



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO

CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

LARISSA FERREIRA DAVID ROMÃO BATISTA

ESTUDO DE INDICADORES DE RISCO DE INUNDAÇÃO NO MUNICÍPIO DO CABO DE SANTO AGOSTINHO

Recife

2015

LARISSA FERREIRA DAVID ROMÃO BATISTA

**ESTUDO DE INDICADORES DE RISCO DE INUNDAÇÃO
NO MUNICÍPIO DO CABO DE SANTO AGOSTINHO**

Dissertação de mestrado apresentada ao
Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Civil, da Universidade Federal de Pernambuco,
como parte dos requisitos para a obtenção do
título de Mestre em Engenharia Civil.

Área de concentração: Recursos
Hídricos.

ORIENTADOR: Prof. Dr. Alfredo Ribeiro Neto

COORIENTADOR: Prof. Dr. Roberto Quental Coutinho

Recife

2015

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

- B333e Batista, Larissa Ferreira David Romão.
Estudo de indicadores de risco de inundação no município do Cabo de Santo Agostinho / Larissa Ferreira David Romão Batista. - Recife: O Autor, 2015.
90 folhas, il., gráfs., tabs.
- Orientador: Prof. Dr. Alfredo Ribeiro Neto.
Coorientador: Prof. Dr. Roberto Quental Coutinho.
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2015.
Inclui Referências.
1. Engenharia Civil. 2. Perigo. 3. Risco. 4. Danos. 5. Indicadores. 6. Inundação. 7. HEC-HMS. 8. HEC-RAS. I. Ribeiro Neto, Alfredo. (Orientador). II. Coutinho, Roberto Quental. (Coorientador). III. Título.

UFPE

624 CDD (22. ed.)

BCTG/2015-200



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

A comissão examinadora da Defesa de Dissertação de Mestrado

**ESTUDO DE INDICADORES DE RISCO DE INUNDAÇÃO NO
MUNICÍPIO DO CABO DE SANTO AGOSTINHO**

defendida por

Larissa Ferreira David Romão Batista

Considera a candidata APROVADA

Recife, 06 de julho de 2015

Orientadores:

Prof. Dr. Alfredo Ribeiro Neto – UFPE
(orientador)

Prof. Dr. Roberto Quental Coutinho - UFPE
(co-orientador)

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Alfredo Ribeiro Neto – UFPE
(orientador)

Prof.^a Dr.^a Simone Rosa da Silva – UPE
(examinadora externa)

Prof. Dr. José Roberto Gonçalves de Azevedo – UFPE
(examinador interno)

AGRADECIMENTOS

Enquanto indivíduos, trilhamos um caminho do qual nada se leva, mas no qual muito se constrói. O aprendizado inerente se faz a todo o momento, no trabalho, no descanso, nas vitórias e nas derrotas, mas principalmente nas trocas. A todos que comigo trocaram, por ajudarem a construir meu aprendizado, agradeço.

Ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil pela oportunidade.

Ao professor Alfredo Ribeiro Neto, sem o qual esta dissertação não teria sido escrita, agradeço pela dedicação, pela paciência e pelo empenho.

Ao professor José Roberto Gonçalves de Azevedo por ter acreditado e me apoiado desde o início.

Ao professor Jaime Joaquim da Silva Pereira Cabral pelo comprometimento e por receber essa arquiteta/engenhaira.

A todos os demais professores do PPGEC/UFPE, da área de concentração em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos pela nobre atividade da transmissão do conhecimento. Em especial aos professores do Grupo de Recursos Hídricos dentre os quais também cito a professora Suzana Maria Gico Lima Montenegro.

Ao convênio Ministério das Cidades / GEGEP – UFPE - Projeto “Elaboração de cartas geotécnicas de aptidão à urbanização frente aos desastres naturais nos Municípios de Camaragibe; Abreu e Lima; Cabo de Santo Agostinho; Jaboatão dos Guararapes, localizados na Região Metropolitana do Recife, Estado de Pernambuco”, do qual esta dissertação é produto, por poder contribuir para o conhecimento dentro da instigante temática dos riscos de desastres, agradeço pelo nome do professor Roberto Quental Coutinho.

A todos os colegas da turma de mestrado por terem dividido generosamente essa experiência ao longo das disciplinas.

A todos os amigos do Grupo de Recursos Hídricos agradeço através dos nomes de Eduardo, Felipe, Victor, Yure, Simone, Cléber, Albert pelo acolhimento, companheirismo e prazerosas conversas acerca da ciência, ou não.

Aos queridos da minha sala, agradeço pelo encontro e por um tempo incrível ao seu lado. A Leidjane por toda a resiliência e carinho, a Ana pela alegria e amizade, e a Zé pela cumplicidade e discussões acerca da vida ou acerca de nada importante, sem esquecer as orientações científicas é claro.

A todos os funcionários da universidade, em especial à Secretaria do PPGEC/UFPE pela disponibilidade, auxílio e zelo.

Aos Órgãos que coletam, tratam e divulgam dados científicos pelo esforço e por sua contribuição imprescindível para a ciência.

A CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pela concessão da bolsa de estudos.

Aos cidadãos brasileiros que através de suas contribuições financiam as universidades públicas, possibilitando a formação de inúmeros profissionais como eu.

Aos meus familiares e amigos por estarem sempre presentes em minha caminhada, independente de quantidades.

Aos meus pais por nunca medirem esforços. Incomensuráveis.

A Deus, pela guia e pelo caminho.

“Everyone has oceans to fly, if they have heart to do it. Is it reckless? Maybe. But what do dreams know of boundaries?”

Amelia Earhart

RESUMO

Mudanças no meio ambiente causadas por ações antrópicas e dinâmicas naturais são evidentes com o aumento do número de eventos extremos, dentre os quais se destacam as inundações por sua abrangência, recorrência e potencial de destruição. A gestão de desastres e as consequentes políticas de mitigação de danos passam pela compreensão do comportamento e interações entre os componentes do risco chamados indicadores. Para tal, foi estabelecida e aplicada metodologia de classificação de indicadores de risco no município do Cabo de Santo Agostinho, Pernambuco, Brasil. Inserida na bacia do rio Pirapama, a cidade do Cabo constitui área em plena expansão com grande relevância econômica para o Estado. Esta pesquisa faz parte do convênio Ministério das Cidades / GEGEP – UFPE - Projeto “Elaboração de cartas geotécnicas de aptidão à urbanização frente aos desastres naturais nos Municípios de Camaragibe; Abreu e Lima; Cabo de Santo Agostinho; Jaboatão dos Guararapes, localizados na Região Metropolitana do Recife, Estado de Pernambuco”. Foram simulados eventos extremos com o uso dos modelos HEC-HMS e HEC-RAS. O modelo hidrológico (HEC-HMS) foi calibrado possibilitando aquisição de hidrogramas para áreas sem dados de vazão observados. O modelo hidrodinâmico (HEC-RAS) simulou eventos em regime permanente para os picos de vazão detectados nos anos de 2000 e 2010, e com auxílio da ferramenta de geoprocessamento, foi possível gerar mapas de profundidade, velocidade e exposição. Foi selecionada uma área na sede do município para estimativa dos danos resultantes das cheias. Foram utilizadas curvas cota-dano desenvolvidas para a cidade de Itajubá/MG. Foi observada a influência fundamental da profundidade para os cenários pós-enchentes, a contribuição determinante da exposição para a origem dos prejuízos e a atuação dos danos diretos para a quantificação da vulnerabilidade, uma vez que são elementos acessíveis. O dano por m² chegou a R\$ 80,29 e se refere apenas à área construída com uso residencial selecionada para a análise.

Palavras-chave: Perigo. Risco. Danos. Indicadores. Inundação. HEC-HMS. HEC-RAS.

ABSTRACT

Environmental changes caused by anthropogenic actions and natural dynamics are evident with the increasing number of extreme events, among which flooding stands out for its scope, recurrence and potential for destruction. Disaster management and the consequent damage mitigation policies must take into account the behavior and interactions between risk components so-called indicators. For this reason, a risk indicators classification methodology was established in the municipality of Cabo de Santo Agostinho, Pernambuco, Brazil. Inserted in the Pirapama River basin, the city of Cabo is in process of expansion and with great economic importance to Pernambuco State. This research is part of a Ministry of Cities / GESEP – UFPE – Project “Elaboração de cartas geotécnicas de aptidão à urbanização frente aos desastres naturais nos Municípios de Camaragibe; Abreu e Lima; Cabo de Santo Agostinho; Jaboatão dos Guararapes, localizados na Região Metropolitana do Recife, Estado de Pernambuco”. Extreme events were simulated with the use of HEC-HMS and HEC-RAS. The hydrological model (HEC-HMS) was calibrated enabling acquisition of hydrographs for ungaged areas. The hydrodynamic model (HEC-RAS) performed steady flow simulations for peak flows observed in 2000 and 2010. Geoprocessing tools aided the generation of depth, flow velocity and exposure. An area of the city was selected for the damage estimation caused by flood events with the use of depth-damage curves developed for the city of Itajubá/MG. The fundamental influence of depth to the post-flood scenarios, the decisive contribution of exposure to the damage source and the direct damage's role for vulnerability's quantification were observed, since they are accessible elements. The calculated damage was about R\$ 80,29/m² (R\$: Brazilian Real Currency), this number refers exclusively to the residential constructed area selected for analysis.

Keywords: Hazard. Risk. Damage. Indicators. Flooding. HEC-HMS. HEC-RAS.

LISTA DE ILUSTRAÇÃO

Figura 1: Organograma conceitual	20
Figura 2: Sumário qualitativo da influência dos parâmetros de impacto em danos de inundação.....	28
Figura 3: Risco de inundação como a interação entre perigo e vulnerabilidade	30
Figura 4: (A) Mapa de perigo de inundação; (B) Mapa de vulnerabilidade; (C) Mapa de danos de inundação; (D) Mapa de risco de danos de inundação	31
Figura 5: Organograma da Metodologia Específica.....	33
Figura 6: Mapa de localização da bacia hidrográfica do rio Pirapama	34
Figura 7: Mapa de localização da bacia hidrográfica do rio Pirapama (municípios)	35
Figura 8: Mapa de declividade da bacia do rio Pirapama.....	36
Figura 9: Área de estudo - sede do Cabo de santo Agostinho.....	37
Figura 10: Setorização da sede do município	39
Figura 11: Ponte dos Carvalhos - Principais eixos de transporte	39
Figura 12: Setor 1 (Vistas frontal da White Martins e aérea do pátio da LanXESS).....	40
Figura 13: Setor 2 (Farmácia, concessionária, lojas de variedades, supermercado)	40
Figura 14: Setor 2 (Escola, Câmara Vereadores, hospital, serviços diversos)	41
Figura 15: Setor 3 (Residências estabelecidas)	41
Figura 16: Ponte dos Carvalhos - Tipologia.....	42
Figura 17: Modelo Digital de Terreno (Topodata, INPE) e contorno da bacia.....	43
Figura 18: Estações de Medição da bacia do rio Pirapama	44
Figura 19: Valores limites dos coeficientes estatísticos	48
Figura 20: Curva de danos x profundidade de submersão, para município de Itajubá... 53	
Figura 21: ID das Estações utilizadas na modelagem hidrológica	54
Figura 22: Hidrograma de calibração da estação 39192000 (abril a agosto de 2000)....	55
Figura 23: Hidrograma de calibração da estação 39192000 (abril a agosto de 2005)....	56
Figura 24: Hidrograma de validação da estação 39192000 (abril a agosto de 2010)....	56
Figura 25: Hidrograma de validação da estação 39192000 (abril a agosto de 2011)....	57
Figura 26: Hidrograma de calibração da estação 39195000 (abril a agosto de 2000)....	57
Figura 27: Hidrograma de calibração da estação 39195000 (abril a agosto de 2005)....	58
Figura 28: Hidrograma de validação da estação 39195000 (abril a agosto de 2010)....	58
Figura 29: Hidrograma de validação da estação 39195000 (abril a agosto de 2011)....	59
Figura 30: Gráfico (Qobs x Qsim) – Estação 39192000 - Calibração.....	59

Figura 31: Gráfico (Qobs x Qsim) – Estação 39192000 – Validação	60
Figura 32: Gráfico (Qobs x Qsim) – Estação 39195000 - Calibração.....	60
Figura 33: Gráfico (Qobs x Qsim) – Estação 39195000 – Validação	61
Figura 34: Locação do trecho da modelagem hidrodinâmica	66
Figura 35: Batimetrias	66
Figura 36: Esquema gráfico - Condições de contorno	68
Figura 37: Curvas de Nível – Cheia 2000	69
Figura 38: Área de estudo – Planície de inundação - Satélite	69
Figura 39: Mapa de Profundidade – Cheia 2000	71
Figura 40: Mapa de Profundidade – Cheia 2010	72
Figura 41: Exposição – Imagem – Cheia de 2010.....	74
Figura 42: Mapa de Exposição – Cheia de 2010	75
Figura 43: Área em estudo para estimativa de danos	76
Figura 44: Delimitação da área construída	77
Figura 45: Raster de profundidades - Cheias 2000 e 2010 - Resolução (1x1) m.....	77

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Estações pluviométricas e séries temporais	44
Tabela 2: Estações fluviométricas e séries temporais	44
Tabela 3: Coeficientes de calibração e validação da estação 39192000	61
Tabela 4: Coeficientes de calibração e validação da estação 39195000	62
Tabela 5: Análise de desempenho	63
Tabela 6: Resultados de calibração	64
Tabela 7: Resultados de validação.....	64
Tabela 8: Desempenho da calibração	64
Tabela 9: Desempenho da verificação.....	65
Tabela 10: Condições de contorno	67
Tabela 11: Faixas de normalização da cota de inundação.....	70
Tabela 12: Percentual de pixels por limiar de cotas atingidas.....	73
Tabela 13: Percentual de exposição.....	74
Tabela 14: Danos potenciais.....	78

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

%Bias	Percent Bias
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANA	Agência Nacional de Águas
APAC	Agência Pernambucana de Águas e Clima
CBIC	Câmara Brasileira da Indústria da Construção
COMPESA	Companhia Pernambucana de Saneamento
CONDEPE/FIDEM	Agência Estadual de Planejamento e Pesquisa de Pernambuco
CPRH	Agência Estadual do Meio Ambiente
D	Desvio padrão
ESRI	Environmental Systems Research Institute
FVI	Flood Vulnerability Index
GL-2	Grupo de Bacias de Pequenos Rios Litorâneos
HEC	Hydrologic Engineering Center
HEC-DSS	Hydrologic Engineering Center`s Data Storage System
HEC-GeoHMS	HEC`s Geospatial Hydrologic Modeling Extension
HEC-GeoRAS	HEC`s Geospatial River Analysis Extension
HEC-HMS	Hydrologic Engineering Center`s Hydrologic Modeling System
HEC-RAS	Hydrologic Engineering Center`s River Analysis System
HIDROWEB	Sistema de Informações Hidrológicas
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
MDT	Modelos Digitais de Terreno
NSE	Nash-Sutcliffe Efficiency
PIB	Produto Interno Bruto
R ²	Coeficiente de determinação
RMR	Região Metropolitana do Recife
SCS	Soil Conservation Service
SIG	Sistemas de Informação Geográfica
SMA	Soil Moisture Accounting
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission
Tr	Tempo de Retorno

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	15
1.1.	JUSTIFICATIVA	16
1.2.	OBJETIVOS	17
2.	REFERENCIAL TEÓRICO	18
2.1.	INUNDAÇÕES	18
2.2.	QUADRO CONCEITUAL	19
2.3.	GESTÃO DE RISCOS.....	23
2.4.	SISTEMAS DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS	24
2.5.	MODELAGEM.....	25
2.6.	INDICADORES.....	26
2.6.1.	INDICADORES DE PERIGO.....	27
2.6.2.	INDICADORES DE VULNERABILIDADE E EXPOSIÇÃO	29
3.	METODOLOGIA DA PESQUISA.....	33
3.1.	BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PIRAPAMA	34
3.1.1.	ÁREA DE ESTUDO	36
3.2.	DADOS DE ENTRADA	42
3.3.	MODELAGEM HIDROLÓGICA	45
3.4.	MODELAGEM HIDRODINÂMICA	49
3.5.	ESTUDO DOS INDICADORES.....	50
3.5.1.	INDICADORES DE PERIGO	50
3.5.2.	INDICADORES DE VULNERABILIDADE E EXPOSIÇÃO	51
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	54
4.1.	MODELAGEM HIDROLÓGICA.....	54
4.2.	MODELAGEM HIDRÁULICA	65
4.3.	INDICADORES	68

5.	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	80
	REFERÊNCIAS	83

1. INTRODUÇÃO

Mudar é uma constante da natureza, adaptar é uma premissa da sobrevivência. Desde os primórdios da humanidade, o ser humano tem se modificado e alterado o ambiente a sua volta de modo a melhor se utilizar dos recursos existentes. Para tal, o conhecimento do meio e de suas dinâmicas é fator fundamental. Observações e consequentes adaptações são procedimentos usados no que diz respeito a assuntos como habitação, transporte, alimentação e comunicação, por exemplo. Essa habilidade basicamente biológica torna-se principal ferramenta das pessoas em seus cada vez maiores agrupamentos sociais, as chamadas cidades.

Mas não apenas as ações antrópicas têm proposto mudanças, com o passar do tempo, as próprias condições ambientais têm sofrido transformações cada vez mais rápidas e abrangentes. E mesmo sem opinião unânime acerca das causas, é evidente o aumento no número de eventos naturais extremos. Os últimos quinze anos testemunharam uma onda de calor na Europa em 2003, um tsunami no oceano Índico em 2004, a atividade devastadora do furacão Katrina nos Estados Unidos em 2005, diversas inundações no Paquistão em 2010 e a passagem do furacão Sandy pela América do Norte em 2012, apenas para citar alguns (KOUSKY, 2014).

A combinação entre tais eventos e os aglomerados populacionais cada vez mais diversos e dispersos compõe situações de risco. Assim, entender as dinâmicas entre o fenômeno natural extremo e uma população passível de ser atingida é dever da gestão de riscos. Tal objetivo pode ser atingido através da análise dos indicadores, ou seja, componentes do risco que caracterizam de maneira simplificada e quantitativa seu comportamento real. Dificuldades quanto à existência e qualidade dos dados por vezes limitam os estudos dos indicadores. No entanto, tais análises se justificam por possibilitarem a eficaz estimativa de cenários pós-desastres e consequentemente das medidas a serem tomadas (KOKS et al., 2015).

Desse modo, o presente trabalho busca entender um pouco dessa realidade, avaliando alguns indicadores com o auxílio de técnicas e softwares de modelagem e de um Sistema de Informação Geográfica. Para tal, esta pesquisa foi desenvolvida em cinco partes. Este primeiro capítulo discorre acerca de temas amplos, justificando e pontuando os objetivos do estudo em questão. O segundo capítulo aborda um levantamento da literatura referente aos vários assuntos estruturadores e integrantes dessa investigação. O terceiro se atém à caracterização da área de estudo e da

metodologia utilizada, enquanto o quarto busca discutir os resultados obtidos. O quinto capítulo conclui a pesquisa.

Esta pesquisa é parte do convênio Ministério das Cidades / GEGEP – UFPE - Projeto “Elaboração de cartas geotécnicas de aptidão à urbanização frente aos desastres naturais nos Municípios de Camaragibe; Abreu e Lima; Cabo de Santo Agostinho; Jaboatão dos Guararapes, localizados na Região Metropolitana do Recife, Estado de Pernambuco”, sob a coordenação do prof. Roberto Quental Coutinho (Área de Geotecnia – DECIV/UFPE).

1.1. Justificativa

Além de prejuízos monetários e infra estruturais, eventos naturais extremos podem causar consequências irreparáveis como a perda de vidas humanas. Neste contexto, as inundações destacam-se como um dos mais comuns fenômenos potencialmente nocivos, ambiental, social e economicamente. Sua frequência e intensidade cada vez maiores fazem do assunto um tema necessário e atual. Seja de modo reativo ou proativo, possíveis respostas, ações de redução de riscos e adaptações merecem ser estudadas de modo a possibilitar uma gestão de riscos eficiente. Esta última passa pela percepção do comportamento, dos impactos, custos e heranças resultantes da interação entre o evento e as pessoas (MIAO & POPP, 2014).

Dessa forma, entender o comportamento e consequências das inundações em quaisquer que sejam suas escalas de atuação é atividade complexa e importante. Para viabilizar e simplificar tal tarefa, são utilizados os indicadores. Tais elementos atuam em atividades como a quantificação de danos, identificação de possíveis medidas de atenuação de riscos e sua adequação a cada cenário, compensação de vítimas, reconstrução, planejamento de ações emergenciais, compreensão da função e papel de cada uma das partes interessadas, seja a população, órgãos técnicos ou o governo.

Assim, muito embora estejam cercados de incertezas, os indicadores atuam de modo eficaz na caracterização de eventos extremos, principalmente no caso de enchentes. Sua análise e a de suas inter-relações possibilitam a previsão, visualização e avaliação de cenários de desastres possíveis ou ocorridos (WANG et al., 2014). O que só acontece através da simulação dos fenômenos naturais em questão, ou seja, a chamada modelagem, que permite o desenvolvimento de estudos hidrológicos tanto antes, como

depois da ocorrência de tais eventos, destacando mais uma vez a importância do tema escolhido (MOLINARI et al., 2014).

A metodologia desta pesquisa será aplicada a uma área do município do Cabo de Santo Agostinho, Região Metropolitana do Recife. Esta é uma zona em plena expansão no Estado de Pernambuco, onde além de extensa infraestrutura, uma ampla rede de negócios e serviços está sendo construída. A avaliação de vulnerabilidades, possíveis perigos e prejuízos causados a empreendimentos desta região no caso de um evento extremo são de grande interesse a ambos os setores privado e público.

1.2. Objetivos

O objetivo geral da dissertação é estabelecer e aplicar metodologia de classificação de indicadores de risco no município do Cabo de Santo Agostinho, Pernambuco, Brasil.

Como objetivos específicos, relacionam-se:

- Calibrar e validar o modelo hidrológico HEC-HMS para a bacia do rio Pirapama;
- Simular eventos extremos em regime permanente com o modelo hidrodinâmico HEC-RAS para a mesma bacia;
- Estabelecer indicadores de risco no município do Cabo de Santo Agostinho;
- Gerar mapas de perigo e exposição na área urbana de Cabo de Santo Agostinho que sofre inundação do rio Pirapama;
- Estimar danos potenciais para os eventos simulados em área selecionada na sede do Cabo.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. Inundações

As enchentes também são parte da natureza e compõem o grupo de fenômenos que mantêm os ciclos naturais em movimento. As cheias dos rios são eventos periódicos de extravasamento das águas do canal principal que passam a ocupar uma região de várzea nem sempre alagada. Em estudo feito na bacia do Baixo Mekong na Ásia, Nikula (2008) destaca a importância das enchentes para a manutenção dos nutrientes do solo e para a riqueza da produtividade biológica de organismos. Tais fatores contribuem para o ser humano à medida que promovem a pesca e a agricultura da região, acentuando o caráter das cheias enquanto provedoras de serviços ambientais. Estes últimos, nada mais são do que benefícios originados por funções desempenhadas pela natureza, como por exemplo, o conforto ambiental trazido pela sombra das árvores, ou a interceptação de poluentes atmosféricos por florestas urbanas.

No entanto, as mesmas cheias que possibilitaram o desenvolvimento natural da região asiática citada causaram inúmeras mortes e perdas econômicas entre os anos de 2000 a 2002, como aponta Nikula (2008). Uma vez que encontram e impactam populações vulneráveis, as enchentes acabam geralmente associadas a imagens de destruição, sendo itens recorrentes em listas como as que enumeram anualmente os eventos naturais mais nocivos ao ser humano. Em 2009, dos desastres mundiais relacionados a eventos de caráter hidrológico, 80% foram inundações, com aproximadamente 50 milhões de pessoas afetadas. Nos dois anos seguintes, tanto em 2010 quanto em 2011, dos dez eventos com maior número de vítimas, seis foram classificados como inundação. Esta última foi o evento anual mais abrangente também em 2012, tendo atingido 17,4 milhões de pessoas no mês de junho na China. Nesse mesmo ano, a Austrália calculou prejuízo de aproximadamente US\$ 500 milhões, enquanto que o Reino Unido somou mais de US\$ 2 bilhões em perdas relacionadas em ambos os casos à ocorrência de inundações (VOS et al., 2010; GUHA-SAPIR et al., 2011; GUHA-SAPIR et al., 2012; GUHA-SAPIR ET AL., 2013).

No Brasil, o cenário não é muito diferente, o Atlas Brasileiro de Desastres Naturais (UFSC, 2012) mostra através de números e mapas temáticos um panorama nacional dos desastres entre os anos 1991 e 2010. Nesse intervalo de vinte anos, o aumento da frequência de tais eventos foi evidente, com 28% das ocorrências registradas na década de 1990, e 72% correspondendo à década de 2000. Já no que concerne às vítimas, as

inundações bruscas destacaram-se por serem os eventos mais mortíferos, contabilizando 43,19% do total de mortes por desastres naturais. Outros documentos também ilustram esse quadro, como por exemplo, o Anuário Brasileiro de Desastres Naturais publicado pelo Ministério da Integração Nacional que somou mais de 2 milhões de pessoas afetadas em 2011 e mais de 5 milhões em 2012 (BRASIL, 2012; BRASIL, 2012). Os eventos estão distribuídos ao longo do ano por todas as regiões brasileiras demonstrando a diversidade climática e a extensa rede hidrográfica existente no país.

Em Pernambuco, o registro de eventos de enchentes é extenso e com amplo histórico de destruição. Em 1970, por exemplo, o município do Cabo foi o mais prejudicado devido a inundações ocorridas no mês de julho. O transbordamento dos rios Pirapama e Gurjaú resultou em hospitais inacessíveis e indústrias paralisadas (ALCOFORADO, 2006). Já neste século, chuvas fortes deixaram sua marca nos anos 2000, 2004, 2005, 2010 e 2011. Com destaque para 2010 quando um grande desastre atingiu Pernambuco e Alagoas, levando diversos municípios a decretarem situação de emergência.

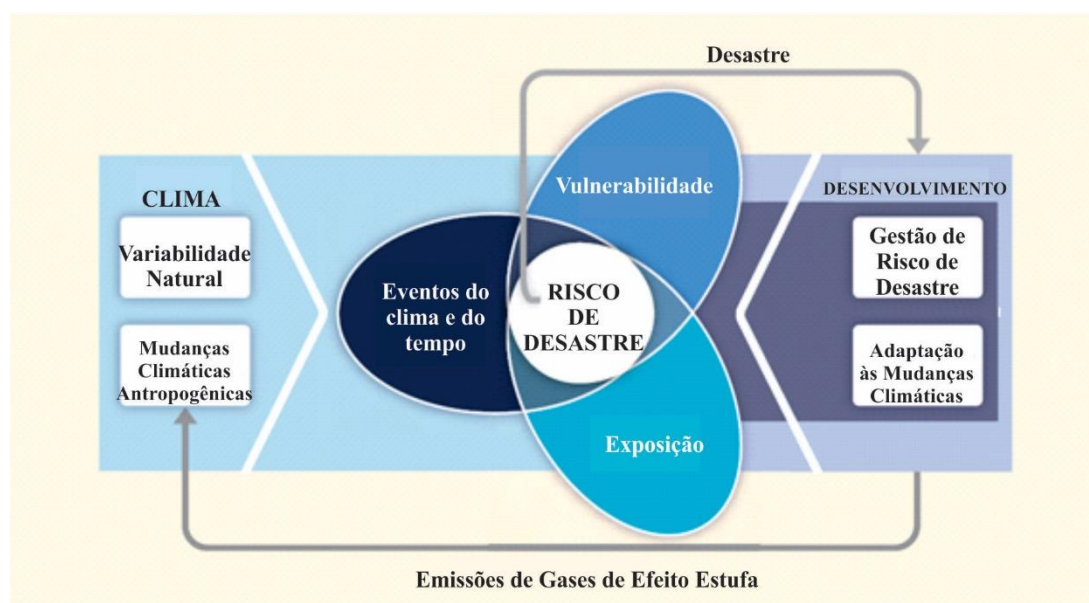
Contudo os danos causados pelas inundações não são resultado apenas da ocorrência de um evento natural extremo, mas sim de sua combinação com uma população vulnerável estabelecida em local propenso a sofrer com tal fenômeno. Logo, entender os conceitos, componentes, causas e consequências envolvidas no processo de formação dos riscos de desastres, são de grande relevância para qualquer estudo acerca de inundações.

2.2. Quadro conceitual

A relação do ser humano com a água vem dos primórdios da história, o estabelecimento dos assentamentos populacionais, que hoje chamamos de cidades, foi usualmente motivado pela proximidade com corpos d'água e pela facilidade de serviços como abastecimento, irrigação, transporte, dentre outros (TURRERO et al., 2013). No entanto, essa ocupação realizada a uma pequena distância dos cursos d'água e, atualmente, outros agravantes como a urbanização desordenada acabaram por evidenciar e maximizar elementos como desastres e riscos (VIGLIONE et al., 2014). Dentro deste contexto, é relevante definir alguns dos conceitos que nortearão este trabalho.

Na busca por qualificar e quantificar desastres, causas e consequências, diversos estudos foram realizados, construindo uma vasta e rica base teórica acerca do tema. Mesmo com diferenças no que concerne à titulação de cada componente do desastre, é possível detectar semelhanças entre conceitos e práticas. A maioria dos pesquisadores desenvolvem seus próprios quadros conceituais de modo que possam expressar o conteúdo de seus estudos com maior clareza. Assim, mesmo não havendo uma padronização rígida ou normativa que possa uniformizar e aproximar os conceitos a nível mundial, as definições estabelecidas por alguns órgãos são ponto de partida para estruturação teórica de pesquisas. Dessa forma, a categorização escolhida como base para esta investigação foi desenvolvida pelo *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC), um corpo científico patrocinado pelas Nações Unidas que revisa e analisa toda a informação produzida referente a mudanças climáticas (ver Figura 1).

Figura 1: Organograma conceitual



Fonte: Adaptado de LAVELL et al., 2012

Como marco inicial, têm-se os desastres caracterizados como alterações resultantes da interação entre fenômenos naturais perigosos e as condições sociais e físicas de uma comunidade, impactando de modo adverso as pessoas, a economia, o meio ambiente, a infraestrutura, a saúde, ou seja, as diversas esferas formadoras de um sistema. Também estão relacionadas ao desastre as respostas emergenciais e ações pós-evento. Da ameaça de que uma situação dessas atinja uma população, é originado o risco (LAVELL et al., 2012). Este último, concretizado na ocorrência do desastre, é recorrentemente definido

pela probabilidade de interação entre perigo e vulnerabilidade (BIRKMANN, 2006; BIRKMANN et al., 2013; MERZ et al., 2010). O IPCC ainda adiciona um terceiro fator a esta soma, a exposição (LAVELL et al., 2012).

Com significado simples, a exposição é categorizada pela potencialidade de prejuízos a pessoas, bens, serviços e recursos resultante de sua localização geográfica. Por exemplo, a proximidade de rios torna uma comunidade mais propensa, ou mais exposta a sofrer quando da ocorrência de uma enchente. Já o perigo está relacionado ao fenômeno natural. Para sua existência é necessária a presença de um evento natural extremo e potencialmente danoso, neste caso a inundação. A possibilidade de prejuízos, perdas e danos é que classifica o evento em perigoso e não apenas a sua ocorrência (LAVELL et al., 2012).

Por sua vez, o terceiro fator do risco, a vulnerabilidade, é aspecto referente à população atingida. Sua definição não apresenta consenso entre os autores, seu caráter multidimensional e a dinâmica de seus constituintes destacam sua complexidade e abrangência. Temporalmente mutável e dificilmente quantificável em sua plenitude, a condição vulnerável de uma população está intimamente ligada ao perfil da comunidade, as habilidades que possui e o modo como as utiliza para lidar, resistir e se recuperar de situações de perigo (BIRKMANN et al., 2013; ADGER, 2006). Sendo construída ao longo do tempo e paralelamente ao desenvolvimento de aspectos comunitários, a vulnerabilidade estrutura-se a partir de elementos relevantes como a suscetibilidade e a resiliência.

Responsável por grande parte do aspecto multidisciplinar da vulnerabilidade, a suscetibilidade, pode ser classificada em social, econômica, política, cultural, ambiental, dentre outras. Normalmente identificada por índices, a suscetibilidade é obtida através de um ou mais dos fatores citados, resultando no nível de predisposição a que uma população, um local ou sistema está sujeito a sofrer com danos provenientes de eventos perigosos (BIRKMANN et al., 2013; MERZ et al., 2010). Desse modo, à medida que a suscetibilidade de uma comunidade aumenta, proporcionalmente cresce sua vulnerabilidade.

Apesar de seu protagonismo, o índice de suscetibilidade de uma população precisa ser somado ao de sua resiliência para que se possa determinar de maneira mais real o quão vulneráveis são essas pessoas. A resiliência efetiva a parcela da vulnerabilidade que concerne a preparação da comunidade para a possibilidade do evento, com pensamento em medidas a serem tomadas antes, durante e após. O Escritório para

Redução de Riscos de Desastres das Nações Unidas (UNISDR, 2009) estabelece uma determinação clara para resiliência:

“A habilidade de um sistema, comunidade ou sociedade exposta a riscos de resistir, absorver, acomodar e se recuperar dos efeitos de um perigo em tempo e de maneira eficiente, inclusive através da preservação e restauração de suas estruturas e funções básicas.”

Ainda é relevante destacar um elemento intimamente relacionado e por vezes confundido com a vulnerabilidade, a capacidade. De acordo com Lavell et al. (2012), este fator é definido pelo grupo externo de forças, atributos e recursos disponíveis para uso do indivíduo ou da comunidade por exemplo. Ou seja, é possível que uma população disponha de um sistema de alerta, sendo, assim capaz de prevenir uma parcela das perdas. No entanto, na ocorrência do evento, o sistema não é utilizado por qualquer razão, desse modo a tal capacidade não se concretiza. A vulnerabilidade dessa comunidade, portanto, era relativa e não absoluta.

Todos esses conceitos estão imersos nas dinâmicas das mudanças climáticas trabalhando para avançar num desenvolvimento sustentável embasado na gestão de desastres e na consolidação de um conceito biológico antigo ultimamente renovado, a adaptação.

Com origem nas ciências naturais, a adaptação pressupõe aprendizado adquirido em situações de desastres e aplicado em estratégias e técnicas conhecidas por capacidades adaptativas, que moldam os sistemas humanos e naturais, buscando redução dos impactos negativos e explorando possíveis melhorias (UNISDR, 2009). Baseia-se aqui na ideia de que as pessoas não podem controlar os perigos, mas podem aprender a conviver com os mesmos (LEI & WANG, 2014).

Contudo, a reconstrução de infraestruturas idênticas às existentes antes do desastre é prática muito comum e nociva uma vez que vê o risco como um fator exclusivamente natural e externo, desassociado das ações humanas e de seu modo de vida no meio que habita (BIRKMANN & VON TEICHMAN, 2010). A compreensão das características da comunidade em questão, assim como dos eventos naturais e das consequências da interação de ambos é extremamente relevante para que a proposição de medidas pós-desastre possibilite mudanças na infraestrutura e no estilo de vida da população.

Logo, o conceito de adaptação é quantificado através das capacidades adaptativas de um indivíduo, população, edificação, infraestrutura, ou sistema, que atuando na compreensão da vulnerabilidade pelo desenvolvimento das habilidades de resiliência e diminuição das suscetibilidades existentes busca reduzir riscos e minimizar os impactos de desastres (SMIT & WANDEL, 2006).

2.3. Gestão de Riscos

O conhecimento holístico dos riscos de desastres passa pela compreensão das características teóricas e do comportamento prático de seus componentes, suas interações, causas e consequências. O aumento populacional em áreas propensas a inundações, a falta de fiscalização e cumprimento do planejamento urbano quando de sua existência, as diversas questões ambientais e climáticas são apenas algumas das variáveis formadoras do risco, que no âmbito da gestão, vão se tornando cada vez mais complexas (DJALANTE et al., 2013).

O desenvolvimento de uma gestão sustentável de riscos passa pela participação das diversas partes interessadas, população residente, governo e setor privado. As gestões atuais tendem à parcialidade, uma vez que se limitam a escolher entre medidas estruturais (obras de engenharia) e não estruturais (planejamento urbano, programas de seguros, educação, etc.), entre investimentos públicos e privados, entre ações de prevenção e resposta, sem ter o prévio conhecimento das reais características físicas e socioeconômicas do lugar em que atuam (GHANBARPOUR et al., 2014).

Desse modo, existe a necessidade de novos paradigmas que atuem como norteadores do desenvolvimento de legislações, planos e ações de mitigação dos riscos. Paradigmas que incorporem a essência multidisciplinar da gestão, associando dimensões sociais, ambientais e políticas com as possibilidades tecnológicas de resposta, entendendo as complexidades e incertezas inerentes à previsão de eventos extremos (GODDEN & KUNG, 2011).

No que concerne ao entendimento do fenômeno natural, são necessárias ferramentas computacionais, como os Sistemas de Informação Geográfica (SIG) e modelos matemáticos detalhados nos itens 2.4 e 2.5, ferramentas importantes que avaliam cenários reais atuais e simulam possíveis cenários futuros. Os modelos matemáticos podem ser utilizados de modo integrado, para representação virtual da realidade através

do teste de teorias, interações e comportamentos tanto dos fenômenos como de seus indicadores (WINZ et al., 2009).

Assim, através da utilização de dados devidamente georreferenciados, tais tecnologias permitem a criação de mapas cujas informações atuam no direcionamento das políticas, planos e ações anteriormente citadas.

2.4. Sistemas de Informações Geográficas

A Geografia ao longo do tempo preocupou-se em representar o espaço físico da maneira mais precisa possível. Para tanto, foi criada uma linguagem própria de modo que as informações pudessem ser compreendidas e compartilhadas. Com o desenvolvimento da ciência cartográfica, os mapas consolidaram-se enquanto principal fonte de informações espaciais. Na década de 60 do século XX, o avanço tecnológico e o desenvolvimento computacional levaram ao surgimento dos Sistemas de Informação Geográfica (SIG).

Os SIG's são softwares que funcionam como plataformas nas quais é possível armazenar, visualizar, analisar, integrar e transmitir informações geográficas. Esses sistemas permitem simular cenários físicos reais através de dados georreferenciados, ou seja, todos os objetos são representados com suas devidas coordenadas, reproduzindo com exatidão sua posição no espaço. Os elementos são classificados em diferentes camadas (layers) de acordo com sua natureza, possibilitando fácil assimilação, organização e manipulação dos dados. Além do já mencionado sistema de coordenadas, os SIG's se utilizam de escalas, sistemas de projeção e simbologia própria para representação dos elementos espaciais de modo a preservar a hierarquia entre os mesmos.

O constante desenvolvimento dessa tecnologia permite cada vez mais fácil e rápida aquisição, processamento e distribuição de informações geográficas com maior acurácia, através de mapas ou outros dispositivos eletrônicos. Assim, a representação do mundo físico passa a ser feita pelos SIG's com uma nova linguagem geográfica, na qual integração tecnológica, fundamentação matemática e abordagem multidisciplinar são os princípios norteadores dessas ferramentas essenciais à gestão, principalmente, dos recursos naturais (HU et al., 2014).

2.5. Modelagem

De um modo geral, o modelo é o meio através do qual se representa um fenômeno possibilitando estudo e entendimento de seus componentes, suas características, relações e comportamentos. A modelagem é realizada através de equações que representam sistemas naturais complexos. Tais equações utilizam variáveis chamadas de parâmetros que precisam ser determinadas ou por meio de calibração ou levantamento em campo.

No âmbito dos recursos hídricos, a bacia hidrográfica é o principal objeto de estudo para o qual muito comumente é realizada a modelagem hidrológica. Esta última descreve o ciclo hidrológico e todos os processos que o compõe, desde a precipitação, passando pela interceptação, evapotranspiração, infiltração, até o escoamento. Os modelos hidrológicos realizam simulações computacionais testando hipóteses relacionadas ao fenômeno em estudo. A qualidade dos dados de entrada, a influência dos parâmetros do modelo e as características das variáveis envolvidas são questões que vão sendo analisadas à medida que as diferentes etapas da modelagem são executadas, de modo que se possa garantir a consistência dos resultados a serem obtidos (ALEXANDRE, 2013).

Várias são as classificações referentes aos modelos. Os hidrológicos podem ser nomeados em concentrados, quando suas variáveis representam toda a área de interesse, ou em distribuídos, quando a variabilidade espacial de tais variáveis é considerada. Também é possível distingui-los pelo tipo de relação de suas variáveis, sendo empíricos, quando se baseiam em observações provenientes do local em estudo, e conceituais ou físicos, quando estão associados aos processos através de equações (SANTOS, 2013).

Outros modelos relevantes são os hidrodinâmicos, os quais se utilizam de equações matemáticas para representação do comportamento do fluido em si, neste caso a água. A modelagem hidrodinâmica abrange variáveis como vazão, velocidade e profundidade, considerando também as características físicas referentes à calha fluvial (ALCOFORADO, 2001).

Aliados aos citados acima, é relevante destacar a função dos Modelos Digitais de Terreno (MDT), os quais são majoritariamente utilizados como base para estudos envolvendo modelagem hidrológica e hidrodinâmica por serem representações do relevo. Os valores altimétricos do terreno são interpolados de modo a originarem uma

superfície contínua. Podendo ser encontrados com diferentes resoluções, e apresentando formato raster (matriz), ou seja, no qual cada célula (pixel) possui um valor de elevação, os MDT representam o terreno em meio digital (MORAES, 2014).

Possuindo ampla aplicação como, por exemplo, no mapeamento de planícies de inundação, tais ferramentas atuam desde estudos científicos, planejamento espacial e emergencial (evacuação), até o estabelecimento de legislações referentes a recursos naturais (MOEL et al., 2009).

2.6. Indicadores

O uso combinado de todos os elementos e instrumentos citados anteriormente são de grande importância uma vez que proporcionam um quadro mais completo da realidade dos eventos hidrológicos extremos e suas consequências, o que começa a partir da compreensão dos indicadores tanto do perigo (evento) quanto da exposição e vulnerabilidade (consequências).

No que concerne ao evento natural potencialmente prejudicial, inundação (perigo), dentre os indicadores podem ser encontrados profundidade da água, velocidade de fluxo, duração, propagação da frente de água, taxa de elevação da água e extensão, sendo este último o mais comum na execução de mapas (MOEL et al., 2009).

Os indicadores de vulnerabilidade caracterizam-se por sua variabilidade temporal e espacial, sendo alguns exemplos, a renda nacional per capita, a média dos salários líquidos, salários por empregado, Produto Interno Bruto (PIB), densidade populacional, e até índices de mortalidade ou perdas por desastres passados. Sejam econômicos, físicos ou demográficos, tais parâmetros podem ser tanto quantitativos quanto qualitativos, dificultando sua abordagem que acaba sendo feita majoritariamente através de índices (KOVACEVIC-MAJKIC et al., 2014). E a exposição por sua vez é direta e determinada por indicadores espaciais de localização da população, comumente apresentados através de mapeamento.

Assim, agentes na caracterização dos cenários de desastre e suas respectivas consequências, os indicadores aparecem frequentemente associados aos danos resultantes de inundações, os quais recebem classificação de modo a padronizar metodologias e facilitar sua contabilização.

Quando classificados em diretos, os danos resultam do contato físico do ser humano, propriedade ou qualquer outro bem com o perigo, neste caso a água da

enchente. Já os danos indiretos consequentemente são apenas induzidos pelo evento, como por exemplo, a interrupção de negócios e serviços. Independente do grau de contato, ambos os tipos de danos ainda podem ser categorizados em tangíveis, quando uma avaliação monetária pode ser realizada, e intangíveis que ocorrem no caso de perdas não mensuráveis (MEYER et al., 2013).

Os danos diretos tangíveis são os mais estudados devido à maior acessibilidade dessa informação, no entanto a escassez, a enorme variabilidade e as incertezas ligadas à modelagem de dados referentes às perdas originadas por desastres naturais é constatação recorrente em trabalhos científicos (MEYER et al., 2013; MERZ et al., 2013; ELMER et al., 2010; BUBECK et al., 2011; BLANCO-VOGT & SCHANZE, 2014). A literatura apresenta majoritariamente uma abordagem dos danos associada ao comportamento dos indicadores de vulnerabilidade ou perigo.

2.6.1. Indicadores de Perigo

No que concerne ao perigo, fenômeno potencialmente danoso, dois trabalhos se destacam pela quantidade expressiva e incomum de dados observados e documentados no que concerne a danos de inundação. Ambos abordam metodologia desenvolvida através de indicadores aplicados a uma grande inundação que tomou os rios Elba e Danúbio em agosto de 2002. Atingindo, principalmente, o Estado alemão da Saxônia, essa cheia originou mais de 11 bilhões de Euros contabilizados em prejuízos e demonstrou os diferentes comportamentos hidrológicos dos rios ao longo de sua extensão. Alguns tributários chegaram a apresentar tempo de retorno excepcional de mais de 500 anos.

O primeiro estudo, realizado por Kreibich et al. (2009), procurou a relevância dos então chamados parâmetros de impacto para as perdas derivadas da inundação. Os conjuntos de dados foram coletados a partir de entrevistas e levantamentos de campo pós-evento, além de informações de arquivos públicos para cruzamento e validação. Simulações hidráulicas (2D), realizadas para eventos de 20, 50 e 100 anos de tempo de retorno, tiveram o objetivo de originar informações quanto à profundidade e velocidade para uso em mapeamentos de risco e análises de custo benefício.

Os parâmetros utilizados foram profundidade, velocidade e combinações de ambas, resultando em energia, fluxo de força e intensidade. As equações dos indicadores combinados são as seguintes:

$$Energia = h + \frac{v^2}{2g} \quad (1)$$

$$Fluxo\ de\ força = hv^2 \quad (2)$$

$$Intensidade = vh \quad (3)$$

Com “h” representado a profundidade da água (m), “v” a velocidade de fluxo (m/s) e “g” a aceleração da gravidade (9,8 m/s²).

Foram avaliados danos estruturais a residências e infraestrutura de rodovias, perdas monetárias e interrupção de negócios. O grau das correlações obtidas está ilustrado na Figura 2.

Figura 2: Sumário qualitativo da influência dos parâmetros de impacto em danos de inundação

Parâmetros de impacto	Tipos de danos				
	Danos estruturais a edifícios residenciais	Danos estruturais a infraestrutura de rodovias	Perdas monetárias a edifícios em residências	Perdas monetárias a edifícios em infraestrutura de rodovias	Interrupção de negócios e duração
Velocidade do fluxo	NENHUMA	FORTE	FRACA	NENHUMA	NENHUMA
Profundidade da água	FORTE	MÉDIA	MÉDIA	NENHUMA	MÉDIA
Energia	FORTE	MÉDIA	MÉDIA	NENHUMA	FRACA
Indicador para força de fluxo	FRACA	FORTE	FRACA	NENHUMA	NENHUMA
Intensidade	FRACA	FORTE	FRACA	NENHUMA	FRACA

Fonte: Adaptado de KREIBICH et al., 2009.

Quanto aos prejuízos estruturais em edificações residenciais, foco desta pesquisa, as maiores correlações encontradas foram com a profundidade e a energia. Esta última, formada por uma parcela potencial (profundidade), de maior influência, e outra parcela cinética (velocidade), foi sugerida como indicador de impacto apropriado para uso em previsões de danos estruturais. Isso porque a participação de ambas, a velocidade e a profundidade, foram constatadas nas consequências pós-evento. Os demais parâmetros exerceram ação menor.

Já o estudo realizado por Thieken et al. (2005) analisa danos causados a propriedades com dados obtidos em sua quase totalidade através de entrevistas coletadas após a cheia de 2002. Mesmo destacando a relevância e popularidade das funções profundidade-dano, internacionalmente aceitas como método padrão da estimativa de prejuízos, a pesquisa investiga vários outros indicadores, com ênfase no perigo, mas também abrangendo a vulnerabilidade. São eles profundidade, velocidade, duração, contaminação da água, sistemas de alerta existentes, medidas de emergência, medidas de previsão, experiência com eventos anteriores e status socioeconômico da população.

O processamento dos dados foi feito através da discretização, análises estatísticas de suas devidas correlações e estabelecimento de escalas, ou índices de cada um dos fatores. Os entrevistados avaliavam cada um dos indicadores identificando seu grau de percepção. Por exemplo, a velocidade tinha uma classificação de 1 a 6, a primeira para fluxo lento e a última para comportamento turbulento e rápido. Para validação, a maioria das informações foi cruzada com dados de arquivos públicos, do banco da Saxônia, órgão responsável por prestar assistência aos cidadãos, e das companhias de seguro.

Os resultados obtidos destacaram a profundidade, duração e contaminação como as variáveis de impacto de maior influência nos danos, os quais foram definidos pelas perdas monetárias referentes às edificações e bens contidos nas mesmas. As demais variáveis tiveram importância secundária e contribuíram de maneira mais tímida para as consequências totais. Assim, o trabalho destaca a importância do estudo contínuo desses parâmetros, principalmente, uma vez que cada evento pode apresentar particularidades de comportamento que venham a interferir nos resultados de uma estimativa de danos.

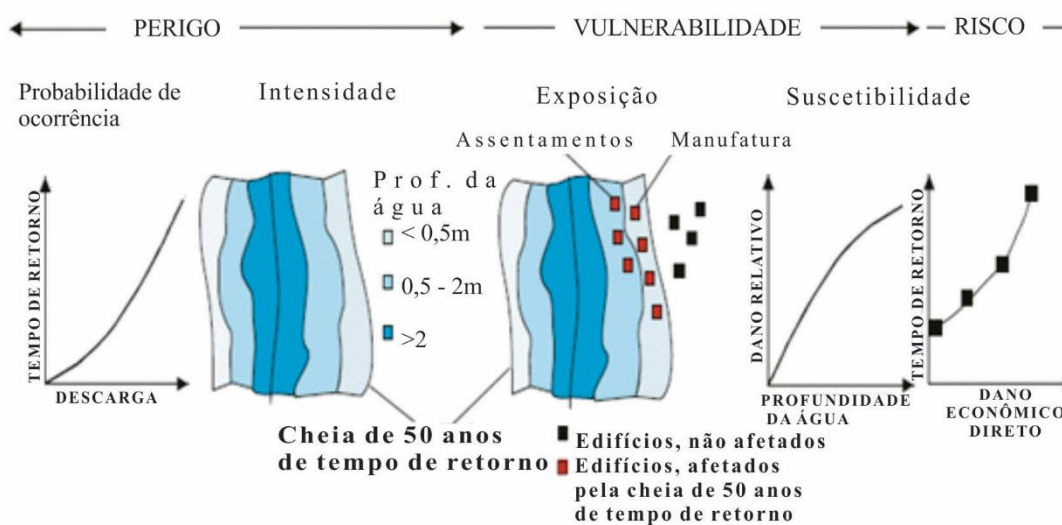
2.6.2. Indicadores de Vulnerabilidade e Exposição

Como já esclarecido, a vulnerabilidade é conceito multifacetado difícil de ser definido quantitativamente. As análises clássicas que buscam tais objetivos restringem-se apenas a fatores financeiros. No entanto, existem outros elementos intrínsecos e relacionados à gestão de riscos de grande relevância e influência no real perfil da vulnerabilidade como, por exemplo, a qualidade das construções, a existência de sistemas de alerta e a capacidade organizacional da sociedade e de suas instituições pós-desastre (MACHADO et al., 2005).

O desmembramento em índices e seus respectivos indicadores é metodologia usual na tentativa de simplificar, mas ainda assim viabilizar, uma representação confiável da vulnerabilidade. Exemplo disso foi realizado por pesquisadores da UNESCO que após desenvolverem o *Flood Vulnerability Index* (FVI), do inglês Índice de Vulnerabilidade a Inundações, precisaram reduzir a quantidade de seus indicadores de modo a torná-lo mais acessível e direto. A metodologia buscou selecionar o mínimo de parâmetros que caracterizassem o sistema em quatro aspectos, social, econômico, ambiental e físico, destacando como interessante a flexibilidade da vulnerabilidade, a qual pode ser examinada em níveis e escalas diferentes (BALICA & WRIGHT, 2010).

Assim, destaca-se como suporte à metodologia a ser desenvolvida nesta pesquisa o trabalho de Merz et al. (2007), que decompõe vulnerabilidade em exposição e suscetibilidade (ver Figura 3). Mesmo com uma conceituação um pouco diferente e bem mais simplificada que o quadro teórico desenvolvido por Lavell et al. (2012), o estudo abrange elementos chave para a classificação do risco. O primeiro componente, exposição, é quantificado através do número de elementos expostos, ou seja, a quantidade de edificações assentadas na área inundável, respondendo à pergunta proposta de “Quem ou o que será afetado?”. E o segundo item, suscetibilidade, é caracterizado por funções relativas de danos, respondendo à pergunta “Como os elementos afetados serão prejudicados?”. O grau de dano sofrido pelas edificações é estimado a partir de análises de perda monetária associadas ao uso do prédio e à profundidade de inundação, traduzidas em curvas profundidade-dano (conhecidas em inglês por “depth-damage curves”).

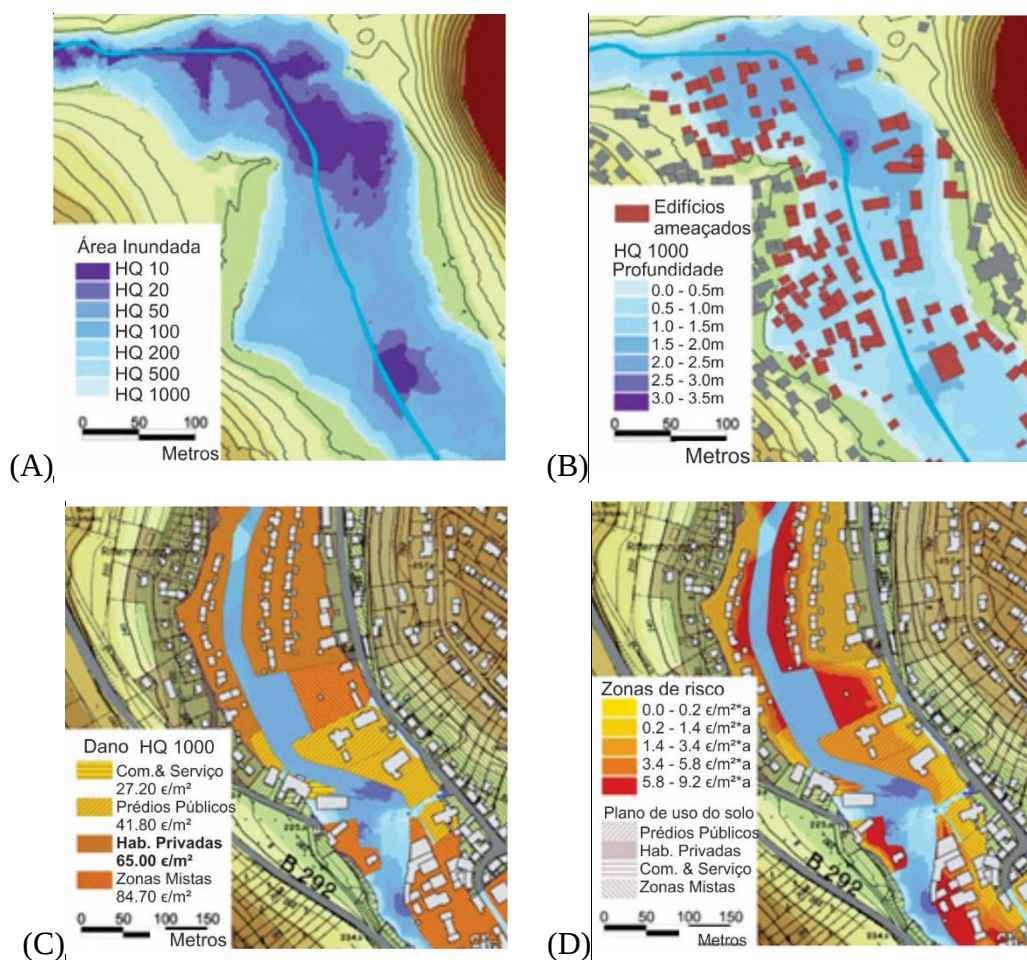
Figura 3: Risco de inundação como a interação entre perigo e vulnerabilidade



Fonte: Adaptado de MERZ et al. (2007)

Dessa forma, para produção da análise de risco, Merz et al. (2007) propõem e apresentam um método de mapeamento sistemático em escala local, exemplificado na Figura 4. O primeiro mapa é o de perigo (A), estando representadas as extensões de inundação para eventos de diferentes tempos de retorno. O segundo mapa caracteriza a exposição (B), apresentando quais edificações seriam atingidas por uma cheia de tempo de retorno de 1000 anos. O terceiro mapa ilustra a suscetibilidade econômica através do prejuízo médio esperado para cada tipo de uso do solo (C). Neste último caso, o autor justifica que os valores monetários de cada setor econômico podem ser derivados de dados estatísticos, provenientes de seguradoras, por exemplo. E por fim, o último mapa sintetiza as informações no que se classificou como risco (D).

Figura 4: (A) Mapa de perigo de inundação; (B) Mapa de vulnerabilidade; (C) Mapa de danos de inundação; (D) Mapa de risco de danos de inundação



Fonte: MERZ et al. (2007)

Outro trabalho que merece menção nesta temática desenvolve um Índice de Risco de Cheia testado com dados referentes à bacia do rio Joana, no Estado do Rio de Janeiro, Brasil (ZONENSEIN, 2007). A pesquisa define indicadores de naturezas diferentes, normaliza-os e estabelece o peso que cada um possui no risco final. No que concerne à vulnerabilidade, ou como a autora chama ao “fator de consequências”, são definidos como indicadores o saneamento inadequado, o tráfego, a renda e a densidade de domicílios. Os dois primeiros referem-se a problemas como transmissão de doenças, número de veículos e vias possivelmente afetadas no caso de uma cheia. Enquanto os dois últimos estão relacionados à caracterização dos indivíduos da região afetada.

Zonensein (2007) define que a densidade de domicílios é preferível ao uso do valor absoluto residencial, pois possibilita comparações entre áreas de diferentes dimensões e não é uma variável dependente da hora do dia. Mesmo não havendo maiores informações quanto à correlação número de pessoas/propriedades afetadas e danos produzidos, pode-se considerar que o aumento potencial de danos é diretamente proporcional ao maior número de domicílios, sendo esta relação linear.

Já no que diz respeito à renda, também se utilizou um rendimento per capita mensal ao invés da renda total para possibilitar comparações e evitar superestimações. Esse parâmetro foi obtido pela divisão da renda nominal mensal, proveniente de dados do IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística), pelo número de domicílios. O indicador não avalia as perdas referentes ao patrimônio disponível, mas sim estabelece a relevância absoluta dos bens de modo que sua quantificação seja independente de quaisquer classes sociais.

Os diversos estudos apresentados ilustraram de maneira prática a função dos indicadores na estimativa de danos e conseqüentemente na gestão de riscos. Mesmo buscando retratar o evento de modo mais completo possível, as pesquisas sublinharam dificuldades e deficiências que só podem ser superadas por outras investigações complementares. A construção de um conhecimento mais sólido acerca das dinâmicas das inundações passa por regiões, indicadores, modelos e base de dados diferentes, em maior quantidade e qualidade.

3. METODOLOGIA DA PESQUISA

“A ciência, como modalidade de conhecimento, só se processa como resultado de articulação do lógico com o real, do teórico com o empírico. Não se reduz a um mero levantamento e exposição de fatos ou a uma coleção de dados. Estes precisam ser articulados mediante uma leitura teórica.”

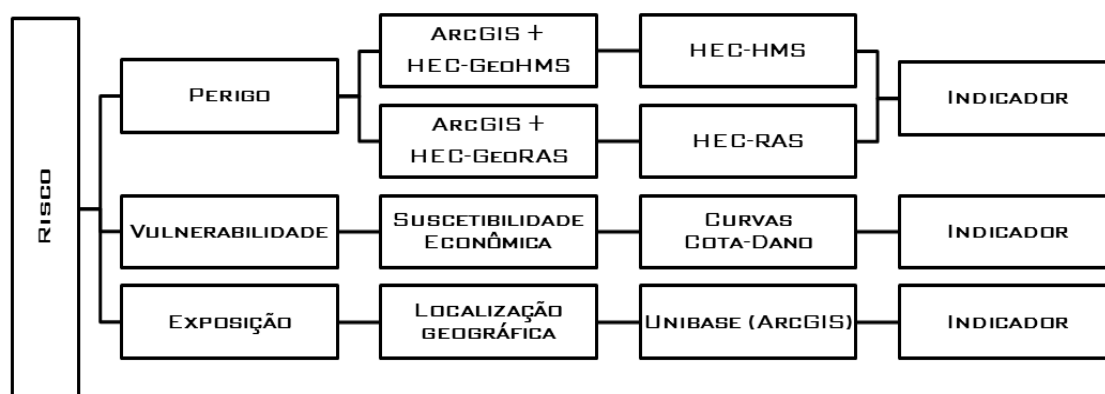
(SEVERINO, 2007, p.126)

Pautada pelo método científico, a ciência observa e tenta explicar as relações causais dos fenômenos e suas variáveis componentes. A confirmação ou refutação de hipóteses é feita através de aparato técnico, sustentado por paradigmas e utilizando-se de processos lógico-dedutivos, onde além da experimentação é utilizada a linguagem matemática (SEVERINO, 2007).

Na intenção de entender o relacionamento entre alguns indicadores de risco, inerentes ao fenômeno inundação, e os danos causados pela ocorrência de tais eventos extremos foi desenvolvida a pesquisa em questão. Mais que um apurado exploratório, no qual se compreende o comportamento da inundação em suas manifestações, busca-se atingir um grau explicativo com a análise e identificação da influência dos indicadores nos danos finais causados à população e seus bens. Esta pesquisa, portanto, parte da suposição de que a variação dos valores dos indicadores estará diretamente relacionada aos níveis quantitativos de danos provenientes das enchentes.

A estrutura do estudo desenvolve-se através da integração entre um SIG, um modelo hidrológico e um modelo hidrodinâmico (KNEBL et al., 2005), e pode ser observada na Figura 5.

Figura 5: Organograma da Metodologia Específica

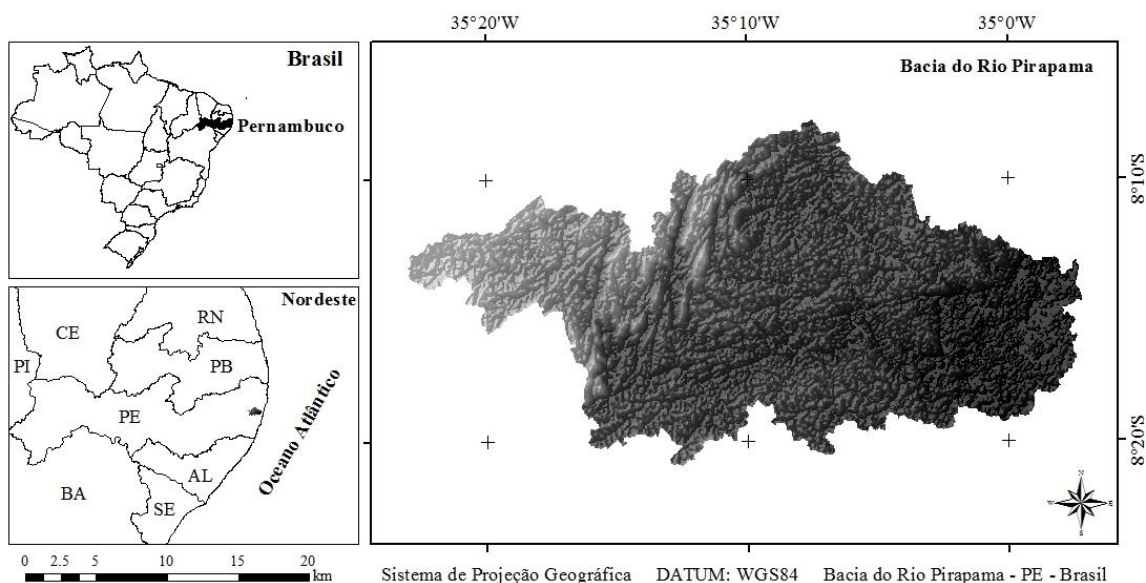


3.1. Bacia Hidrográfica do Rio Pirapama

Informações gerais acerca da região de estudo deste trabalho foram adquiridas de documento publicado pela Agência Estadual do Meio Ambiente (CPRH), coordenação de Gama (2001) e, também, pelo website da Companhia Pernambucana de Saneamento (COMPESA).

Área de base desta pesquisa ilustrada nas Figuras 6 e 7, a bacia do rio Pirapama possui 630,7 km² distribuídos pelos municípios do Cabo de Santo Agostinho, Jaboatão dos Guararapes, Ipojuca, Moreno, Escada, Vitória de Santo Antão e Pombos, onde está localizada sua nascente. Pela divisão hidrográfica estadual esta bacia faz parte do Grupo de Bacias de Pequenos Rios Litorâneos (GL-2), formado por rios que desaguam no Oceano Atlântico localizados na Zona da Mata Sul, correspondendo a aproximadamente de 1,3% da área do Estado.

Figura 6: Mapa de localização da bacia hidrográfica do rio Pirapama



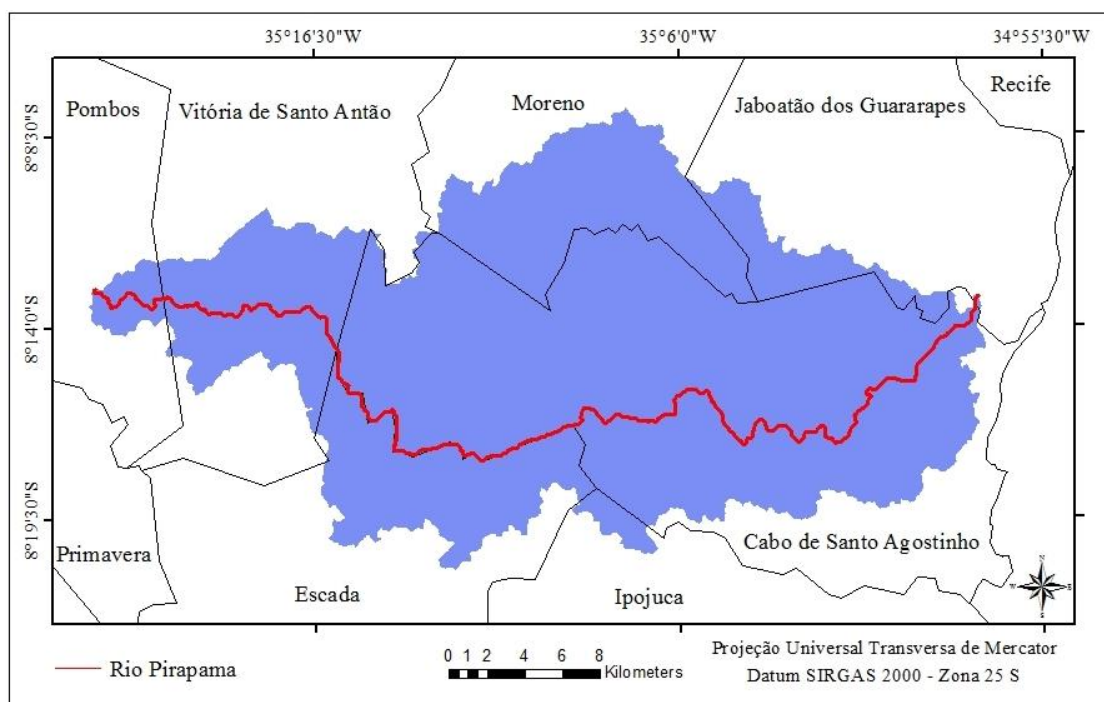
O Pirapama, rio principal com aproximadamente 75 km de extensão, tem grande importância uma vez que, junto com seus tributários, contribui para o abastecimento da Região Metropolitana do Recife (RMR).

Além do uso já citado, esse rio também contribui para abastecimento de zonas rural e industrial, para fins hidro agrícolas, irrigação e para geração hidroelétrica. Esta bacia possui expressividade econômica, pois abrange áreas de grandes unidades agroindustriais e por sua proximidade com o Complexo Industrial Portuário de Suape.

Com uma faixa costeira turisticamente representativa, também se encontram nesta região vários engenhos cuja arquitetura de suas sedes, capelas e casas grandes constituem significativo patrimônio histórico e cultural.

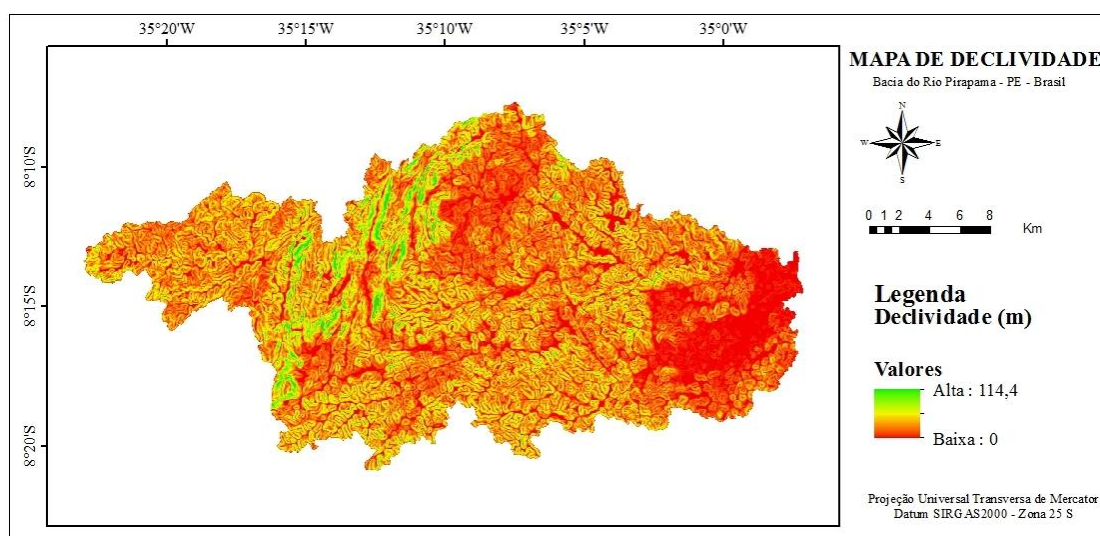
Além dos fatores econômicos, o relevante potencial ecológico da área está compreendido na diversidade de ecossistemas encontrados, em suas dez reservas ecológicas, onde estão preservadas partes de Mata Atlântica, e nos extensos manguezais constituintes de seu ecossistema estuarino.

Figura 7: Mapa de localização da bacia hidrográfica do rio Pirapama (municípios)



Ainda no que concerne aos aspectos físicos ambientais da bacia, esta se caracteriza por seu clima tropical úmido com precipitações anuais variando de 1300 mm a 2300 mm, no sentido oeste-leste. A vegetação acompanha as variações pluviométricas indo de mata úmida no extremo oriental até mata seca na parcela ocidental da bacia. O relevo majoritariamente em estruturas geológicas cristalinas tem predominância de morros com altitudes superiores a 60 m. E os tipos de solo mais encontrados são os argissolos e os latossolos, distintos por sua forte acidez e baixa fertilidade, além da alta suscetibilidade à erosão dos primeiros. Classificada majoritariamente de média a baixa, a declividade da bacia tem pontos mais íngremes localizados em sua região centro-ocidental como evidenciado na Figura 8.

Figura 8: Mapa de declividade da bacia do rio Pirapama



A barragem do rio Gurjaú (importante afluente) foi construída em 1918 como a primeira adutora para o Recife. Contando com uma área de captação de 144 km², a regularização de suas vazões conta com uma pequena represa localizada no rio Sicupema, tributário do Gurjaú. A reserva deste sistema é de 3.200.000 m³, somando-se a contribuição de dois reservatórios implantados em 1946 e 1980. Dos municípios beneficiados, Jaboatão dos Guararapes é o que recebe a maior contribuição. O principal objetivo dessa obra é o de elevar o nível da água até a cota da estação para tratamento, não se tratando de reservatório de acumulação.

O potencial para abastecimento é evidenciado no sistema Pirapama cuja barragem está localizada no Cabo de Santo Agostinho, com a conclusão da última de três etapas do projeto realizada em novembro de 2011. A produção de 5,13 m³/s contribui para o atendimento da demanda da RMR, aliviando o número de bairros com racionamento e levando água para em torno de 3 milhões de pessoas. A reserva total do sistema chega aos 61 milhões de metros cúbicos (COMPESA, 2012).

Assim, pela influência de seus componentes políticos, físicos, culturais, econômicos e ecológicos, a bacia do rio Pirapama é área relevante ao estudo proposto.

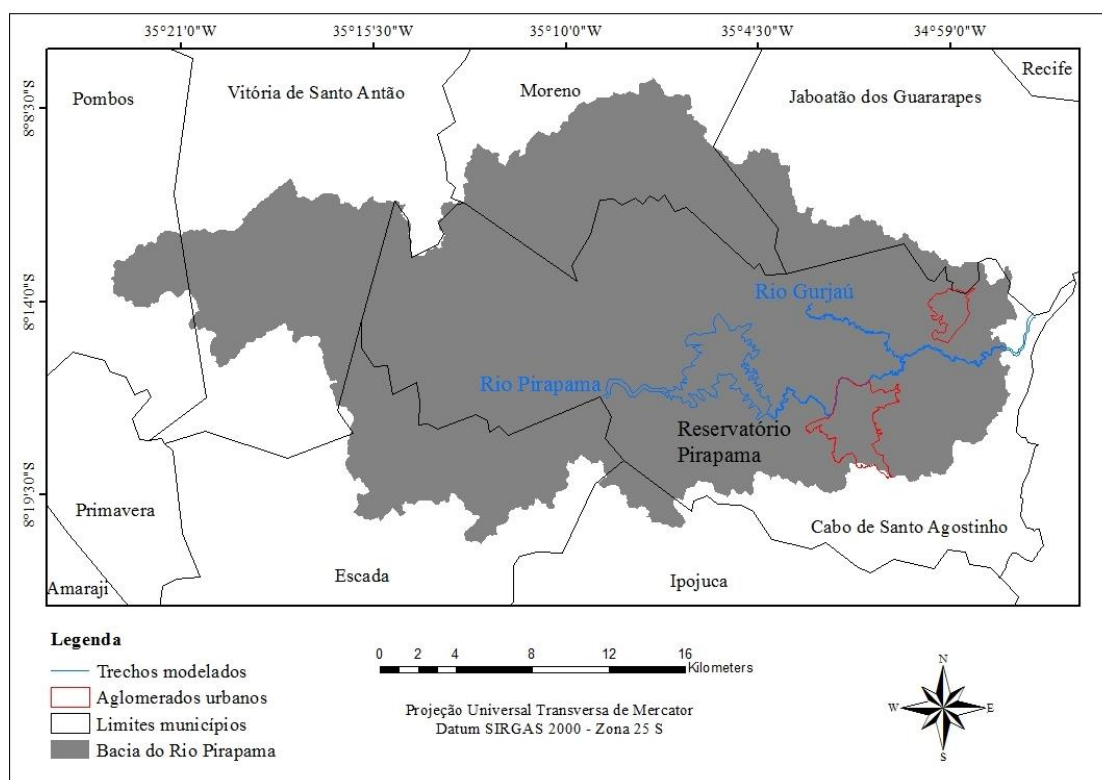
3.1.1. Área de estudo

Localizada a 33 km do Recife, sob as coordenadas 8°17'15"S/35°02'00"W, a cidade do Cabo de Santo Agostinho compõe a Mesorregião Metropolitana do Recife, com extensa área inserida na bacia do rio Pirapama. O município conta com infraestrutura

turística, relevância ambiental e cultural, além de grande significância econômica traduzida pelos complexos industriais e portuários instalados (PMCSA, 2013).

Com uma população estimada em 198.383 pessoas, dados do IBGE (2014), a sede do município será foco do estudo final dos indicadores por conter diversos danos potenciais (ver Figura 9).

Figura 9: Área de estudo - sede do Cabo de Santo Agostinho



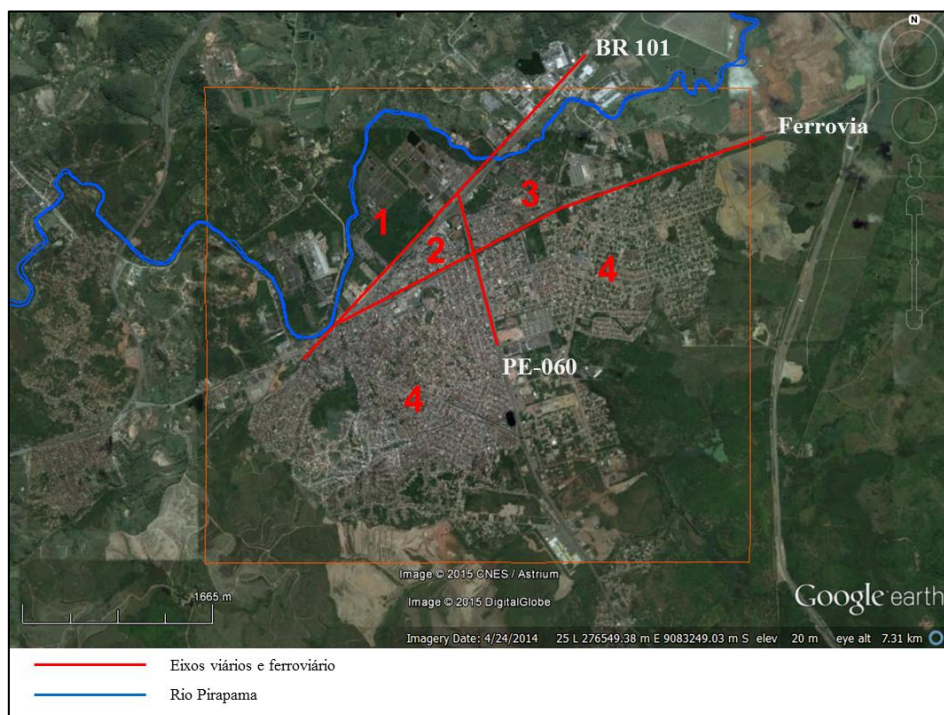
A sede configura-se como principal aglomerado urbanístico e maior concentração demográfica do município, tendo como relevante eixo viário a BR 101, em destaque na Figura 10. Outra aglomeração populacional de destaque encontra-se no bairro de Ponte dos Carvalhos, ver Figura 11. A compreensão da dinâmica e expansão da malha urbana foi feita através de uma abordagem sistemática de setorização e classificação da mesma. As quatro zonas identificadas são as seguintes:

- Setor 1: Industrial. Esta extensa área é composta basicamente por dois pátios industriais. Estão situadas neste setor a LanXESS, antiga COPERBO (Companhia Pernambucana de Borracha Sintética), e a White Martin Praxair Inc., empresa com ampla atuação no mercado de gases industriais. Ver Figura 12;
- Setor 2: Comércio e serviços. Nesta região, estão locados os mais diversos tipos de comércio, de pequenos varejos a lojas de veículos. A variedade de serviços ofertados também é ampla, abrangendo escolas, hospitais, bancos e transporte, dentre outros. Além de vasta estrutura administrativa, grande quantidade de secretarias municipais e a própria Câmara de Vereadores encontra-se neste setor. Ver Figuras 13 e 14;
- Setor 3: Residencial. Essa primeira área residencial configura-se de uma estrutura já estabelecida, cujas modificações ocorrem usualmente dentro do lote, sem grandes repercussões para a malha urbana, ver Figura 15. O bairro de Ponte dos Carvalhos e vizinhanças adequa-se a este e ao setor 4, ver Figura 16;
- Setor 4: Residencial. Essa região encontra-se em presente expansão, sendo composta majoritariamente por assentamentos habitacionais. A configuração da malha urbana desta zona ainda não é definitiva.

Como os dados referentes a riscos e seus consequentes prejuízos são escassos ou neste caso inexistentes, a análise de danos será feita pela adaptação de dados e equações da região sudeste do Brasil. Desse modo, tal zoneamento apresentado acima foi realizado, após visita de campo, para garantir a correspondência dos parâmetros que originaram tais funções com os observados nesta área de estudo.

Adotou-se uma escala mais aproximada e específica de identificação de usos, tipologias, materiais construtivos e gabarito das edificações predominantes de cada setor. O material levantado é um apurado de informações que podem ser ainda complementadas, numa escala menor com as ferramentas governamentais disponíveis, uma vez que o município do Cabo de Santo Agostinho dispõe de Plano Diretor urbanístico, com Lei de Uso e Ocupação do Solo, e demais mapas de Zoneamento, determinação de macro áreas, sistemas viário e ferroviário, dentre outros.

Figura 10: Setorização da sede do município



Fonte: Imagem editada do software Google Earth

Figura 11: Ponte dos Carvalhos - Principais eixos de transporte



Fonte: Imagem editada do software Google Earth

Figura 12: Setor 1 (Vistas frontal da White Martins e aérea do pátio da LanXESS)



Fonte: Pátio LanXess – <http://lanxess.com/en/corporate/media/press-kits/press-kit-petroflex/>
Acesso em: 20 de Junho de 2015

Figura 13: Setor 2 (Farmácia, concessionária, lojas de variedades, supermercado)



Figura14: Setor 2 (Escola, Câmara Vereadores, hospital, serviços diversos)



Figura 15: Setor 3 (Residências estabelecidas)



Figura 16: Ponte dos Carvalhos - Tipologia

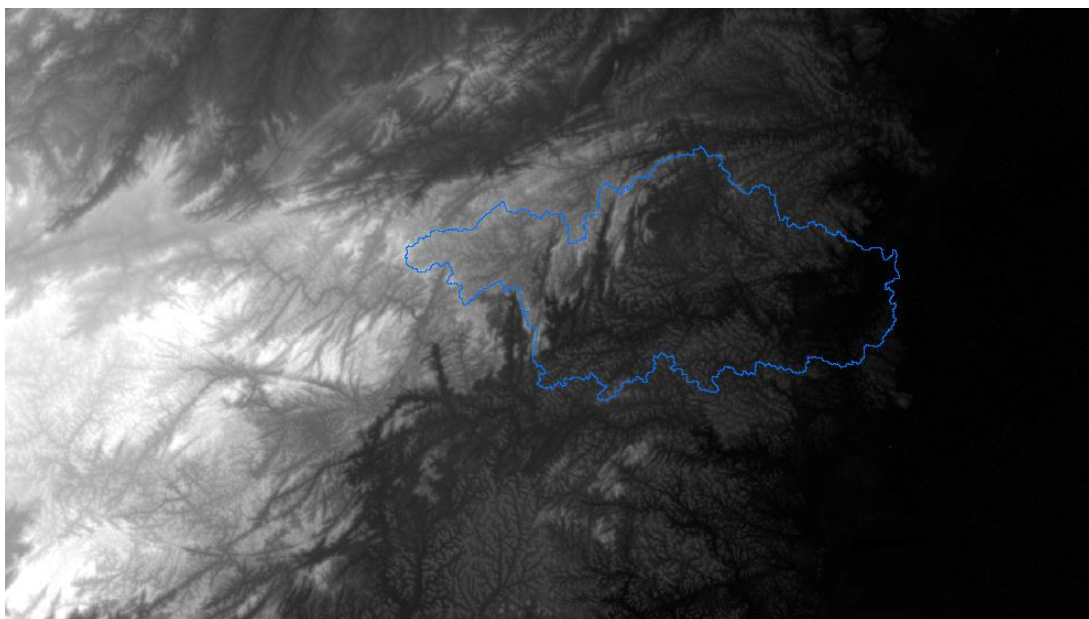


3.2. Dados de entrada

Uma parceria entre as agências espaciais dos Estados Unidos, Alemanha e Itália resultou no projeto *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM). Através de dados de radar, obtidos de sensores instalados no ônibus espacial Endeavour, foi possível adquirir imagens de todo o globo com detalhes do relevo. Após processamento dos dados disponibilizados, muitos a partir do SRTM, o INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais) desenvolveu projeto chamado Topodata que oferece Modelo Digital de Elevação, o qual foi utilizado para a definição da bacia hidrográfica do Pirapama e sua respectiva rede de drenagem, ver Figura 17.

A delimitação da bacia foi desenvolvida através do Sistema de Informação Geográfica ArcGIS/ESRI, utilizando o ArcHydro, ferramenta de manipulação para recursos hídricos. A modelagem foi realizada com base no Modelo Digital de Terreno (MDT) Topodata em formato raster com resolução de 30m x 30m.

Figura 17: Modelo Digital de Terreno (Topodata, INPE) e contorno da bacia



A Agência Estadual de Planejamento e Pesquisa de Pernambuco (CONDEPE/FIDEM) desenvolve trabalho para uniformização e atualização da base cartográfica do Estado. Desta operação resultou um Modelo Digital de Terreno de 10m x 10m de resolução que foi aplicado na etapa de modelagem hidrodinâmica da pesquisa.

Os dados hidrológicos diários utilizados foram obtidos do Sistema de Informações Hidrológicas (Hidroweb) da Agência Nacional de Águas (ANA), e também do Sistema de Geoinformação Hidrometeorológico de Pernambuco gerido pela Agência Pernambucana de Águas e Clima (APAC). É importante destacar que praticamente todos os postos utilizados para a pesquisa apresentam registros com muitas falhas.

As sínteses das séries usadas encontram-se nas Tabelas 1 e 2. As áreas de drenagem das estações fluviométricas estão especificadas na Tabela 3. Na Figura 18 estão ilustradas a rede de drenagem da bacia do rio Pirapama, seus reservatórios e respectivos pontos de medição pluviométrica e fluviométrica.

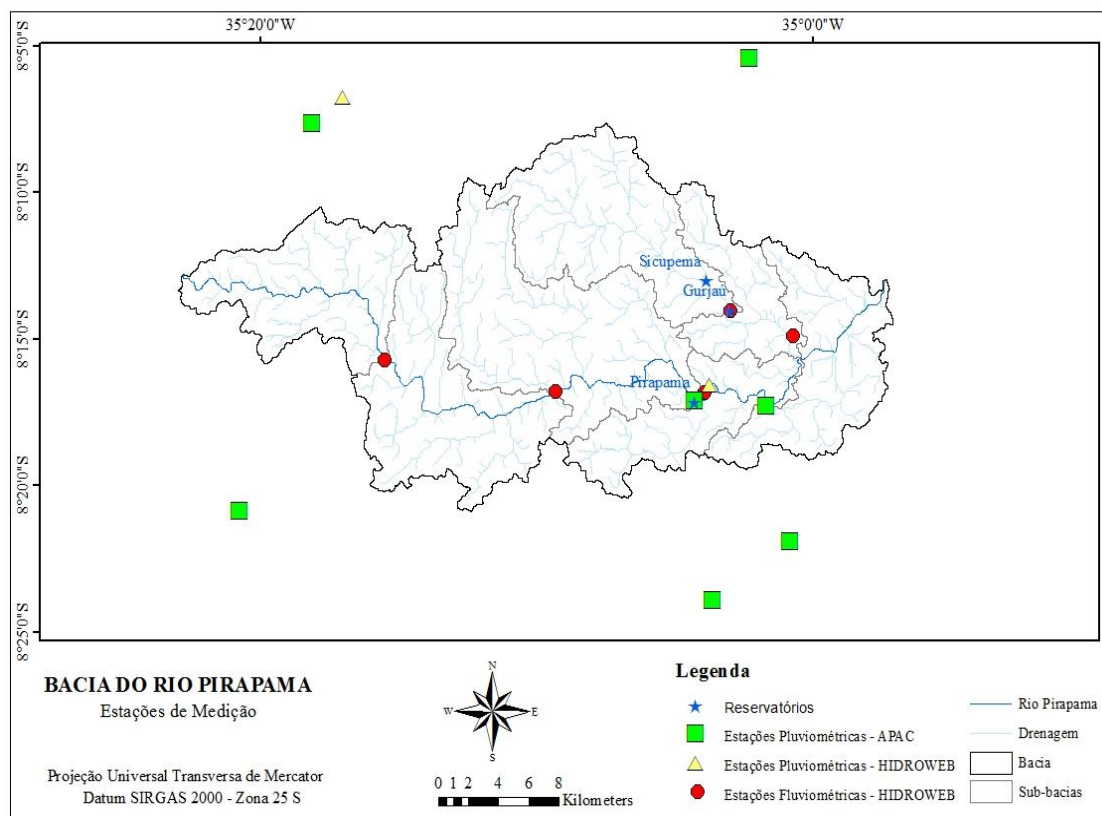
Tabela 1: Estações pluviométricas e séries temporais

Origem	Tipo da Estação	Código	Série	Localização
ANA	Pluviométrica	00835068	01 jan 1996 - 31 mar 2014	Vitória de Santo Antão
ANA	Pluviométrica	00835138	01 jan 1996 - 31 mar 2014	Pirapama
APAC	Pluviométrica	490	01 jan 2000 - 04 ago 2014	Cabo (Barragem Gurjau)
APAC	Pluviométrica	491	01 jan 2000 - 04 ago 2014	Cabo (Barragem Suape)
APAC	Pluviométrica	603	01 mar 2012 - 04 ago 2014	Cabo (Pirapama)
APAC	Pluviométrica	29	01 jan 1996 - 30 ago 2006	Ipojuca
APAC	Pluviométrica	268	01 out 1997 - 04 ago 2014	Jaboatão (Bar. Duas Unas)
APAC	Pluviométrica	108	01 jan 1996 - 04 ago 2014	Primavera
APAC	Pluviométrica	26	01 jan 1996 - 04 ago 2014	Vitória de Santo Antão

Tabela 2: Estações fluviométricas e séries temporais

Origem	Tipo da Estação	Código	Série	Área de Drenagem (km ²)	Localização
ANA	Fluviométrica	39192000	01 abr 2000 - 30 abr 2014	90,4	Rio Pirapama
ANA	Fluviométrica	39195000	01 abr 2000 - 30 abr 2014	104,8	Rio Pirapama
ANA	Fluviométrica	39200000	01 jan 1996 - 28 fev 2014	145,7	Rio Pirapama

Figura 18: Estações de Medição da bacia do rio Pirapama



3.3. Modelagem hidrológica

Através do projeto intitulado *Next Generation Software Development*, o Centro de Engenharia Hidrológica (HEC), que é parte do Instituto de Recursos Hídricos do Corpo de Engenheiros do Exército Americano, desenvolve diversas ferramentas técnicas relacionadas a recursos hídricos, dentre as quais se tem vários modelos, como o HEC-HMS utilizado nesta pesquisa. Tais produtos são disponibilizados livremente ao público, tendo sido amplamente aplicados em bacias de regiões úmidas, tropicais, subtropicais e áridas (ABUSHANDI & MERKEL, 2013). Além de ser um software livre, o modelo foi escolhido devido a sua ampla aceitação, disponibilidade de suporte técnico e constante atualização por parte de seus desenvolvedores.

O Sistema de Modelagem Hidrológica (HEC-HMS) é um modelo computacional que interpreta o ciclo hidrológico de maneira simplificada, simulando o fenômeno de chuva-vazão e produzindo como dados de saída hidrogramas que são aplicados desde estudos relacionados à disponibilidade da água, drenagem urbana e previsão de vazão, até a operação de sistemas.

Para qualquer trabalho com o HEC-HMS é necessária uma representação da bacia, a qual é feita com a ajuda do Geospatial Hydrologic Modeling Extension (HEC-GeoHMS), uma extensão do ArcGIS que viabiliza dentre outras coisas a visualização e análise de informações espaciais (FLEMING & DOAN, 2013). A bacia é então simbolizada por elementos hidrológicos como sub-bacias, trechos, junções, reservatórios, desvios, fontes e exutório.

Já os modelos matemáticos estão contidos no programa e atuam na representação das várias etapas do ciclo hidrológico. A escolha das equações a serem utilizadas depende sempre das condições e do ambiente que se está modelando. Todos os modelos matemáticos inclusos no HEC-HMS são determinísticos e desacoplados. O determinismo define que não há parâmetros aleatórios, pois eles assumem estacionariedade, sendo seus valores constantes. E o desacoplamento significa que os processos são computados de modo sequencial, primeiro a evapotranspiração e depois a infiltração, por exemplo, o que não corresponde ao comportamento da água na natureza (SCHARFFENBERG & FLEMING, 2010).

Assim, de modo a representar detalhadamente apenas os componentes necessários à determinação do escoamento, o HEC-HMS separa seus modelos matemáticos em quatro

grandes categorias, cada qual com diferentes métodos disponíveis para cálculo. Os métodos utilizados nesta pesquisa estão listados abaixo em suas respectivas classes:

- a) Modelo de perda (Loss): Calcula a água retida que não contribuirá diretamente ao escoamento superficial. O método utilizado foi o Soil Moisture Accounting (SMA), o qual é indicado para simulações contínuas enquanto os outros são recomendados em caso de simulações baseadas em eventos (DE SILVA et al., 2014). O SMA simula o movimento e armazenamento da água na superfície, vegetação e no subsolo, sendo seus parâmetros determinados por calibração com os dados observados de vazão;
- b) Modelo de transformação (Transform): Avalia o excesso de precipitação que se tornará escoamento superficial. O método escolhido foi o Soil Conservation Service (SCS) Unit Hydrograph, cujo único parâmetro solicitado é o Lag Time, ou tempo do pico, que é o intervalo entre o centro de massa da precipitação e o tempo da vazão máxima. O tempo de pico está diretamente relacionado ao tempo de concentração, o qual caracteriza a duração do percurso da água precipitada no ponto mais distante da bacia até o exutório. Para cálculo do tempo de concentração e, conseqüentemente, do Lag Time foram utilizados atributos físicos das sub-bacias (dados adquiridos pelo ArcGIS) e as seguintes equações:

$$t_c = 57 \left(\frac{L^3}{H} \right)^{0,385} \quad \text{Fórmula de Kirpich} \quad (4)$$

Sendo t_c o tempo de concentração em minutos, L o comprimento do rio em km, H a diferença de cota entre o ponto mais remoto da bacia e a seção principal em metros.

$$t_c = \frac{t_p}{0,6} \quad (5)$$

Sendo t_p o tempo de pico, Lag Time.

- c) Modelo de escoamento de base (Baseflow): determina a contribuição do escoamento subterrâneo. O método usado foi o Linear Reservoir que é utilizado com o SMA, considerando o escoamento subterrâneo com comportamento

semelhante ao de reservatórios lineares. A calibração de seus parâmetros é similar à do SMA;

- d) **Modelo de propagação de cheia (Routing):** realiza a propagação do escoamento nos canais principais do sistema. Muskingum-Cunge foi o método utilizado, seus parâmetros são físicos e foram obtidos a partir das características do canal adquiridas pelo ArcGIS.

Os dados de chuva e vazão são inseridos no modelo através do *Data Storage System* (HEC-DSS), que é um sistema de base de dados especificamente projetado para armazenamento e manipulação de grandes conjuntos ou séries de dados. O HEC-DSS surgiu no intuito de padronizar e facilitar as análises hidrológicas. Assim, diferentemente dos convencionais, esse sistema evita a sobrecarga através de um processamento mais rápido, uma vez que os dados são tratados em registros contínuos e relacionados (CEIWR-HEC, 2009).

Após processamento das informações de entrada, deve-se partir para a fase de ajuste dos parâmetros, de modo a se avaliar a consistência dos resultados e a precisão do modelo para a aplicação realizada. Embora o HEC-HMS forneça um método automático, foi escolhido o procedimento manual, de modo a avaliar a sensibilidade de cada parâmetro. Assim, o ajuste foi realizado através de uma sequência repetitiva entre edição dos parâmetros, simulação do modelo, e verificação dos resultados (GARCÍA et al., 2008). Esta última foi realizada tanto no aspecto qualitativo, com a comparação visual entre os hidrogramas simulado e observado, quanto de maneira quantitativa, com análises estatísticas. Para tal foram considerados quesitos de aplicabilidade, uso e aceitação, sendo escolhidos os seguintes métodos (MORIASI et al., 2007):

- **Coefficiente de determinação (R^2).** Número que descreve o nível de correlação linear entre os dados simulados e observados. Muito embora seu uso seja bastante comum na modelagem, o R^2 pode ser considerado índice instável, sendo insensível para alguns fatores e extremamente sensível para outros, como no caso de picos de vazão.

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (y^{sim} - y^{média})^2}{\sum_{i=1}^n (y^{obs} - y^{média})^2} \quad (6)$$

- **Nash-Sutcliffe efficiency (NSE).** Tal coeficiente avalia estatisticamente a precisão do modelo, sendo considerado o melhor na análise do ajuste do

hidrograma simulado ao observado. O NSE é calculado como mostrado na equação:

$$NSE = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (y_i^{obs} - y_i^{sim})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i^{obs} - y^{média})^2} \right] \quad (7)$$

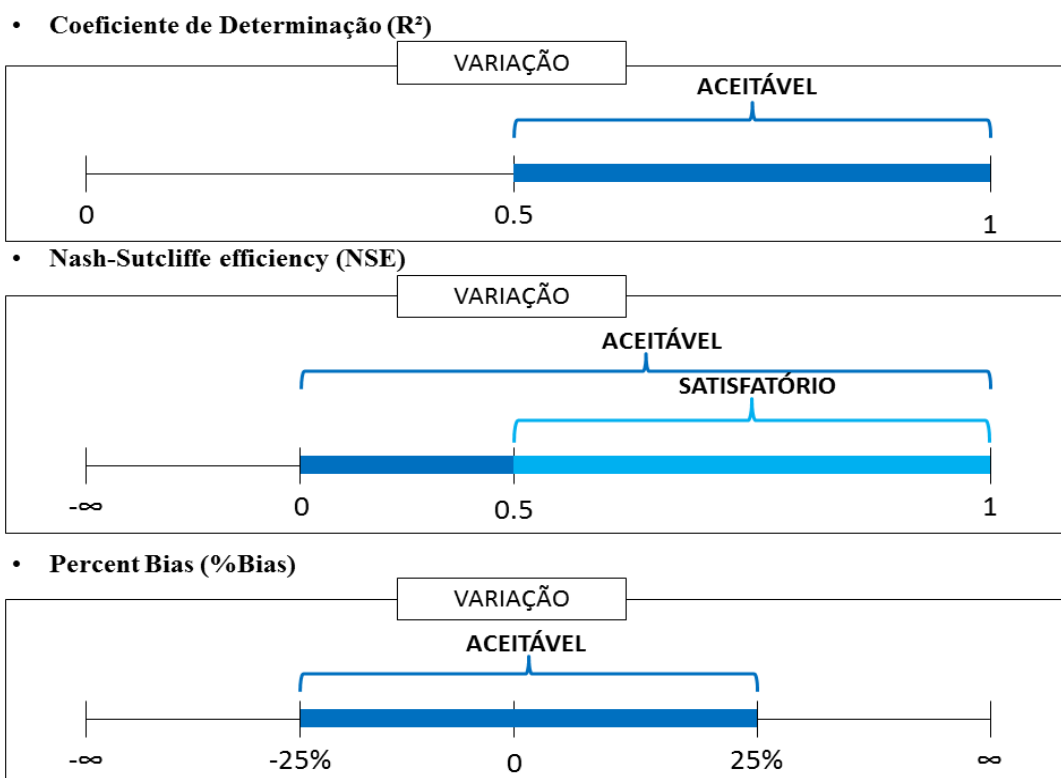
Sendo y_i o valor i do elemento que se está avaliando. Portanto, neste caso, y_i^{obs} refere-se à vazão observada, y_i^{sim} à vazão simulada, $y^{média}$ à média da vazão observada, e n ao número total de observações.

- **Percent Bias (%Bias).** Este índice representa a diferença de volume entre os fluxos simulado e observado, com o ideal sendo representado pelo zero, valores negativos e positivos indicam subestimação e superestimação, respectivamente.

$$\%BIAS = \left(\frac{M^{sim} - M^{obs}}{M^{obs}} \right) * 100 \quad (8)$$

Sendo M^{obs} a média das vazões observadas e M^{sim} a média das vazões simuladas.

Figura 19: Valores limites dos coeficientes estatísticos



Moriasi et al. (2007) ainda destacam os limites aceitáveis dos valores diários para cada coeficiente (ver Figura 19). Para o coeficiente de determinação, as variações vão de 0 a 1, quanto maior o R^2 , menor o erro, e valores acima de 0.5 são considerados aceitáveis. Já Nash tem valores variando de $-\infty$ a 1, sendo este último o resultado ideal. NSE entre 0 e 1 são tidos como aceitáveis, $NSE > 0,5$ são satisfatórios e $NSE < 0$ indicam desempenho ineficaz e intolerável. Quanto ao erro de volume (%Bias) resultados com um erro de 25%, para mais ou para menos são aceitos.

3.4. Modelagem hidrodinâmica

O modelo hidrológico semi-distribuído HEC-HMS simula a vazão no exutório de cada sub-bacia definida, tendo por dados de saída os hidrogramas que são extraídos como série temporal e inseridos diretamente no modelo hidrodinâmico. Este último é responsável pela caracterização da propagação de cheias, simulando o comportamento do escoamento ao longo do rio, de acordo com as características do canal (CASTANHARO & MINE, 2006).

O Sistema de Análises Fluviais (HEC-RAS) foi escolhido para realização desta etapa da metodologia pelos mesmos motivos apresentados para o HEC-HMS, além de possibilitar a continuidade da metodologia, uma vez que é proveniente do mesmo Centro de Engenharia Hidrológica (HEC), citado no item 3.3. Este software é composto por quatro componentes analíticos principais, os quais calculam escoamento permanente, não permanente (transiente), transporte de sedimentos e qualidade da água, sendo capaz de realizar cálculos hidráulicos unidimensionais para rede de canais naturais e artificiais.

No que concerne à classificação do escoamento, diversas são as possibilidades, o fluxo pode ser permanente quando parâmetros hidráulicos como a velocidade da água e profundidade, por exemplo, são invariáveis no tempo. De modo contrário, os escoamentos não permanentes apresentam variação nos fatores citados. Também se pode categorizar o escoamento em uniforme, quando o vetor velocidade mantém constância no módulo, direção e sentido devido a não variação do perfil geométrico do canal. Caso contrário, o escoamento é variado (BAPTISTA et al., 2011).

O modelo busca considerar todos os elementos referentes às fórmulas da continuidade e da quantidade de movimento, também conhecidas por equações de Saint-

Venant para o regime transitório (BRUNNER, 2010). E para o cálculo da superfície da água, em regime permanente, o HEC-RAS utiliza a equação da energia de Bernoulli:

$$H_2 + Z_2 + \frac{\alpha_2^2 V_2^2}{2g} = H_1 + Z_1 + \frac{\alpha_1^2 V_1^2}{2g} + h_e \quad (9)$$

Sendo ‘H’ a profundidade da água, ‘Z’ a elevação do fundo do canal com relação a um *Datum*, ‘V’ a velocidade média na seção, ‘ α ’ o coeficiente da velocidade, ‘g’ a aceleração da gravidade e h_e a perda de energia.

Os dados geométricos representativos do rio, margens, linha de fluxo e seções distribuídas por toda a extensão do curso d’água de interesse, utilizados nesse modelo foram pré-processados no ArcGIS com o auxílio da extensão HEC-GeoRAS e de imagens do software Google Earth. Os dados são então aplicados na resolução das equações componentes do modelo (DANTAS, 2012).

Após a simulação com o HEC-RAS, os dados de saída deste modelo são novamente importados pelo HEC-GeoRAS e ArcGIS, para então originarem mapeamento da planície de inundação e dos indicadores físicos componentes da análise de risco.

3.5. Estudo dos indicadores

As inúmeras metodologias desenvolvidas, na tentativa de aplicar os conceitos teóricos dos diversos indicadores componentes na quantificação do risco de inundação, por vezes são impossibilitadas por sua extrema complexidade e escassez de dados. Dessa maneira, os trabalhos que buscaram determinar uma quantidade potencial do risco tiveram de simplificar conceitos e restringir a análise a indicadores acessíveis.

3.5.1. Indicadores de perigo

- **Profundidade**

Parâmetro principal para a estimativa de danos, a profundidade é variável independente amplamente aplicada em funções que buscam quantificar custos diretos tangíveis. Sua influência está associada à perda de bens móveis, interrupção de atividades econômicas, comprometimento da estrutura de edificações devido à pressão lateral exercida nas paredes, dentre outros. Dentro desse contexto de escassez que são as

bases de dados referentes a desastres, este é o indicador que mais apresenta registros pela possibilidade de ser medido nas paredes das construções após um evento de cheia, e por sua comprovada relevância (KREIBICH et al., 2009; BOUWER et al., 2009; KELMAN & SPENCE, 2004; YANG et al., 2015).

Nesta pesquisa, este parâmetro é obtido como dado de saída do modelo hidrodinâmico HEC-RAS. Este último calcula a profundidade das células que estão conectadas às parcelas molhadas das seções espalhadas ao longo do rio, criando um grid referente à profundidade da superfície da água. Esse produto é processado de modo a gerar um mapa de profundidades de inundação (BRUNNER & CEIWR-HEC, 2010).

3.5.2. Indicadores de vulnerabilidade e exposição

- **Exposição**

A exposição é aqui tratada como as características referentes à localização geográfica dos elementos em estudo que influenciam o maior ou menor grau de prejuízos potenciais causados por inundações. Ou seja, é feita a investigação dos elementos passíveis de serem atingidos pelo evento extremo devido ao seu estabelecimento espacial. Esse indicador avalia quem e o que será possivelmente atingido no caso de uma cheia por causa de sua distribuição espacial. (KAZMIERCZAK & CAVAN, 2011; MERZ et al., 2007).

O mapa de exposição é obtido através da sobreposição entre base planimétrica da área de estudo e a planície de inundação resultante da modelagem hidrodinâmica.

- **Suscetibilidade Econômica**

A suscetibilidade econômica, aqui sinteticamente classificadora do grau parcial de vulnerabilidade dos elementos em estudo, será indicador breve dos prejuízos potenciais derivados das cheias. Internacionalmente aceitas e cientificamente reconhecidas, as funções profundidade-danos, e respectivas curvas, são principal ferramenta de análise de danos de inundação. Pela menor dificuldade de aquisição, os danos monetários diretos são usualmente principais objetos de análise. Neste trabalho, o procedimento foi semelhante.

Processos subjetivos embasam muitas das investigações referentes a prejuízos resultantes de enchentes. No entanto, existem duas abordagens mais populares usadas

especificamente para o desenvolvimento de curvas e consequente avaliação de danos. A primeira baseia-se em dados históricos coletados pós-evento, enquanto a segunda produz curvas sintéticas, nas quais os danos são função da profundidade de submersão, sendo embasadas na tipologia das edificações ou no uso do solo, por exemplo, (MILOGRANA, 2009).

Essa última abordagem busca possibilitar a realização de análises, superando a escassez de dados. São as chamadas “what if analyses”, ou seja, análises que no lugar de estarem totalmente baseadas em registros, buscam estimar as perdas esperadas em caso de uma certa cheia. Os parâmetros de impacto simulados são avaliados e sua correlação com os possíveis danos é determinada (THIEKEN et al., 2005).

A não padronização de procedimentos de análise e a escassez de dados históricos referentes aos impactos das enchentes levam à adaptação e transferência de modelos de perdas e curvas de uma região para outra. Por exercer maior influência na estimativa de danos que os fatores hidráulicos, a escolha da curva deve ser realizada com cuidado para preservação da confiabilidade da análise (CAMMERER et al., 2013). Num caso como o do Cabo de Santo Agostinho, onde não há dados reais, é altamente recomendável que a função de perda seja selecionada ou derivada de regiões nas quais as edificações e os eventos apresentem características semelhantes.

Desse modo, a função de perdas escolhidas para aplicação nesta pesquisa foi desenvolvida por Machado et al. (2005) para o município de Itajubá, Estado de Minas Gerais, região do sudeste do Brasil. Tendo como referência a enchente do ano 2000, na qual mais de 70% da área urbana foi atingida, a metodologia aplicada é resultado de referências empíricas e generalizações que possibilitam o uso de tais curvas em outros contextos. Os prejuízos às construções e a seus conteúdos foram estimados através de uma parte empírica realizada por meio de questionários e dados censitários da população, e de uma parte embasada na NBR 12721:2005 – Avaliação de custos de construção para incorporação imobiliária e outras disposições para condomínios edilícios.

Esta norma estabelece, dentre outras coisas, custos unitários de edificações padrão, neste caso tem-se como unidade o R\$/m². Esses valores são identificados através dos tipos de edificações, seus diferentes acabamentos, materiais empregados e despesas administrativas com mão-de-obra e equipamentos, representando o custo parcial da obra de certo padrão construtivo. O valor é parcial, primeiramente porque diversos componentes do preço final não estão inclusos, e também porque se refere a um projeto

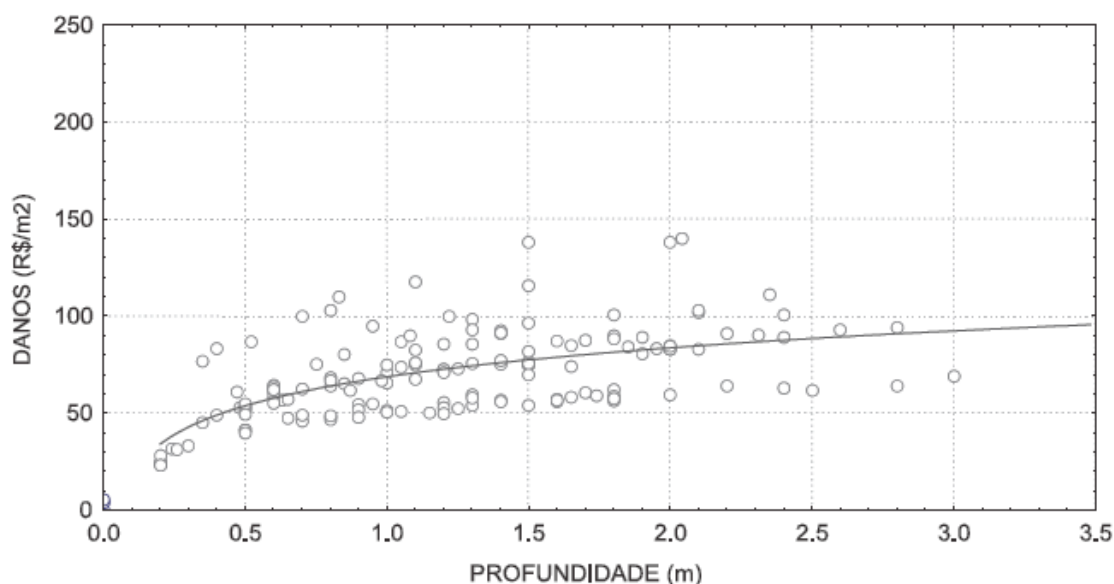
padrão de referência. Ou seja, este indicador possibilita um quantitativo com base num valor proporcional da edificação de determinado tipo construtivo, e não no seu preço real. Tal procedimento tem confiabilidade comprovada uma vez que edifícios de mesmo tipo apresentam curvas profundidade-danos semelhantes, independentes de seu valor atual (MERZ et al., 2007).

Assim, com base nessas informações, funções profundidade-danos foram desenvolvidas por Machado et al. (2005) para área residencial classificada em diferentes classes socioeconômicas. Tais classes são definidas em ordem decrescente de poder aquisitivo pelo Critério Brasil (ABIPEME, 2003), através de um sistema de pontuação avaliativo dos itens que o indivíduo possui e do grau de instrução do chefe de família. A equação utilizada nesta presente pesquisa é referente às classes C e D, e está representada pela Figura 20 e pela seguinte equação:

$$D = 68,6 + 21,6 \ln(d) \quad (10)$$

Sendo 'D' a estimativa de danos por unidade de área (R\$/m²) e 'd' a profundidade de inundação em metros.

Figura 20: Curva de danos x profundidade de submersão, para município de Itajubá



Fonte: MACHADO et al., 2005

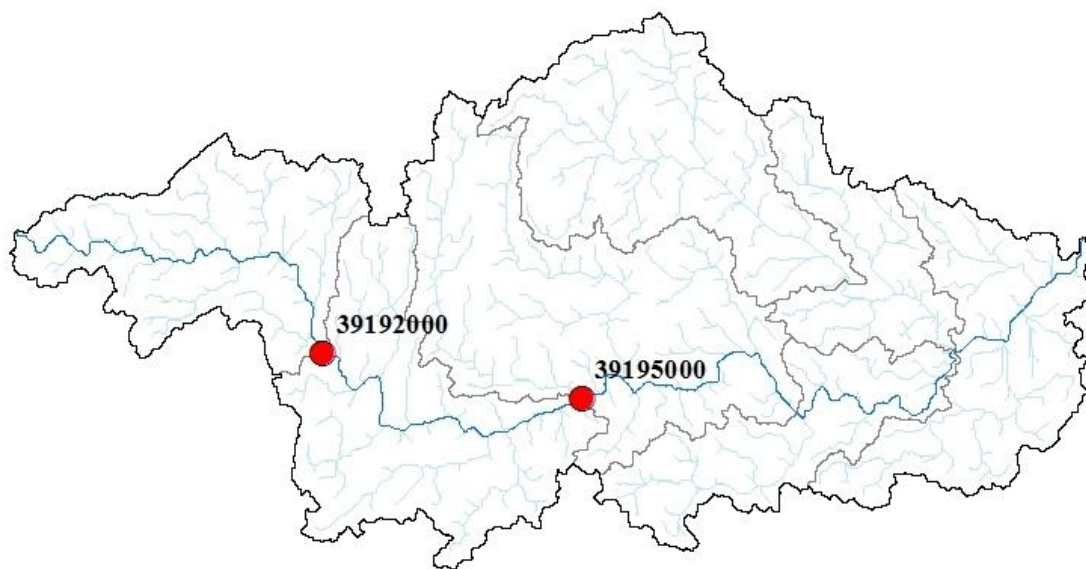
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Modelagem Hidrológica

O desempenho de qualquer modelo deve ser avaliado de modo que se possa garantir a qualidade dos resultados produzidos, para tanto é realizada a calibração ou otimização de seus parâmetros. Essa importante tarefa tem como objetivo diminuir as diferenças entre o hidrograma de vazão simulado e o observado, o que pode ser feito de maneira qualitativa e quantitativa (KHAKBAZ et al., 2012).

A necessidade de dados observados fez com que a calibração fosse realizada em dois pontos específicos: no exutório de duas sub-bacias onde estão localizadas estações fluviométricas. A série histórica de vazão observada foi dividida entre dois períodos, um abrangendo abril de 2000 a abril de 2009, e outro de abril de 2009 a abril de 2014, estando assim numa proporção de 2/3 dos registros para calibração e 1/3 para a validação (SHAMSELDIN, 2005). Os dados analisados foram apenas os referentes aos meses chuvosos que são abril, maio, junho, julho e agosto. A calibração e validação foram feitas para os postos fluviométricos destacados na Figura 21:

Figura 21: ID das Estações utilizadas na modelagem hidrológica



Os gráficos da estação 39192000 apresentaram comportamento diverso, com picos subestimados na calibração dos anos 2000, principalmente nos meses de junho, julho e agosto, e na validação referente ao ano de 2010. Já as vazões simuladas foram superestimadas na calibração do ano 2005 e para a validação do ano 2011. Ver Figuras 22, 23, 24 e 25.

Já a estação 39195000 apresentou, para a calibração do ano 2000, hidrograma simulado superestimando o maior pico de todos, detectado em agosto. Com este mesmo comportamento se repetindo na calibração referente ao ano de 2005. Enquanto que os picos menores de vazão do ano 2000 foram subestimados, assim como ocorreu em ambas as validações referentes a 2010 e 2011. Ver Figuras 26, 27, 28 e 29.

Assim, os maiores fluxos modelados e as altas vazões observadas, relevantes para esta pesquisa, foram detectados pelo modelo, com picos simulados por vezes sendo subestimados ou superestimados em comparação com os dados reais.

Figura 22: Hidrograma de calibração da estação **39192000** (abril a agosto de 2000)

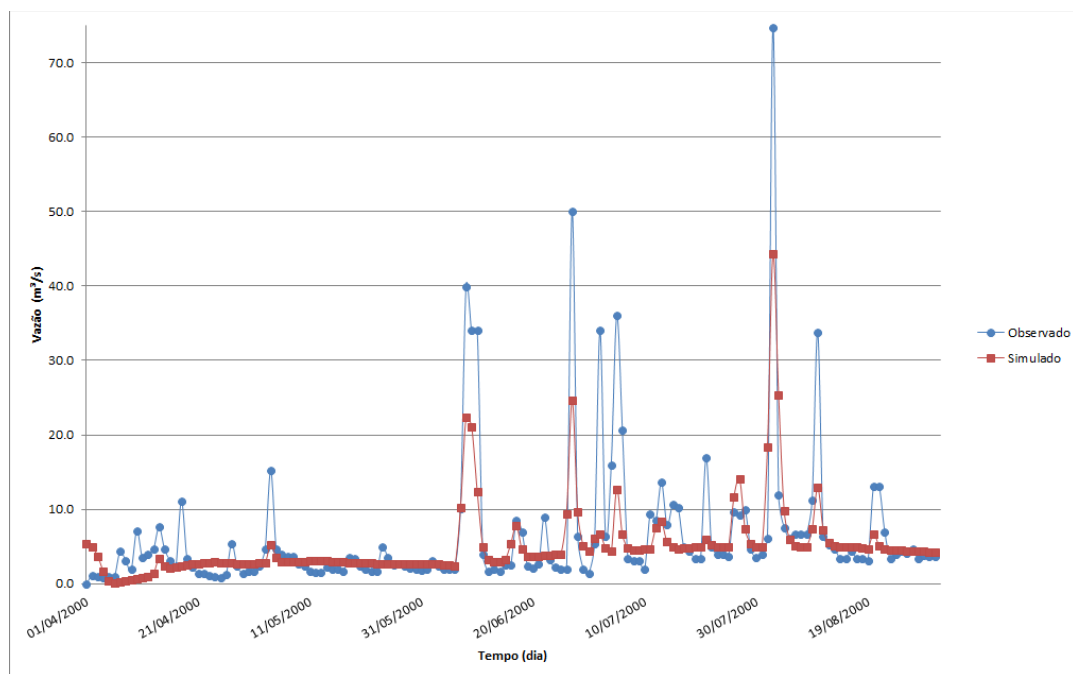


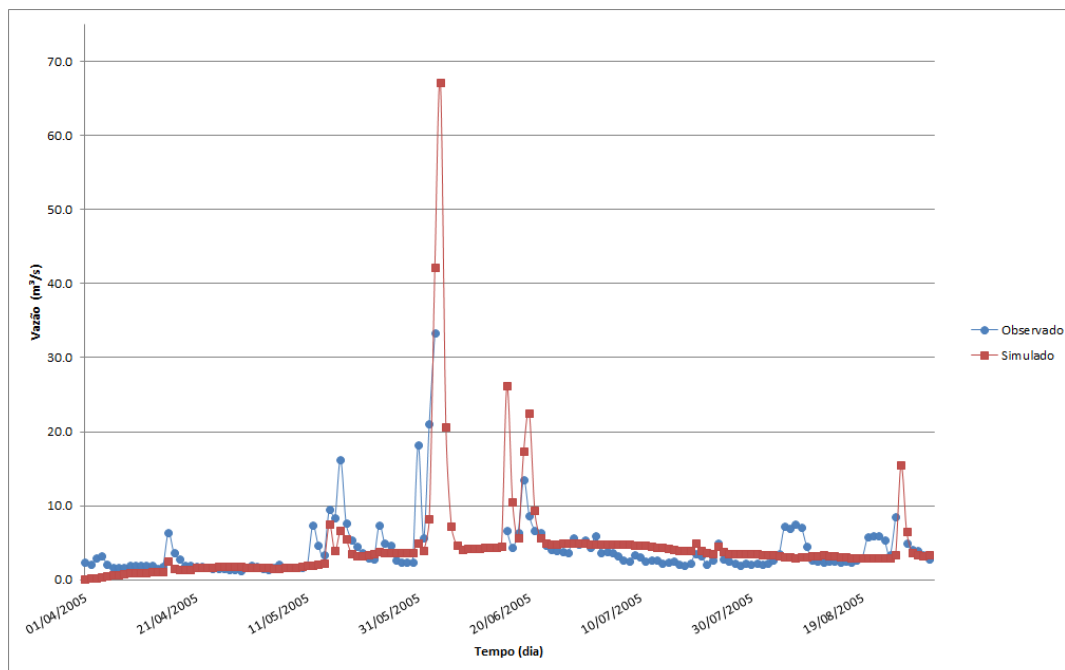
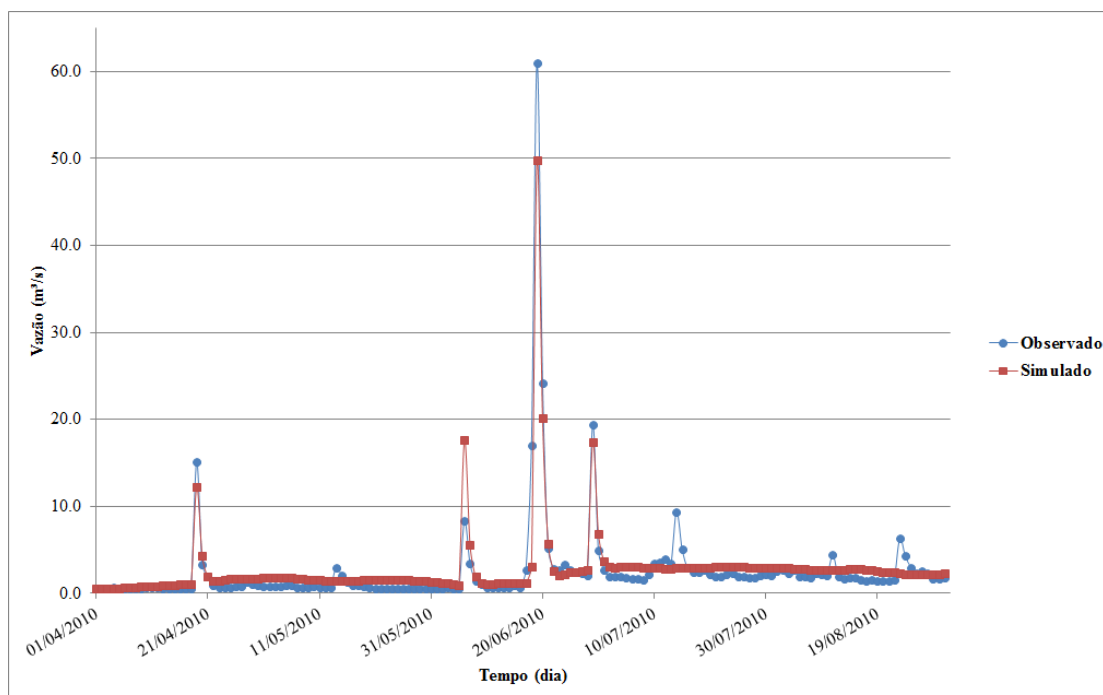
Figura 23: Hidrograma de calibração da estação **39192000** (abril a agosto de 2005)Figura 24: Hidrograma de validação da estação **39192000** (abril a agosto de 2010)

Figura 25: Hidrograma de validação da estação **39192000** (abril a agosto de 2011)

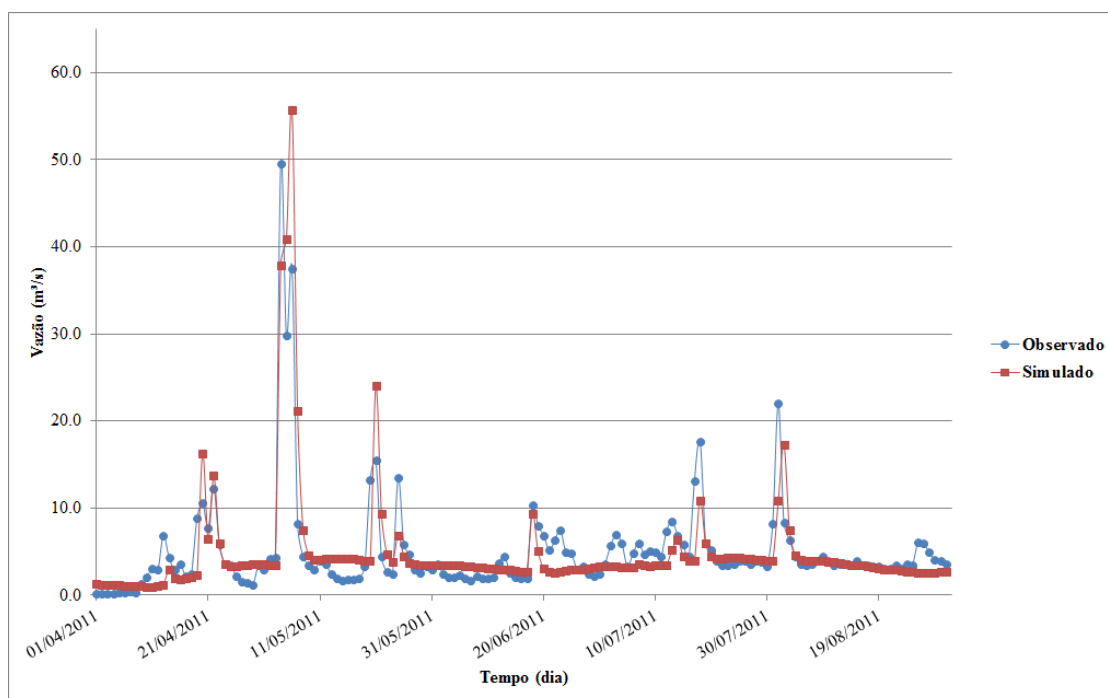


Figura 26: Hidrograma de calibração da estação **39195000** (abril a agosto de 2000)

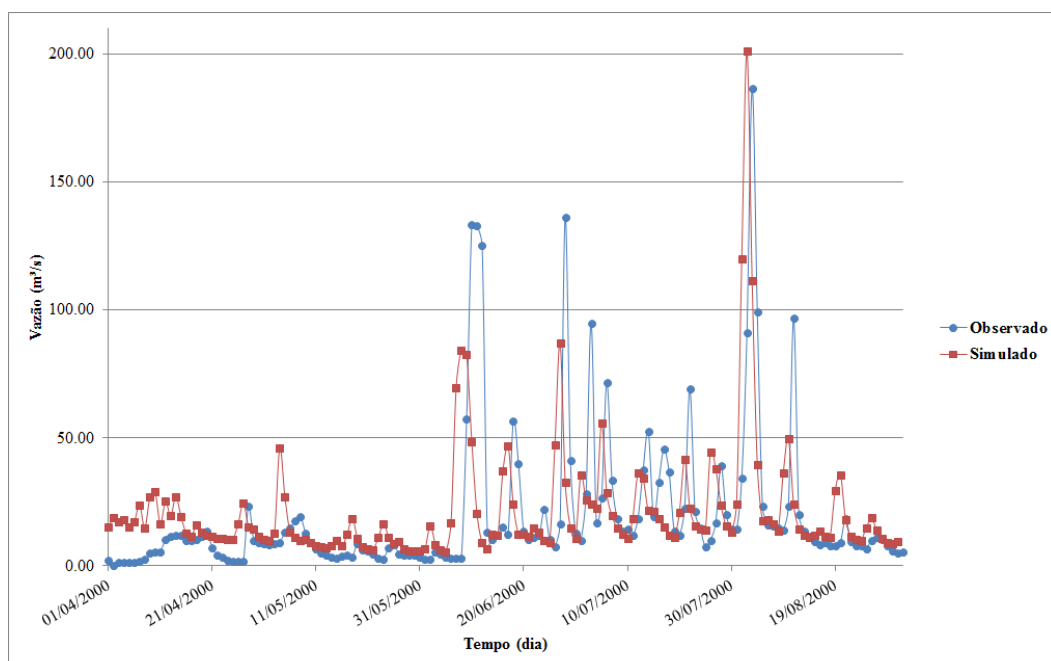


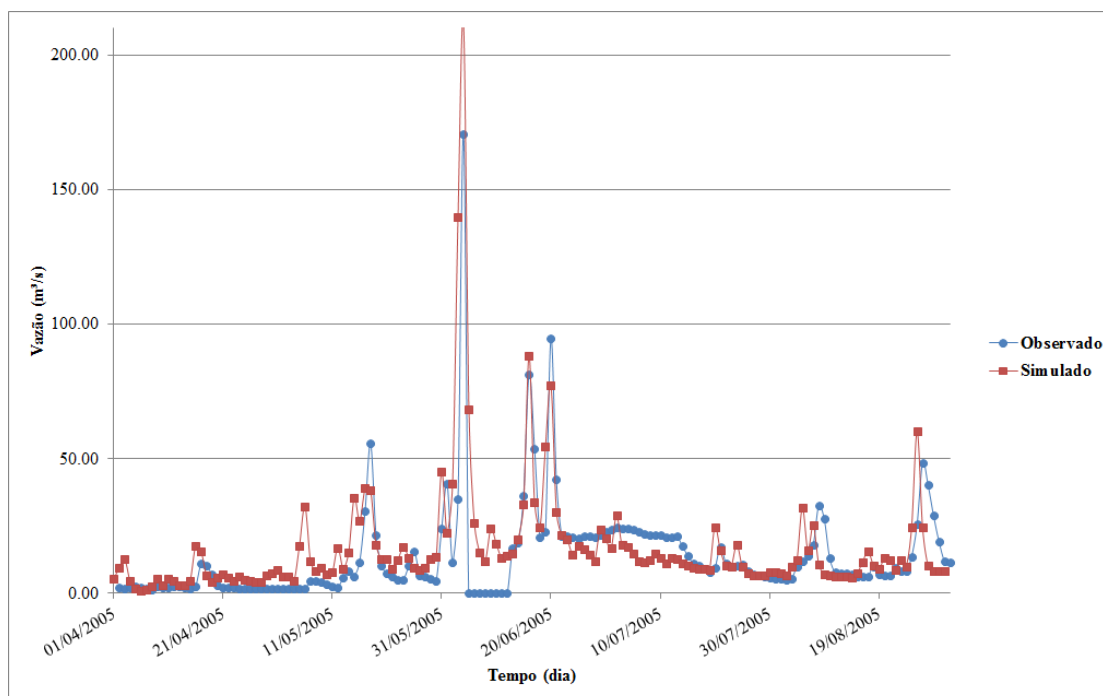
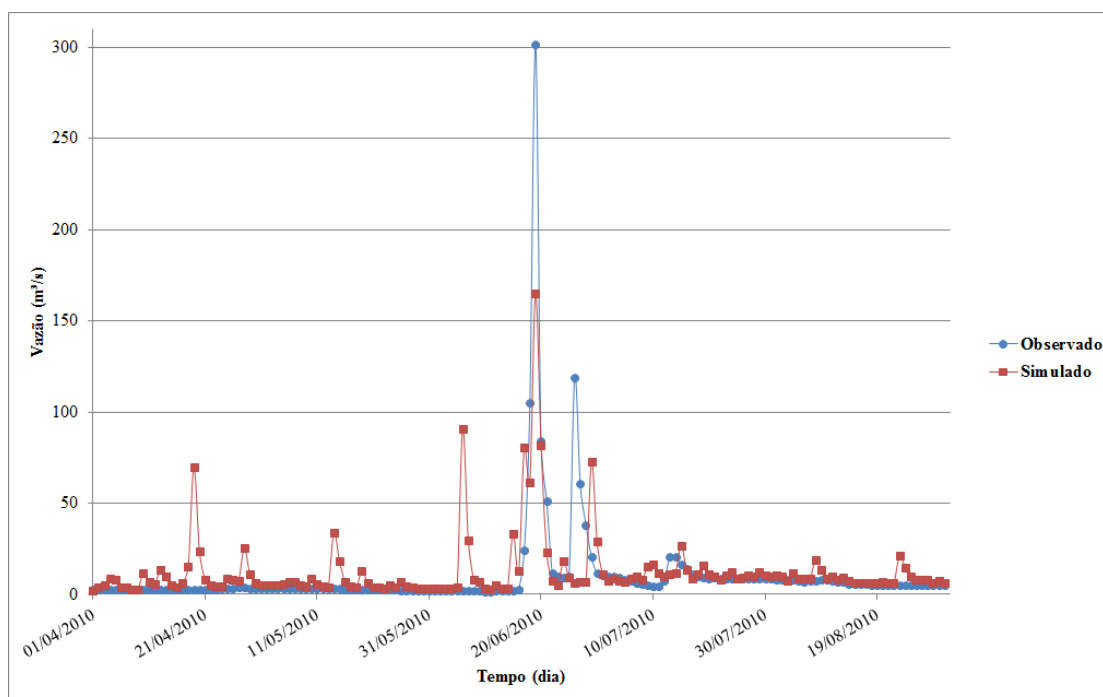
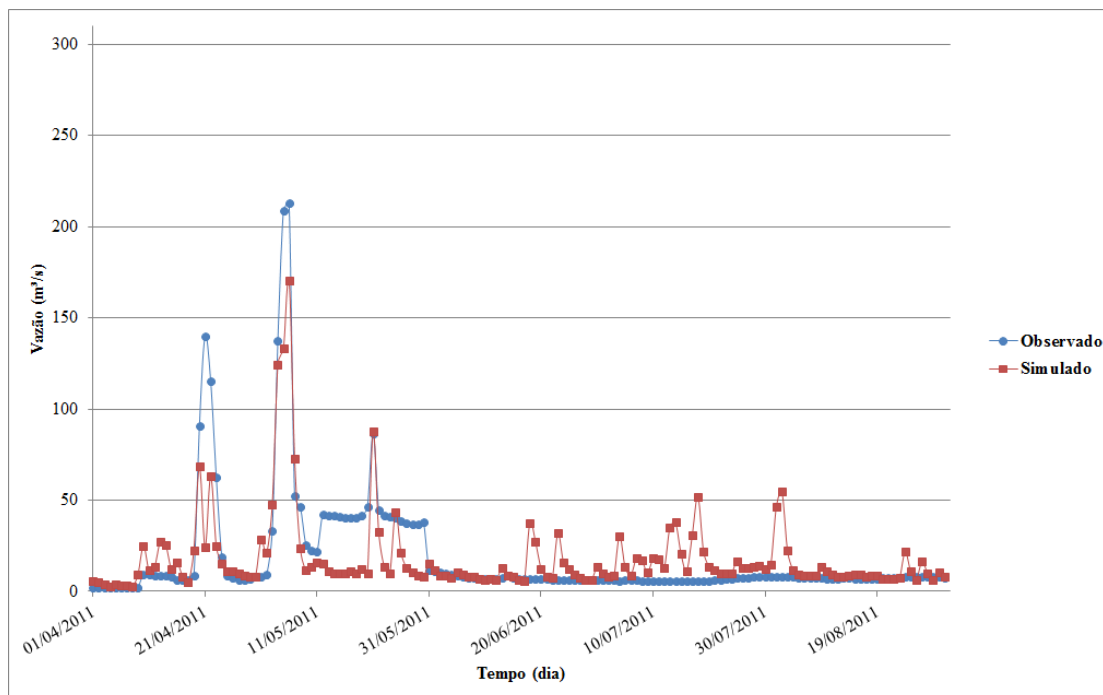
Figura 27: Hidrograma de calibração da estação **39195000** (abril a agosto de 2005)Figura 28: Hidrograma de validação da estação **39195000** (abril a agosto de 2010)

Figura 29: Hidrograma de validação da estação **39195000** (abril a agosto de 2011)



Outra forma de visualizar essas dinâmicas é através dos gráficos de dispersão abaixo, ver Figuras 30, 31, 32 e 33.

Figura 30: Gráfico (Q_{obs} x Q_{sim}) – Estação 39192000 - Calibração

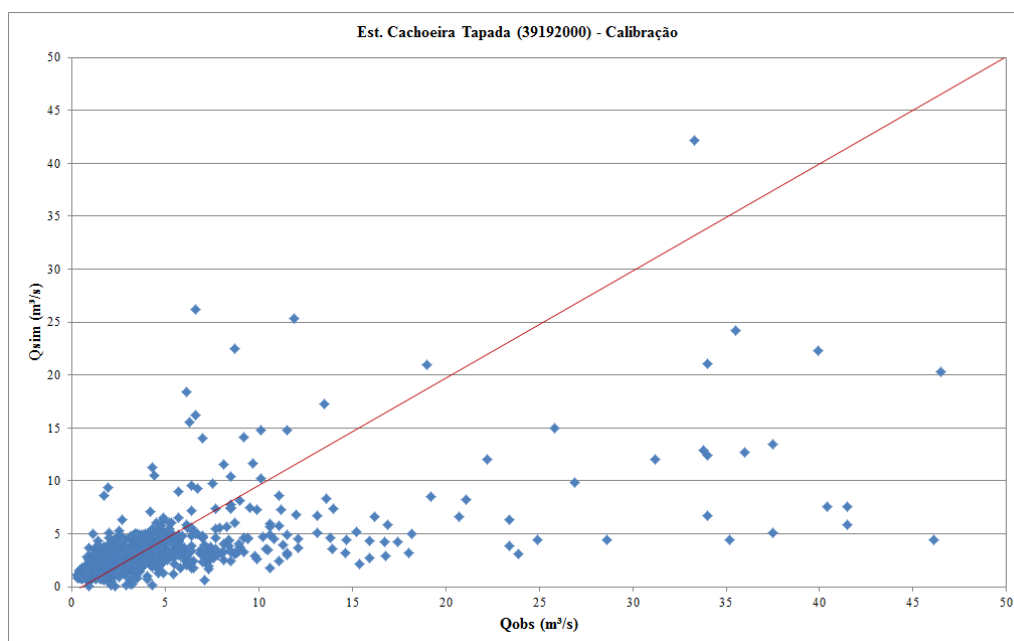


Figura 31: Gráfico (Qobs x Qsim) – Estação 39192000 – Validação

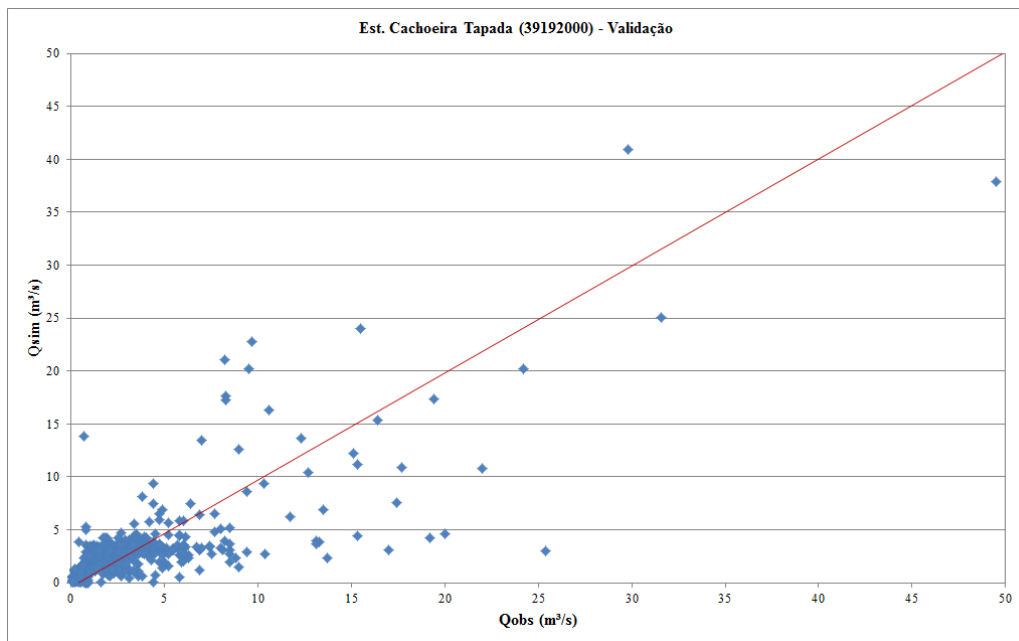


Figura 32: Gráfico (Qobs x Qsim) – Estação 39195000 - Calibração

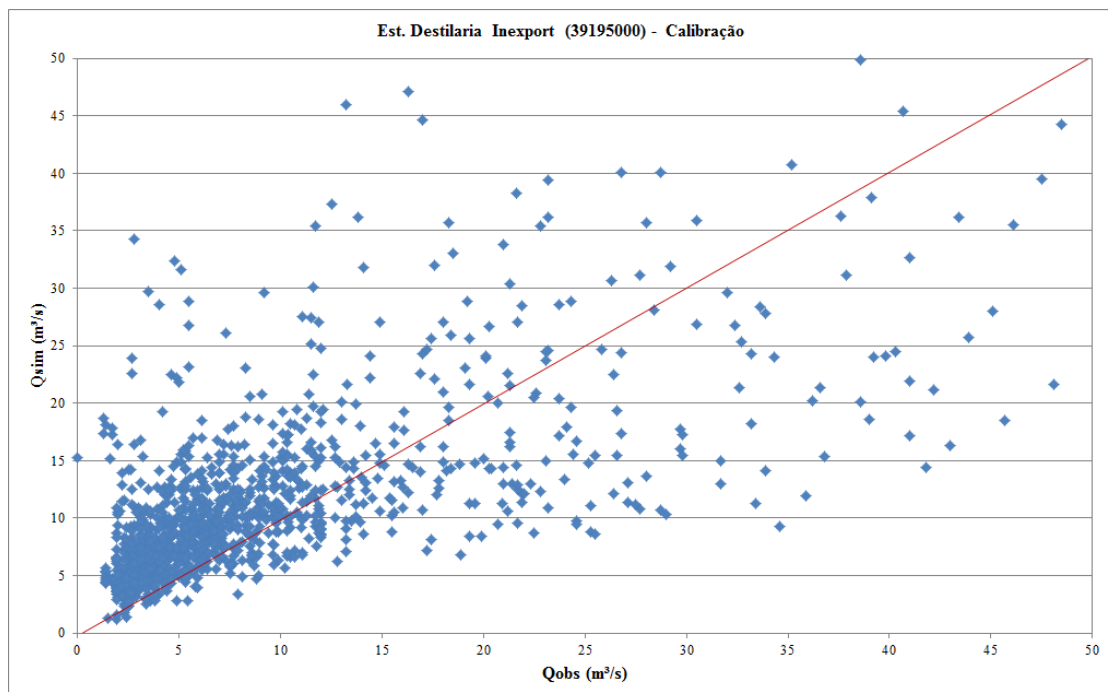
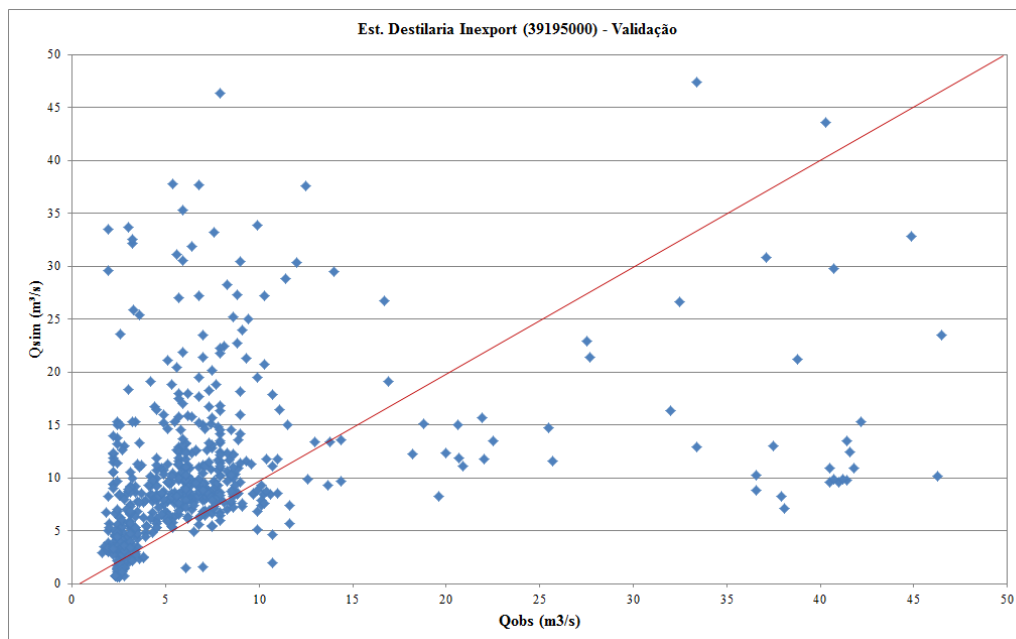


Figura 33: Gráfico (Qobs x Qsim) – Estação 39195000 – Validação



Os gráficos reforçam a observação de que as maiores vazões foram subestimadas e superestimadas em ocasiões distintas. A primeira estação, 39192000, apresenta valores simulados e observados bastante próximos, enquanto que a segunda estação fluviométrica, 39195000, obteve picos modelados superestimando os valores registrados.

No que concerne à análise quantitativa feita através dos coeficientes estatísticos os resultados obtidos podem ser observados nas Tabelas 3 e 4:

Tabela 3: Coeficientes de calibração e validação da estação 39192000

Estação Cachoeira Tapada (39192000)		
Coeficientes	Calibração	Validação
	01abr00 - 01abr09	01abr09 - 30abr14
Vazão Média Observada	2.65	1.88
Vazão Média Simulada	2.02	1.84
Nash	0.44	0.67
%BIAS	-23.90	-1.92
R ²	0.45	0.66

*Valores aceitáveis em negrito

Tabela 4: Coeficientes de calibração e validação da estação 39195000

Estação Destilaria Inexport (39195000)		
Coeficientes	Calibração	Validação
	01abr00 - 01abr09	01abr09 - 30abr14
Vazão Média Observada	7.66	6.51
Vazão Média Simulada	7.77	7.48
Nash	0.62	0.55
%BIAS	1.47	14.99
R ²	0.59	0.56

*Valores aceitáveis em negrito

O grau de precisão dos resultados de um modelo está associado a diferentes fatores, de modo particular e/ou em conjunto. As próprias incertezas envolvidas nas várias etapas da modelagem acabam por limitar a acurácia dos resultados, como no caso de vários parâmetros do HEC-HMS cujos valores são dificilmente estimados através das propriedades físicas. Algumas das características relacionadas à água subterrânea e ao solo são bons exemplos (WALLNER et al., 2012; DE SILVA et al., 2014; HALWATURA & NAJIM, 2013).

Observa-se nas tabelas apresentadas que com exceção dos valores de Nash e R² para a calibração da primeira estação, todos os resultados são satisfatórios. Mesmo atingindo um patamar aceitável, os coeficientes mantiveram um nível mediano de qualidade tanto para a calibração quanto validação. Devido à grande variabilidade de metodologias desenvolvidas, três trabalhos foram selecionados para avaliação e comparação de resultados, uma vez que apresentam vários aspectos coincidentes com os aplicados no Pirapama. Além do uso do mesmo modelo, as séries temporais utilizadas foram diárias, a calibração e validação foram feitas de modo manual, e alguns dos mesmos coeficientes estatísticos foram analisados.

O HEC-HMS foi utilizado por Meenu et al. (2013) em estudo que buscou criar um modelo hidrológico para a bacia do rio Tunga-Bhadra na Índia, a montante da barragem Tungabhadra, com área de aproximadamente 15500 km². As vazões simuladas foram satisfatórias, com exceção dos picos, os quais foram subestimados pelo software. A

pesquisa contou com dados diários e mensais de precipitação adquiridos de cinco estações pluviométricas, tendo os últimos apresentado melhores resultados que os primeiros; ver Tabela 5. Os testes estatísticos de consistência dos valores foram realizados com coeficientes de Nash-Sutcliffe e o R^2 , dentre outros. Diante desse cenário, os autores identificaram algumas dificuldades na criação de um bom modelo para a região em estudo, dentre as quais estão incertezas relacionadas aos dados de chuva e aos parâmetros do modelo. Por fim, a pesquisa ressaltou que diferentes metodologias e abordagens podem vir a encontrar diferentes resultados para a mesma área e período.

Tabela 5: Análise de desempenho

Testes estatísticos	Vazões diárias		Vazões mensais	
	Calibração (1973 - 1992)	Validação (1993 - 2002)	Calibração (1973 - 1992)	Validação (1993 - 2002)
Nash	0.48	0.59	0.75	0.78
R2	0.72	0.77	0.87	0.88

***Valores aceitáveis em negrito**

Fonte: Adaptado de MEENU et al., 2013

Também na Índia, outra pesquisa dessa vez realizada por Chantterjee et al. (2014) buscou desenvolver modelo de chuva-vazão para a bacia do rio Damodar. Por sua utilidade na análise espacial na escala de bacias hidrográficas e por sua ampla aplicação em diversas regiões geográficas, o HEC-HMS foi o software escolhido. Numa área de pouco mais de 23500 km², foram utilizados dados diários de chuva entre os anos 2002 – 2005. Com uma análise baseada em eventos, o modelo utilizou várias sub-bacias para calibração e validação, uma vez que todas elas possuem estações em seus exutórios. O desempenho do modelo foi avaliado também pelo coeficiente Nash-sutcliffe, dentre outros. Os resultados simulados apresentaram grande variância, indo de muito bons a valores medianos, tanto na calibração quanto na validação, ver Tabelas 6 e 7. Também aqui, as previsões mensais foram mais precisas que as diárias, e os picos mais uma vez subestimados pelo modelo. Já o erro de volume foi maior, diferentemente do trabalho anterior, chegou a atingir valores acima dos 30%. Considerando todas as condições, mesmo com a amplitude dos resultados, o modelo foi considerado adequado para a área em estudo.

Tabela 6: Resultados de calibração

Calibração												
Sub-bacias	Tilaiya		Konar		Tenughat		Maithon		Panchet		Durgapur	
	2002	2003	2002	2003	2002	2003	2002	2003	2002	2003	2002	2003
Nash diário	0.55	0.85	0.58	0.88	0.62	0.80	0.34	0.80	0.36	0.48	0.29	0.50
Nash mensal	0.56	0.86	0.60	0.89	0.63	0.81	0.80	0.92	0.73	0.87	0.77	0.78

Fonte: Adaptado de CHANTTERJEE et al., 2014

Tabela 7: Resultados de validação

Validação												
Sub-bacias	Tilaiya		Konar		Tenughat		Maithon		Panchet		Durgapur	
	2002	2003	2002	2003	2002	2003	2002	2003	2002	2003	2002	2003
Nash diário	0.36	0.53	0.34	0.50	0.37	0.79	0.75	0.38	0.82	0.24	0.77	0.37
Nash mensal	0.79	0.70	0.77	0.63	0.87	0.84	0.88	0.94	0.84	0.89	0.78	0.58

Fonte: Adaptado de CHANTERJEE et al., 2014

Ribeiro Neto et al. (2015) combinam os modelos HEC-HMS e HEC-RAS para aplicação na bacia do rio Una, região da Mata Sul e Agreste do Estado de Pernambuco. A bacia abrange uma área de 6704 km², na qual foi realizada simulação por evento com uso de um Modelo Digital de Terreno de alta resolução. De acordo com os autores, os resultados obtidos demonstraram reconhecimento dos momentos de ocorrência dos picos de vazão, por parte do modelo. O desempenho do HEC-HMS mostrou-se coerente com simulações feitas por outros softwares e a parametrização realizada foi eficaz na representação dos processos hidrológicos da bacia (ver Tabelas 8 e 9).

Tabela 8: Desempenho da calibração

Calibração				
Estação	Período	NS	ΔV	R ²
Capivara	1978-1990	0,39	36,1	0,26
Catende	1999-2007	0,62	-21,7	0,64
Palmares	1967-1990	0,54	6,9	0,45
Jacuípe	1989-2000	0,46	-14,4	0,58
Barreiros	2003-2008	0,53	-6,3	0,46

*NS = Nash-Sutcliffe; ΔV = Erro de Volume; R² = Coeficiente de Determinação

Fonte: Adaptado de RIBEIRO NETO et al., 2015

Tabela 9: Desempenho da verificação

Verificação				
Estação	Período	NS	ΔV	R^2
Capivara	2000-2011	0,32	42,08	0,12
Catende	2008-2011	0,52	17,80	0,55
Palmares	1991-2011	0,59	-4,22	0,52
Jacuípe	2001-2011	0,13	-14,03	0,56
Barreiros	2009-2011	0,20	3,54	0,50

Fonte: Adaptado de RIBEIRO NETO et al., 2015

Assim, as considerações de Meenu et al. (2013) assemelham-se às desta pesquisa, embasando os valores desenvolvidos e os problemas encontrados nas simulações realizadas para a bacia do rio Pirapama. Enquanto Chantterjee et al. (2014) e Ribeiro Neto et al. (2015) validam a possibilidade do uso do modelo para a área de interesse, mesmo com a não excelência das simulações.

4.2. Modelagem Hidráulica

A simulação realizada buscou reproduzir as cheias que atingiram a região nos anos de 2000 e 2010. Devido às curtas séries históricas de vazões, provenientes das estações fluviométricas encontradas na bacia, não foi possível determinar estatisticamente o tempo de retorno (T_r) desses eventos. Assim, tomam-se como referência os valores encontrados em bacias vizinhas. Por exemplo, para o rio Ipojuca foi registrada cheia de 160 anos, em 2010 (COUTINHO, 2014). Já no rio Una, os tempos de retorno estimados para as enchentes de 2000 e 2010 foram de 58 e 200 anos, respectivamente (RIBEIRO NETO et al., 2015).

Os trechos de interesse em ambos os rios partem de seus respectivos reservatórios até a foz de cada um, ver Figura 34. A sede da cidade do Cabo de Santo Agostinho, área de estudo e aplicação dos indicadores de risco, encontram-se neste perímetro.

Para representação do canal, foi feita interpolação das batimetrias obtidas pelos postos fluviométricos da ANA (39200000 e 39220000) estabelecidos no trecho a ser modelado. As estações utilizadas na modelagem hidrológica estão a montante deste trecho e, portanto, não foram utilizadas para este propósito. As seções transversais de batimetria (ver Figura 35) foram inseridas em seus respectivos rios e interpoladas de modo a criar o perfil de cada canal.

Figura 34: Localização do trecho da modelagem hidrodinâmica

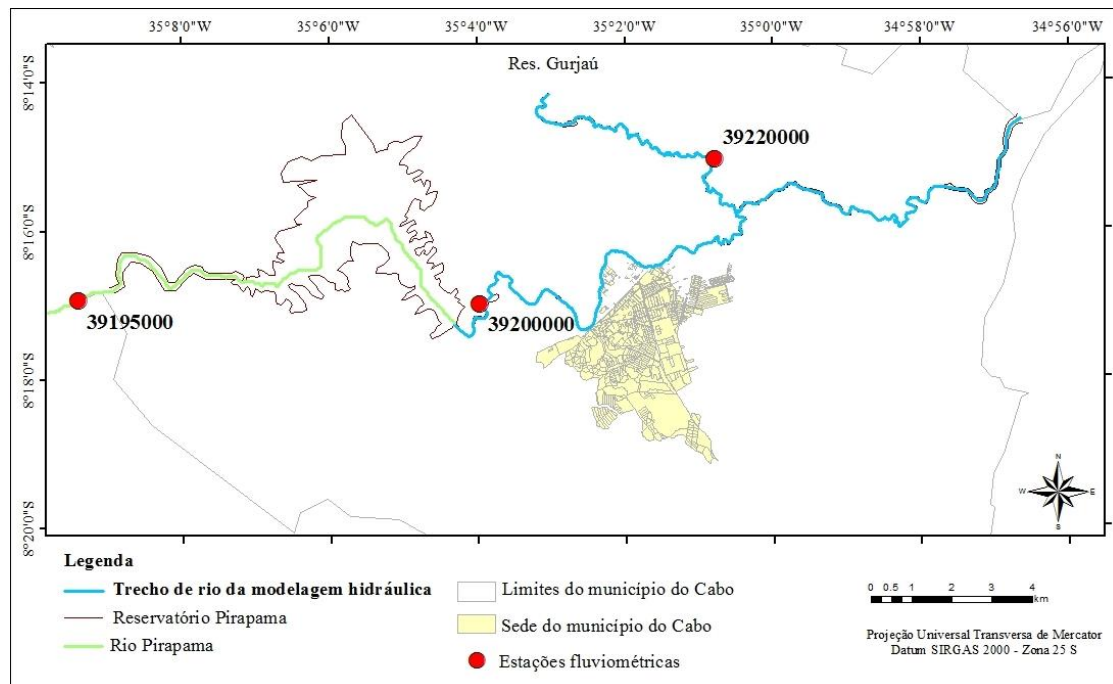
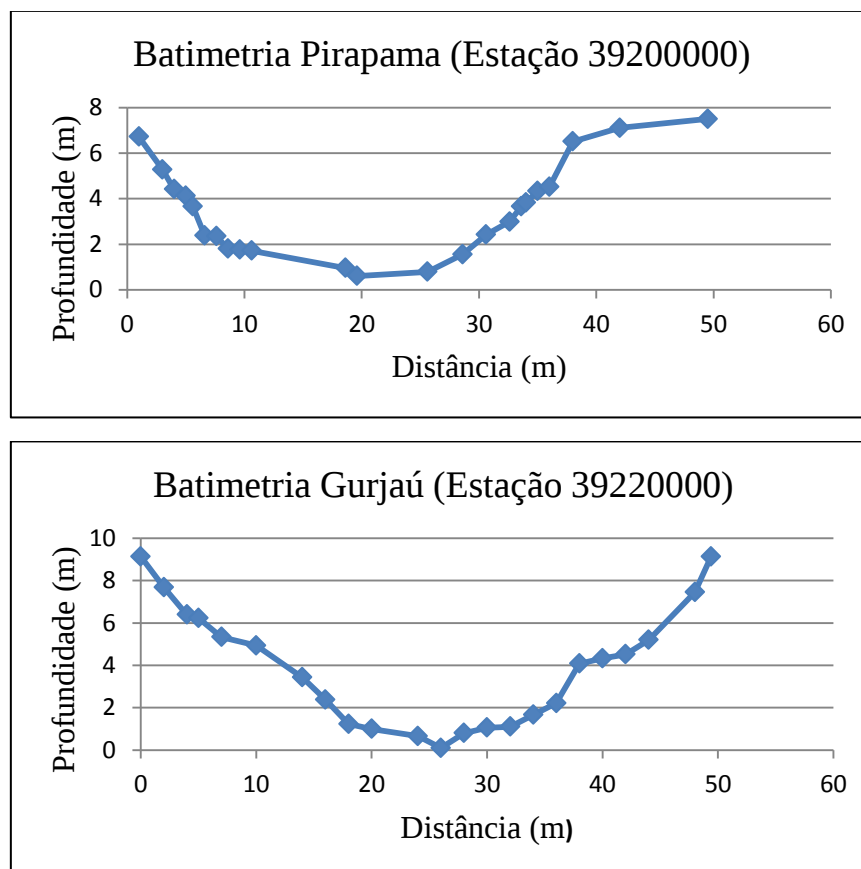


Figura 35: Batimetrias



Os resultados obtidos pelas tentativas de simulação não permanente foram insatisfatórios devido à instabilidade numérica do modelo, alertada no próprio manual do software. As razões para tal comportamento podem ser diversas, como por exemplo, baixas profundidades, ou mudança de fluxo do subcrítico para o supercrítico, sem a predefinição de fluxo misto no processo de modelagem (BRUNNER & CEIWR-HEC, 2010). Tal situação suscitou modificações e a busca por alternativas na tentativa de estabilizar a simulação em regime transitório.

O coeficiente de Manning foi alterado até atingir valores da ordem de 0,070 e 0,100 como em Dantas (2012), seções muito próximas foram suprimidas como explorado por Santos (2013), e foi realizada também a diminuição do intervalo de tempo como testado por Pappenberger et al. (2005). No entanto, nenhuma das medidas modificou satisfatoriamente os resultados ou demonstraram contribuição para uma modelagem mais estável. Desse modo, assim como em Turner et al. (2013), optou-se pela simulação em regime permanente, passando da modelagem hidrodinâmica para a hidráulica uma vez que a variação da vazão ao longo do tempo foi substituída pelos picos referentes a cada evento. Estes últimos foram identificados no dia 01 de agosto de 2000 e 18 de junho de 2010.

Como condições de contorno a montante do Pirapama (Q_1), foi utilizada vazão medida na estação fluviométrica 39200000, e para montante do Gurjaú (Q_2) foi adotada vazão de saída simulada pelo modelo HEC-HMS. A partir daí foram sendo adicionadas as vazões incrementais de cada sub-bacia, as quais vão se acumulando ao longo do percurso do rio, sendo referentes à suas respectivas áreas de drenagem, ver Tabela 10. Os parâmetros utilizados nas sub-bacias, destacadas na Figura, 36 foram os resultantes da calibração do modelo HEC-HMS para a Estação 39195000.

Tabela 10: Condições de contorno

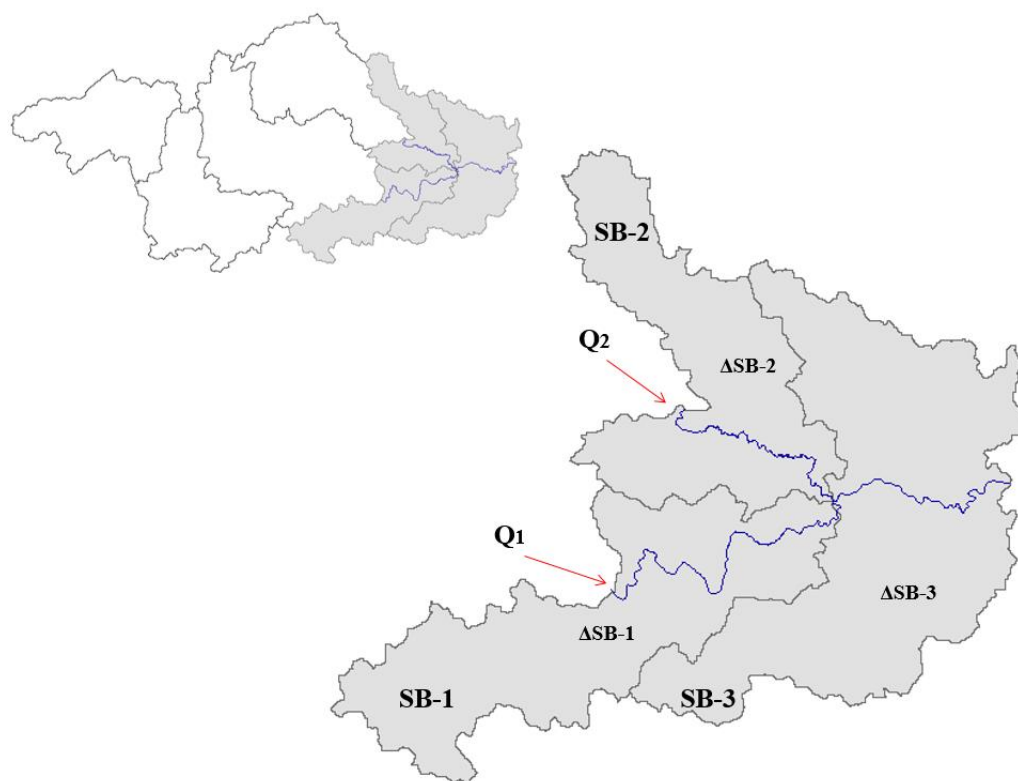
Localização	Vazões
Vazão de Montante Pirapama	Q_1
Vazão de Montante Gurjaú	Q_2
Vazão incremental SB-1	$\Delta SB-1$
Vazão incremental SB-2	$\Delta SB-2$
Vazão incremental SB-3	$\Delta SB-3$

Q_1 – Vazão medida na estação fluviométrica 39200000

Q_2 – Vazão simulada pelo HEC-HMS

Com o modelo respondendo de maneira favorável, foi possível gerar planícies de inundação adequadas à configuração da região fornecida pelos dados topográficos.

Figura 36: Esquema gráfico - Condições de contorno



4.3. Indicadores

Neste estudo, a contribuição de cada indicador é individualizada de modo a demonstrar sua função na construção do cenário de risco da área em foco.

Primeiramente, a extensão da superfície da água mostrou-se coerente com a topografia apresentada nas curvas de nível, assim como com a imagem do Google Earth. Após a sede do município do Cabo, o rio Pirapama encontra o Gurjaú e se desloca para sua foz. Essa região, ainda em processo de expansão ocupacional, caracteriza-se de fato por uma extensa planície entre rio e oceano, justificando a mancha contínua de água gerada pela modelagem (ver Figuras 37 e 38).

Figura 37: Curvas de Nível – Cheia 2000



Figura 38: Área de estudo – Planície de inundação - Satélite



Fonte: Imagem editada do software Google Earth

No que diz respeito à profundidade, é evidente o domínio deste indicador na criação de cenários pós-enchentes, principalmente na caracterização do nível de perigo, sendo fator protagonista na definição de outros parâmetros também. Sua atuação já consolidada na literatura, com ênfase para Thieken et al. (2005) e Kreibich et al. (2009), foi consistente também nos resultados desta pesquisa.

Quanto a categorização, o mesmo Kreibich et al. (2009) divide as alturas da superfície da água em cinco níveis, de modo a proceder sua análise. Tal abordagem foi seguida, entretanto o tipo construtivo que se tem por base é diferente do encontrado no município do Cabo. Assim para manter este parâmetro mais próximo da realidade

brasileira, os limiares dos cinco níveis foram definidos de acordo com a classificação desenvolvida por Zonensein (2007), com a normalização de profundidades em cinco faixas definidas de maneira empírica, ver Tabela 11.

Tabela 11: Faixas de normalização da cota de inundação

COTA (cm)	EFEITO
< 10	O meio-fio costuma ter aproximadamente 15cm de altura, de maneira que a 10cm a água está limitada às ruas.
50	Com 50cm a inundação inunda ruas, além de parques, calçadas, canteiros, quintais e estacionamentos. Pode interromper tráfego de veículos e principalmente de pessoas, podendo invadir casas mais simples, com soleiras próximas ao nível das calçadas.
70	A 70cm a água muito provavelmente já invadiu o interior de casas, causando danos a sua estrutura e conteúdo.
100	A esta altura a água atinge praticamente todos os bens no interior das casas.
>150	Esta profundidade atinge não só bens, mas também é suficiente para causar afogamentos.

Fonte: ZONENSEIN, 2007

Os mapas de profundidade ilustram graficamente a distribuição de cotas atingidas em ambos os eventos simulados, ver Figuras 39 e 40. Na sede do município, pixels com valores acima dos 1.5m de profundidade representaram a maioria dos resultados para ambas as cheias. Os outros valores não chegam a somar 30%, caracterizando predominância do pior cenário possível, com profundidades muito altas. Já em Ponte dos Carvalhos foi apresentado maior equilíbrio entre os resultados, com a maior quantidade de pixels sendo dividida entre valores de até 0.7m de profundidade e acima de 1.5m. O comportamento apresentado pelos números está intimamente associado à topografia das áreas em estudo. Este fato ainda pode ser comprovado pela recorrência da distribuição de cotas nos eventos de 2000 e 2010, ou seja, se em um local a cota foi baixa em 2000, isso se repetiu no evento de 2010 (ver Tabela 12). Desse modo, considerando que os danos diretos serão calculados em função da profundidade, pode-se concluir que a sede do Cabo está mais suscetível a sofrer perdas que o bairro de Ponte dos Carvalhos.

Figura 39: Mapa de Profundidade – Cheia 2000

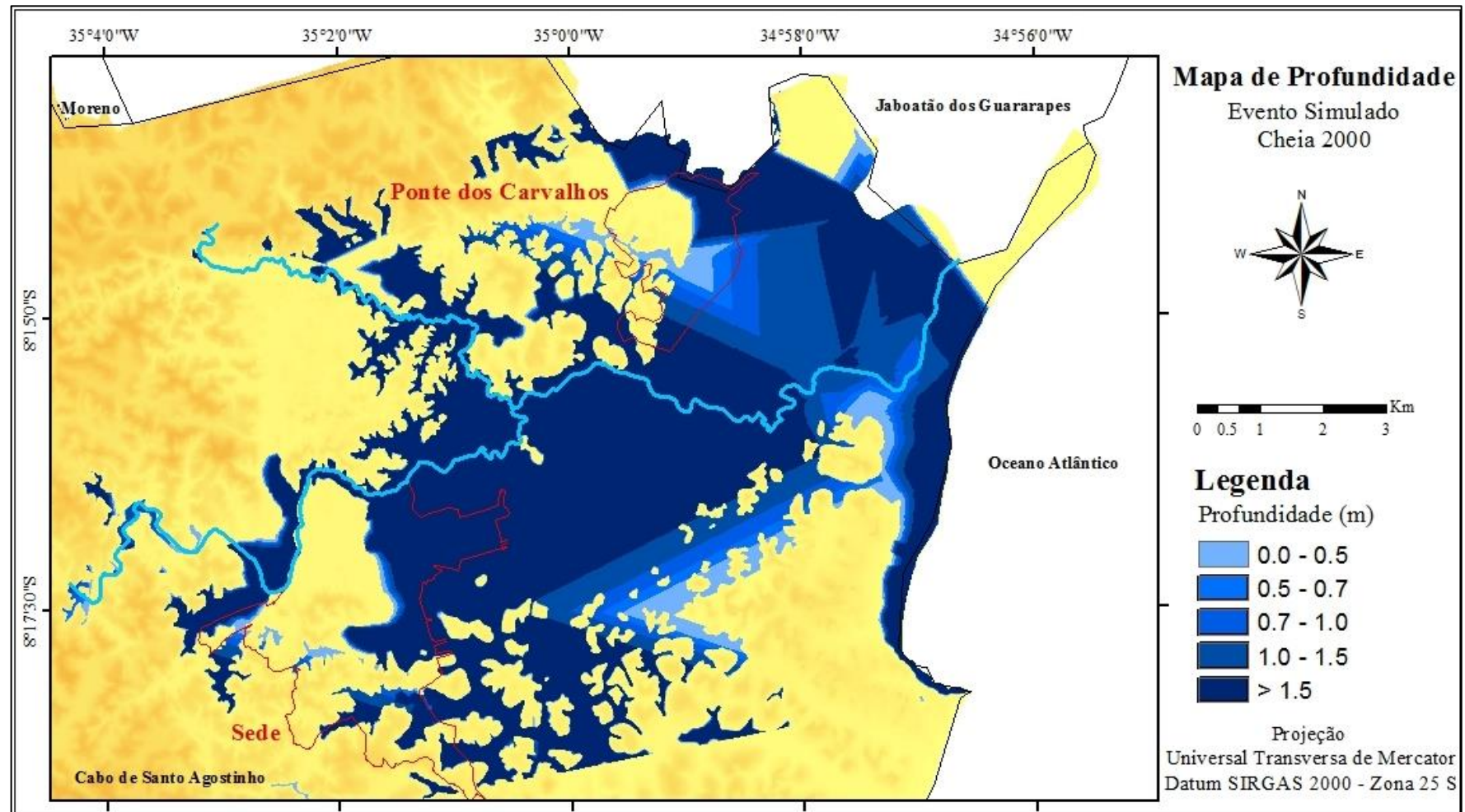


Figura 40: Mapa de Profundidade – Cheia 2010

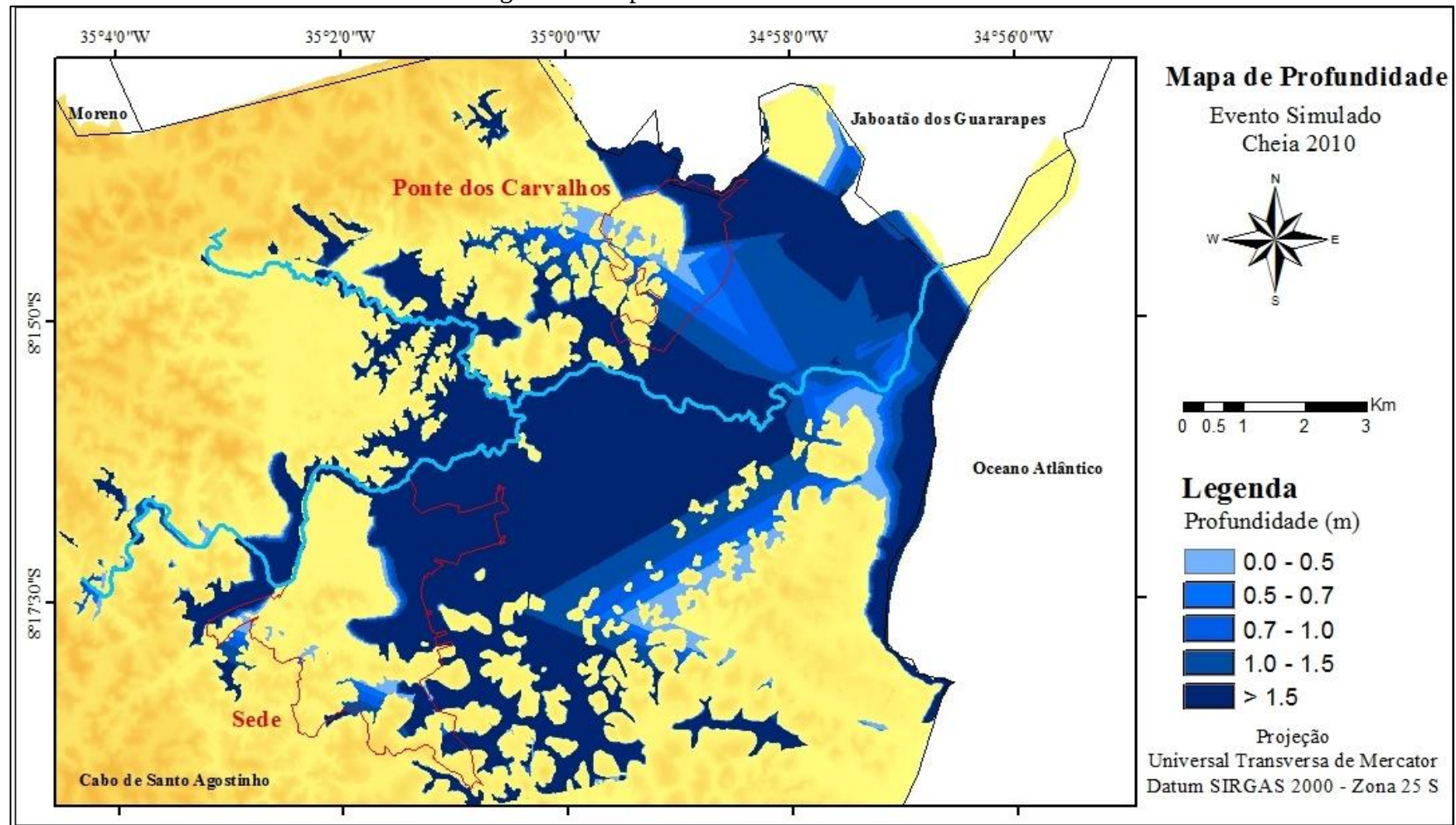


Tabela 12: Percentual de pixels por limiar de cotas atingidas

SEDE DO CABO (m)	Cheia 2000 (%)	Cheia 2010 (%)
0.0 – 0.5	7.68	8.90
0.5 – 0.7	2.46	3.64
0.7 – 1.0	3.69	4.81
1.0 – 1.5	7.76	6.84
>1.5	78.42	75.80
PONTE DOS CARVALHOS (m)	Cheia 2000 (%)	Cheia 2010 (%)
0.0 – 0.5	22.90	17.86
0.5 – 0.7	15.61	17.68
0.7 – 1.0	10.09	15.27
1.0 – 1.5	11.57	11.53
>1.5	39.83	37.65

No que concerne à exposição, esta pesquisa se ateve em demonstrar as áreas propensas a serem atingidas no caso de um evento extremo. Diferentemente de Camarasa Belmonte et al. (2011), que relacionam exposição apenas com as pessoas que podem ser alcançados na ocasião de uma cheia, este trabalho visa delimitar toda a área em contato com a água. Dessa forma, o conceito de exposição está de fato ligado a todo elemento que se encontre na região atingida que potencialmente possa ser prejudicado pela inundação, sejam bens, serviços, construções, pessoas, dentre outros, como definido por Lavell et al. (2012).

Neste caso, devido à ausência de uma unibase, ou seja, uma planta da cidade com registro de lotes e construções, os edifícios expostos não são especificamente apontados, no entanto é possível identificar as quadras propensas a serem atingidas. Além da sede do município do Cabo e do aglomerado urbano do bairro de Ponte dos Carvalhos, também foram destacados dentro do raio de ação da cheia o empreendimento Condomínio de Negócios Cone Suape (áreas construídas até o presente momento) e o Hospital Dom Hélder Câmara, (ver Figuras 41 e 42). Desse modo foi possível se obter um resultado graficamente tão eficaz quanto em Merz et al. (2007).

A sede do município e o bairro de Ponte dos Carvalhos apresentam na Tabela 13 o percentual de sua área atingida nos eventos de 2000 e 2010. Ao se pensar em exposição, deve-se entender que além de perdas materiais, essas áreas podem passar por dificuldades de acesso e, consecutivamente, resgate, abastecimento, além de problemas

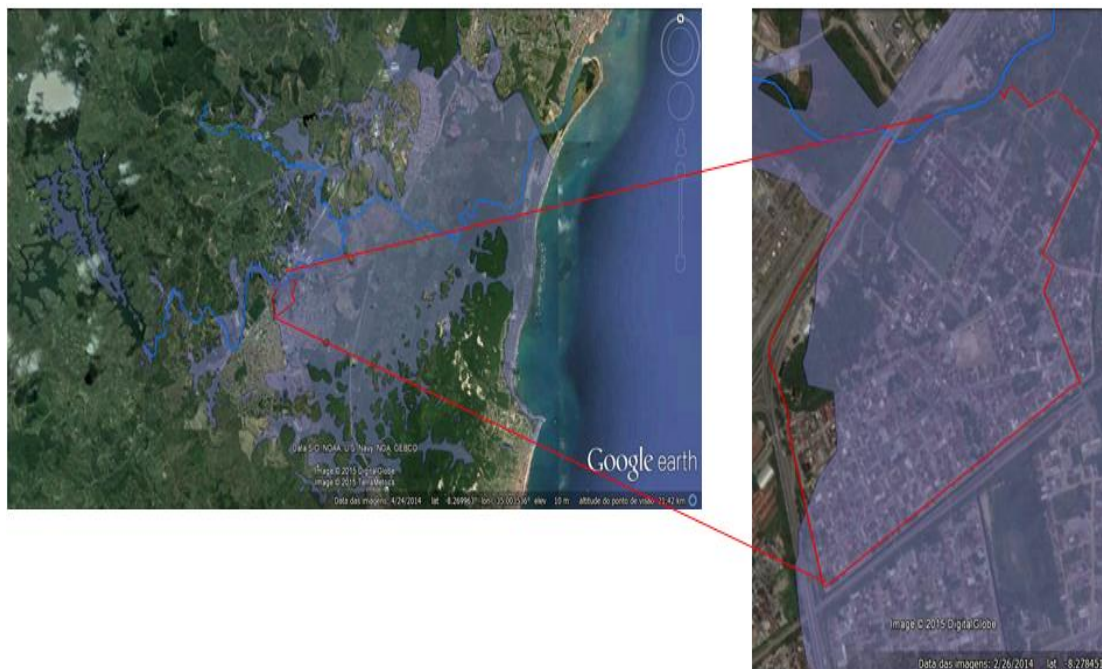
como possível contaminação por doenças de veiculação hídrica, destacadas por Zonensein (2007).

Tabela 13: Percentual de exposição

	Área exposta no evento de 2000 (%)	Área exposta no evento de 2010 (%)
Sede do Cabo	33,82	32,75
Ponte dos Carvalhos	57,44	62,89

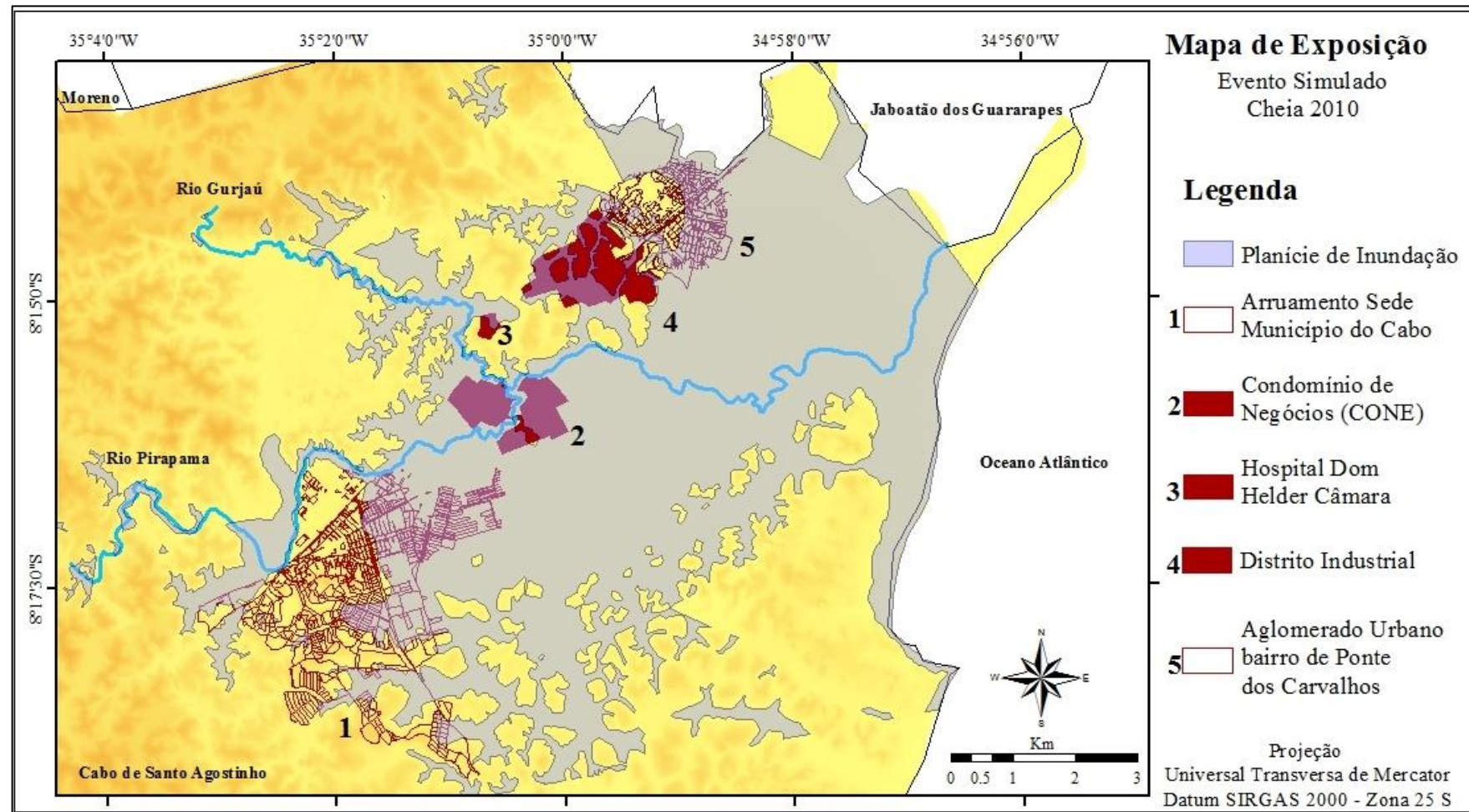
Limitado pela topografia como a profundidade, o fator exposição contribui de modo diretamente proporcional para o índice de risco de uma comunidade. Assim, tanto o planejamento do uso do solo como a gestão de riscos passa pelo mapeamento da exposição, na busca por estratégias que possam reduzir tal situação (CAMARASA BELMONTE et al., 2011).

Figura 41: Exposição – Imagem – Cheia de 2010



Fonte: Imagem editada do software Google Earth

Figura 42: Mapa de Exposição – Cheia de 2010



As estimativas de perdas econômicas pós-desastres também são extremamente úteis para a gestão, visto que direcionam os recursos de auxílio, reconstrução e recuperação, como destacam Dutta et al. (2003). Nesta pesquisa, a estimativa de danos é feita tendo por base os mapas de profundidade, exposição e a função cota-dano desenvolvida por Machado et al. (2005). Esta última deve ser aplicada em área construída que tenha uso residencial. Desse modo, selecionou-se região inundada na sede do Cabo, na qual foi realizado levantamento em campo e classificação das edificações existentes com auxílio de imagem do software Google Earth, ver Figuras 43 e 44. Foram registradas e vetorizadas 809 construções para a área em questão, das quais 756 são de uso residencial, sendo 720 dessas atingidas pela água. Estas últimas são contabilizadas como área construída, na qual é aplicada a função para análise de possíveis perdas, ver Figura 45.

Para maior representatividade dos resultados, foi feita alteração da resolução do raster de profundidades, passando de 10 para 1m. Os valores encontrados para cada evento, diante das características da modelagem realizada, estão resumidos na Tabela 14. Outro trabalho que produziu resultados neste âmbito foi o de Merz et al. (2007), cujos custos para área residencial atingiram a marca dos 65 Euros por m². Aqui vale considerar que a pesquisa foi produzida em cenário europeu com características construtivas e geográficas diferentes, justificando as divergências encontradas em relação aos resultados deste estudo. Mesmo assim é feito esse registro como base de comparação.

Figura 43: Área em estudo para estimativa de danos

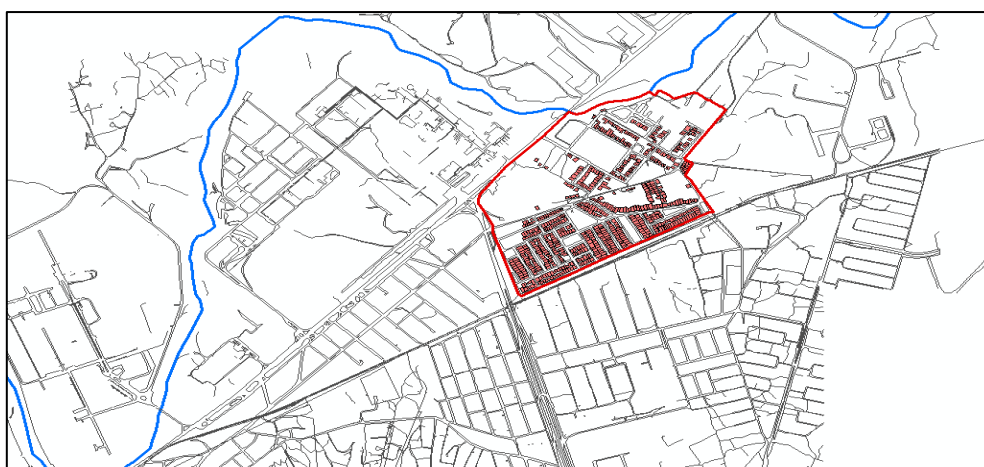
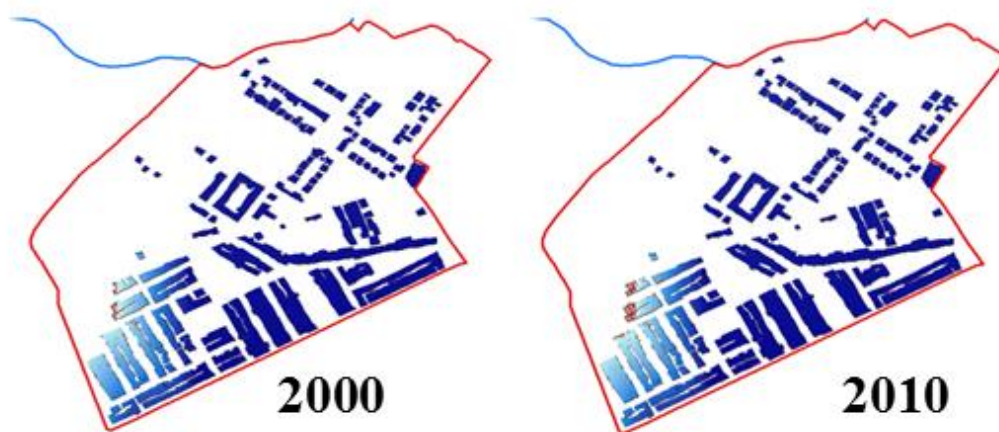


Figura 44: Delimitação da área construída



Fonte: Imagem editada do software Google Earth de fevereiro de 2014

Figura 45: Raster de profundidades - Cheias 2000 e 2010 - Resolução (1x1) m



No Brasil, Pathirana et al. (2011) desenvolveram um modelo que incorporou a equação desenvolvida por Machado et al. (2005), com aplicação para uma área de 19 hectares da cidade de Porto Alegre. O dano total associado à cheia simulada, com 2 horas de duração e tempo de retorno de 50 anos, foi de R\$ 297.000, 00, um valor bem menor do que o encontrado no município do Cabo. No entanto deve-se considerar que as profundidades, enquanto variáveis independentes da função cota-dano utilizada, têm papel determinante para o surgimento e caracterização dos custos. Com a grande maioria das profundidades atingindo valores muito baixos, os resultados de Porto Alegre se justificam. Da mesma maneira, os números simulados no Cabo de Santo Agostinho respondem de modo coerente às altas profundidades registradas na área selecionada da sede, com cotas médias atingindo 2,99m em 2000, e 2,83m em 2010. Tal

comportamento acontece principalmente em resposta à extrema proximidade da ocupação urbana com o rio Pirapama.

Tabela 14: Danos potenciais

	Evento 2000	Evento 2010
Área construída residencial (m ²)	89.701,92	89.701,92
Dano total (R\$)	7.362.872,24	7.202.484,98
Dano/m ² (R\$)	82,08	80,29

É relevante destacar que várias incertezas estão associadas não apenas à estimativa de tais prejuízos, mas no próprio desenvolvimento das funções cota-dano, podendo resultar em cenários reais um pouco diferentes. Assim, este indicador representa apenas uma parte dos prejuízos potenciais originados por um evento extremo, mas ainda assim caracteriza-se como um elemento norteador, uma vez que sua parcela de contribuição é maior que a dos danos indiretos, dentro do atual cenário de metodologias desenvolvidas para este tipo de análise (CARRERA et al., 2015). Os danos calculados apresentam a grandeza do que poderia ocorrer nesta área, levando em consideração as particularidades da modelagem hidráulica realizada. Assim, a extrapolação de tais fatores não pode ser realizada de maneira direta, sem a observação de possíveis diferenças de cotas, de características geográficas, da ocupação populacional e das construções presentes, por exemplo.

Muito embora não se tenha definido um valor absoluto para o risco, é possível perceber as características que atuam em sua composição. A parcela correspondente à vulnerabilidade se concretiza de modo sintético na presença dos danos diretos, passíveis de ocorrerem por força da acentuada exposição dos assentamentos populacionais, estando sua magnitude condicionada ao indicador profundidade. Já no que concerne ao perigo, a existência do reservatório no rio Pirapama poderia caracterizar fator de controle do mesmo, no entanto com uso voltado predominantemente para abastecimento, tais estruturas hidráulicas têm seu poder de influência reduzido. Os altos picos de vazão registrados mesmo com a presença de tal reservatório podem fundamentar esse argumento.

Assim, a individualização dos indicadores, norteadora pelo conceito da adaptação no sentido da compreensão dos possíveis cenários de desastre e mitigação de perdas, ressaltou inter-relações, dinâmicas e contribuições desses parâmetros para a definição

do risco. Este último, enquanto possibilidade da interação entre um evento extremo de inundação e uma comunidade vulnerável existente no município do Cabo.

5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Estando inserida dentro do amplo conceito de impacto, adaptação e vulnerabilidade, a presente investigação buscou entender o comportamento das inundações através de elementos quantitativos chamados de indicadores. Essa abordagem atua como ferramenta em todas as esferas da população, contribuindo para um conhecimento mais abrangente dos riscos e para uma gestão mais objetiva antes, durante e depois da ocorrência de desastres.

Assim, foi aplicada metodologia de classificação de indicadores de risco de inundação para área do município do Cabo de Santo Agostinho, de modo a demonstrar as dinâmicas envolvidas na interação entre perigo, exposição e vulnerabilidade na composição de tal risco. Sendo o perigo referente ao evento natural extremo, a vulnerabilidade às características intrínsecas da comunidade potencialmente atingida, e a exposição às pessoas, bens, serviços e recursos localizados em áreas propensas a sofrer danos. Para tal investigação, foram utilizados o modelo hidrológico HEC-HMS e o modelo hidrodinâmico HEC-RAS.

Diante dos dados disponíveis e da quantidade de variáveis apresentadas, foi realizado ajuste do modelo hidrológico. Os coeficientes estatísticos utilizados para avaliação de tal ajuste atingiram valores aceitáveis para os eventos simulados. Os picos de vazão foram detectados de maneira satisfatória pelo modelo, com correspondência entre as vazões máximas e seu tempo de ocorrência. Os hidrogramas gerados contribuíram de maneira ativa e eficaz na modelagem hidráulica. Esta última, com a opção de simulação em regime permanente, evitou as instabilidades numéricas, e ainda assim gerou adequadamente as planícies de inundação referentes a eventos extremos ocorridos nos anos de 2000 e 2010.

No que concerne aos indicadores, a superfície da água gerada mostrou-se consistente com a topografia do local, sendo a profundidade o elemento protagonista na criação e classificação da magnitude dos cenários pós-enchentes, na caracterização do perigo, e na definição dos demais parâmetros. A Sede do Cabo de Santo Agostinho foi a região mais atingida, mais de 70% dos valores registrados atingiram cotas acima dos 1.5m de profundidade tanto para o evento de 2000, quanto para o de 2010. Já Ponte dos Carvalhos, outro aglomerado urbano do município foco da pesquisa, apresentou comportamento mais equilibrado, com a maioria dos registros para cotas variando entre

valores até 0.7m, nos quais os prejuízos são menores, e acima de 1.5m, o qual caracteriza o pior cenário possível.

A exposição foi delimitada de maneira objetiva, a Sede e Ponte dos Carvalhos tiveram em 2000 33,82% e 57,44% de sua área atingida, respectivamente, enquanto que em 2010 registrou-se 32,75% e 62,89%. Sua influência direta na delimitação dos danos também foi observada.

Por fim, os danos diretos reafirmaram-se enquanto um fator contribuinte para a quantificação da vulnerabilidade devido a sua acessibilidade, sendo sua estimativa viável através da transferência de curvas cota-dano da cidade de Itajubá para o município do Cabo, registrando prejuízos por m² de R\$82,08 para a cheia de 2000, e R\$ 80,29 para 2010. Tais valores foram calculados para região exposta da sede, com área de 8,97 hectares, sendo considerada apenas a parcela construída com uso residencial.

Assim, além da definição quantitativa da grandeza potencial dos danos a serem gerados no caso de eventos extremos semelhantes aos simulados, o desenvolvimento dos mapas possibilitou a visualização da distribuição espacial e do comportamento dos indicadores estudados, representando de modo eficaz o perigo e a exposição.

RECOMENDAÇÕES

Estudos relativos a desastres são extremamente relevantes diante de uma realidade climática instável como a atual. A compreensão dos sistemas, principalmente os naturais, está intrinsecamente associada à qualidade de vida dos seres humanos. Para tal, negar ou permanecer na ignorância não é mais uma possibilidade viável. Gestores públicos e população precisam desenvolver consciência da relevância do planejamento urbano e sua efetiva implementação para consolidação de uma sociedade mais adaptada e sustentável.

Desse modo, é necessário que as pesquisas continuem a avançar no tema, buscando transpassar dificuldades metodológicas recorrentes. Assim ficam registradas as seguintes recomendações para próximas pesquisas:

- **TRABALHO DE CAMPO:** Levantamento da mancha de inundação para comparação dos resultados do modelo;
- **MODELAGEM.** Calibração e validação do modelo hidráulico de modo a permitir a diminuição de incertezas em análises cada vez mais efetivas e abrangentes;

- **RISCO.** Desenvolvimento de classificação e mapeamento do risco final, através da soma e síntese dos indicadores componentes;
- **RESILIÊNCIA:** Inclusão do fator de resiliência na avaliação da vulnerabilidade. É necessária a avaliação de elementos como sistemas de alerta, ações da Defesa Civil, operações de reconstrução, dentre outros.
- **INDICADORES.** Expansão da metodologia com a adição de outros indicadores, para que haja uma maior aproximação entre o complexo conceito de risco e a realidade prática. Proceder com o levantamento de curvas cota-dano de cidades do Estado de Pernambuco, de modo a permitir a estimativa aprimorada dos prejuízos decorrentes de inundação.
- **DADOS.** Estabelecimento de um banco de dados referente a desastres, causas, comportamentos e consequências, de modo que pesquisas futuras possam, além de produzir resultados sintéticos e adimensionais, ser desenvolvidas e comparadas com o suporte de informações observadas, registradas e de características das regiões estudadas. O uso de modelo digital de elevação obtido com tecnologias de levantamento modernas pode melhorar a precisão dos resultados do modelo hidráulico.

REFERÊNCIAS

- ABUSHANDI, E.; MERKEL, B.. **Modelling Rainfall Runoff Relations Using HEC-HMS and IHACRES for a Single Rains Event in an Arid Region of Jordan**. Water Resources Management, v.27, p.2391-2409, 2013.
- ADGER, W. NEIL.. **Vulnerability**. Global Environmental Change, v.16, ed.3, p.268-281, 2006.
- ALCOFORADO, R. M. G.; CIRILO, J. A.. **Sistema de suporte à decisão para análise, previsão e controle de inundações**. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v.6, n.4, p. 133-153, 2001.
- ALCOFORADO, Roberta Guedes. **Simulação hidráulico-hidrológica do escoamento em redes complexas de rios urbanos: suporte de informações espaciais de alta resolução**. 2006. 139 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2006.
- ALEXANDRE, A. M. B.; SOUZA FILHO, F. A.; CAMPOS, J. N. B.. **Incorporação do impacto da rede de reservatórios superficiais artificiais de caráter intranual na modelagem hidrológica chuva-vazão**. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v.18, n.2, p. 67-82, 2013.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PESQUISAS DE MERCADO- ABIPEME. **Critério Brasil: Instrumento para definir a classe social da população**. 2003. Disponível em:< www.abipeme.org.br > Acesso em: 18 de Junho de 2015.
- BALICA, S.F.; WRIGHT, N. G.. **Reducing the complexity of the flood vulnerability index**. Environmental Hazards - Human and Policy Dimensions, v.9, ed.4, p.321-339, 2010.
- BAPTISTA, M. B.; COELHO, M. M. L. P.; CIRILO, J. A.; MASCARENHAS, F. C. B.; CANALI, G. V.; CABRAL, J. J. S. P.; AZEVEDO, J. R. G.; MONTENEGRO, S. M. G. L.. **Hidráulica Aplicada**. 1. reimp. da 2. ed. rev. ampl. – Porto Alegre: ABRH, 2011. 628 p.
- BIRKMANN, J. (Org.). **Measuring vulnerability to natural hazards: towards disaster resilient societies**. United Nations University Press, 2006. 524 p.
- BIRKMANN, J.; CARDONA, O. D.; CARREÑO, M. L.; BARBAT, A. H.; PELLING, M.; SCHNEIDERBAUER, S.; KIENBERGER, S.; KEILER, M.; ALEXANDER, D.; ZEIL, P.; WELLE, T.. **Framing vulnerability, risk and societal responses: the MOVE framework**. Natural Hazards, v.67, ed.2, p.193-211, 2013.

BIRKMANN, J.; VON TEICHMAN, K.. **Integrating disaster risk reduction and climate change adaptation: key challenges – scales, knowledge, and norms.** Sustainability Science, v.5, ed.2, p.171-184, 2010.

BLANCO-VOGT, A.; SCHANZE, J.. **Assessment of the physical flood susceptibility of buildings on a large scale – conceptual and methodological frameworks** .Natural Hazards and Earth System Sciences, v.14, p.2105-2117, 2014.

BOUWER, L. M.; BUBECK, P.; WAGTENDONK, A. J.; AERTS, J. H.. **Inundation scenarios for flood damage evaluation in polder areas.** Natural Hazards and Earth System Sciences, v.9, p.1995-2007, 2009.

BRASIL. Ministério da Integração Nacional. Secretaria Nacional de Defesa Civil. Centro Nacional de Gerenciamento de Riscos e Desastres. **Anuário brasileiro de desastres naturais: 2011** / Centro Nacional de Gerenciamento de Riscos e Desastres. - Brasília: CENAD, 2012. 80 p.

BRASIL. Ministério da Integração Nacional. Secretaria Nacional de Defesa Civil. Centro Nacional de Gerenciamento de Riscos e Desastres. **Anuário brasileiro de desastres naturais: 2012** / Centro Nacional de Gerenciamento de Riscos e Desastres. - Brasília: CENAD, 2012. 84 p.

BRUNNER, G. W.. **HEC-RAS, River Analysis System Hydraulic Reference Manual.** Davis: U.S. Army Corps of Engineers, 2010. 411p.

BRUNNER, G. W.; CEIWR-HEC.. **HEC-RAS, River Analysis System Hydraulic User's Manual.** Davis: U.S. Army Corps of Engineers, 2010. 766p.

BUBECK, P.; MOEL, H.; BOUWER, L. M.; AERTS, J. C. J.. **How reliable are projections of future flood damage?** Natural Hazards and Earth System Sciences, v.11, p.3293-3306, 2011.

CAMARASA BELMONTE, A. M.; LÓPEZ-GARCIA, M. J.; SORIANO-GARCÍA, J.. **Mapping temporally-variable exposure to flooding in small Mediterranean basins using land-use indicators.** Applied Geography, v. 31, p.136-145, 2011.

CAMMERER, H.; THIEKEN, A. H.; LAMMEL, J.. **Adaptability and transferability of flood loss functions in residential areas.** Natural Hazards and Earth System Sciences, v.13, p.3063-3081, 2013.

CARRERA, L.; STANDARDI, G.; BOSELLO, F.; MYSIAK, J.. **Assessing direct and indirect economic impacts of flood event through the integration of spatial and computable general equilibrium modelling.** Environmental Modelling & Software, v.63, p.109-122, 2015.

- CASTANHARO, G.; MINE, M.R.M.. **Considerações sobre a utilização de modelagem hidrodinâmica para propagação de cheias em reservatórios.** Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v.11, n.4, p.5-13, 2006.
- CEIWR-HEC. **HEC-DSSVue:** HEC Data Storage System Visual Utility Engine User's Manual. Davis, U.S. Army Corps of Engineers, 2009, 490p.
- CHANTTERJEE, M.; DE, R.; ROY, D.; DAS, S.; MAZUMBAR, A.. **Hydrological modeling studies with HEC-HMS for Damodar Basin, India.** World Applied Sciences Journal, v.12, p.2148-2154, 2014.
- COMPANHIA PERNAMBUCANA DE SANEAMENTO. **Abastecimento de água.** 2012. Disponível em: < <http://www.compesa.com.br> > Acesso em: 18 de Junho de 2014.
- COUTINHO, Roberto Quental (Coord.). **Elaboração de cartas geotécnicas de aptidão à urbanização frente aos desastres naturais nos Municípios de Camaragibe; Abreu e Lima; Cabo de Santo Agostinho; Jaboatão dos Guararapes, localizados na Região Metropolitana do Recife, Estado de Pernambuco.** Relatório Técnico Parcial, 2014.
- DANTAS, C.E.de O.. **Previsão e controle de inundações em meio urbano com suporte de informações espaciais de alta resolução.** 2012. 221 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2012.
- DE SILVA, M. M. G. T.; WEERAKOON, S. B.; HERATH, S.. **Modeling of event and continuous flow hydrographs with HEC-HMS: Case study in the Kelani River, Sri Lanka.** Journal of Hydrologic Engineering, v.19, p. 800-806, 2014.
- DJALANTE, R.; HOLLEY, C.; THOMALLA, F.; CARNEGIE, M.. **Pathway for adaptive and integrated disaster resilience.** Natural Hazards, v.69, ed.3, p.2105-2135, 2013.
- DUTTA, D.; HERATH, S.; MUSIAKE, K.. **A mathematical model for flood loss estimation.** Journal of Hydrology, v.277, p.24-49, 2003.
- ELMER, F.; THIEKEN, A.H.; PECH, I.; KREIBICH, H.. **Influence of flood frequency on residential buildings losses.** Natural Hazards and Earth System Sciences, v.10, p.2145-2159, 2010.
- FLEMING, M. J.; DOAN, J. H.. **HEC-GeoHMS:Geospatial Hydrologic Modeling Extension** Version 10.1. Davis: U.S. Army Corps of Engineers, 2013. 193p.

- GAMA, Ana Maria de Freitas. (Coord.) **Pirapama: Criando o desenvolvimento sustentável local**. Uma experiência que vale a pena conhecer e repetir. Recife: CPRH/DFID, 2001. 59 p.
- GARCÍA, A.; SAINZ, J.; REVILLA, J.A.; ÁLVAREZ, C.; JUANES, J. A.; PUENTE, A.. **Surface water resources assessment in scarcely gauged basins in the north of Spain**. Journal of Hydrology, v.356, p.312-326, 2008.
- GHANBARPOUR, M. R.; SARAVI, M. M.; SALIMI, S.. **Floodplain inundation analysis combined with contingent valuation: implications for sustainable flood risk management**. Water Resources Management, v.28, ed.9, p.2491-2505, 2014.
- GODDEN, Lee; KUNG, Anthony. **Water law and planning framework under climate change variability: systemic and adaptive management of flood risk**. Water Resources Management, v.25, ed.15, p.4051-4068, 2011.
- GUHA-SAPIR D., Hoyois Ph., Below.R.. **Annual Disaster Statistical Review 2010: The Numbers and Trends**. Brussels: CRED; 2011.
- GUHA-SAPIR D., Hoyois Ph., Below.R.. **Annual Disaster Statistical Review 2011: The Numbers and Trends**. Brussels: CRED; 2012.
- GUHA-SAPIR D., Hoyois Ph., Below.R.. **Annual Disaster Statistical Review 2012: The Numbers and Trends**. Brussels: CRED; 2013.
- HALWATURA, D.; NAJIM, M. M. M.. **Application of the HEC-HMS model for runoff simulation in a tropical catchment**. Environmental Modelling & Software, v.46, p.155-162, 2013.
- HU, Zui; TANG, Gouan; LU, Guonian. **A new geographical language: a perspective of GIS**. Journal of Geographical Sciences, v.24, ed.3, p.560-576, 2014.
- KAZMIERCZAK, A.; CAVAN, G.. **Surface water flooding risk to urban communities: Analysis of vulnerability, hazard and exposure**. Landscape and Urban Planning, v.103, p.185-197, 2011.
- KELMAN, I.; SPENCE, R.. **An overview of flood actions on buildings**. Engineering Geology, v.73, p.297-309, 2004.
- KHAKBAZ, B.; IMAN, B.; HSU, K.; SOROOSHIAN, S.. **From lumped to distributed via semi-distributed: Calibration strategies for semi-distributed hydrologic models**. Journal of Hydrology, v.418, p.61-77, 2012.
- KNEBL, M.R.; YANG, Z.-L.; HUTCHISON, K.; MAIDMENT, D.R.. **Regional scale flood modeling using NEXRAD rainfall, GIS and HEC-HMS/RAS: a case study for**

the San Antonio River Basin Summer 2000 storm event. *Journal of Environmental Management*, v.75, p.325-336, 2005.

KOKS, E. E.; JONGMAN, B.; HUSBY, T. G.; BOTZEN, W. J. W.. **Combining hazard, exposure and social vulnerability to provide lessons for flood risk management.** *Environmental Science & Policy*, v.47, p.42-52, 2015.

KOUSKY, C.. **Informing climate adaptation:** A review of the economics costs of natural disasters. *Energy Economics*, v.46, p.576-592, 2014.

KOVACEVIC-MAJKIC, J.; PANIC, M.; MILJANOVIC, D.; MILETIC, R.. **Vulnerability to natural disasters in Serbia? Spatial and temporal comparison.** *Natural Hazards*, v.72, ed.2, p.945-968, 2014.

KREIBICH, H.; PIROTH, K.; SEIFERT, I.; MAIWALD, H.; KUNNERT, U.; SCHWARZ, J.; MERZ, B.; THIEKEN, A. H.. **Is flow velocity a significant parameter in flood damage modelling?** *Natural Hazards and Earth System*, v.9, ed.5, p.1679-1692, 2009.

LAVELL, A.; OPPENHEIMER, M.; DIOP, C.; HESS, J.; LEMPERT, R.; LI, J.; MUIR-WOOD R.; MYEONG, S.. **Climate change:** new dimensions in disaster risk, exposure, vulnerability and resilience. In *Managing Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation*. [FIELD, C.B.; BARROS, V.; STOCKER, T. F.; QIN, D.; DOKKEN, D. J.; EBI, K. L.; MASTRANDEA, M. D.; MACH, K. J.; PLATTNER, G.-K.; ALLEN, S. K.; TIGNOR, M.; MIDGLEY, P. M. (ed.)]. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York, NY, USA, p.25-64, 2012.

LEI, Yongdeng; WANG, Jing`ai.. **A preliminary discussion on the opportunities and challenges of linking climate change adaptation with disaster risk reduction.** *Natural Hazards*, v.71, p.1587-1597, 2014.

MACHADO, M. L.; NASCIMENTO, N.; BAPTISTA, M.; GONÇALVES, M.; SILVA, A.; LIMA, J. C. de; DIAS, R.; SILVA, A.; MACHADO, E.; FERNANDES, W.. **Curvas de danos de inundação versus profundidade de submersão: desenvolvimento de metodologia.** *Revista de Gestão de Água da América Latina*, v.2, n.1, p.35-52, 2005.

MEENU, R.; REHANA, S.; MUJUMDAR, P. P.. **Assessment of hydrologic impacts of climate change in Tunga-Bhadra river basin, India with HEC-HMS and SDSM.** *Hydrological Processes*, v.27, p.1572-1589, 2013.

- MERZ, B.; THIEKEN, A. H.; GOCHT, M.. **Flood Risk Mapping at the local scale: Concepts and Challenges.** Flood Risk Management in Europe, p.231-251, 2007.
- MERZ, B.; HALL, J.; DISSE, M.; SCHUMANN, A.. **Fluvial flood risk management in a changing world.** Natural Hazards and Earth System Sciences, v.10, p.509-527, 2010.
- MEYER, V.; BECKER, N.; MARKANTONIS, V.; SCHWARZE, R.; VAN DEN BERGH, J. C. J. M.; BOUWER, L. M.; BUBECK, P.; CIAVOLA, P.; GENOVESE, E.; GREEN, C.; HALLEGATE, S.; KREIBICH, H.; LEQUEUX, Q.; LOGAR, I.; PAPYRAKIS, E.; PFURTSCHELLER, C.; POUSSIN, J.; PRZYLUSKI, V.; THIEKEN, A. H.; VIAVATTENE, C.. **Review article:** Assessing the costs of natural hazards – state of the art and knowledge gaps. Natural Hazards and Earth System Sciences, v.13, p.1351-1373, 2013.
- MIAO, Q.; POPP, D.. **Necessity as the mother of invention:** Innovative responses to natural disasters. Journal of Environmental Economics and Management, v.68, p.280-295, 2014.
- MILOGRANA, J.. **Sistemática de auxílio à decisão para a seleção de alternativas de controle de inundações urbanas.** 2009. 316 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade de Brasília, Brasília, 2009.
- MOEL, H.; VEN ALPHEN, J.; AERTS, J.C.J.H.. **Flood maps in Europe – methods, availability and use.** Natural Hazards, v.9, ed.2, p.289-301, 2009.
- MOLINARI, D.; BALLIO, F.; HANDMER, J.; MENONI, S.. **On the modeling of significance for flood damage assessment.** International Journal of Disaster Risk Reduction, v.10, p. 381-391, 2014.
- MORAES, I. C.; CONCEIÇÃO, F. T.; CUNHA, C. M. L.; MORUZZI, R.B.. **Comparação de metodologias na definição de fluxos acumulados a partir de Modelos Digitais de Elevação do terreno aplicado a suscetibilidade de inundações.** Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v.19, n.2, p.223-235, 2014.
- MORIASI, D.N.; ARNOLD, J.G.; VAN LIEW, M.W.; BINGNER, R.D.; HARMEL, R.D.; VEITH, T.L.. **Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations.** Transactions of the ASABE, v.50, p.885-900, 2007.
- NIKULA, J.. **Is harm and destruction all that floods bring?** In: Kummu M, Keskinen M, Varis O, eds. Modern Myths of the Mekong - A Critical Review of Water and

Development Concepts, Principles and Policies: Water & Development Publications - Helsinki University of Technology. Finland. p. 27–38, 2008.

PAPPENBERGER, F.; BEVEN, K.; HORRITH, M.; BLAZKOVA, S.. **Uncertainty in the calibration of effective roughness parameters in HEC-RAS using inundation and downstream level observations.** Journal of Hydrology, v.302, p.46-69, 2005.

PATHIRANA, A.; TSEGAYE, S.; GERSONIUS, B.; VAIRAVAMOORTHY, K.. **A simple 2-D inundation model for incorporating flood damage in urban drainage planning.** Hydrology and Earth System Sciences, v.15, p.2747-2761, 2011.

PISTRIKA, A. K.; JONKMAN, S. N.. **Damage to residential buildings due to flooding of New Orleans after hurricane Katrina.** Natural Hazards, v.54, p.413-434, 2010.

PREFEITURA MUNICIPAL DO CABO DE SANTO AGOSTINHO. **Nossa cidade.** 2013. Disponível em: < <http://www.cabo.pe.gov.br/> > Acesso em: 18 de Junho de 2014.

RIBEIRO NETO, A.; CIRILO, J. A.; DANTAS, C. E. O.; SILVA, E. R.. **Caracterização da formação de cheias na bacia do rio Una em Pernambuco: Simulação Hidrológica-Hidrodinâmica.** Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v.20, n.2, 2015.

SANTOS, Keyla Almeida. **Modelagem do acompanhamento e controle de cheias em bacias hidrográficas de grande variação de altitude. Estudo de caso: bacia do Rio Mundaú.** 2013. 126 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2013.

SCHARFFENBERG W. A.; FLEMING M. J.. **Hydrologic Modeling System HEC-HMS: User`s Manual.** Davis: U.S. Army Corps of Engineers, 2010. 316p.

SEVERINO, Antônio Joaquim. **Metodologia do trabalho científico.** 23.ed. rev. atual. São Paulo: Cortez, 2007. 304p.

SHAMSELDIN, A. Y.. Topics related ro rainfall-runoff models. In: KNIGHT, D. W.; SHAMSELDI, A. Y..Editores. **River Basin Modelling for Flood Risk Mitigation.** London: Taylor & Francis, 2005. 628p.

SMIT, Barry; WANDEL, Johanna.. **Adaptation, adaptive capacity and vulnerability.** Global Environmental Change, v.16, p.282-292, 2006.

THIEKEN, A.H.; MULLER, M.; KREIBICH, H.; MERZ, B.. **Flood damage and influencing factors: new insights from the August 2002 flood in Germany.** WaterResourcesResearch, v.41, ed.12, p.1301-1323, 2005.

- TURNER, A. B.; COLBY, J. D.; CSONTOS, R. M.; BATTEN, M.. **Flood Modelling Using a Synthesis of Multi-Platform LiDAR Data**. Water, v.5, p.1533-1560, 2013.
- TURRERO, P.; JOSÉDOMÍNGUEZ-CUESTA, M.; JIMÉNEZ-SÁNCHEZ, M.; GARCIA-VÁSQUEZ, E.. **The spatial distribution of Paleolithic human settlements and its influence on palaeoecological studies: a case from Northern Iberia**. Journal of Archaeological Science, v.40, p.4127-4138, 2013.
- UNISDR. **Terminology on Disaster Risk Reduction**. Geneva: UNISDR, 2009.
- UNIVERSIDADE Federal de Santa Catarina. **Atlas Brasileiro de Desastres Naturais 1991 a 2010**: volume Brasil / Centro Universitário de Estudos e Pesquisas sobre Desastres. Florianópolis: CEPED UFSC, 2012. 94 p.
- VIGLIONE, A.; DI BALDASSARRE, G.; BRANDIMARTE, L.; KUIL, L.; CARR, G.; SALINAS, J.L.; SCOLOBIG, A.; BLÖSCHL, G.. **Insights from socio-hydrology modelling on dealing with flood risk – Roles of collective memory, risk-taking attitude and trust**. Journal of Hydrology, v.518, p.71-82, 2014.
- VOS F.; RODRIGUEZ J.; BELOW R., GUHA-SAPIR D.. **Annual Disaster Statistical Review 2009: The Numbers and Trends**. Brussels: CRED; 2010.
- WALLNER, M.; HABERLANDT, U.; DIETRICH, J.. **Evaluation of different calibration strategies for large scale continuous hydrological modelling**. Advances in Geosciences, v.31, p.67-74, 2012.
- WANG, L.-N.; CHEN, X.-H.; SHAO, Q.-X.; LI, Y.. **Flood indicators and their clustering features in Wujiang River, South China**. Ecological Engineering (2014).
- WINZ, I.; BRIERLEY, G.; TROWSDALE, S.. **The use of system dynamics simulation in water resources management**. Water Resources Management, v.23, p.1301-1323, 2009.
- YANG, Y. C. E.; RAY, P. A.; BROWN, C. M.; KHALIL, A. F.; YU, W. H.. **Estimation of flood damage functions for river basin planning: a case study in Bangladesh**. Natural Hazards, v.75, p.2773-2791, 2015.
- ZONENSEIN, Juliana. **Índice de risco de cheia como ferramenta de gestão de enchentes**. 2007. 105 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.