

COMPARAÇÃO DOS MODELOS HEC-RAS E LISFLOOD-FP NA DELIMITAÇÃO DE ZONAS INUNDÁVEIS

EVALUATION OF HEC-RAS AND LISFLOOD-FP MODELS FOR PREDICTING RIVER FLOOD INUNDATION

Paulo Fernandez

Professor Adjunto /// Instituto Politécnico de Castelo Branco - Escola Superior Agrária /// email: palex@ipcb.pt

Sandra Mourato

Professora Adjunta /// Instituto Politécnico de Leiria - Escola Superior de Tecnologia e Gestão /// email: sandra.mourato@ipleiria.pt

Madalena Moreira

Professora Auxiliar /// Universidade de Évora - Escola de Ciências e Tecnologia /// email: mmvmv@uevora.pt

RESUMO: Este artigo apresenta os resultados da avaliação e comparação do desempenho de dois modelos hidráulicos, o modelo HEC-RAS e o modelo LISFLOOD-FP, na delimitação das zonas inundáveis. É feita a aplicação a um troço de 4 km do rio Lis. O hidrograma de cheia é estimado através do modelo hidrológico HEC-HMS, calibrado com base nos registos em duas estações hidrométricas instaladas na rede hidrográfica do rio Lis, adotando como parâmetro de calibração o número de escoamento. Os dois modelos hidráulicos são calibrados para um evento de inundação ocorrido em outubro de 2006, tomando como parâmetros de calibração os coeficientes de Manning no leito e nas zonas adjacentes. A comparação dos resultados dos dois modelos hidráulicos HEC-RAS e LISFLOOD-FP, para um evento de precipitação com o período de retorno de 100 anos, permite concluir que as zonas inundadas previstas pelos dois modelos apresentam resultados com sobreposição de 65% da reunião das áreas obtidas, que o tempo de resposta da cheia ao longo do troço em estudo no modelo HEC-RAS é cerca de metade do tempo de resposta no modelo LISFLOOD-FP e que o tempo de simulação do LISFLOOD-FP é muito superior ao tempo consumido pelo modelo HEC-RAS.

Palavras-chave: Modelação hidráulica, zonas inundáveis, HEC-RAS, LISFLOOD-FP, SIG.

ABSTRACT: Two hydraulic flood models (HEC-RAS and LISFLOOD-FP) are tested on a 4km stretch of the river Lis. The HEC-HMS hydrologic model estimates the flood hydrograph. HEC-RAS is calibrated using curve numbers as free parameters against records of hydrometric stations installed in the river Lis basin. The two hydraulic models are calibrated using floodplain and channel friction as free parameters, against observed inundated from a flood event occurred in October 2006. The results show that for this reach and return period of 100 years both HEC-RAS and LISFLOOD-FP models give predictions of 65% overlapped inundated areas. The floodwave travel time for HEC-RAS model was about half of the floodwave travel time for LISFLOOD-FP. LISFLOOD-FP has a simulation time much longer than HEC-RAS model.

Keywords: Hydraulic modelling, flood inundation, HEC-RAS, LISFLOOD-FP, GIS.

1. INTRODUÇÃO

Os eventos de cheia fluvial, com inundação de zonas adjacentes, podem pôr em causa a segurança de pessoas e de bens e comprometer a qualidade do ambiente e o desenvolvimento económico de uma região. A extensão das inundações e os impactos correspondentes podem ser mitigados com base na implementação de restrições em determinadas atividades humanas e/ou construção de obras de controlo. A aplicação da Directiva relativa à Avaliação e Gestão dos Riscos de Inundação (transposta para a ordem jurídica portuguesa através do Decreto-Lei nº 115/2010) deve ser uma oportunidade para o desenvolvimento de uma visão de prevenção integrada e sustentável das inundações, sugerindo novos desafios para a investigação e para a engenharia. De acordo com o Decreto-Lei nº 115/2010 devem ser elaboradas as cartas de delimitação das zonas inundáveis para várias probabilidades de ocorrência de fenómenos extremos de precipitação. Para o final do século, as projeções dos modelos de clima indicam a diminuição do período de retorno de eventos de precipitação de maior intensidade (IPCC, 2007) com o correspondente aumento da probabilidade de ocorrência de inundações e agravamento dos respectivos impactos negativos.

Os modelos hidrológicos e hidráulicos espacialmente distribuídos para determinação das zonas inundáveis são uma ferramenta importante que permite um planeamento e gestão do risco fundamentados. É possível simular o efeito de um evento de precipitação intensa nos edifícios ou nos obstáculos à superfície do terreno, durante a onda de cheia. A representação da superfície do terreno é um fator crítico na modelação hidrológica e hidráulica de inundações pois, como dado de entrada do modelo, condiciona o caudal de ponta de cheia e a extensão da inundação (Horritt e Bates, 2001). A resolução espacial (horizontal e vertical) e a qualidade do conjunto de dados geográficos podem produzir grandes diferenças nos resultados da modelação hidráulica de inundações (Wilson, 2004). A exatidão do Modelo Digital de Terreno (MDT) é afetada por vários fatores, nomeadamente: a precisão, a densidade e a distribuição dos pontos cotados, o algoritmo de interpolação e a resolução espacial ou o tamanho da célula (Gong *et al.*, 2000; Kienzle, 2004; Li *et al.*, 2005; Fisher e Tate, 2006).

Têm sido apresentados vários estudos sobre a aplicação de diferentes modelos hidráulicos na

avaliação da extensão da zona inundável (Horritt e Bates, 2002; Hunter *et al.*, 2008). Apesar destas aplicações é importante perceber o mérito das diferentes metodologias, com diferentes níveis de representação matemática do escoamento e diferentes técnicas numéricas. A maioria dos modelos hidráulicos necessita de calibração para melhorar o seu desempenho, o que pode compensar alguns dos erros dos dados de entrada e de algumas simplificações na formulação (Hunter *et al.*, 2008). É corrente a calibração do parâmetro característico da rugosidade que, em teoria, pode ser indicado individualmente para cada célula do raster. No entanto, poucos estudos têm em consideração a sua distribuição espaciotemporal devido à dificuldade de atribuir valores de coeficientes de resistência para as várias tipologias de ocupação de solo (Wilson e Atkinson, 2007). O modelo LISFLOOD-FP foi testado e comparado com outros modelos 1D e 2D de simulação hidráulica de inundação (Horritt e Bates, 2001; Bates e De Roo, 2000; Hunter *et al.*, 2005). Nestes estudos, o LISFLOOD-FP, quando calibrado, apresentou um desempenho equivalente ou superior aos obtidos com os outros modelos, no cálculo da extensão da inundação.

O objectivo deste trabalho é confrontar o desempenho dos modelos hidráulicos HEC-RAS e LISFLOOD-FP através da comparação da extensão da zona inundável e do tempo de computação. O modelo HEC-RAS corresponde a uma aproximação unidimensional (1D) e o modelo LISFLOOD-FP corresponde a uma aproximação unidimensional (1D) na modelação do escoamento na linha de água e a uma aproximação bidimensional (2D) na zona adjacente inundada. Os modelos são aplicados no cálculo da zona inundável de um troço de 4km do rio Lis, em Portugal, em que têm ocorrido cheias que originam, regularmente, a inundação de campos agrícolas e de infra-estruturas. Neste capítulo do artigo é feita uma introdução ao tema. O artigo continua com a apresentação do modelo hidrológico HEC-HMS e dos modelos hidráulicos HEC-RAS e LISFLOOD-FP e com a caracterização da área de estudo. De seguida é descrita a metodologia aplicada para obtenção e comparação das zonas inundadas, calculadas pelos modelos HEC-RAS e LISFLOOD-FP, para um evento de precipitação com o período de retorno de 100 anos. Finalmente, são apresentados e discutidos os resultados e referidas as principais conclusões do estudo.

O texto deste artigo foi submetido para revisão e possível publicação em janeiro de 2013, tendo sido aceite pela Comissão de Editores Científicos Associados em abril de 2013. Este artigo é parte integrante da *Revista Recursos Hídricos*, Vol. 34, Nº 1, 63-73, maio de 2013.
© APRH, ISSN 0870-1741 | DOI 10.5894/rh34n1-5

2. MODELOS

2.1. Modelo hidrológico HEC-HMS

O modelo hidrológico HEC-HMS é um modelo fisicamente baseado e agregado, pois assume que a bacia hidrográfica é constituída por um grupo de sub-bacias hidrográficas em que os processos hidrológicos são calculados com base em parâmetros que refletem as condições médias na área. As componentes do modelo HEC-HMS caracterizam-se por relações matemáticas que simulam os processos meteorológicos, hidrológicos e hidráulicos (U.S. Army Corps of Engineers, 2010). Estes processos são, sequencialmente, a precipitação, a intercepção, a infiltração e o escoamento superficial na área de drenagem e o escoamento e a propagação da onda de cheia na rede hidrográfica. Os resultados finais do processo de simulação são os hidrogramas de cheia nas secções de referência das sub-bacias ena secção de referência da bacia hidrográfica em estudo. O modelo hidrológico HEC-HMS permite uma integração com os Sistemas de Informação Geográfica (SIG), através do software HEC-GeoHMS.

Neste estudo, o modelo HEC-HMS foi aplicado no cálculo do hidrograma de cheia para um evento de precipitação registado e para um evento de precipitação intenso calculado com base nas curvas Intensidade – Duração – Frequência (IDF), considerando como dado de entrada o hietograma da precipitação total. O hietograma de precipitação útil é calculado em função da infiltração e da retenção superficial na bacia, através do número de escoamento. Considera-se que a precipitação e a infiltração são uniformemente distribuídas na sub-bacia. O hietograma da precipitação útil é aplicado ao hidrograma unitário da sub-bacia calculado com base no hidrograma unitário sintético do Soil Conservation Service (SCS), de forma a obter o hidrograma de cheia para cada sub-bacia hidrográfica e para a bacia hidrográfica em estudo.

2.2. Modelo hidráulico HEC-RAS

O modelo hidráulico HEC-RAS é um dos modelos hidráulicos mais populares na delimitação das zonas inundáveis fluviais (U.S. Army Corps of Engineers, 2008). Trata-se de um modelo 1D que resolve as equações de Saint-Venant completas, por aplicação do método de diferenças finitas, permitindo simular o escoamento em superfície livre em regime permanente e em regime variável. A lei de resistência aplicada é a Equação de Manning-Strickler e a secção transversal de escoamento é considerada uma secção composta. A topografia do canal é caracterizada pelo resultado do levantamento topográfico de uma série de secções transversais ao longo do troço do rio em estudo. Para

delimitar a zona inundada são calculadas as alturas de água nas secções transversais referidas. Dado a cota da superfície livre ser constante na secção, a zona inundada é limitada pela intercepção da topografia do terreno com a superfície livre em cada secção e o resultado da interpolação entre os perfis das secções transversais. O modelo HEC-RAS permite facilmente a integração com um SIG através do software HEC-GeoRAS.

A maior limitação do modelo é o seu carácter unidimensional que, mantendo a cota da superfície livre constante na secção transversal, não é apropriado quando as secções transversais da linha de água apresentam irregularidades acentuadas.

2.3. Modelo hidráulico LISFLOOD-FP

O modelo hidráulico LISFLOOD-FP é um modelo para simulação de inundações, espacialmente distribuído e desenvolvido com o objetivo de integrar dados topográficos de elevada resolução espacial. O MDT é o principal dado de entrada do LISFLOOD-FP, devido à importância da topografia na modelação hidráulica de inundações (Bates e De Roo, 2000).

O modelo representa de forma separada o escoamento no leito do rio e na zona inundável (Knight e Shiono, 1996). A formulação matemática baseia-se numa representação 1D do escoamento no leito do rio, acoplada a uma representação 2D do escoamento na zona inundável (Bates e De Roo, 2000).

No leito do rio é aplicada a aproximação da onda cinemática das equações 1D de Saint-Venant (Moussa e Bocquillon, 1996; Rutschmann e Hager, 1996), devido à simplicidade computacional e à facilidade de parametrização (Horritt e Bates, 2001). Na zona inundável é aplicada a aproximação da onda difusa das equações 2D de Saint-Venant (Bates e De Roo, 2000). A lei de resistência aplicada é a equação de Manning-Strickler (Hunter *et al.*, 2005).

A maior limitação do modelo a assinalar é não considerar a transferência da quantidade de movimento da água entre o escoamento na linha de água principal e na zona inundada. A condição de fronteira de montante na zona inundada é a altura de água no leito do rio.

2.4. Medida de comparação dos modelos hidráulicos

As zonas inundadas previstas pelos modelos hidráulicos HEC-RAS e LISFLOOD são comparados aplicando a seguinte medida de desempenho (Horritt e Bates, 2002):

$$F(\%) = \frac{\text{Num}(S_{LF} \cap S_{HR})}{\text{Num}(S_{LF} \cup S_{HR})} 100 \quad (1)$$

onde:

S_{LF} - conjunto de pixéis com previsão de inundação pela aplicação do modelo LISFLOOD-FP;

S_{HR} - conjunto de pixéis com previsão de inundação pela aplicação do modelo HEC-RAS;

Num - é o número de membros do conjunto.

A medida de desempenho F varia entre 0%, quando não existe sobreposição de nenhum pixel entre os resultados da previsão das zonas inundadas obtidas com a aplicação dos dois modelos, e 100% quando existe uma sobreposição total dos pixéis entre os resultados da previsão das zonas inundadas obtidas com a aplicação dos dois modelos.

3. ÁREA DE ESTUDO E DADOS

Os dois modelos foram aplicados a um troço de aproximadamente 4km do rio Lis, em que têm sido registadas cheias que dão origem, regularmente, à inundação das zonas adjacentes, ocupadas por campos agrícolas e alguns edifícios. O troço está limitado a montante pela ponte do Miguel e a jusante pela ponte da Bajanca, Figura 1.

Foi criado o MDT da bacia hidrográfica contributiva para a secção de montante do troço em estudo, com base na altimetria à escala 1:25 000. Os tipos de solo e usos do solo na bacia hidrográfica foram caracterizados, em primeira aproximação, com base na carta de Número de Escoamento (CN) disponibilizada no Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos (SNIRH) (<http://snirh.pt>).

Para caracterização do troço do leito do rio em estudo foram levantadas topograficamente 70 secções transversais da linha de água, Figura 1. O MDT do leito do rio e da zona adjacente do troço em estudo foi obtido com base na altimetria (curvas de nível e pontos cotados) à escala 1/5 000 das zonas adjacentes ao leito do rio e nos perfis topográficos das 70 secções transversais. A utilização de um programa de SIG permitiu modelar a superfície do terreno através da elaboração do MDT na forma de rede irregular de triângulos para integração no modelo HEC-RAS e na forma matricial ou raster com uma resolução espacial de 4 m para integração no modelo LISFLOOD-FP.

Para caracterização espacial do parâmetro de rugosidade nas zonas inundáveis foram utilizados

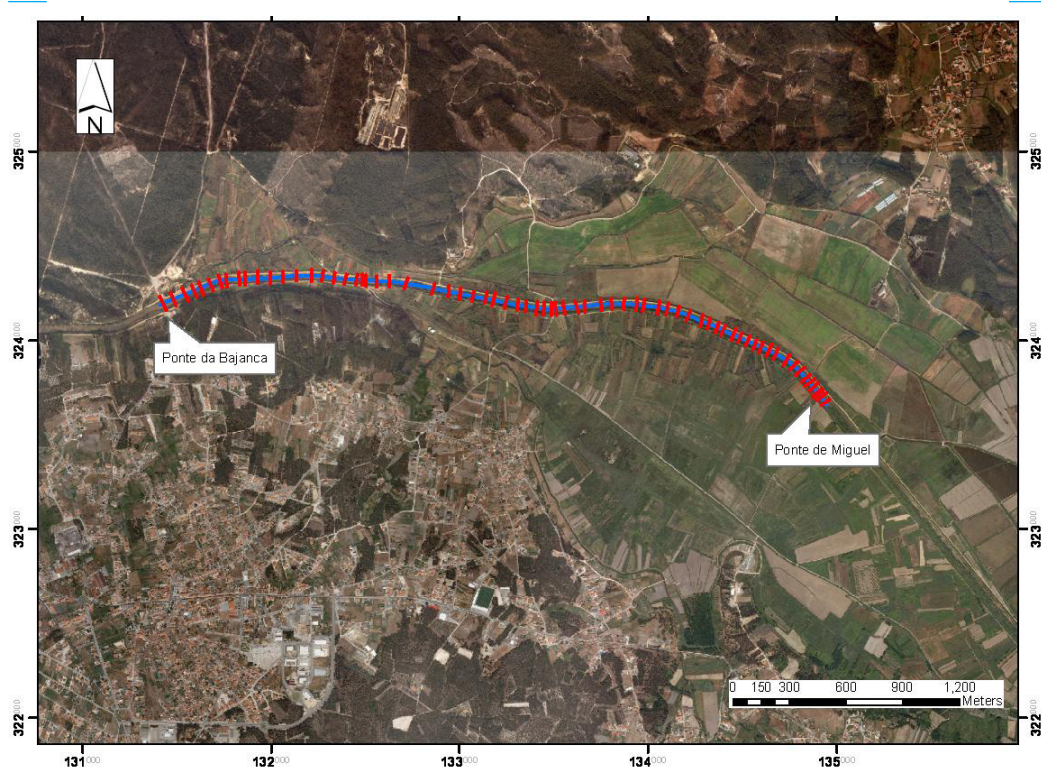


Figura 1 - Localização do troço em estudo e das secções transversais levantadas topograficamente.

ortofotomapas com pixel de 50 cm e nas secções transversais do leito do rio foi realizada uma avaliação in situ por visualização e registo da ocupação de solo. O parâmetro de rugosidade pode ser indicado individualmente para cada célula do raster.

Para calibração do modelo hidrológico HEC-HMS foram aplicados os registos em duas estações hidrométricas: ponte das Mestras no rio Lena (afluente do rio Lis) com uma área de drenagem de 158 km² e o Açude do Arrabalde no rio Lis com uma área de drenagem de 235 km². As estações meteorológicas para caracterização da precipitação na bacia hidrográfica e na área em estudo são: Leiria, Batalha, Caranguejeira e Porto de Mós.

O modelo HEC-HMS foi calibrado à escala diária. O parâmetro calibrado foi o número de escoamento. O período de calibração considerado foi entre 12 de fevereiro a 26 de fevereiro de 1986 e o período de validação considerado foi entre 1 de janeiro a 29 de fevereiro de 1988.

Os parâmetros calibrados no modelo hidráulico foram

os coeficientes de resistência de Manning no leito do rio e na zona inundada. Os dados para calibração do modelo hidráulico basearam-se na informação cedida pela Associação de Regantes e Beneficiários do Vale do Lis acerca dos danos observados no sistema de defesa contra cheias e nas redes de drenagem do Aproveitamento Hidroagrícola do Vale do Lis, em consequência da precipitação intensa ocorrida no dia 25 de outubro de 2006. Destaca-se a indicação de que vários dias após a interrupção das chuvadas (31 de outubro de 2006), continuavam submersas as parcelas agrícolas em frente da povoação de Coimbra, verificando-se durante alguns dias a continuação da ascensão da lâmina de água, provocando mesmo a submersão de um troço da estrada municipal que liga a Aroeira à ponte do Braço e Galeota, Figura 2.

Para a determinação dos hietogramas de precipitação para uma dada duração e um dado período de retorno (T), consideraram-se as curvas de Intensidade-Duração-Frequência (IDF), propostas por Brandão *et al.*, (2001) para Coimbra IG (posto 12G/01).

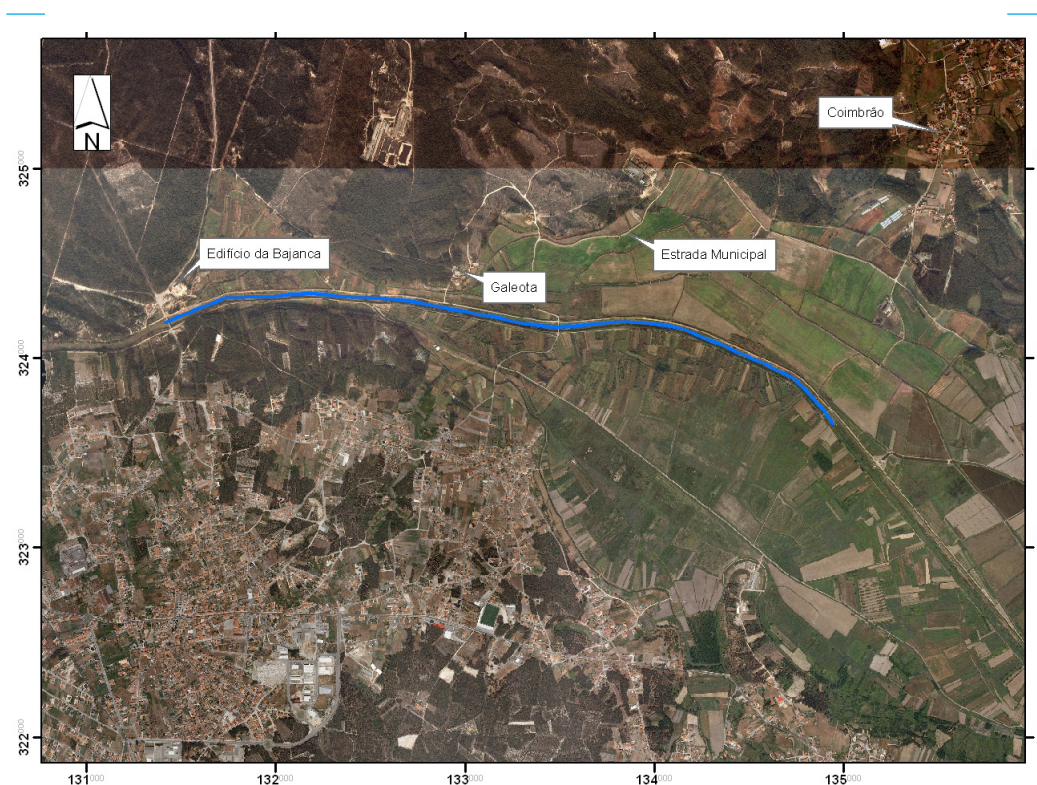


Figura 2 – Locais inundados no evento de 25 de outubro de 2006.

4. METODOLOGIA

A metodologia aplicada neste artigo para estimar e comparar a extensão da zona inundada para um dado período de retorno através da aplicação dos modelos hidráulicos HEC-RAS e LISFLOOD-FP é descrita e esquematizada na Figura 3:

1. Calibração do modelo hidrológico HEC-HMS, através da optimização do coeficiente de determinação (R^2), para as duas sub-bacias do rio Lis em Arrabalde e em ponte das Mestras, estimando o valor do número de escoamento;
2. Preparação da aplicação do modelo hidrológico calibrado à bacia hidrográfica do rio Lis na secção da ponte do Miguel (secção de montante do troço em estudo) e determinação do hidrograma de precipitação para o período de retorno de 100 anos e o respectivo hidrograma de cheia;
3. Construção do MDT do leito, da margem e da zona adjacente do troço em estudo, com base na altimetria à escala 1/5000 das zonas marginais ao leito do rio e nos perfis topográficos de 70 secções transversais obtidos em trabalho de campo;
4. Caracterização espacial do coeficiente de resistência de Manning com base na ocupação de solo nas zonas adjacentes (ortofotomapas) e nas secções transversais (levantamento de campo);
5. Calibração do modelo hidráulico para simulação

de inundações HEC-RAS (por apresentar menores tempos de computação) para o evento de 25 de outubro de 2006, estimando os valores do coeficiente de resistência de Manning no leito do rio e nas zonas inundadas;

6. Preparação dos modelos HEC-RAS e LISFLOOD-FP para modelação do troço do rio Lis em estudo, entre a ponte do Miguel e a ponte da Bajanca, com base nos valores do coeficiente de resistência de Manning no leito do rio e nas zonas inundadas calibrados;
7. Determinação da extensão da inundação (zonas inundadas) com o modelo HEC-RAS e com o modelo LISFLOOD-FP, para a precipitação intensa com o período de retorno 100 anos;
8. Representação em SIG e comparação dos resultados dos modelos hidráulicos através da medida de desempenho (F).

A integração dos SIG e dos modelos hidráulicos permite a delimitação das zonas inundadas e a representação da variação espacial da altura de água, de acordo com a Figura 4. O modelo hidráulico é acoplado ao SIG e, após calibração, é aplicado para estimar a delimitação das zonas inundadas e a variação espacial das alturas de águas na área de estudo, com base no hidrograma de cheia para um determinado período de retorno. Para calibração do modelo hidráulico HEC-RAS, foram considerados os intervalos dos valores dos coeficientes de resistência de Manning no leito do rio e na zona inundada entre $n=0.03m^{-1/3}s$ e $n=0.06m^{-1/3}s$ e entre $n=0.03m^{-1/3}s$ e $n=0.10m^{-1/3}s$, respetivamente (Chow, 1959).

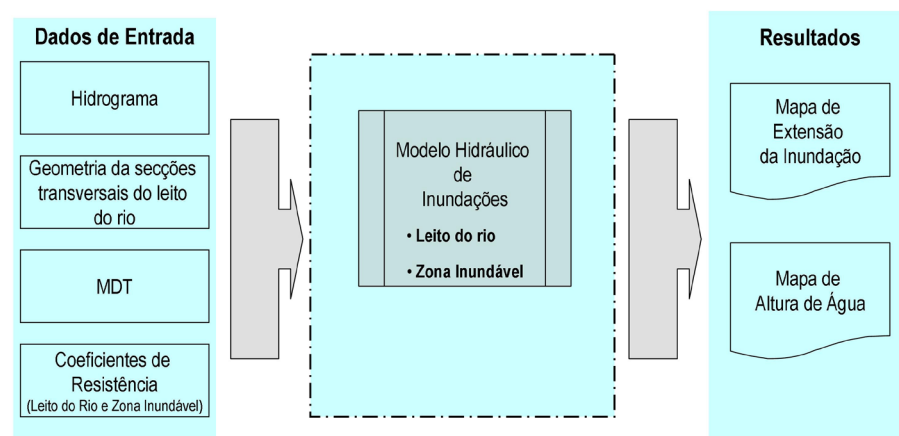


Figura 3 – Fluxograma da modelação hidráulica de inundações.

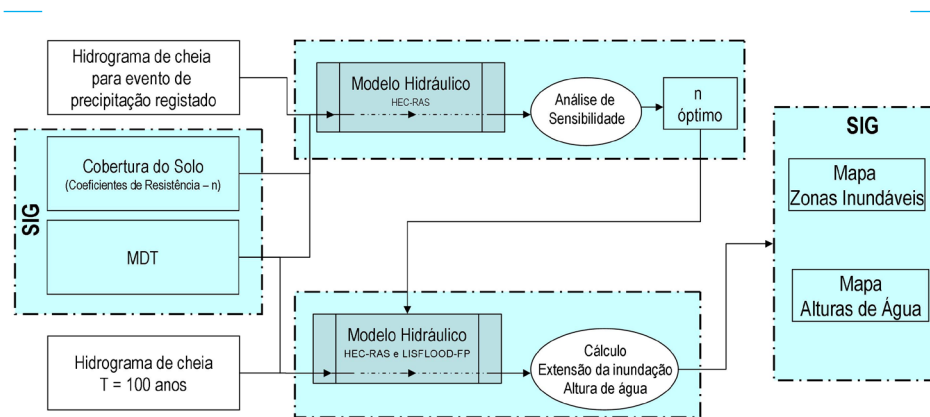


Figura 4 – Fluxograma da integração dos SIG e dos modelos hidráulicos para a modelação de inundações.

Na aplicação dos modelos HEC-RAS e LISFLOOD-FP, em regime variável, a condição de fronteira de montante é representada pelo hidrograma de cheia, resultante da aplicação do modelo hidrológico HEC-HMS, e a condição de fronteira de jusante é representada por um regime de escoamento quase-permanente e em que, para cada intervalo de cálculo, o escoamento atinge a altura uniforme por o canal a jusante do troço em estudo apresentar um troço prismático e de declive fraco.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados da calibração do modelo hidrológico HEC-HMS e do modelo HEC-RAS e da identificação da extensão da zona inundada, obtida pelos dois modelos hidráulicos HEC-RAS e LISFLOOD-FP.

Na bacia hidrográfica do rio Lena, na secção de ponte

das Mestras, foram identificadas quatro sub-bacias hidrográficas e na bacia hidrográfica do rio Lis, na secção de Arrabalde, foram identificadas duas sub-bacias hidrográficas. As seis sub-bacias apresentam características do tipo de solo e/ou uso solo diferentes, tendo sido considerados números de escoamento distintos (Quadro 1).

Os valores obtidos para o coeficiente de determinação (R^2) para a comparação dos hidrogramas registados e calculados com a aplicação do HEC-HMS em ponte das Mestras e em Arrabalde e para os períodos de calibração e de validação são apresentados no Quadro 2. A aplicação do modelo HEC-HMS calibrado à bacia hidrográfica do rio Lis, na secção de ponte do Miguel, para o hietograma de precipitação associado a um período de retorno de 100 anos, conduziu ao hidrograma de cheia representado na Figura 5, a que corresponde um caudal de ponta de cheia de 759.3 m³/s ocorrido 25h após o início do evento de precipitação.

Quadro 1 – Números de escoamento adotados nas sub-bacias hidrográficas calibradas e validadas nas secções da ponte das Mestras e Arrabalde.

Bacia hidrográfica	Sub-bacias	CN Inicial	CN após calibração
Rio Lena na secção da ponte das Mestras	1	74	62
	2	70	58
	3	83	70
	4	86	72
Rio Lis na secção de Arrabalde	1	69	69
	2	81	81

Quadro 2 – Coeficiente de determinação para o ajustamento dos hidrogramas registados e simulados nas secções ponte das Mestras e Arrabalde e para os períodos de calibração e validação.

Bacia hidrográfica	Período	R ² (%)
Rio Lena na secção da ponte das Mestras	12 fev1986-26 fev1986 (calibração)	80
	1 jan1988-29 fev1988 (validação)	52
Rio Lis na secção de Arrabalde	12 fev1986-26 fev1986 (calibração)	81
	1 jan1988-29 fev1988 (validação)	59

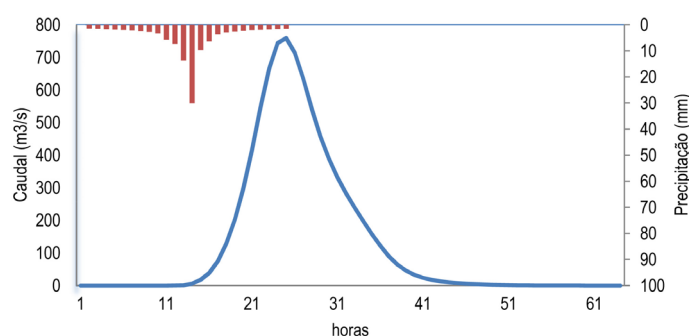


Figura 5 – Hietograma e Hidrograma de cheia na secção da ponte do Miguel para o período de retorno de 100 anos.

Na simulação dos modelos hidráulicos HEC-RAS e LISFLOOD-FP foram adoptados os valores para o coeficiente de Manning de $n=0,06m^{-1/3}s$ e de $n=0,08m^{-1/3}s$, para o leito do rio e para a zona inundável, respectivamente.

Os resultados das simulações dos modelos hidráulicos, para o hidrograma de cheia da Figura 5, correspondente ao período de retorno de 100 anos, são apresentados em mapas *raster* com os valores das alturas água e da cota de ponta de cheia para cada célula. As delimitações das zonas inundadas, obtidas para o modelo HEC-RAS e para o modelo LISFLOOD-FP, são apresentadas nas Figuras 6 e 7, respectivamente.

O valor de F dos modelos HEC-RAS e LISFLOOD-FP é de 65%, ou seja existe uma sobreposição de 65% dos pixéis nas zonas inundadas previstas pelos dois modelos. As áreas inundadas calculadas pelos modelos hidráulicos HEC-RAS e LISFLOOD-FP são iguais a 4.10 km² e a 4.05 km², respectivamente. A largura

média da zona inundada, calculada pela relação entre a área inundada e o comprimento do troço da linha de água em estudo é cerca de 1km.

Se for considerada a área limitada pelas secções de fronteira do troço em estudo, a ponte do Miguel e a ponte da Bajanca, o valor de F aumenta para 78% e a área inundada calculada pelo modelo LISFLOOD-FP é de 3.30 km².

A área inundada máxima verifica-se 29.0 horas e 32.8 horas após o início do evento de precipitação, para o modelo HEC-RAS e para o modelo LISFLOOD-FP, respectivamente. O tempo de resposta da onda de cheia no troço em estudo, calculado pelo período entre o instante da ponta de cheia do hidrograma e a ocorrência da área de inundada máxima, é de 4.0h e 7.8h para o modelo HEC-RAS e LISFLOOD-FP, respectivamente.

A aplicação do modelo HEC-RAS num troço fluvial permite uma correcta representação numérica do

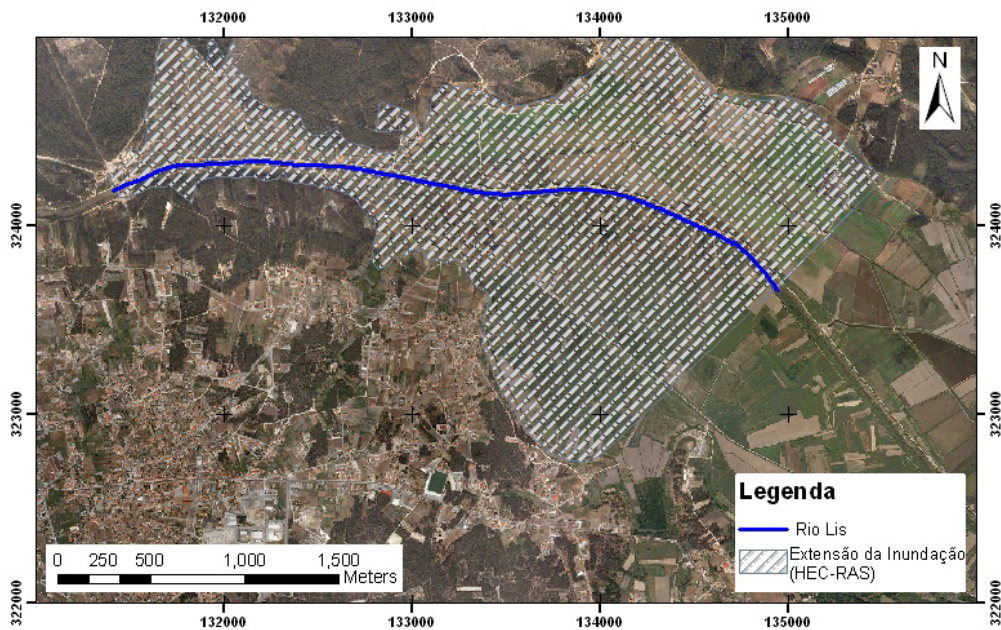


Figura 6 – Delimitação da zona inundada prevista pelo modelo HEC-RAS, para um período de retorno de 100 anos.

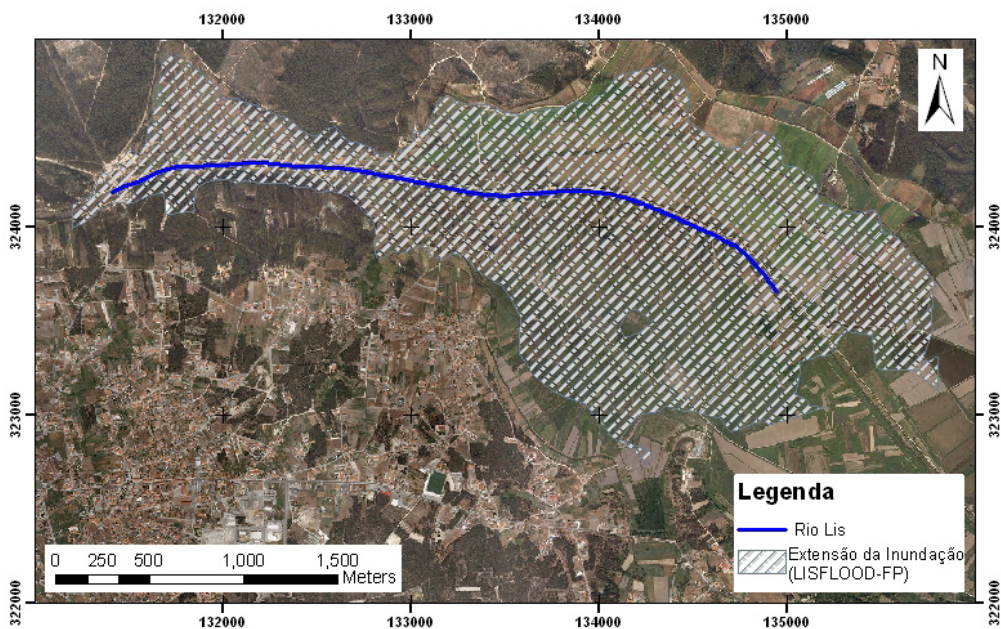


Figura 7 – Delimitação da zona inundada prevista pelo modelo LISFLOOD-FP, para um período de retorno de 100 anos.

escoamento ao longo do rio, através da resolução das equações completas de Saint-Venant, se a geometria do leito do rio estiver devidamente caracterizada. O estudo do escoamento unidimensional no leito do rio conduz à altura de água em cada secção transversal e, na falta de uma boa caracterização da superfície do terreno das zonas adjacentes, a água ocupará, automaticamente, toda a área com cota topográfica inferior à cota topográfica da superfície livre da água na secção do canal. Neste caso, a aplicação das equações completas de Saint-Venant é confrontada com uma limitação resultante da ocupação das zonas adjacentes por um volume de água fictício.

O modelo LISFLOOD-F, na zona inundável representa o escoamento em 2D através de uma solução aproximada do modelo da onda difusa. Este modelo calcula as alturas de água de cada célula, para toda a extensão da malha *raster*, tendo em consideração a altitude das células da zona inundável.

Relativamente ao tempo para a simulação computacional, com a aplicação de um Pentium IV – 3.4 GHz e 2GB de memória RAM, o modelo HEC-RAS consome o tempo inferior a um minuto, enquanto que o modelo LISFLOOD-FP consome 12.6 horas.

Ao nível de facilidade de aplicação, o modelo HEC-RAS funciona numa interface Windows e está integrado em ambiente SIG e o LISFLOOD-FP funciona numa interface MS-DOS e não está directamente integrado em ambiente SIG.

A resolução espacial do MDT *raster* utilizado no modelo LISFLOOD-FP e o MDT em Rede Irregular de Triângulos utilizado pelo modelo HEC-RAS apresentaram o detalhe necessário para a determinação de alturas de água no leito do rio e a consequente definição das zonas inundáveis. No entanto, para elaboração de cartas de zonas inundáveis, de acordo com o Decreto-Lei nº 115/2010, será necessário ter disponível informação topográfica que permita elaborar um MDT de elevada resolução.

6. CONCLUSÕES

Este estudo compara o desempenho de dois modelos hidráulicos, o modelo HEC-RAS e o modelo LISFLOOD-FP, na delimitação das zonas inundadas para o troço do Rio Lis, entre ponte do Miguel e a ponte da Bajanca e para um evento de precipitação com o período de retorno igual a 100 anos.

O modelo HEC-RAS oferece uma interface mais fácil com o utilizador. As zonas inundadas calculadas pelos dois modelos HEC-RAS e LISFLOOD-FP apresentam resultados com sobreposição de 65% da reunião das áreas obtidas. O tempo de resposta da onda de cheia na aplicação do modelo HEC-RAS é cerca de

metade do tempo verificado na aplicação do modelo LISFLOOD-FP. O tempo de simulação do modelo HEC-RAS é inferior a um minuto, enquanto o tempo de simulação do modelo LISFLOOD-FP é de 12.6 horas, pelo que se aconselha a aplicação do LISFLOOD-FP apenas em casos de elevada exigência na exatidão espaciotemporal das zonas inundáveis.

O HEC-RAS apresenta limitações na modelação da inundação na zona inundável resultantes da sua formulação 1D. O modelo HEC-RAS calcula várias alturas de água ao longo de perfis transversais ao rio e utiliza a interpolação para efetuar as previsões nas zonas entre esses perfis, enquanto no LISFLOOD-FP esse cálculo é efetuado para cada célula da zona inundada, por isso existe maior detalhe na representação da extensão de inundação através do LISFLOOD-FP. Outra vantagem do modelo LISFLOOD-FP é que a sua formulação considera a integração de um MDT de elevada resolução espacial, possibilitando assim uma delimitação muito pormenorizada da extensão de inundação. O Varrimento Aéreo por Laser (VAL), também conhecido como LiDAR (Light Detection And Ranging), será uma fonte de dados importante para a modelação hidráulica de inundações, porque permite caracterizar a topografia das zonas inundáveis e da secção transversal das linhas de água com elevada resolução espacial.

BIBLIOGRAFIA

BATES, P.D.; DE ROO, A.P.J. (2000) - "A simple raster-based model for flood inundation simulation". *Journal of Hydrology*, 236, pp. 54-77.

BRANDÃO, C.; RODRIGUES, R, e COSTA, J. P. (2001) - "Análise de fenómenos extremos. Precipitações intensas em Portugal Continental". Direcção dos Serviços de Recursos Hídricos, Instituto da Água, Lisboa.

CHOW, V.T. (1959) - "Open Channel Hydraulics", McGraw-Hill Book Co., New York, N.Y.

FISHER, P.F.; TATE, N.J. (2006) - "Causes and consequences of error in digital elevation models". *Progress in Physical Geography* 30(4), pp. 467-489.

GONG J.; LI Z.; ZHU Q.; SUI H.; ZHOU Y. (2000) - "Effects of various factors on the accuracy of DEM: an intensive experimental investigation". *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 66, 9, pp. 1113-1117.

HORRITT, M.S.; BATES, P.D. (2001) - "Predicting floodplain inundation: raster-based modelling versus the finite-element approach. *Hydrological Processes*" 15, pp. 825-842.

- HORRITT, M.S.; BATES, P.D. (2002) - "*Evaluation of 1-D and 2-D numerical models for predicting river flood inundation*". *Journal of Hydrology*, 268, pp.87-99.
- HUNTER, N.M.; BATES, P.D.; NEELZ, S.; PENDER, G.; VILLANUEVA, I.; WRIGHT, N.G.; LIANG, D.; FALCONER, R.A.; LIN, B.; WALLER, S.; CROSSLEY, A.J.; MASON, D.C. (2008) - "*Benchmarking 2D hydraulic models for urban flooding*". *Water Management*, 161, pp.13-30.
- IPCC (2007) - "*Climate Change 2007: The Physical Science Basis*", Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (ed. S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller), Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- KIENZLE, S. (2004) - "The effect of DEM Resolution on First Order, Second Order and Compound Terrain Derivatives". *Transactions in GIS*, 8, pp. 83-111.
- KNIGHT D. W.; SHIONO K. (1996) - "*River Channel and Floodplain Hydraulics*", In: Anderson, Walling, Bates (eds.), *Floodplain Processes*, J. Wiley, pp.139-181.
- LI, Z.; ZHU, Q.; GOLD, C. (2005) - "*Digital Terrain Modeling: Principles and Methodology*". CRC Press, Boca Raton, Florida, 323 p.
- MOUSSA, R.; BOCQUILLON, C. (1996) - "*Criteria for the choice of flood-routing methods in natural channels*". *Journal of Hydrology* 186, pp.1-30.
- RUTSCHMANN, P.; HAGER, W.H. (1996) - "*Diffusion of floodwaves*". *Journal of Hydrology*, 178, pp.19-32.
- SOIL CONSERVATION SERVICE (SCS) (1986) - "*Urban Hydrology for Small Watersheds*", Technical Release n.º. 55 (TR-55), Hydrology, U. S. Dept. of Agriculture, U. S. Government Printing Office, Washington, D. C.
- U. S. ARMY CORPS OF ENGINEERS (2008) - "*HEC-RAS. Hydrologic Modeling System – User’s Manual (version 2.1.2)*", Hydrologic Engineering Center, Davis.
- U. S. ARMY CORPS OF ENGINEERS (2010) - "*HEC-HMS. River Analysis System.– User’s Manual (version 3.5)*". Hydrologic Engineering Center, Davis.
- WILSON, M.D. (2004) - "*Evaluating the effect of data and data uncertainty on predictions of flood inundation*". Ph.D. Thesis, Faculty of Engineering, Science and Mathematics. University of Southampton, Southampton, p. 252.
- WILSON, M.D.; ATKINSON, P.M. (2007) - "*The use of remotely sensed land cover to derive floodplain friction coefficients for flood inundation modelling*". *Hydrological Processes*, 21, pp 3576-3586.