

Modelagem hidrológica e hidráulica aplicada ao mapeamento de áreas inundáveis

Hydrological and hydraulic modelling applied to the mapping of flood-prone areas

Benício Emanuel Omena Monte¹, Denis Duda Costa², Mahelvson Bazilio Chaves³, Louis de Oliveira Magalhães⁴ and Cintia B. Uvo⁵

^{1,3,4} Federal University of Alagoas, Center for Technology, Maceió, AL, Brazil

crubertofj@hotmail.com; benicio_monte1@hotmail.com; mbchaves@yahoo.com.br; louismagalhaes@hotmail.com

^{2,5} Lund University, Department of Water Resources Engineering, Lund, Sweden

denis.duda_costa@tvrl.lth.se; cintia.uvo@tvrl.lth.se

Recebido: 30/06/15 - Revisado: 31/08/15 - Aceito: 13/11/15

RESUMO

Inundações ribeirinhas ocasionadas por cheias históricas, como, por exemplo, no ano de 2010 na bacia hidrográfica do rio Mundaú (entre os estados de Alagoas e Pernambuco), promovem danos de grandes proporções. O objetivo deste trabalho foi propor um mapeamento de áreas inundáveis no município de Rio Largo (Alagoas), bacia hidrográfica do Mundaú, através de acoplamento “off-line” de modelos hidrológico/hidráulico (MGB-IPH/HEC-RAS), considerando eventos de cheias extremas com diferentes tempos de retorno de vazão. Foi utilizada uma parametrização voltada para eventos extremos de cheia no modelo hidrológico, utilizando como entrada dados de chuva para diferentes tempos de retorno. A calibração e validação do modelo hidrológico foi adequada em áreas de drenagem superiores a 1.500 km², o que não foi verificado em áreas de drenagem próximas a nascentes, as quais possuem geologia e tipo e cobertura do solo que propiciam escoamentos superficiais. O modelo hidráulico indicou boa correspondência com os dados pontuais das marcas de cheia do ano de 2010 em áreas rurais e urbanas perto do curso d’água ($R^2 = 0,99$; RMSE = 1,41 m e CV (RMSE) = 0,04). Entretanto, em áreas urbanas distantes do rio, houve uma superestimação, assinalando a necessidade do uso de Modelos Digitais de Superfície mais detalhados. Eventos de cheia com tempo de retorno acima de 50 anos possuem grande potencial de danos (inundação acima de 0,46 km² na área urbana). Este estudo indicou o uso de modelos acoplados foi viável para representar o mapeamento de áreas inundáveis, quando não é possível realizar uma análise de frequência local de vazões para subsidiar o modelo hidráulico.

Palavras Chave: Inundações. Modelos. Acoplamento.

ABSTRACT

Overbank flooding caused by historically high flows, such as that in the Rio Mundaú watershed (lying between the states of Alagoas and Pernambuco) in 2010, has been the cause of widespread damage. The purpose of work described in this paper was to propose a mapping of areas liable to flooding in the township of Rio Largo (Alagoas) in the Rio Mundaú watershed by means of an “off-line” coupling of the hydrological/hydraulic models (MGB-IPH/HEC-RAS), through consideration of extreme floods with different return periods for discharge. The hydrological model had a parameterization appropriate for extreme floods, using as input rainfall data with different return periods. Calibration and validation of the hydrological model were adequate in drainage areas larger than 1500 km², but were less acceptable in headwater drainage areas where different geology and soil cover gave rise to surface runoff. The hydraulic model showed good agreement with point observations of flood levels in 2010 in both rural and urban areas along the water-course ($R^2 = 0.99$; RMSE = 1.41 m and CV (RMSE) = 0.04). In urban areas distant from the river, however, flood levels were over-estimated, indicating a need to use more detailed Digital Elevation Models. Flood events with return period greater than 50 years have the potential to cause great damage (floods exceeding 0.46 km² in the urban area). The study showed that the use of coupled models was a viable approach for mapping areas liable to flooding, when it is not possible to analyse local flow frequencies in support of a hydraulic model.

Keywords: Floods. Models. Coupling.

INTRODUÇÃO

Inundações decorrentes de enchentes têm acarretado relevantes impactos socioeconômicos ao redor do mundo. Foram mais de 1 bilhão de pessoas afetadas com quase 80 mil mortes associadas a este fenômeno em todo o mundo durante o período de 2001 a 2014 (EM-DAT/OFDA/CRED, 2015). Os principais fatores hidrológico-hidráulicos naturais que propiciam enchentes são o relevo, tipo e intensidade da precipitação, cobertura vegetal, capacidade de drenagem, geologia, morfologia fluvial e extensão do canal e da planície de inundação, interação canal-planície de inundação e rugosidade.

Para minimizar os impactos socioeconômicos decorrentes de inundações, soluções de prevenção são realizadas através de medidas estruturais e não estruturais. Na maioria das ocasiões, as medidas não-estruturais 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 áreas inundáveis, sendo uma alternativa viável financeiramente e útil nos estudos de risco. Para a realização do mapeamento de inundações comumente são utilizados modelos matemáticos hidráulicos 1D e 2D (conceituais ou empíricos) para representar fenômenos envolvidos de ordem hidráulica, os quais determinam a cotas (1D e 2D) e as áreas inundadas (2D). Estes modelos hidráulicos podem ser também acoplados à modelos hidrológicos (COLLISCHONN; COLLISCHONN; TUCCI, 2008; COLLISCHONN et al., 2007; PAIVA; COLLISCHONN; BUARQUE, 2013; PAZ et al., 2011) e atmosféricos (DMITRIEVA; PESKOV, 2013; SRINIVAS et al., 2013; TRAPERIO; BECH; LORENTE, 2013), visando uma representação conceitual e completa de todos os processos envolvidos.

O acoplamento de modelos hidrológicos e hidráulicos tem sido uma importante abordagem em estudos sobre enchente (BALLESTEROS et al., 2011; BONNIFAIT et al., 2009; GRIMALDI et al., 2013; PAZ et al., 2011; SARHADI; SOLTANI; MODARRES, 2012; SURIYA; MUDGAL, 2012), pois possibilita simular cenários futuros com limitação nos dados de entrada. No entanto, tal acoplamento com o auxílio de dados e ferramentas agregadas, como o sensoriamento remoto (BATES et al., 2006; CHORMANSKI et al., 2011; RABER et al., 2007) e Sistemas de Informação Geográfica (SIG) (CASAS et al., 2006), dão contribuições importantes na otimização e visualização dos resultados.

A modelagem hidráulica requer informações para uma adequada representatividade das áreas inundadas, tais como (a) dados ou estimativas de vazões a montante do trecho (SARHADI; SOLTANI; MODARRES, 2012) e (b) boa qualidade de dados topobatimétricos da região de estudo (HORRITT; BATES, 2001; NICHOLAS; WALLING, 1997). Deficiências nos dados topobatimétricos podem promover problemas na representação das áreas inundadas pelo modelo hidráulico (HARDY; BATES; ANDERSON, 1999; HORRITT; BATES; MATTINSON, 2006; SANDERS, 2007), devido à representação inadequada do fundo do canal do rio e da morfologia da região no entorno do curso d'água.

Os municípios que compõem a bacia hidrográfica do Mundaú possuem em sua maioria áreas urbanas nas planícies inundáveis e já sofreram repetidamente inundações; algumas

provocando elevados prejuízos (1914, 1941, 1969, 1988, 1989, 2000, 2010), revelando sua fragilidade em eventos de inundação (FRAGOSO JÚNIOR; PEDROSA; SOUZA, 2010). Após os danos decorrentes das cheias em 1988 e 1989 na bacia hidrográfica do rio Mundaú, estudos recomendaram algumas medidas mitigadoras, tais como aumento da capacidade de drenagem de águas, contenção de cheias por reservatórios, reflorestamento da bacia, obras nas calhas dos rios e implantação de um sistema de alerta e prevenção contra cheias (ALAGOAS; PNUD; OAS, 1990). Apesar das diversas recomendações citadas, nenhuma ação estrutural ou não estrutural foi efetivamente realizada. Além disso, os municípios ribeirinhos da bacia do rio Mundaú ainda não dispõem de estudos que quantificam a abrangência das inundações provocadas por cheias extremas, os quais podem fornecer informações relevantes para a sociedade e subsidiar os gestores públicos no planejamento de políticas públicas e na tomada de decisão.

Desta forma, este estudo teve como objetivo propor um mapeamento de áreas inundáveis para o município de Rio Largo (AL) através de um acoplamento de modelos hidrológico e hidráulico em ambiente SIG, considerando eventos hidrológicos com diferentes tempos de retorno.

METODOLOGIA

Área de Estudo

A bacia hidrográfica do rio Mundaú possui uma área de 4.126,38 km², estando localizada entres os estados de Pernambuco e Alagoas. A área de estudo para o modelo hidrológico envolve toda a bacia hidrográfica (Figura 1) e para o modelo hidráulico apenas um trecho do rio principal, com uma extensão de 4,64 km, referente a área urbana do município de Rio Largo (AL) (Figura 1).

O clima que predomina na bacia, segundo a classificação de Köppen, é do tipo Bsh, onde a precipitação e temperatura anual média é de aproximadamente 800 mm e 18°C, respectivamente (COTEC, 1999).

De acordo com as medições na estação fluviométrica da Fazenda Boa Fortuna (Código 39770000 – ANA), estação mais próxima a foz, situada a montante de Rio Largo, a vazão média é de 25,78 m³/s, com picos acima de 1.000 m³/s e mínimas abaixo de 10 m³/s (COTEC, 1999). A topografia se caracteriza por elevadas declividades, sugerindo que há escoamentos superficiais rápidos. No alto curso as altitudes são próximas de 1.000 m; e no baixo curso, as altitudes alcançam o mínimo de 8 m (COTEC, 1999).

A geologia da bacia é determinada no alto e no médio curso pelo Maciço Pernambuco-Alagoas, baseado em rochas cristalinas (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 da bacia hidrográfica compreendem: (a) Argissolo Vermelho-Amarelo e associações (51,80%), bem ou moderadamente drenado, moderadamente poroso, não hidromórfico; (b) Argissolo Vermelho-Amarelo Eutrófico e associações, semelhante ao anterior, porém mais profundos (17,21%); (c) Neossolo Litólico Eutrófico, Distrófico e associações (10,96%), baixo potencial de

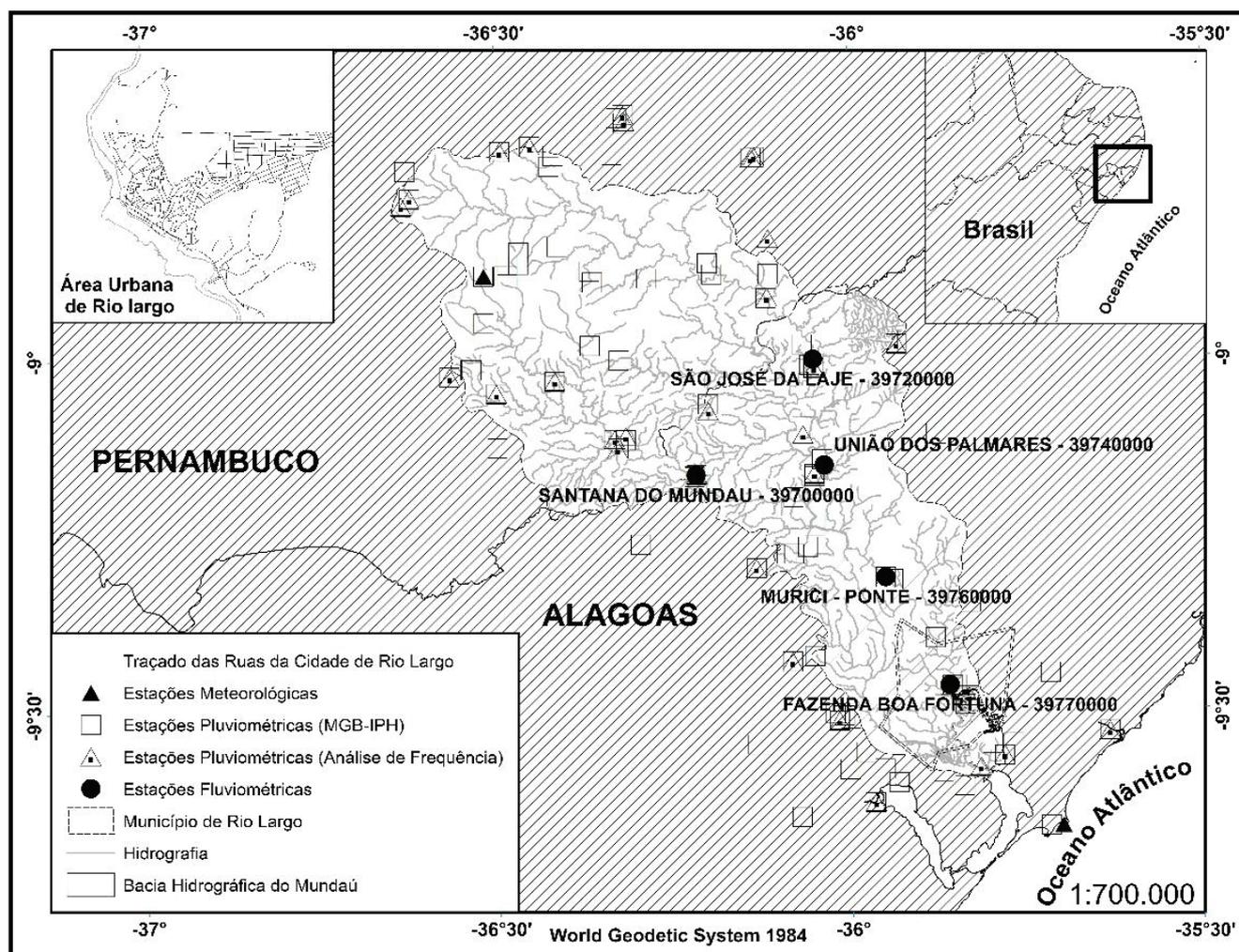


Figura 1—Localização da bacia hidrográfica do rio Mundaú. As estações meteorológicas, fluviométricas e pluviométricas também apresentadas

deflúvio superficial, porosos; (d) Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico e associações (17,25%), os quais são mais porosos; (e) Planossolo Háptico Eutrófico Solódico e associações (1,53%); (f) Neossolo Litólico Eutrófico e associações (0,14%), solos rasos; (g) Gleissolos Hápticos Eutróficos (0,34%), solos com excesso de umidade e (h) Associação Neossolo Flúvico Eutróficos e Distrófico (0,77%) (Adaptado de COTEC, 1999).

O uso e ocupação do solo está dividido em: área antropizada que é de 75,68 % (áreas 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 (COTEC, 1999).

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, causando um desnível acentuado de aproximadamente 13 m. Além disso, o município está assentado sob uma estreita planície de inundação. O perímetro urbano do município de Rio Largo corresponde à área de estudo para o mapeamento de áreas inundáveis, cujo trecho compreende 4,64 km do rio Mundaú, em uma área urbana de 18,55 km².

DADOS HIDROMETEREOLÓGICOS

Para análise de frequência foram utilizadas estações pluviométricas da Agência Nacional de Águas (ANA), do Instituto de Tecnologia de Pernambuco (ITEP) e da Secretaria de Estado do Meio Ambiente e dos Recursos Hídricos do Estado de Alagoas (SEMARH-AL) e o posto fluviométrico Fazenda Boa Fortuna, em Rio Largo, operado pela ANA. A seleção dos postos foi realizada através do gráfico de Gantt, visualizando a disponibilidade de dados. Foram selecionados os postos com menor grau de falhas (falhas nos meses de menor precipitação, máximo de 30 dias de falha), em um período de 30 anos comum a todos os postos (1962 – 1991), que resultou no uso de um total de 31 postos pluviométricos (Figura 1). Este tratamento de dados foi realizado considerando o período de janeiro a dezembro, tendo como critério a manutenção de pelo menos 15 anos de dados de chuva máxima anual, visando diminuir as incertezas estatísticas (SAF, 2010).

Para uso no modelo MGB-IPH, os dados hidrológicos obtidos foram de frequência diária e a partir da base de pluviômetros (97 postos) instalados na Bacia Hidrográfica do Mundaú, da ANA, ITEP e SEMARH-AL, estações fluviométricas da ANA (5 postos) e estações meteorológicas (2 postos) do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) (Figura 1).

Análise de Frequência de Chuvas e Vazões Máximas

Os eventos extremos de precipitação de cada ano do período selecionado passaram por uma análise de consistência para retirada de outliers, que pode ocorrer por erros de aquisição. Para essa análise foi utilizado o programa Expert System for At-Site Frequency Analysis of Hydrologic Variables® (SEAF), que se baseia na metodologia de Grubbs e Beck (1972). Apenas um valor da série histórica de dois postos pluviométricos (Caetés - 0836008 (ANA); Jurema - 0836021 (ANA)) foram descartados, pois apresentaram possíveis erros de leitura dos dados (acima de 50 % do valor da maior chuva da série sem outlier).

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 se baseia 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 as amostras foram formadas de eventos diferentes, precipitações ordinárias ou de fenômenos especiais.

Normalmente a escolha de uma distribuição de máximos é discutível, pois cada uma apresenta qualidades e fragilidades. Neste trabalho foi utilizada a distribuição Generalizada de Eventos Extremos (GEV), uma vez que essa distribuição é amplamente utilizada para eventos extremos de precipitação e vazão (HOSKING; WALLIS; WOO, 1985; KATZ; PARLANGE; NAVEAU, 2002; KOUTSOYIANNIS; BALOUTSOS, 2000; SAF, 2010; TRAMBLAY et al., 2012). A distribuição GEV possui três parâmetros, incluindo o de posição, que elimina problemas com suavização da função de distribuição em decorrência de uma série curta de dados. Este problema pode ocorrer, por exemplo, com a distribuição Gumbel (ROGGER et al., 2012). O método da Máxima Verossimilhança, que consiste em maximizar as funções dos parâmetros da distribuição, foi utilizado para estimar os valores dos parâmetros da distribuição GEV. Este método visa a estimativa de parâmetros com menor grau de variância, consistentes, suficientes e com maior eficiência assintótica. Além disto, foi realizado um teste de aderência de Kolmogorov-Smirnov. 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 tempos de recorrências iguais a 2, 5, 10, 25, 50, 100, 200, 500 e 1.000 anos.

Modelagem Hidrológica

Para transformação chuva-vazão foi utilizado o modelo hidrológico MGB-IPH desenvolvido por Collischonn et al (2007) e aprimorado por Paiva, Collischonn e Buarque (2013). Consiste em um modelo distribuído baseado em processos e simulação do ciclo hidrológico terrestre através de relações físicas e conceituais. O modelo se mostrou adequado em diversas aplicações em bacias hidrográficas brasileiras de médio (entre 2.000 km² e 10.000 km²) (GAMA, 2011; CHAVES, 2013) e de grande porte (> 10.000 km², COLLISCHONN et al., 2007; PAIVA; COLLISCHONN; BU-

ARQUE, 2013).

O modelo divide-se em 4 módulos: balanço de água no solo, evapotranspiração, escoamentos (superficial, sub superficial e subterrâneo) e propagação das vazões na rede de drenagem. O MGB-IPH é apropriado para as características brasileiras, pois permite com facilidade a utilização de dados de entradas (imagens de sensoriamento remoto, modelos digitais de elevação e dados hidrometeorológicos) no formato disponibilizado por órgãos e agências nacionais. Um intervalo de tempo diário foi utilizado nas simulações. As características fisiográficas da bacia (divisão das sub-bacias, trechos de rios, comprimento e declividade dos rios) foram obtidas através do aplicativo ArcHydro, uma extensão do software ArcGIS.

A bacia foi segmentada em 5 sub-bacias e 95 minibacias (i.e. elemento que drena para um único trecho de rio), utilizando o Modelo Digital de Elevação (MDE) Shuttle Radar Topographic Mission (SRTM) missão da National Aeronautics and Space Administration (NASA) disponibilizado com correções de vazios de dados pela Consultative Group on International Agricultural Research-Consortium for Spatial Information (CGIAR-CSI). Cada minibacia possui suas características de tipo, uso e cobertura dos solos, as quais compõem as URH (Unidades de Resposta Hidrológica) (KOUWEN et al., 1993). Seguindo o grupamento de Sartori, Genovez e Neto (2005a; 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. Para a definição das URH da bacia do rio Mundaú foram reclassificados e processados a partir do mapa digital de solos realizados pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA) (Publicado em 2001 na Escala 1:5.000.000) oriundos do projeto RadamBrasil. Foram utilizadas imagens do satélite Landsat 7 (sensor Thematic Mapper) para classificação do uso e cobertura do solo (Tabela 2 e Figura 2). Os valores dos parâmetros fixos e calibráveis foram baseados nas características URH, seguindo a recomendação do manual do MGB-IPH.

Foram adotados como parâmetros fixos o albedo, índice de área foliar, dossel das árvores e resistência superficial. Dentre os parâmetros calibráveis foram utilizados a capacidade de armazenamento no solo (Wm), parâmetro de forma da relação entre armazenamento e saturação (b), parâmetro que controla a vazão durante a estiagem (Kbas), controle da quantidade de água no solo que é escoada subsuperficialmente (Kint), controle da forma da curva de redução da drenagem intermediária ou sub-superficial do solo (XL), controle do fluxo de reservatório subterrâneo para camada superficial do solo ao longo do intervalo de tempo (CAP), armazenamento residual (Wc), coeficiente de propagação superficial nas células (CS), coeficiente de propagação sub-superficial nas células (CI), retardamento do reservatório subterrâneo (CB) (Tabela 3). Foi obtido um valor de 0,0100 m³ / (s.km²) para a vazão específica de base (QB).

O processo de calibração foi feito de forma manual. O período de calibração do modelo escolhido foi de janeiro de 1998 a dezembro de 2005 e o período de validação foi de janeiro de 2006 a janeiro de 2008. As funções objetivas utilizadas para avaliar os resultados da calibração foram o coeficiente de Nash-Sutcliffe (NS), Nash-Sutcliffe logaritmo (NSlog) e a variação de volume (AV).

Tabela 1 - Agrupamento dos solos na bacia do rio Mundaú 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

Tabela 2 - Características de tipo e uso do solo das URH (Blocos) e percentual da área na Bacia Hidrográfica

URH	Tipo e Uso do Solo	Área %
Bloco 1	Solo D + Solo exposto	5,99
Bloco 2	Solo D + Vegetação rasteira	12,79
Bloco 3	Solo D + Floresta	1,37
Bloco 4	Solo C + Solo exposto	57,68
Bloco 5	Solo C + Vegetação rasteira	6,28
Bloco 6	Solo C + Floresta	15,89

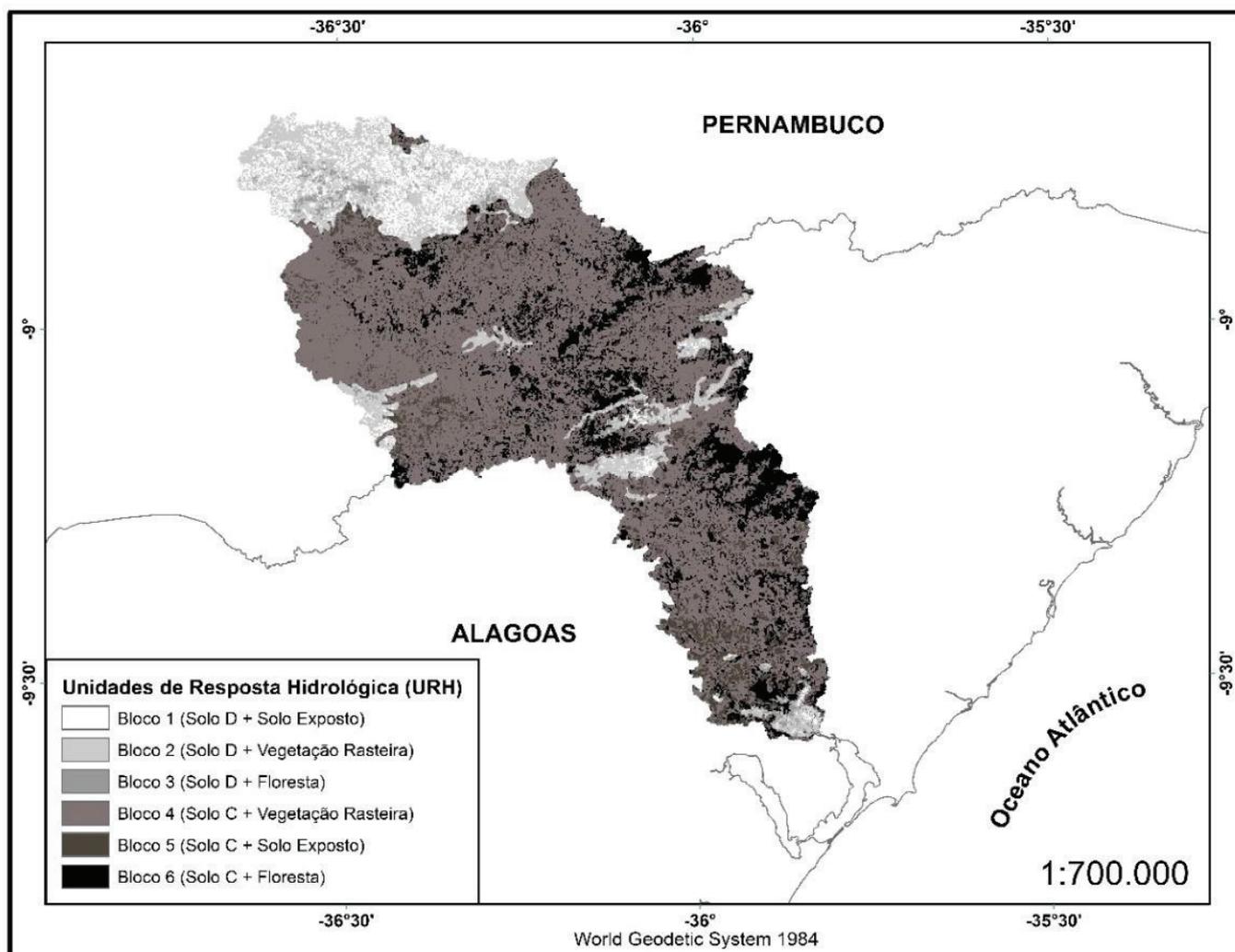


Figura 2 - URH da bacia hidrográfica do rio Mundaú

Tabela 3 – Valores finais dos parâmetros calibráveis do modelo MGB-IPH para a bacia hidrográfica do rio Mundaú

URH	Wm	b	Kbas	Kint	XL	CAP	Wc
Bloco 1	60,1	0,50	3,80	14,27	0,00	0,00	0,90
Bloco 2	50,4	0,37	3,89	10,97	0,10	0,00	0,50
Bloco 3	60,2	0,38	5,84	14,70	0,10	0,00	0,03
Bloco 4	1370,9	0,26	3,77	52,60	0,70	0,00	0,60
Bloco 5	1363,8	0,28	3,88	48,00	0,70	0,00	0,60
Bloco 6	260,2	0,34	7,86	72,93	0,10	0,00	1,20

Modelagem Hidráulica e Mapeamento de Áreas Inundáveis

Para determinar as cotas de inundação 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 (WARNER et al., 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.

O modelo necessita de dados como vazão, mudança de fluxo localizada (regime não-permanente), condições de contorno, informação topobatimétrica para cada seção transversal, parâmetro de atrito (coeficiente de rugosidade) em cada seção transversal e um MDE no pós-processamento para o espriamento da inundação em um pseudo 2D, pois não há simulação de velocidade no plano bidimensional.

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 um valor médio de duas leituras ao longo do dia. Tal simplificação implica em uma situação conservadora em termos de projeto.

Para que as estimativas das áreas de inundações tenham uma boa representatividade, faz-se necessário o levantamento e definição de seções topobatimétricas (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 rio, 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.

Foram definidas cinco seções na cidade de Rio Largo (Figura 3). 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, acurácia < 10 m). O levantamento batimétrico de duas seções foi realizado com o uso de um Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP, modelo M9 SonTek®).

No sentido de montante para jusante, a batimetria da seção transversal na estação Fazenda Boa Fortuna (4,64 km distante da última seção), da penúltima seção (distante 0,52 km da terceira seção e 0,95 km da última seção a jusante) e da última seção a jusante foram levantadas por ADCP. A seção Fazenda Boa Fortuna refere-se à condição de contorno do modelo hidráulico, onde foram estimadas as vazões máximas por distribuição estatística e pelo modelo hidrológico. Estando a 1,98 km da seção Fazenda Boa Fortuna e a 2,66 km da última seção a jusante, a segunda seção transversal foi definida por régua batimétrica, devido ao leito rochoso. A terceira seção (distante 1,19 km da segunda seção e 1,47 km da última seção a jusante) é uma antiga barragem a fio d'água utilizada para fins hidrelétricos, os dados foram obtidos através do projeto da barragem (Figura 3).

A topografia da área de estudo (Figura 3), foi obtida através da integração de duas fontes de dados: (a) cartas topográficas fornecidas pela Companhia de Saneamento de Alagoas (CASAL) com cotas equidistantes de 1 m (escala 1:2000) na planície alagável; e (b) altimetria do Modelo Digital de Elevação (MDE) TOPODATA, disponibilizado pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), com resolução espacial de 30 m interpolado e com correção de dados do MDE SRTM (resolução espacial de 90 m). Os dados do MDE foram utilizados apenas em locais fora da planície de inundação, onde não se dispunha de dados topográficos da CASAL.

As seções topobatimétricas foram estendidas para além da planície de inundação utilizando as informações do MDE. Foi possível observar uma sensível diferença entre os dados levantados em campo e as estimativas do MDE, principalmente na calha do rio. Em média, esta diferença ficou em torno de 12%. Esta combinação entre MDE, topografia e batimetria tende a melhorar a qualidade dos resultados (CASAS et al., 2006).

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

O coeficiente de rugosidade foi o único parâmetro cali-

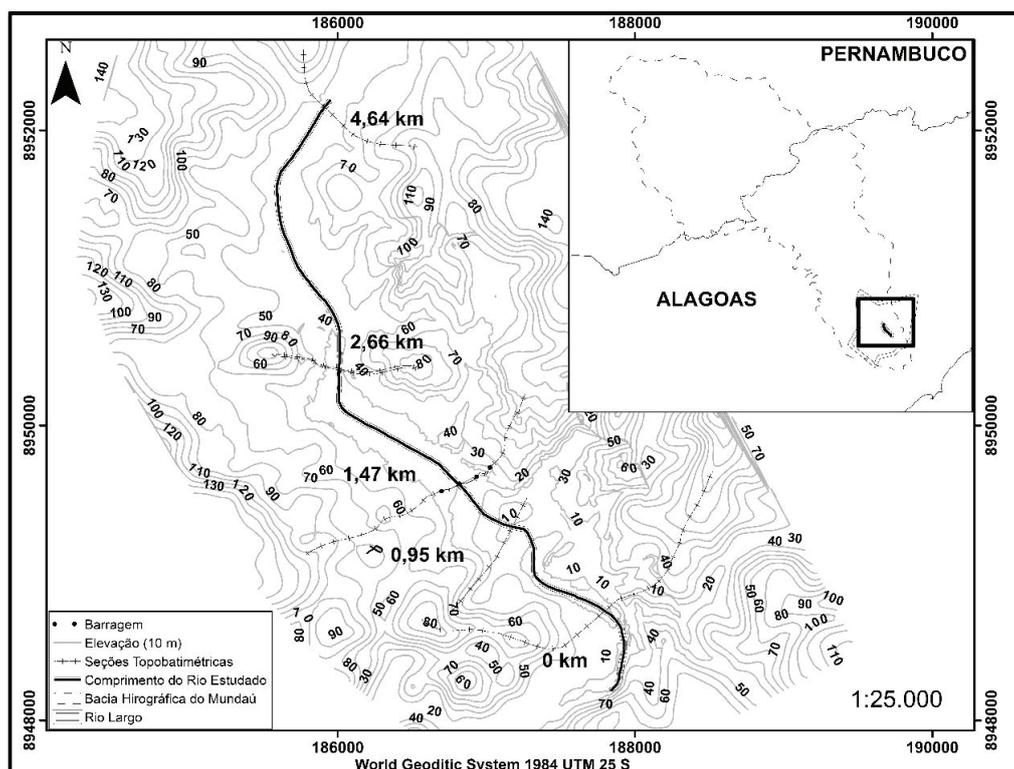


Figura 3 - Seções topobatemétricas utilizadas na modelagem hidráulica

brado no modelo HEC-GeoRAS, devido a sua sensibilidade para as condições hidráulicas. O processo de ajuste do coeficiente de rugosidade de Manning foi manual, partindo de valores de referência apresentados por Chow (1959). Brunner (2010) recomenda medições ou imagens de satélite, que delimitam a área inundada, para calibrar este parâmetro. Neste trabalho foram utilizadas marcas de cheia de junho de 2010 (36 marcas levantadas em campo com o uso de GPS) para a calibração do modelo hidráulico. Este levantamento se restringiu a margem esquerda do rio na cidade de Rio Largo, uma vez que não existe área urbanizada na margem oposta. A condição de contorno utilizada a montante foi a vazão estimada através da curva-chave para o evento de junho de 2010. A condição de contorno a jusante foi a vazão estimada pela equação de Manning, onde a declividade do canal foi obtida através do MDE resultante. Para avaliar a qualidade da calibração do modelo hidráulico foram utilizados o coeficiente de determinação (R^2), erro médio quadrático (RMSE) e o coeficiente de variação do erro médio quadrático (CV (RMSE)) entre cotas observadas e simuladas. Não foi possível utilizar os indicadores de qualidade de calibração recomendados por Sarhadi, Soltani e Modarres (2012) devido à impossibilidade de delimitar a área de inundação usando as marcas da inundação levantadas em campo.

Os mapas de áreas inundáveis, para diferentes tempos de retorno, foram gerados para duas condições de vazões estimadas a montante: (a) vazões máximas geradas pelo ajuste da distribuição GEV; e (b) as vazões máximas geradas pelo modelo hidrológico utilizando as chuvas máximas para distintas estimativas de tempo de retorno (TR). Assim, avaliou-se 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 áreas inundadas para diferentes tipos de vazões (determinísticas e estocásticas) foram avaliadas por diferença de área entre ambas e através da equação Fit (1) (BATES et al., 2006; BATES; DE ROO, 2000; SARHADI; SOLTANI; MODARRES, 2012):

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

onde: *Fit* é o percentual de convergência entre as duas áreas 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 áreas, e próximos de 0% baixa correspondência entre as áreas.

RESULTADOS

Análises de Frequência de Vazões e Chuvas Máximas

O teste não paramétrico de homogeneidade de medianas de Mann-Whitney indicou que as séries de precipitação e a série de vazão na estação Fazenda Boa Fortuna não apresentaram mudanças de tendência em relação às mudanças climáticas locais e/ou de eventos extremos climáticos, indicando que as amostras provêm da mesma população.

Os resultados do teste de Kolmogorov-Smirnov identificaram que todos os 31 postos pluviométricos aderiram bem

à distribuição 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 e para a estação fluviométrica Fazenda Boa Fortuna (Figura 4). Na estação fluviométrica a vazão estimada através da curva-chave para a inundação de junho de 2010 foi de $1.233 \text{ m}^3/\text{s}$ (cota lida 11,50 m), que corresponde ao tempo de retorno de aproximadamente 200 anos (Figura 4).

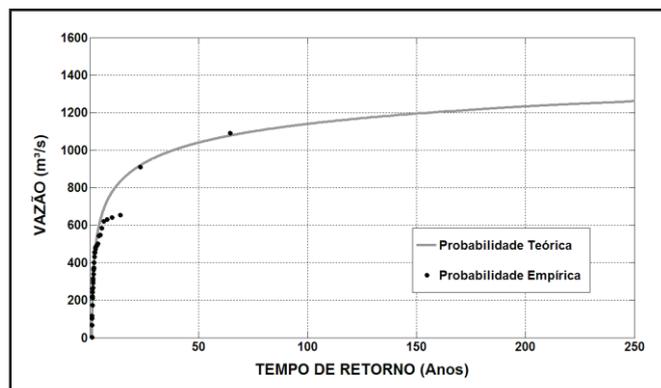


Figura 4 - Vazões estimadas para diferentes tempos de retorno usando a distribuição GEV na estação Fazenda Boa Fortuna, Rio Largo (AL)

Modelagem Hidrológica

Os valores das métricas que avaliam o desempenho do ajuste do modelo hidrológico aos dados observados para o período de calibração e validação do modelo, podem ser obser-

vados nas Tabelas 4 e 5, respectivamente. O modelo hidrológico apresentou um melhor desempenho nas estações localizadas a jusante na bacia (397400000, 397600000 e 397700000). Os piores resultados ocorreram nas estações de cabeceira da bacia (397000000 e 397200000). O melhor ajuste foi obtido na estação Fazenda Boa Fortuna (397700000), seção utilizada como condição de contorno a montante para o modelo hidráulico. Para esta estação, o ajuste da série temporal para o ano de 2000 (ano que apresentou evento de inundação) e para toda a série podem ser observadas nas Figuras 5 e 6, respectivamente.

Após a calibração e validação do modelo, as vazões máximas estimadas para diferentes tempos de retorno da seção fluviométrica Fazenda Boa Fortuna foram comparadas às vazões estimadas pela distribuição GEV (Tabela 6). O comparativo entre os dois métodos demonstra valores semelhantes até 200

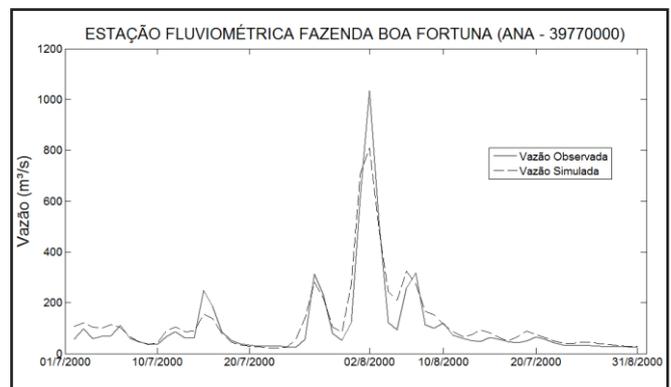


Figura 5 – Comparação das vazões observadas e simuladas para o ano de 2000, quando ocorreu um evento de inundação

Tabela 4 - Valores das funções objetivo para o período de calibração do modelo hidrológico (NS – Nash-Shutcliffe, NSlog – Nash-Shutcliffe em logaritmos, ΔV – Variação de volume)

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 - Valores das funções objetivo para o período de validação do modelo hidrológico (NS – Nash-Shutcliffe, NSlog – Nash-Shutcliffe em logaritmos, ΔV – Variação de volume)

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

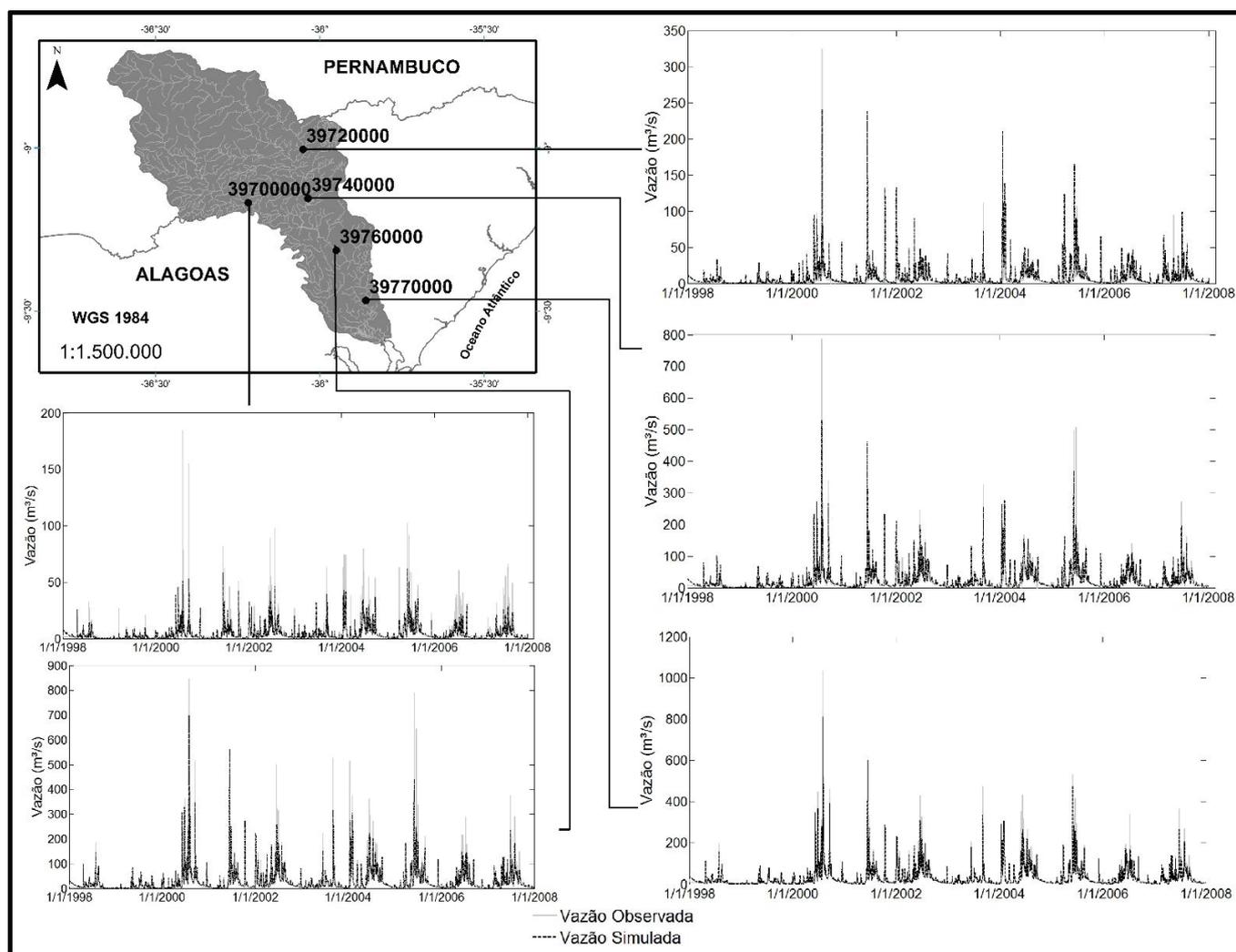


Figura 6 - Comparação entre vazões observadas e calculadas para cada posto fluviométrico

Tabela 6 - Comparação dos valores de vazões estimados pela distribuição GEV e pelo modelo hidrológico

TR	Vazão (GEV) (m ³ /s)	Vazão modelagem (m ³ /s)	% de diferença
2 anos	403,9	367,12	9,11
5 anos	634,8	537,13	13,38
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

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 da distribuição de frequências, sendo mais recomendado estimativas baseadas em processos.

Modelagem Hidráulica

A área inundada simulada e as marcas de cheia levantadas em campo para o evento de junho de 2010 podem ser observadas na Figura 7. Os valores finais do coeficiente de rugosidade, após o processo de calibração, são apresentados na Tabela 7. No geral, observa-se uma boa performance do modelo hidráulico ($R^2 = 0,99$, $RMSE = 1,41$ m e $CV (RMSE) =$

$0,04$), comparando as cotas observadas e simuladas. No entanto ocorreram algumas desconformidades em pontos no início da cidade, na área central e na parte baixa (de montante para jusante). As diferenças médias e medianas de posicionamento no plano horizontal entre as marcas de cheia e mancha simulada foram 12,84 m e 9,34 m, respectivamente. A diferença média e mediana de cotas observadas e simuladas foi em torno de 1,22 m e 0,93 m, respectivamente.

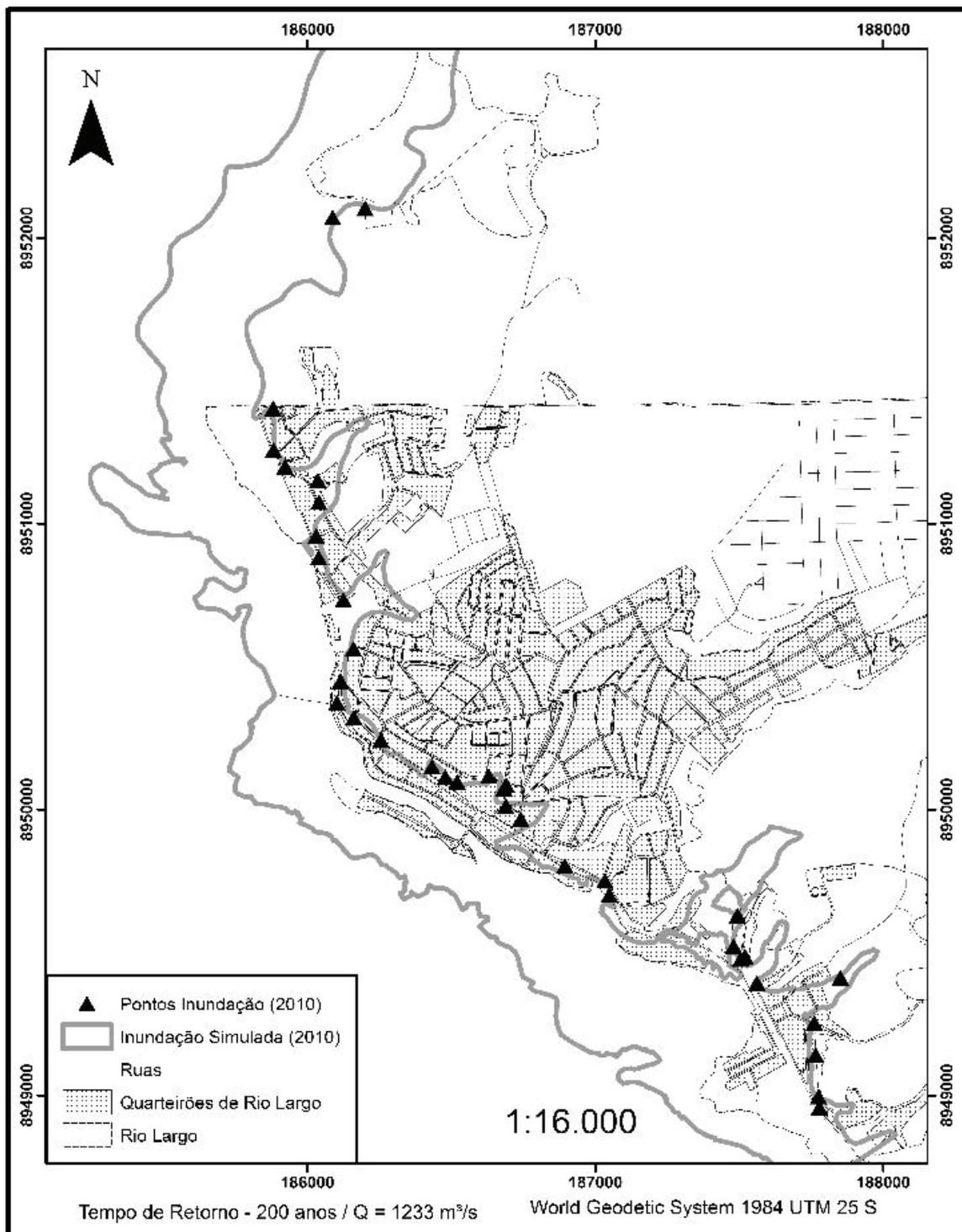


Figura 7 – Comparação da mancha de inundação simulado com as marcas levantadas em campo da inundação de junho de 2010

Tabela 7 - Valores do coeficiente de Manning no trecho do rio Mundaú que passa pelo município de Rio Largo (seções de 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

Mapeamento de Áreas Inundáveis

A partir do modelo hidráulico foram obtidas as áreas inundadas com vazões geradas pelo modelo hidrológico (Figura 8) e por distribuição GEV. Vazões superiores a 50 anos de tempo de retorno promovem áreas inundadas relevantes principalmente na parte média e baixa do trecho. São áreas residenciais,

comerciais, de serviços públicos e privados da cidade (Tabela 8).

As divergências entre as áreas inundadas obtidas para diferentes tipos de vazões (determinísticas e estocásticas) foram determinadas pela estatística Fit. Pode-se observar que existe boa correspondência (acima de 92%) das áreas inundadas pelos diferentes métodos de estimativa de vazão de montante (Tabela 9).

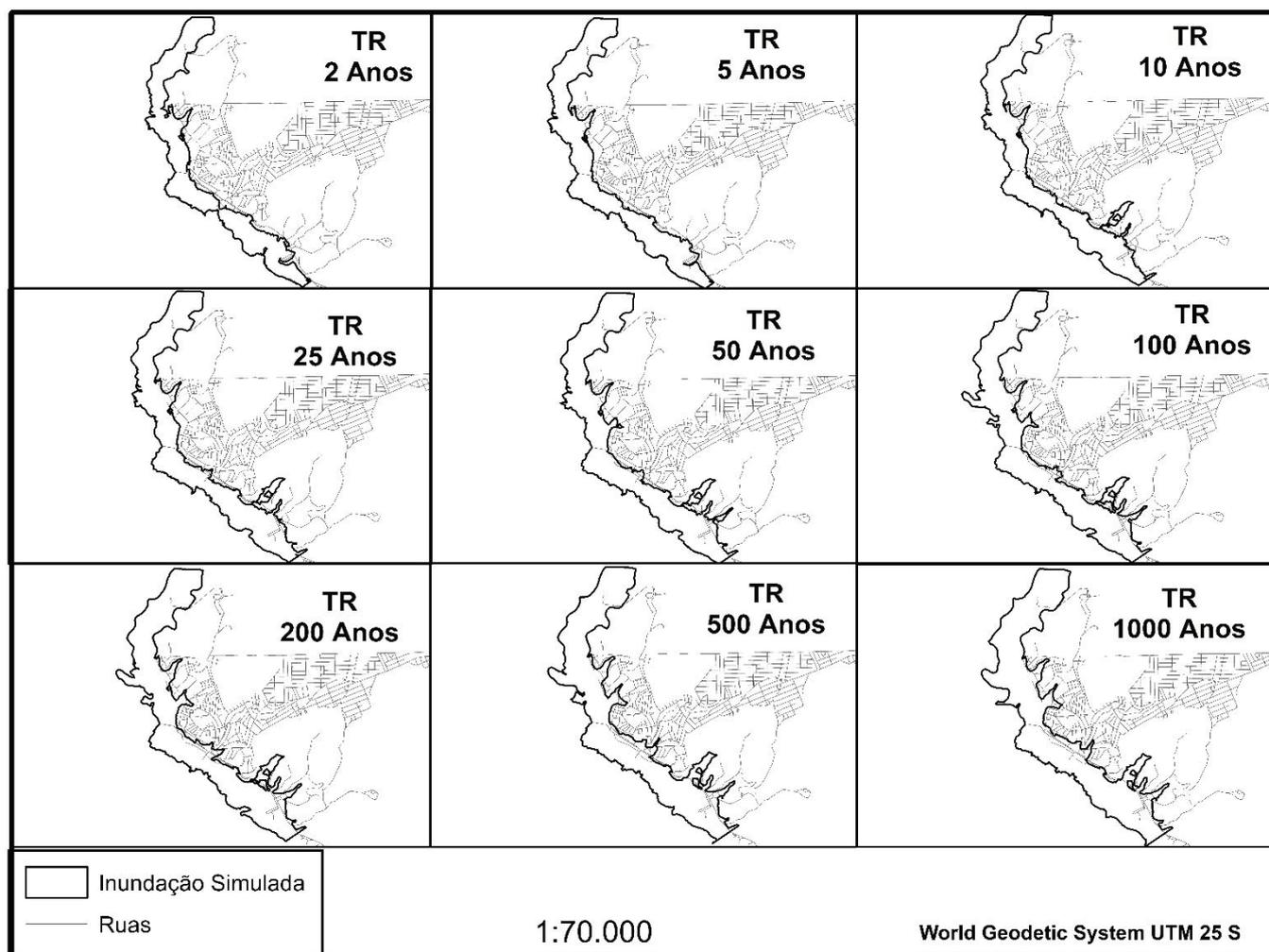


Figura 8 - Mapeamento de áreas suscetíveis a inundação para diferentes tempos de retorno estimadas através do acoplamento do modelo Hidrológico e Hidráulico.

Tabela 8 - Área urbana inundada para diferentes tempos de retorno (Nota: área urbana de Rio Largo: 18,55 km²)

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

Tabela 9 - Qualidade do ajuste entre as manchas de inundação geradas por vazões estimadas pela distribuição GEV e pelo modelo hidrológico

TR	Área Vazão Estimada (GEV) (km ²)	Área Vazão Estimada (Modelo) (km ²)	Estatística <i>F_{it}</i> (%)
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

DISCUSSÕES

Análises Estatísticas de Extremos

A distribuição de probabilidade GEV utilizada nos dados de chuva e vazão se mostrou robusta e aplicável à região, visto que esta distribuição apresentou uma boa aderência à distribuição empírica pelos testes de aderência e não paramétricos. Isto corrobora com outros estudos hidrometeorológicos e hidrológicos que utilizaram esta distribuição de máximos (KATZ; PARLANGE; NAVEAU, 2002; NAUMANN; LLANO; VARGAS, 2012; NORBIATO et al., 2007; 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 (< 30 anos de dados), como as utilizadas neste estudo (NAGHETTINI; 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 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 probabilidade na região de extrapolação da curva da

distribuição (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 tempo de retorno de chuva e vazão não foi avaliada (VIGLIONE; BLÖSCHL, 2009; VIGLIONE; MERZ; BLÖSCHL, 2009). Apesar disso, não foi observada uma grande diferença em relação às áreas inundadas por diferentes vazões, provavelmente devido ao efeito da topografia da região (planície de inundação estreita), não promovendo profundas modificações da área inundada com o incremento da vazão.

Modelagem Hidrológica

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 (o posto 397000000 possui 762,70 km² de área e 74,27 km de perímetro e o posto 397200000 possui 1182,86 km² de área e 117,87 km de perímetro), pois há respostas hidrológicas mais rápidas de chuvas mais intensas nestes locais devido a uma geologia composta de rochas cristalinas e de solos de pouca

profundidade, além da baixa capacidade de retenção da água infiltrada. Além disto, a parte alta/média da bacia é uma zona de transição climática entre semiárido e litoral tropical. Isto demonstra os piores resultados das funções objetivos nessas estações.

Estudos anteriores mostram que o modelo MGB apresenta limitações em representar vazões médias diárias em bacias com áreas menores que 1.500 km² (COLLISCHONN; COLLISCHONN; TUCCI, 2008; COLLISCHONN et al., 2007; PAIVA; COLLISCHONN; BUARQUE, 2013; PAZ et al., 2011; RAJE; KRISHNAN, 2012). No entanto, a calibração e validação do modelo hidrológico se mostrou satisfatória no posto fluviométrico Fazenda Boa Fortuna (área de drenagem acima de 3.000 km²), a montante do município de Rio Largo, atendendo assim os propósitos deste estudo. Neste posto fluviométrico, o modelo não apresentou bons ajustes para vazões mínimas no período de estiagem (tende a superestimar), uma vez que o ajuste priorizou o período de vazões máximas, não comprometendo, desta maneira, os resultados (ROGGER et al., 2012). No entanto, a priorização de um período para ajuste pode ter contribuído para redução dos valores dos indicadores de performance. Desta forma, o modelo hidrológico deve ser utilizado com cautela em seções a montante de Rio Largo e para descrever o comportamento de vazões mínimas, onde é recomendado uma calibração específica ao período (PAIVA; COLLISCHONN; BUARQUE, 2013).

Com relação aos parâmetros calibráveis, os parâmetros como o *b*, *W_m*, *k_{bas}* foram os mais sensíveis no processo de calibração. O parâmetro *b* controlou a forma dos picos do hidrograma, aproximando melhor os valores da inundação. O parâmetro *W_m* representou de forma adequada a característica dos solos situados na parte média e baixa da bacia (solos com maior capacidade de infiltração). Como o parâmetro *W_c* está associado a capacidade de saturação do solo, tal parâmetro tem um papel importante para representar eventos de inundações que são influenciados fortemente por escoamento superficial de grandes volumes no alto e médio curso da bacia hidrográfica, como, por exemplo, nos ocorridos na inundação de junho de 2010 (OLIVEIRA; SOUZA; FRAGOSO JÚNIOR, 2014).

Modelagem Hidráulica e Mapeamento de Áreas Inundáveis

A calibração do modelo hidráulico neste estudo, apesar de algumas limitações, se apresentou satisfatório considerando os propósitos do estudo. Não existiu delimitação da área de inundação observada para o evento de junho. No entanto o levantamento em campo de marcas de cheia foi a alternativa viável para este tipo de análise na ausência de informações mais precisas como, por exemplo, o uso de imagens de Radar de Abertura Sintética (SAR), Radar de Abertura Sintética Aero-transportado (ASAR) (BATES et al., 2006; BATES; DE ROO, 2000; SARHADI; SOLTANI; MODARRES, 2012), imagens aéreas ou levantamento em campo no dia do evento. A calibração resultou em valores de coeficientes de Manning dentro dos padrões apresentados por CHOW (1959) e recomendados por WARNER et al. (2010), e que foram baseadas em valores

aproximados do fundo do canal e das margens. As diferenças média e mediana na horizontal e na vertical, e os resultados estatístico da vertical relatam uma certa diferença, que pode se considerar dentro de um limite plausível devido ao número de incertezas encontrados no trabalho, como por exemplos cartas topográficas antigas, falta de um Modelo Digital de Superfície (MDS) para melhor interpretação dos resultados em área urbana, pequenos erros inerentes a digitalização das cartas e acurácia do GPS que demarcou os pontos da inundação de 2010. É importante ressaltar que a seção Fazenda Boa Fortuna sofreu no mínimo duas grandes modificações na sua geometria em 10 anos, principalmente durante as inundações 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; MONTANARI, 2009). É recomendada uma atualização dos dados de entrada do modelo hidráulico sempre que houver a passagem de uma cheia ou modificações artificiais (implantação de reservatório, canalização). A topografia da área urbana da cidade de Rio Largo foi baseada nas cartas topográficas cedidas pela CASAL, que pode ter repercutido 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, podendo promover incertezas do valor levantado em alguns locais. Para uma representação mais detalhada da área de inundação, na escala de lotes, seria necessário um conjunto de informações mais detalhadas de um MDS, em que identifica topo de construções e de árvores, com resolução espacial menor ou igual 1 m (por exemplo, superfície gerada por LiDAR), informações dos lotes e uma malha mais densa de seções topobatimétricas (CASAS et al., 2006). Devido à falta de dados mais refinados, a modelagem não conseguiu representar a inundação em algumas áreas no início e no centro da cidade para o evento de 2010, o que pode representar custos técnicos e financeiros elevados se o sistema fosse utilizado de forma operacional (BORGA et al., 2010). Em geral, não foi observado 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 TOPODATA, pouca informação da extensão da inundação e o efeito dos lotes na mancha de inundação (áreas não efetivas de escoamento); os estimadores estatísticos indicaram que não houve comprometimento para o modelo hidráulico representar o evento de 2010.

CONCLUSÕES

Para possibilitar o uso de análise de frequência local diária de chuvas como dado de entrada no modelo chuva-vazão, necessitou que a parametrização do modelo hidrológico fosse voltada para vazões máximas. O modelo hidrológico indicou boa capacidade de representação dos eventos de cheia na cidade de Rio Largo. Os resultados mostraram que houveram limitações

para simular vazões máximas em áreas de drenagem menores que 1.500 km², mesmo com as tentativas de melhorar a parametrização a partir de uma calibração voltada para vazões máximas. Estas áreas apresentam uma resposta rápida nos escoamentos, possuem um tempo de concentração abaixo de um dia e se situam em uma região com apenas um horizonte de solo e uma geologia de rocha cristalina. Desta forma, é recomendado um intervalo horário de simulação nestas áreas, no entanto, nem sempre os dados de entrada de chuva e vazão estão disponíveis em uma frequência horária.

O acoplamento de modelos permitiu que o mapeamento estimado da área inundada seja aplicável como meio de informação para ações mitigadoras que as inundações podem causar ou para sistemas de alerta, podendo ser utilizado para previsão com certa antecedência (a partir de precipitação prevista ou medida em tempo real) e ainda comparar as estimativas com os zoneamentos de inundação, diminuindo possíveis danos socioeconômicos. Destaca-se também, que o acoplamento de modelos pode ser considerado uma metodologia promissora em localidades em que a série de dados de vazões é recente e/ou insuficiente para gerar uma análise de frequência local, necessitando no mínimo de um evento de cheia relevante para calibração e outro para validação. Os locais com maiores recorrências de inundações no município de Rio Largo englobam áreas agrícolas de cana-de-açúcar, áreas residenciais antigas, de expansão imobiliária e a principal área comercial da cidade. A calibração do modelo hidráulico foi feita utilizando os dados de marcas da inundação de 2010, onde pode ter ocorrido eventuais erros, por se tratar de um levantamento qualitativo no local, entretanto sua utilização demonstrou ser útil na falta de outras alternativas. Desta forma, recomenda-se o uso de imagens aéreas ou de satélite para uma melhor delimitação da área inundada. O uso de um MDS mais detalhado poderia também proporcionar melhores resultados do mapeamento de inundação da área urbana.

REFERÊNCIAS

- ALAGOAS; PNUD; OAS. *Diagnóstico da região das Bacias dos Rios Mundaú e Paraíba*. Maceió, AL: Governo do estado de Alagoas, 1990.
- BALDASSARRE, G. DI.; MONTANARI, A. Uncertainty in river discharge observations: a quantitative analysis. *Hydrology and Earth System Sciences*, v. 13, n. 6, p. 913–921, Jun. 2009.
- BALLESTEROS, J. A.; BODOQUE, J. M.; DÍEZ-HERRERO, A.; SANCHEZ-SILVA, M.; STOFFEL, M. Calibration of floodplain roughness and estimation of flood discharge based on tree-ring evidence and hydraulic modelling. *Journal of Hydrology*, v. 403, n. 1-2, p. 103–115, Jun. 2011.
- BATES, P. D.; WILSON, M. D.; HORRITT, M. S.; MASON, D. C.; HOLDEN, N.; CURRIE, A. Reach scale floodplain inundation dynamics observed using airborne synthetic aperture radar imagery: Data analysis and modelling. *Journal of Hydrology*, v. 328, n. 1-2, p. 306–318, Ago. 2006.
- BATES, P.D.; ROO, A. P. DE. A simple raster-based model for flood inundation simulation. *Journal of Hydrology*, v. 23, n. 1-2, p. 54–77, Set. 2000.
- BONNIFAIT, L.; DELRIEU, G.; LAY, M. LE; BOUDEVILLAIN, B.; MASSON, A.; BELLEUDY, P.; GAUME, E.; SAULNIER, G. M. 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*, v. 32, n. 7, p. 1077–1089, Jul. 2009.
- BORGA, M.; ANAGNOSTOU, E. N.; BLÖSCHL, G.; CREUTIN, J.-D. Flash floods: Observations and analysis of hydro-meteorological controls. *Journal of Hydrology*, v. 39, n. 1-2, p. 1–3, Nov. 2010.
- BRUNNER, G. W. HEC-RAS, *River Analysis System: User's manual*. Davis, CA: US Army Corps of Engineers, 2010. 766 p. Available at: http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/documentation/HEC-RAS_4.1_Users_Manual.pdf. Accessed at August 07, 2013.
- CASAS, A.; BENITO, G.; THORNDYCRAFT, V. R.; RICO, M. The topographic data source of digital terrain models as a key element in the accuracy of hydraulic flood modelling. *Earth Surface Processes and Landforms*, v. 31, n. 4, p. 444–456, Mar. 2006.
- CHAVES, M. B. *Modelagem e previsão de áreas de inundação no município de Rio Largo/AL*. 2013. 63 f. Undergraduate Dissertation, Center for Technology, Federal University of Alagoas, Alagoas, 2013.
- CHORMANSKI, J.; OKRUSZKO, T.; IGNAR, S.; BATELAAN, O.; REBEL, K. T.; WASEN, M. J. Flood mapping with remote sensing and hydrochemistry: A new method to distinguish the origin of flood water during floods. *Ecological Engineering*, v. 37, n. 9, p. 1334–1349, Set. 2011.
- CHOW, V. T. *Open Channel Hydraulics*. Tokyo: McGraw Hill, 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*, v. 360, n. 1-4, p. 207–216, Out. 2008.
- COLLISCHONN, W.; ALLASIA, D.; SILVA, B. C. DA.; TUCCI, C. E. M. The MGB-IPH model for large-scale rainfall-runoff modelling. *Hydrological Sciences Journal*, v. 52, n. 5, p. 878–895, Mai. 2007.
- COTEC. Technical Consulting. *Plano Diretor de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Mundaú - TOMO I*. Recife, PE: COTEC, 1999. 168 p.
- DMITRIEVA, T. G.; PESKOV, B. E. Numerical forecast with the mesosynoptic specification of extremely severe squalls in the European part of Russia (Case study for June 13 and July

- 29, 2010). *Russian Meteorology and Hydrology*, v. 38, n. 2, p. 71–79, Fev. 2013.
- EM-DAT: THE INTERNATIONAL DISASTER DATABASE/CENTRE FOR RESEARCH ON THE EPIDEMIOLOGY OF DISASTERS – CRED. *Disaster profile*. Available at: http://www.emdat.be/disaster_profiles/index.html. Accessed at August 03, 2015
- FRAGOSO JÚNIOR, C. R.; PEDROSA, V. A.; SOUZA, V. C. B. Reflexões Sobre a Cheia de Junho de 2010 nas Bacias do Rio Mundaú e Paraíba. *In: SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE*, 10., 2010, Fortaleza. Proceedings of X Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos do Nordeste, Porto Alegre: ABRH, 2010.
- GAMA, W. M. *Impactos das mudanças climáticas na resposta hidrológica da bacia hidrográfica do rio Paraíba do Meio*. 2011. 112 f. Master Dissertation. Center for Technology, Federal University of Alagoas., Alagoas, 2011.
- GRIMALDI, S.; PETROSELLI, A.; ARCANGELETTI, E.; NARDI, F. Flood mapping in ungauged basins using fully continuous hydrologic–hydraulic modeling. *Journal of Hydrology*, v. 487, n. n/d, p. 39–47, Abr. 2013. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.02.023>. Acesso em: 09 ago. 2013.
- GRUBBS, F.E.; BECK, G. Extension of sample sizes and percentage points for significance tests of outlying observations. *Technometrics*, v. 14, n. 4, p. 847–854, Nov. 1972.
- HARDY, R. J.; BATES, P. D.; ANDERSON, M. G. The importance of spatial resolution in hydraulic models for floodplain environments. *Journal of Hydrology*, v. 216, n. 1-2, p. 124–136, Mar. 1999.
- HORRITT, M. S.; BATES, P. D. Predicting floodplain inundation: raster-based modelling versus the finite-element approach. *Hydrological Processes*, v. 15, n. 5, p. 825–842, Mar. 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*, v. 329, n. 1-2, p. 306–314, Set. 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*, v. 27, n. 3, p. 251–261, Ago. 1985.
- KATZ, R. W.; PARLANGE, M. B.; NAVEAU, P. Statistics of extremes in hydrology. *Advances in Water Resources*, v. 25, n. 8-12, p. 1287–1304, Ago./Dez. 2002.
- KOUTSOYIANNIS, D.; BALOUTSOS, G. Analysis of a Long Record of Annual Maximum Rainfall in Athens, Greece, and Design Rainfall Inferences. *Natural Hazards*, v. 22, n. 1, p. 29–48, Jul. 2000.
- KOUWEN, N.; SOULIS, E. D.; PIETRONIRO, A.; DONALD, J.; HARRINGTON, R. A. Grouped Response Units for Distributed Hydrologic Modeling. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 119, n. 3, p. 289–305, Mai. 1993.
- NAGHETTINI, M.; PINTO, E. J. A. *Hidrologia Estatística*. Belo Horizonte, MG: 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*, v. 3, n. 2, p. 247–260, Fev. 2012.
- NICHOLAS, A. P.; WALLING, D. E. Modelling flood hydraulics and overbank deposition on river floodplains. *Earth Surface Processes and Landforms*, v. 2, n. 1, p. 59–77, Jan. 1997.
- NORBIATO, D.; BORGA, M.; SANGATI, M.; ZANON, F. Regional frequency analysis of extreme precipitation in the eastern Italian Alps and the August 29, 2003 flash flood. *Journal of Hydrology*, v. 345, n. 3-4, p. 149–166, Out. 2007.
- OLIVEIRA, D.L.; SOUZA, V. C. B.; FRAGOSO JÚNIOR, C. R. Análise hidrológica da cheia excepcional ocorrida em junho de 2010 nas Bacias dos Rios Mundaú e Paraíba do Meio em Alagoas e Pernambuco. *RBRH: Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 19, n. 3, p. 279–293, Jul./Set. 2014.
- 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*, v. 27, n. 3, p. 333–346, Jan. 2013.
- PAZ, A. R. DA.; COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M.; PADOVANI, C. R. Large-scale modelling of channel flow and floodplain inundation dynamics and its application to the Pantanal (Brazil). *Hydrological Processes*, v. 25, n. 9, p. 1498–1516, Abr. 2011.
- RABER, G. T.; JENSEN, J. R.; HODGSON, M. E.; TULLIS, J. A.; DAVIS, B. A.; BERGLUND, J. Impact of Lidar Nominal Post-spacing on DEM Accuracy and Flood Zone Delineation. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* v. 73, n. 7, p. 793–804, Jan. 2007.
- RAJE, D.; KRISHNAN, R. Bayesian parameter uncertainty modeling in a macroscale hydrologic model and its impact on Indian river basin hydrology under climate change. *Water Resources Research*, v. 48, n. 8, p. 1-17, Ago. 2012.
- ROGGER, M.; KOHL, B.; PIRKL, H.; VIGLIONE, A.; KOMMA, J.; KIRNBAUER, R.; MERZ, R.; BLÖSCHL, G. Runoff models and flood frequency statistics for design flood estimation in Austria – Do they tell a consistent story? *Journal of Hydrology*, v. 456-457, n. n/d, p. 30–43, Ago. 2012.

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

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

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

SARTORI, A.; GENOVEZ, A. M.; NETO, F. L. 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. *RBRH: Revista Brasileira de Recursos Hídricos*. v. 10, n. 4, p. 19–29, Out./Dez. 2005.

SARTORI, A.; NETO, F. L.; 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. *RBRH: Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 10, n. 4, p. 5–18, Out./Dez. 2005.

SRINIVAS, C. V.; HARIPRASAD, D.; BHASKAR RAO, D. V.; ANJANEYULU, Y.; BASKARAN, R.; VENKATRAMAN, B. Simulation of the Indian summer monsoon regional climate using advanced research WRF model. *International Journal of Climatology*, v. 33, n. 5, p. 1195–1210, Abr. 2013.

SURIYA, S.; MUDGAL, B. V. Impact of urbanization on flooding: The Thirusoolam sub watershed – A case study. *Journal of Hydrology*, v. 412-413, n. n/d, p. 210–219, Jan. 2012.

TRAMBLAY, Y.; BADI, W.; DRIOUECH, F.; ADLOUNI, S. EL; NEPPEL, L.; SERVAT, E. Climate change impacts on extreme precipitation in Morocco. *Global and Planetary Change*, v. 82-83, n. n/d, p. 104–114, Fev. 2012.

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

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

TUCCI, C. E. M. *Inundações urbanas*. Porto Alegre, RS: ABRH/RHAMA, 2007. 389 p.

VIGLIONE, A.; BLÖSCHL, G. On the role of storm duration in the mapping of rainfall to flood return periods. *Hydrology and Earth System Sciences*, v. 13, n. 2, p. 205–216, Fev. 2009.

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*, v. 6, n. 1, p. 627–665, Jan. 2009.

WARNER, J. C.; BRUNNER, G. W.; WOLFE, B. C.; PIPER, S. S. HEC-RAS, *River Analysis System: Applications Guide – Version 4.10*. Davis, CA: US Army Corps of Engineering, 2010. Available at: http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/documentation/HEC-RAS_4.1_Applications_Guide.pdf. Accessed at August 07, 2013.

Contribuição dos autores:

Benício Emanuel Omena Monte: Autor principal da pesquisa; concepção da metodologia; escrita geral; obtenção dos dados; análises estatísticas; realização das etapas de campo; simulações hidrológica/hidráulica; interpretação dos resultados; discussão dos resultados; fechamento do texto.

Louis Fillipi de Oliveira Magalhães: Obtenção dos dados; realização das etapas de campo; simulação hidráulica; interpretação dos resultados.

Denis Duda Costa: Realização das etapas de campo; simulação hidráulica; interpretação dos resultados; discussão dos resultados; revisão conceitual; fechamento do texto.

Mahelvson Bazilio Chaves: Etapas de campo; Simulações hidrológica/hidráulica.