e grandes prejuízos, retratando a vulnerabilidade na qual a bacia está exposta.

Nesses casos, o acoplamento de modelos hidrológicos e hidráulicos representa uma ferramenta fundamental no processo de mapeamento das planícies inundáveis (FALCK et al., 2015; MUÑOZ & VALERIANO, 2015; MONTE et al, 2016; HOLZ, 2010), essencial no planejamento e elaboração do Plano Diretor das cidades, onde as áreas de riscos são previamente conhecidas e a ocupação nessas regiões deve ser controlada. Ainda assim, uma forma de identificar essas áreas, quando não há informações topográficas obtidas em campo, é através de informações do relevo por meio do processamento de Modelos Digitais de Elevação (MDE) (MUÑOZ & VALERIANO, 2015; NÓBREGA et al., 2008).

O mapeamento de áreas inundáveis depende de um prévio estudo hidrológico da região que está sujeito à disponibilidade de informações locais, retratando a deficiência das redes de monitoramento hidrológico espalhadas pelo Brasil (TUCCI, 2012), onde a disponibilidade e

representatividade dos dados em algumas regiões são escassas. Nesse sentido, as informações fornecidas pelo satélite TRMM (*Tropical Rainfall Measuring Mission*) vêm sendo utilizadas nos últimos anos como fonte de dados para estudos hidrológicos e estimativas de precipitação em locais com poucos registros ou até mesmo na ausência deles (FALCK et al., 2015; PEREIRA et al., 2013; NÓBREGA et al., 2008; COLLISCHONN, 2006; KUMMEROW et al., 2000).

Esse processo de mapeamento das áreas inundáveis é um importante instrumento na gestão das cidades por indicar as áreas mais suscetíveis à ocorrência de inundações e, também, os locais com maiores índices de vulnerabilidade.

Nesse âmbito de identificação da vulnerabilidade e subsídio aos gestores, a análise de risco é uma das ferramentas frequentemente utilizada em regiões ameaçadas, onde um estudo detalhado é feito e cenários de risco são analisados (BARROS et al., 2015; SILVA JR. & SZLAFSZTENS, 2013; HORA & GOMES, 2009; REBELO, 2003; CUTTER et al., 2003). À vista disso, cabe aos gestores ações específicas para reverter este quadro e medidas que visem diminuir os riscos à inundação.

Desta forma, este estudo teve como objetivo a modelagem hidrológica-hidráulica a partir dos dados do satélite TRMM, seguida do mapeamento e análise de risco das áreas ribeirinhas com potencial de inundação no município de Atalaia – AL.

2 OBJETIVOS

2.1 Geral

Avaliar a modelagem hidrológica e hidráulica a partir de dados do satélite TRMM na bacia hidrográfica do rio Paraíba do Meio (AL/PE), visando o mapeamento das áreas inundáveis e análise de risco do município de Atalaia-AL.

2.2 Específicos

1. Obter e espacializar os dados de precipitação dos postos pluviométricos e do satélite TRMM;
2. Utilizar os dados de precipitação dos postos pluviométricos, TRMM e TRMM+Postos na modelagem hidrológica da bacia hidrográfica;
3. Utilizar os dados resultantes da modelagem hidrológica em um modelo hidráulico para mapeamento das áreas inundáveis no município de Atalaia;
4. Analisar as áreas de risco no município de Atalaia, a partir das áreas inundáveis e da vulnerabilidade social da população.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 TRMM

O satélite TRMM (*Tropical Rainfall Measuring Mission*), lançado em 27 de novembro de 1997, é um projeto em parceria entre a NASA e a Agência Japonesa de Exploração Aeroespacial (JAXA) com o principal objetivo de monitorar e coletar dados mais refinados sobre a estrutura da precipitação nos trópicos, além de verificar sua influência no clima global (KUMMEROW et al., 2000).

Os dados de intensidade pluviométrica fornecidos pelo TRMM ficaram disponíveis 30 dias após o seu lançamento, ainda em 1997, ao disponibilizar informações em mm/h de áreas tropicais e subtropicais a cada 3 horas em arquivos de extensão .hdf (*Hierarchical Data Format*) (KUMMEROW et al., 2000).

A bordo do satélite TRMM há alguns instrumentos como o imageador de micro-ondas (TMI), o radar de precipitação (PR), o radiômetro no visível e no infravermelho (VIRS), o sensor de energia radiante da superfície terrestre e das nuvens (CERES), e o sensor para imageamento de relâmpagos (LIS). Sendo o TMI o principal instrumento utilizado na medição da precipitação e o PR utilizado no refinamento das estimativas afetadas pelas diferentes formações de nuvens (COLLISCHONN, 2006).

O satélite TRMM gera diferentes produtos a depender da combinação de instrumentos utilizados no cálculo da precipitação (ARAÚJO, 2015; COLLISCHONN, 2006), sendo que neste trabalho optou-se pelo uso do produto 3B42 (versão 7 e 7A), que obtém as intensidades pluviométricas por meio do TMI e usa o PR para corrigir as estimativas afetadas pelas nuvens.

A grande vantagem do produto 3B42 do TRMM é sua alta resolução temporal e espacial, uma vez que o mesmo gera estimativas de intensidade pluviométrica a cada 3 horas com resolução de 0,25° x 0,25° graus, que se estendem de 50°S a 50°N no sistema de coordenadas WGS-1984. Além disso, o produto 3B42 pode combinar observações obtidas através de sensoriamento remoto com observações obtidas em campo.

As estimativas de chuva do satélite TRMM, no período de 1998 a 2014, estão disponíveis para acesso e download no site da NASA (<http://mirador.gsfc.nasa.gov/cgi-bin/mirador/homepageAlt.pl?CGISESSID=a7ed0756366f60263c8ae04a2e4d76b9> – acessado em 30 de abril de 2016).

Embora o lançamento do satélite TRMM tenha representado um sucesso nas estimativas de intensidade pluviométrica, em 2014 a NASA deixou de operar o satélite devido a alguns problemas na sua permanência em órbita (ARAÚJO, 2015).

Contudo, devido ao sucesso do TRMM utilizado em várias pesquisas de relevante interesse científico (FALCK et al., 2015; PEREIRA et al., 2013; NÓBREGA et al., 2008; COLLISCHONN, 2006; KUMMEROW et al., 2000), em 2015 o satélite GPM (*Global Precipitation Measurement*) foi lançado com o intuito de dar continuidade e de expandir as capacidades do TRMM carregando um avançado imageador de microondas. Sua área de cobertura foi expandida para além dos trópicos, sendo capaz de detectar furacões e a queda de neve, a cada meia hora, e já está sendo usado no monitoramento de ciclones tropicais pelo Laboratório de Pesquisa Naval (PRAKASH et al., 2016; TANG et al., 2016; ISLAM et al., 2012).

3.2 Modelagem

A modelagem permite a representação do comportamento de algum objeto ou sistema em diferentes situações, respondendo, através de uma saída, a uma determinada entrada (TUCCI, 2005). À vista disso, os modelos hidrológicos e hidráulicos destacam-se como alguns dos modelos de maiores aplicações na representação de sistemas.

O modelo hidrológico é frequentemente utilizado na análise do comportamento de bacias hidrográficas a situações reais ou hipotéticas, enquanto que o modelo hidráulico analisa o comportamento do escoamento em canais.

O acoplamento de modelos hidrológicos e hidráulicos vem sendo abordado em alguns estudos de inundações (MONTE et al, 2016; PAZ, 2010), podendo ser feito de forma *on-line* ou *off-line*. O acoplamento *on-line* é caracterizado pela interatividade entre os modelos, de modo a aumentar os custos computacionais, à medida que o acoplamento *off-line* é caracterizado por ser unidirecional, ou seja, o acoplamento é feito em uma única direção partindo do modelo hidrológico para o modelo hidráulico, sem que haja uma comunicação entre eles, e com um maior trabalho de implementação (PAZ, 2010).

Um dos principais dados de entrada dos modelos é o MDE (Modelo Digital de Elevação). O MDE corresponde a uma representação matemática da topografia de um terreno em um conjunto de coordenadas X, Y e Z, onde a coordenada Z representa valores da altitude e profundidade em um modelo tridimensional. Esse tipo de representação é frequentemente utilizado em ambientes SIG (Sistemas de Informações Geográficas) como, por exemplo, no processamento hidrológico para obtenção das características fisiográficas de bacias hidrográficas.

O SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) e o Aster GDEM (*Global Digital Elevation Model*), representam algumas das fontes de obtenção de MDE. Sendo que as imagens

do GDEM são oriundas de imagens orbitais com resolução espacial de 30m x 30m, diferente das imagens SRTM que são oriundas de radar com resolução espacial de 90m x 90m.

Desta forma, os modelos utilizados neste trabalho apresentam acoplamento off-line e representam extensões de modelos que operam em ambiente SIG, permitindo uma melhor manipulação e visualização dos resultados gerados.

3.2.1 Modelagem Hidrológica

O modelo hidrológico escolhido para realização deste estudo corresponde ao HEC-HMS (Hydrologic Modeling System), um software livre desenvolvido pelo Hydrologic Engineering Center (HEC) frequentemente utilizado nas transformações chuva-vazão.

O HEC-HMS representa um modelo hidrológico concentrado, que pode ser transformado em um modelo semi-distribuído, constituído por uma série de modelos para modelagem de processos hidrológicos, a partir das informações fisiográficas e meteorológicas de uma bacia hidrográfica. Dentre os modelos inseridos no HEC-HMS, destacam-se: taxa inicial e constante (*Initial and Constant*), SCS (*Soil Conservation Service*), déficit constante (*Deficit Constant*), Muskingum, Muskingum Cunge, Lag e outros.

O modelo SCS, desenvolvido pelo NRCS (*Natural Resources Conservation Service*), é um dos mais utilizados em estudos que abordam os riscos de enchentes ao analisar a transformação da precipitação total em precipitação efetiva em uma bacia hidrográfica. Considera-se, ainda, o SCS como um modelo de fácil aplicação devido ao reduzido número de parâmetros utilizados e por ponderar a relação existente entre os parâmetros e as características físicas da bacia (TUCCI, 2005).

O cálculo da precipitação efetiva pelo modelo HEC-HMS, no módulo *Loss Method*, considerada a aplicação da Equação (1).

$$P_e = \frac{(P - I_a)^2}{P - I_a + S} \quad (1)$$

Onde: P_e é a precipitação efetiva (mm); P é a precipitação total (mm); I_a é a abstração inicial (mm); S é o potencial máximo de retenção do solo (mm).

Segundo o NRCS o valor de I_a corresponde a $0,2S$, onde S é obtido segundo aplicação da Equação (2), e os valores do parâmetro CN (*Curve Number*) consideram os tipos de solo da região estudada, ao avaliar os valores disponíveis na tabela determinada pelo próprio NRCS conforme o uso e ocupação correspondente a cada tipo de solo presente na área estudada.

$$S = \frac{254000}{CN} - 254 \quad (2)$$

Um dos módulos disponíveis no HEC-HMS responsável por obter o hidrograma de cheia através do hietograma da chuva é o Hidrograma Unitário Adimensional do NRCS (SCS-HU), que considera como parâmetro apenas o tempo de retardo da bacia (T_{lag}) – Equação (3).

$$T_{lag} = 0,6 * T_c \quad (3)$$

Onde: T_c é o tempo de concentração (min).

Modelos que simulam o escoamento em rios e canais (*Route Method*) podem ser utilizados de forma conjunta ao modelo SCS, visando a simulação e propagação de hidrogramas em diferentes sub-bacias. Desta forma, modelos como Muskingum, Muskingum-Cunge, Lag e outros, podem ser aplicados na simulação de escoamento em rios, sendo o Lag um dos mais utilizados devido a sua simplicidade ao considerar apenas o tempo de concentração, ao obter um valor *Lag Time*, em minutos, para cada trecho de rio ao longo da bacia.

3.2.2 Modelagem Hidráulica

O modelo hidráulico escolhido para realização deste estudo corresponde ao HEC-RAS (River Analysis System), que representa outro dos softwares livres desenvolvidos pelo Hydrologic Engineering Center (HEC), frequentemente utilizado na simulação de escoamentos em canais naturais ou artificiais de escoamentos supercrítico, subcrítico ou misto.

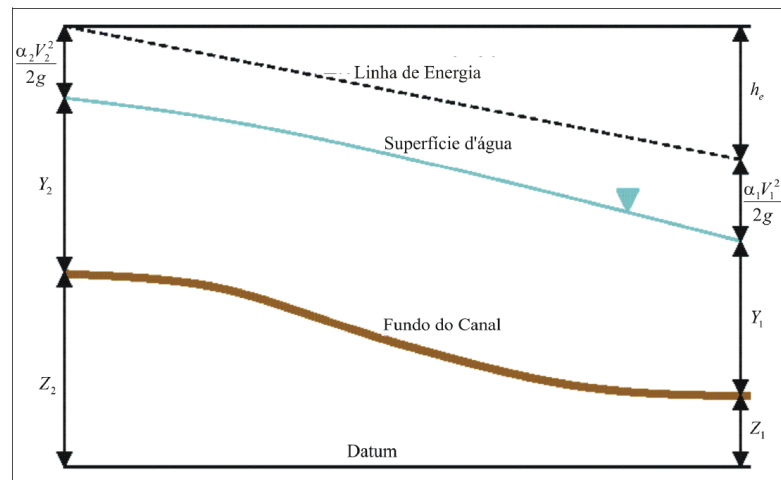
O HEC-RAS representa um software utilizado no cálculo e na análise hidráulica de escoamentos unidimensionais em regime permanente, quase permanente e não permanente. A simulação da erosão no leito do rio, o transporte de sedimentos e a simulação da qualidade do rio representam as outras funcionalidades desse software. Uma maior descrição de todas as funções do modelo pode ser vista em HEC-RAS (2010).

O HEC-RAS é um modelo unidimensional baseado nas equações de Saint Venant ou variações, sendo a determinação do escoamento permanente baseada na equação de energia desenvolvida por Bernoulli – Equação (4) - Figura 1.

$$Y_2 + Z_2 + \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} = Y_1 + Z_1 + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} + h_e \quad (4)$$

Onde: Y_1 e Y_2 representam as profundidades líquida da seção; Z_1 e Z_2 representam as cotas do fundo do canal em relação a um Datum; V_1 e V_2 representam as velocidades média na seção; α_1 e α_2 representam os coeficientes de Coriolis; g representa a aceleração da gravidade; h_e representa a perda de carga no trecho - Figura 1.

Figura 1 – Elementos da equação de energia com representação das linhas de água e energia – Equação (4).

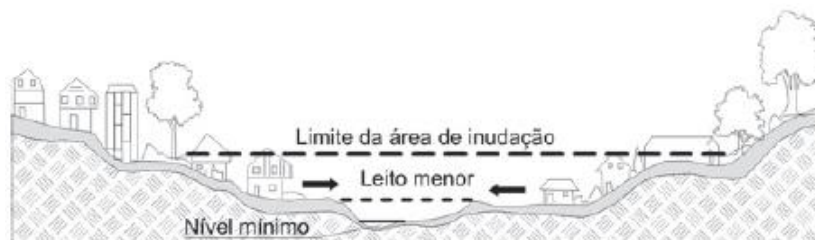


Fonte: Campos (2011).

A simulação do escoamento nesse software necessita de informações como o hidrograma de montante como condição de contorno, seções topobatimétricas e dos coeficientes de rugosidade (coeficiente de Manning - n) das margens e do fundo do canal para cada seção.

Além da simulação dos níveis dos rios, é possível realizar um mapeamento de áreas inundáveis através de uma extensão do HEC-RAS associada ao ArcMap, o HEC-GeoRAS. Essa ferramenta permite analisar o comportamento das variações das vazões como consequência, por exemplo, do processo de impermeabilização do solo a partir da ocupação desordenada da bacia principalmente às margens dos rios. Esse aumento das vazões pode acarretar em uma elevação dos níveis dos corpos hídricos e, conseqüentemente, a transbordamentos desse excedente para suas planícies inundáveis, muitas vezes ocupadas por populações ribeirinhas (Figura 2).

Figura 2 – Representação do leito do rio.



Fonte: Tucci, 2008.

A inundação de áreas ribeirinhas é caracterizada pelo alcance dos níveis dos rios às planícies inundáveis, processo esse que não deveria acarretar em prejuízos, uma vez que, o

alcance dos níveis a essas regiões é um processo natural dos rios e os danos poderiam ser evitados com um planejamento adequado da região.

Diante disto, o mapeamento das áreas suscetíveis à ocorrência de inundações a partir de um MDE (Modelo Digital de Elevação) é um instrumento eficiente no zoneamento das áreas de risco à inundação (TUCCI, 2008), no controle e emissão de alertas quando da detecção de prováveis eventos de risco, como também no gerenciamento de cidades ribeirinhas que deveria ser feito antes mesmo do registro de ocupação.

3.3 Análise de Risco

O mapeamento de áreas inundáveis seguido de uma análise de risco é uma ferramenta útil na prevenção e controle de danos decorrentes das cheias, uma vez que, ao realizar o mapeamento das áreas de risco é possível promover um planejamento adequado da região, evitando que famílias e empreendimentos diversos sejam instalados em áreas consideradas de risco.

A análise de risco consiste em conhecer e entender os fatores que influenciam os riscos, visando identificá-los para sua prevenção, controle e gestão. Nesse aspecto, a adequada gestão das cidades representa uma das principais ferramentas na análise de risco visando sua prevenção e redução e, até mesmo, a diminuição dos seus impactos (HORA & GOMES, 2009; VENTON & HANSFORD, 2006).

A presença do risco está associada à ameaça e à existência de vulnerabilidade que venham a causar algum dano ou adversidade à vida do homem em relação à ocorrência de algum desastre natural. Neste âmbito, o risco de inundação está associado à ocupação de planícies inundáveis, ou seja, quando há a identificação de vulnerabilidade da população residente na região e identificação da ameaça existente em relação à possibilidade de ocorrência de inundações nesta localidade.

As ameaças não afetam de forma igualitária a todas as pessoas, atividades socioeconômicas e/ou infraestruturas. Sabe-se que fatores como localização inadequada, baixa renda, excedente populacional e condições precárias são fatores que favorecem alguns grupos a serem os mais afetados na ocorrência de algum desastre natural.

A vulnerabilidade se refere à presença do risco e, também, à capacidade dos indivíduos em mitigar os danos causados pelos desastres, que se diferem e os tornam mais ou menos vulneráveis de acordo com o risco e suas condições de resiliência. Podem ser agrupadas e

classificadas em vulnerabilidade social, vulnerabilidade de infraestrutura, vulnerabilidade ambiental e sua quantificação geralmente é feita por meio dos indicadores de vulnerabilidade.

Os indicadores de vulnerabilidade são capazes de refletir de forma quantitativa um determinado fenômeno, indicando a capacidade que uma determinada comunidade tem de enfrentar e se recuperar de um desastre (DRACHLER et al., 2014; SILVA JR., 2010; CUTTER et al., 2003).

A vulnerabilidade social considera aspectos como, por exemplo, população residente, faixa etária, renda, nível educacional, infraestrutura, elementos essenciais e unidades de resposta, sendo resultado de processos políticos, culturais e econômicos (DRACHLER et al., 2014; CUTTER et al., 2003).

Os elementos essenciais e as unidades de resposta são duas das variáveis mais importantes na quantificação da vulnerabilidade social de uma região. Os elementos essenciais por si só, representam elementos de infraestrutura essenciais no desenvolvimento humano, enquanto que as unidades de resposta são importantes na redução da vulnerabilidade ao serem utilizadas como unidades de socorro às vítimas dos desastres (hospitais, escolas e igrejas).

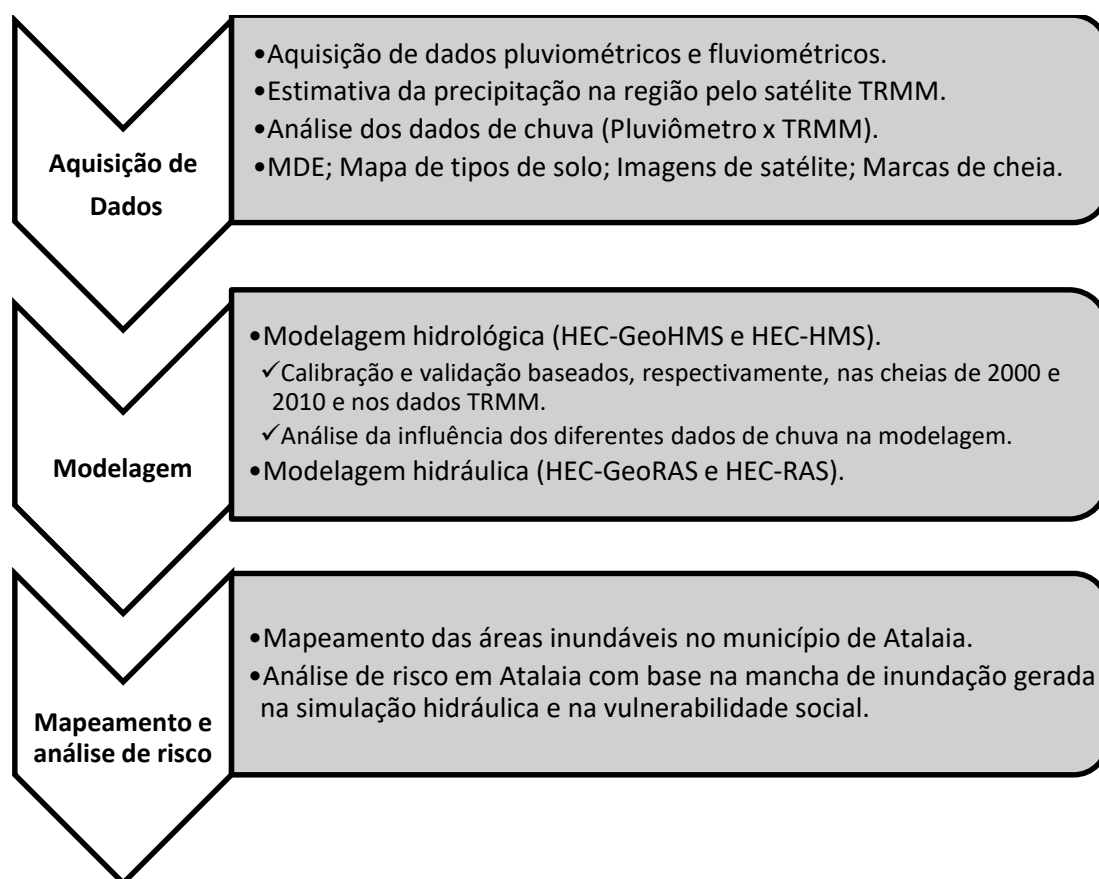
Desta forma, a confecção de um mapa de risco permite o alerta a atuais ou futuros proprietários de terras sujeitas à ocorrência de inundações, subsidiando-os quanto à construção de estruturas de prevenção aos possíveis danos, bem como no auxílio às autoridades e gestores na elaboração dos Planos Diretores das cidades.

Além de promover um zoneamento urbano adequado, é possível ainda prevenir prejuízos ao patrimônio público e privado, evitar a disseminação de doenças de veiculação hídrica e registros de óbitos por afogamento, por exemplo, e outros danos materiais relacionados a residências e estabelecimentos comerciais na região.

4 METODOLOGIA

Para melhor entendimento do escopo do trabalho a Figura 3 mostra a sequência das etapas executadas para alcance do objetivo geral.

Figura 3 - Metodologia empregada no mapeamento das áreas inundáveis e análise de risco do município de Atalaia (AL).



Fonte: Autor (2017).

4.1 Área de Estudo

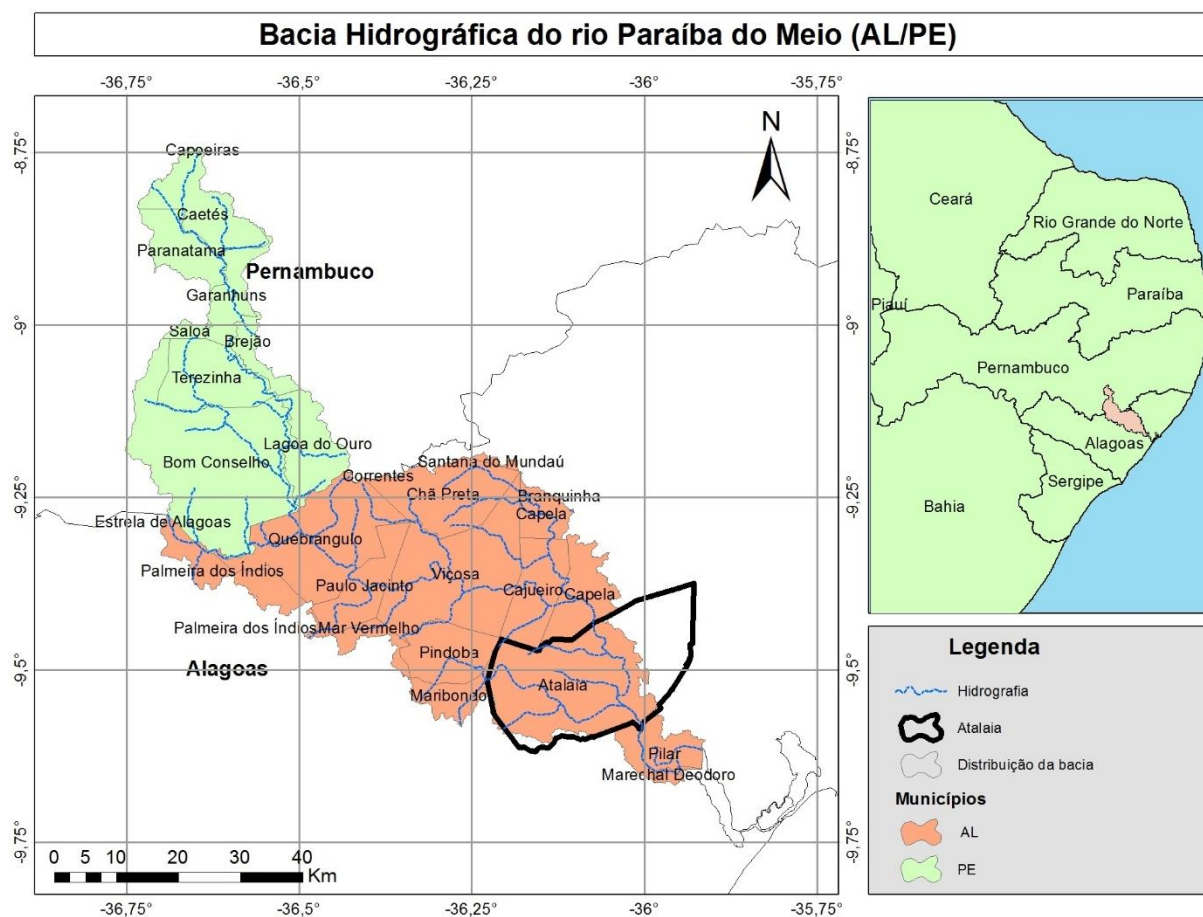
A bacia hidrográfica do rio Paraíba do Meio com aproximadamente 3.200 km² de área total e perímetro de aproximadamente 530 km, está situada entre os estados de Pernambuco e Alagoas entre os paralelos 08°44' e 09°44' de latitude sul e entre os meridianos 35°45' e 36°45' de longitude oeste de Greenwich.

A bacia apresenta duas regiões bem distintas: a região de cabeceira, localizada na porção Pernambucana da bacia e caracterizada por uma região semiárida, e outra inserida numa região de mata atlântica alcançando o litoral, porção Alagoana da bacia. Suas águas são drenadas pelo rio principal, com aproximadamente 122 km de extensão, a caminho do seu exutório localizado na lagoa Manguaba (Figura 4).

A porção alagoana da bacia representa cerca de 63% da sua área total, enquanto que os outros 37% compreendem o trecho pernambucano. Seu território abrange 27 municípios, sendo 17 alagoanos e 10 pernambucanos (Figura 4).

Um dos últimos municípios alagoanos que integram a bacia do rio Paraíba do Meio é o município de Atalaia com aproximadamente 528,8 km² de área (Figura 4), cujo trecho do rio que corta o município é conhecido como Riacho Brejão. Segundo censo demográfico levantado pelo IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística) em 2010, Atalaia apresentava uma população total de 44.322 habitantes, onde 49,3% dos habitantes residiam na zona rural e 50,7% na zona urbana.

Figura 4 - Localização da bacia do rio Paraíba do Meio (AL/PE) e representação do município de Atalaia na bacia.

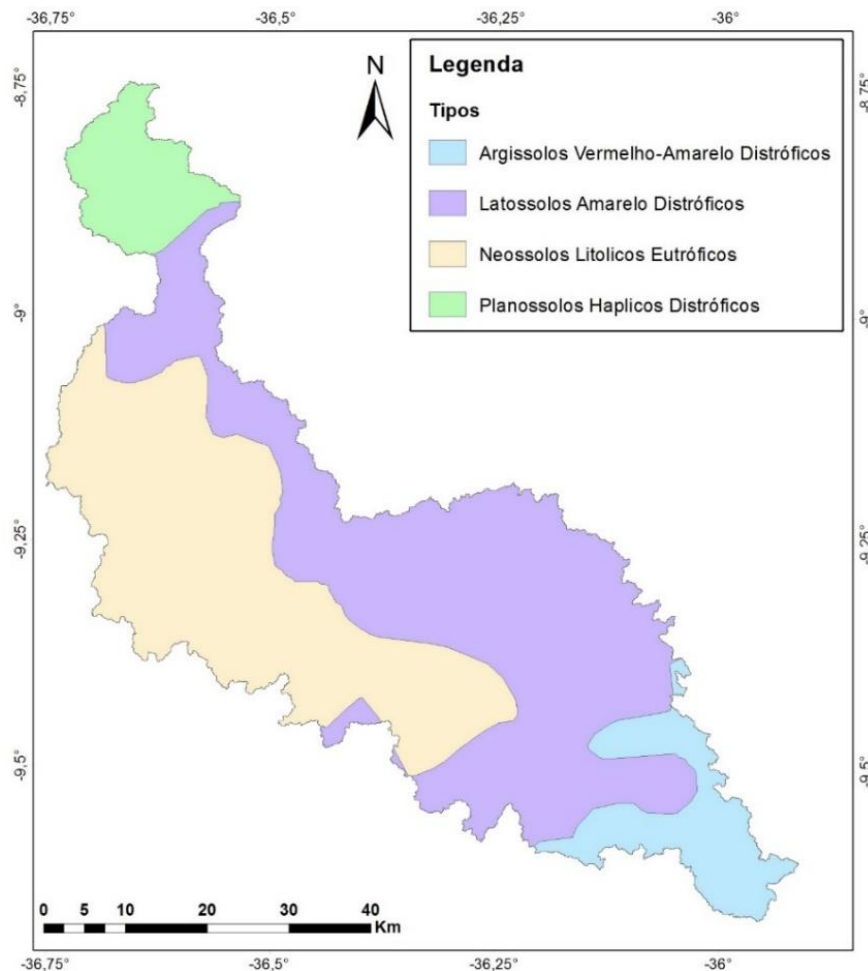


Fonte: Autor (2017).

Às margens do rio há registros de ocupação sem o devido planejamento de muitas famílias carentes e até mesmo de construções inadequadas, tornando essa uma área de risco principalmente pelo histórico de cheias já registrado nessa bacia (1969, 1988, 1989, 2000 e 2010).

Em sua extensão territorial há diferentes tipos de solo, como argilossolo vermelho-amarelo distrófico, latossolo amarelo, neossolo regolítico e planossolo háplico, que, juntamente com o tipo de uso e ocupação do solo, são responsáveis pelos processos de infiltração, armazenamento e escoamento superficial na bacia hidrográfica (Figura 5).

Figura 5 – Tipos de solo ao longo da bacia do rio Paraíba do Meio (AL/PE).



Fonte: IBGE (2001).

4.2 Eventos

O período escolhido para estudo hidrológico e hidráulico corresponde à cheia ocorrida em junho de 2010, que atingiu as bacias dos rios Mundaú e Paraíba do Meio. Neste trabalho, considerou-se apenas a influência da cheia na bacia do rio Paraíba do Meio devido à carência de estudos como este nessa bacia.

Outro evento, a cheia ocorrida entre julho e agosto de 2000 na mesma região, foi selecionado para calibração do modelo hidrológico, devido à disponibilidade de dados pluviométricos e fluviométricos desse evento.

Ainda dentro do evento ocorrido em 2010, objeto de estudo deste trabalho, o município de Atalaia foi escolhido para análise dos efeitos dessa cheia por ser um município com um grau de ocupação ribeirinha elevado e por sua proximidade com o exutório da bacia (Figura 4).

4.3 Levantamento de dados

O levantamento de informações foi baseado na pesquisa por postos que apresentassem informações acerca dos eventos ocorridos em 2000 (calibração) e 2010 (simulação).

As informações de evapotranspiração da bacia foram desconsideradas em consequência do efeito desprezível que esta variável tem em um período de simulação pequeno, em razão da velocidade do evento e das magnitudes da precipitação e evapotranspiração em uma cheia (TUCCI, 2005).

4.3.1 Dados Pluviométricos

4.3.1.1 Postos Pluviométricos

Embora a região apresente registros de vários postos pluviométricos, não há informações dos eventos mais recentes registrados na bacia por alguns desses não estarem mais em operação. A Tabela 1 apresenta a descrição das informações dos postos pluviométricos utilizados nesse estudo.

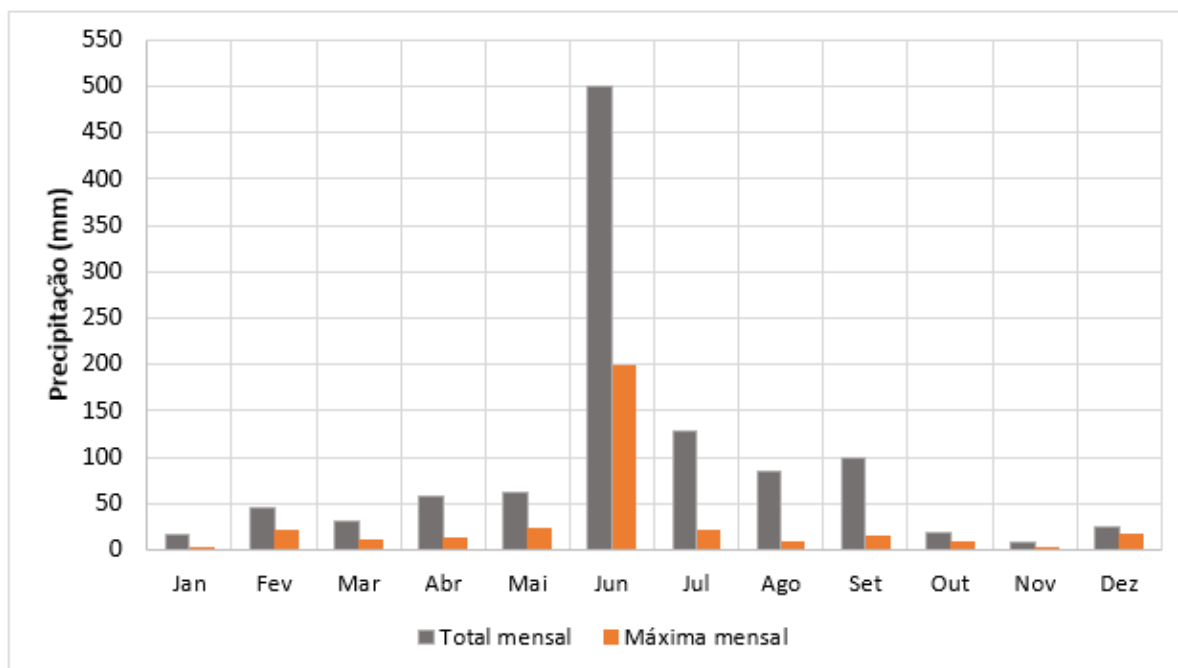
Tabela 1 - Informações dos postos pluviométricos.

Código	Posto	Latitude (°)	Longitude (°)	Estado	Operador	Dados em 2000	Dados em 2010
10000005	Caetés	-8.77	-36.62	Pernambuco	ITEP	--	Ok
10000016	Garanhuns	-8.88	-36.49	Pernambuco	ITEP	Ok	Ok
10000003	Brejão	-9.02	-36.54	Pernambuco	ITEP	--	Ok
----	Bom Conselho	-9.17	-36.69	Pernambuco	APAC-PE	--	Ok
00936115	Quebrangulo	-9.32	-36.47	Alagoas	ANA	Ok	Ok
00936111	Viçosa	-9.38	-36.25	Alagoas	ANA	Ok	Ok
00936110	Atalaia	-9.51	-36.02	Alagoas	ANA	Ok	Ok

Fonte: Autor (2017).

O regime pluviométrico da região da bacia hidrográfica do rio Paraíba do Meio tem como período mais chuvoso, geralmente, os meses de maio, junho e julho – MJJ – período conhecido como o trimestre mais chuvoso da região. O hietograma com representação das precipitações totais e máximas mensais de 2010 referente ao posto Atalaia (00936110) pode ser observado na Figura 6, onde é possível confirmar que o período de maiores índices pluviométricos está, realmente, concentrado no período chuvoso característico dessa região.

Figura 6 – Hietograma dos totais e das máximas mensais do posto Atalaia (00936110) em 2010.



Fonte: Autor (2017).

Ainda na Figura 6, observa-se que o mês que apresentou a chuva de maior índice pluviométrico foi o mês de junho, período esse cuja bacia do rio Paraíba do Meio testemunhou uma das maiores enchentes já registradas na região, sendo o município de Atalaia um dos mais atingidos (SANTOS, 2016; OLIVEIRA et al., 2014; GAMA, 2011; FRAGOSO JR et al., 2010).

4.3.1.2 Dados do Satélite TRMM

A rotina desenvolvida por Collischonn (2006) para descompactação e leitura dos dados em massa do produto 3B42 do satélite TRMM (formato .hdf), foi adaptada e utilizada neste trabalho para auxiliar no processo de descompactação e manipulação dessas informações

Para análise dessas informações, foram criados dois grupos de dados provenientes desse satélite, referidos neste trabalho como “TRMM” e “TRMM+Postos”. O primeiro deles é composto pela soma (a cada 3 horas) das informações referentes a um dia (24h) para cada um dos *pixels* que compõem a região, resultando em um conjunto de dados diário. O segundo grupo também representa um conjunto de dados diário dos *pixels*, sendo que as informações dos pluviômetros existentes na região foram consideradas no processo de correção dos dados do satélite, uma vez que, os dados fornecidos por ele geralmente destoam dos obtidos em campo.

Desta forma, uma outra rotina desenvolvida e utilizada por pesquisadores do CEMADEN (Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais), foi utilizada para agilizar esse processo de correção dos dados. Nesse procedimento de correção,

inicialmente são calculadas as diferenças entre as estimativas do satélite e as medições em campo inseridas no mesmo *pixel* das informações do satélite; posteriormente, essas diferenças são interpoladas para os demais *pixels* que englobam a região da bacia pelo método do inverso da distância ao quadrado; o resultado dessa interpolação é subtraído de cada informação do satélite (cada *pixel* de informação), de modo que um novo conjunto de dados de precipitação é criado, para cada *pixel*, ao incorporar informações tanto do satélite quanto dos postos pluviométricos distribuídos pela região. Uma descrição mais detalhada dessa correção pode ser vista em Collischonn (2006).

A intenção de criar esses dois grupos de dados foi analisar a diferença entre as séries com dado bruto e dado corrigido do satélite para, posteriormente, verificar suas possíveis influências na modelagem hidrológica, a fim de identificar qual série é capaz de melhor representar o comportamento pluviométrico da bacia.

Portanto, a série de dados “TRMM” criada neste estudo, refere-se à chuva registrada durante todo o mês de junho de 2010 e, visando simplificar as operações, a série “TRMM+Postos”, criada após correção dos dados do satélite, refere-se apenas ao período do evento.

4.3.2 Dados Fluviométricos

Em relação aos dados fluviométricos, a bacia apresenta uma deficiência por só ter 3 (três) estações fluviométricas em operação (Tabela 2). Além disso, as mesmas estão concentradas na porção média e baixa da bacia, onde o município de Atalaia está localizado, de modo que não há registros de vazão na parte alta da bacia (Figura 7).

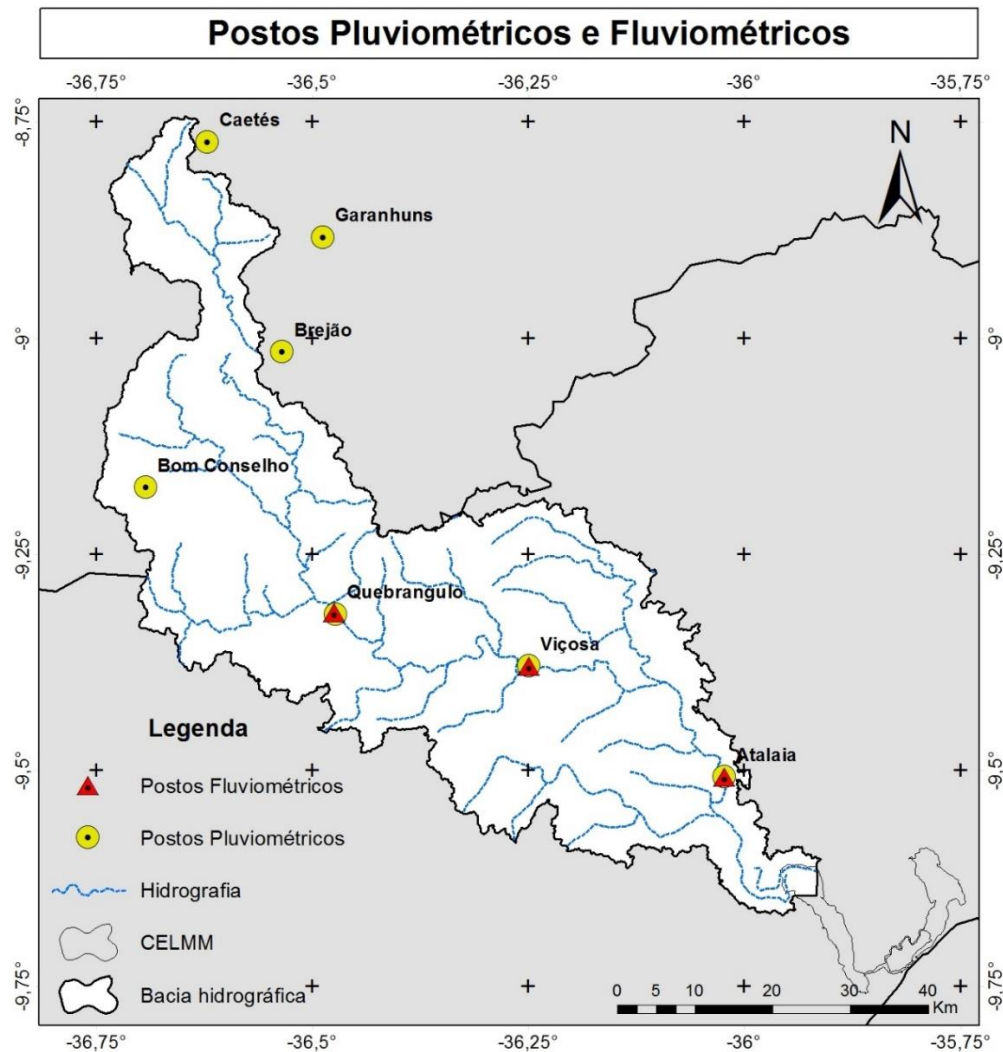
Tabela 2 - Informações dos postos fluviométricos.

Código	Posto	Latitude (°)	Longitude (°)	Altitude (m)	Área de Drenagem (km²)	Rio	Estado	Responsável	Operador
39850000	Quebrangulo	-9.32	-36.47	--	1340	Paraíba	Alagoas	ANA	ANA
39860000	Viçosa	-9.38	-36.25	212	1970	Paraíba	Alagoas	ANA	CPRM
39870000	Atalaia	-9.51	-36.02	54.14	2600	Paraíba	Alagoas	ANA	CPRM

Fonte: Autor (2017).

A Figura 7 mostra a distribuição dos pontos de grade do TRMM com resolução de 0,25° x 0,25° sobre a bacia do rio Paraíba do Meio, bem como a localização dos postos pluviométricos e fluviométricos existentes.

Figura 7 - Distribuição dos postos pluviométricos e fluviométricos na bacia e representação dos pontos de grade com resolução do satélite TRMM ($0,25^\circ \times 0,25^\circ$).



4.3.3 Representação do terreno

Para representação do terreno e extração das informações físicas necessárias da área foram utilizados um MDE da região de acesso livre e um levantamento feito em campo do relevo às margens do rio Paraíba do Meio.

O MDE escolhido para ser utilizado neste trabalho foi o do SRTM, que vem sendo um dos mais utilizados e, em 2008, passou por algumas correções pelo INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais) para melhoria da acurácia da sua estrutura de valores, com a interpolação das informações para pixels de $30\text{m} \times 30\text{m}$, ao invés de $90\text{m} \times 90\text{m}$, constituindo assim o banco de dados do TOPODATA de acesso livre.

A representação do relevo utilizada a partir de curvas de nível com resolução de 5 metros levantadas às margens dos rios Paraíba do Meio e Mundaú, é proveniente de um estudo

realizado em 2013 pela ENGEMAP às expensas da SEMARH – AL (Secretaria de Estado do Meio Ambiente e Recursos Hídricos do Estado de Alagoas), estudo esse realizado em ambas as bacias atingidas pela enchente registrada em 2010.

Neste trabalho, utilizou-se apenas o trecho correspondente às áreas ribeirinhas do município de Atalaia na bacia do rio Paraíba do Meio.

4.4 Modelagem

Os modelos HEC-HMS versão 3.4 e HEC-RAS versão 4.0 foram adotados para simulação, respectivamente, da vazão e dos níveis do canal, a partir de um acoplamento unidirecional (*off-line*) entre os modelos, na expectativa de realizar o mapeamento das áreas inundáveis do município de Atalaia inserido na bacia hidrográfica do rio Paraíba do Meio (AL/PE).

4.4.1 Modelagem Hidrológica

4.4.1.1 Pré-Processamento

A etapa inicial da modelagem hidrológica, o pré-processamento, teve como princípio o uso de um MDE com resolução espacial de 30 metros proveniente do processamento digital do MDE SRTM feito pelo INPE, através do Projeto TOPODATA. A partir desse MDE foi possível delimitar a bacia hidrográfica do rio Paraíba do Meio, bem como extrair suas informações fisiográficas.

O pré-processamento foi realizado no HEC-GeoHMS versão 5.0, extensão do HEC-HMS integrada ao ArcMap, que visa facilitar a etapa de aquisição das informações fisiográficas da bacia. Essa extensão foi desenvolvida pelos mesmos criadores do HEC-HMS pensando, principalmente, nos usuários com pouca experiência em softwares de geoprocessamento frequentemente utilizado como ferramenta em estudos hidrológicos (KAATZ, 2014; BIGNOTTO, 2013; MULUNGO et al., 2012; BAUMANN & HALASEH, 2011).

Além do MDE, o mapa de tipos de solo do Brasil levantado pelo IBGE (2001) e imagens do satélite Landsat 5 foram utilizados como referências na etapa de quantificação do parâmetro CN, parâmetro esse utilizado no método SCS, que identifica a capacidade de a chuva ser transformada em escoamento.

A definição dos valores CN foi feita com base nos tipos de solo existentes na bacia, bem como no seu uso e ocupação e, estando localizada em uma região rural pouco urbanizada,

optou-se por utilizar o NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) como identificador dos tipos de vegetação existentes para caracterização do uso e ocupação da região.

A faixa do NDVI varia de -1 a +1, sendo que quanto mais próximo de -1 menor será o índice de vegetação e alvos não abióticos estarão sendo detectados, enquanto que quanto mais próximo de +1 maior será o índice de vegetação e, conseqüentemente, maiores densidades de vegetação estarão sendo detectadas.

Ainda dentro do pré-processamento, os modelos utilizados no HEC-HMS precisaram ser selecionados (*Loss Method* - SCS-CN, *Transform Method* - SCS-HU e *Route Method* - Lag) e a bacia foi dividida em 41 sub-bacias, de modo que a partir do HEC-GeoHMS foi possível quantificar todas as informações (Apêndice A) necessárias para cada uma delas (área, perímetro, T_{lag} , T_c e CN), tornando o processamento ainda mais detalhado.

Finalizada essa etapa inicial, um projeto foi criado no próprio HEC-GeoHMS para exportação de todas as informações das sub-bacias e de seus respectivos trechos de rio para o modelo hidrológico HEC-HMS. Ao abrir esse projeto no HEC-HMS todos os dados fisiográficos são automaticamente atribuídos a cada sub-bacia.

4.4.1.2 Calibração

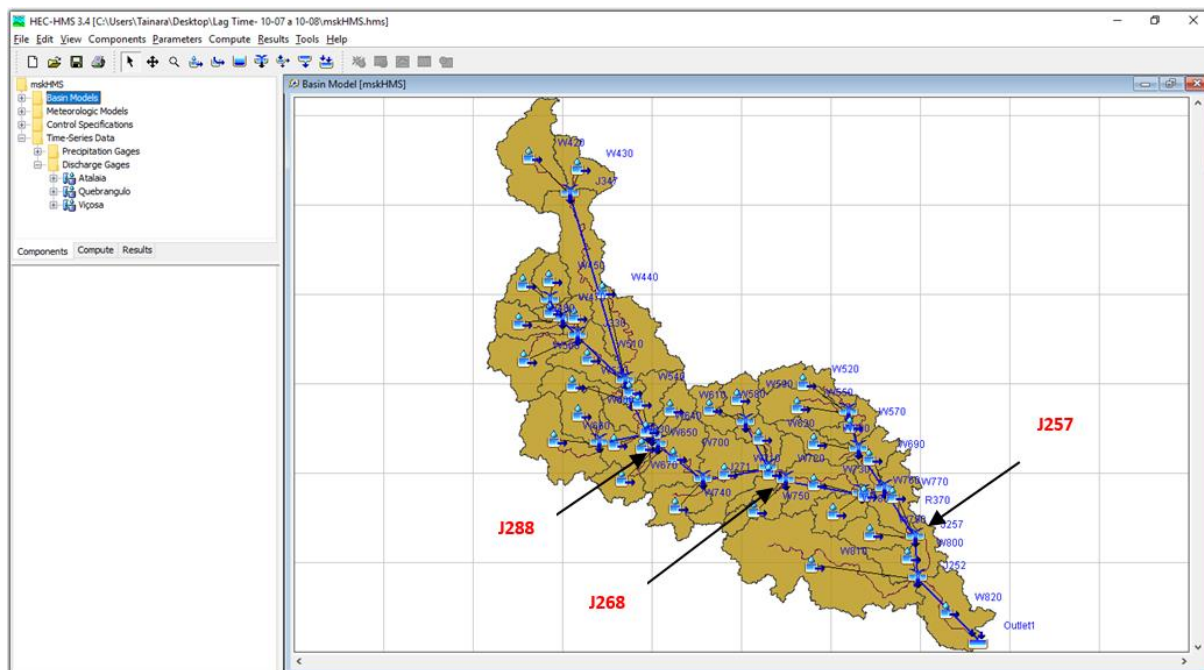
A etapa seguinte à importação dos dados no modelo hidrológico corresponde à calibração dos seus parâmetros, calibração essa baseada nas características fisiográficas e de algum evento conhecido ocorrido na mesma bacia. O evento escolhido para esse processo foi a cheia ocorrida em 2000 e, para isso, seus dados de chuva e vazão precisaram ser inseridos no modelo.

Para inserção dos dados de chuva, foi necessário interpolar as informações dos postos pluviométricos localizados na (Figura 7) para espacialização dessas informações e extração de valores médios para cada sub-bacia, visto que, o modelo necessita de uma informação de chuva para cada sub-bacia (ver exemplo na Figura 15). Esse procedimento foi realizado para todos os dias correspondentes ao evento ocorrido em 2000 (28 de julho a 05 de agosto de 2000), onde as informações do hietograma foram inseridas no modelo de forma manual por meio da opção *Specified Hyetograph*.

No que diz respeito às informações dos postos fluviométricos, as mesmas foram adicionadas ao modelo e relacionadas às junções mais próximas às suas localizações (Figura 8). Essas junções foram criadas pelo próprio processamento da bacia com base no relevo e curso

d'água, de modo a permitir a comparação das contribuições recebidas a montante pelas junções com os dados observados e, assim, auxiliar a calibração do modelo a partir de dados observados.

Figura 8 – Layout do modelo hidrológico (HEC-HMS) com representação de algumas junções*.



Fonte: Autor (2017).

*J288, J268 e J257 representam, respectivamente, as junções mais próximas aos postos fluviométricos Quebrangulo (39850000), Viçosa (39860000) e Atalaia (39870000).

Para condução do processo de calibração automática, mais rápida e eficaz do que a calibração manual na otimização dos parâmetros, optou-se por realizá-la pelo método do Gradiente Univariado e pela função-objetivo Erro Percentual nos Picos por apresentar melhores resultados na representação de vazões máximas (SIFONTES & MOYA, 2012; KATHOL et al., 2003).

Os parâmetros testados no processo de calibração do modelo hidrológico foram o CN de cada sub-bacia e o Lag Time de cada trecho de rio. Os valores iniciais e otimizados desses parâmetros podem ser vistos nos Apêndices A e B.

No ajuste do parâmetro CN, foi testado a qualidade dos resultados ao calibrar o parâmetro de cada sub-bacia ou, simplesmente, buscou-se otimizar um valor, o fator de escala do CN, a ser multiplicado pelo valor inicial de cada CN das sub-bacias. Já em relação ao Lag Time dos rios, foi testado a calibração selecionando todos os trechos de rio da bacia ou, apenas, os trechos correspondentes às localizações das estações fluviométricas utilizadas no processo de calibração do modelo (Quebrangulo, Viçosa e Atalaia).

4.4.1.3 Validação

Após calibração do modelo, a qualidade dos parâmetros obtidos foi avaliada a partir da simulação hidrológica ao utilizar as informações do evento ocorrido em 2010, onde além das informações fisiográficas da bacia apenas os dados de chuva disponíveis (“Postos”, “TRMM” e “TRMM+Postos”) foram inseridos no modelo. Essa simulação foi feita buscando analisar a representatividade dos parâmetros calibrados na geração dos hidrogramas a partir das diferentes séries de dados disponíveis.

O mesmo procedimento feito na etapa anterior para inserção dos dados pluviométricos no modelo (item 4.4.1.1) foi realizado nesta etapa considerando agora as informações do evento de 2010.

Já em relação às séries de dados “TRMM” e “TRMM+Postos”, como as mesmas possuem resolução de 0,25° x 0,25° e apresentam uma melhor distribuição espacial, uma média dessas informações foi calculada para cada sub-bacia levando em consideração as informações de chuva de cada pixel (ver exemplo na Figura 16).

4.4.1.4 Análises estatísticas

A qualidade da simulação do evento ocorrido em 2010 pelo modelo hidrológico calibrado, foi fundamentada em análises estatísticas segundo: cálculo do coeficiente de eficiência de Nash Sutcliffe – COE – e cálculo do desvio padrão – DP, juntamente com os métodos gráficos e de dispersão para análise do desempenho do modelo.

O coeficiente COE (Equação (5)) foi utilizado na avaliação do ajuste do modelo aos parâmetros calibrados, por ser frequentemente utilizado no ajuste de modelos hidrológicos e por representar uma modificação padronizada do R² (BOLTOKOSKI et al., 2010; COLLISCHONN & TUCCI, 2003; KRYSANOVA et al., 1998). Seu valor pode variar de negativo infinito a +1, sendo o valor +1 indicativo de um ajuste perfeito, podendo ser considerado como um ajuste muito bom já entre 0,7-0,8 (KRYSANOVA et al., 1998).

$$COE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs} - Q_{sim})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs} - \overline{Q_{sim}})^2} \quad (5)$$

Onde: Q_{obs} é a vazão observada; Q_{sim} é a vazão simulada pelo modelo; $\overline{Q_{sim}}$ é a média da vazão simulada no período de simulação; e n o número de eventos.

O DP (Equação (6)) representa a variação de valores em torno de sua média (NAGHETTINI & PINTO, 2007) e foi calculado para os valores observados e simulados, onde valores similares de DP indicam uma similaridade entre as séries.

$$DP = \sqrt{\frac{(x-\bar{x})^2}{n-1}} \quad (6)$$

Onde: x representa os dados; $\bar{x}$ representa a média do conjunto de dados; e n o número total de dados do conjunto.

4.4.2 Modelagem Hidráulica

Nesta etapa do trabalho, apenas o trecho correspondente ao município de Atalaia às margens do rio foi considerado, devido ao principal objetivo do estudo em mapear as áreas inundáveis dessa região.

4.4.2.1 Pré-Processamento

A etapa inicial da modelagem hidráulica, o pré-processamento, teve como principais dados de entrada a representação do relevo às margens do rio Paraíba do Meio, com resolução de 5 metros, e as seções transversais levantadas, ambos, pela ENGEMAP. As seções transversais foram estendidas para além das margens do rio com base na representação do relevo utilizada

O pré-processamento foi realizado no HEC-GeoRAS versão 4.3, extensão do HEC-RAS integrada ao ArcMap, que visa facilitar as etapas de delimitação do canal principal e suas margens, da planície inundável e das seções transversais, bem como a aquisição de informações necessárias para a modelagem hidráulica.

Nesta etapa, foram utilizadas algumas ferramentas de geoprocessamento disponíveis no HEC-GeoRAS essenciais na identificação das características do canal. As funções utilizadas estão inseridas no módulo *RAS Geometry* e foram aplicadas na delimitação do canal principal (*River*), das margens do canal (*Banks*), da planície de inundação (*Floodpath*) e das seções transversais (*XC Cut Lines*).

Finalizada essa etapa inicial, um projeto foi criado no próprio HEC-GeoRAS para exportação de todas as informações necessárias para simulação no modelo hidráulico (HEC-RAS). Ao importar esse projeto no HEC-RAS, todos os dados do canal e das seções transversais foram importados de forma automática.

4.4.2.2 Calibração

A etapa seguinte à importação dos dados no modelo hidráulico foi a calibração dos parâmetros a partir das informações de algum evento que, no caso deste trabalho, baseou-se na cheia de 2010.

O processo de calibração foi feito de forma manual a partir da técnica de ajuste “Tentativa e Erro” ao ajustar os valores do coeficiente de Manning (n), único parâmetro calibrado, do fundo e das margens (direita e esquerda) do canal até que a mancha de inundação gerada se aproximasse ao máximo das cotas e marcas de cheia levantadas em campo. As marcas de cheia utilizadas também foram levantadas em campo pela ENGEMAP (5 marcas de cheia levantadas com o uso de um GPS).

Os valores apresentados por Chow (1959) em relação ao coeficiente de Manning (n), foram utilizados como referência no processo de ajuste manual do parâmetro fundamentado nas características do canal e das marcas de cheia disponíveis para o evento analisado. Possíveis variações das condições hidráulicas do canal também foram levadas em consideração durante a calibração do coeficiente de Manning (n), uma vez que, alterações na declividade do fundo do canal, presença de pontes, ilhas e obstruções, por exemplo, podem provocar variações.

Uma configuração simplificada do modelo foi utilizada ao considerar o escoamento em regime permanente, uma vez que os dados de entrada representam a vazão média diária. A condição de contorno utilizada na calibração foi o hidrograma a montante da área analisada com vazão média de 948,01 m³/s relacionada ao dia de pico da cheia de 2010.

Esse processo de calibração se deu até que um valor coerente fosse encontrado para o coeficiente de Manning (n) fundamentado nas condições do canal, bem como na aproximação da mancha de inundação gerada pelo modelo em relação às marcas de cheia disponíveis.

4.4.2.3 Validação e Mapeamento das áreas inundadas

Nesta etapa, todas as informações geométricas e hidráulicas utilizadas na calibração foram mantidas como a delimitação do canal principal, das seções transversais e das planícies inundáveis, além do coeficiente de Manning (n) calibrado para o fundo e margens do canal.

Após calibração do modelo, a qualidade do parâmetro calibrado foi validada ao processar uma nova mancha de inundação considerando agora como condição de contorno o hidrograma gerado pelo modelo hidrológico a partir dos dados do satélite TRMM (série corrigida “TRMM+Postos”), com uma vazão de pico de 888,02 m³/s. Optou-se por utilizar

apenas a série corrigida do satélite (“TRMM+Postos”) pela boa correlação apresentada em relação à série de dados observados.

Ainda assim, o hidrograma oriundo da simulação com a série “TRMM” também foi utilizada nesta etapa da modelagem hidráulica com o intuito de mostrar a representatividade do satélite em regiões sem nenhuma informação pluviométrica disponível em campo.

As manchas geradas na validação foram comparadas à mancha da calibração, visando avaliar a representatividade dos dados do satélite na modelagem hidráulica, bem como a calibração do modelo hidráulico.

O mapeamento das áreas inundáveis do município de Atalaia foi feito durante a calibração e validação do modelo hidráulico, a partir das marcas de cheia do evento de 2010 levantadas pela ENGEMAP e das manchas de inundação provenientes da simulação hidráulica.

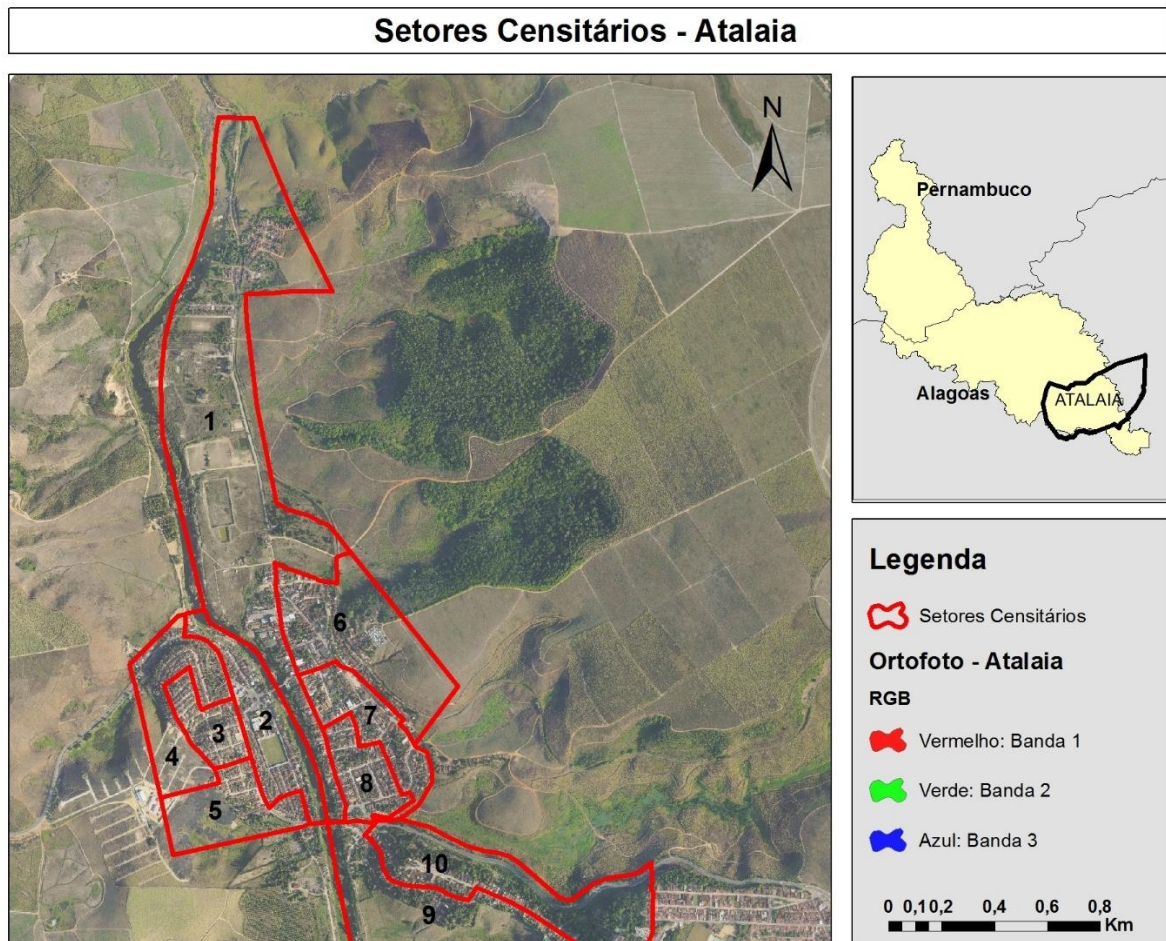
As manchas de inundação foram geradas a partir dos dados do posto fluviométrico de Atalaia ($Q_{ATALAIA}$) e dos hidrogramas provenientes da modelagem hidrológica com os dados do satélite TRMM (Q_{TRMM} e $Q_{TRMM+Postos}$) e, também, das curvas de nível da região com resolução de 5 metros. Ortofotos da região com resolução de 1,0 metro também levantadas pela ENGEMAP, foram utilizadas para uma melhor representação das áreas afetadas no município.

4.5 Análise de Risco

A última etapa do trabalho, após o mapeamento das áreas inundáveis, consistiu em fazer uma análise de risco do município de Atalaia em relação às áreas sujeitas à ocorrência de inundações, onde aspectos como população, educação, renda, infraestrutura e localização de residências ou empreendimentos próximos ao rio Paraíba do Meio foram considerados.

O mapeamento da análise de risco foi feito fundamentado nos setores censitários urbanos definidos e utilizados pelo IBGE (2010) no levantamento de dados do censo demográfico (Figura 9), já que estas são as menores unidades territoriais com limites físicos identificáveis em campo. A partir desses setores, foi possível verificar o grau de risco de cada um quanto à ocorrência de inundações baseado em um evento de cheia com a magnitude do evento registrado em 2010 no município de Atalaia.

Figura 9 – Representação dos setores censitários urbanos às margens do rio Paraíba do Meio no município de Atalaia-AL.



Fonte: Autor (2017).

Uma das metodologias proposta por Rebelo (2003) foi escolhida para este estudo, onde a estimativa do risco é feita a partir da multiplicação entre a análise da ameaça à inundação e a análise da vulnerabilidade social em uma determinada área (Equação (7)).

$$R = A * V \quad (7)$$

Onde: R representa o risco; A representa a ameaça e; V representa a vulnerabilidade social.

A partir da Equação (7) Rebelo (2003) propôs que se um dos elementos for igual a zero, por exemplo, quando há ameaça de ocorrência de uma enchente ($A=1$) mas não há uma pessoa vulnerável na região ($V=0$), então não haverá risco na região analisada ($R=1*0=0$).

Desta forma, a identificação das áreas *ameaçadas* à ocorrência de inundações, baseou-se na análise do histórico de cheias na região, onde as maiores cotas do leito do rio foram levantadas a partir dos dados disponíveis no posto fluviométrico localizado em Atalaia (39870000). Dentre os eventos de cheia registrados no período de 1988 a 2010 (1988, 1989, 2000 e 2010) as cotas atingidas pelo rio foram sempre superiores a 4,90 metros (Figura 13), onde a menor e maior vazão registrada foram, respectivamente, 424 m³/s em 2000 e 948,01

m³/s em 2010. Desta forma, a menor e a maior vazão registrada nesse período foram utilizadas como referências na análise de ameaça a partir da criação de zonas de ameaça.

As zonas de ameaça foram definidas como áreas de alta, moderada e baixa ameaça à ocorrência de inundações: (1) zona de alta ameaça: áreas frequentemente inundadas – Q = 424 m³/s; (2) zona de moderada ameaça: áreas inundadas nas maiores enchentes – Q = 948,01 m³/s e; (3) zona de baixa ameaça: áreas mais elevadas que não foram atingidas nem nas maiores enchentes – Q > 948,01 m³/s.

Já a análise da *vulnerabilidade social* foi possível por meio de fórmulas e índices que relacionam diferentes variáveis essenciais nessa análise. O índice utilizado por Silva Jr. (2010) – Equação (8) – foi adaptado aos dados disponíveis para o município de Atalaia e adotado neste estudo para verificação da vulnerabilidade social da região, cujas variáveis foram baseadas no levantamento do censo demográfico realizado em 2010 pelo IBGE (Tabela 3).

$$V = \frac{(P_{total} + P_{analf} + P_{renda} + P_{>60\text{ anos}} + P_{0-4\text{ anos}} + ES) - UR}{7} \quad (8)$$

Onde V representa a vulnerabilidade social do setor e a descrição das outras variáveis é apresentada na Tabela 3.

Tabela 3 – Descrição das variáveis utilizadas na análise da vulnerabilidade social.

Variável	Sigla	Descrição
População total do setor	P _{total}	Quanto maior o número de pessoas por setor maior será a vulnerabilidade local.
População com idade entre 0-4 anos	P ₀₋₄	A população com faixa etária entre 0 e 4 anos é mais frágil a desastres, devido a dependência de seus familiares.
População com idade superior a 60 anos	P _{>60}	A população com faixa etária superior a 60 anos exposta a um desastre, apresenta maiores dificuldades em relação à locomoção e dependência de outras pessoas.
População analfabeta	P _{analf}	Pessoas analfabetas apresentam maiores dificuldades em conhecer e entender os riscos decorrentes de desastres, de modo que carecem de conscientização a respeito de situações emergenciais.
População em domicílio particular permanente com renda per capita de até 70 reais	P _{renda}	População em domicílios particulares permanentes que apresentam baixa renda per capita é mais vulnerável em relação a domicílios cuja renda é maior, uma vez que, o poder aquisitivo da população está diretamente ligado a seu poder de resiliência.
Elementos essenciais vulneráveis	ES	Alguns elementos de infraestrutura são considerados como essenciais para o desenvolvimento humano (escolas, hospitais, mercados, instituições públicas, bancos e outros). Quanto maior a concentração do ES por setor maior será a vulnerabilidade.
Unidades de resposta	UR	As unidades de resposta são importantes na redução da vulnerabilidade ao serem utilizadas como unidades de socorro às vítimas dos desastres, como: hospitais, escolas e igrejas.

Fonte: Adaptada de Silva Jr. (2010).

As informações das variáveis sociais foram agrupadas e classificadas em três grupos de vulnerabilidade (alta, moderada e baixa vulnerabilidade) segundo a sua porcentagem em relação ao total de cada variável baseada nos dez setores analisados (Tabela 4).

Tabela 4 – Classificação de vulnerabilidade segundo agrupamento das variáveis.

Vulnerabilidade	Classificação	População Total	População com idade entre 0-4 anos	População com idade superior a 60 anos	População analfabeta	População com renda per capita de até 70 reais
Baixa	1	< 10%	< 10%	< 10%	< 10%	< 10%
Moderada	2	10 a 20%	10 a 20%	10 a 20%	10 a 20%	10 a 20%
Alta	3	> 20%	> 20%	> 20%	> 20%	> 20%

Fonte: Adaptada de Silva Jr. (2010).

Os *elementos essenciais (ES)* considerados neste estudo como essenciais para o desenvolvimento humano foram os órgãos públicos (Câmara Municipal, Fórum, Prefeitura, Secretarias, etc.), centrais elétricas, instituições financeiras, hospitais, escolas, igrejas e postos de combustíveis. O levantamento desses elementos, por setor censitário, permitiu ainda sua classificação segundo os níveis de vulnerabilidade aos quais estão expostos (alta, moderada e baixa vulnerabilidade) (Tabela 5).

Tabela 5 – Classificação de vulnerabilidade segundo levantamento dos elementos essenciais.

Vulnerabilidade	Classificação	Elementos essenciais por setor censitário
Baixa	1	$ES < 2$
Moderada	2	$2 \leq ES \leq 5$
Alta	3	$ES > 5$

Fonte: Silva Jr. (2010).

São consideradas como *unidades de resposta (UR)* os hospitais, as escolas e as igrejas, diante da possibilidade de serem utilizadas como unidades de socorro na reestruturação das comunidades após as mesmas terem sido atingidas por algum desastre.

Na estimativa das URs, uma análise ponderada foi realizada com base na importância atribuída a cada uma das unidades na hipótese de ocorrência de algum desastre, onde os hospitais são considerados os mais importantes por sua contribuição no restabelecimento da saúde da população (peso 3), as escolas podem servir como abrigos para as pessoas desalojadas (peso 2) e as igrejas têm um papel importante no apoio social e psicológico para a população atingida (peso 1).

No caso da área ribeirinha de Atalaia, não há registros de hospitais de grande porte, apenas unidades de saúde familiar. Desta forma, uma adaptação na fórmula utilizada por Silva Jr. (2010) – Equação (9) – foi feita ao atribuir o peso 2,5 para as unidades de saúde (hospitais)

no processo de quantificação das URs, uma vez que, as unidades de saúde não apresentam o mesmo poder de recuperação e acomodação de um hospital.

$$UR = \frac{(\sum n^{\circ} \text{ de hospitais} * 2,5) + (\sum n^{\circ} \text{ de escolas} * 2) + (\sum n^{\circ} \text{ de igrejas} * 1)}{5,5} \quad (9)$$

A estimativa das URs para cada setor censitário, possibilitou ainda a classificação das mesmas segundo os níveis de vulnerabilidade aos quais estão expostas (alta, moderada e baixa vulnerabilidade) (Tabela 6).

Tabela 6 – Classificação de vulnerabilidade segundo levantamento e estimativa das unidades de resposta – Equação (9).

Vulnerabilidade	Unidades de Resposta por setor censitário
Alta	$UR < 1$
Moderada	$1 \leq UR \leq 2$
Baixa	$UR > 2$

Fonte: Silva Jr. (2010).

Após levantamento dos elementos essenciais e das unidades de resposta, a estimativa da vulnerabilidade social (Equação (8)) de cada setor censitário foi concretizada, de modo a classificá-la em 3 grupos distintos (alta, moderada e baixa vulnerabilidade) (Tabela 7). A espacialização da vulnerabilidade social foi feita, por setor censitário, a partir da classificação proposta ao longo das áreas mais vulneráveis às margens do rio.

Tabela 7 – Classificação segundo cálculo da vulnerabilidade social dos setores censitários.

Vulnerabilidade	Classificação	Vulnerabilidade do setor censitário
Baixa	1	$0,7 \leq V < 0,9$
Moderada	2	$0,9 \leq V < 1,2$
Alta	3	$V \geq 1,2$

Fonte: Adaptada de Silva Jr. (2010).

A última etapa da análise de risco, consistiu na aplicação da Equação (7) ao considerar a ameaça e a vulnerabilidade social de cada setor. Assim, os riscos também foram estimados e classificados em três grupos distintos (alto, moderado e baixo risco) segundo as áreas ameaçadas à ocorrência de inundações.

A classificação dos riscos no município de Atalaia considerou os critérios mostrados na Tabela 8, ao relacionar o grau de ameaça e o grau de vulnerabilidade social na identificação do risco.

Tabela 8 – Critérios utilizados na classificação do risco durante a Análise de Risco no município de Atalaia-AL.

AMEAÇA	VULNERABILIDADE SOCIAL		
	Alta	Moderada	Baixa
Alta	alto	alto	moderado
Moderada	alto	moderado	baixo
Baixa	moderado	baixo	baixo

Fonte: Autor (2017).

Por fim, um mapeamento das áreas de risco foi feito ao considerar os setores censitários urbanos como unidade territorial de análise, tendo como base a classificação dos riscos segundo as áreas ameaçadas e a vulnerabilidade social da região.

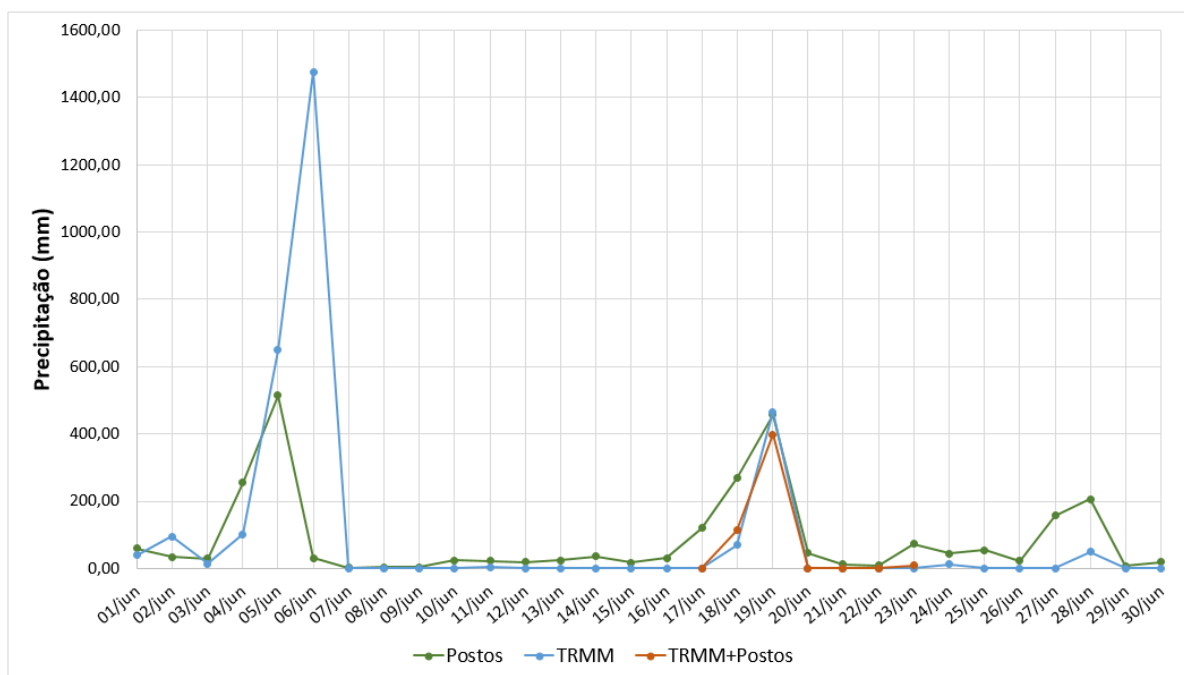
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Levantamento de dados

5.1.1 Dados Pluviométricos

Uma comparação entre as séries disponíveis e utilizadas neste estudo pode ser observada na Figura 10 (“Postos”; “TRMM”; e “TRMM+Postos”).

Figura 10 – Comparação entres os dados pluviométricos disponíveis para a região da bacia hidrográfica do rio Paraíba do Meio em junho de 2010.



Fonte: Autor (2017).

*A série “TRMM+Postos” na Figura 10 corresponde apenas ao período do evento.

A partir da Figura 10 é possível observar a tendência dos dados TRMM em superestimar as precipitações máximas e subestimar as precipitações mínimas, corroborando com os resultados obtidos em outros estudos (PEREIRA et al., 2013; NÓBREGA et al., 2008; COLLISCHONN, 2006).

Após levantamento de todos os dados pluviométricos, fez-se uma análise da representatividade das informações disponibilizadas pelo satélite em relação aos dados obtidos em campo ao calcular a correlação existente entre essas séries em relação ao evento de 2010.

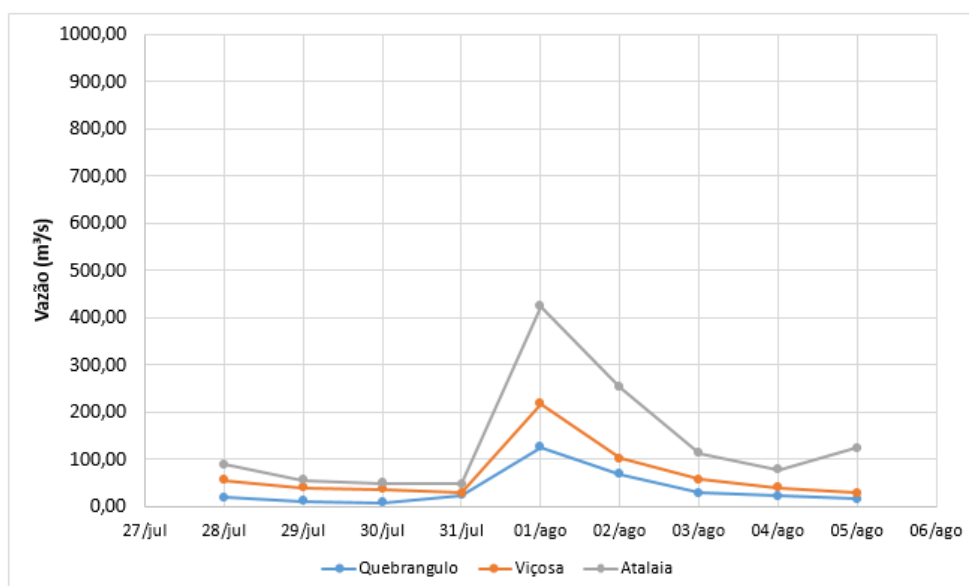
A correlação existente entre os dados do satélite e dos pluviômetros foi comprovada por meio do cálculo da correlação entre essas séries durante o período de ocorrência do evento. A correlação entre a série de dados “Postos” e a série “TRMM” foi de 0,90, enquanto que a correlação entre a série de dados “Postos” e a série “TRMM+Postos” foi de 0,94. Esses

resultados confirmam a boa representatividade existente entre os dados dos pluviômetros e os dados do satélite, havendo uma maior correlação com a série corrigida – “TRMM+Postos”.

5.1.2 Dados Fluviométricos

O hidrograma de cheia do evento ocorrido em 2000, entre os dias 28 julho e 5 de agosto, com pico no dia 1 de agosto, pode ser observado na Figura 11. Esse evento foi utilizado na calibração do modelo hidrológico por representar um dos eventos que causaram maiores estragos na região (SANTOS, 2016; OLIVEIRA et al., 2014; FRAGOSO JR et al., 2010) e, ainda, por apresentar uma série sem falhas, otimizando assim o processo de calibração.

Figura 11 – Hidrograma da cheia de 2000.

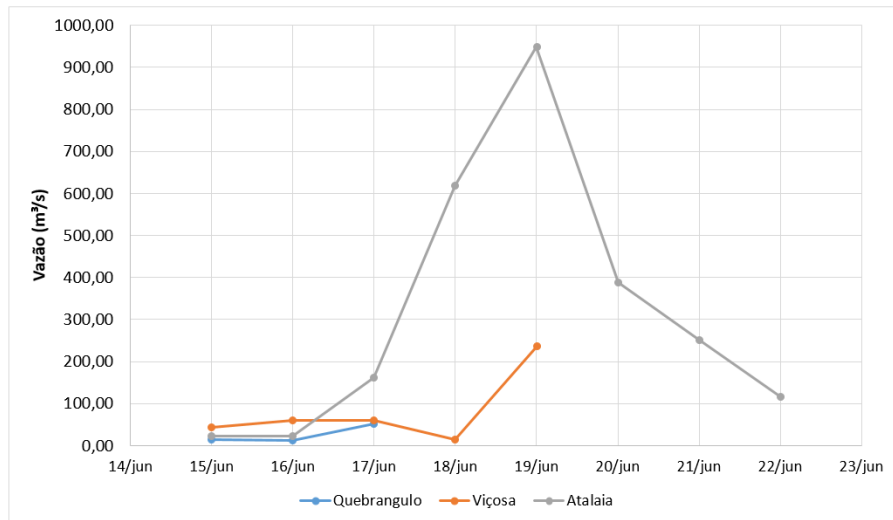


Fonte: Autor (2017).

Já o evento ocorrido em 2010, entre os dias 15 e 22 de junho e com pico no dia 19, representa o período escolhido para estudo hidrológico/hidráulico deste trabalho, cujo hidrograma de cheia pode ser observado na Figura 12. Esse evento corresponde a uma das cheias de maiores proporções já registradas nessa região hidrográfica, ocasionando prejuízos em várias cidades ribeirinhas além de registros de óbitos por afogamento (SANTOS, 2016; OLIVEIRA et al., 2014; FRAGOSO JR et al., 2010). Além disso, alguns postos fluviométricos como Quebrangulo (39850000) e Atalaia (39870000), sofreram com as altas vazões registradas na região, sendo danificadas ou arrastadas pela força da água.

Observa-se que além de existir muitas falhas nos dados fluviométricos do evento ocorrido em 2010 (Figura 12), suas magnitudes foram bem superiores às da cheia ocorrida em 2000 (Figura 11).

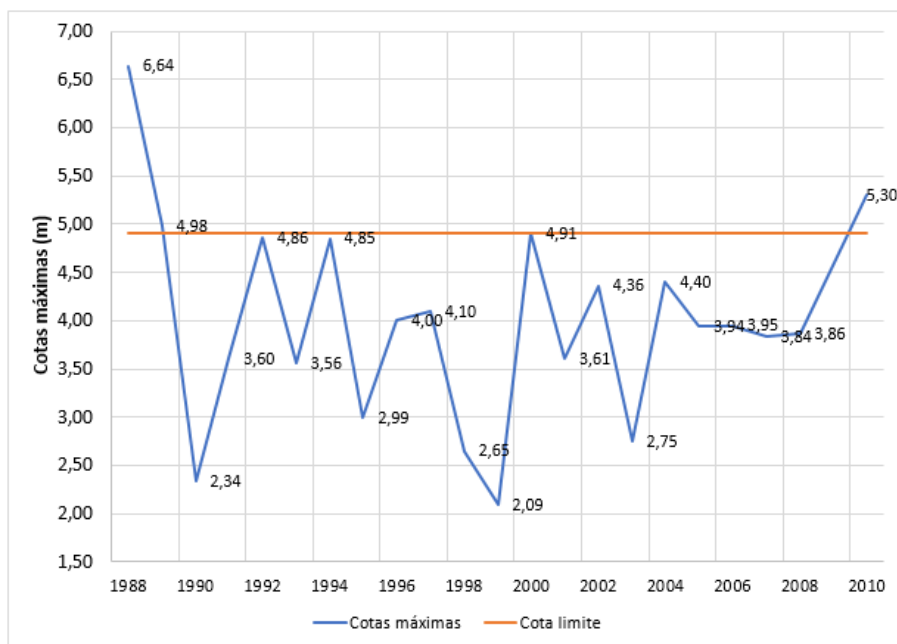
Figura 12 – Hidrograma da cheia de 2010.



Fonte: Autor (2017).

Ao analisar o posto fluviométrico de Atalaia (39870000), um dos eventos de cheia registrado nessa região que mais se aproximou da magnitude da cheia de 2010 foi o ocorrido em 1988, com uma cota do rio de 6,64 metros enquanto que o evento de 2010 registrou uma cota de 5,30 metros. A cheia de 2000 registrou uma cota de 4,91 metros, inferior à cota de 2010, mas a ausência de dados suficientes do evento ocorrido em 1988 impediu que o mesmo pudesse ser utilizado como referência no processo de calibração do modelo hidrológico (Figura 13).

Figura 13 – Representação das cotas máximas do posto Atalaia (39870000) entre 1988 e 2010.



Fonte: Autor (2017).

*A linha laranja representa a cota correspondente ao limite entre o registro ou não de eventos de inundação – Posto Atalaia (39870000). Para os eventos de cheia registrados nesse período (1988, 1989, 2000 e 2010) as cotas atingidas pelo rio foram sempre superiores a 4,90 metros.

Além da falta de informações do evento ocorrido em 1988, as mudanças ocorridas na bacia nesse período (1988 a 2010), como o processo de urbanização e ocupação, iriam interferir mais na calibração do modelo, uma vez que, em 22 anos é provável que a bacia tenha sofrido grandes mudanças no seu uso e ocupação do solo.

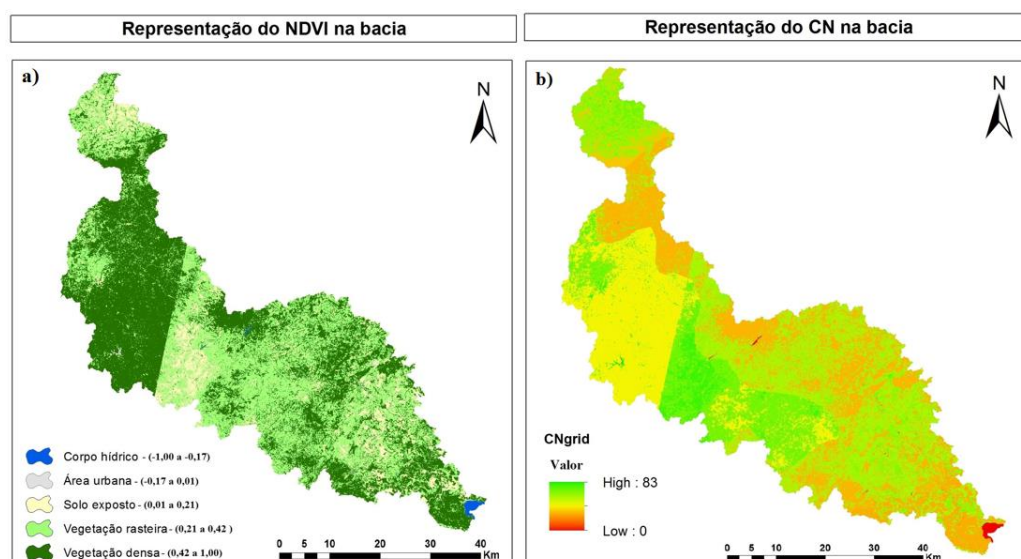
5.2 Modelagem

5.2.1 Modelagem Hidrológica

Diante dos modelos escolhidos para modelagem hidrológica no HEC-HMS (*Loss Method* - SCS-CN, *Transform Method* - SCS-HU e *Route Method* - Lag), o modelo demandou a inserção dos valores do parâmetro CN para cada sub-bacia existente, tendo sido realizada ainda no pré-processamento hidrológico. A obtenção desse parâmetro consistiu na quantificação do índice NDVI para a região da bacia baseada em imagens do satélite Landsat-5 (descrição no item 4.4.1.1) e no mapa de solos da região (Figura 5).

A partir do NDVI é possível identificar as densidades das vegetações predominantes em uma região, bem como a identificação de alvos abióticos como, por exemplo, as áreas urbanas. Desta forma, como a faixa do NDVI varia de -1 (alvos abióticos) a +1 (maiores densidades de vegetação), na Figura 14a a classe *Corpo Hídrico* foi considerada dentro do intervalo -1,0 ~ -0,17 e a classe *Vegetação densa* no intervalo de +0,42 ~ +1 corroborando com os resultados encontrados em outros estudos ao analisarem a relação dos valores NDVI com os tipos de uso do solo (NUNES & ROIG, 2015; GAIDA et al., 2012; DEMARCHI et al., 2011).

Figura 14 – (a) Representação do índice de vegetação (NDVI) na bacia e (b) Representação dos valores de CN ao longo da bacia.



Fonte: Autor (2017).

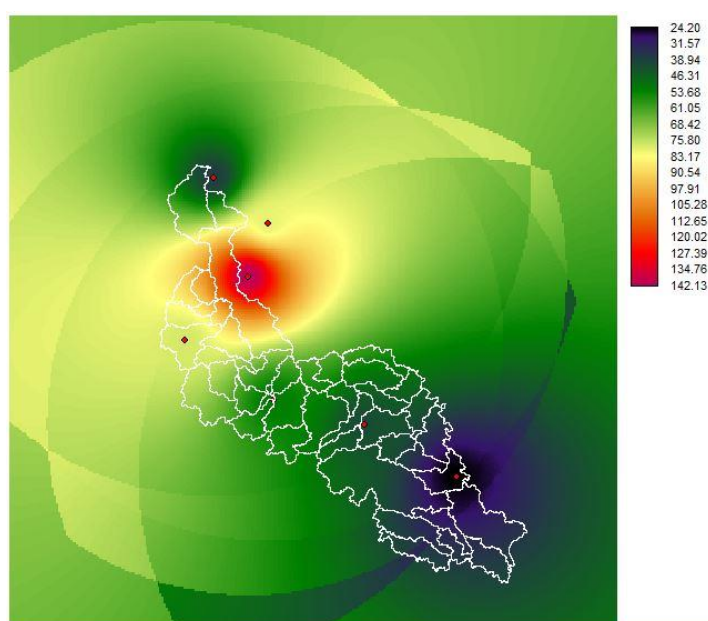
Além disso, segundo Nunes & Roig (2015) as classes campo (vegetação pouco densa), solo exposto e construções e edificações também apresentam valores negativos ou próximos a 0 (zero) para o NDVI, podendo causar uma certa confusão na classificação dessas, justificando a classe *Área urbana* (-0,17 – 0,01) e *Solo Exposto* (0,01 – 0,21) da Figura 14a estarem mais próximas a 0 (zero).

Após classificação da área em relação ao NDVI, foi possível estimar os valores do parâmetro CN (Figura 14b) a partir da função “*Generate CN Grid*” disponível no HEC-GeoHMS, com base na tabela proposta pelo NRCS que considera os tipos de solo presentes na região (Figura 5), assim como seu uso e ocupação (Figura 14a).

Além do NDVI, as informações de precipitação precisaram ser inseridas no modelo por representarem um dos principais dados de entrada de um modelo hidrológico do tipo chuva-vazão. O procedimento de inserção dos dados pluviométricos ao modelo hidrológico (descrito no item 4.4.1.2) foi feito para os dois eventos utilizados no estudo, o evento ocorrido em 2000 (calibração) e o evento ocorrido em 2010 (validação). Em relação ao evento de 2010, além dos dados correspondentes à série “Postos”, implantou-se as séries “TRMM” e “TRMM+Postos” referentes às estimativas do satélite TRMM.

A partir da Figura 15 e Figura 16 é possível observar alguns exemplos do processo de extração das precipitações médias para cada sub-bacia correspondentes ao dia de pico da cheia de 2010.

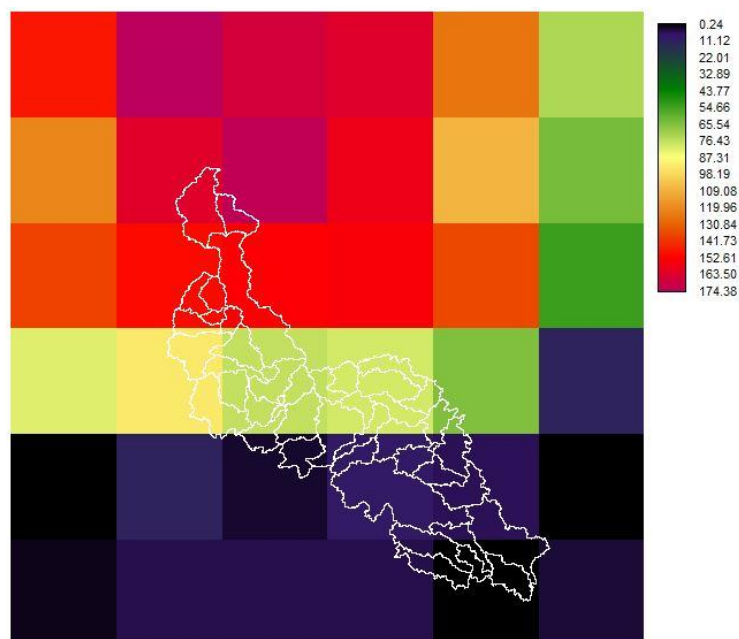
Figura 15 – Extração das precipitações médias de cada sub-bacia em 19/06/2010 – Postos Pluviométricos.



Fonte: Autor (2017).

* Os pontos em vermelho na Figura 15 indicam a localização dos postos pluviométricos disponíveis na região.

Figura 16 – Extração das precipitações médias de cada sub-bacia em 19/06/2010 – “TRMM”.



Fonte: Autor (2017).

Na Figura 15, observa-se a interpolação feita para os postos pluviométricos da região enquanto que na Figura 16 há a representação espacial dos dados do satélite TRMM, onde cada pixel apresentado na figura corresponde às informações de chuva segundo a resolução do próprio satélite $0,25^\circ \times 0,25^\circ$.

Diante da distribuição dos dados de precipitação ao longo da extensão territorial da bacia do rio Paraíba do Meio, foi possível extrair a precipitação média correspondente à cada sub-bacia em relação às séries de dados pluviométricos disponíveis (“Postos”, “TRMM” e “TRMM+Postos”) para sua inserção no modelo hidrológico.

5.2.1.1 Calibração

O pré-processamento dos dados requeridos pela modelagem hidrológica, foi seguido tal como descrito no item 4.4.1.1. Após o pré-processamento, todas as informações geradas para as 41 sub-bacias (Apêndice A) foram exportadas para o software HEC-HMS, onde o processo de calibração automática foi realizado.

A calibração do modelo hidrológico foi feita baseada no evento de cheia ocorrido entre os dias 28 de julho e 05 de agosto de 2000, e nos dados dos três postos fluviométricos existentes na região (Quebrangulo – 39850000, Viçosa – 39860000 e Atalaia – 39870000), de modo que os parâmetros a serem otimizados foram alterados a cada tentativa.

Durante a calibração, vários cenários foram criados e testados buscando encontrar o que apresentasse os parâmetros que melhor se ajustassem aos dados de vazão disponíveis nos postos

fluviométricos da região, ou seja, o cenário que melhor ajustasse as vazões simuladas das vazões observadas.

Apesar das várias tentativas considerando diferentes parâmetros a cada cenário, apenas dois dos cenários criados apresentaram resultados satisfatórios na calibração do modelo ao considerarem: (1) otimização dos trechos de rio e otimização do fator de escala do CN para as sub-bacias, ambos a montante de Atalaia e; (2) otimização do trecho do rio imediatamente a montante de Atalaia – R370 – e otimização do fator de escala do CN para as sub-bacias a montante de Atalaia.

Os valores iniciais dos parâmetros a serem calibrados, obtidos no pré-processamento da modelagem hidrológica, bem como seus respectivos valores otimizados para os dois cenários podem ser observados na Tabela 9 (Cenário 1) e Tabela 10 (Cenário 2)

Tabela 9 – Parâmetros otimizados – Cenário 1.

Elemento	Parâmetro	Unidade	Valor inicial	Valor otimizado
R100	Lag	h	2,22	4,89
R120	Lag	h	1,24	1,24
R170	Lag	h	2,76	2,49
R180	Lag	h	0,28	0,43
R200	Lag	h	2,57	2,57
R220	Lag	h	1,43	3,22
R230	Lag	h	1,99	4,47
R260	Lag	h	1,57	2,69
R280	Lag	h	3,44	7,74
R290	Lag	h	1,04	1,55
R300	Lag	h	2,77	6,24
R310	Lag	h	2,22	2,18
R330	Lag	h	3,11	4,68
R340	Lag	h	0,96	1,44
R370	Lag	h	4,37	6,56
R50	Lag	h	1,14	1,71
R70	Lag	h	1,16	1,74
R90	Lag	h	7,37	16,58
Todas as sub-bacias	Fator CN	-	1,00	0,97

Fonte: Autor (2017).

Tabela 10 – Parâmetros otimizados – Cenário 2.

Elemento	Parâmetro	Unidade	Valor inicial	Valor otimizado
R370	Lag	h	4,37	12,44
Todas as sub-bacias	Fator CN	-	1,00	0,94

Fonte: Autor (2017).

*O fator de escala do CN representa um coeficiente a ser multiplicado pelo valor inicial de cada CN das sub-bacias

*Os valores iniciais e otimizados dos parâmetros CN e Lag Time para todas as sub-bacias e trechos de rio, cenários 1 e 2, podem ser observados, respectivamente, no Apêndice A e Apêndice B.

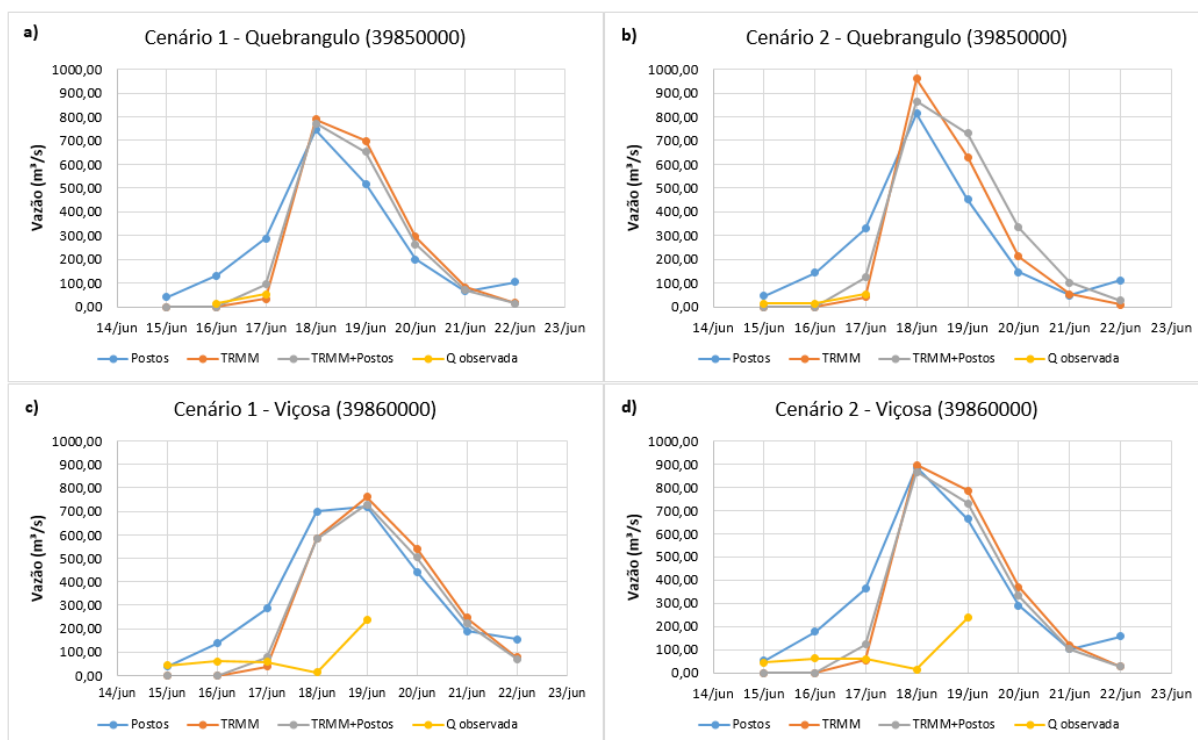
5.2.1.2 Validação

Os dois cenários que apresentaram os melhores resultados na calibração foram utilizados na validação do modelo hidrológico avaliando agora o evento de cheia ocorrido em 2010, ao considerar as séries de dados pluviométricos disponíveis no período de 15 e 22 de junho de 2010 (“Postos”; “TRMM”; “TRMM+Postos”).

Durante a validação do modelo, uma simulação foi feita para cada posto fluviométrico disponível na região (Quebrangulo, Viçosa e Atalaia) ao considerar os parâmetros otimizados na calibração. Os resultados das vazões simuladas foram comparados aos dados observados para uma verificação da representatividade do modelo aos novos dados inseridos.

Ao comparar os resultados das vazões simuladas e observadas, para os dois cenários, constatou-se que a validação não apresentou bons resultados para os postos Quebrangulo (Figura 17 a e b) e Viçosa (Figura 17 c e d) durante o evento de 2010.

Figura 17 – Comportamento das vazões simuladas e observadas na validação do modelo hidrológico para os postos Quebrangulo e Viçosa – Cenários 1 e 2.



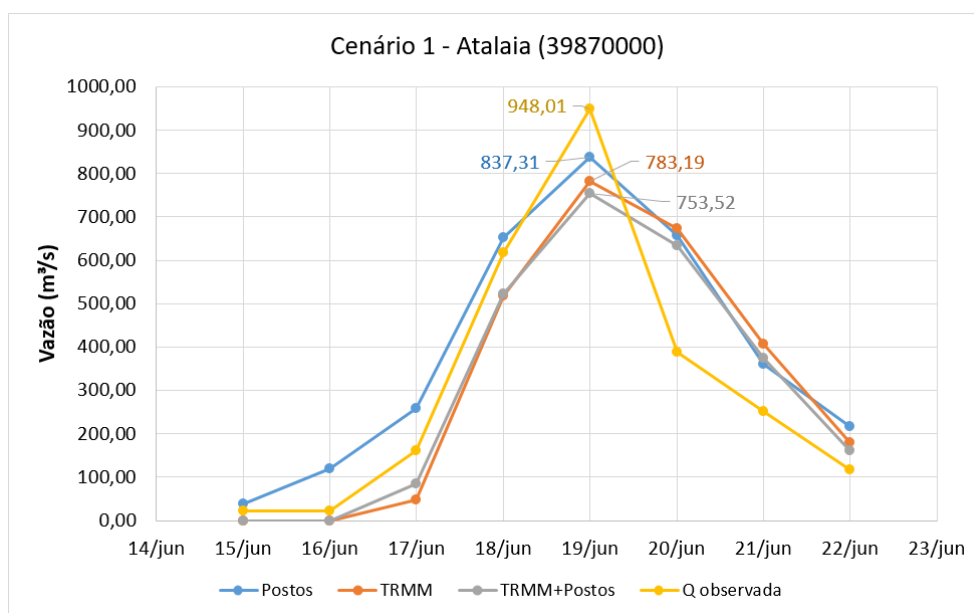
Fonte: Autor (2017).

Embora o posto Quebrangulo não tenha apresentado um comportamento muito diferente do observado (Figura 17), não foi possível considerar que a validação nesse posto tenha sido satisfatória, uma vez que, o mesmo apresentava apenas 3 informações de vazão observada

disponíveis para o período, dificultando assim a avaliação da qualidade do modelo em relação a esse posto.

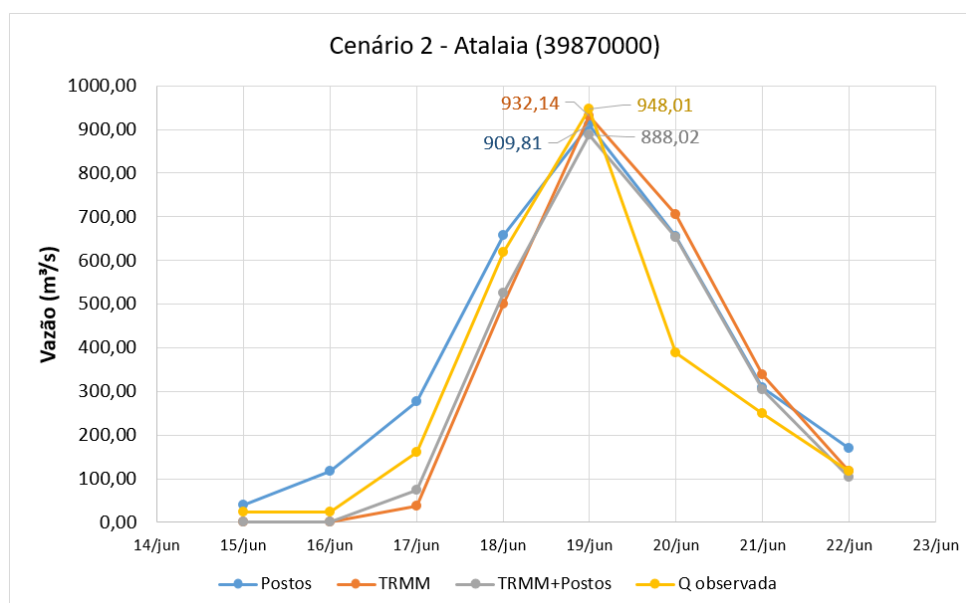
À vista disso, como este trabalho visava um estudo de caso no município de Atalaia, cujo posto fluviométrico presente na região foi o único que apresentou resultados satisfatórios, decidiu-se por adotar apenas o posto Atalaia na avaliação dos resultados da validação (cenários 1 e 2), bem como nas demais etapas do estudo (Figura 18 e Figura 19).

Figura 18 – Comportamento das vazões simuladas na etapa de validação do modelo hidrológico para o posto Atalaia (39870000) – Cenário 1.



Fonte: Autor (2017).

Figura 19 – Comportamento das vazões simuladas na etapa de validação do modelo hidrológico para o posto Atalaia (39870000) – Cenário 2.



Fonte: Autor (2017).

Ademais, uma análise estatística foi realizada a fim de confirmar a eficácia da validação desse modelo ao comparar as vazões simuladas com as vazões observadas disponíveis através do coeficiente de eficiência de Nash Sutcliffe – COE e do desvio padrão – DP, como também na análise do diagrama de dispersão com representação da linha de tendência e do seu coeficiente de determinação – R^2 para cada um dos cenários analisados.

Tabela 11 – Análise estatística da validação do modelo hidrológico – Posto Atalaia (39870000).

	Análise Estatística	Postos	TRMM	TRMM+Postos
Cenário 1	COE	0,86	0,77	0,76
	DP	288,17	307,82	300,27
Cenário 2	COE	0,89	0,87	0,91
	DP	297,69	328,35	318,67

Fonte: Autor (2017).

A Tabela 11 traz um resumo da análise estatística realizada a partir das três séries de dados utilizadas na validação do modelo hidrológico ao considerar os dois melhores cenários apenas para o posto Atalaia (39870000). Desta forma, considerando apenas a visualização dos cenários 1 (Figura 18) e 2 (Figura 19) e os resultados da Tabela 11 é possível concluir que o cenário 2 foi o cenário que apresentou melhores resultados na validação do modelo, mostrando ainda uma excelente representatividade dos dados corrigidos do satélite na modelagem (“TRMM+Postos”).

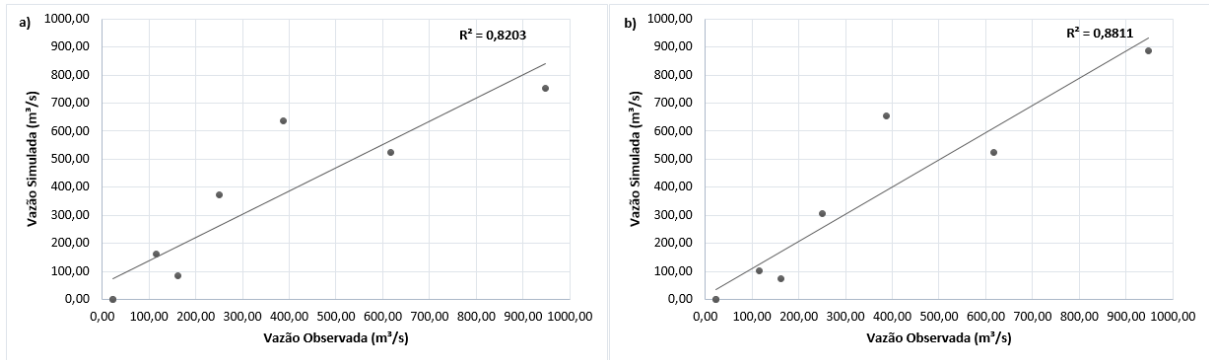
Esta conclusão é fundamentada, principalmente, nos valores encontrados para o COE (Tabela 11), frequentemente utilizado na análise do ajuste de modelos hidrológicos, ao apresentar valores satisfatórios segundo Krysanova et al. (1998), que considera como um ajuste muito bom valores de COE entre 0,7-0,8 e, nos valores encontrados para o DP, que também apresentou resultados satisfatórios, uma vez que, seu valor não alterou muito de uma série para outra (Tabela 11), mostrando uma provável similaridade entre as mesmas.

Apesar da vazão de pico da série bruta do satélite TRMM (932,14 m³/s) ter se aproximado mais da vazão observada no posto Atalaia (948,01 m³/s) no dia de pico do evento para o Cenário 2 (Figura 19), a modelagem hidrológica dos outros valores do hidrograma foram menos significativos justificando assim o menor COE obtido para a série TRMM em relação à série “TRMM+Postos” (Tabela 11).

Os diagramas de dispersão ilustrados na Figura 20 foram criados analisando apenas a série corrigida do satélite (“TRMM+Postos”) por ter sido a série com melhores resultados para o COE na validação do modelo hidrológico em relação aos dados observados do posto fluviométrico Atalaia (39870000). Seu comportamento foi avaliado considerando os dois

cenários, de modo a confirmar a melhor representatividade do cenário 2 na simulação hidrológica na bacia, no qual a linha de tendência se ajustou melhor aos dados apresentando um coeficiente de determinação – R^2 de 0,88 contra um R^2 de 0,82 correspondente ao cenário 1.

Figura 20 – Diagramas de dispersão entre as vazões observadas (Atalaia – 39870000) e as vazões simuladas (“TRMM+Postos”) da cheia de 2010 para o a) Cenário 1 e o b) Cenário 2.



Fonte: Autor (2017).

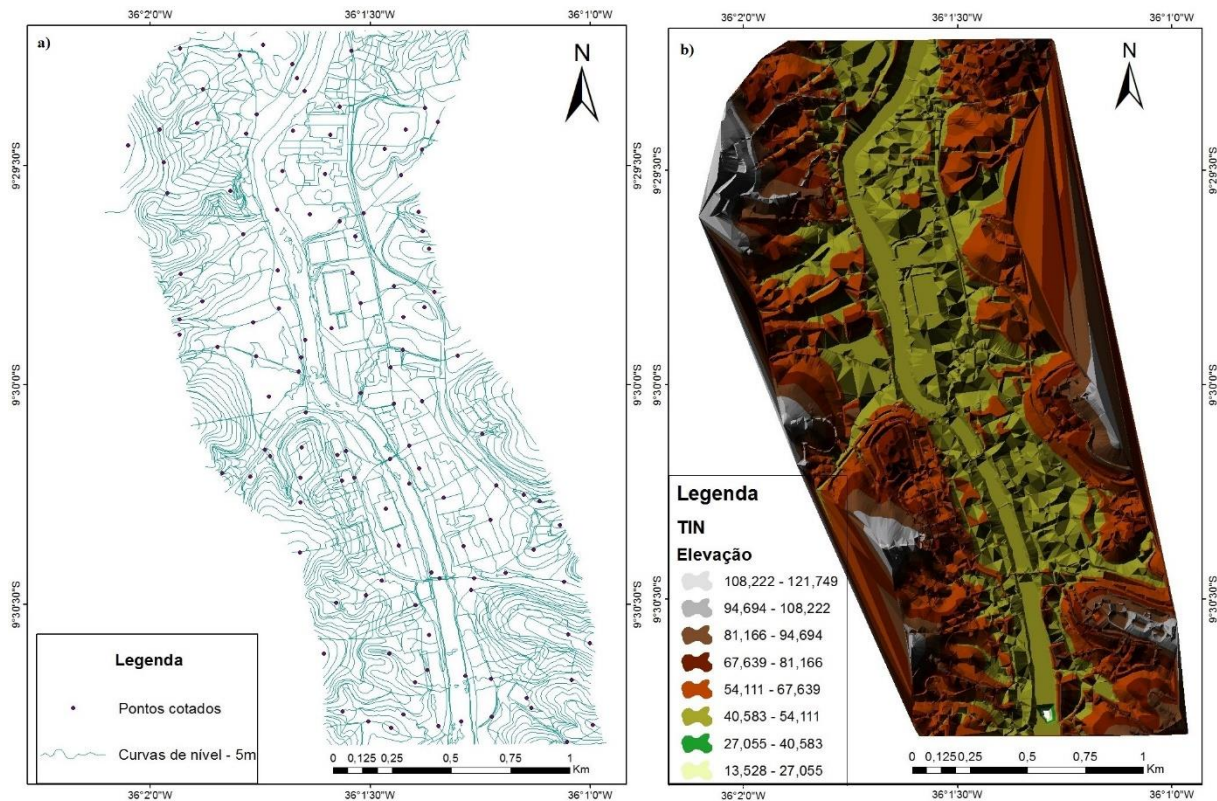
5.2.2 Modelagem Hidráulica

A etapa inicial da modelagem hidráulica foi realizada no HEC-GeoRAS possibilitando a extração de informações essenciais para a simulação, como as delimitações do canal principal, das margens do canal, da planície de inundação e das seções transversais através da representação do terreno baseada nas curvas de nível e nos pontos cotados levantados pela ENGEMAP na região (Figura 21a). Em posse das curvas de nível e pontos cotado, foi possível gerar um arquivo TIN (*Triangulated Irregular Network*), um modelo matemático com valores de altitude para uma representação mais precisa do relevo (Figura 21b).

Esse pré-processamento facilitou a inserção das informações do canal no modelo hidráulico, exportando-as diretamente para o HEC-RAS, de modo que para as etapas seguintes da modelagem hidráulica foi necessário inserir apenas as informações referentes ao regime de escoamento, ao coeficiente de Manning (n), ao fluxo e às condições de contorno para calibração e validação do modelo.

A partir da Figura 22 é possível observar a tela inicial do HEC-RAS com representação do canal principal e das seções transversais após importação dessas informações extraídas durante a etapa do pré-processamento realizada no HEC-GeoRAS.

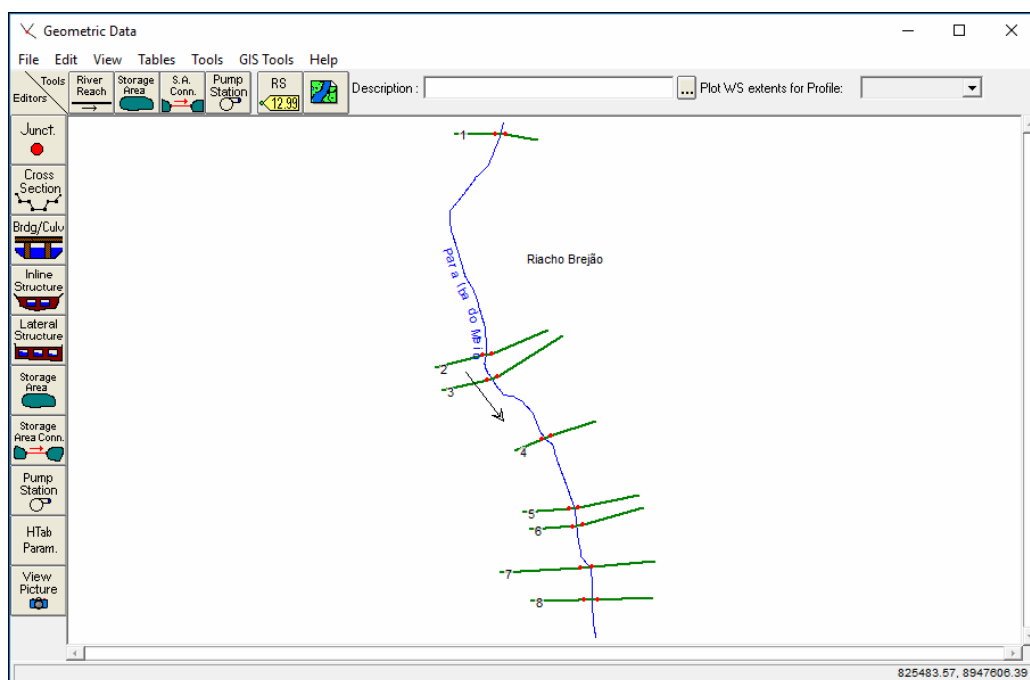
Figura 21 – a) Representação do terreno através de curvas de nível e pontos cotados levantados pela ENGEMAP às margens do rio em Atalaia-AL e b) Representação do TIN criado a partir das curvas de nível e pontos cotados.



Fonte: Autor (2017).

*O TIN (*Triangulated Irregular Network*) consiste em um modelo digital criado a partir da interpolação entre as curvas de nível e os pontos cotados de uma região, transformando essas informações em um modelo matemático com valores de altitude.

Figura 22 – Representação da geometria do canal e seções transversais no HEC-RAS.



Fonte: Autor (2017).

5.2.2.1 Calibração

A Tabela 12 apresenta o coeficiente de Manning (n) calibrado para o fundo e margens (direita e esquerda) do canal a partir da vazão registrada no dia de pico do evento (19/06/2010) pelo posto fluviométrico Atalaia (39870000) – 948,01 m³/s.

Tabela 12 – Coeficientes de Manning (n) obtidos na calibração do modelo hidráulico.

Seções	Margem esquerda	Canal principal	Margem direita
1	0.17	0.14	0.17
2	0.17	0.14	0.17
3	0.17	0.14	0.17
4	0.30	0.25	0.30
5	0.30	0.25	0.30
6	0.30	0.25	0.30
7	0.17	0.14	0.17
8	0.17	0.14	0.17

Fonte: Autor (2017).

Os valores obtidos para o coeficiente de Manning (Tabela 12) diferentes dos propostos por Chow (1959) podem ser explicados pela alta concentração de vegetação ao longo da bacia (Figura 14a), irregularidades do canal e obstruções do fluxo (MUSTAFA et al., 2016; HEC-RAS, 2010; ARCEMENT JR. & SCHNEIDER, 1984). Segundo Mustaffa et al. (2016), características como altura, tipos e condições da vegetação podem ser considerados como fatores que contribuem para alterações nas características do fluxo e da rugosidade no canal.

Além da alta concentração de vegetação próxima às margens das seções 4, 5 e 6, os altos valores obtidos para o coeficiente de Manning nessas seções também podem ser justificados pela presença de pontes e por maiores profundidades de fluxo nesse trecho do rio (Tabela 12), corroborando com os resultados encontrados por Mustaffa et al. (2016) em regiões com maiores profundidades de fluxo.

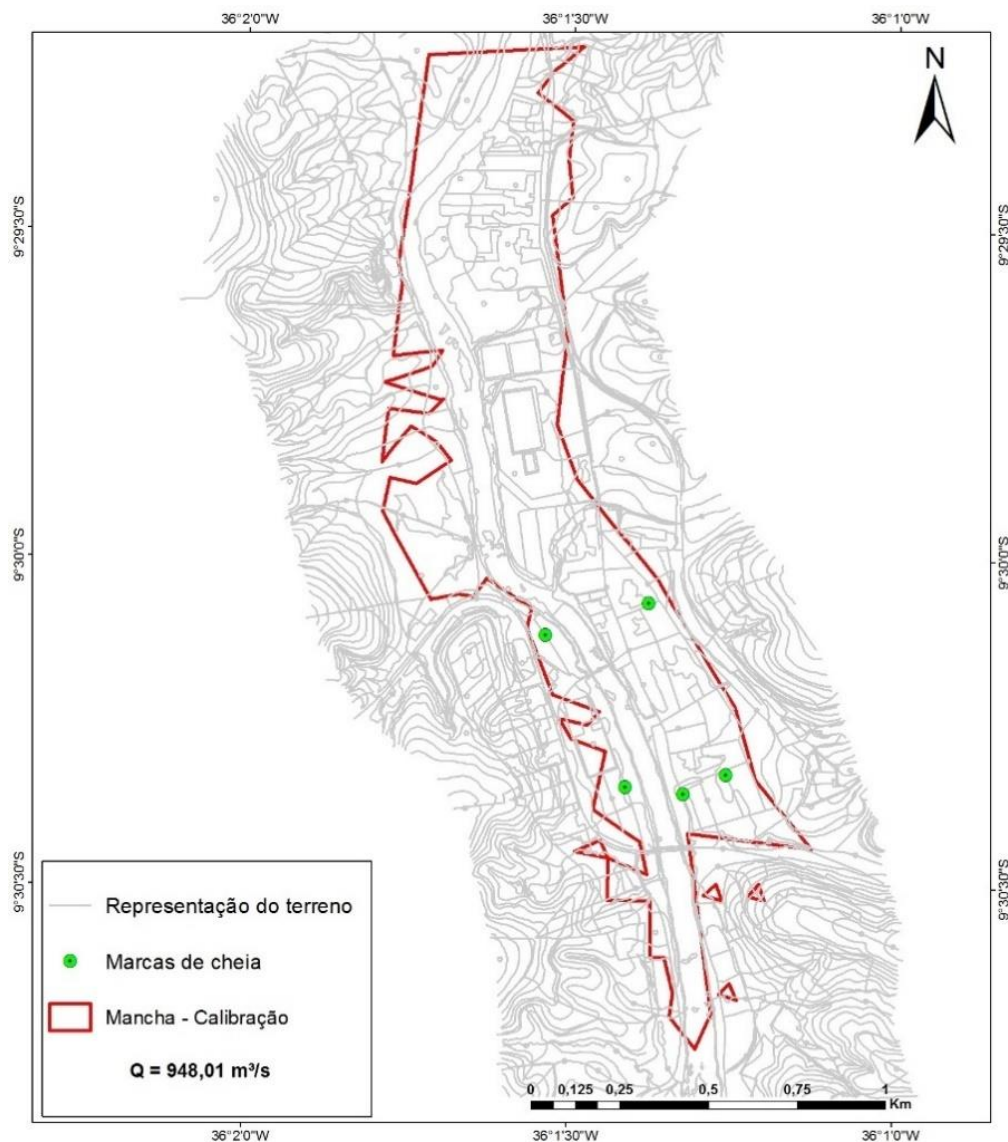
Quando o nível da água é elevado, o curso d'água tende a atingir áreas com maior cobertura vegetal ou áreas mais rugosas, justificando a elevação do coeficiente de Manning quando a vazão é muito alta e o rio transborda para a planície inundada onde, em geral, o coeficiente de Manning é maior do que no curso d'água em si (MUSTAFA et al., 2016; LYRA et al., 2010). Sabe-se ainda que as pontes são estruturas que provocam variações nas condições hidráulicas do canal, alterando o comportamento do fluxo no canal devido, principalmente, às suas características construtivas (material e estrutura física).

Em geral, os valores do coeficiente calibrados para as seções transversais, referentes ao fundo e margens do canal (Tabela 12), apresentaram ainda valores relativamente próximos aos

encontrados por Monte et al. (2016) ao estudarem a bacia do rio Mundaú, vizinha à bacia do rio Paraíba do Meio com características físicas, climáticas e de uso e ocupação do solo semelhantes.

A mancha de inundação gerada na etapa de calibração do modelo que melhor se ajustou às marcas de cheia em relação ao evento de 2010, a partir da vazão de 948,01 m³/s no dia 19/06/2010, pode ser observada na Figura 23.

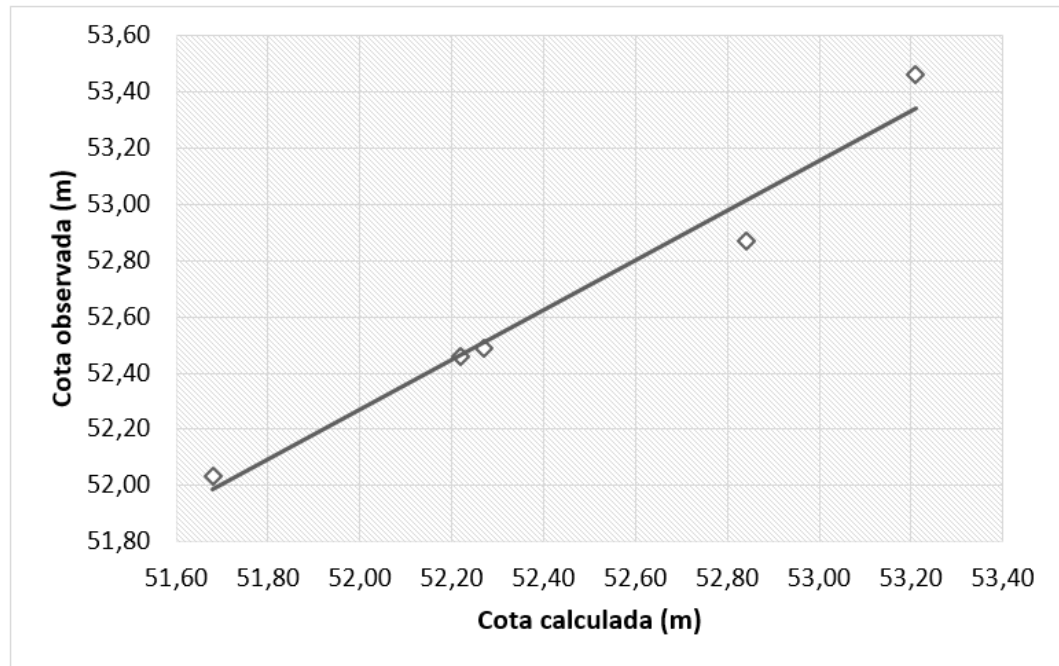
Figura 23 – Representação da mancha de inundação gerada na calibração do modelo hidráulico ($Q_{ATLALIA}$) e das marcas de cheia levantadas em campo no dia de pico do evento – 19/06/2010.



Fonte: Autor (2017).

Segundo levantamento das marcas de cheia e representação das altitudes através do TIN, a maior cota na área urbana levantada em campo foi de 53,46 metros enquanto a maior cota estimada na calibração foi de 53,21 metros, valor bem próximo ao valor medido em campo indicando uma boa representatividade da calibração do modelo hidráulico (Figura 24).

Figura 24 – Comparação entre as cotas observadas e simuladas – Calibração.



Fonte: Autor (2017).

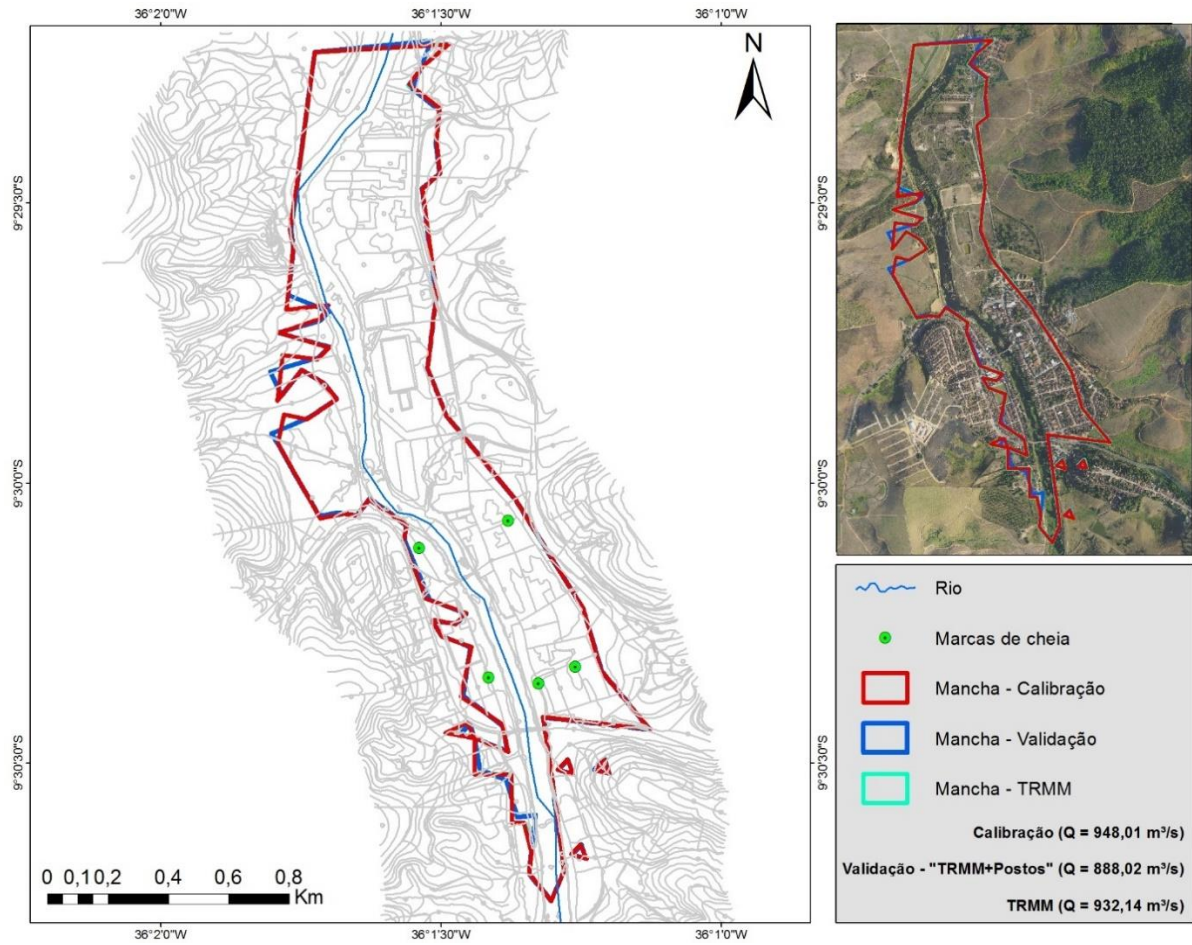
5.2.2.2 Validação e Mapeamento das áreas inundáveis

A validação do modelo hidráulico foi feita a partir da simulação do comportamento do hidrograma baseado nas informações corrigidas do satélite TRMM ($Q_{\text{TRMM+Postos}}$), gerado pelo modelo hidrológico, visando produzir uma mancha de inundação com essas novas informações e compará-la com a mancha produzida na calibração do modelo a partir das informações de vazão do posto fluviométrico Atalaia (Q_{ATALAIA}) referentes ao dia do evento.

A simulação hidráulica utilizando como condição de contorno o hidrograma gerado na simulação hidrológica a partir da série bruta do satélite TRMM (Q_{TRMM}) também foi realizada com o intuito de analisar a representatividade dos dados do satélite em regiões sem nenhuma informação pluviométrica.

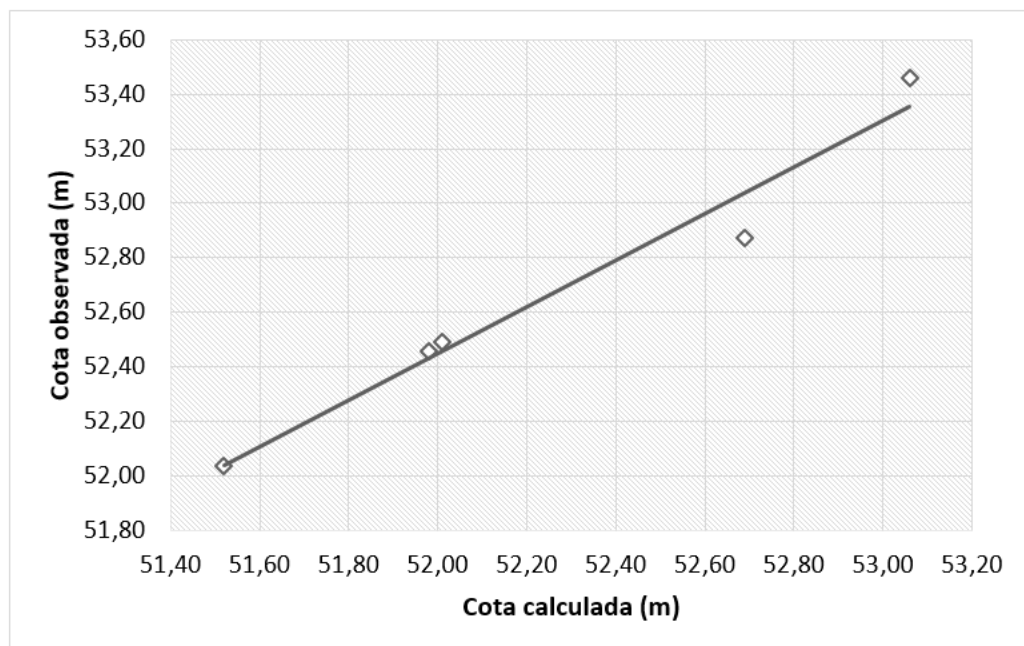
A modelagem hidrológica estimou uma vazão de pico de 932,14 m³/s para a série “TRMM” e 888,02 m³/s para a série “TRMM+Postos” em relação ao dia de pico do evento (19/06/2010) que, utilizadas como condições de contorno no HEC-RAS e aplicadas ao HEC-GeoRAS, gerou as manchas de inundação ilustradas na Figura 25.

Figura 25 – Representação da mancha de inundação gerada na validação do modelo hidráulico ($Q_{\text{TRMM+Postos}}$) comparada às manchas geradas na calibração e na mancha proveniente dos dados do satélite (Q_{TRMM}).



Fonte: Autor (2017).

Figura 26 – Comparação entre as cotas observadas e simuladas – Validação



Fonte: Autor (2017).

Observa-se a partir da A validação do modelo hidráulico foi feita a partir da simulação do comportamento do hidrograma baseado nas informações corrigidas do satélite TRMM ($Q_{\text{TRMM+Postos}}$), gerado pelo modelo hidrológico, visando produzir uma mancha de inundação com essas novas informações e compará-la com a mancha produzida na calibração do modelo a partir das informações de vazão do posto fluviométrico Atalaia (Q_{ATALAIA}) referentes ao dia do evento.

A simulação hidráulica utilizando como condição de contorno o hidrograma gerado na simulação hidrológica a partir da série bruta do satélite TRMM (Q_{TRMM}) também foi realizada com o intuito de analisar a representatividade dos dados do satélite em regiões sem nenhuma informação pluviométrica.

A modelagem hidrológica estimou uma vazão de pico de 932,14 m³/s para a série “TRMM” e 888,02 m³/s para a série “TRMM+Postos” em relação ao dia de pico do evento (19/06/2010) que, utilizadas como condições de contorno no HEC-RAS e aplicadas ao HEC-GeoRAS, gerou as manchas de inundação ilustradas na Figura 25.

Figura 25 e Figura 26, que a mancha de inundação e simulação das cotas durante a validação hidráulica (série “TRMM+Postos”) apresentaram resultados satisfatórios em relação às marcas de cheia levantadas em campo e à mancha de inundação gerada na calibração do modelo, onde a cota de 53,06 metros foi a maior obtida durante a validação estando bem próxima à cota de 53,21 metros obtida na calibração do modelo hidráulico.

Ainda segundo a Figura 25 é possível observar que a mancha gerada na simulação hidráulica a partir do hidrograma proveniente da série “TRMM” apresentou comportamento análogo ao da mancha obtida na calibração do modelo pela proximidade das vazões analisadas, respectivamente, 932,14 m³/s e 948,01 m³/s, diferenciando-se apenas em relação à cota máxima de 53,17 metros referente à série “TRMM” contra uma cota de 53,21 metros da calibração.

Apesar da mancha obtida com a série “TRMM” apresentar um comportamento bastante análogo à mancha da calibração e uma cota máxima mais próxima, a série “TRMM+Postos” foi utilizada nas outras etapas do estudo por seu melhor comportamento hidrológico em relação às outras vazões registradas durante o evento.

A representatividade da mancha de inundação (Figura 25) a partir da série bruta dos dados do satélite TRMM em relação às informações obtidas em campo, mostra a relevância das estimativas do satélite nessa região podendo ser utilizadas em outros estudos nessa mesma bacia ou em regiões com pouca ou sem nenhuma informação pluviométrica, de modo a destacar a importância de ferramentas como essa no subsídio a estudos hidrológicos em regiões com

escassez de dados (ARAÚJO, 2015; FALCK et al., 2015; PEREIRA et al., 2013; NÓBREGA et al., 2008; COLLISCHONN, 2006).

5.3 Análise de Risco

A análise de risco foi realizada com base na análise da ameaça à ocorrência de inundações e da vulnerabilidade social, por setor censitário, da população residente às margens do rio Paraíba do Meio no município de Atalaia-AL.

As variáveis utilizadas na estimativa de vulnerabilidade social (Tabela 13) foram classificadas para cada um dos setores analisados segundo agrupamento proposto na Tabela 4 e sua classificação pode ser observada Tabela 14.

Tabela 13 – Informações das variáveis utilizadas na definição da vulnerabilidade social dos setores censitários às margens do rio Paraíba do Meio - Atalaia/AL.

Setor	População Total	% da população em relação à população total urbana de Atalaia	População com idade entre 0-4 anos	% da população com idade entre 0-4 anos	População com idade superior a 60 anos	% da população com idade superior a 60 anos	População analfabeta	% da população analfabeta	População em domicílio particular permanente com renda per capita de até 70 reais	% da população em domicílio particular permanente com renda per capita de até 70 reais
1	1474	4,7%	194	13,16%	114	7,73%	533	36,16%	287	25,26%
2	1367	4,4%	124	9,07%	101	7,39%	383	28,02%	172	12,59%
3	1261	4,0%	106	8,41%	111	8,80%	386	30,61%	208	16,49%
4	1753	5,6%	178	10,15%	110	6,27%	649	37,02%	442	25,21%
5	1004	3,2%	106	10,56%	58	5,78%	356	35,46%	193	19,22%
6	1141	3,6%	94	8,24%	106	9,29%	230	20,16%	196	17,18%
7	1044	3,3%	95	9,10%	120	11,49%	191	18,30%	89	8,52%
8	1062	3,4%	84	7,91%	109	10,26%	166	15,63%	77	7,25%
9	845	2,7%	55	6,51%	96	11,36%	218	25,80%	125	14,79%
10	771	2,5%	58	7,52%	81	10,51%	130	16,86%	37	4,80%

Fonte: Autor (2017).

Tabela 14 – Variáveis classificadas segundo sua vulnerabilidade para cada setor censitário.

Setor	População Total	População com idade entre 0-4 anos	População com idade superior a 60 anos	População analfabeta	População com renda per capita de até 70 reais
1	1	2	1	3	3
2	1	1	1	3	2
3	1	1	1	3	2
4	1	2	1	3	3
5	1	2	1	3	2
6	1	1	1	3	2
7	1	1	2	2	1
8	1	1	2	2	1
9	1	1	2	3	2
10	1	1	2	2	1

Fonte: Autor (2017).

No caso de Atalaia, a relação entre a população total de cada setor censitário e as populações correspondentes às crianças com idade entre 0 e 4 anos e aos idosos com idade superior a 60 anos, mostrou que os setores 1, 4 e 5 apresentaram maior porcentagem de crianças, enquanto nos setores 7, 8, 9 e 10 houve uma maior porcentagem em relação à população de idosos (Tabela 13). As porcentagens da população analfabeta e população com renda *per capita* baixa, também foram consideradas como agravantes no grau de vulnerabilidade social de Atalaia em relação à grande maioria dos setores (Tabela 13).

Essas informações corroboram com os resultados obtidos por Venton & Hansford (2006) e Cutter et al. (2003), ao identificarem uma maior vulnerabilidade social em locais com maiores concentrações dos grupos populacionais que apresentam capacidade reduzida de resposta aos desastres, dificuldades em conhecer e entender os riscos decorrentes dos desastres e um baixo poder aquisitivo, estando este último diretamente ligado ao poder de resiliência da população.

Tratando-se ainda das variáveis utilizadas na estimativa da vulnerabilidade social, o levantamento dos elementos essenciais – ES – existentes em cada setor analisado (Tabela 15) partiu da obtenção de informações junto à Prefeitura de Atalaia, bem como dos registros fornecidos pelas entidades governamentais como o MEC (Ministério de Educação) e ANS (Agência Nacional de Saúde). Nessa mesma tabela (Tabela 15), observa-se a classificação realizada para os ES a partir da classificação proposta na Tabela 5.

Tabela 15 – Quantificação e classificação dos elementos essenciais para cada setor censitário.

Setor	Descrição do elemento essencial	Quantidade	Classificação	Classe de Vulnerabilidade
1	Secretaria de Infraestrutura	1	3	Alta
	Mercado Municipal	1		
	Unidades de saúde	1		
	Escolas	1		
	Igrejas	3		
2	Estádio Luiz de Albuquerque	1	3	Alta
	Ministério da Defesa do Exército Brasileiro	1		
	Escolas	4		
3	Posto de combustível	1	2	Moderada
	Unidades de saúde	1		
	Escolas	1		
4	Igrejas	1	1	Baixa
5	Unidades de saúde	1	2	Moderada
	Escolas	1		
	Igrejas	1		
6	Centro Cultural Prefeito José Lopes Duarte	1	3	Alta

	Sindicato Rural de Atalaia	1		
	Instituições financeiras	1		
	Escolas	3		
	Igrejas	1		
	Delegacia da Polícia Civil	1		
	Palácio Municipal Miguel Correia de Araújo	1		
	Sindicato dos Educadores	1		
	Instituições financeiras	2		
7	Agência dos Correios	1	3	Alta
	Conselho Municipal de Saúde	1		
	Câmara Municipal de Atalaia	1		
	Central Elétrica	1		
	Escolas	2		
	Igrejas	4		
	Secretaria Municipal de Saúde	1		
	Ministério do Trabalho e Emprego	1		
8	Núcleo de Apoio a Saúde da Família - NASF	1	3	Alta
	Unidades de saúde	2		
	Escolas	2		
	Igrejas	2		
	Posto de combustível	2		
9	Sede do IBGE - Atalaia	1	3	Alta
	Escolas	1		
	Igrejas	2		
10	Unidades de saúde	2	3	Alta
	Escolas	3		

Fonte: Autor (2017).

Alguns ES são fundamentais no desenvolvimento humano, uma vez que as atividades diárias da população dependem de elementos essenciais de infraestrutura para seu desenvolvimento como, por exemplo: escolas, hospitais, mercados, instituições públicas, bancos e postos de combustíveis. Dentre os 10 setores analisados no município de Atalaia todos apresentaram pelo menos um elemento essencial, sendo os setores 1, 2, 6, 7 e 9 os mais vulneráveis, uma vez que, quanto maior a concentração de ES por setor maior será sua vulnerabilidade (Tabela 15).

A estimativa das unidades de resposta – UR – foi realizada de forma ponderada destacando a importância de cada uma delas para a reestruturação das comunidades na hipótese de ocorrência de desastres na região, sendo esta a última das variáveis necessárias para análise da vulnerabilidade social (Tabela 16).

O cálculo das URs considerou os hospitais com peso 2,5, visto que, apenas unidades de saúde foram identificados na região, as escolas com peso 2 e as igrejas com peso 1 a partir da

aplicação da Equação (9). Já a classificação de vulnerabilidade das URs partiu dos resultados obtidos pela Equação (9), sendo considerados de alta vulnerabilidade os setores com valores de UR menores ou iguais a 1, de moderada vulnerabilidade os setores com UR entre 1 e 2 e de baixa vulnerabilidade os setores com UR maiores do que 2 (Tabela 16).

Tabela 16 – Detalhamento e resultado do cálculo ponderado das unidades de resposta, bem como classificação de vulnerabilidade para cada setor censitário.

Setor	Hospitais	Escolas	Igrejas	UR	Classificação
1	1	1	3	3	Baixa
2	0	4	0	3	Baixa
3	1	1	0	2	Moderada
4	0	0	1	1	Alta
5	1	1	1	2	Moderada
6	0	3	1	3	Baixa
7	0	2	4	3	Baixa
8	2	2	2	4	Baixa
9	0	1	2	2	Moderada
10	2	3	0	4	Baixa

Fonte: Autor (2017).

O setor 4 foi considerado o setor com maior vulnerabilidade em relação às URs por apresentar apenas uma igreja em sua extensão, representando uma situação precária no caso de um desastre, uma vez que, a população desse setor terá menos unidades de apoio no processo de reestruturação, necessitando se locomover para outros setores em busca de ajuda e/ou abrigo.

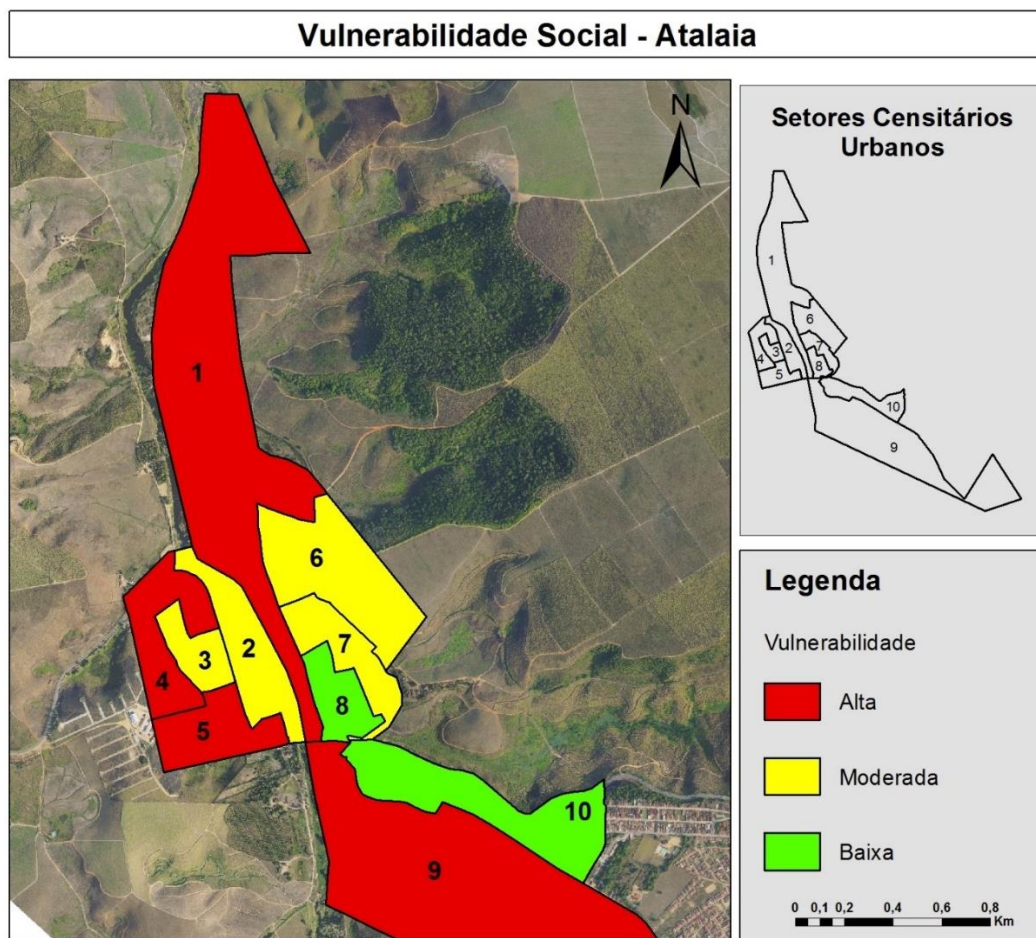
Por fim, após obtenção e classificação de todas as informações necessárias para análise da vulnerabilidade social, foi possível identificar e classificar (Tabela 7) as áreas mais vulneráveis à ocorrência de inundações às margens do rio Paraíba do Meio no município de Atalaia a partir da Equação (8) (Tabela 17) e mapeá-las através de ferramentas de geoprocessamento (Figura 27).

Tabela 17 – Vulnerabilidade social por setor censitário – Equação (8).

Setor	Vulnerabilidade do setor censitário	Classificação	Classe de Vulnerabilidade
1	1,43	3	Alta
2	1,14	2	Moderada
3	1,14	2	Moderada
4	1,43	3	Alta
5	1,29	3	Alta
6	1,14	2	Moderada
7	1,00	2	Moderada
8	0,86	1	Baixa
9	1,43	3	Alta
10	0,86	1	Baixa

Fonte: Autor (2017).

Figura 27 – Mapeamento da vulnerabilidade social nos setores censitários urbanos às margens do rio Paraíba do Meio no município de Atalaia.



Fonte: Autor (2017).

A baixa vulnerabilidade apresentada nos setores 8 e 10 (Tabela 17 e Figura 27) pode ser explicada, principalmente, pelo alto número de unidades de resposta (Tabela 16) existente nesses setores, caracterizando-os como os setores com maior grau de resiliência, ou seja, quando afetados por algum desastre serão capazes de se recuperar de forma mais rápida e ainda subsidiar outros setores mais vulneráveis.

Os setores 1, 4, 5 e 9 foram considerados os mais vulneráveis, podendo ser justificado, principalmente, pelas vulnerabilidades elevada e moderada de aspectos como concentração de crianças com idade entre 0 e 4 anos, de pessoas analfabetas e de ES nesses setores, com exceção do setor 4 que no caso dos ES apresentou baixa vulnerabilidade. Enquanto isso, os setores 2, 3, 6 e 7 foram considerados de vulnerabilidade moderada, ao oscilarem entre alta e moderada na maioria das variáveis analisadas e, ainda, apresentarem baixa vulnerabilidade em relação às URs, com exceção do setor 3 (Tabela 17 e Figura 27).

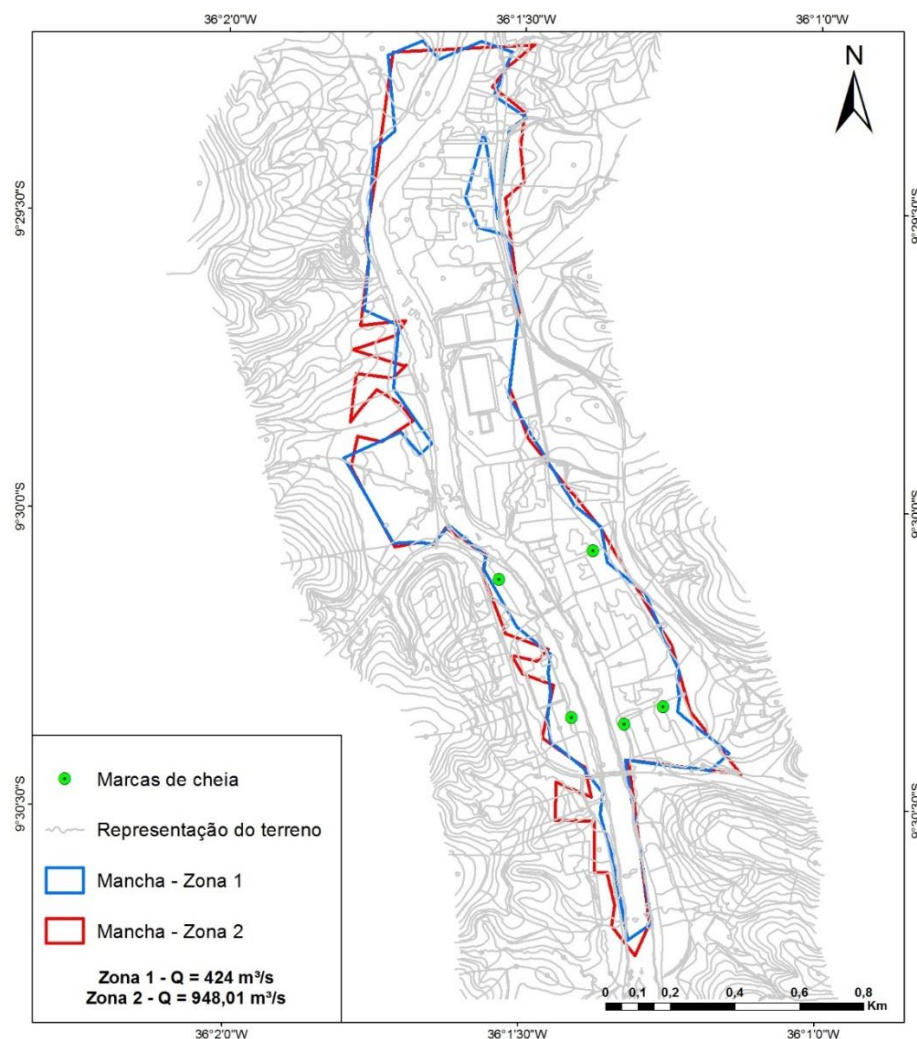
Após a identificação das áreas mais vulneráveis (Figura 27) e aplicação da metodologia proposta por Rebelo (2003), foi possível realizar uma análise de risco para a população

ribeirinha do município de Atalaia a partir das vazões adotadas como parâmetros na criação das zonas de ameaça (ver item 4.5).

A Figura 28 mostra a representação das manchas de inundação das Zonas 1 e 2 geradas a partir da simulação hidráulica ao utilizar como condições de contorno, respectivamente, as vazões de 424 m³/s e 948,01 m³/s. A Zona 3, apesar de não ter sido representada na Figura 28, corresponde à área que excede as regiões inundadas nas maiores enchentes (Zona 2), caracterizando-a como uma área de baixa ameaça à ocorrência de inundações.

Observa-se ainda que a mancha da Zona 1 apresenta distribuição semelhante à obtida na Zona 2, confirmando as áreas mais suscetíveis à ocorrência de inundações às margens do rio no município de Atalaia-AL. A maior diferença entre essas manchas está relacionada à cota, uma vez que, a maior cota obtida na simulação da Zona 1 foi de 51,34 metros enquanto a maior cota da Zona 2 foi de 53,21 metros, obtida durante a calibração do modelo hidráulico.

Figura 28 – Representação da mancha de inundação referente à Zona 1 ($Q_{Zona\ 1} = 424\text{ m}^3/\text{s}$) comparada à mancha de inundação da Zona 2 ($Q_{Zona\ 2} = 948,01\text{ m}^3/\text{s}$).



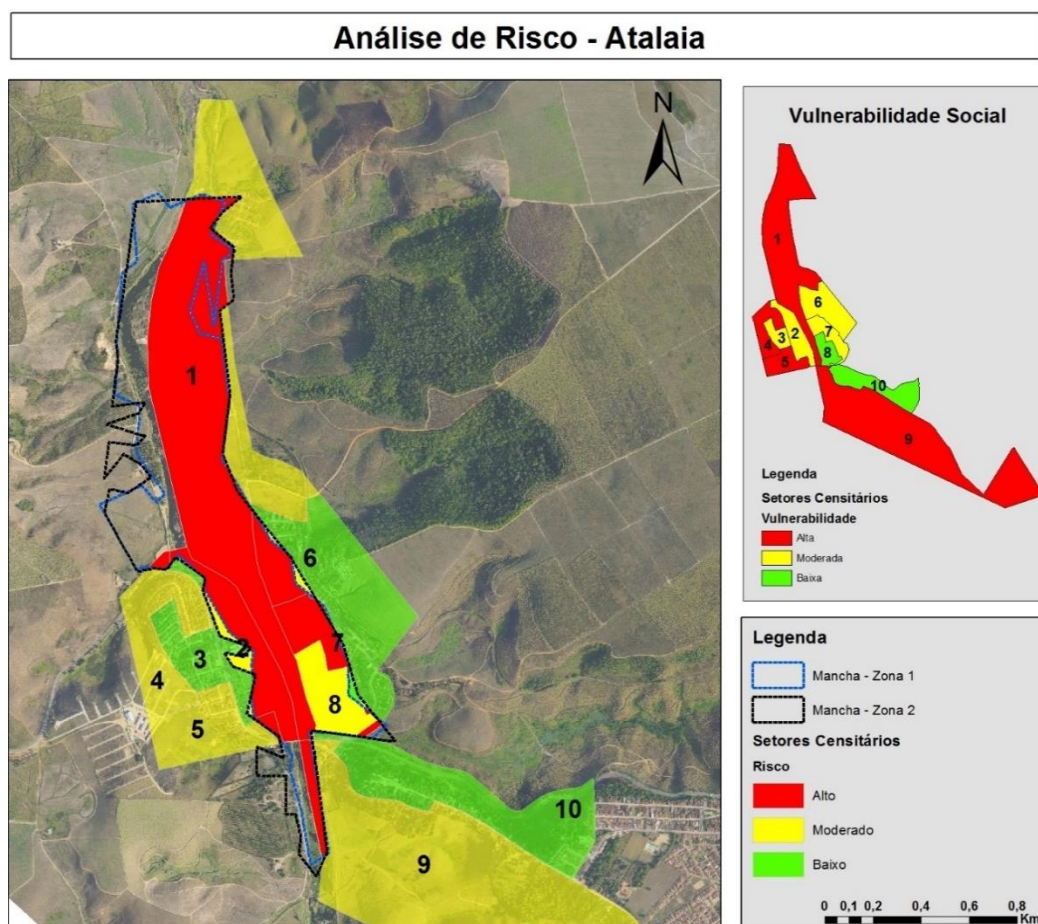
Fonte: Autor (2017).

A partir da Figura 29 é possível observar o resultado da classificação e mapeamento da análise de risco a qual a população residente às margens do rio está exposta, baseando-se no cruzamento das informações de vulnerabilidade social e ameaça do município de Atalaia-AL.

Os altos riscos associados à maior parte dos setores 1, 2, 6 e 7, justifica-se principalmente pelas altas concentrações de populações analfabetas e de baixa renda *per capita*, representando alguns dos grupos populacionais que demonstram maior vulnerabilidade à ocorrência de desastres (Tabela 13). Esses grupos populacionais, além de sofrerem com condições precárias de sobrevivência devido à baixa renda são carentes de informações, conferindo baixa instrução escolar e de subsistência que, associada à taxa de natalidade elevada e baixa renda *per capita*, torna a situação da população ainda mais precária.

A elevada concentração de elementos essenciais identificada nos setores com maiores riscos à ocorrência de inundações, também confere um grau elevado de vulnerabilidade devido à dependência desses elementos em relação ao desenvolvimento humano (Tabela 15), sendo essenciais para a recuperação de populações atingidas pelas cheias.

Figura 29 – Mapeamento e classificação dos riscos existentes para a população residente nos setores censitários urbanos às margens do rio no município de Atalaia – AL.



Fonte: Autor (2017).

Ao analisar a Figura 29 é ainda possível observar que as regiões que apresentaram maiores riscos às margens do rio estão inseridas, principalmente, nos locais mais afetados pelas cheias, corroborando com a localização das marcas de cheia levantadas pela ENGEMAP para o dia de pico do evento ocorrido em 2010 no município de Atalaia-AL (Figura 28).

Desta forma, a partir dos resultados obtidos na Análise de Risco (Figura 29) é possível confirmar que parte dos setores censitários às margens do rio Paraíba do Meio estão inseridos dentro da planície de inundação do rio, uma vez que, as vazões utilizadas na análise da ameaça geraram manchas de inundação aproximadas, de modo a identificar as áreas mais ameaçadas dessa região.

6 CONCLUSÕES

Esta pesquisa teve como objetivo principal avaliar o acoplamento unidirecional entre os modelos hidrológico – HEC-HMS – e hidráulico – HEC-RAS – ao considerar como entrada na modelagem hidrológica os dados pluviométricos do satélite TRMM.

O emprego dos dados provenientes do satélite TRMM, visou avaliar a representatividade dessas informações em relação às informações obtidas em campo para um posterior mapeamento das áreas inundáveis e análise de risco no município de Atalaia/AL, localizado próximo ao exutório da bacia do rio Paraíba do Meio (AL/PE).

Inicialmente, os resultados obtidos na análise dos dados disponíveis em campo pelos pluviômetros em relação aos dados do satélite TRMM na bacia do rio Paraíba do Meio, apresentaram uma correlação de 0,90 entre as séries (Postos x TRMM) enquanto que, ao ponderar as informações obtidas em campo com as informações provenientes do satélite, observa-se ainda uma melhora nessa correlação que passa a ser de 0,94 (Postos x “TRMM+Postos”). Desta forma, os resultados mostraram que a utilização dos dados TRMM é uma ferramenta útil na aquisição de dados pluviométricos, principalmente, em locais com poucos registros ou até mesmo na ausência deles.

Nesse estudo, a modelagem hidrológica a partir do HEC-HMS apresentou resultados satisfatórios na simulação do processo chuva-vazão ao considerar, como dados de entrada, as características fisiográficas da bacia do rio Paraíba do Meio e os dados dos pluviômetros disponíveis em campo. Ressalta-se ainda que os parâmetros foram calibrados para um evento de cheia (cheia de 2000) e, segundo Tucci (2005) devem ser aplicados em estudos nessa bacia, ou em bacias análogas, que visem representar magnitudes semelhantes às do evento estudado.

A validação do modelo hidrológico consistiu na utilização das informações do satélite TRMM ao analisar o evento de cheia ocorrido em 2010 e, mostrou que o cenário 2 foi o que apresentou melhores resultados no posto Atalaia, uma vez que, ao analisar a série corrigida do satélite TRMM (“TRMM+Postos”) foi obtido um R^2 de aproximadamente 0,88 e o COE (coeficiente de eficiência de Nash Sutcliffe) atingiu um valor de 0,91, cujo valor pode ser interpretado como um bom ajuste para o modelo (KRYSANOVA et al., 1998).

Para a calibração do modelo hidráulico, foi implementado um ajuste do coeficiente de Manning (n) das seções transversais em relação às margens e fundo do canal até que os níveis simulados para o rio atingissem as cotas das marcas de cheia levantadas em campo e a mancha de inundação se aproximasse da localização das marcas de cheia, levantadas pela ENGEMAP, correspondentes à cheia de 2010. A utilização de 5 (cinco) marcas de cheia levantadas cerca de

3 anos após o evento com base em relatos da população e registros dos órgãos locais, serviu de apoio a modelagem hidráulica.

Um mapeamento das áreas inundadas da região foi realizado a partir das informações provenientes da simulação hidráulica. O resultado desse mapeamento consistiu na construção de mapas de inundação, apontados como ferramentas essenciais no controle e prevenção de desastres decorrentes de eventos de inundação, ao permitir uma melhor visualização da área de abrangência cujos níveis de um rio são capazes de atingir a depender da vazão analisada.

O acoplamento dos modelos permitiu o mapeamento e análise de risco da área inundada a partir de dados pluviométricos provenientes do satélite TRMM e de variáveis sociais, podendo ser utilizados como ferramentas e informações no subsídio aos gestores no alerta à população e aos comerciantes, instalados nas áreas ribeirinhas do município de Atalaia, quanto aos riscos os quais estão expostos. Essas informações podem auxiliar na promoção de ações mitigadoras, que visem evitar ou diminuir os danos, assim como na redução dos danos socioeconômicos servindo como referência no zoneamento da região.

Desta forma, conclui-se que a metodologia utilizada nesse trabalho é eficaz para a análise de risco em áreas inundáveis, ao considerar o acoplamento de modelos hidrológico e hidráulico a partir das estimativas de intensidade de precipitação do satélite TRMM, podendo ser utilizada em outros estudos na mesma região ou em diferentes regiões.

Recomenda-se, para futuros trabalhos na região, que seja levantado um maior número de marcas de cheia ao longo do trecho do rio a ser analisado, de modo a permitir uma melhor representação do comportamento da cheia nessa região, assim como a realização de um levantamento das marcas logo após a ocorrência do evento, visando melhor subsidiar a modelagem hidráulica.

REFERÊNCIAS

- ARAÚJO, R. S. **Classificação climatológica das nuvens precipitantes no Nordeste Brasileiro utilizando dados do radar a bordo de um satélite TRMM**. 2015. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos-SP, 2015.
- ARCEMENT JR., G. J.; SCHNEIDER, V. R. **Guide for selecting manning's roughness coefficients for natural channels and flood plains**. Federal Highway Administration – FHWA-TD-84-204, 1984.
- BARROS, M. V. F.; MENDES, C.; CASTRO, P. H. M. **Vulnerabilidade socioambiental à inundação na área urbana de londrina – PR**. Revista Franco-Brasileira de Geografia, Número 24, 2015. <<http://confins.revues.org/10228>> Disponível em: 18 de outubro de 2017. doi: 10.4000/confins.10228.
- BAUMANN, C. A.; HALASEH, A. A. **Utilizing Interfacing Tools for GIS, HEC-GeoHMS, HEC-GeoRAS, and ArcHydro**. In: World Environmental and Water Resources Congress, 2011, At 3305-3318 Vol. 414, Palm Springs, 2011.
- BIGNOTTO, R. B. **A aplicação de modelagem hidrológica associada à análise geoespacial para avaliação da vazão na Micro Central hidroelétrica Ilha Anchieta – SP**. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Estadual Paulista, São Paulo, 2013.
- BOLTOKOSKI, V. et al. **Calibração de modelo para simulação de vazão e de fósforo total nas sub-bacias dos rios Conrado e Pinheiro – Pato Branco (PR)**. Revista Brasileira de Ciência do Solo, 34:253-261, 2010.
- CAMPOS, R. G. D. **Curso Básico HEC-RAS**. Universidade Federal de Minas Gerais, MG, 7 e 8 de maio de 2011.
- CHOW, V. T. **Open Channel Hydraulics**. Tokyo: McGraw Hill, 680 p, 1959.
- COLLISCHONN, B. **Uso de precipitação estimada pelo satélite TRMM em modelo hidrológico distribuído**. 2006. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.
- COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M. **Ajuste Multiobjetivo dos Parâmetros de um Modelo Hidrológico**. Revista Brasileira de Recursos Hídricos. Vol. 8, n.3, 27-39, Jul/Set, 2003.
- CUTTER, S. L.; BORUFF, B. J.; SHIRLEY, W. L. **Social Vulnerability to Environmental Hazards**. Social Science Quarterly, Vol. 84, n.2, June, 2003.
- DEMARCHI, J. C.; PIROLI, E. L.; ZIMBACK, C. R. L. **Análise temporal do uso do solo e comparação entre os índices de vegetação NDVI e SAVI no município de Santa Cruz do Rio Pardo – SP usando imagens Landsat-5**. Departamento de Geografia, Curitiba. RA'E GA 21 (2011), p. 234-271. ISSN: 2177-2738.

DRACHLER, M. L. et al. **Desenvolvimento e validação de um índice de vulnerabilidade social aplicado a políticas públicas do SUS**. *Ciência & Saúde Coletiva*, 19(9):3849-3858, 2014. doi: 10.1590/1413-81232014199.12012013.

FALCK, A. S. et al. **Propagation of satellite precipitation uncertainties through a distributed hydrologic model: A case study in the Tocantins-Araguaia basin in Brazil**. *Journal of Hydrology*, 527, 943-957, 2015. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.05.042>

FRAGOSO JR, C. R.; PEDROSA, V. A.; SOUZA, V. C. B. **Reflexões sobre a Cheia de Junho de 2010 nas Bacias do Rio Mundaú e Paraíba**. In: SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE, X., 2010, Fortaleza. Anais... Fortaleza-CE: X SRHN, 2010.

GAIDA, W. et al. **Dinâmica da vegetação e uso da terra com uso do NDVI na bacia hidrográfica do Alto Jacuí**. *Geo UERJ - Ano 14, nº. 23, v. 2, 2º semestre de 2012* p. 684-698. ISSN: 1415-7543.

GAMA, W. M. **Impactos das mudanças climáticas na resposta hidrológica da bacia hidrográfica do rio Paraíba do Meio (AL/PE)**. 2011. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento) – Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2011.

HYDROLOGIC ENGINEERING CENTER - RIVER ANALYSIS SYSTEM (HEC-RAS). **Hydraulic Reference Manual. Version 4.1**. January 2010.

HOLZ, J. **Levantamento e mapeamento do índice de risco de alagamento da bacia do Riacho Reginaldo**. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento) – Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2010.

HORA, S. B.; GOMES, R. L. **Mapeamento e avaliação do risco a inundação do rio Cachoeira em trecho da área urbana do município de Itabuna/BA**. *Revista Sociedade & Natureza*, Uberlândia, 21 (2): 57-75, agosto, 2009.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Censo Demográfico, 2010**. <<http://www.censo2010.ibge.gov.br/sinopseporsetores/?nivel=st>> Disponível em: 25 de outubro de 2016.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Mapas temáticos – Mapa de solo do Brasil**. 2001. <<http://mapas.ibge.gov.br/tematicos/solos>>. Disponível em: 10 de abril de 2016.

ISLAM, T. et al. **Performance evaluation of the TRMM precipitation estimation using ground-based radars from the GPM validation network**. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 77, 194–208, 2012. doi:10.1016/j.jastp.2012.01.001

KAATZ, J. A. **Development of a HEC-HMS Model to Inform River Gauge Placement for a Flood Early Warning System in Uganda**. 2014. Dissertation (Master on Civil and Environmental Engineering), Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, 2014.

KATHOL, J.; WERNER, H.; TROOEN, T. **Predicting runoff for frequency based storms using a precipitation-runoff model**. North-Central Intersectional Meeting of the American Society of Agricultural Engineers (ASAE) and Canadian Society of Agricultural Engineers (CSAE), October 3-4, Fargo, North Dakota: St. Joseph, MI, ASAE Paper RRV03-0046, 2003.

KRYSANOVA, V.; MÜLLER-WOHLFEIL, D.I.; BECKER, A. **Development and test of a spatially distributed hydrological:water quality model for mesoscale watersheds.** Ecological Modelling 106, 261-289, 1998.

KUMMEROW, C. et al. **The Status of the Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) after Two Years in Orbit.** Journal of Applied Meteorology, Vol. 39, 1965-1982, Dezembro, 2000. [http://dx.doi.org/10.1175/1520-0450\(2001\)040<1965:TSOTTR>2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0450(2001)040<1965:TSOTTR>2.0.CO;2).

LYRA, G. B. et al. **Coefficiente de rugosidade de Manning para o rio Paracatu.** Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Vol.14, n.4, p.343-350, 2010.

MONTE, B. E. O. et al. **Modelagem hidrológica e hidráulica aplicada ao mapeamento de áreas inundáveis.** Revista Brasileira de Recursos Hídricos, Vol. 21 n. 1, Porto Alegre jan./mar, p. 152 – 167, 2016. ISSN 2318-0331.

MULUNGO, H. E. et al. **Análise das mudanças do uso do solo e suas consequências na vazão por meio do modelo HEC-HMS: estudo de caso da bacia do Campus da UFSC.** In: Simpósio Luso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, XV, Belo Horizonte. Anais... Belo Horizonte-MG: XV SILUBESA, 2012.

MUÑOZ, V. A.; VALERIANO, M. M. **Mapeamento de planícies inundáveis a partir de MDE e avaliação da exposição à inundação na bacia do rio Itajaí.** In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, XVII., 2015, João Pessoa. Anais... João Pessoa, PB: XVII SBSR, 2015.

MUSTAFFA, N.; AHMAD, N. A.; RAZI, M. A. M. **Variations of Roughness Coefficients with Flow Depth of Grassed Swale.** In: Soft Soil Engineering International Conference 2015 - Materials Science and Engineering, 136, 012082, 2016. doi:10.1088/1757-899X/136/1/012082.

NAGHETTINI, M.; PINTO, E. J. A. **Hidrologia Estatística.** Belo Horizonte: CPRM, 2007. ISBN: 978-85-7499-023-1.

NÓBREGA, R. S.; SOUZA, E. P.; SOUSA, F. A. S. **Análise da utilização de dados do satélite TRMM em um modelo hidrológico semidistribuído na bacia do rio Jamari (RO).** Revista Brasileira de Geografia Física, Recife, Vol.01, n. 01, Mai/Ago, 47-61, 2008.

NUNES, J. F.; ROIG, H. L. **Análise e mapeamento do uso e ocupação do solo da bacia do Alto do Descoberto, DF/GO, por meio de classificação automática baseada em regras e lógica nebulosa.** Revista Árvore, Viçosa-MG, Vol.39, n.1, p.25-36, 2015. <http://dx.doi.org/10.1590/0100-67622015000100003>

OLIVEIRA, D. L.; SOUZA, V. C. B.; FRAGOSO JR., C. R. **Análise Hidrológica da Cheia Excepcional Ocorrida em Junho de 2010 nas Bacias dos Rios Mundaú e Paraíba do Meio em Alagoas e Pernambuco.** Revista Brasileira de Recursos Hídricos, Vol. 19, n.3 –Jul/Set, 279-293, 2014.

PAZ, A. R. **Simulação hidrológica em rios com grandes planícies de inundação.** 2010. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

- PEPLAU, G. R. **Influência da variação da urbanização nas vazões de drenagem na bacia do rio Jacarecica em Maceió-AL**. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2005.
- PEREIRA, G. et al. **Avaliação dos Dados de Precipitação Estimados pelo Satélite TRMM para o Brasil**. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, vol. 18, n. 3 – Jul/Set, 139-148, 2013.
- PRAKASH, S. et al. **From TRMM to GPM: How well can heavy rainfall be detected from space?** Advances in Water Resources 88, 1–7, 2016.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.advwatres.2015.11.008>.
- REBELO, F. **Riscos naturais e ação antrópica: estudos e reflexões**. 2. ed. Coimbra: Imprensa da Universidade de Coimbra, 2003. ISBN: 972-8704-17-8.
- SANTOS, A. G. **Acoplamento do modelo atmosférico WRF ao modelo hidrológico SCS/HMS para a previsão de cheias na bacia do Paraíba do Meio em Alagoas**. 2016. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2016.
- SILVA JR., O. M.; SZLAFSZTEIN, C. F. **A importância dos conceitos de ameaça, vulnerabilidade e risco em planos diretores municipais: estudo de caso no município de Alenquer (Pará)**. Revista GeoAmazônica, 1980-7759, Belém, n. 01, v. 01, p. 55 - 71, jan./jun., 2013. ISSN: 2358-1778. doi: 10.17551/2358-1778/geoamazonia.n1v1p64-80.
- SILVA JR., O. M. **Análise de risco a inundação na cidade de Alenquer – Estado do Pará**. 2010. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Federal do Pará, Belém, 2010.
- SIFONTES, V. E.; MOYA, R. M. P. **Modelación hidrológica con HEC-HMS en cuencas montañosas de la región oriental de Cuba**. Ing. Hidráulica Y Ambiental, Vol. XXXIII, Nº 1, Ene-Abr, 2012. ISSN 1815–591X.
- TANG, G. et al. **Evaluation of GPM Day-1 IMERG and TMPA Version-7 legacy products over Mainland China at multiple spatiotemporal scales**. Journal of Hydrology 533, 152–167, 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.12.008>
- TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: Ciência e Aplicação**. 4. ed. Rio Grande do Sul: UFRGS, 2012. 944p. ISBN: 978-85-7025-924-0.
- TUCCI, C. E. M. **Águas Urbanas**. Estudos Avançados 22 (63), 2008.
- TUCCI, C. E. M. **Modelos Hidrológicos**. 2. ed. Porto Alegre: UFRGS, 2005.
- VENTON, P.; HANSFORD, B. **Reduzindo o risco de desastres em nossas comunidades**. Belo Horizonte: ROOTS 9, 2006. ISBN 1 904364 61 6.

APÊNDICE

APÊNDICE A – Informações fisiográficas da bacia

Sub-bacia	Nome	Área (km ²)	Perímetro (km)	Lag Time (h)	Tc (h)	CN inicial	CN otimizado - Cenário 1	CN otimizado - Cenário 2
1	W420	157,83	104,80	7,04	11,73	73,51	71,49	69,13
2	W430	66,34	64,79	4,65	7,75	72,14	70,16	67,85
3	W440	289,22	186,16	13,53	22,56	67,48	65,63	63,46
4	W450	44,79	44,58	4,25	7,08	65,16	63,37	61,28
5	W460	47,74	62,01	5,50	9,16	70,20	68,27	66,02
6	W470	18,13	30,85	2,33	3,89	69,42	67,52	65,29
7	W480	55,61	59,35	4,26	7,10	73,55	71,53	69,17
8	W490	28,80	36,60	2,64	4,41	68,70	66,82	64,61
9	W500	114,52	87,48	5,94	9,90	69,88	67,96	65,72
10	W510	78,89	69,86	4,47	7,45	68,08	66,21	64,02
11	W520	61,68	86,19	4,49	7,49	69,35	67,45	65,22
12	W530	48,27	71,90	4,37	7,28	68,39	66,52	64,32
13	W540	12,58	21,39	1,44	2,40	76,55	74,45	71,99
14	W550	94,19	75,98	4,46	7,44	69,61	67,70	65,47
15	W560	78,59	84,52	4,15	6,92	73,32	71,31	68,95
16	W570	48,06	55,95	3,17	5,28	69,05	67,16	64,94
17	W580	46,50	58,98	3,62	6,04	65,69	63,89	61,78
18	W590	48,24	49,15	2,60	4,33	68,17	66,30	64,11
19	W600	65,86	53,17	3,74	6,24	68,03	66,16	63,98
20	W610	47,92	50,39	3,26	5,43	68,89	67,00	64,79
21	W620	40,40	51,75	3,18	5,30	71,12	69,16	66,88
22	W630	50,50	58,12	3,18	5,30	75,61	73,54	71,11
23	W640	3,25	12,06	0,82	1,37	77,57	75,44	72,95
24	W650	7,31	22,38	1,45	2,42	80,01	77,81	75,24
25	W660	137,19	96,45	4,91	8,18	68,14	66,27	64,08
26	W670	60,67	68,81	4,06	6,76	78,60	76,44	73,92
27	W680	53,34	62,51	4,59	7,65	68,13	66,26	64,07
28	W690	55,76	62,82	3,76	6,27	69,45	67,55	65,32
29	W700	105,00	80,31	3,73	6,21	75,28	73,22	70,80
30	W710	141,81	103,74	4,06	6,77	73,92	71,89	69,52
31	W720	55,06	76,05	2,96	4,93	72,74	70,75	68,41
32	W730	99,42	80,07	4,54	7,57	69,46	67,55	65,32
33	W740	73,59	73,57	3,67	6,11	74,22	72,18	69,79
34	W750	50,16	61,15	3,73	6,22	74,99	72,93	70,52
35	W760	3,66	16,69	1,58	2,63	72,34	70,35	68,03
36	W770	88,29	86,87	4,53	7,55	71,59	69,63	67,33
37	W780	55,12	55,03	2,76	4,60	71,68	69,71	67,41
38	W790	57,89	60,40	3,57	5,95	71,23	69,28	66,99
39	W800	86,08	83,77	4,05	6,75	68,73	66,85	64,64
40	W810	360,81	190,61	8,48	14,13	69,76	67,85	65,61
41	W820	127,54	92,74	7,21	12,02	62,10	60,39	58,40

APÊNDICE B – Informações dos trechos de rio da bacia

Trecho do Rio	Nome	Comprimento (km)	Declividade (m/m)	Lag Time inicial (h)	Lag Time otimizado (h) - Cenário 1	Lag Time otimizado (h) - Cenário 2
1	R100	14,65	0,006	2,23	4,89	-
2	R120	5,94	0,005	0,61	1,24	-
3	R170	9,88	0,002	1,84	2,49	-
4	R180	1,04	0,007	0,43	0,43	-
5	R200	11,56	0,003	1,14	2,57	-
6	R220	2,22	0,000	2,11	3,22	-
7	R230	13,99	0,008	4,49	4,47	-
8	R260	12,66	0,012	0,46	2,69	-
9	R280	16,22	0,002	5,07	7,74	-
10	R290	6,58	0,009	0,48	1,55	-
11	R300	16,21	0,004	2,72	6,24	-
12	R310	11,39	0,004	2,21	2,18	-
13	R330	19,81	0,005	4,57	4,68	-
14	R340	4,60	0,005	0,67	1,44	-
15	R370	12,96	0,001	4,37	6,56	12,44
16	R390	11,72	0,002	3,09	-	-
17	R410	19,12	0,001	6,07	-	-
18	R50	6,31	0,007	0,80	1,71	-
19	R70	6,92	0,008	0,81	1,74	-
20	R90	64,39	0,005	10,84	16,58	-