

REVISTA AIDIS

de Ingeniería y Ciencias Ambientales:
Investigación, desarrollo y práctica.

ACOPLAMIENTO DE MODELO HIDROLÓGICO E HIDRÁULICO A PARTIR DE DATOS DE SATÉLITE TRMM NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PARAÍBA DO MEIO (AL/PE)

Tainara Ramos da Rocha Lins de Brito ¹
Rosângela Sampaio Reis ¹
* Samuellson Lopes Cabral ²

HYDROLOGICAL AND HYDRAULIC MODEL COUPLING FROM SATELLITE TRMM DATA IN THE PARAÍBA DO MEIO RIVER BASIN (AL/PE)

Recibido el 16 de mayo de 2018; Aceptado el 12 de noviembre 2019

Abstract

This work comprised the application of hydrological and hydraulic models to precipitation amount and intensity data from the TRMM satellite over the Paraíba do Meio river basin, with the purpose of mapping the Atalaia municipality areas susceptible to flood inundation. The procedure involved extending GIS environment operating models, aimed at improving data handling and visualization, based on altimetric and supplementary information obtained in the field at the expense of local authorities. The hydrological model calibration presented high significance when applied to former flood events in the basin (2000 and 2010). Its validation attained satisfactory results in the Atalaia River post for the adjusted satellite series ("TRMM + Postos"), with a Nash Sutcliffe Efficiency Coefficient (NSE) of 0.91. Model calibration consisted of adjusting Manning Coefficients to channel margins and bed, based on field raised flood marks and maximum flow records at Atalaia station during the 2010 event. Model validation, for its part, considered the adjusted Manning Coefficients and the hydrogram generated by hydrological simulation of the adjusted satellite series ("TRMM + Postos"). As a result, the inundation flood mapping of the locations related to the 2010 event indicates that a large part of Atalaia flooded area is located within the river floodplain and is susceptible to future high-level floods.

Keywords: coupling models, flooded áreas, GIS, HEC-HMS, HEC-RAS.

¹ Universidade Federal de Alagoas – UFAL, Maceió, Alagoas, Brasil.

² Centro de Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais – CEMADEN, São José dos Campos, São Paulo, Brasil.

*Autor correspondente: Centro de Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais - CEMADEN, Estrada Doutor Altino Bondesan, 500 - Distrito de Eugênio de Melo, CEP: 12247-016, São José dos Campos, São Paulo, Brasil.

Email: samuellson.cabral@cemaden.gov.br

Resumo

Este trabalho consistiu no acoplamento de modelos hidrológico e hidráulico a partir de dados de precipitação e nas estimativas de intensidade de precipitação do satélite TRMM na bacia do rio Paraíba do Meio, visando o mapeamento das áreas inundáveis do município de Atalaia para detecção das áreas atingidas pela água quando o rio atinge níveis elevados. Este procedimento foi realizado através de extensões de modelos que operam em ambiente SIG, permitindo uma melhor manipulação e visualização dos resultados, a partir de dados altimétricos e informações obtidas em campo por uma empresa às expensas de autoridades locais. O modelo hidrológico demonstrou boa representatividade na calibração em relação a eventos de cheia na bacia (2000 e 2010). A validação deste demonstrou resultados satisfatórios no posto fluviométrico Atalaia para a série corrigida do satélite (“TRMM+Postos”), exibindo um coeficiente de eficiência de Nash Sutcliffe – COE – de 0.91. O modelo hidráulico teve sua calibração baseada nos ajustes dos coeficientes de Manning para as margens e fundo do canal, a partir das marcas de cheia levantadas em campo e pela vazão máxima registrada no posto Atalaia durante o evento de 2010, enquanto a validação partiu do coeficiente de Manning ajustado e do hidrograma gerado na simulação hidrológica a partir da série corrigida do satélite (“TRMM+Postos”). O mapeamento das áreas inundadas referente ao evento de 2010, permitiu identificar que boa parte da área inundada de Atalaia, encontra-se inserida na planície de inundação do rio estando suscetível à ocorrência de novas inundações para cotas elevadas.

Palavras chave: acoplamento de modelos, áreas inundadas, HEC-HMS, HEC-RAS, SIG.

Introdução

O desenvolvimento da infraestrutura das cidades não acompanhou o crescimento demográfico que vem intensificando o grau de urbanização em áreas ribeirinhas conforme observado por Brito (2017), expondo a população à ocorrência de desastres ambientais e/ou prejuízos econômicos decorrentes dos elevados índices pluviométricos registrados nos últimos anos (Tucci, 2012).

A partir de dados observador por Brito (2017), observa-se que esse cenário de ocupação desordenada e conseqüente alteração do regime hidrológico, vem sendo objeto de estudo em diversos trabalhos realizados em bacias hidrográficas localizadas no estado de Alagoas, como nas bacias do rio Mundaú (Monte *et al.*, 2016; Oliveira *et al.*, 2014; Fragoso Jr *et al.*, 2010), do rio Jacarecica (Peplau, 2005) e do rio Paraíba do Meio (Santos, 2016; Oliveira *et al.*, 2014; Gama, 2011; Fragoso Jr *et al.*, 2010).

A frequência na qual os desastres ocorrem é um dos fatores limitantes no processo de urbanização, visto que, quando a frequência é baixa a população despreza os riscos de ocorrer um novo desastre e acaba ocupando progressivamente áreas mais vulneráveis à ocorrência de desastres (Brito, 2017). Assim, a urbanização desordenada se torna um dos agravantes na dinâmica hídrica de uma bacia hidrográfica, devido principalmente à impermeabilização do solo e ao aumento do volume e velocidade do escoamento superficial, provocando a ascensão da vazão dos rios e dos seus níveis, de modo a atingirem o seu leito maior geralmente ocupado pela população ribeirinha.

Conforme levantamentos realizados por Brito (2017), observa-se que na bacia hidrográfica do rio Paraíba do Meio ocorreram grandes inundações ribeirinhas, como as registradas em 1969, 1988, 1989, 2000, 2010 e 2017 com registros de óbitos e grandes prejuízos, retratando a vulnerabilidade na qual a bacia está exposta.

Nesses casos, o acoplamento de modelos hidrológicos e hidráulicos em ambiente SIG (Sistema de Informação Geográfica) representa uma ferramenta fundamental no processo de mapeamento das planícies inundáveis (Brito, 2017; Falck *et al.*, 2015; Muñoz & Valeriano, 2015; Monte *et al.*, 2016; Holz, 2010), essencial no planejamento e elaboração do Plano Diretor das cidades, onde as áreas de riscos são previamente conhecidas e a ocupação nessas regiões deve ser controlada. Ainda assim, uma forma de identificar essas áreas, quando não há informações topográficas obtidas em campo, é através de informações do relevo por meio do processamento de Modelos Digitais de Elevação (MDE) (Muñoz & Valeriano, 2015; Nóbrega *et al.*, 2008).

O mapeamento de áreas inundáveis depende de um prévio estudo hidrológico da região que está sujeito à disponibilidade de informações locais, retratando a deficiência das redes de monitoramento hidrológico espalhadas pelo Brasil (Tucci, 2012), onde a disponibilidade e representatividade dos dados em algumas regiões, principalmente em áreas rurais, ainda são escassas.

Nesse sentido, as informações fornecidas pelo produto 3B42 (registros a cada 3 horas com resolução espacial de 0,25° x 0,25°) do satélite TRMM (*Tropical Rainfall Measuring Mission*) representa um dos produtos frequentemente utilizados nos últimos anos como fonte de dados para estudos hidrológicos a partir das estimativas de precipitação em locais com poucos registros ou até mesmo na ausência deles (Brito, 2017; Falck *et al.*, 2015; Pereira *et al.*, 2013; Nóbrega *et al.*, 2008; Collischonn, 2006; Kummerow *et al.*, 2000). Embora o satélite TRMM tenha encerrado suas operações em 2014, ainda há outros satélites em órbita fazendo esse mesmo tipo de medição ao gerar informações de precipitação que podem ser utilizadas em estudos semelhantes a este ou que necessitem de informações pluviométricas com uma boa resolução espacial.

Conforme observado por Brito (2017), o processo de mapeamento das áreas inundáveis representa um importante instrumento na gestão das cidades por indicar as áreas mais suscetíveis à ocorrência de inundações, cabendo aos gestores a adoção de medidas específicas que visem reverter este quadro de ocupação desordenada bem como dos riscos atrelados às áreas com potencial risco de inundação.

Desta forma, este artigo apresenta um estudo de caso em um município inserido na bacia hidrográfica do rio Paraíba do Meio a partir do acoplamento de modelos hidrológico e hidráulico em ambiente SIG, baseado nas análises dos dados do satélite TRMM ao considerar como

referências as cheias ocorridas em 2000 e 2010, seguido de um mapeamento das áreas ribeirinhas que apresentam potencial risco de inundação no município de Atalaia – AL.

Este artigo apresenta parte dos resultados da Dissertação de Mestrado intitulada “Modelagem hidrológica e hidráulica a partir de dados TRMM aplicada a análise de risco em áreas inundáveis: estudo de caso no município de Atalaia” finalizada em 2017, na qual considerei o município de Atalaia, interior de Alagoas, como área de estudo na análise do comportamento dos dados do satélite TRMM aplicados às modelagens hidrológica e hidráulica.

Metodologia

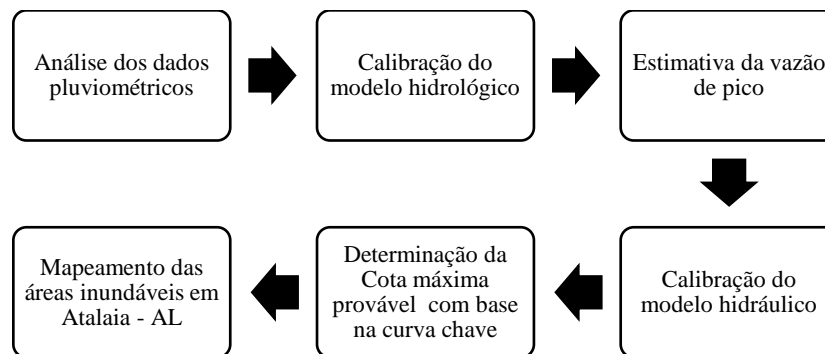


Figura 1. Fluxograma das etapas e informações necessárias para realização do mapeamento das áreas inundáveis no Município de Atalaia-AL.

Área de estudo

A bacia hidrográfica do rio Paraíba do Meio possui uma área de aproximadamente 3.200 km², localizada entre os estados de Pernambuco e Alagoas. A bacia apresenta duas regiões bem distintas: parte alta da bacia, localizada na porção Pernambucana é caracterizada por uma região semiárida, já a parte média e baixa da bacia está inserida em uma região de mata atlântica alcançando o litoral, porção Alagoana da bacia. Suas águas são drenadas pelo rio principal, com aproximadamente 122 km de extensão (Figura 2).

O regime pluviométrico da região da bacia tem como época mais chuvosa o período iniciado no mês de Abril e finalizado no mês de Agosto, período este conhecido como a quadra chuvosa da região. Conforme levantamento por Brito (2017), às margens do rio Paraíba do Meio há registros de ocupação sem o devido planejamento de muitas famílias carentes e, até mesmo, de construções inadequadas, tornando essa uma área de risco principalmente pelo histórico de cheias já registrado nessa bacia (1969, 1988, 1989, 2000, 2010 e 2016).

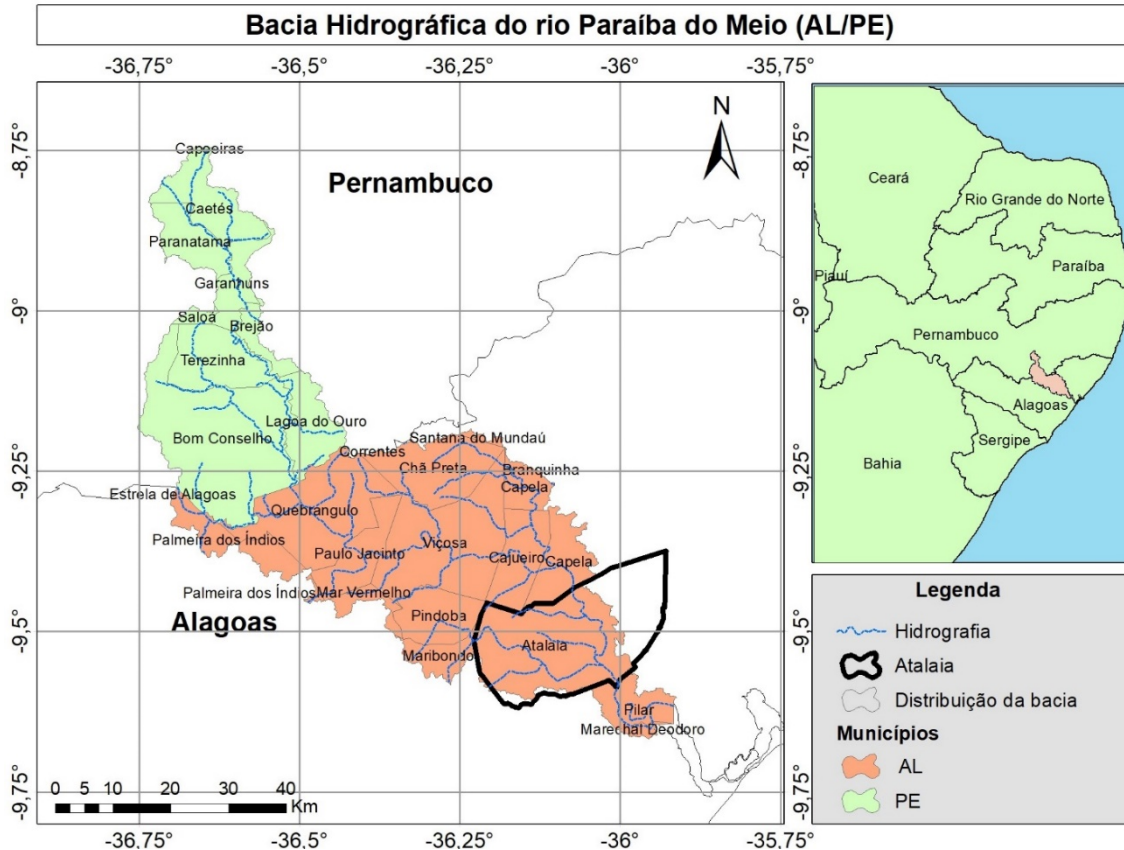


Figura 2. Localização da bacia do rio Paraíba do Meio (AL/PE) e representação do município de Atalaia na bacia.

Em sua extensão territorial há diferentes tipos de solo, como argilossolo vermelho-amarelo distrófico, latossolo amarelo, neossolo regolítico e planossolo háplico, que, juntamente com o tipo de uso e ocupação do solo, são responsáveis pelos processos de infiltração, armazenamento e escoamento superficial na bacia hidrográfica (Brito, 2017).

Um dos últimos municípios alagoanos que integram a bacia do rio Paraíba do Meio é o município de Atalaia com aproximadamente 528.8 km² de área (Figura 2), cujo trecho do rio que corta o município é conhecido como Riacho Brejão, representando um dos Municípios cuja população mais sofre com a ocorrência de inundações devido, principalmente, ao elevado grau de ocupação às margens do rio. Segundo censo demográfico levantado pelo IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística) em 2010, Atalaia apresentava uma população total de 44322 habitantes, onde 49.3% dos habitantes residiam na zona rural e 50.7% na zona urbana.

Dados pluviométricos e fluviométricos

O período escolhido por Brito (2017) para estudo hidrológico e hidráulico corresponde à cheia ocorrida em junho de 2010 que atingiu as bacias dos rios Mundaú e Paraíba do Meio, embora neste trabalho tenha sido considerado apenas a influência da cheia na bacia do rio Paraíba do Meio devido à carência de estudos relevantes nessa bacia. Outro evento, a cheia ocorrida entre julho e agosto de 2000 na mesma região, também precisou ser selecionado para que o modelo hidrológico fosse calibrado. Esse evento ocorrido em 2000 foi escolhido devido à disponibilidade de dados pluviométricos e fluviométricos sem falhas referentes ao período utilizado.

Após a seleção dos dados diários dos postos pluviométricos (série “Postos”) e fluviométricos que apresentassem informações acerca dos eventos, foram selecionados dados diários de 7 estações pluviométricas (Tabela 1) e 3 fluviométricas (Tabela 2), inseridas na área de contribuição da bacia do rio Paraíba do Meio, disponibilizadas pela ANA, APAC-PE e pelo ITEP.

Tabela 1. Informações dos postos pluviométricos.

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

Tabela 2. Informações dos postos fluviométricos.

Código	Posto	Latitude (°)	Longitude (°)	Altitude (m)	Área de Drenagem (km ²)	Rio	Estado	Responsável	Operador
39850000	Quebrangulo	-9.32	-36.47	--	1340	Paraíba	Alagoas	ANA	ANA
39860000	Viçosa	-9.38	-36.25	212	1970	Paraíba	Alagoas	ANA	CPRM
39870000	Atalaia	-9.51	-36.02	54.14	2600	Paraíba	Alagoas	ANA	CPRM

Em relação aos dados fluviométricos, a bacia apresenta uma deficiência por possuir apenas 3 (três) estações fluviométricas em operação (Tabela 2), concentradas na porção média e baixa da bacia, onde o município de Atalaia está localizado, de modo a não existir registros de vazão na parte alta da bacia (Figura 3).

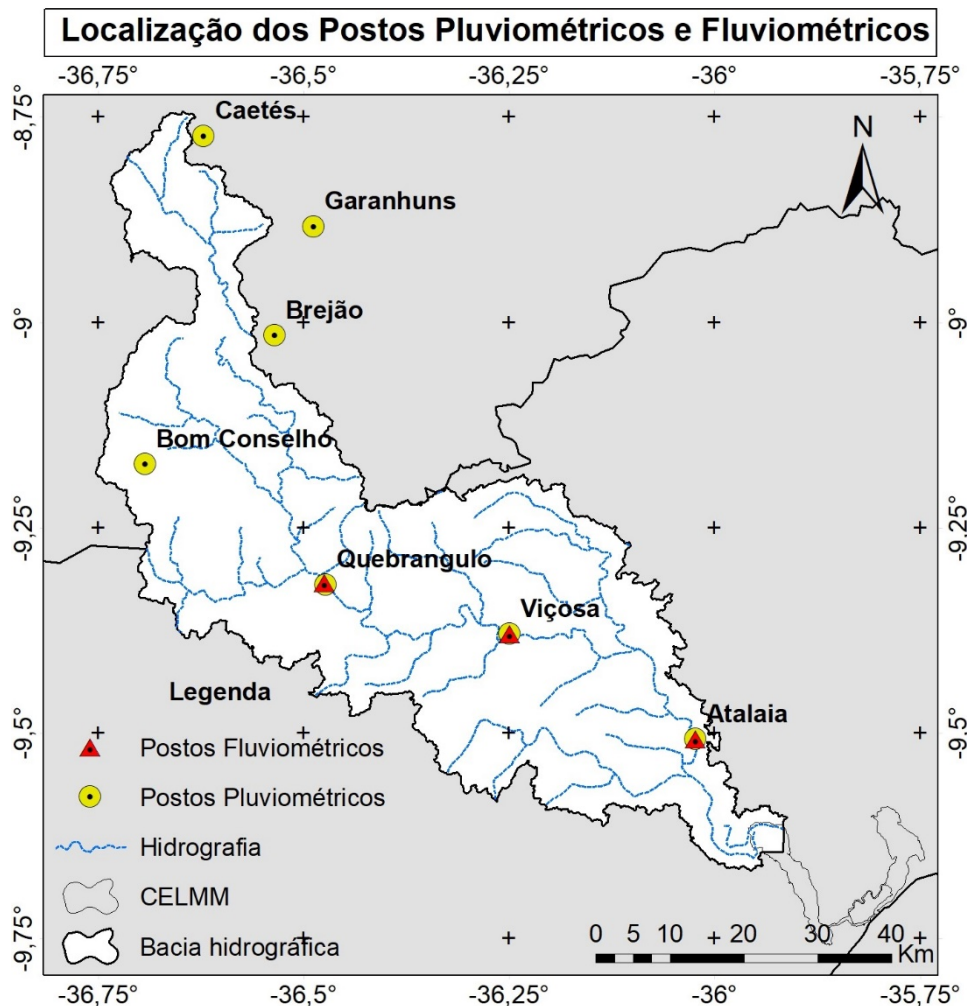


Figura 3. Distribuição dos postos pluviométricos e fluviométricos na bacia e representação dos pontos de grade representando a resolução do satélite TRMM ($0,25^\circ \times 0,25^\circ$).

Estimativa da precipitação

As estimativas de intensidade pluviométrica pelo satélite foram obtidas através do produto 3B42 que fornece informações a cada 3 horas com resolução espacial de $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ (Figura 3). A partir dessas informações duas séries de dados foram criadas em relação ao período do evento ocorrido em 2010 na bacia do rio Paraíba do Meio – séries “TRMM” e “TRMM+Postos”. A primeira delas é composta pela soma (a cada 3 horas) das informações referentes a um dia (24h) para cada um dos pixels que compõem a região da bacia; enquanto que a segunda série foi criada ao considerar os dados dos pluviômetros existentes na região no processo de correção dos dados do satélite como descrito em Collischonn, 2006.

Desta forma, Brito (2017) nomeou da seguinte forma as séries de dados utilizadas durante suas simulações: a série de dados “TRMM” criada, refere-se à chuva diária registrada durante todo o mês de junho de 2010 e, visando simplificar as operações, a série “TRMM+Postos”, criada após correção dos dados do satélite pelas informações dos postos pluviométricos existentes na região, refere-se apenas aos dias de ocorrência do evento (17 a 23 de junho de 2010). Segundo Brito (2017), a intenção de criar esses dois grupos de dados foi analisar a diferença entre as séries com dado bruto (“TRMM”) e dado corrigido (“TRMM+Postos”) do satélite para, posteriormente, verificar suas possíveis influências na modelagem hidrológica, a fim de identificar qual série seria capaz de melhor representar o comportamento hidrológico da bacia.

Modelagem hidrológica

Durante o processamento hidrológico, foi utilizado o modelo hidrológico HEC-HMS (*Hydrologic Engineering Center – Hydrologic Modeling System*) versão 3.4. Para realizar a modelagem, foi necessário identificar as características fisiográficas da bacia (divisão da bacia em sub-bacias e identificação das características de cada delas: área, tempo de concentração, trechos dos rios, comprimento e declividade dos rios de cada uma das sub-bacias, por exemplo) que foram obtidas através de uma extensão do HEC-HMS integrada ao software de geoprocessamento ArcMap, o HEC-GeoHMS na versão 5.0.

A bacia foi dividida em 41 sub-bacias a partir de um modelo digital de elevação (MDE) com resolução espacial de 30 metros, obtido do Projeto TOPODATA do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Para cada sub-bacia foi calculado o parâmetro CN (*Curve Number*) médio necessário para utilização do método Soil Conservation Service (SCS), um dos módulos inseridos no HEC-HMS destinados à obtenção da parcela da precipitação que tenderá a escoar superficialmente com base nas características da bacia.

A obtenção desse parâmetro para as sub-bacias partiu do cruzamento entre o mapa de tipos de solo da região levantado pelo IBGE (2001) e imagens do satélite Landsat 5, datada em 17 de março de 2011, utilizadas na classificação do uso e ocupação do solo da região através do índice NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*), uma vez que, a área de estudo se trata de uma bacia rural e o índice de vegetação é considerado um eficiente indicador dos tipos de vegetação existentes na região.

De acordo com Brito (2017), a calibração do modelo baseou-se na cheia ocorrida em 2000, sendo realizada de forma automática pelo método do Gradiente Univariado e pela função-objetivo Erro Percentual nos Picos por apresentarem melhores resultados na representação de vazões máximas (Sifontes & Moya, 2012; Kathol *et al.*, 2003). O hidrograma de cheia foi obtido a partir da aplicação do método do Hidrograma Unitário Adimensional do NRCS (SCS-HU) inserido no HEC-HMS, que considera como parâmetro apenas o tempo de retardo da bacia (Tlag).

Os parâmetros testados no processo de calibração do modelo hidrológico foram o CN de cada sub-bacia e o Lag Time de cada trecho de rio das sub-bacias. No ajuste do parâmetro CN, foi testado a qualidade dos resultados ao calibrar o parâmetro de cada sub-bacia ou, simplesmente, buscou-se otimizar um valor, o fator de escala do CN, a ser multiplicado pelo valor inicial de cada CN das sub-bacias. Já em relação ao Lag Time dos rios, foi testado a calibração selecionando todos os trechos de rio da bacia ou, apenas, o trecho correspondente à localização da estação fluviométrica de Atalaia adotada no processo de calibração do modelo (maiores detalhes a respeito da calibração do modelo podem ser observados em Brito (2017)). O município de Atalaia foi escolhido para análise dos efeitos dessa cheia por ser um município com um grau de ocupação ribeirinha elevado e, por sua proximidade ao exutorio da bacia (Figura 2) localizado na laguna Manguaba (Brito, 2017).

Os parâmetros obtidos na calibração foram avaliados a partir da simulação hidrológica ao utilizar as informações de vazão disponíveis do evento ocorrido em 2010. A qualidade da simulação do modelo calibrado, foi fundamentada em análises estatísticas segundo: cálculo do coeficiente de eficiência de Nash Sutcliffe – COE – e cálculo do desvio padrão – DP, juntamente com os métodos gráficos e de dispersão para análise do desempenho do modelo (Brito, 2017).

Segundo Brito (2017), o coeficiente COE (Equação (1)) foi utilizado na avaliação do ajuste do modelo aos parâmetros calibrados, por ser frequentemente utilizado no ajuste de modelos hidrológicos e por representar uma modificação padronizada do R^2 (Boltokoski *et al.*, 2010; Collischonn & Tucci, 2003; Krysanova *et al.*, 1998). Seu valor pode variar de negativo infinito a +1, sendo o valor +1 indicativo de um ajuste perfeito, podendo ser considerado como um ajuste muito bom já entre 0.7-0.8 (Krysanova *et al.*, 1998).

$$COE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs} - Q_{sim})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs} - \bar{Q}_{sim})^2} \quad \text{Equação (1)}$$

Onde

Q_{obs} : Vazão observada no posto fluviométrico

Q_{sim} : Vazão simulada pelo modelo hidrológico

A validação do modelo foi realizada com base nos cenários que apresentaram os melhores resultados na calibração do modelo ao inserir as informações fisiográficas das sub-bacias e os dados de chuva disponíveis para o evento de 2010 (“Postos”, “TRMM” e “TRMM+Postos”) no modelo hidrológico. Essa simulação foi feita buscando analisar a representatividade dos parâmetros calibrados na geração dos hidrogramas a partir das diferentes séries de dados pluviométricos disponíveis (Brito, 2017).

Modelagem hidráulica e mapeamento de áreas inundáveis

Em seu estudo, Brito (2017) optou por considerar apenas o trecho correspondente ao município de Atalaia às margens do rio, devido ao principal objetivo do estudo em mapear as áreas inundáveis dessa região.

O modelo hidráulico utilizado para simulação das cotas do rio Paraíba do Meio no trecho correspondente à área de estudo corresponde ao HEC-RAS (Hydrologic Engineering Center – River Analysis System) versão 4.0. Maiores detalhes a respeito das funções do modelo podem ser vistos em HEC-RAS (2010).

Uma extensão do HEC-RAS associada ao software de geoprocessamento ArcMap, o HEC-GeoRAS, foi utilizado durante a etapa da modelagem hidráulica visando auxiliar o processo de geração da mancha de inundação da área analisada ocasionada pela cheia registrada em 2010. Essa extensão, além de permitir a extração das informações das seções topobatimétricas do canal, necessárias para a simulação no modelo hidráulico, permite uma melhor visualização das variações das cotas alcançadas pela vazão inserida no modelo a partir da geração de manchas de inundação a cada tentativa de calibração dos coeficientes de rugosidade (coeficiente de Manning – n), referentes às margens e fundo do canal, até que estes fornecessem cotas próximas às cotas registradas durante a inundação ocorrida em 2010.

A simulação hidráulica nesse modelo requer a inserção de algumas informações básicas como o hidrograma de montante utilizado (oriundo da modelagem hidrológica) como condição de contorno, dados sobre as seções topobatimétricas do canal e os coeficientes de rugosidade das margens e do fundo do canal a serem ajustados durante a calibração para cada uma das seções analisadas.

Em 2013 um estudo foi realizado pela ENGEMAP, às expensas da SEMARH – AL (Secretaria de Estado do Meio Ambiente e Recursos Hídricos do Estado de Alagoas), às margens dos rios Paraíba do Meio e Mundaú, motivado pela inundação registrada em 2010 às margens desses rios.

As informações topobatimétricas do trecho do rio Paraíba do Meio que passa pelo município de Atalaia obtidas pela empresa durante o levantamento em campo, foram utilizadas como dados de entrada no modelo hidráulico para realização das simulações nesse trecho do rio. Além das seções topobatimétricas, curvas de nível com resolução de 5 metros, pontos cotados e marcas de cheia referentes ao evento estudado levantadas em campos (Figura 4) foram utilizadas nas simulações hidráulicas e, principalmente, durante o mapeamento das áreas inundáveis por apresentarem uma melhor resolução e detalhamento da região.

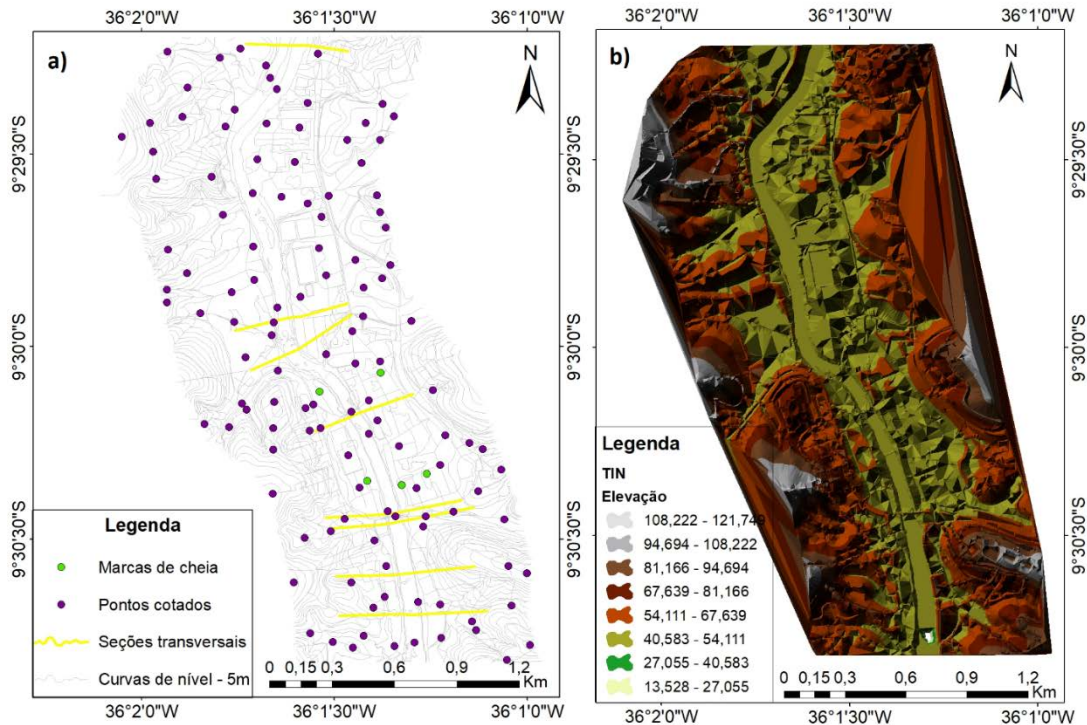


Figura 4. a) Representação do terreno através de curvas de nível e pontos cotados, além da indicação das marcas de cheia e seções transversais (seção 1 (topo da imagen) a seção 8 (seção mais a baixo)) às margens do rio em Atalaia-AL utilizados durante o processamento hidráulico; e **b)** Representação do TIN criado a partir das curvas de nível e pontos cotados.

Conforme pode ser observado em Brito (2017), o processo de calibração foi feito de forma manual a partir da técnica de ajuste “Tentativa e Erro” ao ajustar os valores do coeficiente de Manning (n), único parâmetro calibrado, do fundo e das margens (direita e esquerda) do canal até que a mancha de inundação gerada se aproximasse ao máximo das cotas e marcas de cheia levantadas em campo.

A definição inicial dos coeficientes de Manning, partiu dos valores de referência apresentados por Chow (1959) que melhor retratassem as características do fundo e das margens do canal. Possíveis variações das condições hidráulicas do canal também foram levadas em consideração por Brito (2017) durante a calibração do coeficiente de Manning, uma vez que, alterações na declividade do fundo do canal, presença de pontes, ilhas e obstruções, por exemplo, podem provocar variações.

Após Brito (2017) calibrar o modelo, a qualidade do parâmetro calibrado foi validada ao processar uma nova mancha de inundação considerando agora como condição de contorno o hidrograma

gerado pelo modelo hidrológico a partir dos dados do satélite TRMM (série corrigida “TRMM+Postos”). Brito (2017) optou por utilizar apenas a série corrigida do satélite (“TRMM+Postos”) pela boa correlação apresentada em relação à série de dados observados.

Por fim, o mapeamento das áreas inundáveis no município de Atalaia foi feito de forma simultânea ao processo de calibração e validação do modelo hidráulico, a partir das manchas geradas durante a simulação hidráulica a partir dos dados do posto fluviométrico de Atalaia (Q_{ATALAIA}) e dos hidrogramas provenientes da modelagem hidrológica com os dados do satélite TRMM (Q_{TRMM} e $Q_{\text{TRMM+Postos}}$).

Resultados e discussões

Durante a calibração do modelo hidrológico vários cenários foram criados e testados, mas apenas dois apresentaram resultados satisfatórios na calibração do modelo ao considerarem: (1) otimização dos trechos de rio e otimização do fator de escala do CN para as sub-bacias, ambos a montante de Atalaia e; (2) otimização do trecho do rio imediatamente a montante de Atalaia – R370 – e otimização do fator de escala do CN para as sub-bacias a montante de Atalaia (Brito, 2017).

Como pode ser observado em Brito (2017), os melhores cenários foram utilizados na validação do modelo na região de Atalaia avaliando agora o evento de cheia ocorrido em 2010 (Figura 5), ao considerar as vazões geradas no modelo hidrológico pelas séries de dados pluviométricos disponíveis no período de 15 e 22 de junho de 2010 (“Postos”; “TRMM”; “TRMM+Postos”).

Ademais, uma análise estatística foi realizada a fim de confirmar a eficácia da validação do HEC-HMS ao comparar as vazões simuladas pelo modelo hidrológico com as vazões observadas no posto fluviométrico Atalaia (39870000). A Tabela 3 traz um resumo dessa análise realizada por Brito (2017) a partir das três séries de dados utilizadas na validação do modelo considerando os dois melhores cenários obtidos na calibração do modelo hidrológico.

Desta forma, conforme análises feitas por Brito (2017) ao considerar apenas a visualização dos cenários 1 e 2 (Figura 5) e os resultados da Tabela 3 é possível observar que o cenário 2 foi o cenário que apresentou melhores resultados na validação do modelo para o posto fluviométrico de Atalaia, mostrando ainda uma excelente representatividade dos dados corrigidos do satélite na modelagem (“TRMM+Postos”). Esta análise é fundamentada, principalmente, nos valores encontrados para o COE (Tabela 3), frequentemente utilizado na análise do ajuste de modelos hidrológicos, ao apresentar valores satisfatórios segundo Krysanova *et al.* (1998), que considera como um ajuste muito bom valores de COE entre 0.7 – 0.8 e, nos valores encontrados para o DP, que também apresentaram resultados satisfatórios, uma vez que, seu valor não alterou muito de uma série para outra (Tabela 3), mostrando uma similaridade entre as mesmas.

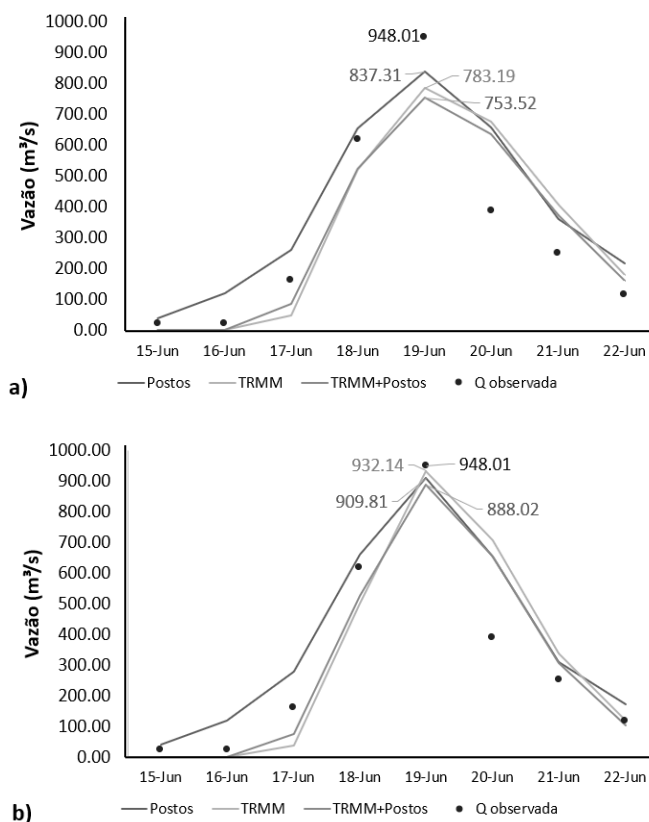


Figura 5. Desempenho das vazões simuladas durante a validação do modelo hidrológico comparados aos dados observados no posto Atalaia (39870000) – a) Cenário 1 e b) Cenário 2.

Tabela 3 - Análise da validação do modelo hidrológico – Posto Atalaia (39870000).

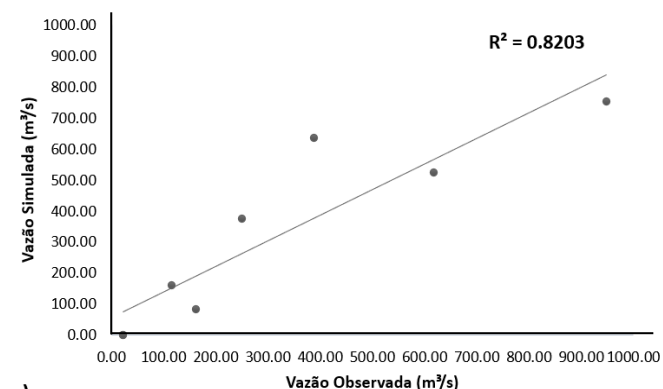
Análise Estatística		Postos	TRMM	TRMM+Postos
Cenário 1	COE	0.86	0.77	0.76
	DP	288.17	307.82	300.27
Cenário 2	COE	0.89	0.87	0.91
	DP	297.69	328.35	318.67

Nota: o COE representa o coeficiente de eficiência de Nash Sutcliffe e o DP o desvio padrão.

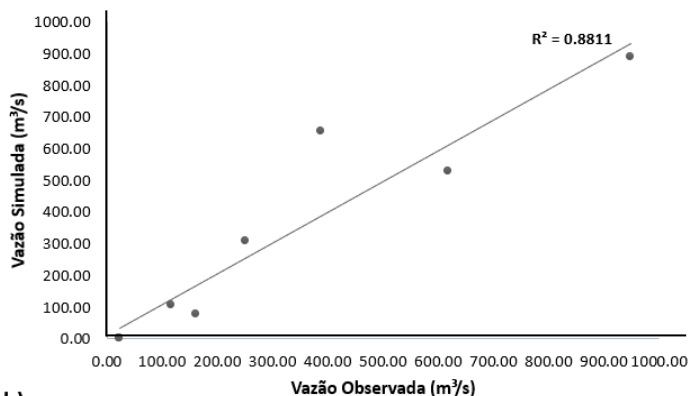
Ainda com base na Figura 5, observa-se no cenário 2 além de um comportamento semelhante entre os hidrogramas gerados, picos de cheia ainda mais próximos ao valor observado pelo posto fluviométrico ($948.01 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) nas três séries de dados utilizadas durante a validação do modelo (“Postos”; “TRMM”; “TRMM+Postos”).

A pesar de a vazão de pico da série bruta do satélite “TRMM” ($932.14 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) ter se aproximado mais da vazão observada no posto Atalaia ($948.01 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) no dia de pico do evento para o Cenário 2 (Figura 5), a simulação hidrológica referente aos outros valores do hidrograma foram menos significativos justificando assim o menor COE obtido para a série “TRMM” em relação à série “TRMM+Postos” (Brito, 2017).

Os diagramas de dispersão ilustrados na Figura 6 foram criados analisando apenas a série corrigida do satélite (“TRMM+Postos”) por ter sido a série com melhores resultados do COE. Conforme analisado por Brito (2017), seu comportamento foi avaliado considerando os dois cenários, de modo a confirmar a melhor representatividade do cenário 2 na simulação hidrológica na bacia, no qual a linha de tendência se ajustou melhor aos dados apresentando um coeficiente de determinação – R^2 de 0.88 contra um R^2 de 0.82 correspondente ao cenário 1.



a)



b)

Figura 6. Dispersão dos dados de vazão observada (Atalaia – 39870000) com os dados de vazão simulada (“TRMM+Postos”) da cheia de 2010 para: a) Cenário 1; e b) Cenário 2.

Segundo as simulações realizadas por Brito (2017), o coeficiente de Manning (n) calibrado para o fundo e margens (direita e esquerda) do canal, a partir da vazão registrada no dia de pico do evento (19/06/2010) pelo posto Atalaia – $948.01 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, foram semelhantes para as seções 1, 2, 3, 7 e 8 (margens 0.17 e canal 0.14), enquanto que as seções 4, 5 e 6 apresentaram os maiores valores (margens 0.30 e canal 0.25).

Os valores obtidos para o coeficiente de Manning que foram superiores aos propostos por Chow (1959) podem ser explicados pela alta concentração de vegetação ao longo da bacia, irregularidades do canal e obstruções do fluxo (Brito, 2017; Mustaffa *et al.*, 2016; HEC-RAS, 2010; Arcement JR. & Schneider, 1984). Segundo Mustaffa *et al.* (2016), características como altura, tipos e condições da vegetação podem ser considerados como fatores que contribuem para alterações nas características do fluxo e da rugosidade no canal (Brito, 2017).

Além da alta concentração de vegetação próxima às margens das seções 4, 5 e 6, os altos valores obtidos para o coeficiente de Manning nessas seções também podem ser justificados pela presença de pontes e por maiores profundidades de fluxo nesse trecho do rio (Brito, 2017). Sabe-se ainda que, quando o nível da água é elevado, o curso d'água tende a atingir áreas com maior cobertura vegetal ou áreas mais rugosas, justificando a elevação do coeficiente de Manning quando a vazão é muito alta e o rio transborda para a planície inundada onde, em geral, o coeficiente de Manning é maior do que no curso d'água em si (Brito, 2017; Mustaffa *et al.*, 2016; Lyra *et al.*, 2010).

Conforme analisado por Brito (2017), os valores do coeficiente geralmente calibrados para as seções transversais, referentes ao fundo e margens do canal, apresentaram ainda valores relativamente próximos aos encontrados por Monte *et al.* (2016) ao estudarem a bacia do rio Mundaú, vizinha à bacia do rio Paraíba do Meio com características físicas, climáticas e de uso e ocupação do solo semelhantes.

A validação do modelo foi feita a partir da série simulada pelo cenário 2 que apresentou melhores valores de COE e DP (Tabela 3) quando comparados aos dados observados no período de 15 a 22 de junho de 2010 – série corrigida dos dados do satélite (“TRMM+Postos”) – com uma vazão de pico simulada de $888.01 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ($Q_{\text{TRMM+Postos}}$), visando produzir uma mancha de inundação com essas informações e compará-la com a mancha produzida na calibração do modelo a partir das informações de vazão do posto Atalaia (Q_{ATALAIA}) referentes ao dia do evento. A simulação hidráulica utilizando como condição de contorno o hidrograma gerado a partir da série bruta do satélite TRMM (Q_{TRMM}) com vazão de pico simulada de $932.14 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, também foi realizada por Brito (2017) com o intuito de analisar a representatividade de todos os dados do satélite analisados em regiões sem nenhuma informação pluviométrica.

As manchas de inundação geradas durante a calibração e validação do modelo hidráulico podem ser observadas na Figura 7, bem como a comparação entre as cotas observadas e simuladas durante o processo de calibração e validação podem ser observadas na Figura 8. A partir das Figuras 7 e 8, é possível observar que a mancha de inundação e a simulação das cotas realizadas por Brito (2017) durante a validação hidráulica (série “TRMM+Postos”) apresentaram resultados satisfatórios em relação às marcas de cheia levantadas em campo e à mancha de inundação gerada na calibração do modelo, onde a cota de 53.06 metros foi a maior obtida durante a validação estando bem próxima à cota de 53.21 metros obtida na calibração do modelo hidráulico.

Observa-se ainda que a mancha gerada por Brito (2017) na simulação hidráulica (Figura 7) a partir do hidrograma proveniente da série “TRMM” apresentou comportamento análogo ao da mancha obtida na calibração do modelo pela proximidade das vazões analisadas, respectivamente, $932.14 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ e $948.01 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$, diferenciando-se apenas em relação à cota máxima de 53.17 metros referente à série “TRMM” contra uma cota de 53.21 metros da calibração (Figura 8).

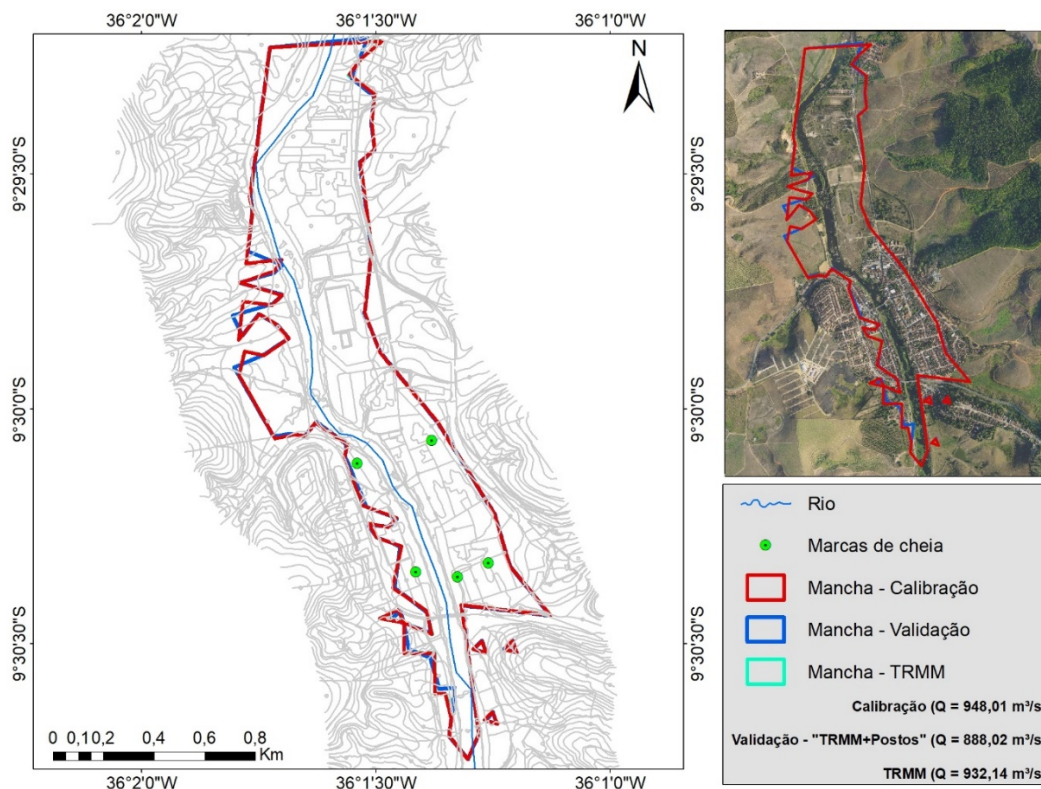


Figura 7. Representação das manchas de inundação geradas na calibração e validação do modelo hidráulico comparadas à mancha proveniente dos dados brutos do satélite.

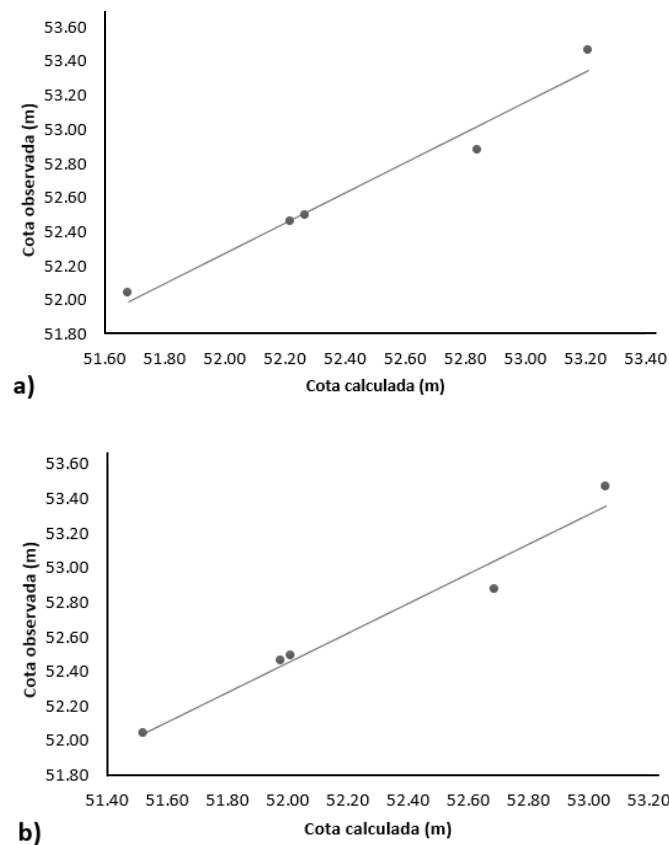


Figura 8. Curvas chave indicando a comparação entre as cotas observadas e simuladas durante a a) Calibração e b) Validação do modelo hidráulico.

Observa-se ainda que a mancha gerada por Brito (2017) na simulação hidráulica (Figura 7) a partir do hidrograma proveniente da série “TRMM” apresentou comportamento análogo ao da mancha obtida na calibração do modelo pela proximidade das vazões analisadas, respectivamente, $932.14 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ e $948.01 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, diferenciando-se apenas em relação à cota máxima de 53.17 metros referente à série “TRMM” contra uma cota de 53.21 metros da calibração (Figura 8).

Segundo Brito (2017), a representatividade das manchas de inundação (Figura 7) oriundas dos dados do satélite TRMM (serie “TRMM” e “TRMM+Postos”) em relação às informações obtidas em campo, mostra a relevância das estimativas do satélite nessa região podendo ser utilizadas em outros estudos nessa mesma bacia ou em regiões com pouca ou sem nenhuma informação pluviométrica, de modo a destacar a importância de ferramentas como essa no subsídio a estudos hidrológicos em regiões com escassez de dados (Araújo, 2015; Falck *et al.*, 2015; Pereira *et al.*, 2013; Nóbrega *et al.*, 2008; Collischonn, 2006).

Conclusões

A partir dos resultados obtidos por Brito (2017), é possível concluir que a modelagem hidrológica apresentou resultados satisfatórios na simulação do processo chuva-vazão considerando como dados de entrada as características fisiográficas da bacia do rio Paraíba do Meio e os dados dos pluviômetros disponíveis em campo. Ressalta-se ainda que os parâmetros foram calibrados para um evento de cheia (registrada em 2000) e, segundo Tucci (2005) devem ser aplicados em estudos nessa bacia, ou em bacias análogas, que visem representar magnitudes semelhantes às do evento estudado.

A validação consistiu na utilização das informações do satélite TRMM ao analisar o evento de cheia ocorrido em 2010 indicando que o cenário 2 foi o que apresentou melhores resultados no posto Atalaia, uma vez que, ao analisar a série corrigida do satélite TRMM (“TRMM+Postos”) foi obtido um R^2 de aproximadamente 0.88 e um COE de 0.91, representando um bom ajuste para o modelo (Brito, 2017).

A calibração do modelo hidráulico foi fundamentada no ajuste do coeficiente de Manning (n) para as margens e fundo do canal a partir das informações levantadas pela ENGEMAP por meio da representação do terreno com curvas de nível e pontos cotados, seções transversais e 5 marcas de cheia às margens do rio no trecho correspondente à cidade de Atalaia. Segundo Brito (2017), os altos valores obtidos para o coeficiente de Manning nas seções 4, 5 e 6 podem ser justificados pela presença de pontes e por maiores profundidades de fluxo nesse trecho do rio, corroborando com os resultados encontrados por Mustaffa *et al.* (2016) em regiões com maiores profundidades de fluxo. Aos futuros trabalhos nessa região, recomenda-se o levantamento de um maior número de marcas de cheia às margens da calha do rio.

Por fim, um mapeamento das áreas inundadas referente ao trecho do rio Paraíba do Meio que banha o município de Atalaia foi realizado a partir das informações provenientes da simulação hidráulica, possibilitando a construção de mapas de inundação, apontados por Brito (2017) como ferramentas essenciais no controle e prevenção de desastres decorrentes de eventos de inundação, ao permitir uma melhor visualização da área de abrangência na qual os níveis de um rio são capazes de atingir a depender da vazão analisada.

Bibliografia

- ANA, Agência Nacional de Águas (2010) *Dados pluviométricos*. Acesso em 17 de agosto de 2017, disponível em: <http://www.snirh.gov.br/hidroweb/publico/apresentacao.jsf>
- APAC, Agência Pernambucana de Águas e Clima (2010) *Dados pluviométricos*. Acesso em 18 de agosto de 2017, disponível em: www.apac.pe.gov.br/monitoramento/
- Araújo, R. S. (2015) *Classificação climatológica das nuvens precipitantes no Nordeste Brasileiro utilizando dados do radar a bordo de um satélite TRMM*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Meteorologia, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 102 pp.

- Arcement JR., G. J., Schneider, V. R. (1984) *Guide for selecting manning's roughness coefficients for natural channels and flood plains*. Federal Highway Administration – FHWA-TD, 84-204.
- Boltokoski, V., Tavares, M. H. F., Machado, R. E., Oliveira, M. P. (2010) Calibração de modelo para simulação de vazão e de fósforo total nas sub-bacias dos rios Conrado e Pinheiro. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, **34**, 253-261.
- Brito, T. R. R. L. (2017) *Modelagem hidrológica e hidráulica a partir de dados TRMM aplicada a análise de risco em áreas inundáveis: estudo de caso no município de Atalaia*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 78 f. : il.
- Chow, V. T. (1959) *Open Channel Hydraulics*. Tokyo: McGraw Hill, 680pp.
- Collischonn, B. (2006) *Uso de precipitação estimada pelo satélite TRMM em modelo hidrológico distribuído*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 193 pp.
- Collischonn, W., Tucci, C. E. M. (2003) Ajuste Multiobjetivo dos Parâmetros de um Modelo Hidrológico. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*. **8**(3), 27-39.
- Falck, A. S., Maggioni, V., Tomasella, J., Vila, D. A., Diniz, F. L. R. (2015) Propagation of satellite precipitation uncertainties through a distributed hydrologic model: A case study in the Tocantins-Araguaia basin in Brazil. *Journal of Hydrology*, **527**, 943-957.
- Fragoso JR., C. R., Pedrosa, V. A., Souza, V. C. B. (2010) Reflexões sobre a Cheia de Junho de 2010 nas Bacias do Rio Mundaú e Paraíba. *X Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste*, Fortaleza, Brasil.
- Gama, W. M. (2011) *Impactos das mudanças climáticas na resposta hidrológica da bacia hidrográfica do rio Paraíba do Meio (AL/PE)*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 114 pp.
- HEC-RAS, Hydrologic Engineering Center - River Analysis System (2010) *Hydraulic Reference Manual. Version 4.1*. January.
- Holz, J. (2010) *Levantamento e mapeamento do índice de risco de alagamento da bacia do Riacho Reginaldo*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 163 pp.
- IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2010) *Censo Demográfico*. Acesso em 10 de agosto de 2017, disponível em: www.censo2010.ibge.gov.br/sinopseporsetores/?nivel=st
- IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2001) *Mapas temáticos - Mapa de solo do Brasil*. Acesso em 25 de outubro de 2017, disponível em: <https://mapas.ibge.gov.br/tematicos/soles>
- ITEP, Instituto de Tecnologia de Pernambuco (2010) *Dados pluviométricos*. Acesso em 17 de agosto de 2017, disponível em: http://www.itep.br/index.php?option=com_content&view=article&id=1136&Itemid=630
- Kathol, J., Werner, H., Trooien, T. (2003) Predicting runoff for frequency based storms using a precipitation-runoff model. *North-Central Intersectional Meeting of the American Society of Agricultural Engineers (ASAE) and Canadian Society of Agricultural Engineers (CSAE)*, Fargo, North Dakota.
- Krysanova, V., Müller-Wohlfeil, D. I., Becker, A. (1998) Development and test of a spatially distributed hydrological:water quality model for mesoscale watersheds. *Ecological Modelling*, **106**, 261-289.
- Kummerow, C., Simpson, J., Thiele, O., Barnes, W., Chang, A. T. C., Stocker, E., Adler, R. F.; Hou, A., Kakar, R., Wentz, F., Ashcroft, P., Kozu, T., Hong, Y., Okamoto, K., Iguchi, T., Kuroiwa, H., Im., E., Haddad, Z., Huffman, G., Ferrier, B., Olson, W. S., Zipser, E., Smith, E. A., Wilheit, T. T., North, G., Krishnamurti, T., Nakamura, K. (2000) The Status of the Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) after Two Years in Orbit. *Journal of Applied Meteorology*, **39**, 1965-1982.
- Lyra, G. B., Cecílio, R. A., Zanetti, S. S., Lyra, G. B. (2010) Coeficiente de rugosidade de Manning para o rio Paracatu. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, **14**(4), 343-350.
- Monte, B. E. O., Costa, D. D., Chaves, M. B., Magalhães, L. O., Uvo, C. B. (2016) Modelagem hidrológica e hidráulica aplicada ao mapeamento de áreas inundáveis. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, **21**(1), 152 – 167.

- Muñoz, V. A., Valeriano, M. M. (2015) Mapeamento de planícies inundáveis a partir de MDE e avaliação da exposição à inundação na bacia do rio Itajaí. *XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, João Pessoa, Brasil.
- Mustaffa, N., Ahmad, N. A., Razi, M. A. M. (2016) Variations of Roughness Coefficients with Flow Depth of Grassed Swale. *Materials Science and Engineering*, **136**, 012082.
- Nóbrega, R. S., Souza, E. P., Sousa, F. A. S. (2008) Análise da utilização de dados do satélite TRMM em um modelo hidrológico semidistribuído na bacia do rio Jamari (RO). *Revista Brasileira de Geografia Física*, **1**(1), 47-61.
- Oliveira, D. L., Souza, V. C. B., Fragoso JR., C. R. (2014) Análise Hidrológica da Cheia Excepcional Ocorrida em Junho de 2010 nas Bacias dos Rios Mundaú e Paraíba do Meio em Alagoas e Pernambuco. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, **19**(3), 279-293.
- Peplau, G. R. (2005) *Influência da variação da urbanização nas vazões de drenagem na bacia do rio Jacarecica em Maceió-AL*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife. 144 pp.
- Pereira, G., Silva, M. E. S., Moraes, E. C., Cardozo, F. S. (2013) Avaliação dos Dados de Precipitação Estimados pelo Satélite TRMM para o Brasil. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, **18**(3), 139-148.
- Santos, A. G. (2016) *Acoplamento do modelo atmosférico WRF ao modelo hidrológico SCS/HMS para a previsão de cheias na bacia do Paraíba do Meio em Alagoas*. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 132 pp.
- Sifontes, V. E., Moya, R. M. P. (2012) Modelación hidrológica con HEC-HMS en cuencas montañosas de la región oriental de Cuba. *Ing. Hidráulica Y Ambiental*, **1**, 94-105.
- Tucci, C. E. M. (2012) *Hidrologia: Ciência e Aplicação*. 4. ed. Rio Grande do Sul: UFRGS, 944 pp.