



Análise do efeito da resolução espacial do modelo digital de superfície de escoamento na delimitação de zonas inundáveis

Paulo FERNANDEZ¹, Luísa GOMES PEREIRA², Madalena MOREIRA³ e Gil GONÇALVES⁴

¹ Instituto Politécnico de Castelo Branco - Escola Superior Agrária e ICAAM - Instituto de Ciências Agrárias e Ambientais Mediterrânicas. Apartado 119, 6001-909 Castelo Branco, Portugal.

² ESTGA-Universidade de Aveiro e Centro de Investigação em Ciências Geo-espaciais. Apartado 473, 3754-909 Águeda, Portugal.

³ Universidade de Évora. Escola de Ciências e Tecnologia. Apartado 94, 7006-554 Évora, Portugal.

⁴ Universidade de Coimbra. Departamento de Matemática e Instituto de Engenharia de Sistemas e Computadores de Coimbra. 3001-501 Coimbra, Portugal.

(palex@ipcb.pt; luisapereira@ua.pt; mmvmv@uevora.pt; gil@mat.uc.pt)

Palavras-chave: LiDAR, Cartografia a escala grande, Ortoimagens CIR, Resolução Espacial, Modelo Digital de Superfície de Escoamento, Zonas Inundáveis.

Resumo

O perigo de inundação é um componente da avaliação do risco de inundação. Um dos elementos fundamentais na avaliação do perigo de inundação é a estimativa da extensão da zona inundável.

Neste trabalho é estudado o efeito da resolução espacial do Modelo Digital de Superfície de Escoamento (MDSe) na extensão da zona inundável. São criados três MDSe de diferentes resoluções que resultam da integração de dados LiDAR, cartografia a escala grande e ortoimagens CIR (*Colour Infra-Red*). Os dados LiDAR, devidamente filtrados dos objetos no terreno, são convertidos em três Modelos Digitais de Terreno (MDT) em formato *raster* com 1 m, 2 m, e 4 m. Da cartografia é extraído o edificado na forma de um *raster*. A vegetação com altura inferior a 2 m é por sua vez extraída das ortoimagens CIR. Os *rasters* dos objetos e vegetação são redimensionados para células de 1 m, 2 m e 4 m. Os três MDSe assim obtidos são utilizados na simulação hidráulica, com a aplicação do modelo LISFLOOD-FP e com o objetivo de determinar as zonas inundáveis.

A metodologia aqui proposta é aplicada a uma zona nas margens do Rio Febros, em Vila Nova de Gaia. Os resultados mostram um aumento de 13% e 20% das áreas inundáveis, respetivamente pela duplicação e quadruplicação da resolução espacial. Conclui-se que uma menor resolução espacial leva a uma sobrestimação da extensão de inundação, que se traduz num aumento da zona de perigo e portanto, um acréscimo de segurança na estimativa do risco de inundação. Relativamente ao tempo computacional, ele é reduzido 15,7 vezes, se a resolução espacial passar de 2 m para 4 m e de 3,8 vezes quando passa de 1 m para 2 m. Assim, numa análise conjunta do desempenho do próprio modelo e da eficiência computacional pode ser considerada como aceitável, a utilização de uma resolução mais grosseira para avaliação do perigo de inundação.

1. Introdução

A resolução espacial num MDSe em formato de grelha refere-se ao espaçamento entre dois pontos da grelha do MDSe. A escolha da resolução espacial é o problema central da criação do MDSe e da análise espacial de dados *raster*. A ideia geral é obter uma descrição adequada da superfície terrestre com uma quantidade mínima de pontos do MDSe ou com um espaçamento entre pontos tão grande quanto possível, assegurando uma exatidão conforme os objetivos específicos propostos (Gao, 1997). Um MDSe de alta resolução pode resultar na representação de uma superfície terrestre que é muito mais detalhada do que aquilo que é relevante para o processo que está a ser modelado (Ziadat, 2007), implicando tempos de computação desnecessários.



Precisamente, na modelação hidráulica de inundações em zonas urbanas é necessário ter em consideração os efeitos das relações entre o tempo de computação, a resolução espacial e a exatidão. Os MDSe com elevada resolução espacial implicam uma grande quantidade de células na grelha e, como tal, exigem um grande número de cálculos por passo de cálculo. Para reduzir a complexidade de cálculo pode-se diminuir o número de células da grelha e conseqüentemente as necessidades computacionais. No entanto, procura-se também obter exatidão nos resultados da modelação hidráulica e, por isso, os investigadores têm procurado a resolução espacial ótima para a modelação hidráulica de inundações. Haile e Rientjes (2005) mostraram que o tempo de computação das simulações hidráulicas, com baixa e alta resolução espacial, variou de algumas horas a 13 dias.

A modelação do escoamento da água sobre a superfície do terreno, em zonas urbanas, necessita de uma resolução que represente os caminhos complexos do escoamento em torno dos edifícios, os efeitos topográficos e de bloqueio à micro-escala e ainda de modelos numéricos capazes de lidar com a velocidade de escoamento elevada em águas pouco profundas. São necessários dados da superfície do terreno com uma resolução espacial de 1 a 5 m (Hunter et al., 2008). O processamento computacional de modelos hidráulicos com estas resoluções espaciais é demorado, e muitas vezes é realizada uma reamostragem dos dados para uma resolução espacial que reduza o tempo computacional. A generalização dos MDSe em zonas urbanas provoca mudanças significativas na topologia devido à perda das características dominantes. A presença de objetos significativos (casas, muros, etc.) na zona inundável é importante, porque influencia o volume de água na zona inundada e a direção do escoamento (Yu e Lane, 2006).

Este trabalho tem por objetivo estudar o efeito da resolução espacial do MDSe na extensão da zona inundável e no tempo de computação. Este estudo parte de um MDT, criado a partir de dados LiDAR de um troço do Rio Febros em Vila Nova de Gaia, em formato grelha de 1 m x 1m, e produz mais dois MDT, com grelhas de 2 m x 2 m e 4 m x 4m através de reamostragem por interpolação bilinear. A cada um destes modelos é adicionado o edificado da cartografia a escala grande e a vegetação com altura inferior a 2 m extraída de ortoimagens CIR. Os *rasters* destes objectos foram também redimensionados por interpolação bilinear para células de 2 m e 4 m. Os três MDSe assim obtidos são, juntamente com os outros dados de entrada, utilizados na simulação do modelo LISFLOOD-FP para determinação das correspondentes zonas inundáveis.

Esta comunicação contém, para além da Introdução, uma secção sobre a área de estudo e dados, outra, a secção 3, sobre metodologia, terminando com a secção 4, apresentação dos resultados e conclusões.

2. Área de Estudo e Dados

2.1 Área de Estudo

No estudo de avaliação do perigo de inundação foi efetuada a modelação hidráulica de inundação num troço de aproximadamente 3,8 km do rio Febros, afluente do rio Douro, com uma área contributiva de 24,2 km² na secção a montante. A zona de estudo tem uma área de 2,7 km², com 1841 edifícios e 4725 residentes e, segundo a Reserva Ecológica Nacional (REN), apresenta uma área de 178 479 m² nas margens do rio Febros classificada como Zona Ameaçada pelas Cheias (Figura 1). A área de estudo está localizada nas freguesias de Vilar de Andorinho e Avintes, onde ocorreram 45 e 18 eventos de inundação, respetivamente, no período entre 1999 e 2009. Esta área foi escolhida por apresentar vários pontos classificados como críticos pelos Bombeiros Voluntários de Avintes.

2.2 Dados

Os dados utilizados na criação do MDSe dizem respeito aos dados LiDAR, ortoimagens CIR e cartografia a escala grande. Os dados LiDAR, disponíveis em formato grelha com uma resolução espacial de 1 m abrangendo uma área de 5 km x 5 km no município de Vila Nova de Gaia e adquiridos em 2005, representam um Modelo Digital de Superfície (MDS) LiDAR e correspondem ao último retorno. Os dados LiDAR têm, teoricamente, uma exatidão de 15 cm na vertical e 20 cm na horizontal. As ortoimagens CIR com um *pixel* 50 cm foram adquiridas no mesmo voo da recolha de dados LiDAR. Estas imagens foram utilizadas para calcular o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (secção 3). A cartografia produzida no ano 2004 à escala 1:2000 é detalhada e rica em pormenores, sendo, por isso, uma ferramenta adequada à análise urbana. Os elementos integrados nesta cartografia têm uma exatidão posicional planimétrica de 0,30 m. A altimetria tem uma exatidão de 0,40 m nas curvas de nível e de 0,25 m nos pontos cotados. A exatidão posicional está de



acordo com os valores de desvio toleráveis para cartografia à escala 1:2000 (Direção Geral do Território (DGT), 2013). A hidrografia representa os rios, ribeiras e outros cursos de água com uma precisão altimétrica igual à das curvas de nível. As intersecções das curvas de nível com as linhas de água são materializadas na inflexão das curvas de nível com um ponto comum a ambas. As construções de área superior a 4m² são identificadas, individualizadas e recolhidas à escala por um polígono, correspondente aos seus limites no solo.

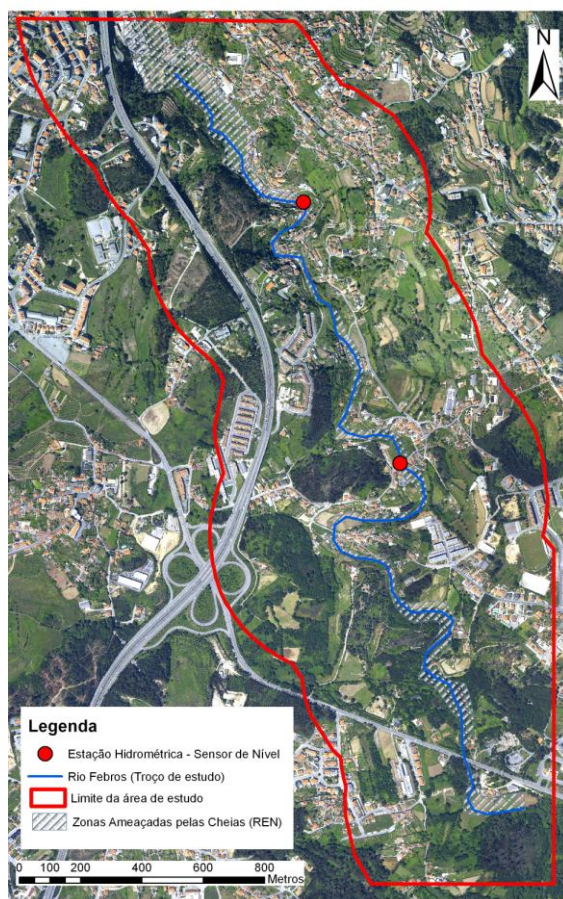


Figura 1 – Área de estudo delimitada pela linha a encarnado

Para calibração do modelo hidráulico foram recolhidos dados nas zonas inundáveis através de trabalho de campo, pós-evento de inundação, para determinar o limite da extensão de inundação. No trabalho de campo foram contactados os residentes das habitações afectadas e o Comandante dos Bombeiros Voluntários de Avintes para recolher dados que permitissem identificar e confirmar as marcas relativas ao limite máximo da extensão de inundação.

3. Metodologia

A metodologia utilizada usa um MDT, criado a partir de dados LiDAR, em formato grelha de 1 m x 1m, e produz mais dois MDT, com grelhas de 2 m x 2 m e 4 m x 4m através de reamostragem por interpolação bilinear. A cada um destes modelos é adicionado o edificado da cartografia a escala grande e a vegetação com altura inferior a 2 m extraída de ortoimagens CIR. Assim, com base na informação topográfica recolhida através do LiDAR (2.2) é gerado um MDS, no formato TOR que depois é convertido para o formato LAS (formato de ficheiro público para o intercâmbio de dados de nuvem de pontos 3D) (x,y,z) através do *software TopoSys converter*. O MDT é obtido pela filtragem do MDS. Esta filtragem é realizada através de um filtro baseado em TIN, desenvolvido por Axelsson (2000), que permite classificar os pontos em duas categorias: “pontos terreno” e “pontos não-terreno”. A justificação para a utilização deste filtro baseia-se



em diversos estudos publicados em Gonçalves e Gomes Pereira (2010), Meng et al. (2010), e Vosselman e Maas (2010). Este filtro está implementado no *software TerraScan®* (Soininen, 2012), que foi utilizado para realizar a filtragem do MDS.

O MDT assim obtido em formato grelha de 1 m x 1 m é utilizado para a criação de dois MDT, com grelhas de 2 m x 2 m e de 4 m x 4 m por interpolação bilinear. A integração dos edifícios consiste na adição ao MDT do limite da área de implantação das construções e respetiva altura, de acordo com a cartografia. Esta área corresponde à projeção vertical do edifício sobre a representação em plano horizontal do terreno. Este procedimento obriga à conversão de vetor para *raster* dos edifícios presentes na cartografia vetorial. A conversão foi efetuada com base na respetiva altura, e permitiu obter um mapa da altura dos edifícios, em formato *raster* de 1 m x 1 m, 2 m x 2 m e 4 m x 4 m adicionado aos MDT (Figura 2) através de álgebra de mapas (DeMers, 2001). Por sua vez, a integração da vegetação consiste na adição da sua altura e localização aos MDT. Para isso, torna-se necessário a extração de todos os objetos acima da superfície terrestre. Este processo contempla a produção do chamado Modelo Digital de Superfície normalizado (MDSn) que se obtém pela subtração do MDS com o MDT e que contém os valores da altura dos objetos presentes na superfície. Para separar a vegetação dos outros objetos são utilizadas ortoimagens CIR, de alta resolução espacial, a partir das quais é calculado o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (IVDN). Este índice é calculado como a razão entre a diferença dos valores de refletância medida nas regiões do vermelho e do infravermelho próximo do espectro eletromagnético, normalizada pelo valor da sua soma, sendo selecionadas essas duas bandas espectrais por serem as mais afetadas respetivamente pela absorção da clorofila na folhagem da vegetação e pela salubridade da planta. Aos *pixels* dos *raster* resultantes, com 1 m x 1 m, 2 m x 2 m e 4 m x 4 m, com valores do IVDN, foi atribuído os valores 0 e 1, consoante o IVDN seja inferior ou igual a 0,2 ou superior a 0,2. (Assume-se que valores de IVDN superiores a 0,2 correspondem a vegetação.) A altura associada a cada um destes *pixels* é obtida da sua multiplicação com o MDSn representando a distribuição espacial da altura da vegetação. Neste *raster*, aos *pixels* com um valor de altura superior a 2 m é atribuído o valor 0, por ter sido considerado que apenas a vegetação com altura menor que 2 m condiciona o escoamento superficial.

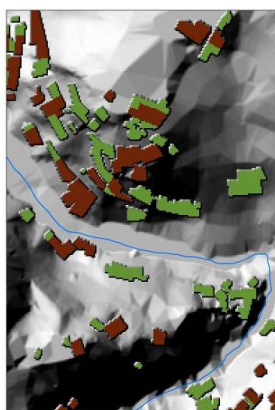


Figura 2 – Edifícios adicionados a um MDT

A Figura 3 ilustra o fluxograma do procedimento para a criação dos três MDSe com resoluções de 1 m x 1 m (MDSeLCI1m), de 2 m x 2 m (MDSeLCI2m), e de 4 m x 4 m (MDSeLCI4m).

O modelo hidráulico de inundação permite calcular o caudal de ponta de cheia, a altura de água, a velocidade de escoamento, a duração da inundação e simular o efeito de um evento de precipitação nos objetos presentes na superfície do terreno, durante a onda de cheia. O modelo LISFLOOD-FP é um modelo hidráulico de inundação *raster* 1D/2D que foi desenvolvido por Bates e Roo (2000) e incorporou, ao longo do tempo, várias modificações no seu código (Horritt e Bates, 2001a; Horritt e Bates, 2001b; Hunter et al., 2005; Trigg et al., 2009; Bates et al., 2010). O modelo baseia-se numa representação 1D do escoamento no leito do canal, acoplada a uma representação 2D do escoamento



na zona inundável (Bates e Roo, 2000). O MDSe é o elemento principal do LISFLOOD-FP devido à importância da topografia na modelação hidráulica de inundações.

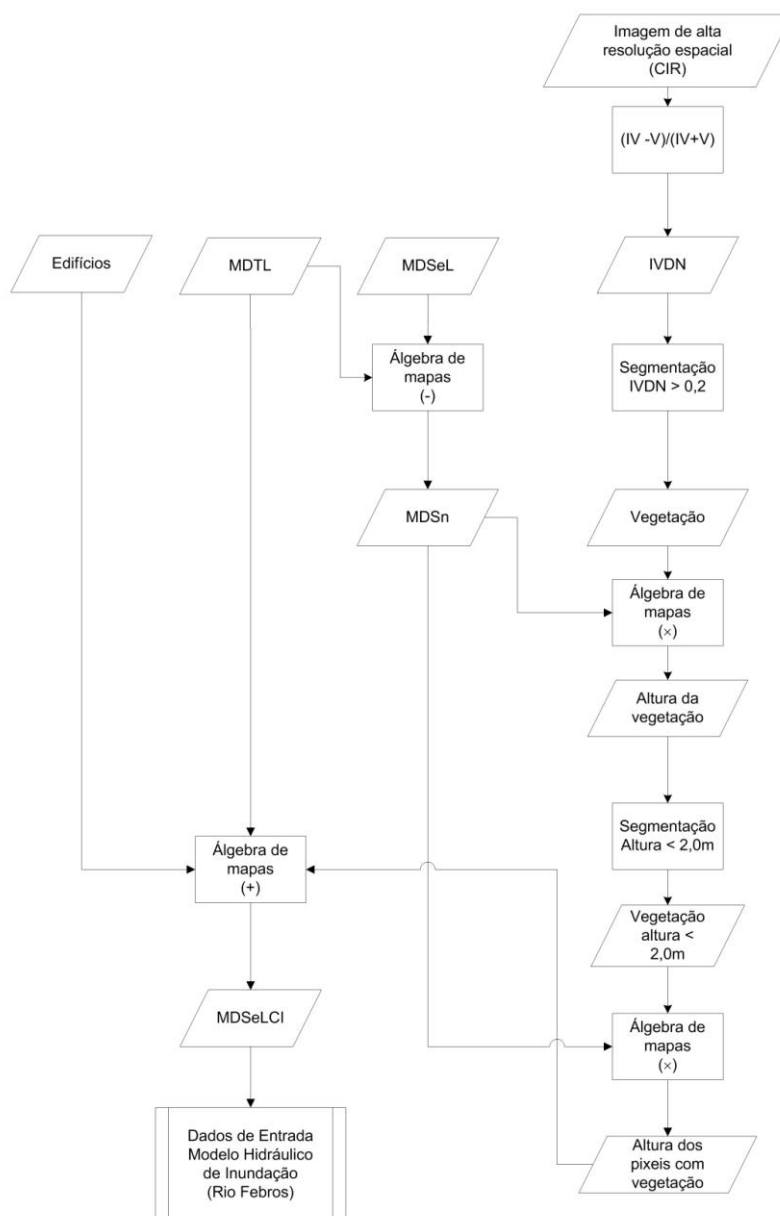


Figura 3 – Fluxograma do procedimento para a criação dos MDSelLCI1m, MDSelLCI2m e MDSelLCI4m

A comparação dos resultados obtidos com as três resoluções diferentes do MDSe é feito com base no indicador F (Bates e Roo, 2000), que é representado através da equação 1.



$$F = \frac{A^{obs} \cap A^{calc}}{A^{obs} \cup A^{calc}} \quad (1)$$

onde A^{obs} representa o conjunto de *pixels* observados como inundados, e A^{calc} conjunto de *pixels* calculados pelo modelo como inundados.

4. Apresentação de resultados e conclusões

As áreas inundadas estimadas pelo modelo LISFLOOD-FP com o MDSeLCI2m e o MDSeLCI4m são iguais a 50 520 m² e a 54 704 m², respetivamente. Tendo em consideração a extensão de inundação obtida com o MDSeLCI1m, verificou-se um aumento de 13% e 20% dessa área respetivamente com o MDSeLCI2m e o MDSeLCI4m (Figura 4).

Tendo como referência a extensão de inundação prevista com o MDSeLCI1m e utilizando o indicador F como medida de avaliação da concordância espacial da delimitação da zona inundável, verificou-se que existe um ajustamento de 0,87 e 0,78 respetivamente para o MDSeLCI2m e o MDSeLCI4m.

Relativamente ao tempo para a simulação computacional, utilizando um computador com processador Xeon E5405 – 2,0GHz, 32GB de memória RAM, e sistema operativo 64 bits, a utilização do MDSeLCI4m no LISFLOOD-FP permite uma redução de 15,7 vezes do tempo de simulação, em relação à utilização do MDSeLCI2m. Por sua vez, a simulação com o MDSeLCI2m permite uma redução de 3,8 vezes do tempo de simulação com o MDSeLCI1m.

A aplicação de uma menor resolução espacial provoca uma sobrestimação da extensão de inundação, que consequentemente se traduz num aumento da zona de perigo. Esta situação pode funcionar como um acréscimo de segurança na estimativa do risco de inundação e por isso, numa análise conjunta do desempenho do próprio modelo e da eficiência computacional, pode ser considerada como aceitável a utilização de uma resolução mais grosseira para avaliação do perigo de inundação.

Poder-se-á considerar que é expectável que a extensão de inundação obtida utilizando um *raster* de reduzida resolução derivado de um *raster* de alta resolução, como foi este caso (MDSeLCI2m ou MDSeLCI4m), seja mais exata do que aquela que se obtém quando é utilizado um *raster* derivado de dados de reduzida resolução. Isto porque os valores em altitude que compõem o MDSeLCI2m e MDSeLCI4m têm, em princípio, maior exatidão. De referir que, apesar da baixa resolução (MDSeLCI4m), os dados integram tipos de informação diversos, como a altitude de pontos no terreno, e a localização e altitude do edificado e da vegetação.

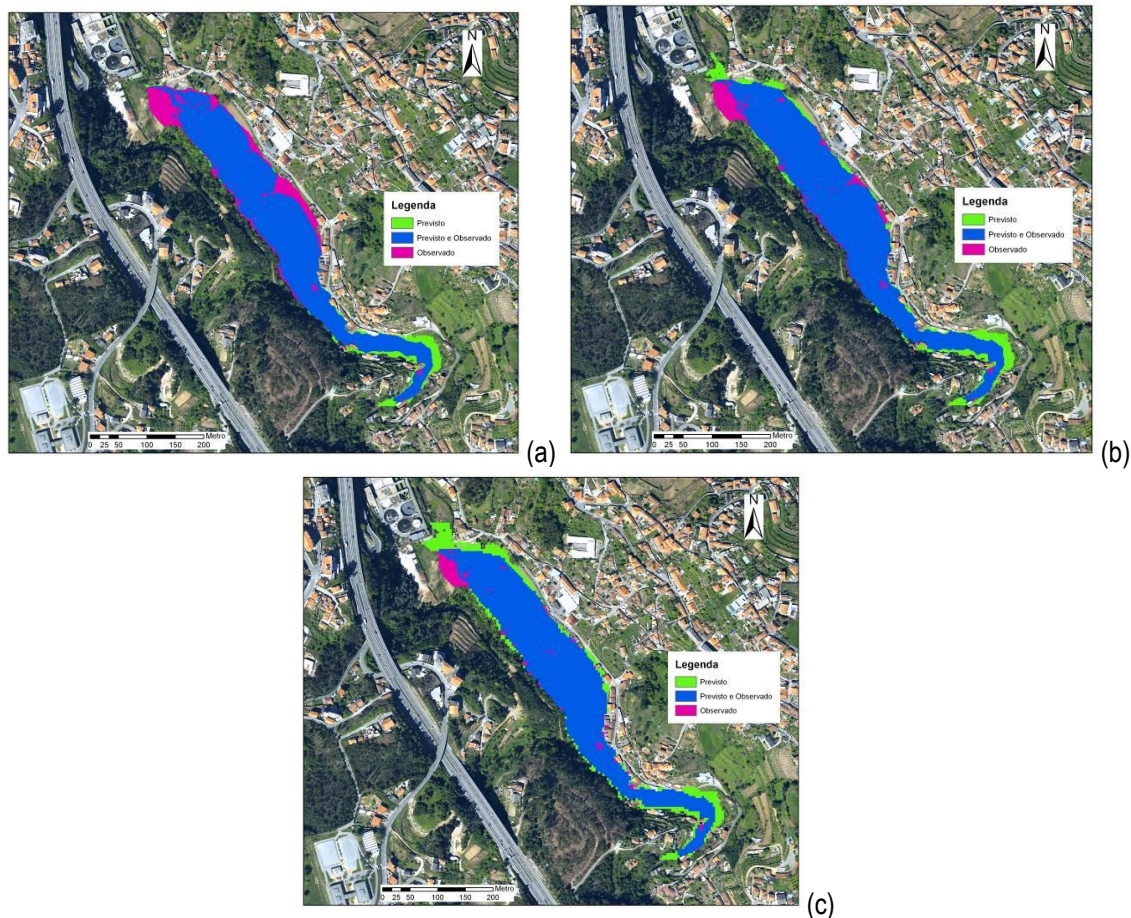


Figura 4 - Extensão de inundação prevista e observada para diferentes resoluções espaciais: a) MDSelC11m; b) MDSelC12m; c) MDSelC14m

Agradecimentos

Ao projeto de investigação POCI/CTE-GEX/60353/2004 – “Modelação e classificação da superfície terrestre pela integração de imagens multiespectrais e MDS”, os autores agradecem a disponibilização dos dados LiDAR e das imagens CIR.

Ao programa PROTEC da FCT, pela concessão da bolsa de doutoramento que permitiu o financiamento do estudo.

Referências Bibliográficas

- Axelsson, P. (2000). DEM Generation from Laser Scanner Data Using Adaptive TIN Models. *International Archives of the Photogrammetry and Remote Sensing*, XXXIII: 110-117.
- Bates, P.D., Roo, A.P.J.D. (2000). A simple raster-based model for flood inundation simulation. *Journal of Hydrology* 236: 54–77.
- Bates, P., Horritt, M., Wilson, M., Hunter, N. (2005). LISFLOOD-FP User manual and technical note. University of Bristol, Bristol.
- Bates, P.D., Horritt, M.S., Fewtrell, T.J. (2010). A simple inertial formulation of the shallow water equations for efficient two-dimensional flood inundation modelling. *Journal of Hydrology*, 387(1-2): 33-45.
- DeMers, M.N. (2001). *GIS Modeling in Raster*. Wiley, Chichester.



- Gao, J. (1997). Resolution and accuracy of terrain representation by grid DEMs at a micro-scale International Journal of Geographical Information Science, 11- Nº2: 199-212.
- Gonçalves, G., Gomes Pereira, L. (2010). Assessment of the performance of eight filtering algorithms by using full waveform LiDAR data of unmanaged eucalypt forest, The 10th International Conference on LiDAR Applications for Assessing Forest Ecosystems 2010, Germany, pp. 187-196.
- Haile, A.T., Rientjes, T.H.M. (2005). Effects of LIDAR DEM resolution in flood modelling: a model sensitivity study for the city of Tegucigalpa, Honduras, ISPRS WG III/3, III/4, V/3 Workshop "Laser scanning 2005", Enschede, Netherlands.
- Horritt, M.S., Bates, P.D. (2001a). Effects of spatial resolution on a raster based model of flood flow Journal of Hydrology, 253(1-4): 239-249
- Horritt, M.S., Bates, P.D. (2001b). Predicting floodplain inundation: raster-based modelling versus the finite-element approach. Hydrological Processes, 15(5): 825-842.
- Hunter, N.M., Horritt, M.S., Bates, P.D., Wilson, M.D., Werner, M.G. (2005). An adaptive time step solution for raster-based storage cell modelling of floodplain inundation. Advances in Water Resources, 28: 975-991.
- 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(WM1): 13-30.
- Meng, X., Currit, N., Zhao, K. (2010). Ground Filtering Algorithms for Airborne LiDAR Data: A Review of Critical Issues. Remote Sensing, 2(3): 833-860.
- Trigg, M.A., Wilson, M.D., Bates, P.D., Horritt, M.S., Alsdorf, D.E., Forsberg, B.R., Vega, M.C. (2009). Amazon flood wave hydraulics. Journal of Hydrology, 374(1-2): 92-105.
- Vosselman, G., Maas, H.-G. (2010). Airborne and Terrestrial Laser Scanning. CRC Press, Taylor & Francis Group, Scotland (UK).
- Yu, D., Lane, S.N. (2006). Urban fluvial flood modelling using a two-dimensional diffusion-wave treatment, part 1: mesh resolution effects. Hydrological Processes, 20: 1541-1565.
- Ziadat, F.M. (2007). Effect of Contour Intervals and Grid Cell Size on the Accuracy of DEMs and Slope Derivatives. Transactions in GIS, 11(1): 67-81.