

## DELIMITAÇÃO DE EXTENSÃO DE CHEIAS NO RIO TEJO ATRAVÉS DE IMAGENS SAR

Dora ROQUE<sup>1</sup>, Nuno AFONSO<sup>1</sup>, Ana FONSECA<sup>1</sup> e Sandra HELENO<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Laboratório Nacional de Engenharia Civil

<sup>2</sup>Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa

Resumo: Devido à morfologia, à litologia e às condições meteorológicas características da bacia hidrográfica do rio Tejo (Almeida *et al.*, 2006; Benito *et al.*, 2003), a ocorrência de cheias neste rio é bastante frequente, sendo a causa de perda de vidas humanas e de bens materiais. A identificação das zonas em risco pode ser realizada através de modelos hidráulicos de cheia, os quais necessitam de ser calibrados a fim de estimar valores para parâmetros desconhecidos. Essa operação é feita com dados de cheias passadas, cuja extensão pode ser conhecida usando imagens de satélite adquiridas nas datas em que estas ocorreram. Foi seleccionado um conjunto de imagens SAR, provenientes de diferentes sensores, adquiridas em datas de cheia, as quais foram ortorrectificadas e normalizadas, tendo, ainda, sido alvo de pré-processamento com o objectivo de reduzir o ruído inerente a este género de imagens. Após o pré-processamento, as imagens foram segmentadas e classificadas, tendo sido desenvolvida uma metodologia com a finalidade de permitir a delimitação da extensão da cheia. O algoritmo desenvolvido permitiu a correcta classificação de 89% da área inundada representada numa imagem de teste e está a ser aplicado às restantes imagens do conjunto.

**Palavras-chave:** Cheias no rio Tejo / Imagens SAR de amplitude / Detecção remota / Processamento digital de imagem / Classificação por objectos.

### 1. INTRODUÇÃO

Apesar de muitos registos antigos terem sido perdidos em incêndios, guerras ou sismos (Azevêdo *et al.*, 2006), de acordo com Almeida *et al.* (2006) a cheia de 1876 é “conhecida como a maior cheia do Tejo de que há memória”. Diversa literatura histórica permite reconstituir os níveis atingidos pela água, através da citação de locais e acessos que ficaram inundados. Durante o século XX, várias cheias de elevada intensidade provocaram diversos danos materiais ao longo do curso do rio (Almeida *et al.*, 2006). A cheia que ocorreu em Fevereiro de 1979 é considerada como a maior desse século e as suas proporções históricas, em termos de área inundada, foram em parte devidas às descargas de barragens tanto em Portugal como em Espanha (Nunes and Azevêdo, 2011). Em Novembro de 1997, apesar de as barragens, em ambos os países da Península Ibérica, terem sido utilizadas para atenuar o impacto das inundações verificadas, não foi evitada a perda de vidas humanas, tendo morrido 11 pessoas em Portugal e 22 em Espanha como consequência das cheias (Rodrigues *et al.*, 2003).

Os modelos hidráulicos de cheia podem ser utilizados para planeamento urbano e avaliação de risco, uma vez que permitem conhecer, para uma determinada localização e para um dado instante, a profundidade da água e a sua velocidade na localização considerada (Donnell *et al.*, 2008). A relação entre estes factores depende de diversos parâmetros, como por exemplo, a rugosidade da superfície onde a água se desloca, que não é conhecida, sendo necessário estimar o seu valor. Conhecendo algumas informações relevantes referentes a datas de cheia, tais como os níveis hidrométricos em estações localizadas nas proximidades do corpo de água que provoca a inundaçã, é possível calibrar os modelos hidráulicos de cheia, ou seja, ajustar os valores dos parâmetros desconhecidos de forma a fazer coincidir a extensão de cheia prevista pelo modelo com a verificada na realidade.

A extensão da área inundada, necessária para calibrar os modelos, pode ser conhecida, para cheias recentes, através de dados de detecção remota. A ocorrência de cheias é, usualmente, acompanhada pela presença de nuvens, que impedem que os sensores que operam nas bandas do visível e do infravermelho do espectro

electromagnético registem a superfície. No entanto, os sensores que utilizam a banda das microondas não têm esta limitação, pois o comprimento de onda deste tipo de radiação é suficientemente elevado para não ser afectado pela dispersão atmosférica. A detecção de áreas inundadas em imagens SAR é possível devido ao facto de superfícies com diferentes rugosidades provocarem dispersões diferentes da radiação microondas reflectida. Numa situação em que a cobertura do solo está totalmente submersa e em que não ocorre vento nem chuva forte, a superfície da água encontra-se lisa, provocando a reflexão especular da radiação, reflectindo-a para fora do alcance do sensor. Desta forma, a superfície da água é representada na imagem através de valores baixos de amplitude, enquanto outros tipos de cobertura de solo, por exemplo a vegetação, apresentam valores mais elevados, dado que reflectem a radiação em várias direcções e parte desta é captada pelo sensor.

Na avaliação preliminar deste estudo foi seleccionado um conjunto de imagens SAR, de uma área escolhida, adquiridas em datas de cheia, as quais estão a ser alvo de diversos processamentos geométricos e radiométricos, tendo em vista a obtenção de informação vectorial de delimitação das áreas inundadas representadas nas imagens, que serão, posteriormente, utilizados para calibrar os modelos hidráulicos de cheia. As secções deste texto que se seguem apresentam a metodologia aplicada, assim como alguns dos resultados obtidos e o respectivo controlo de qualidade, no caso particular de um excerto da imagem do dia 7 de Novembro de 1997 adquirida na banda C do sensor ERS-2 SAR, a qual apresenta uma resolução espacial de 12,5 m.

## 2. METODOLOGIA

### 2.1. Área de Estudo e Selecção de Imagens

A área de estudo considerada está localizada no troço português do rio Tejo, situando-se, aproximadamente, entre as localidades de Benfica do Ribatejo e Abrantes. As margens do rio nesta zona são ocupadas por terrenos de cultivo, cujo potencial para a produção agrícola provém, em grande parte, das inundações que ocorrem frequentemente nesta zona (Almeida *et al.*, 2006; Azevêdo *et al.*, 2006; Freitas, 2006) Existem três estações hidrométricas localizadas na área de estudo, Ómnias, Almourol e Tramagal, cujos registos de níveis hidrométricos podem ser consultados no sítio da internet do Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos (SNIRH - <http://snirh.pt/>). Uma equipa do Instituto Superior Técnico realizou a análise dos valores registados desde 1992 e considerou como dias de cheia, aqueles que apresentavam níveis hidrométricos superiores ao percentil 95.

Foram adquiridas 28 imagens SAR da área de estudo relativas a datas de cheia, obtidas através dos sensores a bordo dos satélites ERS-1, ERS-2 e ENVISAT, todos operados pela Agência Espacial Europeia e actualmente desactivados. Os três sensores funcionam com a banda C e todas as imagens foram adquiridas com polarização VV, a qual não é a combinação de parâmetros de aquisição mais indicada para o estudo de áreas inundadas devido à sua elevada sensibilidade à rugosidade da superfície observada. Quanto a imagens ópticas, foram identificadas algumas imagens Landsat e SPOT, cuja principal aplicação é o auxílio na interpretação das imagens SAR.

### 2.2. Pré-Processamento Radiométrico e Geométrico

As operações de pré-processamento radiométrico e geométrico da imagem SAR, permitiram, para além de eliminar diferentes distorções geométricas (principalmente as introduzidas pelas variações da topografia do terreno), outro tipo de correcções, nomeadamente as relacionadas com a perda de propagação do sinal e aplicação de filtros às imagens. Estes realçam alguns pormenores e melhoram o contraste, contribuindo para a eliminação de algum “ruído” (*speckle*), característico das imagens SAR, que degrada a sua qualidade e dificulta a detecção e identificação de elementos.

Para as operações de pré-processamento, assim como de correção geométrica das imagens SAR, foram efectuados alguns testes, em diferentes programas de processamento de imagens, assim como nos diversos modelos de ortorrectificação disponíveis. Deste modo, a escolha recaiu sobre o programa NEST 4B (*Next ESA SAR Toolbox 4B*), que consiste num programa informático *open-source* desenvolvido pela ESA (*European Space Agency*), e específico para o processamento de imagens SAR.

No que diz respeito à informação altimétrica necessária para o processo de ortorrectificação, foi utilizado um Modelo Digital do Terreno (MDT) datado de Abril de 2008 e com o sistema de referência ETRS89, já delimitado à zona de estudo e com 5m de resolução espacial. Este MDT foi gerado através da tecnologia IFSAR (*InterFerometric Synthetic Aperture Radar*), que permite a recolha de informação altimétrica através de interferometria RADAR, e que foi adquirido à empresa INTERMAP<sup>1</sup>.

Tendo em conta o processo de ortorrectificação e após avaliação dos modelos disponíveis, o modelo de correcção utilizado baseou-se no *Range Doppler Terrain Correction*. Este modelo implementa o método de ortorrectificação *Range Doppler*, que utiliza os diversos parâmetros orbitais importados dos metadados dos ficheiros da imagem, dados temporais e um conjunto de parâmetros auxiliares para a correcção do deslocamento devido ao relevo, corrigindo assim a imagem das diferentes deformações perspectivas, utilizando o MDT como informação de referência (ESA, 2011). Deste modo, neste método, não existe a necessidade de selecção de pontos de controlo. As imagens resultantes do processo de correcção geométrica foram georreferenciadas no sistema de referência ETRS89. Aliado a este processo de ortorrectificação foi igualmente efectuada uma operação de correcção e normalização radiométrica absoluta que utiliza a informação do MDT, obtendo-se assim as imagens ortorrectificadas e em que os níveis de intensidade dos pixéis são valores do coeficiente de retroreflexão ( $\sigma_0$ ). Desta forma, a imagem fica preparada para posterior processamento e análise multitemporal.

Nas Figuras 1 e 2 ilustram-se excertos da imagem SAR ortorrectificada e normalizada e do Modelo Digital do Terreno utilizado, respectivamente.



Figura 1 – Excerto da imagem SAR ortorrectificada e normalizada radiometricamente (7 de Novembro de 1997).

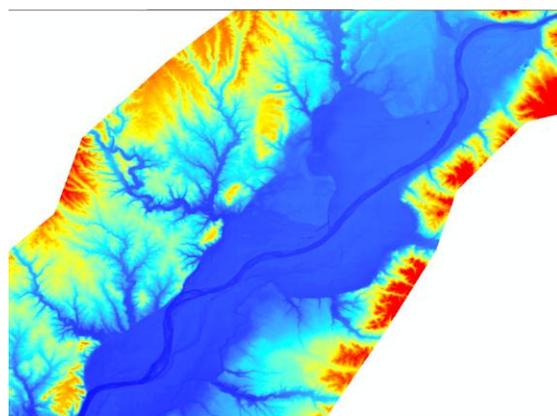


Figura 2 – Excerto do Modelo Digital de Terreno utilizado, adquirido em Abril de 2008.

<sup>1</sup> <http://www.intermap.com>

### 2.3. Algoritmo de Classificação

Para obter um polígono de delimitação da cheia observada, a imagem foi alvo de um processo de segmentação, durante o qual foram agregados pixels vizinhos com características semelhantes, de acordo com determinados critérios definidos pelo utilizador. Um desses critérios, a Escala, está relacionado com a variabilidade de níveis de intensidade permitida a cada objecto, sendo tanto maior quanto maior for essa variabilidade. Para este trabalho foi utilizada uma Escala relativamente baixa, pois valores elevados deram origem a polígonos com pixels de classes diferentes. Foram ainda considerados outros parâmetros como a Cor e a Forma, sendo esta, ainda, caracterizada em função da Suavidade e da Compacidade. Diferentes pesos atribuídos a cada uma destas componentes deram origem a objectos com características distintas. Após a realização de diversos testes, verificou-se que a melhor combinação de pesos associou importâncias iguais à Cor e à Forma e deu maior destaque à Compacidade do que à Suavidade, permitindo obter polígonos de pequenas dimensões, com um formato próximo da circunferência ou da elipse, contendo apenas pixels de uma classe de cobertura de solo.

Após a conclusão da segmentação da imagem, os objectos foram classificados com uma de duas classes (Área Inundada ou Outras Classes) tendo em conta diversas das suas propriedades. Dado que os objectos relativos à área inundada, na sua maioria, apresentavam tons escuros, estes foram realçados através do cálculo do valor do logaritmo do coeficiente de retroreflexão, o que deu origem a polígonos de água mais escuros e a polígonos de outras classes de ocupação de solo com valores elevados e próximos entre si, permitindo o realce da zona de interesse. A classe Área Inundada foi atribuída aos objectos com valores mais baixos de logaritmo, sendo os restantes classificados como Outras Classes. A fim de diminuir os erros de comissão, ou seja, a quantidade de polígonos pertencentes a Outras Classes aos quais foi atribuída a classe Área Inundada, a classificação inicial considerou apenas os objectos mais escuros. Outro critério relevante para a classificação inicial é a altitude média de cada objecto, proveniente do MDT. Ao comparar o MDT com a imagem SAR, verificou-se que existia um limiar de altitude a partir do qual já não eram observados polígonos de inundação, portanto este limiar foi utilizado para limitar a classificação das Áreas Inundadas, evitando erros de comissão. Posteriormente, foi efectuado o crescimento dos polígonos classificados como inundação, mas apenas para os objectos vizinhos que apresentavam valores de logaritmo de coeficiente de retroreflexão inferior a um segundo limiar um pouco superior ao primeiro considerado para esta variável.

A fim de eliminar alguns objectos de outras classes classificados como Áreas Inundadas, mas que não estavam junto à zona de cheia, foi realizada a fusão de todos os polígonos de água adjacentes num único objecto. Verificou-se que a zona de cheia era o objecto com a classe Área Inundada que apresentava maior área, sendo possível eliminar os objectos mal classificados através desta propriedade. Outra propriedade dos objectos que também pode ser utilizada com esta finalidade é a densidade, a qual permite distinguir objectos alongados de outros mais compactos, tendo sido verificado que a zona inundada apresentava uma forma mais alongada do que a maioria dos restantes polígonos, o que corresponde a valores baixos de densidade.

O procedimento exposto permitiu detectar uma grande proporção da área inundada num passo inicial da classificação, porque a zona ocupada por água apresentava valores de coeficiente de retroreflexão relativamente mais baixos que os restantes tipos de cobertura de solo. No entanto, frequentemente, a superfície da água é perturbada pelo vento, por chuva forte (o que é comum durante a ocorrência de cheias) ou por alguns elementos do terreno que não ficaram submersos, o que implica valores mais elevados de coeficiente de retroreflexão. Após a classificação inicial, foi necessário avaliar a situação de outros polígonos adjacentes à zona já classificada para afinar o resultado da classificação. Uma das situações a destacar são os polígonos que se encontram totalmente rodeados por água. O valor médio do coeficiente de retroreflexão destes foi comparado com o de outros polígonos, os quais não apresentavam dúvidas de classificação, e foi definido um limiar que permitiu adicionar à mancha de cheia apenas aqueles que se encontravam indubitavelmente inundados. A utilização do valor médio do coeficiente de retroreflexão em detrimento do uso do seu logaritmo nesta fase do processamento deve-se ao facto de os polígonos considerados apresentarem valores intermédios da variável, sendo mais intuitiva a diferenciação entre os valores originais do que entre os respectivos logaritmos.

Durante o processamento supracitado, alguns polígonos adjacentes à cheia, mas que não se encontravam inundados, foram classificados como Áreas Inundadas, tendo sido necessário reavaliar a sua classificação. Para tal, foi realizada uma nova segmentação, apenas dos polígonos considerados como água, usando um valor

elevado de Escala para gerar objectos de grandes dimensões e atribuindo pesos elevados à Forma e à Compacidade, para obter objectos arredondados. A distinção entre os polígonos efectivamente inundados e os restantes foi realizada, uma vez mais, através do valor médio do coeficiente de retrorreflexão dos objectos, tendo sido obtido, desta forma, o contorno final da região inundada (Figura 3). O programa utilizado para efectuar a segmentação e classificação da imagem foi o *Definiens® Developer*.

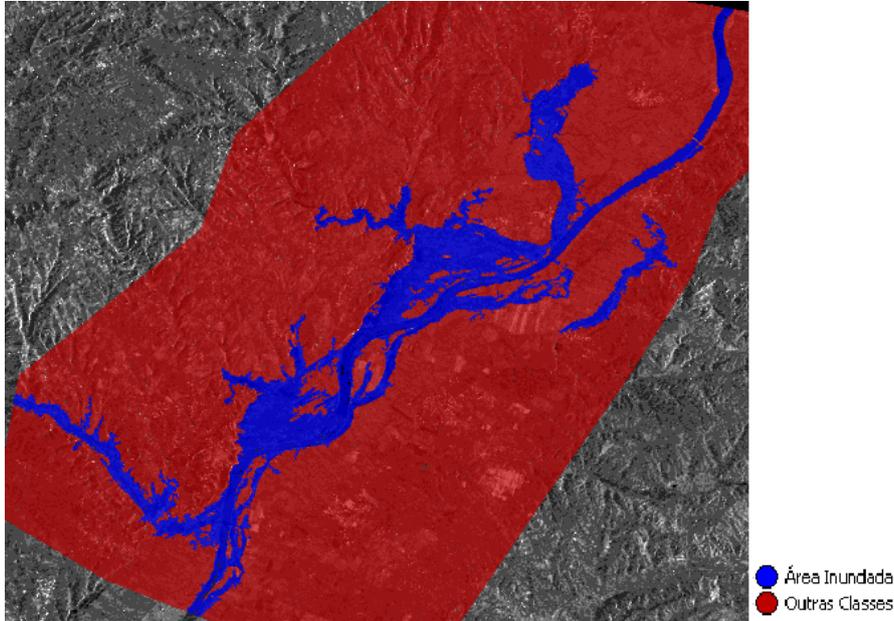


Figura 3 – Excerto da imagem SAR adquirida no dia 7 de Novembro de 1997 classificada com o algoritmo proposto.

## 2.4. Controlo de Qualidade

A fim de aferir a precisão do algoritmo de detecção de áreas inundadas através da análise de objectos, o limite da cheia foi digitalizado manualmente sobre a imagem SAR, uma vez que não havia nenhuma imagem óptica disponível para a data considerada, nem outra informação sobre a extensão da área inundada. Este vector foi utilizado como referência, tendo sido feita a comparação entre este e o vector resultante do processo de classificação. Foi determinada a percentagem de área comum entre os dois vectores (Área Comum), a percentagem da área que foi detectada a mais na classificação (Erros de Comissão) e a percentagem da área inundada que não foi detectada (Erros de Omissão), em que a área do vector resultante da digitalização manual foi utilizada como referência para o cálculo dos índices. Os resultados obtidos encontram-se no Quadro 1.

Quadro 1 – Controlo de qualidade da delimitação das áreas inundadas obtida através da classificação por objectos.

|                       |    |
|-----------------------|----|
| Área Comum (%)        | 89 |
| Erros de Comissão (%) | 18 |
| Erros de Omissão (%)  | 11 |

Verificou-se que o algoritmo permitiu detectar uma percentagem considerável da área inundada. Os Erros de Comissão observados são um pouco elevados, mas num trabalho desta natureza os Erros de Omissão são mais preocupantes, pois a omissão de áreas que poderão vir a ser inundadas pode ter um impacto mais negativo numa operação de planeamento eficaz.

### 3. CONCLUSÕES

As cheias no rio Tejo têm causado diversas situações problemáticas, pondo em risco vidas humanas e bens materiais. Uma das formas de minimizar as consequências deste fenómeno é um planeamento eficaz, com a identificação das zonas que se encontram em maior risco, e a tomada de medidas atempadas para minimizar as consequências de desastres. Para este efeito, os modelos hidráulicos de cheia podem ser de elevada importância, sendo necessário calibrá-los para a zona de estudo considerada, sendo muito relevante a precisão com que a extensão da cheia é conhecida. A metodologia apresentada neste trabalho, que realiza a extracção da linha de cheia através de análise de objectos efectuada sobre imagens SAR com o auxílio do MDT, permitiu identificar uma percentagem considerável da área inundada, incluindo não só as zonas radiometricamente mais escuras, mas também zonas com alguma turbulência na superfície da água. Actualmente, o algoritmo desenvolvido está a ser aplicado às restantes imagens SAR do conjunto seleccionado e está a ser adaptado para possibilitar também a análise de zonas inundadas onde a cobertura do solo não ficou totalmente submersa.

#### Agradecimentos

Este trabalho foi desenvolvido no âmbito do projecto RIVERSAR (PTDC/CTE-GIX/099085/2008), financiado pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia. Dados fornecidos pela Agência Espacial Europeia.

#### Referências

- Almeida, M. C., Azevêdo, T. M. e Pimentel, N. L. (2006). As Cheias Históricas na Região de Abrantes. Tagus Floods '06 Workshop, Lisboa, Portugal, Julho 19 – 21, 2006. Abstracts Book, p. 59 – 61.
- Azevêdo, T. M., Nunes, E., Ramos, C., Pereira, A. R., Freitas, C., Andrade, C. and Pereira, D. I. (2006). The Tagus River and Its Historical Floods (Santarém, Portugal). Tagus Floods '06 Workshop, Lisboa, Portugal, Julho 19 – 21, 2006. Abstracts Book, p. 64 – 67.
- Benito, G., Díez-Herrero, A. and Villalta, M. F. (2003). Magnitude and Frequency of Flooding in the Tagus Basin (Central Spain) over the Last Millennium. *Climatic Change*, 58, p. 171 – 192.
- Donnell, B. P., Letter, J.V., McAnally, W. H., Thomas, W. A. and King, I. (2008). Users Guide for RMA2 Version 4.5. US Army, Engineer Research and Development Center, Waterways Experiment Station, Coastal and Hydraulics Laboratory.
- Freitas, J. G. (2006). Acções Antrópicas na Bacia Hidrográfica do Tejo na Época Contemporânea: Florestação, Correção Torrencial e Controlo de Cheias. Tagus Floods '06 Workshop, Lisboa, Portugal, Julho 19 – 21, 2006. Abstracts Book, p. 56 – 58.
- ESA, (2011). NEST 4B User Manual. European Space Agency.
- Nunes, E. and Azevêdo, T. (2011). The Evolution of the Tagus River's Main Channel (Santarém, Portugal) through Cartographic Analysis. *The Egyptian Journal of Environmental Change*, Volume 3, Number 1, p. 7 – 17.
- Rodrigues, R., Brandão, C. e Costa, J. P. (2003). Breve Nota sobre as Cheias no Tejo e o Seu Sistema de Vigilância e Alerta. Direcção dos Serviços de Recursos Hídricos, Instituto da Água.

#### Contactos

Dora ROQUE

droque@lnec.pt

Laboratório Nacional de Engenharia Civil

www.lnec.pt

Portugal