

CALIBRAÇÃO DE UM MODELO HIDRÁULICO PARA ZONEAMENTO DE MANCHAS DE INUNDAÇÃO NO MUNICÍPIO DE RIO LARGO/AL BASEADA NO EVENTO DE 2010

Louis Fillipi de Oliveira Magalhães^{1}; Benício Emanuel Omena Monte²; Carlos Ruberto Fragoso Júnior³; Denis Duda Costa².*

RESUMO – Este artigo apresenta a calibração de um modelo hidráulico para representar manchas de inundação na cidade de Rio Largo/AL. A calibração foi realizada para a cheia de ocorrência em 2010. O modelo hidráulico utilizado foi o HEC-RAS 4.1, na condição de regime permanente. Como entrada foram utilizados dados de levantamento das seções topobatimétricas e vazão a montante da cidade. O coeficiente de rugosidade de *Manning* foi ajustado com a finalidade de obter uma melhor correspondência entre os níveis d'água simulados pelo modelo e os níveis observados durante o evento da cheia (levantamentos *in situ* com pontos georreferenciados). O modelo representou de forma satisfatória a mancha de inundação de 2010 no município de Rio Largo, indicando ser uma ferramenta promissora para subsidiar o planejamento urbano e para alertar e prevenir a cidade contra cheias.

PALAVRAS-CHAVE –HEC-RAS; Mapa de Inundação.

CALIBRATION OF A HYDRAULIC MODEL FOR FLOOD ZONING AT RIO LARGO/AL

ABSTRACT – The aims of this work was to present a calibration of a hydraulic model to represent flood maps at Rio Largo/AL. Calibration was performed for the greatest flood occurred in 2010. It was used the hydraulic model named HEC-RAS 4.1, under steady state condition. As input data were used cross sections and river flow data in the upstream of the city. The Manning roughness coefficient was adjusted in order to obtain a better match between simulated and observed water levels during the flood event. The model could satisfactorily represent water levels of the flood of 2010 at Rio Largo, indicating to be a promising tool to support urban planning and to alert and prevent the city against floods.

KEYWORDS – Hydraulic Modeling; Flood Map.

1. INTRODUÇÃO – Historicamente, áreas marginais a rios são regiões difusoras da ocupação da sociedade ao redor do mundo, e essa necessidade de utilizar os recursos hídricos para o desenvolvimento demonstra o grau de dependência da sociedade, o que impõe uma pressão no uso do solo. Esta relação é um dos potenciais causadores de acidentes e prejuízos por inundações ribeirinhas, que devido ao incremento populacional nas cidades brasileiras nos últimos anos, tornaram-se motivo de preocupação para órgãos públicos e sociedade civil.

Em países em desenvolvimento, como o Brasil, estes eventos vieram a se agravar com o crescimento das cidades após a década de 70 do século XX e o adensamento populacional urbano que vem aumentando consideravelmente: atualmente quase 74 % da população brasileira residem

¹ *Afiliação: Graduando em Engenharia Civil (CTEC/UFAL)

² Afiliação: Mestrando em Recursos Hídricos e Saneamento (CTEC/UFAL)

³ Afiliação: Professor Efetivo (CTEC/UFAL)

em domicílios com ordenamento regular em áreas urbanas [IBGE (2010)], que somado ao número de pessoas em domicílios irregulares aumenta esse percentual consideravelmente.

Os municípios ribeirinhos da bacia hidrográfica do Mundaú apresentam urbanização concentrada nas áreas marginais do rio principal. Nesta bacia, ocorrem com regularidade grandes inundações ribeirinhas rápidas, com algumas provocando fortes prejuízos e catástrofes (e.g. 1914, 1941, 1969, 1988, 1989, 2000, 2010), revelando a fragilidade da bacia a eventos de cheia [Fragoso Júnior et al. (2010)]. Recomendações de estudos e medidas mitigadoras [ALAGOAS (1990)] impediam a ocupação urbana em planícies de inundação e foram elaboradas após os eventos extremos de inundação ocorridos em 1988 e 1989 na bacia do Rio Mundaú, mas nunca efetivamente implementadas. Isto é uma tendência muito comum, já que sistemas, estratégias e capacidades são ignorados em favor de ações paliativas; soluções e projetos são esquecidos após a retirada de especialistas externos [Hagelsteen e Becker (2013)].

Para a previsão da vazão de pico de eventos extremos, a carência de dados pode ser sanada através das probabilidades de tempo de retorno de vazão (TR), utilizando distribuições extremas clássicas como a de Valores Extremos Generalizados (GEV) em eventos hidrológicos (e.g. Lu e Stendiger (1992); Katz et al. (2002)).

A utilização de modelos hidráulicos (e.g. Ballesteros et al. (2011)) permite a geração de áreas inundadas em ambiente de geoprocessamento. Modelos hidráulicos unidimensionais como Mike 11 [DANISH (1997)], ISIS [HALCROW (1997)] ou HEC-RAS [USACE (2010)] fundamentados nas equações de St. Venant ou variações são difundidos devido à necessidade mínima de cálculo computacional. Três aspectos são fundamentais na modelação hidráulica: dados topográficos detalhados, um modelo hidráulico para propagação da inundação e o impacto que as estimativas de descargas hidrológicas possuem no delineamento dos mapas de inundação [Grimaldi et al. (2013)].

Desta forma, este estudo tem como objetivo desenvolver um zoneamento de inundação no município de Rio Largo/Alagoas através de modelação hidráulica, no curso principal da bacia hidrográfica do rio Mundaú, de forma simplificada e acessível tanto em relação a custos financeiros e tempo, mesmo que a bacia não possua uma situação facilitadora no que tange a estrutura de dados e informação. Este tipo de estudo é essencial para fornecer subsídios ao planejamento da ocupação urbana ribeirinha em uma localidade que vem sofrendo com sucessivos eventos de inundação.

2. METODOLOGIA

2.1 Área de Estudo - O município de Rio Largo encontra-se inserido na bacia hidrográfica do rio Mundaú, que percorre 30 municípios dos estados de Pernambuco e Alagoas. A bacia possui uma área de 4.126 km², onde 2.155 km² estão sob o domínio do estado de Pernambuco e os 1.971 km² restantes, pertencentes ao estado de Alagoas. Segundo o Censo 2010 do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), a população de Rio Largo era de 68.512 habitantes. O clima predominante é o tropical litorâneo úmido, com período chuvoso mais intenso entre junho e agosto e uma chuva anual média de 1400 mm/ano.

2.2 Fluxograma – O fluxograma abaixo resume as etapas deste trabalho:

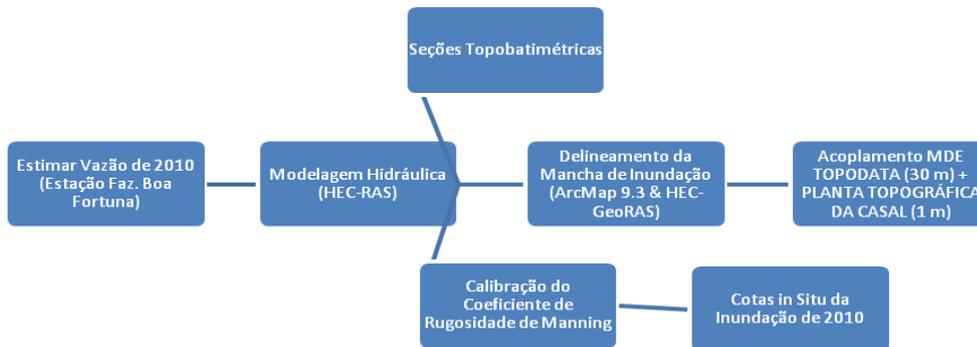


Figura 1 - Fluxograma do Estudo

2.3 Vazões Estimadas por Distribuição de Probabilidades – Através do programa MATLAB, a distribuição GEV foi utilizada para se obter o valor do tempo de retorno (TR) da cota lida em 2010 na seção fluviométrica Fazenda Boa Fortuna, e posteriormente, utilizou-se o mesmo tempo de retorno da cota lida para atingir o valor da vazão de 2010. Uma alternativa ao fato de haver falta de dados de sensores remotos para eventos de inundações rápidas na Bacia do Mundaú. Foram realizadas otimizações, retiradas de falhas e testes de aderência dos dados durante o processo. Após a utilização da distribuição GEV, as vazões geradas alimentaram como condição de entrada (i.e. de modo off-line) o modelo hidráulico utilizado para o cálculo dos perfis da linha d’água.

2.4 Modelagem Hidráulica – Através do modelo hidráulico utilizado (i.e. HEC-RAS 4.1, desenvolvido pela Hydrologic Engineering Center (HEC)) buscou-se os níveis (i.e. perfis de linha d’água) para o rio Mundaú a partir do dado de entrada (i.e. vazão). Sua estrutura conceitual permite modelar um escoamento unidimensional permanente (i.e. utiliza princípios da conservação de energia) ou não permanente (utiliza as equações da continuidade e quantidade de movimento) e progressivamente diverso, podendo ser aplicado em canais de escoamento supercrítico, subcrítico ou misto [USACE (2010)]. Algumas das vantagens são: software livre e robusto, interface simples, inserção de dados de outras estruturas (i.e. pontes, bueiros, junções), introdução e interpolação de seções transversais.

2.4.1 Seções Transversais do Rio - Um dado de entrada essencial para o modelo hidráulico são as seções transversais, onde a calha do rio e o relevo das partes emersas da seção são detalhados. Dessa forma, foi realizado o levantamento topobatimétrico das seções transversais do trecho em estudo. A locação dessas seções foi definida após uma visita de reconhecimento do trecho do rio no município de Rio Largo onde se procurou identificar os locais em que ocorre variação nas condições de escoamento. Tais alterações podem ocorrer devido às mudanças de declividade do fundo do canal, presença de pontes, ilhas e obstruções, alargamentos ou estreitamentos do canal, entre outros motivos [Castilho et al. (2005)].

Foram executadas topobatimetrias de três seções transversais do Rio Mundaú, sendo uma seção na estação fluviométrica Fazenda Boa Fortuna, outra sob a ponte que liga a cidade ao outro lado do rio, e a terceira no trecho em que o rio passa próximo à Subestação Elétrica da CHESF, se aproximando do limite do município de Rio Largo com Maceió (no trecho jusante à barragem). As topografias das planícies de inundação das três seções levantadas citadas foram obtidas através da utilização de estações totais e georreferenciadas com o auxílio de um GPS (Global Position System). Para o levantamento batimétrico das seções transversais molhadas foi utilizado um Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP, modelo M9), com exceção da seção transversal da ponte, onde foi utilizado um guincho hidráulico para detalhamento do fundo do rio devido à grande quantidade de rochas aflorantes nesta seção.

Uma antiga barragem hidrelétrica foi modelada no HEC-RAS como uma estrutura hidráulica com sua respectiva seção transversal, ressaltando-se a possibilidade, por parte do software, de inserção das informações de localização e tamanho de comportas e diques presentes na mesma.

Antes desse processo, cartas de elevação dotadas de curvas de nível com boa resolução (i.e. pouco espaçadas verticalmente) foram digitalizadas e georreferenciadas através de um SIG. Desta forma, pôde-se conjugar o MDE da região de estudo (com resolução de 30 metros), que foi obtido através do banco de dados do INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais), com as cartas de elevação da cidade, cedidas pela Companhia de Saneamento de Alagoas (CASAL). O resultado dessa conjugação foi uma malha irregular de triângulos (TIN) (i.e. estrutura de dados para representação de superfícies contínuas num SIG) com melhor qualidade e resolução dos dados. Através do software SIG ArcMap e do HEC-GEO RAS as seções levantadas topobatimetricamente em campo tiveram suas extensões aumentadas acrescentando-se os dados do relevo disponíveis no TIN nas regiões onde não haviam dados levantados. Tal fato se deu devido à perda de qualidade das imagens de satélite para rastreamentos abaixo de superfícies molhadas. Dessa forma pôde-se aumentar a abrangência das seções, impedindo que altos níveis de água numa possível simulação de cheia atingisse uma cota em que não houvesse dados de topobatimetria suficientemente levantados.

O acréscimo de mais três seções gerou um detalhe melhor do trecho estudado: de montante para jusante, a primeira seção extra se localiza a 20 metros da seção da ponte, com o objetivo de minimizar o efeito do aterro de encontro da ponte, o que poderia interferir nos resultados já que o aterro seria representado por um longo trecho pelo HEC-RAS. A segunda seção extra localiza-se a 1,716 metros a montante da barragem e foi nomeada de “pré-barragem”, tendo o objetivo de representar o fundo do canal natural antes da interferência estrutural da antiga barragem. Por último, a seção extra mais a jusante recebeu o nome de “declividade” devido a sua função principal de representar a inclinação que o canal assume após a barragem. Esta seção foi locada entre a seção da estrutura da barragem e a seção mais a jusante do canal (pós-barragem) na estaca a 950,780 metros desde o ponto final de deságue modelado (a estaca zero, onde se representou a seção “pré-barragem”). Tais seções e seus estaqueamentos são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Seções topobatimétricas levantadas (nota: sentido jusante para montante)

Seções	Pós-Barragem	Declividade	Barragem	Pré-Barragem	Pós-Ponte	Ponte	Fazenda Boa Fortuna
Distância (km)	0	0,951	1,452	1,473	2,640	2,660	4,639

2.4.2 Calibração do Modelo Hidráulico – Através de um GPS (Global Position System) e informações da população local, além de marcas históricas (e.g. Rogger (2012)) a mancha de inundação da cheia de 2010 foi mapeada rastreando-se as coordenadas geográficas de pontos limitantes do alcance da água que adentrou a cidade. Tal levantamento serviu de base para a obtenção das cotas máximas alcançadas pela água através do TIN, de onde se tirou o nível da linha d'água observado para cada uma das seções transversais utilizadas no 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.

Através desse procedimento foi possível realizar a calibração manual do número de Manning objetivando a proximidade entre o nível de água observado com o modelado, utilizando-se como condição de contorno a vazão obtida para a cheia de 2010. Para tanto, utilizou-se a vazão de pico da inundação de 2010, estimado pela distribuição GEV. Em cada uma das seções foram avaliadas rugosidades diferentes para a margem esquerda, direita e para o fundo, adotando-se inicialmente as que mais se adequassem ao tipo e uso do solo no local de acordo com as imagens de satélites e observações em visitas ao local. Posteriormente, a calibração manual seguiu de maneira a aumentar

a rugosidade do canal nas seções em que o nível da água estivesse abaixo do observado na cheia, e baixá-la para as seções com o nível superdimensionado, tornando, esse, um trabalho iterativo.

Ainda como condição da modelagem, adotou-se um regime de escoamento misto devido às características do fluxo observado durante o período das cheias, onde altas velocidades podem eventualmente surgir, de maneira a deixar o escoamento turbulento. Como condição de contorno de jusante adotou-se a declividade média do rio nesse trecho. Já como condição de contorno de montante adotou-se a curva-chave da estação fluviométrica de Boa Fortuna (i.e. mais a montante) que relaciona a profundidade do canal com a vazão correspondente. Considerou-se o escoamento como unidimensional e permanente de vazão constante e temporalidade em dias, de forma a simplificar a realidade sem perder a representatividade.

Sendo assim, o modelo hidráulico teve por finalidade transformar as vazões de entrada em níveis e perfis de linha d'água para posteriormente servir para a delimitação das manchas de inundações num SIG de maneira a definir o possível alcance da água ao longo da cidade em situações de vazões extremas.

2.5 Delineamento da Mancha de Inundação – A partir de softwares de geoprocessamento, como o aplicativo ArcGisTM da ESRI, é possível adicionar expansões para gerar interações entre alguns modelos. Neste caso se aplicou o HEC-GeoRAS 4.3 que importa os resultados obtidos do HEC-RAS 4.3. Este aplicativo tem a capacidade gerar informação espacial gráfica de áreas inundadas sob o TIN a partir da interseção do nível de água estimado com as seções transversais.

O pós-processamento do HEC-GeoRAS envolve a formação de vários produtos como perfis de superfície da água estimados pelo HEC-RAS em formato TIN, este TIN é comparado com o TIN do terreno para definir áreas alagadas, posteriormente eles são transformados em formato GRID, assim cada célula da superfície da água é comparada com a do terreno, se a cota da superfície da água for maior, é dado como área alagada [Sarhadi et al. (2012)].

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Vazão Estimada – Após a retirada de falhas da amostra, teste de aderência e homogeneidade (e.g. Lu e Stendiger (1992)), aproveitou-se quase que a totalidade dos dados disponíveis para a bacia hidrográfica do Mundaú. Para a cota lida na seção fluviométrica Fazenda Boa Fortuna durante o evento da cheia de 2010 (i.e. 11,50 m) obteve-se, a partir de GEV, a vazão de 1233 m³/s e o TR correspondente à 200 anos.

Pode-se perceber a intensidade do evento ocorrido em 2010, dentre outras, na cidade de Rio Largo, onde se observa uma vazão de pico aproximada a vazão para um tempo de recorrência de 200 anos. Tal fato reflete a destruição e as mortes geradas por tamanha cheia numa cidade sem um tipo de zoneamento de urbanização contra o risco a desastres.

3.2 Dados De Entrada Do Modelo Hidráulico – As seções topobatimétricas levantadas foram utilizadas de forma a corrigir os dados da geometria do fundo do canal disponíveis através do TIN da região. A condição de contorno à montante foi a curva-chave da estação fluviométrica de Boa Fortuna, já a de jusante, a declividade a jusante da seção Fazenda Boa Fortuna (i.e. 2,10E-3 m/m).

3.3 Calibração do Modelo Hidráulico – Através do levantamento dos pontos da mancha observada durante a cheia de 2010, pôde-se observar, com o auxílio no TIN do terreno, as cotas atingidas pela água na ocasião da inundação para cada seção. Para se atingir no HEC-RAS o nível mais próximo do observado durante o evento, a calibração do Número de Manning foi realizada manualmente baseada em tabelas de referências de rugosidades mais frequentes e acusou as seguintes grandezas Tabela 2:

Tabela 2 - Valores do coeficiente de Manning (nota: sentido montante para jusante)

Seções	Margem Esquerda	Canal	Margem Direita
Fazenda Boa Fortuna	0,12	0,176	0,12
Ponte	0,15	0,176	0,08
Pós-Ponte	0,15	0,176	0,08
Pré-Barragem	0,15	0,176	0,08
Declividade	0,15	0,07	0,15
Pós-Barragem	0,15	0,07	0,15

Os resultados do coeficiente de Manning foram moldados levando em conta a falta de dados de área inefetiva, logo, houve uma compensação no valor do coeficiente de Manning para aproximar-se da inundação de 2010 usada como meio para calibração. Dados de áreas inefetivas entre outros detalhes elevam consideravelmente o custo técnico e financeiro do estudo.

As limitações do modelo são relacionadas ao escoamento constante no tempo (i.e. permanente é apenas opcional), recursos gráficos limitados a 500 pontos por seção, escoamento unidirecional (1-D) (i.e. limita o uso para estruturas hidráulicas que possuam mais de uma direção), e simulação só possível em locais com menos de 10 % de inclinação.

3.4 Modelagem da Mancha de Inundação – De posse da modelagem hidráulica executada pelo HEC-RAS para a cheia de 2010, onde foram obtidas as cotas das linhas d'águas para cada seção transversal, utilizou-se a expansão HEC-GEO RAS para realizar a conexão entre o modelo hidráulico e o SIG. Através desse procedimento, o HEC-GEO RAS gera a área de espraiamento (i.e. mancha de inundação) de forma a demonstrar o avanço do espelho d'água através da cidade de Rio Largo de acordo com as informações do perfil hidráulico obtido (Figura 2).

A modelagem deu resultados confiáveis mesmo que o método de calibração do modelo não tenha utilizado imagens de inundações históricas e sim levantamentos in situ; o uso de SIG no pré e pós-processamento foi um fator facilitador para o processamento e visualização dos resultados.

Os resultados da calibração tiveram uma boa aproximação na região urbana, em alguns pontos como no início da cidade (sentido montante para jusante) e na área central houve uma desconformidade, isto pode ser devido à não suficiência de seções topobatimétricas que representassem melhor o local, a não inserção de áreas inefetivas ou a provável causa, que foi alteração na topografia da região, já que as cartas utilizadas são de 1978. Durante os eventos de cheia de 2000 e 2010 a seção transversal da Fazenda Boa Fortuna sofreu no mínimo duas modificações na sua geometria, o que altera também a rugosidade, podendo colocar incertezas nas estimativas de descarga [Di Baldassarre e Montanari (2009)], em uma escala muito grande. Tais fatores não foram suficientes a ponto de invalidar o trabalho.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS – A distribuição de probabilidade utilizada (i.e. GEV) se mostrou robusta e aplicável à região, visto que se pôde obter um resultado a partir de um conjunto de dados limitados. Porém, deve-se salientar a necessidade de dados minimamente corretos para um resultado coerente com a realidade.

Neste estudo foi possível mostrar que, mesmo para uma região com poucos dados disponíveis, é válida a tentativa de busca de alternativas e soluções para um mapeamento de áreas de inundação. A partir de dados de livre acesso (i.e. grátis), alguns levantamentos de campo e o uso de softwares de ampla divulgação no meio técnico podem-se obter calibrações de modelos para certa região ou Bacia Hidrográfica. Partindo dos parâmetros calibrados, demais vazões respectivas a outros tempos de retorno podem ser modeladas de maneira a se obter perspectivas de inundação dentro de certos

Tempos de Retorno para o evento. Esse é um fator importante dentro dos processos de zoneamento de risco, planejamento de ocupação urbana, sistema de alerta e prevenção de catástrofes.

Os resultados demonstraram que a cidade de Rio Largo possui uma situação preocupante em relação a risco de inundação, pois a ocupação urbana pode ser afetada dependendo do nível crítico. Torna-se então necessário que medidas para o controle da inundação sejam tomadas.

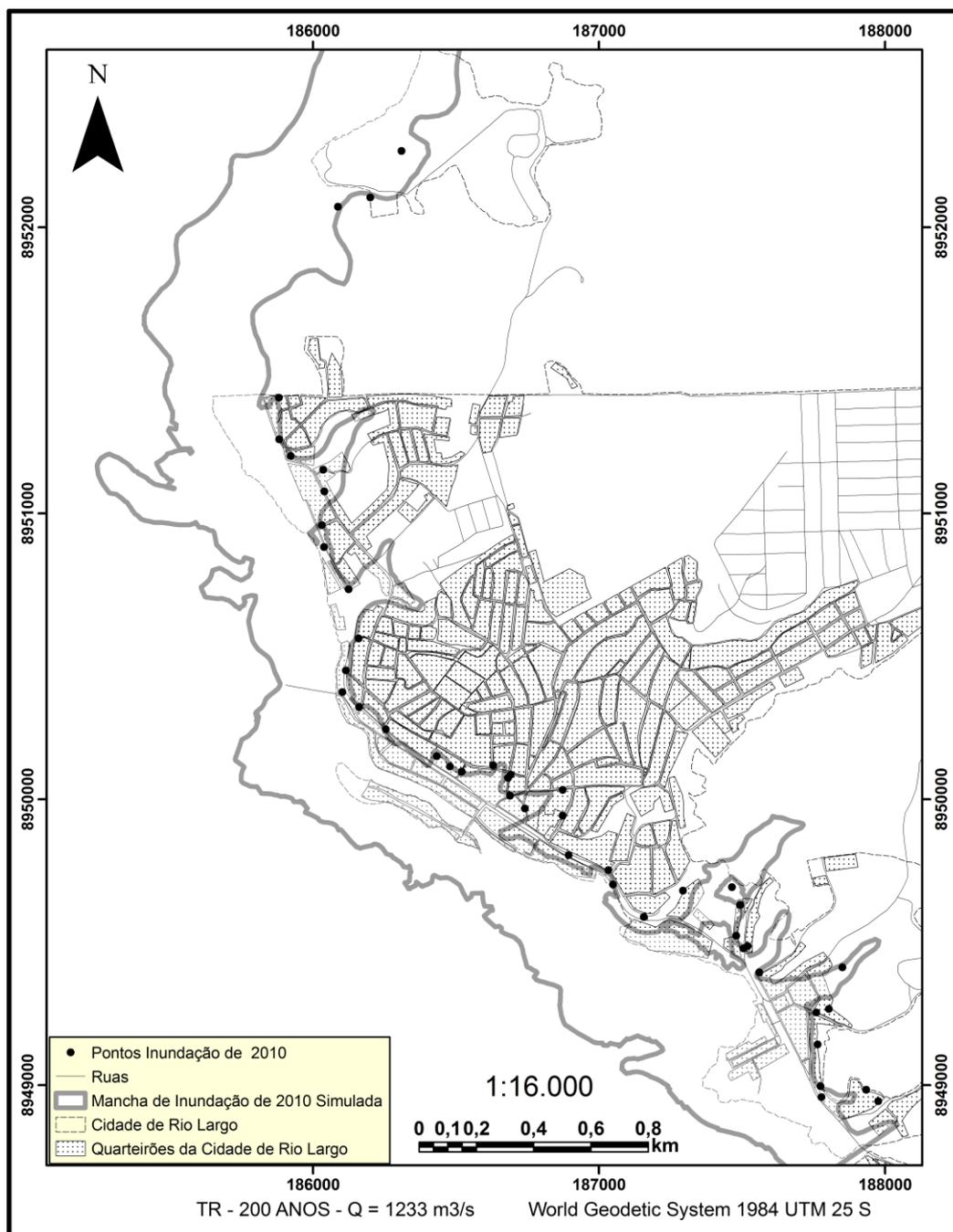


Figura 2 - Ajuste da modelagem hidráulica com os pontos da inundação de 2010. Área da mancha corresponde a 2.23 km².

5. AGRADECIMENTOS – Agradeço a todos os co-autores pelos conhecimentos compartilhados e trabalhos divididos, assim como a todos que, de alguma forma, foram essenciais para o estudo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 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*, 403: 103-115, 2011.
- CASTILHO, A.S., *et al.* Utilização de modelo hidráulico associado a um SIG para a definição de áreas inundáveis na cidade de Governador Valadares, Minas Gerais. In: Anais XVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. João Pessoa: 1-20, 2005.
- DANISH HYDRAULIC INSTITUTE. MIKE11 GIS Reference and User Manual. DHI: Horsholm, 1997.
- DI BALDASSARRE, G.; MONTANARI, A. Uncertainty in river discharge observations: a quantitative analysis. *Hydrology and Earth System Sciences*, 13: 913–921, 2009.
- FRAGOSO JÚNIOR, C.R.; *et al.* Reflexões sobre a cheia de junho de 2010 nas bacias do rio Mundaú e Paraíba. In: *X Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste*. Fortaleza: 20 p.
- GOVERNO DO ESTADO DE ALAGOAS. Programa de reabilitação e reconstrução do estado de Alagoas: Diagnóstico da região das bacias dos Rios Mundaú e Paraíba. PNUD e Governo do estado de Alagoas: 1990.
- GRIMALDI, S.; *et al.* Flood mapping in ungauged basins using fully continuous hydrologic–hydraulic modeling. *Journal of Hydrology*, 487: 39-47, 2013.
- HAGELSTEEN, M.; BECKER, P. Challenging disparities in capacity development for disaster risk reduction. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 3: 4-13, 2013.
- HALCROW. ISIS Flow User Manual. 1997.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Censo 2010.
- KATZ, R.W.; *et al.* Statistics of extremes in hydrology. *Advances in Water Resources*, 25: 1287–13-4, 2002.
- LU, L.-H.; STENDIGER, J.R. Sampling variance of normalized GEV/PWM quantile estimators and a regional homogeneity test. *Journal of Hydrology*, 138: 223-245, 1992.
- 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*, 456-457: 30-43, 2012.
- SARHADI, A.; *et al.* Probabilistic flood inundation mapping of ungauged rivers: Linking GIS techniques and frequency analysis. *Journal of Hydrology*, 458-459: 68-86, 2012.
- US ARMY CORPS OF ENGINEERS (USACE). HEC-RAS: River analysis system: applications guide. USACE, Davis: 351 p, 2010.