



Criação e Avaliação do Modelo Digital de Superfície de Escoamento para Elaboração das Cartas de Risco de Inundação

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.

(¹palex@ipcb.pt; ²luisapereira@ua.pt; ³mmvmv@uevora.pt; ⁴gil@mat.uc.pt)

Palavras-chave: LiDAR, Cartografia a Escala Grande, Ortoimagens CIR, Modelo Digital de Superfície de Escoamento, Cartas de Risco de Inundação.

Resumo

As cartas de risco de inundação são elaboradas com base na avaliação do risco de inundação, que depende do perigo de inundação. Para a avaliação do perigo de inundação é necessária a delimitação da área inundada, obtida através de modelação hidráulica que requer como dado de entrada fundamental o Modelo Digital de Superfície de Escoamento (MDSe).

O objetivo deste trabalho é avaliar quatro MDSe comparando-os entre si visualmente e estatisticamente e comparando as extensões da inundação obtidas pela aplicação do modelo hidráulico LISFLOOD-FP usando o indicador F. Os quatro modelos estudados são produzidos com três conjuntos de dados, individualmente ou integrados. Os dados são obtidos de varrimento aéreo com laser, de cartografia a escala 1:2000 e de ortofotografias CIR (*Colour Infra-Red*). É feita a aplicação a uma área de 2,7 km² nas margens do rio Febros, afluente do rio Douro, com 1841 edifícios e 4725 residentes e localizada no município de Vila Nova de Gaia, no norte de Portugal.

Os resultados mostram, por um lado, que os quatro MDSe são visualmente e estatisticamente diferentes e, por outro, que o modelo LISFLOOD-FP conseguiu representar a extensão de inundação com maior rigor usando o MDSe que resulta da integração dos três conjuntos de dados ($F= 0,71$). Os resultados das simulações do modelo hidráulico mostram também que a integração de dados LiDAR e cartografia a escala grande na construção do MDSe possibilitou um bom ajustamento do modelo no cálculo da extensão de inundação ($F= 0,68$) e que o pior desempenho ($F= 0,53$) foi obtido com a utilização do MDSe produzido somente com os dados provenientes da cartografia.



1. Introdução

As inundações são um dos desastres naturais com mais impacto, provocando mortes, afetando pessoas e causando perdas económicas elevadas, tendo a sua frequência aumentado nos últimos anos. A avaliação do risco de inundação apresenta um carácter multidisciplinar e a abordagem deve ser centrada no perigo e na vulnerabilidade.

Para a avaliação do perigo de inundação é necessário extrair um Modelo Digital de Superfície de Escoamento (MDSe) que é um dado de entrada para o modelo hidráulico de inundação. Este MDSe representa a superfície do terreno e os objetos, onde se desenvolve e é condicionado o escoamento superficial, sendo um dos fatores determinantes na simulação de uma inundação provocada pela ocorrência de um evento de precipitação de elevada intensidade.

Tradicionalmente, o MDSe é construído à custa de informação existente, particularmente cartografia. Com o aparecimento de novas tecnologias para aquisição de geoinformação, como por exemplo aquela que se pode extrair do varrimento aéreo por laser, também conhecido como LiDAR (*Light Detection and Ranging*) e de imagens CIR, torna-se pertinente verificar até que ponto a integração de geoinformação obtida de diversas fontes poderá permitir construir um MDSe mais exacto e fidedigno com impacto na avaliação do perigo de inundação.

Assim, e no âmbito da modelação hidráulica de inundações em zonas urbanas, foi desenvolvido, testado e validado um método para a criação de um MDSe com exatidão e resolução espacial elevadas, pela integração de geoinformação existente e obtida de diferentes fontes. A avaliação do perigo de inundação foi efetuada numa área que contém zonas classificadas como Zonas Ameaçadas pelas Cheias nas margens do rio Febros, no município de Vila Nova de Gaia. Este município é o terceiro mais populoso de Portugal, e o mais populoso da região norte, com 302 295 habitantes em 2011, dos quais cerca de 180 000 residem em zonas urbanas, e onde ocorreram várias inundações nos últimos anos (Quaresma, 2008; Zêzere *et al.*, 2014). Segundo os dados disponibilizados pelo Comando Distrital de Operações de Socorro do Porto verificaram-se 1275 eventos de inundação, no período entre 1999 e 2009.

O modelo hidráulico adotado é o modelo LISFLOOD-FP que foi desenvolvido na Universidade de Bristol (Bates *et al.*, 2005).

Este artigo contém, para além da introdução, uma secção com a apresentação da área de estudo e os dados, a secção 3 com a apresentação da metodologia aplicada na criação e comparação dos MDSe, a secção 4 com a apresentação dos resultados e a secção 5 com a discussão de resultados e conclusões.

2. Área de Estudo e Dados

2.1 Área de Estudo

Na avaliação do perigo de inundação foi efetuada a modelação hidráulica da 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, imagens CIR ortoretificadas e cartografia à escala 1:2000. Os dados LiDAR, disponíveis em formato grelha com uma resolução espacial de 1 m, abrangem uma área de 5 km x 5 km no município de Vila Nova de Gaia, adquiridos em 2005, e representam um Modelo Digital de Superfície (MDS) LiDAR produzido com o último retorno. Os dados LiDAR apresentam, teoricamente, uma exatidão de 15 cm na componente vertical e 20 cm na componente horizontal. As imagens CIR são ortoretificadas com um *pixel* de 50 cm e foram adquiridas no mesmo voo de aquisição dos dados LiDAR. Estas imagens foram utilizadas para calcular o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (secção 3.1). 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 de implantação.

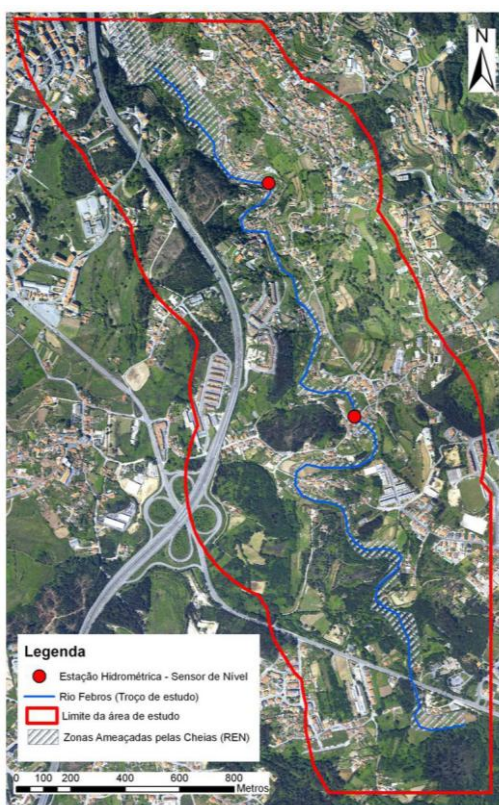


Figura 1 – Área de estudo, em Vila Nova de Gaia

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

As combinações de vários dados de fontes diversas permitiu produzir distintos MDSe. Neste estudo foram produzidos quatro MDSe, um diretamente obtido a partir dos dados LiDAR (MDSeL), e os outros três derivados, resultando da integração de vários elementos geográficos extraídos da cartografia a escala grande (MDSeC) ou da integração de elementos geográficos extraídos de diferentes fontes de informação, como dos dados LiDAR e cartografia a escala grande (MDSeLC), e dos dados LiDAR, cartografia a escala grande e ortoimagens CIR (MDSeLCI).

A justificação da criação de quatro MDSe é baseada na qualidade e nas características dos dados de base. No MDSeC, a Raiz Quadrada do Erro Médio Quadrático (RQEMQ) das curvas de nível da cartografia (1:2000) é inferior a 0,40 m e 90% do valor em Z de pontos de uma amostra têm erros inferiores a 0,65 m quando comparados com valores mais



precisos. Aqueles valores são 0,25 m e 0,40 m respetivamente para os pontos cotados (DGT, 2013). No entanto, a precisão final do MDSeC será menor considerando a conversão de formato vetorial para matricial. Como a exatidão dos dados LiDAR é, em geral, inferior a 0,15 m na vertical (Huising e Gomes Pereira, 1998), o MDTL é, em princípio, mais exato do que o MDTC.

A RQEMQ da informação planimétrica (X, Y) da cartografia (1:2000), que inclui o edificado e a rede hidrográfica, é inferior a 0,30 m e 90% das coordenadas X, Y amostradas são inferiores a 0,45 m (DGT, 2013). Quanto aos dados LiDAR, a qualidade planimétrica depende da altura de voo. Segundo Hass (2002) existe uma exatidão típica que varia entre 0,5 e 1,0 m para uma altura de voo de 1000 m. Assim, o edificado e a rede hidrográfica da cartografia têm, teoricamente, melhor exatidão planimétrica do que aquela dos dados LiDAR. Sendo assim, o MDSeLC terá melhor exatidão posicional do que o MDSeC e o MDSeL uma vez que o terreno é derivado do MDT resultante da filtragem dos dados LiDAR e os objetos e a rede hidrográfica da cartografia à escala 1:2000.

O MDSeLCI é igual ao MDSeLC com a diferença de que incluiu a altura da vegetação. Assim, ele permite também melhorar a representação de obstáculos que condicionam o escoamento superficial em relação ao MDSeLC. Por outro lado, como o MDSeLCI é construído a partir do MDT LiDAR, ele representa o terreno sem detalhes de alta frequência (pequena escala), sendo assim expectável que o MDSeLCI seja o modelo de superfície de escoamento mais exato.

A Error! Reference source not found. ilustra a metodologia de trabalho desenvolvida para obter os quatro MDSe que foram utilizados como dados de entrada do modelo hidráulico de inundação.

Nas secções 3.1 e 3.2 são apresentadas as metodologias para, respetivamente, a criação dos MDSe e para a sua avaliação.

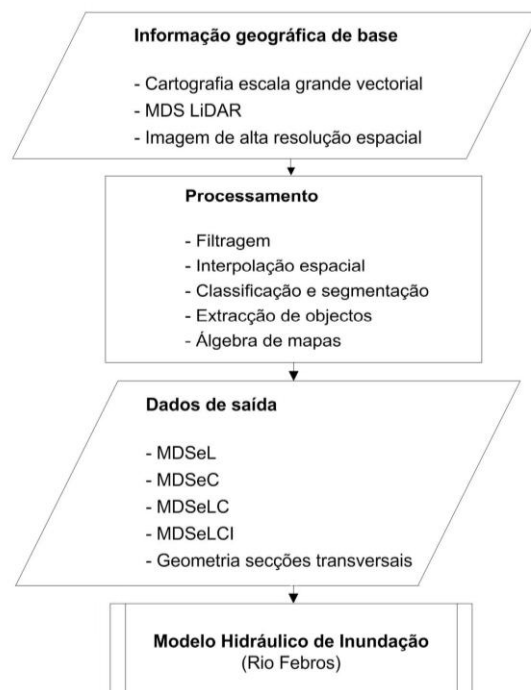


Figura 2 – Fluxograma da metodologia para criação do modelo digital de superfície de escoamento

3.1 Criação dos MDSe

Com base na informação topográfica recolhida através do LiDAR é gerado diretamente o MDSe, que foi denominado por MDSeL, no formato TOR. Os dados foram convertidos para o formato ASCII GRID através do *software* TopoSys converter®. Com este processo, a *raster* resultante, de 1 m x 1 m, contém *pixels* sem informação (*NoData*), os quais são



substituídos pela média focal dos valores atribuídos aos *pixels* numa vizinhança (3×3). Obteve-se assim um novo *raster* designado por MDSeL.

O MDSeC é composto pelo MDT com base na Cartografia (MDTC) e pelo edificado. O MDTC foi construído baseado na triangulação de um conjunto de dados - curvas de nível, pontos cotados, e rede hidrográfica - sendo a superfície modelada por um conjunto de faces trianguladas. O método TIN utiliza a triangulação de *Delaunay* condicionada à rede hidrográfica que foi considerada como linha de rotura (ESRI, 2012). Estas linhas não podem ser atravessadas pelas arestas da triangulação. O MDTC foi convertido através de interpolação linear para um *raster*, com uma resolução espacial de 1 metro. A integração dos edifícios consiste na adição ao MDTC do limite da área de implantação das construções e respetiva altura. 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, adicionado ao MDTC através de álgebra de mapas (DeMers, 2001). O resultado é o MDSeC.

O MDSeLC resulta da integração do Modelo Digital de Terreno LiDAR (MDTL) com edificado da cartografia a escala grande. O MDSeLCI corresponde à integração no MDSeLC de vegetação. O MDTL é obtido pela filtragem do MDSL 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*. 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 utilização deste filtro em detrimento de outros é justificada por 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 MDSL. Os pontos classificados como “pontos terreno”, depois do processo de filtragem, são utilizados para a produção de um *raster* com *pixels* de 1 m x 1 m, o MDTL, através de interpolação espacial. Analogamente ao processo para a criação do MDSeC, o mapa da altura dos edifícios é adicionado ao MDTL, resultando o MDSeLC.

A integração da vegetação consiste na adição da sua altura e localização ao MDSeLC. 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 MDSeL com o MDTL 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 no cálculo do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (IVDN). Este índice é calculado como a razão entre a diferença dos valores de reflectância medida nas regiões do vermelho e do infravermelho próximo do espectro eletromagnético, normalizada pela 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* do *raster* resultante, 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.

3.2 Avaliação dos MDSe

A avaliação dos MDSe é feita em três etapas. Primeiro, eles são avaliados qualitativamente comparando-os por inspeção visual. Segundo, eles são comparados entre si para se verificar até que ponto são diferentes. Esta diferença entre os MDSe é aqui entendida do ponto de vista estatístico e refere-se às populações a que pertencem os valores de altitude. O procedimento para esta análise envolve testes estatísticos que permitem, primeiro determinar a distribuição da população dos valores de altitude de cada um dos MDSe e, depois, verificar se existem diferenças significativas entre as populações. Para a realização da análise estatística foram amostrados aleatoriamente 940 pontos correspondentes a valores de altitude extraídos de cada MDSe. A amostra de pontos foi obtida na envolvente de 100 metros do Rio Febros, de forma a representar a área potencialmente inundável. Em primeiro lugar foi necessário analisar a distribuição das amostras, extraídas dos MDSeC, MDSeL, MDSeLC, e MDSeLCI. O teste de ajustamento de *Kolmogorov-Smirnov*



permite averiguar se uma amostra pode ser considerada como não proveniente de uma população com uma determinada distribuição (normal, uniforme, exponencial e Poisson). Como não são conhecidos os valores da média e do desvio padrão da população, foi utilizado o teste de *Kolmogorov-Smirnov* com a correção de *Lilliefors* (Lilliefors, 1967), e ainda outro teste de ajustamento específico para a lei normal, o teste de *Shapiro-Wilk* (Shapiro e Francia, 1972). Se as amostras não ajustarem a uma distribuição normal é utilizada uma análise estatística não paramétrica, o teste *Kruskal-Wallis*. O objetivo do teste de *Kruskal-Wallis* é verificar se as diferentes amostras são provenientes de populações idênticas em relação às medianas (Marques de Sá, 2007), permitindo testar se os valores de altitude dos MDSe são globalmente semelhantes ou se existem MDSe com valores globalmente maiores ou menores do que outros.

Terceiro, verificada a diferença entre os MDSe, eles são comparados através da área inundada obtida pela aplicação do modelo hidráulico LISFLOOD-FP e a área delimitada no trabalho de campo. A comparação é feita 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} o conjunto de *pixels* calculados pelo modelo hidráulico como inundados.

4. Apresentação de resultados

Os quatro MDSe produzidos de acordo com a metodologia descrita em 3.1 são ilustrados na Figura 3.

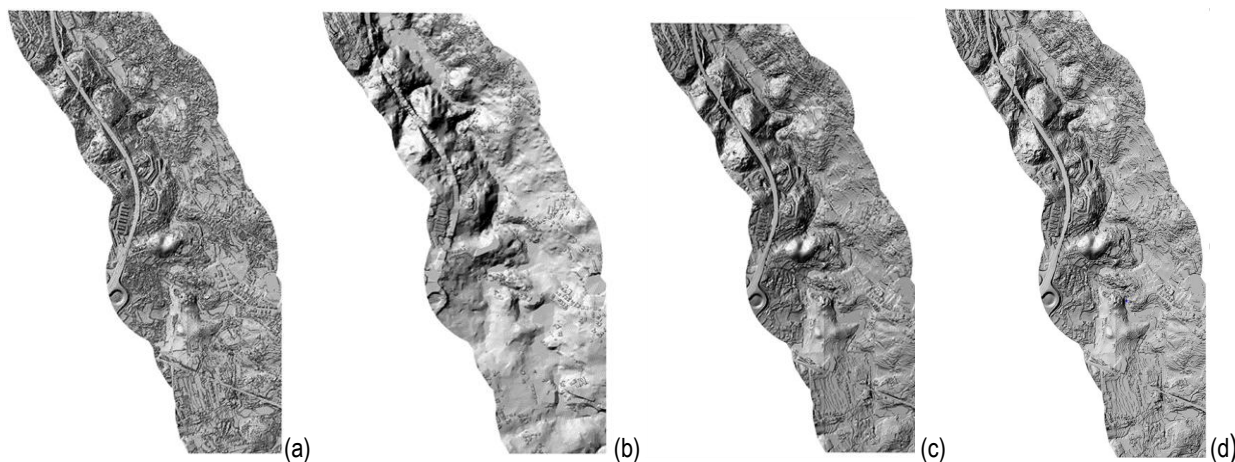


Figura 3 – Ilustração dos quatro MDSe: (a) MDSeL; (b) MDSeC; (c) MDSeLC; (d) MDSeLCI

Os resultados dos testes *Kolmogorov-Smirnov* e *Shapiro-Wilk* mostram que, para nível de significância de 5%, é reforçada a hipótese de que a população não tem uma distribuição normal. Como as amostras não advêm de uma população com distribuição normal foi utilizada uma análise estatística não paramétrica, o teste *Kruskal-Wallis*. Para um nível de significância de 5% os resultados do teste de *Kruskal-Wallis* confirmam que existem diferenças significativas entre os MDSe. Assim, é possível concluir que os quatro MDSe são diferentes, pelo que foram simuladas e comparadas as extensões de inundação obtidas pelo modelo LISFLOOD-FP utilizando os quatro MDSe. Essas extensões assim como a extensão delimitada no trabalho de campo estão ilustradas na Figura 4.

No Quadro 1 são apresentados os valores de desempenho do modelo (indicador *F*) na estimativa da extensão de inundação, para os quatro modelos digitais de superfície de escoamento, relativamente à extensão medida no terreno.

Quadro 1 – Resultados da avaliação de desempenho do modelo (indicador F) na estimativa da extensão de inundação relativamente à extensão medida no terreno.

MDSeC	MDSeL	MDSeLC	MDSeLCI
0,53	0,57	0,68	0,71

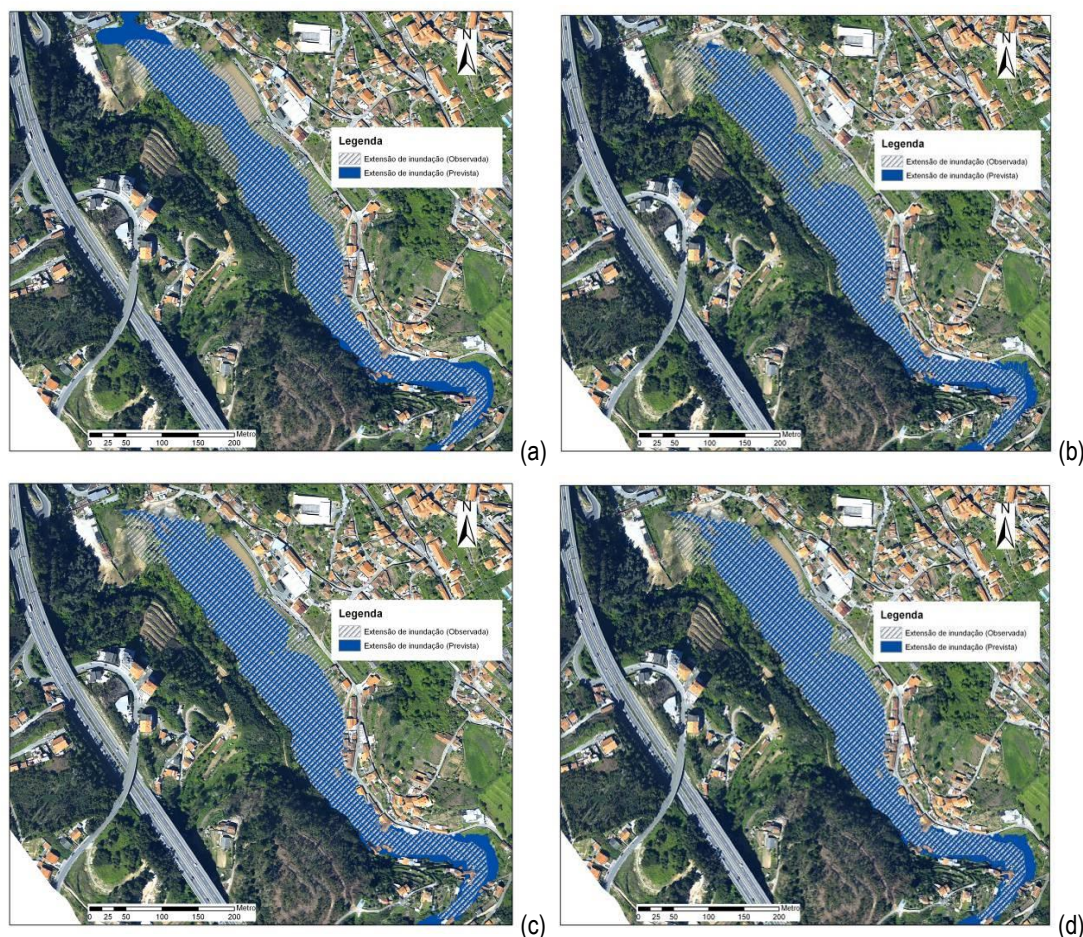


Figura 4 – Extensão de inundação prevista pelo modelo (a tracejado) e delimitada no trabalho de campo (a azul) para os vários MDSe: a) MDSeL; b) MDSeC; c) MDSeLC; d) MDSeLCI

5. Discussão de resultados e conclusões

A comparação estatística dos quatro MDSe confirma a sua diferença. Esta pode também ser constatada através da sua inspeção visual (Figura 3) que mostra que o MDSe com mais detalhe é o MDSeL e aquele com menos detalhe é o MDSeC. Os MDSeLC e MDSeLCI aparentam níveis de detalhe semelhantes sendo que o MDSeLCI parece estar um pouco mais suavizado.

O modelo LISFLOOD-FP conseguiu representar a extensão de inundação com maior rigor para o MDSeLCI ($F=0,71$), que é um elemento muito importante para o cálculo do perigo de inundação. Os resultados das simulações do modelo hidráulico mostram também que a integração de dados LiDAR e cartografia a escala grande na construção do MDSe possibilitou um bom ajustamento do modelo no cálculo da extensão de inundação ($F=0,68$) e que o pior desempenho foi obtido com a utilização do MDSe produzido somente com os dados provenientes da cartografia ($F=0,53$).



Concluindo, os resultados das simulações do modelo hidráulico desenvolvido pela Universidade de Bristol, o LISFLOOD-FP, mostram que a integração de dados LiDAR, cartografia a escala grande e ortoimagens CIR de alta resolução na construção do MDSe possibilitou o melhor ajustamento do modelo no cálculo da extensão de inundação.

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.
- DeMers, M.N. (2001). *GIS Modeling in Raster*. Wiley, Chichester.
- Direção Geral do Território (2013). *Cartografia e Ortofotocartografia à Escala 1:2 000 - Normas técnicas de produção e reprodução*, Lisboa.
- ESRI (2012). ArcGIS Help 10.1. <http://resources.arcgis.com/en/help/main/10.1/index.html#>, consultada em 3 de março de 2015.
- 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.
- Huisig, J., Gomes Pereira, L. (1998). Errors and accuracy estimates of laser data acquired by various laser scanning systems for topographic applications. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 53(5): 245-261.
- Lilliefors, H.W. (1967). On the Kolmogorov-Smirnov Test for Normality with Mean and Variance Unknown. *Journal of the American Statistical Association* 62, 399-402.
- Marques de Sá, J.P. (2007). *Applied Statistics Using SPSS, STATISTICA, MATLAB and R*. Springer, Berlin, 505 pp.
- 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.
- Quaresma, I. (2008). *Inventariação e análise de eventos Hidro-Geomorfológicos com carácter danoso em Portugal Continental*, Universidade de Lisboa, Lisboa, 100 pp.
- Shapiro, S.S., Francia, R.S. (1972). An Approximate Analysis of Variance Test for Normality. *Journal of the American Statistical Association* 67, 215-216.
- Soininen, A. (2012). *TerraScan User's Guide*. Terrasolid, Helsinki, Finland, 311 pp.
- Vosselman, G., Maas, H.-G. (2010). *Airborne and Terrestrial Laser Scanning*. CRC Press, Taylor & Francis Group, Scotland (UK).
- Zêzere, J.L., Pereira, S., Tavares, A.O., Bateira, C., Trigo, R.M., Quaresma, I., Santos, P.P., Santos, M., Verde, J. (2014). DISASTER: a GIS database on hydro-geomorphologic disasters in Portugal. *Natural Hazards*, 72(2): 503-532.