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

BENÍCIO EMANOEL OMENA MONTE

MAPEAMENTO DE INUNDAÇÕES NO MUNICÍPIO DE RIO LARGO (AL)

Maceió
2013

BENÍCIO EMANOEL OMENA MONTE

MAPEAMENTO DE INUNDAÇÕES NO MUNICÍPIO DE RIO LARGO (AL)

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

Orientador(a): Prof(a). Dr. Carlos Ruberto Fragoso Júnior

Maceió
2013

Catalogação na fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca Central
Divisão de Tratamento Técnico
Bibliotecária Responsável: Fabiana Camargo dos Santos

M772m Monte, Benício Emanoel Omena.
Mapeamento de inundações no município de Rio Largo (AL) / Benício Emanoel Omena Monte. – 2013.
67 f. : il.

Orientador: Carlos Ruberto Fragoso Junior.
Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento) – Universidade Federal de Alagoas. Centro de Tecnologia. Maceió, 2013.

Bibliografia: f. 56-61.
Anexos: f. 62-67.

1. Distribuição de Valor de Extremo Generalizado. 2. Modelo de Grandes Bacias. 3. Hydrologic Engineering Center – Modelo hidráulico. 4. Monitoramento hidrológico – Rio Largo. I. Título.

CDU: 628:556.18

Universidade Federal de Alagoas – UFAL
Centro de Tecnologia – CTEC
Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamentos – PPGRHS

MAPEAMENTO DE INUNDAÇÕES NO MUNICÍPIO DE RIO LARGO

BENÍCIO EMANOEL OMENA MONTE

Dissertação submetida à banca examinadora do Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento da Universidade Federal de Alagoas e aprovada no dia 18 de julho do ano de 2013.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Carlos Ruberto Fragoso Júnior
(PPGRHS/UFAL)

Prof. Dr. Marllus Gustavo F. Passos das Neves
(PPGRHS/UFAL)

Profª. Dra. Cleuda Custódio Freire
(PPGRHS/UFAL)

Prof. Dr. Alfredo Ribeiro Neto
(UFPE)

Dedico este trabalho a minha querida família que nos momentos bons e ruins esteve ao meu lado: ao meu pai, que incansavelmente doa sua vida em prol da melhor qualidade de vida e de conhecimento dos seus filhos; a minha irmã Thaise, em quem tenho confiança ilibada e quem nunca me negou uma ajuda; a minha irmã Juliene, pois sem ela provavelmente nunca teria alcançado qualquer coisa na vida; a minha tia/madrinha/mãe de criação Profa. Dra. Liriane Monte Freitas, quem sempre zelou, ajudou e me aconselhou na vida social e acadêmica, e aos meus primos/irmãos Nairo José Monte Freitas e Nairo Freitas Jr., que sempre acreditaram em mim e me ajudaram nessa caminhada.

AGRADECIMENTOS

Estes agradecimentos vão às pessoas que estiveram ao meu lado no êxito para alcançar o título de mestre; mesmo com todas as dificuldades, tristezas e alegrias, foram importantes na construção da dissertação ou na amizade para manter as estruturas inabaladas:

- A minha namorada, Daniele Feitoza, pelo seu comprometimento, paciência, ajuda e força dada; você foi fundamental para que eu pudesse terminar esse trabalho, agradeço do fundo do meu coração.

- Ao Prof. Carlos Ruberto Fragoso Júnior, um excelente profissional, dedicado ao crescimento do nosso curso de pós-graduação diuturnamente visando a valorização do conhecimento criado em Alagoas, além de ter me adotado nessa campanha que realmente não foi fácil. Nunca negou conhecimento e nem um dia sequer de porta fechada. Sempre terei sua disposição de trabalho como referência.

- Aos professores Christopher, Valmir, Cleuda, Adriano, Eduardo, Marllus, Vladimir e todos os outros professores do PPGRHS, pelo conhecimento adquirido, pelos bons bate-papos jogados fora e os bons momentos dos rachas (futebol de várzea).

- Aos meus grandes amigos de mestrado Carlos Alberto (vulgo Rogério), Cledeílson, Wilson e Denis Duda, além de Louis Magalhães (aluno de engenharia civil), sem os quais com certeza não conseguiria vencer as pelejas de forma fácil. Foram fundamentais nesta conquista, com certeza ganhei amigos/irmãos que levarei para o resto da vida.

- Aos meus outros amigos e colegas de PPGRHS como Rafael Cavalcanti, Alison Yañez, Tony, Angélica, Esdras, Lívia, Andréa, João Paulo, Pedro, Denis Calazans, Eric Avilino, Erick Sebadelhe, Emanuelle, Nely, Jeílson, Josuelly, Sheyla, Suzana, além dos demais.

- Aos meus amigos Aída Domithilla, Tony, Mikael Rodrigues, Bruno Rodrigues, Wendell Fialho, Marco Diniz, José Henrique, pelo incentivo, confiança e ajuda de forma incondicional.

- As minhas amigas de condomínio Naisabelle, Neucimar, Aline, pela paciência e força dada.

- Aos meus colegas de especialização por terem me ajudado em outra jornada que tende a finalizar-se e ter aguentado meus vários momentos de lapso de sono em aula devido às ocupações no mestrado.

- Obrigado Josuelly pela ajuda fundamental na obtenção das cartas da CASAL para melhorar a qualidade do MDE.

Agradeço ao Prof. Jerônimo e aos alunos de engenharia civil Eduardo, Ana Beatriz Lessa e Renata Freire pelo esforço empreendido no levantamento topográfico com uma disposição contínua. Agradeço a ajuda de José Gino (SEMARH-AL) pela disposição irrestrita no

levantamento batimétrico com um aparelho de alta qualidade como o M-9 baseado em efeito Doppler.

- Meu sincero muito obrigado a Denis Duda e Louis Magalhães pela ajuda incondicional na modelagem hidráulica. Agradeço ao aluno Mahelvson, ex-aluno de engenharia ambiental e agora companheiro de mestrado, por contribuir muito na modelagem hidrológica.

- Aos meus novos colegas e amigos que fiz no contato com alunos de graduação de engenharia ambiental e engenharia civil: Pedro "Ricaria" Omena, Renata "Ricaria" Tauber, Aline Neves, Glaucia Nascimento, Helen Xavier, Almir Brito, Paulinho "Azulino Sofredor", Rafaela, Amanda, Altair, Diogo "Cabelinho", Ana Beatriz Nobre, Ana Carolina, Thamyres Pontes, Araceli, Daysy, Ketson, Heleno, Arla, Cristiano, Hélvio, Bruno Beuttenmüller, Artur Piatti, Májores, Fernando Nascimento, Thiago "Zé" "Bomba", Tácyo, Karol Tenório, Maria Elisa Leite, Tainara Ramos, João Paulo Lyra, Pedro Paulo e Pedro Lucas. Aos meus velhos e bons amigos do laboratório de hidráulica: Alberonaldo, Geyza "Chefa", Rafaela e Gracyelle.

- Aos secretários da Pós-Graduação pelos serviços sempre bem prestados.

- E ao meu bom Deus e Jesus Cristo pela força concebida a minha pessoa para lograr êxito neste mestrado, pois sem fé os momentos mais difíceis iriam se reverberar em desistências e fraquezas.

"O pessimista vê dificuldade em cada oportunidade; o otimista vê oportunidade em cada dificuldade."

Wiston Churchill

"Seja você quem for, seja qual for a posição social que você tenha na vida, a mais alta ou a mais baixa, tenha sempre como meta muita força, muita determinação e sempre faça tudo com muito amor e com muita fé em Deus, que um dia você chega lá. De alguma maneira você chega lá."

Ayrton Senna

"A natureza nunca nos engana; somos sempre nós que nos enganamos".

Jean Jacques Rosseua

RESUMO

As inundações têm gerado ao redor do mundo prejuízos tanto econômicos como sociais devido à falta de um correto planejamento fundamentado em informação fidedigna. Este estudo apresenta um mapeamento de áreas inundáveis no município de Rio Largo (AL) através do acoplamento de modelos hidrológico/hidráulico. O município de Rio Largo está situado na Bacia Hidrográfica do rio Mundaú que historicamente vem sofrendo sucessivos eventos de inundação rápida. Para a estimativa de chuvas máximas foi utilizada a distribuição de frequência de Valor Extremo Generalizado (GEV), a qual foi validada pelo teste de aderência de Kolmogorov-Smirnov. Para a transformação chuva-vazão foi utilizado o modelo hidrológico distribuído MGB-IPH, o qual foi acoplado de modo "off-line" com o modelo hidráulico HEC-GeoRAS 4.1 para estimativa dos níveis de cheia e, consequentemente, das manchas de inundação para diferentes tempos de retorno. O modelo hidrológico foi calibrado e validado em uma estação fluviométrica a montante da cidade de Rio Largo. O modelo hidráulico foi calibrado satisfatoriamente através da comparação da macha de inundação estimada com as marcas de cheia de junho de 2010 levantadas em campo. Esta metodologia se mostrou adequada para um local que apresenta pouca informação disponível e limitação de instrumentação de monitoramento hidrológico. Os resultados se mostraram promissores do ponto de vista de aplicação, podendo subsidiar gestores para o planejamento urbano na cidade de Rio Largo, que se encontra em situação de risco de inundação, pois a ocupação urbana pode ser afetada dependendo do nível da água alcançado, mesmo sabendo que existe um erro inerente às estimativas do mapeamento em função das incertezas dos dados de entrada, da estrutura e dos parâmetros dos modelos. Nestes casos, medidas para o controle da inundação, de origem estrutural ou não estrutural (preferencialmente), podem ser tomadas.

Palavras-chave: Distribuição de Valor Extremo Generalziado, Modelo de Grandes Bacias,

Hydrologic Engineering Center – Modelo Hidráulico

ABSTRACT

The floods have caused both economic and social injuries around the world due to lack of correct planning based on reliable information. This study presents a mapping of flooded areas in the city of Rio Largo (AL) by coupling hydrologic/hydraulic models. The city of Rio Largo is located in the Mundaú river watershed that historically has suffered successive flood quickly events. To estimate the maximum rainfall was used the frequency distribution of Generalized Extreme Value (GEV), which was validated by Kolmogorov-Smirnov test. For the rainfall-runoff transformation was used distributed hydrologic model MGB-IPH, which was coupled of "off-line" way with the hydraulic model HEC-GeoRAS 4.1 to estimate flood levels and, accordlingly, stains flood for different return times. The hydrological model was calibrated and validated in a fluviometric station a upstream of the city of Rio Largo. The hydraulic model was satisfactorily calibrated by comparing of the stain of flood estimated with full marks of june 2010 raised in field study. This methodology showed adequate for a site that has few information and limited hydrological monitoring instrumentation. The results were promising from the viewpoint of application, which can support managers for urban planning in the city of Rio Largo, which has risk of flooding because of the urban settlement can be affected depending on the water level reached, even though that there is an inherent error in the mapping estimates due to the uncertainties of the input data, the structure and parameters of the models. In such cases, measures to flood control, source structural or non-structural (preferably), may be taken.

Key-word: Generalized Values Extremes; Modelo de Grandes Bacias, Hydrologic Engineering Center – Hydraulic Model.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1 - CIDADE DE SÃO JOSÉ DA LAJE (1969) – INUNDAÇÃO DO RIO CANHOTO (AFLUENTE DO RIO MUNDAÚ). 21
FIGURA 2 - INUNDAÇÃO NO RIO MUNDAÚ (2010) – REGIÃO DA BARRAGEM DA CIDADE DE RIO LARGO. 21
FIGURA 3 - ORGANOGRAMA DA METODOLOGIA DO ESTUDO. 28
FIGURA 4 - BACIA HIDROGRÁFICA DO MUNDAÚ (NOTA: DESTAQUE PARA OS FLUVIÔMETROS E PLUVIÔMETROS UTILIZADOS). 32
FIGURA 5 - URH DA BACIA HIDROGRÁFICA DO MUNDAÚ. 36
FIGURA 6 - SEÇÕES TOPOBATIMÉTRICAS UTILIZADAS NA MODELAGEM HIDRÁULICA. 39
FIGURA 7 - COMPARAÇÃO ENTRE DADOS TOPOGRÁFICOS DO MDE E DE LEVANTAMENTO TOPOBATIMÉTRICO. 40
FIGURA 8 - TEMPO DE RETORNO PARA VAZÕES ESTIMADAS POR DISTRIBUIÇÃO GEV NA ESTAÇÃO FAZENDA BOA FORTUNA. 44
FIGURA 9 - COMPARAÇÃO ENTRE VAZÕES OBSERVADAS E CALCULADAS PARA CADA POSTO FLUVIOMÉTRICO. 46
FIGURA 10 - CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DAS VAZÕES SIMULADAS NA ESTAÇÃO FLUVIOMÉTRICA FAZENDA BOA FORTUNA. 47
FIGURA 11 - CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO FLUVIOMÉTRICA DA ESTAÇÃO FLUVIOMÉTRICA FAZENDA BOA FORTUNA NO PERÍODO DA INUNDAÇÃO DE 2000. 47
FIGURA 12 - AJUSTE DA MODELAGEM HIDRÁULICA COM OS PONTOS DA INUNDAÇÃO DE 2010. 49
FIGURA 13 – MAPEAMENTO DE INUNDAÇÃO PARA CADA TEMPO DE RETORNO (MODELAGEM HIDROLÓGICA/HIDRÁULICA). 51

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - AGRUPAMENTO DOS SOLOS RELACIONADO A SUAS CARACTERÍSTICAS 35
TABELA 2 - CARACTERÍSTICAS DE TIPO E USO DO SOLO DAS URH (I.E. BLOCOS). 35
TABELA 3 - CHUVA ESTIMADA PARA TEMPOS DE RETORNO EM CADA POSTO PLUVIOMÉTRICO. 42
TABELA 4 - RESULTADO DAS FUNÇÕES OBJETIVO PARA CALIBRAÇÃO DO MODELO HIDROLÓGICO...45
TABELA 5 - RESULTADO DAS FUNÇÕES OBJETIVO PARA VALIDAÇÃO DO MODELO HIDROLÓGICO. ...45
TABELA 6 - COMPARAÇÃO DE VAZÕES.....48
TABELA 7 - VALORES DO COEFICIENTE DE MANNING (NOTA: SENTINDO MONTANTE PARA JUSANTE). 48
TABELA 8 - ÁREA URBANA INUNDADA DE ACORDO COM O TEMPO DE RETORNO DA VAZÃO GERADA PELOS MODELOS HIDRÁULICOS (NOTA: ÁREA URBANA DE RIO LARGO: 17,62 KM²). 50
TABELA 9 - QUALIDADE DE AJUSTE ENTRE A EXTENSÃO DA MANCHA DE INUNDAÇÃO DE VAZÕES ESTIMADAS POR DISTRIBUIÇÃO GEV E DE VAZÕES ESTIMADAS POR MODELO HIDROLÓGICO MGB-IPH. 50

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ΔV – Variação de Volume
ADCP - Acoustic Doppler Current Profiler
ANA - Agência Nacional de Águas
CASAL – Companhia de Saneamento de Alagoas
DRI – Índice de Riscos e Desastres
EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
GEV – Valor Extremo Generalizado
GPS - Global Positioning System
HEC - Hydrologic Engineering Center
IAF - Índice de Área Foliar
IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IfSAR - Interferometric Synthetic Aperture Radar
INMET – Instituto Nacional de Meteorologia
INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
ITEP - Instituto de Tecnologia de Pernambuco
LiDAR – Airbone Light Ranging and Detection
MDE – Modelo Digital de Elevação
MGB-IPH – Modelo de Grandes Bacias – Instituto de Pesquisas Hidráulicas
NS – Coeficiente de Nash-Sutcliffe
NSlog - Coeficiente de Nash-Sutcliffe em Logaritmos
OEA - Organização dos Estados Americanos
PNUD – Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento
SAR - Synthetic Aperture Radar
SIG – Sistema de Informação Geográfica
SEAF - Expert System for At-Site Frequency Analisys of Hydrologic Variables
SRTM - Shuttle Radar Topography Mission
TR – Tempo de retorno
UNDP - United Nations Development Programme
URH – Unidades de Resposta Hidrológica
ASAR – Airbone Synthetic Aperture Radar
SAR - Synthetic Aperture Radar
USGS - United States Geological Survey

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO **14**
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA **17**
2.1 Ocorrência de inundações **17**
2.2 Ocupação humana em área ribeirinhas **17**
2.5 Gestão de áreas inundáveis **20**
2.5.1 Medidas estruturais 22
2.5.2 Medidas não estruturais 22
2.6.1 Modelagem hidrológica 24
2.6.2 Modelagem hidráulica 25
2.6.3 Seções transversais e topobatimetria 26
2.6.4 Manchas de inundação, MDE e SIG 27
3 METODOLOGIA **28**
3.1 Área de estudo **29**
3.2 Dados para a área de estudo **30**
3.3 Análise de frequência de vazões e chuvas máximas **31**
3.4 Modelagem hidrológica **34**
3.5 Modelagem hidráulica **37**
4 RESULTADOS **42**
4.1 Análises de frequência de vazões e chuvas máximas **42**
4.2 Modelagem hidrológica **44**
4.3 Modelagem hidráulica **48**
4.4 Mapeamento das áreas de risco de inundação **50**
5 DISCUSSÃO **52**
ANEXO **62**

1 INTRODUÇÃO

As inundações são um dos eventos naturais mais assoladores do mundo, são cerca de 196 milhões de pessoas expostas por ano, sendo que, durante o período de 1980 a 2000, houve 170.010 mil mortes associadas a este fenômeno em todo o mundo (UNDP, 2004). A gravidade e frequência com que vêm ocorrendo tais eventos aumentou a preocupação mundial para que se diminuam perdas econômicas e humanas, o que faz da identificação das regiões potenciais um importante auxílio no planejamento das autoridades, servindo como solução para mitigação das enchentes (SAHARDI, 2012). Dentre os fatores naturais que influenciam as inundações ribeirinhas citam-se o relevo, tipo de precipitação, cobertura vegetal e capacidade de drenagem (TUCCI, 2007) e os impactos que são decorrentes das ocupações indevidas na planície de inundação (ARCMANZ, 2000).

Nos países em desenvolvimento como o Brasil, após a década de 70 do século XX, inundações tornaram-se mais recorrentes com o crescimento das cidades e com o adensamento populacional urbano. Isto ocorreu também nos municípios ribeirinhos na bacia hidrográfica do Mundaú, os quais apresentam estas características urbanas, e com alta densidade populacional em áreas marginais do rio principal. Nesta bacia, ocorreram grandes inundações ribeirinhas rápidas; algumas provocando fortes prejuízos e catástrofes (e.g. cheia de 1914, 1941, 1969, 1988, 1989, 2000, 2010), revelando sua fragilidade em eventos de cheia (FRAGOSO JR. et al, 2010).

Após os eventos extremos de inundação ocorridos em 1988 e 1989 na bacia do rio Mundaú, estudos recomendaram algumas medidas mitigadoras de inundação, tais como aumento da capacidade de drenagem de águas, contenção de enchentes por reservatórios, reflorestamento da bacia, obras nas calhas dos rios e implantação de um sistema de alerta e prevenção contra enchentes (GOVERNO DO ESTADO DE ALAGOAS, 1990). Tais medidas nunca foram efetivamente colocadas em prática. Isto é um fato comum, já que sistemas, estratégias e capacidades são ignorados em favor de ações paliativas, as quais não evitam que novos desastres naturais causem problemas (HAGELSTEEN E BECKER, 2013).

Para minimizar os impactos socioeconômicos e ambientais promovidos por cheias, a gestão de inundação necessita incluir as características físicas e os processos ambientais como

forma de evitar prejuízos à sociedade (MANFREDA; DI LEO; SOLE, 2011), devendo haver uma integração entre estes aspectos (ARCMANZ, 2000). Soluções de prevenção são realizadas através de medidas estruturantes e não estruturantes, onde as não estruturantes são mais eficientes. Na maioria das oportunidades estas medidas são financeiramente mais viáveis e focam na prevenção, conservação, e buscam uma melhor harmonia entre o meio ambiente e áreas urbanas ribeirinhas (TUCCI, 2007).

Dentre as técnicas não estruturais mais difundidas destaca-se o mapeamento de risco a inundações, que realiza (a) a determinação do risco de enchentes; (b) o mapeamento de áreas de inundação; e (c) o zoneamento (TUCCI, 2007), sendo uma medida de fácil aplicação. Existem diversos métodos práticos de mapeamento de risco como, por exemplo, o Índice de Riscos de Desastres (DRI) (PEDUZZI et al. 2009; ISLAM; SWAPAM; HAQUE, 2013), que foi concebido pelo Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento (PNUD). No entanto, tal método apenas leva em consideração dados sociais e de histórico de desastres para gerar um índice de vulnerabilidade. Sua escala espacial de aplicação é pequena, utiliza dados a nível global (UNPD, 2004) e não há predição de risco associado, pois não se considera processos físicos conceituais.

Na realização do mapeamento de risco de inundações comumente são utilizados modelos matemáticos (conceituais ou empíricos) para representar fenômenos de ordem hidráulica envolvidos na inundação ribeirinha, determinando extensão e profundidade das áreas inundadas através de modelos hidráulicos 1D e 2D, podendo ser utilizados também modelos hidrológicos (e.g. COLLISCHONN,B.; COLLISCHONN, W.; TUCCI, 2008; COLLISCHONN et al. 2007; PAIVA; COLLISCHONN; BUARQUE, 2012; PAZ et al. 2011) e atmosféricos (e.g. SRINIVAS et al. 2013; DMITRIEVA e PESKOV, 2013; TRAPERO; BECH; LORENTE, 2013) associados para uma representação conceitual e completa de todos os processos envolvidos.

Uma abordagem atualmente muito utilizada é o acoplamento de modelos hidrológicos e hidráulicos (e.g. BONIFFAIT et al. 2009; PAZ et al. 2011; SURYA e MUGDAL, 2011; GRIMALDI et al. 2013; BALLESTEROS et al. 2013; SARHADI; SOLTANI; MODARRES, 2012). Já que estes se tornaram mais robustos e menos custosos, com a possibilidade de inclusão de ferramentas agregadas como o Sensoriamento Remoto (BATES et al. 2006; CHORMANSKI

et al. 2011; RABER et al. 2007) e Sistemas de Informações Geográficas (SIG) (e.g. CASAS et al. 2006). Entretanto a modelagem hidráulica possui dois fatores essenciais para uma melhor representatividade das áreas inundadas: (a) dados ou estimativas de vazões a montante do trecho (ARHADI; SOLTANI; MODARRES, 2012) e (b) boa qualidade de dados topobatiméticos da região de estudo (HORRITT e BATES, 2001; NICHOLLAS e WALLING, 1997), todavia a falta destes dados pode restringir o uso da metodologia.

A falta de uma base extensa e consistida de dados hidrológicos ou hidrometeorológicos limita a determinação da magnitude e a frequência de ocorrência dos eventos extremos de vazão (e.g. KATZ; PARLANG; NAVEAU, 2002; NORBIATO et al. 2007; ZAMAN; RAHMAN; HADDAD, 2012). Além disso, uma baixa resolução dos dados topobatiméticos pode afetar uma boa estimativa das manchas de inundação pelo modelo hidráulico (SANDERS, 2007; HARDY; BATES; ANDERSON, 1999; HORRITT; BATES; MATTINSON, 2006).

Este estudo tem como objetivo realizar o mapeamento de risco de inundação para o município de Rio Largo (AL) através do acoplamento de modelos estatístico, hidrológico e hidráulico em ambiente SIG. Este tipo de estudo é essencial para fornecimento de subsídios ao planejamento da ocupação urbana ribeirinha em uma localidade que vem sofrendo com sucessivos eventos de inundação.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Ocorrência de inundações

Inundações ribeirinhas são processos físicos naturais e Tucci (2007) descreve como um fenômeno em que o rio alcança seu leito maior (i.e. planície de inundação) em época de vazões máximas. Sendo mais recorrentes em regiões de médio e baixo curso de rios, pois são áreas normalmente mais planas, com menor velocidade e menor capacidade de escoamento.

Extravasamentos das calhas de rios para a planície de inundação são determinados pela aptidão do canal em comandar o escoamento tendo conexão com a rugosidade, declividade e área da seção transversal, além da interação canal-planície de inundação. O relevo e cobertura vegetal da bacia influenciam a propagação de uma inundação no tempo e no espaço sobre a planície, havendo também influências das condições antecedentes de água armazenada (PAZ, 2010).

As inundações ribeirinhas ocorrem normalmente em bacias de médio a grande porte (> 500 km²) nos trechos com declividade baixa e seção de escoamento pequena (TUCCI, 2007), porém, não são exclusividade de locais com alta pluviometria anual e úmidos. Camarasa-Belmonte e Soriano-García (2011) avaliaram e mapearam o risco de inundação em riachos intermitentes na região da comunidade Valenciana, que possui um clima mediterrânico (semi-árido), o que torna os eventos pouco recorrentes e aumenta a ocupação em áreas inundáveis. Isto demonstra que a incidência destes fenômenos ocorre em áreas úmidas ou semi-áridas, a atenção deve ser para a ocorrência de eventos de pluviometria isolados.

2.2 Ocupação humana em área ribeirinhas

Fenômenos naturais como as inundações causam impactos adversos devido à ocupação humana em áreas marginais a rios (ARCMANZ, 2000), isto advém do processo histórico da utilização dos corpos hídricos como meio de transporte para consumo de água, geração de energia entre outros usos.

O crescimento de manchas urbanas ao redor das planícies de inundação torna suscetível a sociedade aos eventos de enchentes. A UNDP (2004) cita que em torno de 196 milhões pessoas

são expostas por ano à inundações, e que durante o período de 1980 a 2000 houve 170.010 mil mortes associadas à inundações em todo o mundo.

O continuísmo de ocupações mesmo após eventos se sucederem em certa região pode ter duas vertentes, a do bem estar pela proximidade do meio ambiente e uma certa especulação imobiliária ou principalmente por não haver condições financeiras para se instalar em uma localidade com menores riscos ambientais. Estas situações se perpetuam devido à morosidade e ineficiência do poder público, pressão financeira do poder privado (e.g. setor da construção civil, imobiliário, industrial, agrícola) e pelo anseio da sociedade em obter moradias.

Graham (1999) cita que perdas de vidas oriundas de inundações advêm de três fatores: 1) habitantes residentes em áreas de várzea de inundação, chamada de população em risco; 2) a indisponibilidade de estruturas de informação para aviso prévio de eventos extremos; e 3) nível de gravidade que a inundação pode alcançar. Se analisarmos o pensamento de Crichton (1999) veremos que um risco advém de uma tríade dada por: vulnerabilidade, exposição e perigo, denominada de triângulo de risco.

2.3 Impacto das inundações ribeirinhas

Machado et al. (2005) classifica os danos decorrentes da inundação em tangíveis e intangíveis. Os danos tangíveis são os danos passíveis de reparação via ação monetária (e.g. destruição ou danificação de casas, pontes e estradas), e os danos intangíveis são mais complicados para se medir um valor monetário ao proprietário (e.g. mortes, modificação da paisagem, limitação do uso da água, doenças, etc). Os prejuízos são decorrentes de planejamentos mal elaborados, da ocupação do espaço e do limitado conhecimento do risco das áreas de inundações (TUCCI, 2007).

A quantificação dos danos usualmente é realizada através de um comparativo entre prejuízos e tempo de retorno (probabilidade de ocorrência do evento extremo) (TUCCI, 2007).

2.4 Histórico de inundações na bacia hidrográfica do Rio Mundaú

Os trabalhos de Reis; Silva Júnior; Pedrosa (2000) e Fragoso Júnior; Pedrosa; Souza (2010) trazem uma reflexão da magnitude das inundações de 2000 e 2010 na bacia hidrográfica

do Rio Mundaú. Registros históricos, técnicos e jornalísticos indicaram 7 (sete) grandes enchentes nos últimos 100 anos (i.e. 1914, 1941, 1969, 1988, 1989, 2000, 2010) que afetaram significativamente a estrutura econômica, física e social das cidades ribeirinhas do rio Mundaú.

A enchente de 1969 foi a cheia registrada que teve o maior número de mortes (i.e. aproximadamente 1.100 óbitos), pois ocorreu no período noturno. Esta cheia causou a destruição de 1.200 casas e um prejuízo em torno de 30 milhões de dólares. Um fato interessante é que, após esta cheia, a Prefeitura Municipal de São José da Laje expediu um decreto municipal em que ficou proibida a ocupação das áreas ribeirinhas no eixo urbano da cidade (i.e. relato do ex-prefeito Osvaldo Timóteo). Após alguns anos de cumprimento deste decreto, os impactos das cheias foram caindo no esquecimento e o poder público deixou de fiscalizar, o que resultou na ocupação urbana das margens do rio Canhoto, um dos afluentes do rio Mundaú (UOL NOTÍCIAS COTIDIANO, 2010; FRAGOSO JÚNIOR; PEDROSA, SOUZA, 2010) (Figura 1).

Em 1988 e 1989 houve uma sequência de duas enchentes, na primeira houve grandes danos à infraestrutura, onde 21 municípios em Alagoas e Pernambuco foram atingidos; nesta época o posto fluviométrico da Fazenda Boa Fortuna (Rio Largo/Alagoas) já existia e marcou um nível de 9,83 m, com vazão máxima registrada de 912 m^3/s. O segundo evento atingiu 17 municípios; os custos para recuperar a infraestrutura foram de 200 milhões de dólares e uma vazão estimada em 1.042 m^3/s no posto fluviométrico da Fazenda Boa Fortuna.

Após esses desastres foi elaborado um relatório pelo Governo do estado de Alagoas, Governo Federal, Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento (PNUD) e Organização dos Estados Americanos (OEA) (GOVERNO DO ESTADO DE ALAGOAS, 1990), o qual apontava uma série de medidas para diminuir os problemas das cheias, tais como drenagem de águas, contenção de enchentes por reservatórios, reflorestamento da bacia, obras nas calhas dos rios e implantação de um sistema de alerta e prevenção contra enchentes. Tais medidas nunca foram estudadas ou implementadas.

Em 2000 ocorreu uma cheia que atingiu a cota de 10,5 m e uma vazão estimada em 1.092 m^3/s no posto fluviométrico da Fazenda de Boa Fortuna (REIS; SILVA JÚNIOR; PEDROSA,

2000). Tal evento resultou em mais problemas de infraestrutura e 36 óbitos. A última grande cheia na bacia ocorreu em 2010, onde foram registrados quase 50.000 desabrigados na bacia hidrográfica do Mundaú. Houve também danos significativos na bacia hidrográfica do rio Paraíba do Meio e do rio Jacuípe-Una (localizadas próximas à bacia do rio Mundaú) (Figura 2). O tempo de retorno da cota alcançada para este evento na estação Fazenda Boa Fortuna foi de 200 anos aproximadamente (FRAGOSO JÚNIOR; PEDROSA; SOUZA, 2010).

Dentre os possíveis fatores que contribuíram para a intensificação da magnitude desta última enchente podemos citar: (a) saturação do solo nas bacias; (b) rompimento de barragens; (c) altas declividades das bacias; e (d) ocupação urbana de áreas marginais (FRAGOSO JÚNIOR; PEDROSA; SOUZA, 2010).

2.5 Gestão de áreas inundáveis

Gestão de áreas inundáveis ainda é uma área incipiente quando se trata do espaço brasileiro; Tucci (2007) elenca os principais fatores da situação arcaica e desqualificada em que se encontra a gestão de inundações no Brasil:

1. Falta de conhecimento sobre o controle de processos naturais por parte dos planejadores urbanos;

2. Falta de planejamento adequado às características locais e gestão de inundações em nível federal e estadual;

3. O desgaste político para os administradores públicos no controle não estrutural (i.e. zoneamento), já que a população está sempre esperando uma obra estrutural por falta de uma maior percepção sobre o assunto;

4. Em alguns locais não existe interesse na prevenção das inundações, pois quando ocorrem, os recursos são fornecidos a fundo perdido.

Figura 1 - Cidade de São José da Laje (1969) – Inundação do Rio Canhoto (afluente do Rio Mundaú).

Fonte: UOL Notícias Cotidiano (2010).

Figura 2 - Inundação no Rio Mundaú (2010) – Região da barragem da cidade de Rio Largo.

Fonte: UOL Notícias Cotidiano (2010).

Gerir áreas inundáveis envolve o emprego de medidas estruturais e não estruturais. A viabilidade econômica de implantação destas medidas se dá normalmente pela análise de custo e benefício, sendo viável quando os prejuízos da inundação forem maiores que os custos das medidas, implicando em um benefício intrínseco (TUCCI, 2007).

Soluções para esses problemas perpassam por um Planejamento Integrado de Bacias, onde estão englobadas as inundações ribeirinhas junto com esgotamento sanitário, resíduo sólido, preservação de manancial, drenagem urbana (TUCCI, 2004), o que podemos traduzir como os planos de saneamento básico.

Para minimizar os impactos socioeconômicos e ambientais promovidos por enchentes, a gestão de inundação necessita incluir as características físicas e os processos ambientais como forma de evitar prejuízos à sociedade (MANFREDA; DI LEO; SOLE, 2011), devendo haver uma integração entre estes aspectos (ARCMANZ, 2000).

2.5.1 Medidas estruturais

Segundo TUCCI (2007), são medidas da engenharia voltadas a alterar o ambiente de um corpo hídrico com o intuito de impedir a sublevação de um leito ordinário originado de um aumento considerável no seu volume, podendo ser de forma extensiva (e.g. hidráulico-florestal e hidráulico-agrário) ou intensiva (diques, polders, canais retificados, reservatórios, bacias de amortecimento, entre outros).

2.5.2 Medidas não estruturais

São medidas que priorizam a manutenção dos sistemas ambientais, tendo como produto uma harmonia entre a sociedade e as inundações, uma vez que o alicerce concentra-se na convivência com desastres naturais. Seu custo na maioria dos casos é realmente menor em comparação com medidas estruturais, além de focar a não ocupação de espaços propícios à inundação (TUCCI, 2007).

As principais medidas não estruturais são: sistemas de previsão e alerta contra inundações, seguros e zoneamento das áreas de risco de inundação.

2.6 Mapeamento de áreas com riscos de inundações

O extravasamento de água do rio para a planície é uma consequência natural do regime hidrológico (PAZ, 2010). Isto demonstra que o zoneamento de áreas inundáveis tem importância dentro dos estudos de planejamento urbano, fazendo-se necessária a utilização de meios técnicos para isso.

O zoneamento das áreas passíveis de inundação engloba as seguintes etapas (TUCCI, 2007): (a) determinação do risco das enchentes; (b) mapeamento das áreas sujeitas à inundação; (c) zoneamento. Sua essência perpassa por um grupo de delimitações para uso de áreas de risco propondo como resultado um desenvolvimento racional de áreas ribeirinhas.

Diferenças sociais e econômicas, além da falta de fiscalização do poder público são fatores que favorecem a ocupação irregular do solo. No entanto, eventos de inundações não acontecem apenas em regiões subdesenvolvidas ou em desenvolvimento, como o estudo de Marchi et al. (2010) que caracteriza os principais eventos de inundações rápidas extremas na Europa..

TUCCI (2007) faz a divisão do zoneamento em três: zona de passagem da enchente, zona com restrições e zona de baixo risco. Após os zoneamentos e a desocupação de áreas, o setor público necessita intervir com ações para que não haja reocupação da área como: expansão das cidades para áreas de baixo risco, criar estruturas recreativas que impeçam a ocupação e atrelar financiamentos à moradia de acordo com o risco da área a ser construída.

A última ação citada anteriormente é interessante, pois muito dos financiamentos ocorridos no Brasil para moradia se realizam por instituições financeiras, e na maioria dos casos é concedido por bancos estatais e fomentado por fundos obrigatórios federais; esta é uma situação em que o governo federal pode atuar diretamente atrelando os financiamentos particulares ou públicos (i.e. estados e municípios) de acordo com o índice de risco que a estrutura pode oferecer. Crichton (2002) foca a sustentabilidade dos seguros privados ou públicos para inundações; no caso privado, o Estado deve se ausentar de qualquer compensação financeira posterior a um

evento. Esta opção de seguros é inovadora, entretanto sua aplicabilidade em países com uma dinâmica socioeconômica como a brasileira precisa ser mais discutida.

Um fato problemático em termos de países em desenvolvimento, como o Brasil, é a carência de dados hidrológicos, hidrometeorológicos e de histórico de inundações para realização destes estudos. Neste caso, vale destacar a importância da modelagem matemática hidrológico-hidráulica como alternativa.

2.6.1 Modelagem hidrológica

A vasta gama de processos hidrológicos dificulta a análise quantitativa de eventos extremos. Uma estratégia bem conhecida que visa simplificar as interações e processos em bacias hidrográficas para obter entendimento sobre seu comportamento é a modelagem matemática (TUCCI, 1998). Simular inundações surge como oportunidade para enfrentar as barreiras de representação do ciclo hidrológico e da falta de dados.

Antever o efeito de um evento extremo necessita de um aprofundamento complexo dos processos ambientais, os quais envolvem diversas áreas de conhecimento.

Os primeiros modelos hidrológicos foram estruturados de forma empírica ou conceitual e concentrados, representando componentes do ciclo hidrológico (e.g. modelos SCS, Tank Model, IPH-II e SMAP), entretanto com os avanços computacionais de SIG e Sensoriamento Remoto surgiram os modelos distribuídos (e.g. MGB-IPH), trazendo relações de processos físicos variáveis no tempo e espaço.

O que antes ficava restrito a hidrogramas a partir de hietogramas e evapotranspiração potencial avançou para mudanças do uso do solo e climáticas, qualidade da água, e produção e transporte de sedimentos. Modelos hidrológicos também são acoplados a modelos de previsão meteorológica para previsão hidrológica, demonstrando o contínuo aprimoramento dos modelos hidrológicos e o surgimento de novas informações traz melhor compreensão dos processos físicos e fornece respostas mais fiéis para o gerenciamento dos recursos hídricos (PAIVA, 2009).

De forma concisa os principais tipos de modelos hidrológicos utilizados para efeito de inundações são:

Modelos unidimensionais (1D) : Direciona o fluxo de água de forma longitudinal, a rede de drenagem se conecta por nós computacionais (i.e. seções transversais).

Modelos hidrodinâmicos bidimensionais (2D): Este modelo é representado por malhas quadradas em que se faz uso de esquemas numéricos de diferenças finitas para resolução de sistema de equações ou uma discretização de elementos de formas geométricas variadas para metodologia de elementos finitos (e.g. ZHANG; CHENG; HUANG, 2010; QI e ALTINAKAR, 2011) afirmaram que modelos bidimensionais têm melhores resultados para planícies de inundações extensas e planas para momentos de cheia. Tais aproximações podem dar bons resultados para velocidade e duração das inundações.

Modelos Tridimensionais (3D): utilizam-se de equações completas de Navier-Stokes em discretizações nas três dimensões (3D). Não existem muitas aplicações na literatura considerando este tipo de aproximação (e.g. IZHAM et al. 2010).

Segundo Barros; Mediondo; Wedland (2007), vários autores têm se utilizado dos mapas de inundação como uma medida de controle não estruturante, e sendo a maioria através de vazões críticas simuladas por modelos hidrológicos e por estimativa de recorrência tanto para bacias urbanas como para bacias rurais.

2.6.2 Modelagem hidráulica

Modelos para eventos que causam inundação devem aliar ocorrências que derivam de propagação de onda de cheia originada a montante como também advindas de condições locais de chuva e hidrológicas. A extensão da inundação sobre a planície durante um evento de cheia é influenciada por diversos fatores, com destaque para os seguintes: características do evento de cheia; condutância hidráulica do canal principal; características físicas da planície; condições antecedentes de água armazenada e umidade do solo na planície, como exemplifica Paz (2010).

Os modelos normalmente se utilizam da equação de Manning para demonstrar a resistência a um escoamento que provém da rugosidade do fundo de canal. Uma revisão mais detalhada sobre os modelos hidráulicos utilizados para representar inundações pode ser encontrada em Paz (2010).

Modelos chuva-vazão podem ter conexão com modelos hidráulicos de inundação de planícies, de dois modos, on-line ou off-line. O acoplamento ocorre de forma on-line quando há interatividade entre os modelos, tendo um custo computacional alto e não há ganho das condições hidráulicas ou hidrológicas (PAZ, 2010) ou off-line, em que o acoplamento é de direção única do modelo hidrológico para modelo hidráulico,: porém, não há comunicação entre eles e o processo é mais trabalhoso (PAZ, 2010).

2.6.3 Seções transversais e topobatimetria

As seções transversais têm sua morfologia moldada por vazões ordinárias, normais ou pequenas cheias trazem alterações diminutas. Todavia, eventos de cheia de maior intensidade resultam em extravasamentos acima das margens do canal; a planície de inundação vira armazenamento temporário, além de área condutora de escoamento. Níveis de água calculados nas seções transversais podem ser produtos da modelagem (PAZ, 2010).

Para que estudos de inundação tenham uma boa eficácia é preciso um bom levantamento topográfico de dados de seções fluviais transversais e da modelagem numérica de propagação da onda de inundação (MANFREDA; DI LEO; SOLE, 2011).

Visitas técnicas são necessárias para delimitação das seções transversais, pois se obtém a declividade do fundo do canal, presença de pontes, ilhas e obstruções, alargamentos e estreitamentos de canal (CASTILHO; PINTO; OLIVEIRA, 2005). As etapas de campo pós-enchente servem como uma forma de determinar os níveis de enchente e depreender onde ocorreram sublevações do canal para a planície, tendo uma estimativa de certa forma aceitável da dissipação da água sobre a planície de inundação, pois o maior nível de inundação não fica realmente presente nas feições da paisagem em virtude da rapidez que ocorre; as marcas visilmente constatáveis são um pouco menores que o nível máximo ocorrido, sobretudo em áreas mais íngremes.

Castilho; Pinto; Oliveira (2005) utilizou em seu estudo na cidade de Governador Valadares (MG), no rio Doce, 12 seções topobatimétricas em aproximadamente 14 km de trecho do rio. Já nos estudos de Bates et al. (2006) foram levantadas 20 seções batimétricas na cidade de

Upton-On-Severn em um trecho estudado de 16 km, para um rio Severn, indicando que o número de seções depende do tamanho do trecho do estudo, da heterogeneidade da seção e do propósito do estudo.

Dependendo do modelo utilizado e do Modelo Digital de Elevação (MDE) escolhido, a seção transversal pode ter uma importância alta nos estudos de inundação; Qi e Altinakar (2011) identificaram que modelos 1D (i.e. unidimensional) sem seções transversais bem delimitadas para planície de inundações extensas, como é o caso do estudo a montante da barragem Synclair (EUA), o modelo tende a encher o canal instantaneamente e pode causar erros na estimação do nível e do tempo de escoamento considerado.

2.6.4 Manchas de inundação, MDE e SIG

Oliveira; Saldanha; Guaselli (2010) citam que o sensoriamento remoto, o geoprocessamento e os Sistemas de Informação Geográfica (SIG) são ferramentas importantes na capacidade de mapeamento e de análise, tendo nas suas aplicações planejamento, monitoramento e simulação de eventos de inundação rápida.

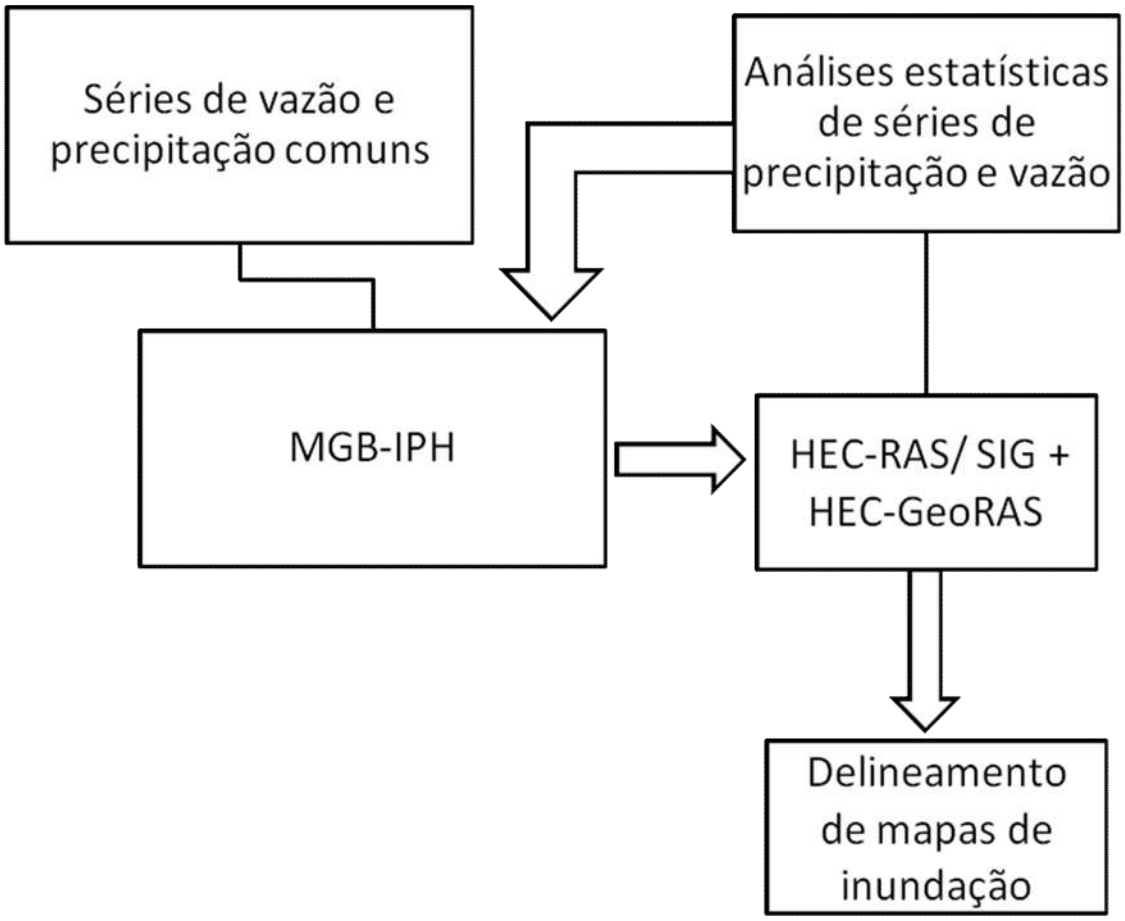
As dificuldades no que concerne à mancha de inundação são: a delimitação das áreas que sofrem com inundações e os parâmetros que irão compor os modelos hidrológicos (MANFREDA; DI LEO; SOLE, 2011).

Os MDE, dentre seus usos hidrológicos, têm dentre suas finalidades, a de circunscrever áreas propícias à inundação. Vários são os tipos de fontes de MDE existentes, exemplos como Shuttle Radar Topography Mission (SRTM), Aster Global DEM (GDEM), IfSAR, LiDAR, SAR. Um MDE bastante utilizado é o SRTM. Manfreda; Di Leo; Solo, (2011) destacam que o SRTM, mesmo com uma resolução de 90 m, tornou-se revolucionário para países em desenvolvimento, pois é de livre obtenção, inclusive sofreu correções para melhorar a acurácia da sua estrutura de valores; isto pode ser evidenciado em alguns MDE como USGS HydroSHEDS e USGS CSI-CGIAR e Topodata (INPE). No caso deste último, além de correções de algumas falhas, houve uma interpolação dos dados do SRTM e interpolação das informações para píxeis de 30 x 30 m.

3 METODOLOGIA

As etapas da metodologia utilizaram de dados de precipitação e vazão comuns e que também serão utilizadas para análises estatísticas, servindo para calibrar e validar o modelo hidrológico (MGB-IPH), além de ter fornecido dados de tempo de retorno de chuva. Posteriormente o produto do modelo hidrológico e estatístico serviu como dado de entrada para o modelo hidráulico (HEC-RAS), que teve interações com o Sistema de Informação Geográfica (SIG) e o aplicativo HEC Geo-Ras para o delineamento dos mapas de inundação (Figura 3).

Figura 3 - Organograma da metodologia do estudo.



3.1 Área de estudo

A bacia hidrográfica do rio Mundaú possui uma área de aproximadamente 4.126 km², entre os estados de Pernambuco e Alagoas; deste total, o trecho pernambucano se encontra com área de 2.155 km² (i.e. 52,23 % do total), situada na Mesorregião do Agreste Pernambucano com 15 municípios com seus territórios estabelecidos total ou parcialmente na bacia. O trecho alagoano corresponde a 1.971 km² (i.e. 47,77 % do total da bacia), situado na Mesorregião do Leste Alagoano com 15 municípios total ou parcialmente inseridos na bacia (Figura 4).

O clima que predomina, segundo a classificação de Köppen, é do tipo Bsh, em que a precipitação anual média gira em torno de 800 mm e temperatura média anual superior a 18 ºC (CONSULTORIA TÉCNICA LTDA, 1999).

De acordo com as medições na estação fluviométrica mais próxima da foz (Fazenda Boa Fortuna, 39770000 – ANA), a vazão média é de 25,78 m³/s, com picos acima de 1.000 m³/s e mínimas abaixo de 10 m³/s (CONSULTORIA TÉCNICA LTDA, 1999). A bacia hidrográfica possui uma elevada vulnerabilidade para inundações devido às suas características geológico-geomorfológica e de uso e cobertura do solo. No alto curso a geomorfologia é caracterizada por superfícies aplainadas e dissecadas (e.g. serras, chapadas e morros isolados), com resquícios de cumes a altitudes próximas de 1.000 m; o médio curso apresenta superfícies aplainadas e dissecadas (i.e. cotas entre 400 m a 900 m) e forte presença de pediplanos comuns da região Nordeste (i.e.. cotas entre 500 m a 600 m); e no baixo curso, destacam-se os terraços superiores (i.e. origem fluvial, e cotas de 15 m a 20 m) e terraços médios (i.e. origem fluvial litorânea e cotas em torno de 8 m) (CONSULTORIA TÉCNICA LTDA, 1999).

A geologia da bacia é determinada no alto e no médio curso pelo Maciço Pernambuco-Alagoas, baseado em rochas cristalinas (i.e. de formação ígnea ou metamórfica), com menor capacidade de infiltração, e no baixo curso está situada a bacia sedimentar Sergipe-Alagoas, ocupando uma pequena parte da bacia, tendo maior capacidade de infiltração.

Os solos na área da bacia hidrográfica que compreende o estado de Pernambuco e suas características hidrológicas são principalmente: (a) Argissolo Vermelho-Amarelo (39% da área

da bacia) bem ou moderadamente drenado, moderadamente poroso, não hidromórfico; (b) Argissolo Vermelho-Amarelo Eutrófico, semelhante ao anterior, porém mais profundos (i.e. 16,5% da área da bacia); (c) Neossolo Litólico Eutrófico (21 % da área da bacia) (i.e. possui camada do subsolo que restringe o fluxo de água) acima das rochas; (d) Latosolo Vermelho-Amarelo Distrófico (19,9 % da área da bacia), os quais são mais porosos. Na parte que compreende o estado de Alagoas se destacam o Latosolo Vermelho-Amarelo Distrófico (i.e. 14,32 % da área da bacia), o Argissolo Vermelho-Amarelo Eutrófico (i.e. 18,07 % da área da bacia), o Argissolo Vermelho-Amarelo (i.e. 65,40 % da área da bacia) (CONSULTORIA TÉCNICA LTDA, 1999).

Um aspecto que promove um maior escoamento superficial é o seu atual estado de uso e ocupação do solo. Segundo o estudo da Consultoria Técnica LTDA (1999), a área antropizada na bacia do Rio Mundaú é de 75,68 % (i.e. manchas urbanas, pastagens e sistemas agrícolas de pequena e grande escala em especial a de cana de açúcar) e apenas 22,76 % de cobertura arbórea, arbustiva ou mata nativa.

O município de Rio Largo é uma das últimas cidades ribeirinhas banhadas pelo rio Mundaú, tendo a parte urbana mais antiga situada sob a falha geológica Cachoeira do Meirim, que divide a formação de rochas cristalinas das sedimentares e causando um desnível acentuado em média de 13 m, além de estar assentada sob uma estreita planície de inundação. O perímetro urbano do município de Rio Largo corresponde à área de estudo para o mapeamento de risco de inundação, cujo trecho compreende aproximadamente 5 km do rio Mundaú.

3.2 Dados para a área de estudo

Os dados hidrológicos com frequência diária foram obtidos a partir da base de pluviômetros instalados na Bacia Hidrográfica do Mundaú, da Agência Nacional de Águas (ANA) e do Instituto de Tecnologia de Pernambuco (ITEP) (ver postos de precipitação e vazão na Figura 4). A seleção dos postos foi feita através da visualização da disponibilidade de dados pelo Gráfico de Gantt. Foram selecionados os postos com menor grau de falhas, em um período de 30 anos comum a todos os postos (1962 – 1991). Dos postos selecionados, foram retirados da análise aqueles que apresentaram falhas nos meses de maior precipitação. Este tratamento de

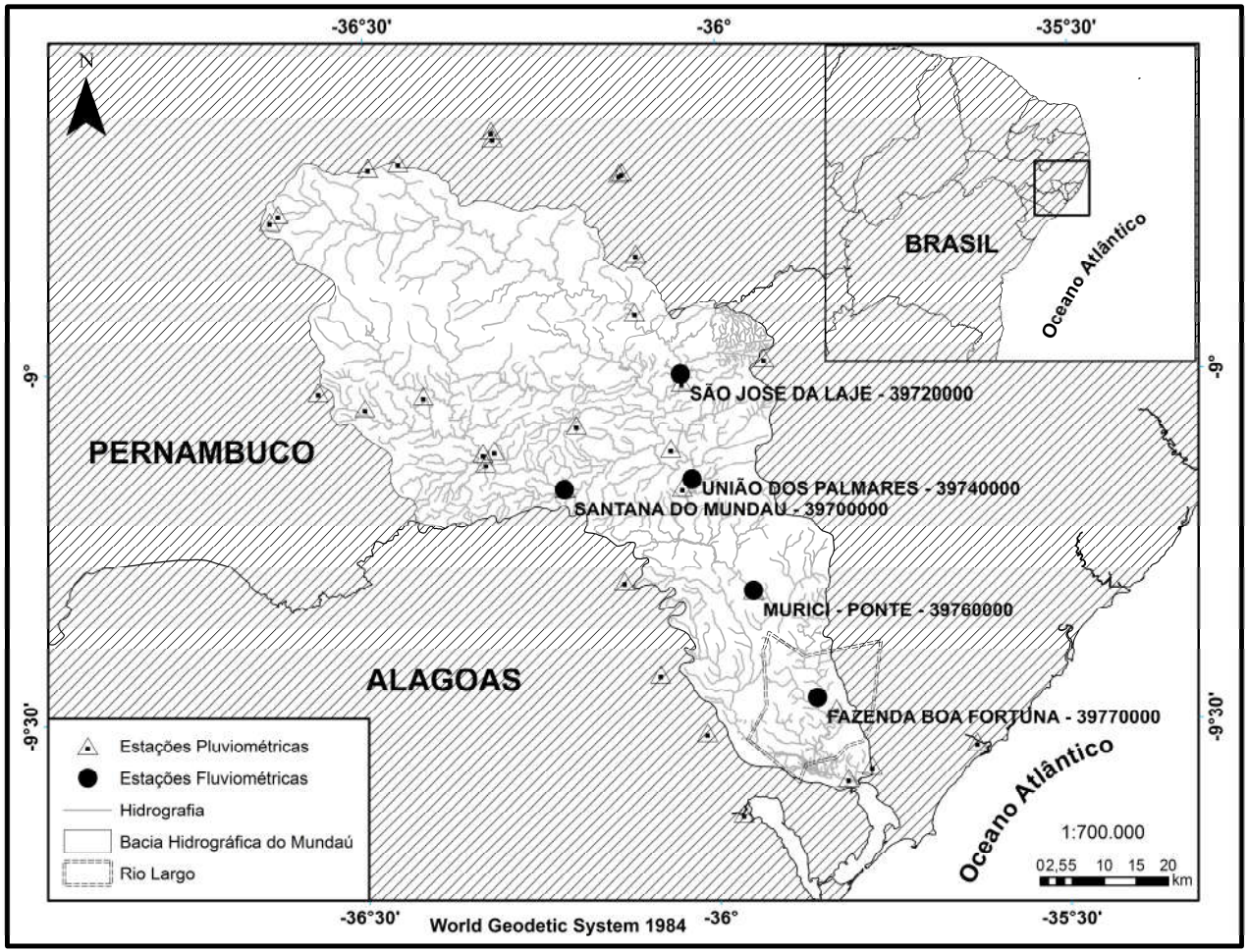
dados foi realizado considerando um período de Janeiro a Dezembro, tendo como norma a manutenção de pelo menos 15 anos de dados, conforme recomendado por Saf (2010), visando diminuir as incertezas estatísticas. Tais dados hidrológicos foram utilizados para a análise de frequência de máximos (precipitação e vazão) e na modelagem hidrológica.

3.3 Análise de frequência de vazões e chuvas máximas

Os eventos extremos de precipitação de cada ano do período selecionado passaram por uma análise estatística de consistência para retirada de outliers (i.e. pontos atípicos que podem afetar qualquer análise estatística), que pode ocorrer por erros de aquisição ou não. Dados não consistidos podem influenciar o ajuste das distribuições de frequência de máximos e do modelo hidrológico, podendo levar a resultados e conclusões incorretas (SAF, 2010). A retirada foi feita analisando caso a caso, observando se realmente houve erro de obtenção ou se o evento realmente aconteceu (NAGHETTINI e PINTO, 2007). Para a análise dos outliers foi utilizado o programa Expert System for At-Site Frequency Analisys of Hydrologic Variables (SEAF), que se baseia na metodologia de Grubbs e Beck (1972) e é descrito por Naghettini e Pinto (2007).

Posteriormente foi realizado um teste de hipóteses não paramétrico de homogeneidade nos postos de precipitação e vazão através da metodologia da Soma de Postos de Wilcoxon de amostras independentes, equivalente ao teste de Mann-Whitney, nível de significância de $\alpha = 0,05$ e bilateral. O teste baseia-se na comparação de medianas de duas ou mais amostras de um conjunto de dados. A hipótese nula é que as amostras são de populações com medianas iguais (TRIOLA, 2008). Nos estudos hidrológicos o teste de Mann-Whitney identifica se amostras foram formadas de eventos diferentes, precipitações ordinárias ou de fenômenos especiais. No entanto, Naghettini e Pinto (2007) afirmam que é difícil obter heterogeneidade quando se trata de amostras pequenas e/ou variáveis de valores extremos.

Figura 4 - Bacia Hidrográfica do Mundaú (Nota: destaque para os fluviômetros e pluviômetros utilizados).



A distribuição de probabilidade utilizada para estimar as precipitações máximas de projeto foi a Valor Extremo Generalizado (GEV), que é dada como a soma das distribuições Fréchet, Gumbel e Weibull, e possuem três parâmetros assintóticos de valores extremos máximos (i.e. forma (k), escala (α) e posição (β)), se $k = 0$, esta distribuição de probabilidade equivale à distribuição Gumbel de dois parâmetros (i.e. escala (α) e posição (β)) quando, $k < 0$, torna-se GEV do tipo II, sendo empregada uma forma exponencial e se, $k > 0$, torna-se GEV do tipo III, sendo uma forma exponencial com limite.

Normalmente a escolha de uma distribuição é discutível, porém, o uso da distribuição de GEV para eventos extremos de inundação e tormentas é muito disseminado (e.g. HOSKING; WALLIS, WOOD, 1985; KATZ; PARLANGE; NAVEAU, 2002; KOUTSOYIANNIS e BALOUTSOS, 2000; SAF, 2010; TRAMBLAY et al. 2012). Além disso, esta distribuição de frequência é recomendada para locais onde pluviômetros têm frequência de coleta de 1 hora ou 24h (NORBIATO et al. 2007). Outra vantagem da distribuição GEV é que ela possui três parâmetros, incluindo a posição, eliminando problemas com suavização da função de distribuição em decorrência de uma série curta de dados, como pode ocorrer com a distribuição Gumbel (e.g. ROGGER et al. 2012)

Foi utilizado o programa MATLAB para obtenção de chuvas e vazões extremas para diferentes tempos de retorno considerando a distribuição de probabilidade GEV pelo método da Máxima Verossimilhança, que consiste em maximizar as funções dos parâmetros da distribuição, sendo bastante utilizadas devido à formação de estimadores com menor grau de variância, consistentes, suficientes e com maior eficiência assintótica.

Também foi realizado um teste de aderência Kolmogorov-Smirnov para a distribuição GEV. Esse teste identifica se os dados empíricos de precipitação e de vazão possuem uma boa aderência com a distribuição GEV. O nível de significância adotado para determinar a aderência foi de $\alpha = 0{,}05$ (i.e. 95 % de nível de confiança). A posição de plotagem dos dados empíricos seguiu a equação de Gringorten (apropriada para a distribuição GEV). Os valores extremos de precipitação e vazão foram obtidos para os eventos com tempo de recorrência igual a 2, 5, 10, 25, 50, 100, 200, 500 e 1.000 anos.

3.4 Modelagem hidrológica

Para tal aplicação foi utilizado o modelo hidrológico chuva-vazão MGB-IPH desenvolvido por Collischonn et al. (2007) e aprimorado por Paiva; Collischonn; Buarque (2012). Consiste em um modelo distribuído baseado em processos e simulação do ciclo hidrológico através de relações físicas e conceituais, tendo por finalidade representar fenômenos principalmente em grandes bacias hidrográficas (i.e. > 10.000 km²) (PAIVA; COLLISCHONN; BUARQUE, 2012).

O modelo divide-se em 4 módulos: balanço de água no solo, evapotranspiração, escoamentos (i.e. superficial, subsuperficial e subterrâneo) e propagação das vazões na rede de drenagem. O MGB-IPH é apropriado para as características brasileiras, pois os dados necessários para sua aplicação são obtidos em quase todo território nacional (i.e. imagens de sensoriamento remoto, MDE e dados hidrometeorológicos), o modelo foi concebido para bacias maiores que 10.000 km²; todavia pode ser usado em bacias acima de 1.000 km² (COLLISCHONN et al. 2007). O intervalo de tempo utilizado de simulação foi o diário. As características fisiográficas da bacia (e.g. divisão das sub-bacias, trechos de rios, comprimento e declividade dos rios) foram obtidas através do aplicativo ArcHydro (um componente do software ArcGIS).

A bacia foi segmentada em 95 minibacias e 5 sub-bacias. Cada minibacia possui suas características de tipo, uso e cobertura dos solos, as quais compõem as URH (i.e. Unidades de Resposta Hidrológica), descrito por Kouwen et al. (1993). Para a definição das URH da bacia do rio Mundaú foram reclassificados e processados a partir do mapa digital de solos oriundo do projeto Radambrasil (Publicado em 2001 na Escala 1:5.000.000) oriundo de mapeamentos de solo realizados pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA). Também foi utilizado um mapa de vegetação com origem nas cartas-imagens de radar produzidas pelo Projeto Radambrasil, que foi digitalizado e distribuído pela U.S. Geological Survey's EROS Data Center (publicado em 1992 na escala 1:5.000.000). Seguindo o grupamento de Sartori; Genovez; Lombardi Neto (2005a) e Sartori; Genovez; Lombardi Neto (2005b) (Tabela 1), os solos foram classificados em rasos e profundos; a cobertura classificada em solo exposto, vegetação rasteira e

floresta, resultando em 6 URH (blocos) para a bacia (Tabela 2 e Figura 5). Os parâmetros fixos e calibráveis são baseados nas URH (Anexo A).

Tabela 1 - Agrupamento dos solos relacionado a suas características

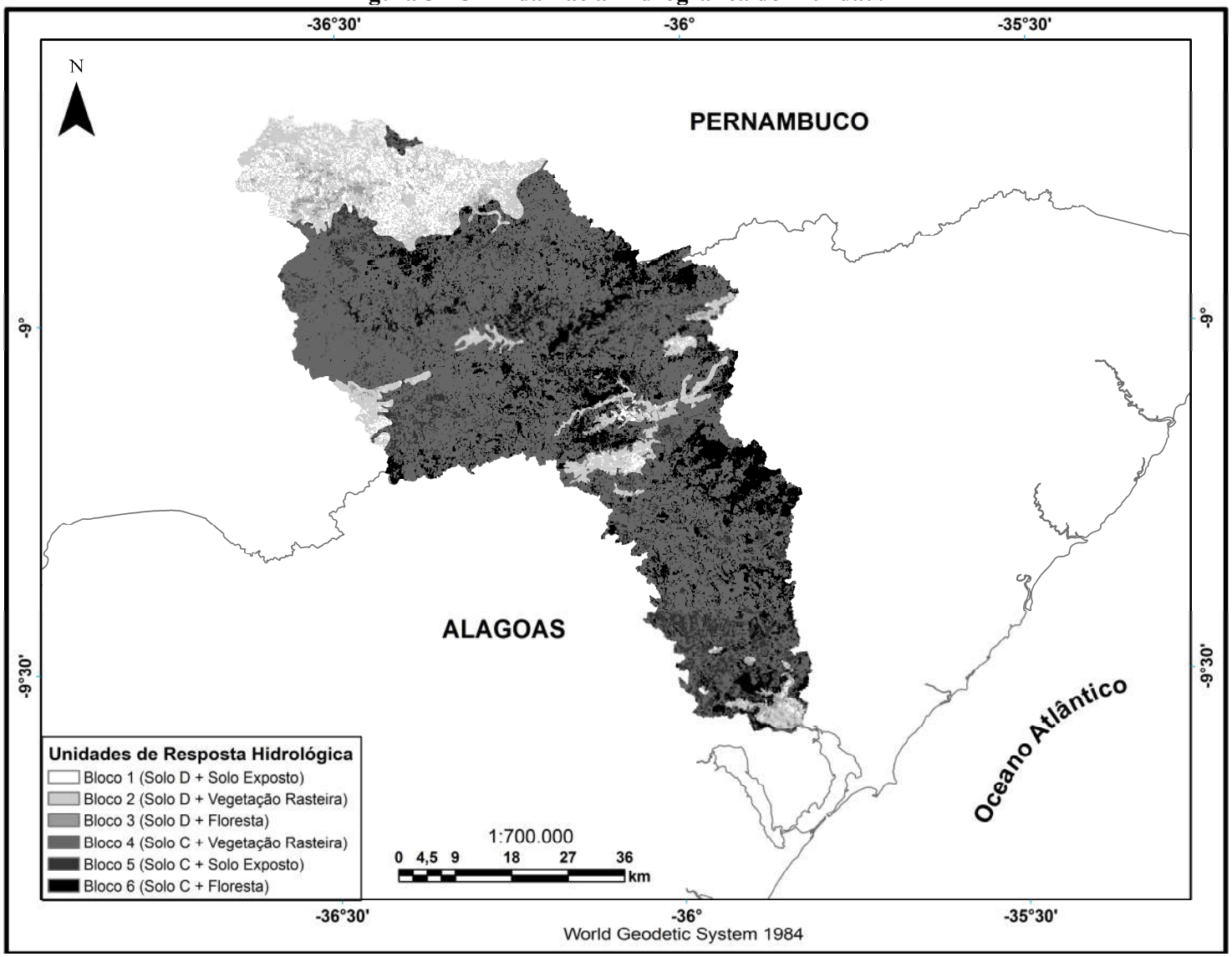
Grupo	Profundidade	Permeabilidade
A	Muito Profundo (> 2 m) ou Profundo (1 m a 2 m)	Rápida/Moderada
B	Profundo (1 m a 2 m)	Rápida/Moderada
C	Profundo (1 m a 2 m) ou Moderadamente Profundo (0,5 m a 1,0 m)	Lenta/Rápida
D	Moderadamente Profundo (0,5 m a 1,0 m) ou Raso (0,25 m a 0,50 m)	Lenta/Moderada

Fonte: Sartori; Genovez; Lombardi Neto (2005a).

Tabela 2 - Características de tipo e uso do solo das URH (i.e. Blocos).

URH	Tipo e Uso do Solo
Bloco 1	SOLO D + SOLO EXPOSTO
Bloco 2	SOLO D + VEGETAÇÃO RASTEIRA
Bloco 3	SOLO D + FLORESTA
Bloco 4	SOLO C + SOLO EXPOSTO
Bloco 5	SOLO C + VEGETAÇÃO RASTEIRA
Bloco 6	SOLO C + FLORESTA

Figura 5 - URH da Bacia Hidrográfica do Mundaú.



3.5 Modelagem hidráulica

Para determinação dos níveis de cheia para diferentes tempos de retorno foi utilizado o modelo hidráulico. HEC-RAS 4.1, desenvolvido pelo Hydrologic Engineering Center (HEC). HEC-RAS é um modelo matemático que permite simular escoamentos em canais naturais ou artificiais de escoamento supercrítico, subcrítico ou misto (USACE, 2010). Este software possibilita o cálculo e análise hidráulica de escoamentos unidimensionais em regime permanente, quase permanente e não permanente. Também permite simular a erosão no leito do rio, o transporte de sedimento e modelar a qualidade da água no trecho simulado.

Neste estudo foi utilizada uma configuração simplificada do modelo considerando uma condição de escoamento em regime permanente, uma vez que os dados de entrada representam uma condição média diária (i.e. constante ao longo do dia). Tal simplificação implica numa situação conservadora em termos de projeto, o que é razoável para o planejamento de áreas de risco de inundação.

Para que as estimativas das áreas de inundações tenham uma boa representatividade, faz-se necessário o levantamento e definição de seções topobatimétricas (i.e. seções que integram a batimetria do canal com a topografia da planície de inundação) representativas das condições de escoamento. A localização das seções topobatimétricas para este estudo foi definida após uma visita de reconhecimento do trecho do rio, onde se procurou identificar os locais de variação das condições hidráulicas do mesmo, além da viabilidade do levantamento da seção em campo. Variações das condições hidráulicas podem ocorrer devido às mudanças de declividade do fundo do canal, presença de pontes, ilhas e obstruções; alargamentos ou estreitamentos da seção transversal, dentre outros motivos (CASTILHO; PINTO; OLIVEIRA, 2005).

Desta forma, foram definidas cinco seções na cidade de Rio Largo (Figura 6). Para o levantamento topográfico em campo da planície de inundação foi utilizado uma Estação Total (modelo Topcom). As margens das seções batimétricas foram georreferenciadas com o uso de um GPS (modelo Garmin Etrex H). O levantamento batimétrico de duas seções foi realizado com o uso de um Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP, modelo M9 SonTek®).

A batimetria da seção transversal mais a montante foi levantada por ADCP. Esta seção refere-se à condição de contorno do modelo hidráulico, onde foram estimadas as vazões máximas pelo modelo hidrológico (estação fluviométrica Fazenda Boa Fortuna). Nesta seção, foi adotado

como condição de contorno de jusante um valor de declividade média do trecho estudado, existe no modelo outras condições como curva-chave, nível conhecido e declividade crítica. A segunda seção transversal foi definida sob uma ponte próxima ao centro da cidade de Rio Largo onde foi realizado levantamento batimétrico através de régua batimétrica. A terceira seção é uma antiga barragem a fio d'água utilizada para fins hidrelétricos, situada numa região próxima ao centro da cidade de Rio Largo, onde os dados batimétricos e da própria barragem foram obtidos no projeto da mesma com os responsáveis pelo empreendimento. A quarta seção é localizada pós-barragem, tendo esta uma importância significativa para a simulação hidráulica, pois está localizada em uma região de intensa mudança nas condições hidráulicas em relação à seção anterior (i.e. grande mudança de declividade). A última seção, levantada por ADCP, está localizada em uma região próxima ao limite político do município de Rio Largo com Maceió, a qual representa o fim da zona urbana da cidade sujeita à inundação. Além disto, o formato desta seção foi replicado para a seção imediatamente de montante devido à semelhança geométrica, considerando a declividade observada média em campo (estimada em 2,10 m/km).

A topografia da planície de inundação foi obtida através da integração dos dados provenientes das cartas topográficas com cotas equidistantes de 1 m, cedidas pela Companhia de Saneamento de Alagoas (CASAL), e do Modelo Digital de Terreno (MDE), disponibilizado pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), com resolução de 30 m interpolados do MDE SRTM (i.e. 90 m), gerando um único Modelo Numérico de Terreno (MNT, ver curvas de nível na Figura 6). Estas informações foram utilizadas apenas em áreas sem levantamento topográfico.

As seções topobatimétricas foram estendidas para a planície de inundação utilizando as informações do MNT (Figura 7). É possível observar uma sensível diferença entre os dados levantados em campo e as estimativas do MNT, principalmente na calha do rio. Esta combinação entre MNT, topografia e batimetria melhora a qualidade dos resultados (CASAS et al. 2006).

Todo o pré-processamento para o HEC-RAS (e.g. definição das seções transversais, canal e margens, dados de geometria) foi realizado através da extensão HEC-GeoRAS 4.3 dentro do ambiente do ArcGIS®.

Figura 6 - Seções topobatimétricas utilizadas na modelagem hidráulica.

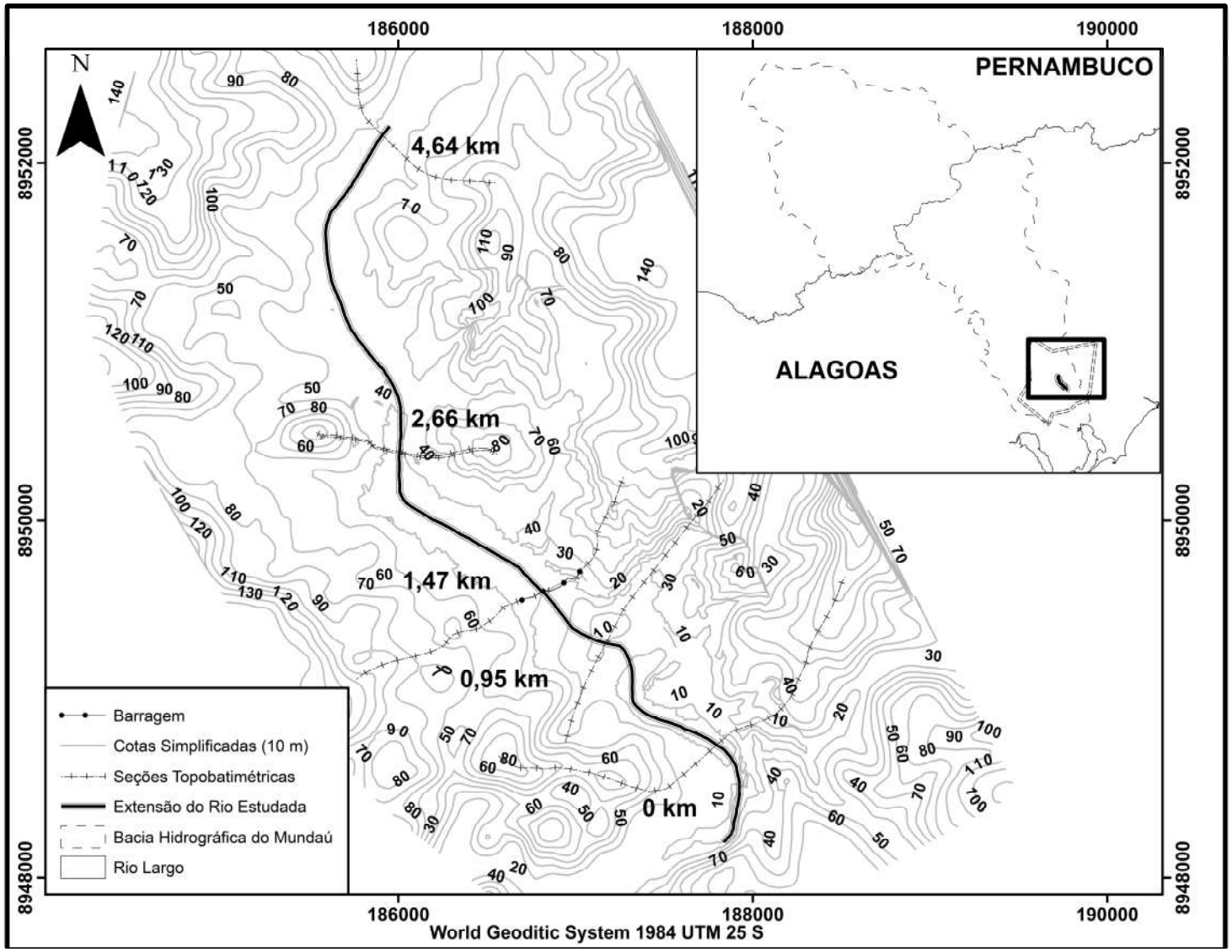
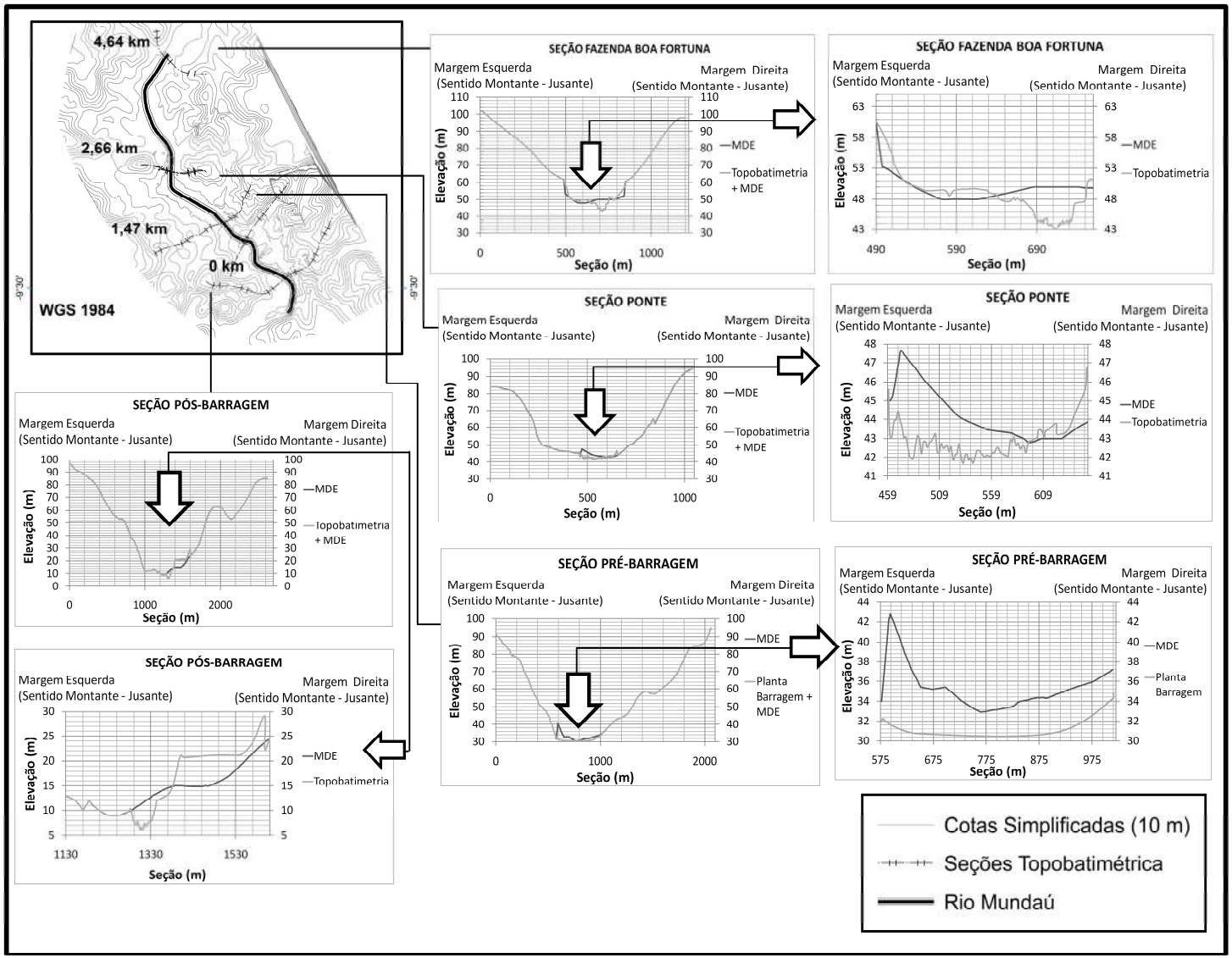


Figura 7 - Comparação entre dados topográficos do MDE e de levantamento topobatimétrico.



O coeficiente de rugosidade de Manning foi utilizado como parâmetro de calibração do modelo hidráulico. O processo de ajuste do coeficiente de rugosidade de Manning foi manual, partindo de valores de referência apresentados por Chow (1959), até obter uma melhor correspondência entre as marcas de cheias de junho de 2010 (45 marcas de cheias levantadas em campo de forma qualitativa junto à população local (Anexo B)) e a mancha simulada pelo modelo hidráulico. Como o desenvolvimento da cidade de Rio Largo ocorre apenas na margem esquerda do rio Mundaú, não foi possível levantar as marcas de inundação da margem direita.

Para a calibração dos níveis simulados pelo modelo hidráulico também foi utilizado uma imagem satélite do Google Earth do dia 20/06/2008. A vazão para o dia correspondente foi registrada pela estação fluviométrica da Fazenda Boa Fortuna.

Os mapas de risco de inundação, para diferentes tempos de retorno, foram gerados para duas diferentes condições de vazão estimada a montante: (a) vazões máximas geradas pelo ajuste da distribuição de frequência GEV; e (b) as vazões máximas geradas pelo modelo hidrológico. Desta forma, foi possível avaliar possíveis divergências por se adotar diferentes métodos de definição das vazões máximas (ROGGER et al. 2012). Os tempos de retornos adotados para as vazões máximas são os mesmos das precipitações máximas. As convergências entre as manchas de inundação geradas para diferentes tipos de vazões (i.e. determinísticas e estocásticas) foram avaliadas pela seguinte expressão (BATES e DE ROO, 2000; BATES et al. 2006; SAHARDI; SOLTANI; MODARRES, 2012):

$$\textbf{Fit}\ (\%) = \left(\frac{A_{om}}{A_o + A_m - A_{om}}\right) x\ 100 \qquad (1)$$

onde Fit é o percentual de convergência entre as duas manchas geradas, A_o é a área da mancha de inundação gerada por vazão estocástica (distribuição GEV) e A_m é a área da mancha de inundação gerada por vazão determinística (modelo hidrológico), A_{om} é a intersecção das áreas de mancha de inundação das duas condições de contorno. Valores próximos a 100 % indicam alta correspondência entre as manchas, e próximos de 0 % baixa correspondência entre as manchas.

4 RESULTADOS

4.1 Análises de frequência de vazões e chuvas máximas

As precipitações e vazões máximas anuais foram pré-tratadas para retirada de outliers. Apenas um valor da série histórica de dois postos pluviométricos (i.e. Caetés - 0836008 (ANA); Jurema – 0836021 (ANA)) foram descartados, pois realmente apresentaram possíveis erros de leitura dos dados. Foram selecionados 31 postos pluviométricos para a análise de frequência de máximas por apresentarem no mínimo 15 anos de dados, sem falhas no período mais chuvoso.

O teste não paramétrico de homogeneidade de medianas de Mann-Whitney indicou que as séries de precipitação e a série de vazão não apresentaram mudanças de tendência em relação a mudanças climáticas locais ou de eventos extremos climáticos, não identificando rejeições na hipótese nula em nenhum posto pluviométrico, o que demonstra que as amostras provêm da mesma população (NAGHETTINI e PINTO, 2007).

Os resultados do teste de Kolmogorov-Smirnov identificaram que todos os 31 postos pluviométricos aderiram bem à distribuição de probabilidade GEV, com valor de significância $p < 0,05$.

Após a aplicação dos testes de homogeneidade e aderência foram estimados os tempos de retorno para cada posto pluviométrico (Tabela 3) e para a estação fluviométrica Fazenda Boa Fortuna (Figura 8); tendo esta logrado uma vazão de 1.233 m³/s (i.e. cota lida 11,50 m) na inundação de 2010, onde obteve tempo de retorno de aproximadamente 200 anos (Figura 8).

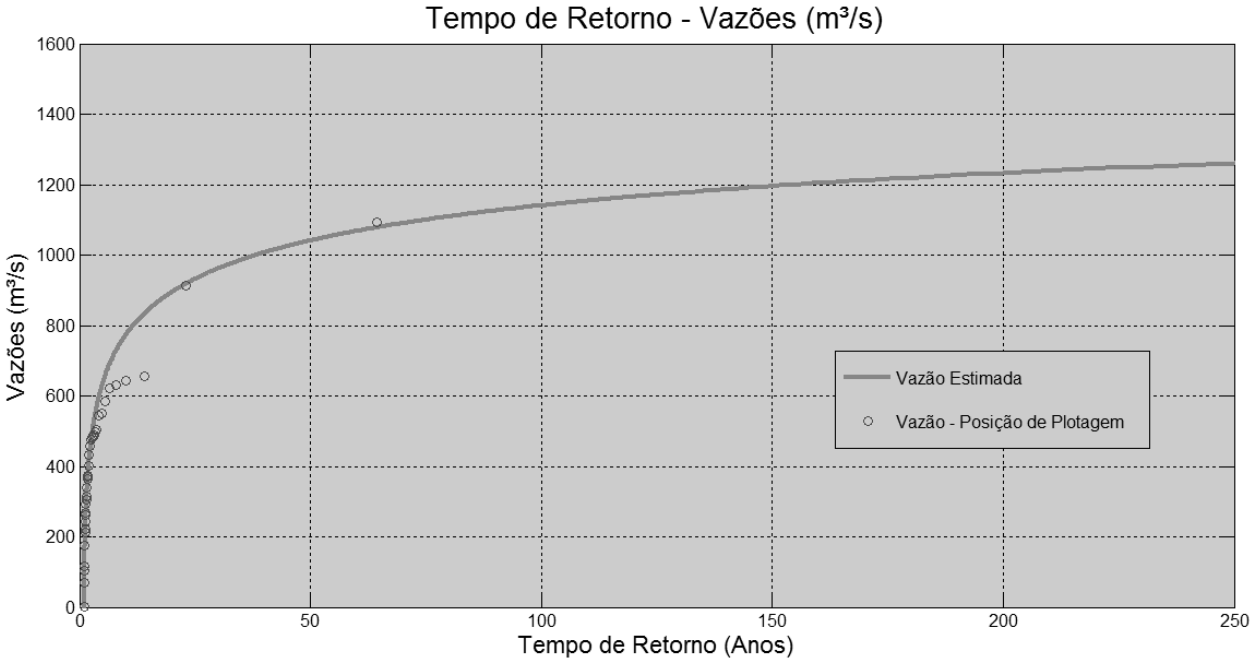
Tabela 3 - Chuva estimada para Tempos de Retorno em cada posto pluviométrico.

Código - Posto	TR 2	TR 5	TR 10	TR 25	TR 50	TR 100	TR 200	TR 500	TR 1000
00835073 Ibateguara	55,41	62,25	69,21	72,20	73,65	74,64	75,31	75,88	76,16
00836008 Caetés	65,02	80,40	87,30	93,53	96,84	99,31	101,20	103,00	103,90
00836020 Jucati	64,59	86,53	98,56	111,40	119,40	126,40	132,40	139,20	143,60
00836021 Jurema	50,07	73,05	93,91	130,80	163,60	207,00	261,80	357,00	451,40
00836022 Lajedo	62,75	80,02	90,48	102,70	111,10	118,90	126,20	135,10	141,30

00836026 Paquevira	44,26	61,08	73,06	89,26	102,10	115,50	129,70	149,60	165,60
00935005 Maceió	97,34	129,80	149,30	171,90	187,30	201,50	214,70	230,80	241,90
00935012 Murici (Ponte)	77,23	96,93	109,20	123,80	134,10	143,90	153,20	164,80	173,10
00935021 Rio Largo	59,53	87,07	111,10	150,30	187,40	232,80	288,40	381,80	471,30
00935023 Satuba	120,30	152,00	166,70	180,20	187,60	193,20	197,60	201,80	204,10
00935024 Saúde	100,20	135,40	154,70	175,10	187,80	198,80	208,30	218,80	225,60
00935054 Pilar	115,00	155,60	179,80	207,40	226,10	243,20	259,00	277,90	291,00
00936003 Brejão	68,51	106,80	142,00	202,00	261,40	336,70	432,60	601,00	769,50
00936004 Correntes - 806	67,58	86,55	100,50	116,90	128,20	138,80	280,30	343,80	398,90
00936008 Poço Comprido	34,93	54,43	71,68	100,10	127,30	160,80	202,20	272,60	340,80
00936010 Atalaia	62,08	84,77	100,50	121,20	137,30	153,70	170,70	194,00	212,30
00936014 Capela	72,96	92,39	104,00	117,50	126,60	135,10	142,90	152,30	158,90
00936033 Munguba	109,00	140,20	155,50	170,30	178,80	185,60	191,00	196,60	199,80
00936044 União dos Palmares (Rocha Cavalcanti)	77,50	97,34	103,00	106,40	107,70	108,30	108,70	108,90	109,00
00936045 Santana do Mundaú	68,10	88,24	102,70	122,50	138,30	155,00	172,60	197,70	218,00
00936047 São José da Laje	45,58	66,26	77,54	92,06	103,00	114,10	116,90	140,30	151,90
00936049 Santa Efigênia	69,93	90,18	103,50	120,20	132,50	144,70	156,80	172,60	184,50
00936053 União dos Palmares	71,66	96,99	112,90	132,10	145,60	158,60	171,00	186,60	197,90
10000002 Brejão	72,37	112,20	146,70	202,40	254,70	318,10	395,20	515,90	645,80
10000005 Caetés	63,64	79,44	87,26	94,89	99,27	318,10	105,60	108,50	110,20

10000007 Canhotinho (Paquevira)	44,73	62,73	75,92	94,19	99,27	102,80	141,90	166,40	186,50
10000010 Correntes (Poço Comprido)	34,93	54,43	71,68	100,10	127,30	160,80	202,20	272,60	340,80
10000011 Correntes	74,59	103,00	121,10	143,10	158,80	174,00	188,60	207,30	220,90
10000017 Jucati (IPA)	64,59	86,53	98,56	111,40	119,40	126,40	132,40	139,20	143,60
10000020 Jurema	50,26	76,11	101,50	147,50	195,80	260,30	346,70	507,60	678,10
10000023 Lajedo	64,38	81,25	91,56	103,70	112,10	120,00	127,40	136,50	142,90

Figura 8 - Tempo de retorno para vazões estimadas por distribuição GEV na estação Fazenda Boa Fortuna.



4.2 Modelagem hidrológica

Os valores das métricas que avaliam a performance do ajuste do modelo aos dados observados para o período de calibração e validação do modelo, podem ser observados nas Tabela 4 e Tabela 5, respectivamente, e na Figura 9. O modelo hidrológico apresentou um melhor desempenho nas estações localizadas mais a jusante na bacia (397400000, 397600000 e

principalmente 397700000, que é a estação foco do estudo (Figura 10 e Figura 11)); diferentemente das estações 397000000 e 397200000, localizadas na cabeceira da bacia, onde ocorre uma resposta hidrológica das chuvas mais rápida ou a influência climática também pode ser uma influência devido a falta a bacia hidrográfica se encontrar em uma zona de transição entre uma área semi-árida e uma de alta umidade.

Tabela 4 - Resultado das funções objetivo para calibração do modelo hidrológico.

Código	Posto	NS	NS_{log}	ΔV(%)
397000000	Santana do Mundaú	0,65	0,94	-19
397200000	São José da Laje	-1,55	0,92	118
397400000	União dos Palmares	0,68	1,00	73
397600000	Murici-Ponte	0,76	1,00	20
397700000	Fazenda Boa Fortuna	0,81	0,45	12

Tabela 5 - Resultado das funções objetivo para validação do modelo hidrológico.

Código	Posto	NS	NS_{log}	ΔV(%)
397000000	Santana do Mundaú	0,48	0,89	-48
397200000	São José da Laje	-1,73	0,91	96
397400000	União dos Palmares	0,75	1,00	0
397600000	Murici-Ponte	0,87	1,00	-1
397700000	Fazenda Boa Fortuna	0,74	0,47	3

Após a calibração e validação do modelo foram estimadas as vazões máximas para diferentes tempos de retorno na seção fluviométrica a montante de Rio Largo - Fazenda Boa Fortuna (Tabela 6). As vazões máximas estimadas pelo modelo foram comparadas às vazões estimadas pela distribuição GEV. O comparativo entre os dois métodos demonstra valores semelhantes até 200 anos de tempo de retorno (diferença máxima de 16%), onde as vazões estimadas pela distribuição GEV são maiores do que as vazões estimadas pelo modelo hidrológico. Este padrão inverte-se para tempos de retorno maiores. Ressalta-se que nesta região as incertezas das estimativas estocásticas são maiores por estarem na região de extrapolação da curva de distribuição de frequências, sendo mais recomendado estimativas baseadas em processos.

Figura 9 - Comparação entre vazões observadas e calculadas para cada posto fluviométrico.

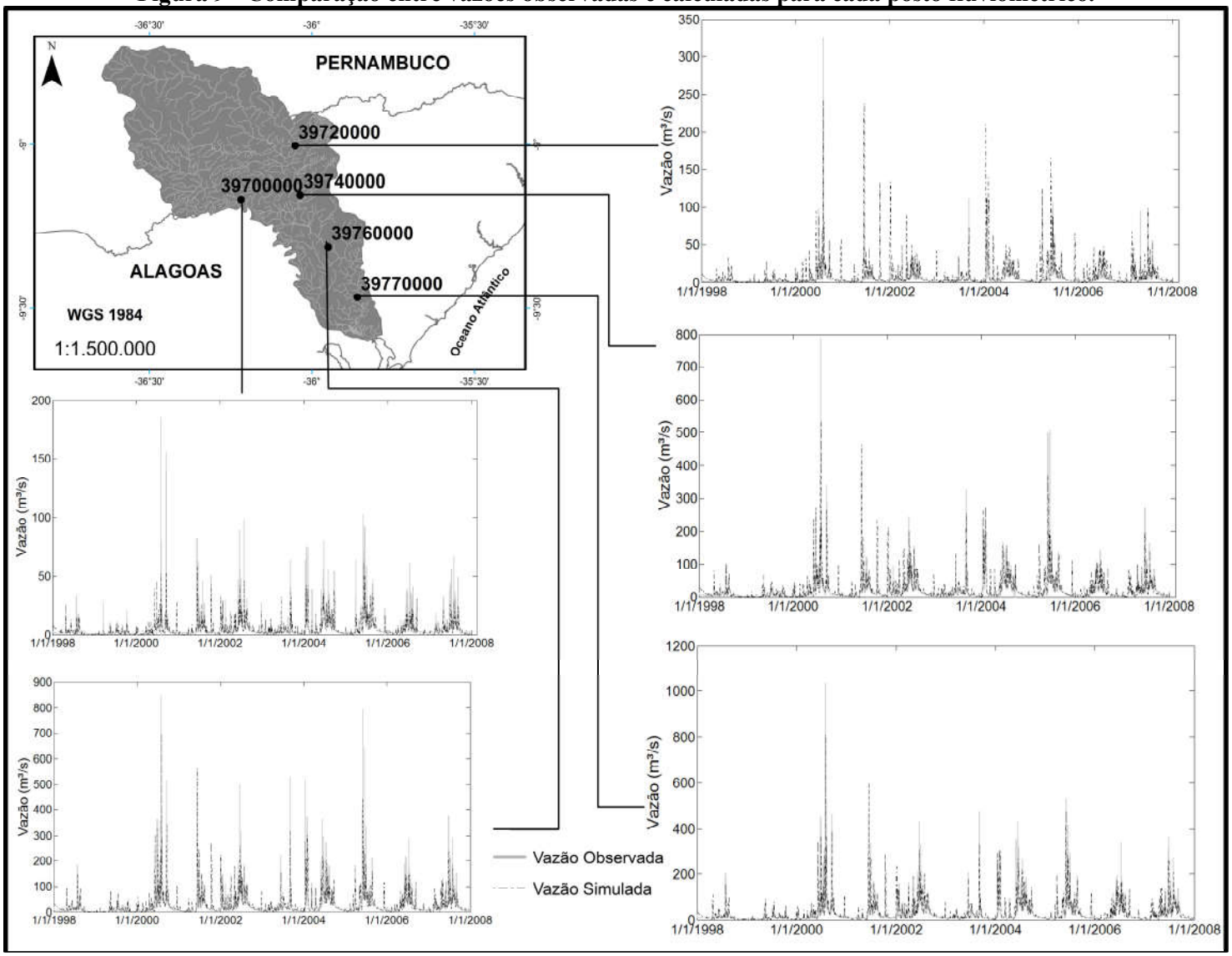


Figura 10 - Calibração e validação das vazões simuladas na estação fluviométrica Fazenda Boa Fortuna.

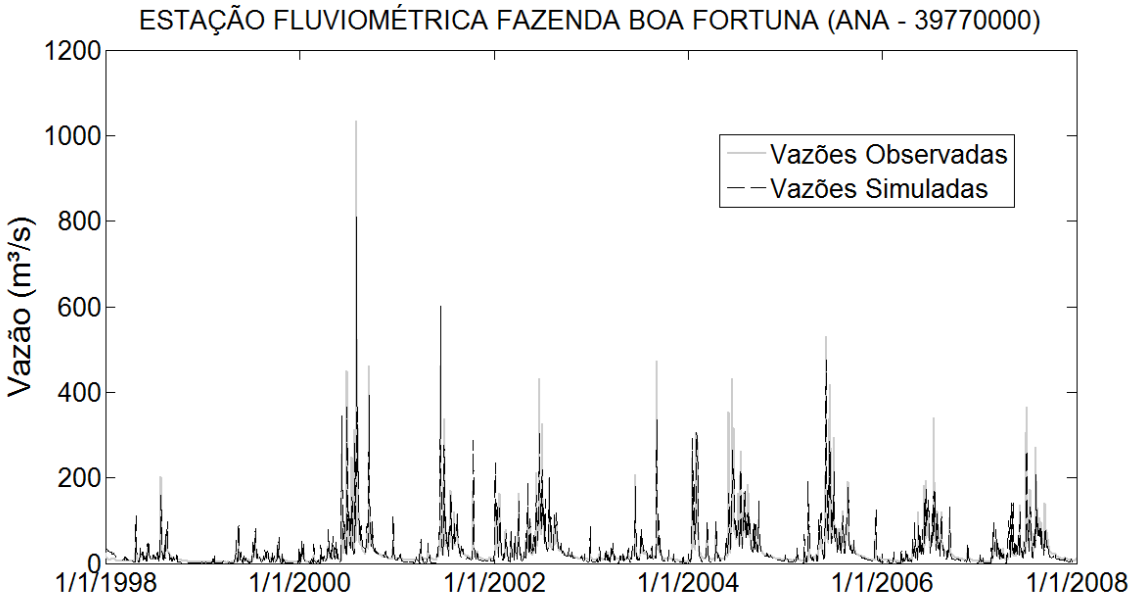


Figura 11 - Calibração e validação fluviométrica da estação fluviométrica Fazenda Boa Fortuna no período da inundação de 2000.

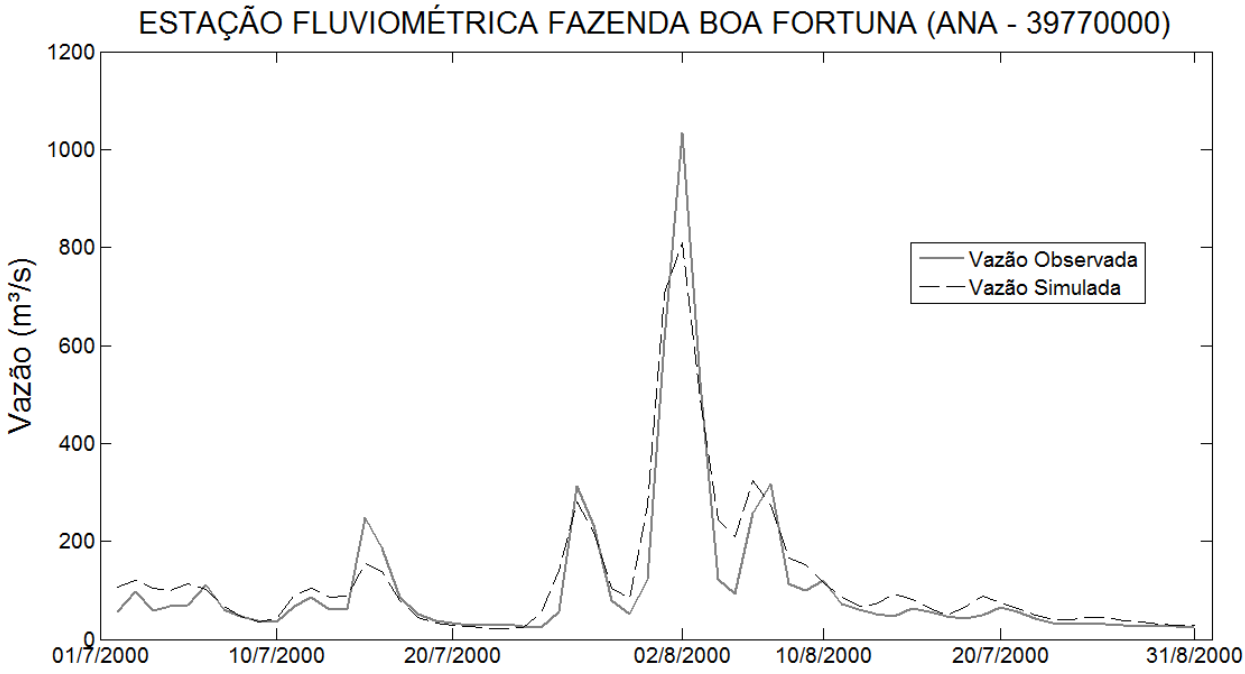


Tabela 6 - Comparação de vazões.

TR	Vazão Estimada (GEV)	Vazão - Modelagem	% de diferença
2 anos	403,9	367,12	9,11
5 anos	634,8	537,13	15,38
10 anos	773,1	650,24	15,89
25 anos	932,7	801,89	14,02
50 anos	1041	926,86	10,96
100 anos	1141	1066,19	6,56
200 anos	1233	1236,78	-0,31
500 anos	1345	1593,09	-18,45
1000 anos	1422	1864,29	-31,10

4.3 Modelagem hidráulica

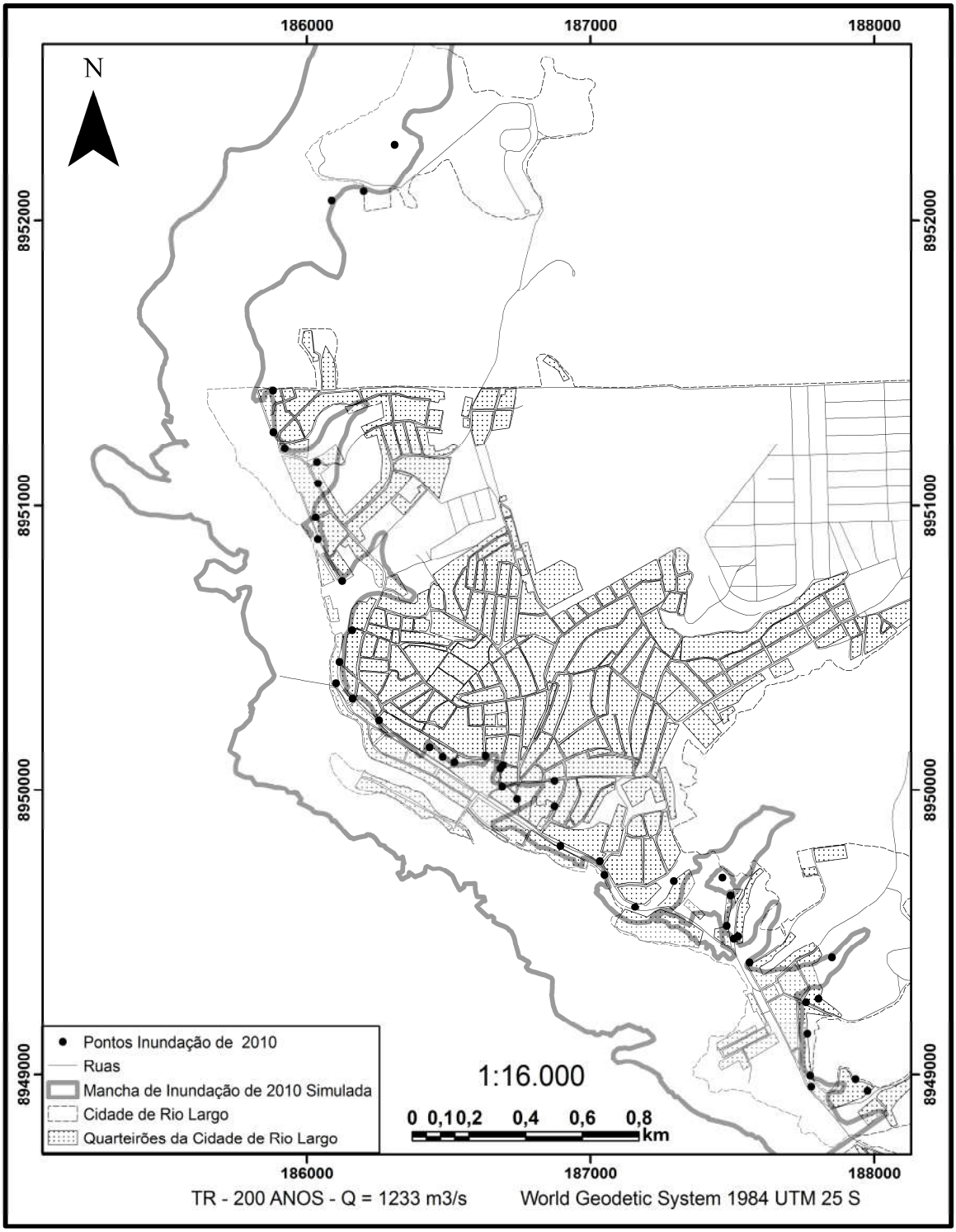
A mancha de inundação simulada e as marcas de cheia para o evento de junho de 2010 podem ser observadas na Figura 12. No geral, observa-se uma boa correspondência da estimativa da mancha de inundação com as marcas de cheia para toda área urbana da cidade de Rio Largo. No entanto ocorreram algumas desconformidades em pontos no início da cidade, na área central e na parte baixa (sentido montante para jusante). As diferenças no plano horizontal foram em média de 33,50 m e de 27,20 m de mediana, já a diferença de declividade foi em torno de 2,37 m de média e mediana de 1,40 m.

Os valores dos coeficientes de rugosidade de Manning obtidos ao final do processo de calibração podem ser observados na Tabela 7.

Tabela 7 - Valores do coeficiente de Manning (nota: sentindo montante para jusante).

Seções	Margem Esquerda	Canal	Margem Direita
Fazenda Boa Fortuna	0,14	0,14	0,14
Ponte	0,17	0,17	0,17
Pré-Barragem	0,17	0,17	0,17
Declividade	0,15	0,07	0,15
Pós-Barragem	0,15	0,07	0,15

Figura 12 - Ajuste da modelagem hidráulica com os pontos da inundação de 2010.



4.4 Mapeamento das áreas de risco de inundação

Após calibração da mancha de inundação, o modelo hidráulico foi utilizado para gerar as manchas de cheias considerando vazões de montante geradas pelo modelo hidrológico e estocástico para diferentes tempos de retorno (Figura 13). Observa-se que a área urbana inundada é pequena para diferentes vazões de cheia (i.e. área inundada menor do que 4% da área total urbana para uma vazão com tempo de retorno de 1000 anos). Vazões de cheia superiores a 50 anos de TR promovem áreas inundadas relevantes principalmente na parte média e baixa do trecho (Tabela 8).

As divergências entre as manchas de inundação geradas para diferentes tipos de vazões (i.e. determinísticas e estocásticas) foram avaliadas pela estatística Fit (1) (Tabela 9). Pode-se observar que existe forte correspondência (acima de 92%) entre as manchas de inundação geradas por diferentes métodos de estimativa de vazão de montante.

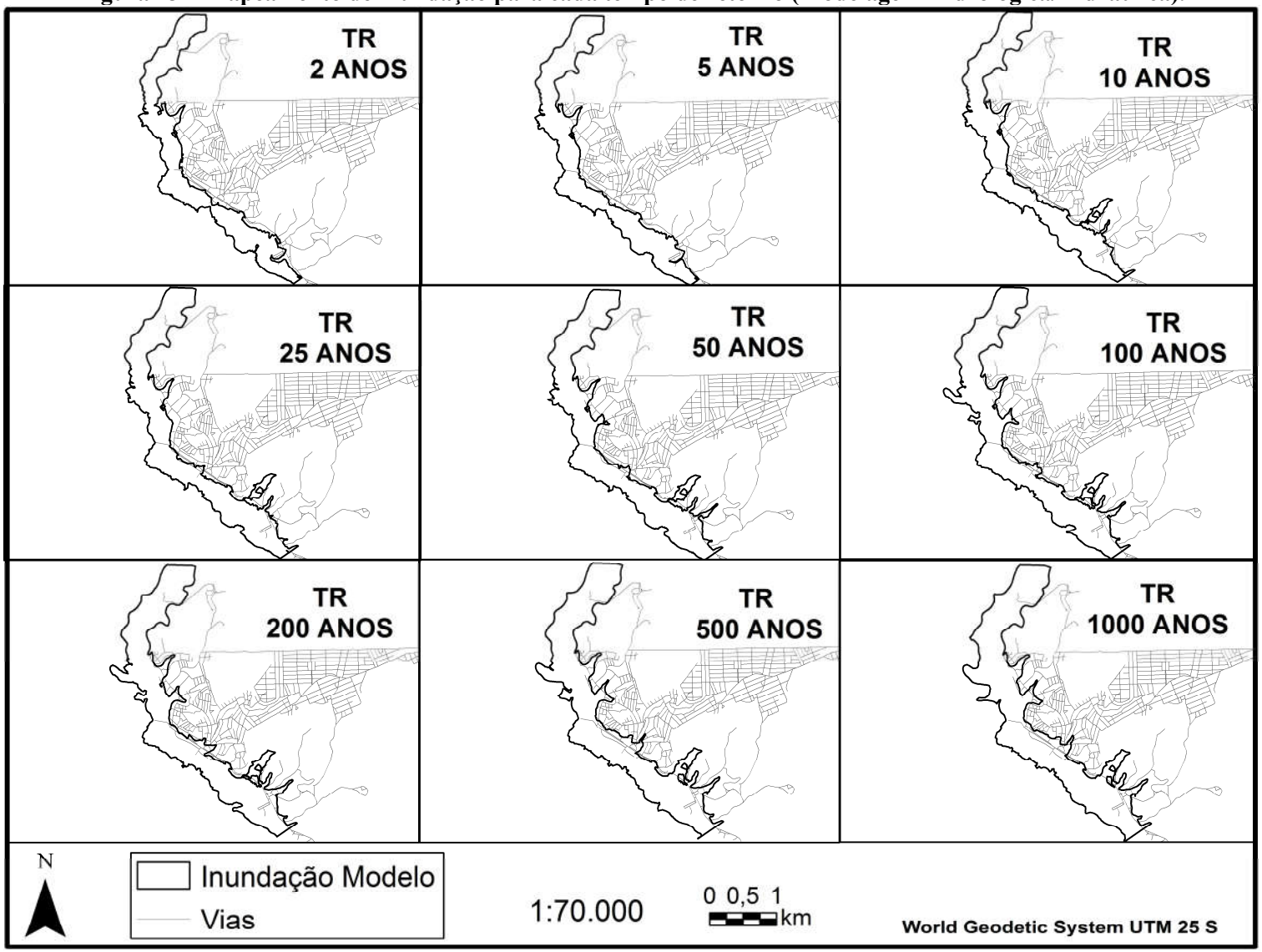
Tabela 8 - Área urbana inundada de acordo com o tempo de retorno da vazão gerada pelos modelos hidráulicos (Nota: Área Urbana de Rio Largo: 17,62 km²).

TR	Área Urbana Inundada (km²)	% Área urbana inundada
2 anos	0,25	1,42
5 anos	0,29	1,65
10 anos	0,35	1,99
25 anos	0,39	2,21
50 anos	0,46	2,61
100 anos	0,51	2,89
200 anos	0,55	3,12
500 anos	0,63	3,58
1000 anos	0,65	3,69

Tabela 9 - Qualidade de ajuste entre a extensão da mancha de inundação de vazões estimadas por distribuição GEV e de vazões estimadas por modelo hidrológico MGB-IPH.

TR	Área Vazão Estimada (GEV) (km²)	Área Vazão Estimada (Modelo) (km²)	Estatística *Fit* (%)
2 anos	1,58	1,55	97,57
5 anos	1,75	1,69	95,88
10 anos	1,88	1,81	95,20
25 anos	2,02	1,91	93,35
50 anos	2,11	2,01	94,86
100 anos	2,19	2,14	96,76
200 anos	2,23	2,24	99,46
500 anos	2,28	2,41	94,61
1000 anos	2,33	2,51	92,19

Figura 13 – Mapeamento de inundação para cada tempo de retorno (Modelagem Hidrológica/Hidráulica).



5 DISCUSSÃO

A distribuição de probabilidade utilizada de Valores Extremos Generalizados (GEV) para os dados de chuva e vazão provou-se robusta e aplicável à região, visto que esta distribuição apresentou uma boa aderência à distribuição empírica. Isto corrobora com outros estudos hidrometeorológicos e hidrológicos que utilizaram esta distribuição de máximos (e.g. KATZ; PARLANGE; NAVEAU, 2002; NORBIATO et al. 2007; NAUMANN; LLANO; VARGAS, 2012; TRAMBLAY et al. 2012). A aplicação do teste de Mann-Whitney não identificou mudanças de tendência no comportamento das chuvas. No entanto, é difícil identificar mudanças de tendência com séries históricas não tão longas, como as utilizadas neste estudo (NAGHETTINI e PINTO, 2007). As estimativas de vazão por distribuição probabilística também apresentam limitações devido ao tamanho da série histórica. A partir de 500 anos de tempo de retorno as estimativas de vazão por GEV diferiram muito das estimativas de vazão pelo modelo hidrológico, o qual utilizou como entrada chuvas máximas de projeto. Estudos indicam que não há grande confiabilidade das estimativas geradas por distribuição de frequência na região de extrapolação da curva de distribuição de probabilidade (KATZ; PARLANGE; NAVEAU, 2002; ROGGER et al. 2012). Por outro lado, as vazões estimadas pelo modelo podem estar superestimadas, sobretudo, para grandes tempos de retorno, uma vez que foi admitido que para a condição de projeto a chuva intensa está ocorrendo em toda área de drenagem (GRIMALDI et al. 2013) e a relação entre TR de chuva e vazão não foi aprofundada (VIGLIONE; MERZ; BLÖSCHL, 2009; VIGLIONE e BLÖSCHL, 2009). Apesar disso, não foi observada uma grande diferença em relação às manchas de inundação geradas por diferentes vazões, provavelmente devido ao efeito da topografia da região (vale encaixado), não promovendo profundas modificações da área inundada com o incremento da vazão de cheia.

O modelo hidrológico apresentou limitações de representação das vazões de postos localizados mais a montante na bacia, provavelmente devido à pequena área de montante destes postos (menor do que 1.500 km²), o que limita a capacidade de representação de vazões médias diárias (COLLISCHONN et al. 2007; COLLISCHONN, B; COLLISCHONN, W.; TUCCI, 2008; PAZ et al. 2011; PAIVA; COLLISCHONN; BUARQUE, 2012; RAJE et al. 2013), uma solução pode ser aplicação do modelo para vazões horárias. No entanto, a calibração e validação do modelo hidrológico utilizando funções objetivo, mostraram-se satisfatórias para os propósitos

deste estudo, que visou obter uma melhor representação das vazões máximas no posto fluviométrico a montante do município de Rio Largo (área de drenagem > 3.000 km²). Neste posto fluviométrico, o modelo superestimou um pouco as vazões no período de estiagem. Porém, tal deficiência não compromete a utilização do modelo para estimativas das vazões máximas neste posto (ROGGER et al. 2012). Desta forma, o modelo deve ser utilizado com cautela para o uso em seções mais a montante de Rio Largo e para descrever o comportamento de vazões mínimas, necessitando de uma nova calibração (PAIVA; COLLISCHONN; BUARQUE, 2012).

Se compararmos ao ajuste encontrado em outros estudos Bates e De Roo (2000), Bates et al. (2006) Sahardi; Soltani; Modarres (2012), em que apresentaram como meio de encontrar a similaridade com a mancha de inundação simulada, dados de imagens de Radar de Abertura Sintética (SAR), Radar de Abertura Sintética Aerotransportado (ASAR) ou de área inundada do evento real, demonstrando que a calibração do modelo neste estudo apesar de suas limitações foi satisfatória. A calibração resultou em valores de coeficientes de Manning dentro dos padrões apresentados por Chow (1959) e recomendados por USACE (2010), e que foram baseadas em valores aproximados do fundo do canal e das margens, porém alguns valores necessitaram de ajustes para melhor representação da mancha de inundação. É importante ressaltar que a seção transversal da seção Fazenda Boa Fortuna sofreu no mínimo duas grandes modificações na sua geometria em 10 anos, principalmente durante as cheias de 2000 e 2010. Alterações das características hidráulicas de uma seção transversal devido à passagem de uma cheia modificam também as características do escoamento do trecho simulado (DI BALDASSARRE e MONTANARI, 2009). Desta forma, é recomendada uma atualização dos dados de entrada do modelo hidráulico sempre que houver a passagem de uma grande cheia ou modificações artificiais (e.g. implantação de reservatório, canalização, etc.). A topografia da área urbana da cidade de Rio Largo foi baseada nas cartas topográficas cedidas pela CASAL, repercutindo em dois problemas: (a) informações podem estar defasadas (o levantamento foi realizado em 1978), não representando mudanças topográficas ocorridas; e (b) algumas áreas não possuem cotas e escala, podendo promover incertezas em alguns locais. Foi observado que algumas áreas no início e no centro da cidade não sofreram inundação no modelo hidráulico para o evento de 2010, provavelmente devido ao efeito da pequena quantidade de seções topobatimétricas disponíveis.

Para uma representação mais detalhada da mancha de inundação, na escala de lotes, seria necessário um conjunto de informações precisas de MDE com resolução espacial menor que 1 m (e.g. topografia gerada por LiDAR), informações dos lotes e uma malha mais densa de seções topobatimétricas (CASAS et al. 2006); porém, o custo técnico e financeiro pode ser elevado (BORGA et al. 2010). Em geral, não se observa grandes diferenças entre as áreas inundadas para diferentes tempos de retorno devido às grandes declividades e por estar bem encaixado topograficamente no trecho estudado. Apesar das diversas limitações de dados e simplificações adotadas, tais como a pequena quantidade de seções topobatimétricas disponíveis, a dificuldade de integração de cartas topográficas da região com o MDE estimado por satélite, pouca informação da extensão da inundação e o efeito dos lotes na mancha de inundação (áreas não efetivas de escoamento), não houve comprometimento para o modelo hidráulico representar o evento de 2010.

CONCLUSÕES

Este trabalho utilizou o acoplamento de modelos hidrológico e hidráulico para realização do mapeamento das áreas de risco de inundação na cidade de Rio Largo/AL. Esta metodologia apresentou-se adequada para um local que dispõe de pouca informação e limitada instrumentação de monitoramento hidrológico. Mesmo sabendo que existe um erro inerente às estimativas do mapeamento em função das incertezas dos dados de entrada, da estrutura e dos parâmetros dos modelos, os resultados mostraram-se promissores do ponto de vista de aplicação, podendo subsidiar gestores para o planejamento urbano na cidade de Rio Largo.

O acoplamento de modelos é uma metodologia que pode trazer benefícios na diminuição dos custos e de tempo para simular inundações, em que as limitações não mostraram ser preponderantes para inviabilizar o trabalho.

Os mapas de inundação gerados neste estudo podem servir como suporte à decisão para gestores, com a finalidade de mitigar danos e estabelecer limites de urbanização através do zoneamento urbano na cidade de Rio Largo. Os locais mais afetados no município englobam áreas agrícolas de cana-de-açúcar, áreas residenciais antigas e novas (expansão imobiliária) e a

principal área comercial da cidade, onde havendo um evento de inundação da mesma magnitude de 2010 acarretará perdas socioeconômicas significativas ao município (Anexo C).

Os resultados demonstraram que a cidade de Rio Largo possui uma situação preocupante quando se trata de risco de inundação, pois a ocupação urbana pode ser afetada dependendo do nível da água alcançado. Nestes casos, medidas para o controle da inundação, de origem estrutural ou não estrutural (preferencialmente), podem ser tomadas.

A consciência sobre o risco de inundação ainda precisa ser mais expandida na sociedade e nos órgãos gestores brasileiros. Esta cultura está mudando paulatinamente devido aos diversos desastres naturais ocorridos no país na última década, muitos dos quais motivados por uma má gestão do uso e ocupação do solo.

REFERÊNCIAS

AGRICULTURE AND RESOURCE MANAGEMENT COUNCIL OF AUSTRALIA AND NEW ZEALAND (ARMCANZ), 2000. **Floodplain management in Australia**: Best practice principles and guielines. Collingwood Victoria: CSIRO Publishing, 2000. 101 p.

BALLESTEROS, J.A.; et al. Calibration of floodplain roughness and estimation of flood discharge based on tree-ring evidence and hydraulic modelling. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 403, n. 1-2, p.103-115, 2011.

BARROS, R.M.; MEDIONDO, E.M.; WEDLAND, E. Cálculo de áreas inundáveis devido a enchentes para o Plano Diretor de Drenagem Urbana, de São Carlos (PDDUSC) na Bacia escola do Córrego do Gregório. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v.12, p.5-17, abr-jun, 2007.

BATES, P.D.; DE ROO, A.P.J. A simple raster-based model for flood inundation simulation. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 236, n.1-2, p.54-77, 2000.

BATES, P.D.; et al. Reach scale floodplain inundation dynamics observed using airborne synthetic aperture radar imagery: Data analysis and modelling. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v.328, n.1-2, p.306-318, 2006.

BONNIFAIT, L.; et al. Distributed hydrologic and hydraulic modelling with radar rainfall input: reconstruction of the 8–9 September 2002 catastrophic flood event in the Gard region, France. **Advances in Water Resources**, Amsterdam, v.32, n.7, p.1077–1089, 2009.

BORGA, P.D.; et al. Preface - Flash floods: Observations and analysis of hydro-meteorological controls. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v.394, n.1-2, p.1-3, 2010.

CAMARASA-BELMONTE, A.M.; SORIANO-GARCÍA, J. Flood risk assessment and mapping in peri-urban Mediterranean environments using hydrogeomorphology. Application to ephemeral streams in the Valencia region (eastern Spain). **Landscape and Urban Planning**, Amsterdam, v.104, n.2, p. 189-200, 2011.

CASAS, A.; et al. The topographic data source of digital terrain models as a key element in the accuracy of hydraulic flood modelling. **Earth Surface Processes and Landforms**, Hoboken, v.31, n.4, p. 444-456, 2006.

CASTILHO, A.S.; PINTO, E.J.A.; OLIVEIRA, G.S.R. Utilização de modelo hidráulico associado a um SIG para a definição de áreas inundáveis na cidade de Governador Valadares, Minas Gerais. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, XVI, 2005, João Pessoa. **Anais do XVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**. Porto Alegre: ABRH, 2005. 20 p.

CHORMANSKI, J.; et al. Flood mapping with remote sensing and hydrochemistry: A new method to distinguish the origin of flood water during floods. **Ecological Engineering**, Amsterdam, v.134, n.9, p. 1334–1349, 2011.

CHOW, V.T. **Open-Channel Hydraulics**. New York: McGraw-Hill Book, 1959. 680 p.

COLLISCHONN, B.; COLLISCHONN, W.; TUCCI, C.E.M. Daily hydrological modeling in the Amazon basin using TRMM rainfall estimates. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v.360, n.1-2, p.207-216, 2008.

COLLISCHONN, W.; et al. The MGB-IPH model for large-scale rainfall—runoff modelling. **Hydrological Sciences Journal**, United Kingdom, n.52, v.5, p.878-895, 2007.

CONSULTORIA TÉNICA LTDA. Plano Diretor de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Mundaú (PDRH-Bacia do Mundaú). Recife: COTEC, 1999. 168 p.

CRICHTON, D. The risk triangle. **Natural Disaster Management**, London, p. 102–103, 1999.

CRICHTON, D. UK and global insurance responses to flood hazard. **Water International**, United Kingdom, v.27, n.1, p. 119-131, 2002.

DI BALDASSARRE, G.; MONTANARI, A. Uncertainty in river discharge observations: a quantitative analysis. **Hydrolology and Earth System Sciences**, Göttingen, v.13, n.6, p.913–921, 2009.

DMITRIEVA, T.G.; PESKOV, B.E. Numerical forecast with the meso synoptic specification of extremely severe squalls in the European part of Russia (Case study for June 13 and July 29, 2010). **Russian Meteorology and Hydrology**, New York, v.38, n.2, p.71-79, 2013.

FAN, F.M.; et al. **Manual do PrePro-MGB para aplicação do modelo MGB-IPH**: Projeto Integrado de Cooperação Amazônica e de Modernização do Monitoramento Hidrológico. FINEP/ANA/IPH-UFRGS: Porto Alegre, 2010.17 p.

FRAGOSO JÚNIOR, C.R.; PEDROSA, V.A.; SOUZA, V.C. Reflexões sobre a cheia de junho de 2010 nas bacias do rio Mundaú e Paraíba. In: SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE, X, 2010, Fortaleza. **Anais do X Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste**. Porto Alegre: ABRH, 2010. 20 p.

GRAHAM, W.J. A procedure for estimating loss of life caused by Dam Failure. **Dam Safety Office – US Department of Interior/US Bureau of Reclamation**, n.99-06, Denver, 46 p, 1999.

GOVERNO DO ESTADO DE ALAGOAS. **Programa de reabilitação e reconstrução do estado de Alagoas:** Diagnóstico da região das bacias dos Rios Mundaú e Paraíba. OEA/PNUD e Governo do estado de Alagoas: Maceió, 1990.

GRIMALDI, S.; et al. Flood mapping in ungauged basins using fully continuous hydrologic–hydraulic modeling. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v.487, p.39-47, 2013.

HAGELSTEEN, M.; BECKER, P. Challenging disparities in capacity development for disaster risk reduction. **International Journal of Disaster Risk Reduction**, Amsterdam, v.3, p.4-13, 2013.

HARDY, R.J.; BATES, P.D.; ANDERSON, M.G. The importance of spatial resolution in hydraulic models for floodplain environments. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v.216, n. 1-2, p.124-136, 1999.

HORRITT, M.S.; BATES, P.D. Predicting floodplain inundation; rastered-based modelling versus the finite-element approach. **Hydrological Processes**, Hoboken, v.15, n.5, p.825–842, 2001.

HORRITT, M.S.; BATES, P.D.; MATTINSON, M.J. Effects of mesh resolution and topographic representation in 2D finite volume models of shallow water fluvial flow. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v.329, n.1-2, p.306-314, 2006.

HOSKING, J.R.M.; WALLIS, J.R.; WOOD, E.F. Estimation of the generalized extreme value distribution by the method of probability weighted moments. **Technometrics**, United Kingdom, v.27, n.3, p. 251–261, 1985.

ISLAM, M.S.; SWAPAN, M.S.H.; HAQUE, S.M. Disaster risk index: How far should it take account of local attributes?. **International Journal of Disaster Risk Reduction**, Amsterdam, v.3, p.76-87, 2013.

IZHAM, M.Y.; et al. Georeference, rainfall-runoff modeling and 3D dynamic simulation: Physical influence, integration and approaches. In: INTERNATIONAL CONFERENCE AND EXHIBITION ON COMPUTING FOR GEOSPATIAL RESEARCH AND APPLICATION, 1, 2010, Washington. Washington: Carlo Ratti (Organizador Principal), 2010, 8 p.

KATZ, R.W.; PARLANGE, M.B.; NAVEAU, P. Statistics of extremes in hydrology. **Advances in Water Resources**, Amsterdam, v.25, n.8-12, p.1287–1304, 2002.

KOUTSOYIANNIS, D.; BALOUTSOS, G. Analysis of a long record of annual maximum rainfall in Athens, Greece, and design rainfall inferences. **Natural Hazards**, New York, v.22, n.1, p.29–48, 2000.

KOUWEN, N.; et al.. Grouping Response Units for Distributed Hydrologic Modelling. **Journal of Water Resources Management and Planning**, Reston, v.119, n.3, p.289-305, 1993.

MACHADO, M.L.; et al. Curvas de danos de inundação versus profundidade de submersão: desenvolvimento de metodologia. **Revista de Gestão de Água da América Latina**, Porto Alegre: v.2, n.3, p.289–305, Jan-Jun, 2005.

MANFREDA, S.; DI LEO, M.; SOLE, A. Detection of flood-prone areas using Digital Elevation Models. **Journal of Hydrologic Engineering**, Reston, v.16, n.10, p.781-790, 2011.

MARCHI, L.; et al. Characterisation of selected extreme flash floods in Europe and implications for flood risk management. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v.394, n.1-2, p.118-133, 2010.

NAGHETTINI, M.; PINTO, E.J.A. **Hidrologia Estatística**. Belo Horizonte: CPRM, 2007. 552 p.

NAUMANN, G.; LLANO, M.P.; VARGAS, W.M. Climatology of the annual maximum daily precipitation in the La Plata Basin. **International Journal of Climatology**, Hoboken, v.32, n.2, p.247-360, 2010.

NICHOLAS, A.P.; WALLING D.E. Modelling flood hydraulics and overbank deposition on river floodplains. **Earth Surface Processes and Landforms**, Hoboken, v.22, n.1, p.59–77, 1997.

NORBIATO, D.; et al.. Regional frequency analysis of extreme precipitation in the eastern Italian Alps and the August 29, 2003 flash flood. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v.345, n.3-4, p.149-166, 2007.

OLIVEIRA, G.G.; SALDANHA, D.L.; GUASELLI, L.A. Espacialização e análise das inundações na Bacia Hidrográfica do Rio Caí/RS. **Revista de Geociências**, São Paulo, v.29, n.3, p.413-427, 2010.

PAIVA, R.C.D. **Modelagem hidrológica e hidrodinâmica de grandes bacias**. Estudo de caso: Bacia do Rio Solimões. 2009. 168 p. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

PAIVA, R.C.D.; COLLISCHONN, W.; BUARQUE, D.C. Validation of a full hydrodynamic model for large-scale hydrologic modelling in the Amazon. **Hydrological Processes**, Hoboken, v.27, n.3, p.333–346, 2012.

PAZ, A.R. **Simulação hidrológica de rios com grandes planícies de inundação**. 2010. 235 p. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

PAZ, A.R.; et al. Large-scale modelling of channel flow and floodplain inundation dynamics and its application to the Pantanal (Brazil). **Hydrological Processes**, Hoboken, v.25, n.9, p.1498-1516, 2011.

QI, H.; ALTINAKAR, M.S. A GIS-based decision support system for integrated flood management under uncertainty with two dimensional numerical simulations. **Environmental Modelling & Software**, Amsterdam, v.26, n.6, p.817-821, 2011.

PEDUZZI, P.; et al. Assessing global exposure and vulnerability towards Natural Hazards: The Disaster Risk Index. **Natural Hazards and Earth System Science**, Göttingen, v.9, n.4, p.1149-1159, 2009.

RABER, G.T.; et al. Impact of lidar nominal post-spacing on DEM accuracy and flood zone delineation. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, Bethesda, v.73, n.7, p.793-804, 2007.

RAJE, D.; et al. Macroscale hydrological modelling approach for study of large scale hydrologic impacts under climate change in Indian river basins. **Hydrological Processes**, Hoboken, 2013.

REIS, L.G.M.; SILVA JÚNIOR, O.B.; PEDROSA, V.A. Análise da cheia de agosto de 2000 no Rio Mundaú em Alagoas. In: SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE, V., 2000, Natal. **Anais do Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste**. Porto Alegre: ABRH, 2000. p.729-740.

ROGGER, M.; et al. Runoff models and flood frequency statistics for design flood estimation in Austria – Do they tell a consistent story?. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v.456-457, n.16, p.30-43, 2012.

SAF, B. Assessment of the effects of discordant sites on regional flood frequency analysis. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v.380, n.3-4, p.362-375, 2010.

SARHADI, A.; SOLTANI, S.; MODARRES, R. Probabilistic flood inundation mapping of ungauged rivers: Linking GIS techniques and frequency analysis. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v.458-459, p.68-86, 2012.

SANDERS, B.F. Evaluation of on-line DEMs for flood inundation modeling. **Advances in Water Resources**, Amsterdam, v.30, n.8, p.1831–1843, 2007.

SARTORI, A.; LOMBARDI NETO, F.; GENOVEZ, A.M. Classificação Hidrológica de Solos Brasileiros para a Estimativa da Chuva Excedente com o Método do Serviço de Conservação do Solo dos Estados Unidos Parte 1: Classificação. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v.10, n.4, 5-18, Out-Dez, 2005a.

SARTORI, A.; GENOVEZ, A.M.; LOMBARDI NETO, F. Classificação Hidrológica de Solos Brasileiros para a Estimativa da Chuva Excedente com o Método do Serviço de Conservação do Solo dos Estados Unidos Parte 2: Aplicação. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v.10, n.4, p. 19-29, Out-Dez, 2005b.

SRINIVAS, C.V.; et al. Simulation of the Indian summer monsoon regional climate using advanced research WRF model. **International Journal of Climatology**, Hoboken, v.33, n.5, p.1195-1210, 2013.

SURYA, S.; MUGDAL, B.V. Impact of urbanization on flooding: The Thirusoolam sub watershed – A case study. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v.413, p.210-219, 2011.

TRAMBLAY,Y.; et al. Climate change impacts on extreme precipitation in Morocco. **Global and Planetary Change**, Amsterdam, v.83, p.104-114, 2012.

TRAPERO, L.; BECH, J.; LORENTE, J. Numerical modelling of heavy precipitation events over Eastern Pyrenees: Analysis of orographic effects. **Atmospheric Research**, Amsterdam, v.123, p.368-383, 2013.

TRIOLA, M. **Introdução a estatística**. Rio de Janeiro: LTC, 2008. 10. ed., 722 p.

TUCCI, C.E.M. Gerenciamento integrado das Inundações Urbanas no Brasil. **Revista de Gestão de Água da América Latina**, Porto Alegre: v.1, n.1, p.59–73, Jan-Jun, 2004.

TUCCI, C. E. M. (Org.). **Hidrologia Ciência e Aplicação**. Porto Alegre: editora da UFRGS ABRH, 2012. 4. ed. 912 p.

TUCCI, C.E.M. **Inundações Urbanas**. Rio Grande do Sul: ABRH/RHAMA, 2007. 389 p.

TUCCI, C.E.M. **Modelos Hidrológicos**. Porto Alegre: editora da UFRGS, 1998. 669 p.

UNITED NATIONS DEVELOPMENT PROGRAMME (UNDP). **Reducing disaster risk a challenge for development**. New York: UNDP/UN, 2004. 146 p.

UOL NOTÍCIAS COTIDIANO. Destruída em 1969, São José da Laje (AL) ignora proibição de construir à beira do rio e revive tragédia. 2010. Disponível em: <http://noticias.uol.com.br/cotidiano/ultimas-noticias/2010/06/28/destruida-em-1969-sao-jose-da-laje-al-ignora-proibicao-de-construir-a-beira-do-rio-e-revive-tragedia.htm>. Acesso em: 03 fev. 2013.

US ARMY CORPS OF ENGINEERS (USACE). **HEC-RAS**: River analysis system: applications guide. Davis: USACE, 2010. 351 p.

VIGLIONE, A.; MERZ, R.; BLÖSCHL, G. On the role of the runoff coefficient in the mapping of rainfall to flood return periods. **Hydrology and Earth System Sciences Discussions**, Göttingen, v.13, n.5, p.577 – 593, 2009.

VIGLIONE, A.; BLÖSCHL, G. On the role of storm duration in the mapping of rainfall to flood return periods. **Hydrology and Earth System Sciences Discussions**, Göttingen, v.1, n.2, p.205 – 216, 2009.

ZAMAN, M.A.; RAHMAN, A.; HADDAD, K. Regional flood frequency analysis in arid regions: A case study for Australia. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v.475, p.74–83, 2012.

ZHANG, D.-W.; CHENG, X.-T.; HUANG, J,-C. 2-D numerical modeling of levee-breach floods in dense urban areas. **Journal of Hydraulic Engineering**, Reston, v.41, n.3, p.272–277, 2010.

ANEXO

ANEXO A – Parametrização Fixa e Calibrável do Modelo Hidrológico MGB

ANEXO A1 - Parâmetros fixos de albedo do modelo hidrológico usados para a bacia hidrográfica do Mundaú.

URH	Jan	Fev	Mar	Abr	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Bloco 1	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22
Bloco 2	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22
Bloco 3	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13
Bloco 4	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22
Bloco 5	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22
Bloco 6	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13

ANEXO A2 - Parâmetros fixos de índice de área foliar (IAF) do modelo hidrológico usados para a bacia hidrográfica do Mundaú.

URH	Jan	Fev	Mar	Abr	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Bloco 1	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
Bloco 2	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
Bloco 3	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00
Bloco 4	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
Bloco 5	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
Bloco 6	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00

ANEXO A3 - Parâmetros fixos de altura média das árvores do modelo hidrológico usados para a bacia hidrográfica do Mundaú.

URH	Jan	Fev	Mar	Abr	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Bloco 1	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
Bloco 2	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
Bloco 3	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00
Bloco 4	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
Bloco 5	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
Bloco 6	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00

ANEXO A4 - Parâmetros fixos de resistência superficial do modelo hidrológico usados para a bacia hidrográfica do Mundaú.

URH	Jan	Fev	Mar	Abr	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Bloco 1	70,00	70,00	70,00	70,00	70,00	70,00	70,00	70,00	70,00	70,00	70,00
Bloco 2	70,00	70,00	70,00	70,00	70,00	70,00	70,00	70,00	70,00	70,00	70,00
Bloco 3	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
Bloco 4	70,00	70,00	70,00	70,00	70,00	70,00	70,00	70,00	70,00	70,00	70,00
Bloco 5	70,00	70,00	70,00	70,00	70,00	70,00	70,00	70,00	70,00	70,00	70,00
Bloco 6	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00

ANEXO A5 - Parâmetros calibráveis do modelo hidrológico usados para a bacia hidrográfica do Mundaú.

URH	Wm	b	Kbas	Wint	XL	CAP	Wc
Bloco 1	32,00	0,50	4,50	13,00	0,00	0,00	0,90
Bloco 2	23,00	0,37	4,00	13,00	0,10	0,00	0,50
Bloco 3	153,00	0,38	5,00	14,00	0,10	0,00	0,03
Bloco 4	1477,00	0,26	3,00	44,00	0,70	0,00	0,60
Bloco 5	1477,00	0,28	3,00	44,00	0,70	0,00	0,60
Bloco 6	175,00	0,34	2,50	55,00	0,10	0,00	1,20

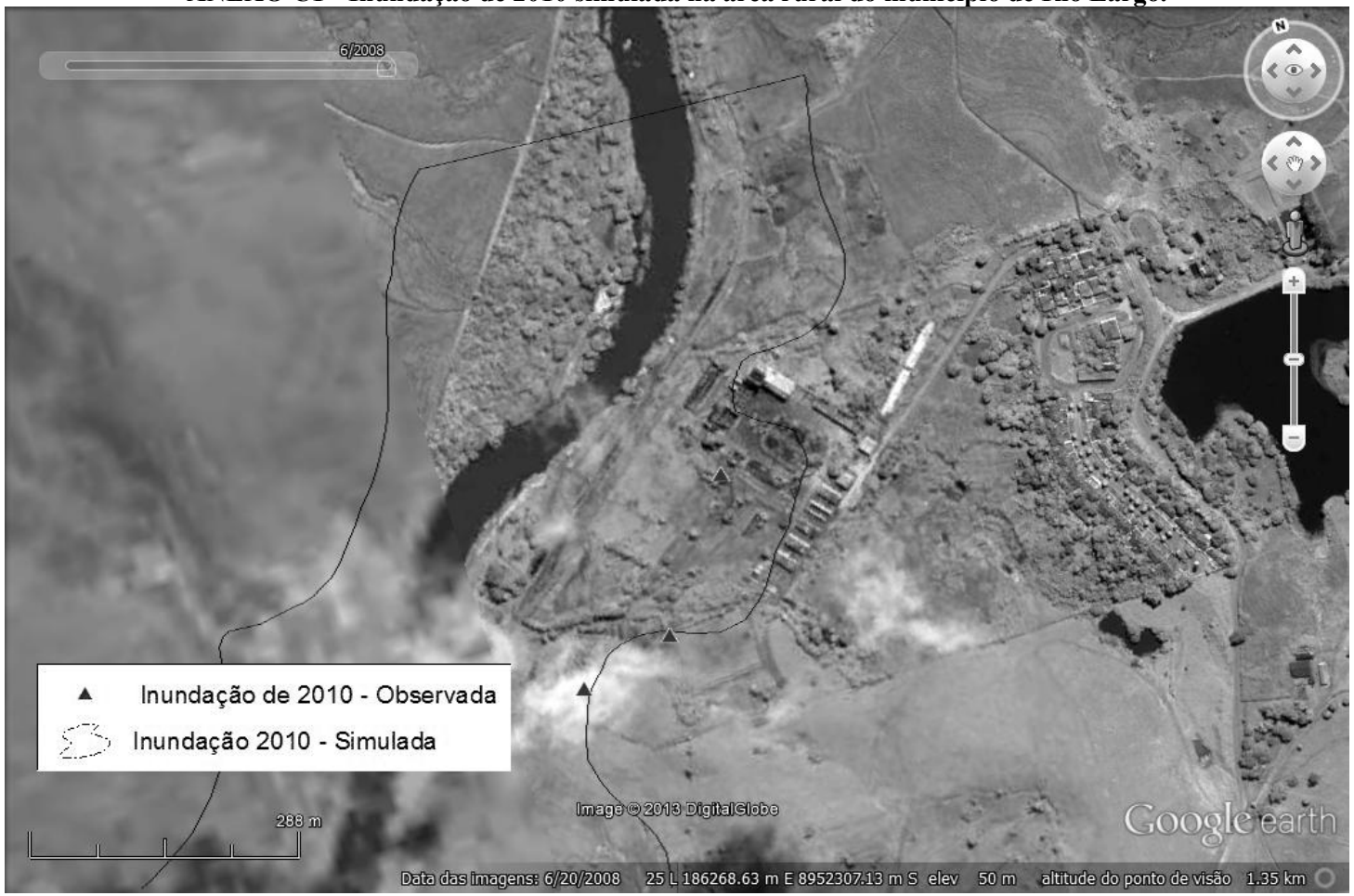
ANEXO B – Identificação dos pontos críticos da inundação de 2010

ANEXO B1 - Parâmetros fixos de albedo do modelo hidrológico usados para a bacia hidrográfica do Mundaú.

ANEXO B2 - Parâmetros fixos de albedo do modelo hidrológico usados para a bacia hidrográfica do Mundaú.

ANEXO C – Área estimada da inundação de 2010

ANEXO C1 - Inundação de 2010 simulada na área rural do município de Rio Largo.



ANEXO C2 - Inundação de 2010 simulada na área urbana do município de Rio Largo.

ANEXO C3 - Inundação de 2010 simulada no município de Rio Largo.