



Mariana Matias Ribeiro Corrêa

Licenciada em Ciências de Engenharia do Ambiente

Contribuição para Avaliação e Gestão de Riscos de Inundações. Caso de estudo: Bacia Hidrográfica do Rio Nabão

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia do Ambiente - Perfil de Gestão e Sistemas Ambientais

Orientador: Professor Doutor Pedro Manuel da Hora Santos Coelho, Professor Auxiliar, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa

Júri

Presidente: Prof. Doutor António Pedro de Nobre Carmona Rodrigues

Arguente: Prof. Doutor Paulo Alexandre Marques Diogo

Orientador: Prof. Doutor Pedro Manuel da Hora Santos Coelho



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Julho 2013

“Copyright” Mariana Matias Ribeiro Corrêa, FCT/UNL e UNL

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objectivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar não poderia deixar de agradecer ao Professor Doutor Pedro Santos Coelho, que ao longo desta fase, desempenhou um papel bastante importante pela orientação e incentivo que sempre demonstrou. Gostaria de expressar o meu agradecimento ao Eng.º Manuel Almeida pela paciência e prontidão com que sempre respondeu às minhas dúvidas.

Aos meus pais e irmãos, pela força e confiança que sempre depositaram em mim e por todo o apoio que me possibilitou desenvolver capacidades tanto a nível académico como pessoal.

Ao Miguel, pela presença incondicional, compreensão, carinho e motivação que sem dúvida me ajudaram a ultrapassar muitos dos momentos mais difíceis.

Por último, mas sempre presentes, todos os que me acompanharam nesta fase e que sem eles certamente não seria a mesma coisa. Dani, Inês e Lipa muito obrigada pela vossa preocupação, palavras de encorajamento e companhia. Chino e Zorro, pela disponibilidade e tempo que dispensaram quando precisei. Mouras, Pedro, Rolo e Sara pelas palavras de apoio e companhia nos momentos de distração. Maria e Pipa que, mesmo longe nunca deixaram de manifestar o apoio e a grande amizade.

RESUMO

A crescente ocorrência de fenómenos extremos, entre os quais se destacam as cheias e inundações, é um problema a nível mundial que, pelo facto de não serem previsíveis, torna essencial aprofundar o seu conhecimento, as suas causas e propor medidas preventivas das consequências que advêm das mesmas. A consciencialização da problemática das cheias e inundações na Europa conduziu ao aparecimento de directrizes europeias que visam minimizar os correspondentes efeitos adversos.

Portugal testemunhou, ao longo da sua história, efeitos devastadores de grandes cheias e inundações, com maior frequência de cheias rápidas, devido às características das precipitações que desencadeiam este tipo de cheias e das bacias hidrográficas afectadas. A cidade de Tomar encontra-se particularmente susceptível à ocorrência destes fenómenos hidrológicos, já que é atravessada pelo rio Nabão, com consequências graves nas zonas ribeirinhas, tanto no que diz respeito aos impactes físicos como económicos.

Como objectivo principal deste trabalho pretende-se a aplicação de um modelo hidrológico - hidráulico ao rio Nabão, com a finalidade de elaborar as cartas de zonas inundáveis no troço crítico do respectivo rio. A metodologia adoptada na presente dissertação constitui um contributo para a preparação e elaboração destas cartas a incorporar nos Planos de Gestão de Riscos de Inundações em Portugal, correspondendo à primeira etapa da gestão destes riscos.

As ferramentas utilizadas para a simulação hidrológica e hidráulica do escoamento no rio Nabão foram os modelos HEC-HMS e HEC-RAS. Ambos os modelos possuem extensões que os integram directamente num Sistema de Informação Geográfica (ArcGIS), possibilitando todo o processamento dos dados geométricos da zona de estudo, assim como a visualização dos resultados obtidos. A cartografia de áreas inundáveis obtida pela aplicação do modelo hidrológico-hidráulico proposto reconhece a importância da informação de base que suporta a elaboração de tais mapas, principalmente no que diz respeito à informação geográfica utilizada.

Palavras-chave: Cheias e Inundações, Modelação hidrológica e hidráulica, HEC-HMS, HEC-RAS, rio Nabão, áreas inundáveis

ABSTRACT

The experienced growth in extreme environment phenomena, namely flooding and water level raisings, is a global issue that, because of its unpredictability, makes it an important subject to study (causes and preventive measures). The awareness of the mentioned issue in Europe led to the approval of European Directives which aim to minimize the adverse consequences of such events.

Portugal has witnessed, throughout its history, the devastating effects of big flooding, rapid flooding being the most frequent due to precipitation characteristics that cause this kind of flooding, and the affected river basins. The city of Tomar, located in central Portugal, is particularly vulnerable to this phenomenon due to being crossed by Nabão River. This has physical and economic consequences on the river bank areas.

The main purpose of this investigation is to apply a hydrologic – hydraulic model to Nabão River, in order to elaborate flood charts of the critical section of the river. The method used in the present dissertation pretends to be a contribution for the elaboration of the charts planned to be part of Portugal's Flood Risk Management Plan. This corresponds to the first stage of the Risk Management.

The tools used for the hydrologic and hydraulic simulation of Nabão's river water flow were the models HEC-HMS and HEC-RAS. Both models allow them to be directly integrated in a Geographic Information System (ArcGIS), allowing all the geometric data of the case study area to be processed and the visual interface of the obtained results. The mapping of the flood hazard areas obtained through the proposed hydrologic-hydraulic model recognizes the importance of the base information that supports the elaboration of those maps, mainly in what concerns the geographic information used.

Keywords: Flooding, Hydraulic and Hydrologic Modeling, HEC-HMS, HEC-RAS, Nabão River, flood hazard areas.

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Âmbito e enquadramento teórico	1
1.2. Objectivos.....	2
1.3. Organização da dissertação.....	3
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
2.1. O problema das inundações.....	5
2.2. Cheias em Portugal.....	8
2.3. Gestão dos riscos de inundações	17
2.4. Modelos matemáticos e integração com SIG.....	22
3. METODOLOGIA.....	27
3.1. Caso de estudo	27
3.1.1. Características da bacia hidrográfica.....	29
3.1.2. Registo histórico de cheias em Tomar	31
3.2. Modelo hidrológico-hidráulico.....	32
3.2.1. Análise estatística de precipitações máximas diárias anuais	34
3.2.2. Análise estatística das séries de registos hidrométricos.....	37
3.2.3. Modelo hidrológico	38
3.2.4. Modelo hidráulico	50
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	55
5. CONCLUSÕES.....	67
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	69

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Desastres Naturais que afectaram os países da EEA entre 1980 e 2011	7
Figura 2.2. Ocorrências de Eventos Hidro-Geomorfológicos (Cheias e Movimentos de Massa)	11
Figura 2.3. Dados de desastres naturais em Portugal	12
Figura 2.4. Principais perigos em Portugal Continental	13
Figura 2.5. Marcas de cheias, zonas críticas e pontos críticos de inundações	15
Figura 3.1. Localização da Bacia Hidrográfica do Rio Nabão	28
Figura 3.2. Localização das estações hidrométricas na bacia hidrográfica	29
Figura 3.3. Ocupação e Uso do Solo (CLC 2006)	30
Figura 3.4. Carta Litológica da área de estudo	31
Figura 3.5. Cheia de Novembro de 2006 no centro da cidade de Tomar	32
Figura 3.6. Fluxograma da metodologia proposta	33
Figura 3.7. Localização das estações meteorológicas	35
Figura 3.8. Ferramentas do pré-processamento do terreno com o HEC-GeoHMS	40
Figura 3.9. Modelo Digital do Terreno com preenchimento de depressões (<i>Fill Sinks</i>)	41
Figura 3.10. Direcção do escoamento	42
Figura 3.11. Escoamento Acumulado	42
Figura 3.12. Rede de drenagem	43
Figura 3.13. Bacia hidrográfica do rio Nabão, dividida em duas sub-unidades	44
Figura 3.14. Componentes da simulação hidrológica	46
Figura 4.1. Classes de declive	55
Figura 4.2. Número de escoamento CN (AMC II)	56
Figura 4.3. Hidrograma de cheia para o período de retorno de 50 anos	60
Figura 4.4. Hidrograma de cheia para o período de retorno de 100 anos	61
Figura 4.5. Hidrograma de cheia para o período de retorno de 500 anos	61
Figura 4.6. Enquadramento do troço analisado no Município de Tomar	62
Figura 4.7. Geometria do troço do rio Nabão em estudo e respectivas secções transversais	63
Figura 4.8. Mapa de inundação para um período de retorno de 50 anos	64
Figura 4.9. Mapa de inundação para um período de retorno de 100 anos	64
Figura 4.10. Mapa de inundação para um período de retorno de 500 anos	65

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1. Principais cheias ocorridas desde o início do séc. XX	10
Tabela 3.1. Principais características das estações meteorológicas com influência na BH do rio Nabão ..	35
Tabela 3.2. Características principais das estações hidrométricas do rio Nabão	37
Tabela 4.1. Valores dos tempos de concentração para a bacia hidrográfica e para a sub-bacia inseridos no programa HEC-HMS.....	56
Tabela 4.2. Principais características da bacia hidrográfica do rio Nabão	57
Tabela 4.3. Precipitações ponderadas da bacia hidrográfica do rio Nabão para os períodos de retorno de 2, 10, 50, 100 e 500 anos.....	58
Tabela 4.4. Caudais de cheia estimados pelo método racional	58
Tabela 4.5. Caudais de cheia estimados por análise estatística da série de registos da estação hidrométrica Fábrica da Matrena	59
Tabela 4.6. Caudais de ponta de cheia obtidos no HEC-HMS	59

1. INTRODUÇÃO

1.1. Âmbito e enquadramento teórico

As cheias são um desastre natural comum que não pode ser evitado e, em conjunto com as tempestades, os desastres naturais mais importantes em termos de prejuízos económicos na Europa (EEA, 2012). As cheias são fenómenos cíclicos e temporários causados principalmente por eventos de precipitação prolongados, intensos ou pelo degelo e, em muitos casos, pela conjugação desses factores.

Nos últimos 30 anos foram reportados 3 119 eventos de cheias e inundações na plataforma de registos de desastres naturais - EM-DAT (*Emergency Events Database*)¹ - destes resultaram 20 000 mortes e mais de 2,8 mil milhões de pessoas afectadas. Na Europa, as cheias são os desastres naturais mais comuns, e em anos recentes ocorreram dos mais graves desastres na história da Europa, onde 7 dos 20 desastres mais importantes registados (em termos do número de pessoas afectadas) ocorreram na década 2000-2010. No verão de 2002 as grandes cheias no Danúbio e no Elba e as cheias de 2007 no Reino Unido determinaram danos na ordem dos 20 mil milhões de euros (EM-DAT, 2013).

A consciencialização da problemática das cheias e inundações na Europa conduziu ao aparecimento de directivas europeias que visam minimizar os efeitos adversos. A Directiva 2007/60/CE do Parlamento Europeu e do Conselho, de 23 de Outubro, relativa à avaliação e gestão dos riscos de inundações estabelece linhas estratégicas para a promoção de uma acção concertada na definição dos planos de gestão de risco de inundação de bacias hidrográficas afectadas.

Portugal conheceu ao longo da sua história os efeitos devastadores de grandes cheias que, hoje em dia continuam a ser o risco natural que se manifesta com mais frequência (ANPC 2013). As cheias, que se verificam sobretudo nas planícies aluviais dos principais rios do país e, também, em bacias hidrográficas de menores dimensões sujeitas a cheias rápidas, merecem a atenção devida. O rio Tejo, apesar do número elevado de barragens construídas tanto em Espanha como em Portugal, está sujeito a grandes inundações em períodos de precipitações mais intensas, chegando a inundar amplamente lezírias e a criar problemas de circulação rodoviária em várias regiões como, por exemplo, Abrantes e Santarém (Rebelo 2003). Apesar da construção de obras hidráulicas para resolver alguns dos problemas das inundações, muitas resultam na construção de diques e açudes que, no caso do rio Nabão, em Tomar, apesar de se verificarem eventos pontualmente, não diminuiu a gravidade dos mesmos (Rebelo 2003).

¹ <http://www.emdat.be/>

1 INTRODUÇÃO

Portugal apresenta uma grande variabilidade de distribuição da precipitação, tanto espacial como temporal, tornando-se essencial aprofundar o conhecimento destes fenómenos, as suas causas e propor medidas preventivas das consequências que advém das mesmas.

Os planos de gestão das bacias hidrográficas mostraram um grande avanço no que diz respeito ao tema em questão, onde são apresentadas as zonas críticas de cheias em cada bacia, assim como medidas de acção e de mitigação dos efeitos das mesmas. No entanto, esta problemática deve ser estudada a um nível mais pormenorizado - pontos críticos - que pode ir mais além da bacia hidrográfica. Foi com a transposição da Directiva europeia relativa à avaliação da gestão dos riscos de inundações, através do Decreto-Lei n.º 115/2010, de 22 de Outubro, que em Portugal se sentiu a necessidade de rever as metodologias aplicadas, de modo a apresentar mapas de zonas inundáveis e zonas de risco de inundação até ao final de 2013.

A importância dos estudos hidrológicos e hidráulicos toma especial relevância nos estudos de cheias. Assim, as metodologias adoptadas devem ser capazes de integrar os estudos hidrológicos e hidráulicos com a gestão do risco de inundações. Esta integração tem vindo a ser facilitada com o crescente desenvolvimento tecnológico dos Sistemas de Informação Geográfica (SIG). Nos dias de hoje, a maioria dos estudos de cheias implementa metodologias com SIG e modelação.

O trabalho desenvolvido pretendeu desenvolver uma metodologia com a integração de modelação de cheias e SIG, de modo a ser conceptualmente simples e fácil de utilizar, não exigir muito em termos de volume e formatação dos dados de entrada, possibilitando a definição e estudo de diferentes cenários. Esta metodologia foi aplicada a um caso de estudo, localizado na bacia hidrográfica do rio Nabão, na tentativa de elaborar cartas de zonas inundáveis para diferentes situações de cheia, ou seja, para diferentes períodos de retorno. A cidade de Tomar, atravessada pelo rio Nabão, está sujeita a eventos de cheias e inundações à bastantes anos, o que desperta a preocupação no sentido de serem tomadas medidas preventivas e de adaptação a estes acontecimentos.

1.2. Objectivos

A presente dissertação pretende contribuir para a avaliação do risco de inundações, pelo que se irá focar na elaboração de cartas de zonas inundáveis. Assim, o objectivo principal deste trabalho é a aplicação de um modelo hidrológico - hidráulico ao rio Nabão, com a finalidade de elaborar as cartas de zonas inundáveis no troço crítico do respectivo rio, na cidade de Tomar. O Decreto-Lei n.º 115/2010 transpôs para legislação nacional a Directiva 2007/60/CE de 23 de Outubro, relativa à

Avaliação e Gestão dos Riscos de Inundações, que têm como principal objectivo elaborar um quadro para a avaliação e a gestão dos riscos ligados às inundações para a saúde humana, o ambiente, o património cultural e as actividades económicas. O presente trabalho pretende contribuir para a cartografia das zonas inundáveis associadas a diferentes cenários de inundações.

A principal motivação para a elaboração deste estudo foi a crescente preocupação mundial com os impactes causados pelas inundações. As alterações climáticas têm um significado importante neste tema, pois entre as suas previsíveis consequências aparece o aumento do risco de inundações.

1.3. Organização da dissertação

Esta dissertação está organizada em cinco capítulos, em que o primeiro diz respeito ao enquadramento teórico, de modo a conhecer o contexto em que se insere o estudo realizado, e ao objectivo do trabalho realizado. O segundo capítulo sistematiza e analisa o problema das inundações, com destaque para Portugal, com suporte numa pesquisa bibliográfica de publicações nacionais e europeias. É apresentada a situação portuguesa em relação a este tema, considerando a legislação aplicável.

A metodologia é apresentada no terceiro capítulo, em que se descreve o caso de estudo e procede-se a uma proposta de metodologia, envolvendo as etapas necessárias à elaboração de mapas de zonas inundáveis.

Os resultados obtidos são apresentados e discutidos no capítulo quatro, que culmina com a definição de zonas inundáveis para o caso de estudo. Por último, são apresentadas as principais conclusões desta dissertação assim como as limitações encontradas e recomendações para desenvolvimentos futuros.

1 INTRODUÇÃO

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. O problema das inundações

Nos dias de hoje as sociedades enfrentam problemas graves associados aos riscos naturais, quer pelas consequências ambientais, quer pelos impactos económicos e sociais negativos que provocam. Assim torna-se cada vez mais pertinente conhecer os factores que estão na sua origem, determinar os efeitos perturbadores que as causam e reduzir as potenciais consequências.

Os desafios ambientais estão intrinsecamente ligados à maneira como dependemos do ambiente natural, o qual nos proporciona os recursos naturais que suportam a sociedade. Muitos dos problemas ambientais que enfrentamos hoje em dia verificam-se há décadas, o que tem vindo a alterar-se é a apreciação das causas e dos impactos que estes podem ter sobre o Planeta como um todo. As cheias, assim como as secas, fazem parte do ciclo hidrológico e do desenvolvimento natural dos ecossistemas. Em diferentes regiões climáticas do mundo as adaptações a este tipo de eventos têm-se verificado ao longo de milhares de anos com a formação de planícies aluviais, sapais e zonas áridas (EEA 2012a)). No entanto o ciclo hidrológico está a ser perturbado e os eventos extremos são cada vez mais frequentes em várias regiões do planeta. As pressões das alterações climáticas nos padrões de precipitação e temperatura, assim como o crescimento urbano estão a contribuir para este aumento.

Neste contexto de mudanças sem precedentes sobressaem algumas prioridades da política ambiental futura: melhor implementação e reforço das actuais prioridades ambientais; integração coerente das questões ambientais em vários domínios de políticas sectoriais; gestão do capital natural e dos serviços de ecossistemas.

Desde sempre o Homem privilegiou os locais perto de massas de água, tanto por questões de recursos naturais como de facilidade de transporte e comunicação. Porém, estas áreas estão sujeitas a determinados factores de risco que podem pôr em perigo a população, pelo que a prevenção de fenómenos extremos deve ser uma das prioridades de modo a minimizar potenciais danos.

As cheias são fenómenos naturais extremos, em grande medida incontroláveis, maioritariamente provocados por precipitações intensas que fazem aumentar o caudal dos cursos de água conduzindo ao transbordo dos rios que originam as inundações das margens e áreas próximas usualmente frequentadas pela actividade humana (Zêzere, Pereira e Morgado 2006)) colocando em risco vidas e bens. Existem diversas definições de cheia e inundação que podem ser consideradas consoante a perspectiva do autor e o objectivo. Lencastre e Franco (2006) definem, do ponto de vista hidrológico,

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

que uma situação de cheia ocorre quando a precipitação origina escoamento superficial directo e se traduz na formação de um hidrograma de cheia. No âmbito da gestão dos riscos de inundações, os termos cheia e inundação podem ser entendidos como sinónimos. No entanto, Ramos (2005) separa estes dois termos com a simples definição: “todas as cheias provocam inundações, mas nem todas as inundações são devidas às cheias”.

Os principais factores desencadeantes das cheias são, como foi referido, as situações climáticas extremas. No entanto, existem vários factores que condicionam e agravam estes fenómenos. Em termos de factores condicionantes, as características físicas das bacias hidrográficas – geometria, relevo, rede de drenagem, ocupação do solo e tipo de solos – contribuem para agravar ou atenuar os efeitos das cheias e inundações, actuando principalmente na velocidade do escoamento e na magnitude das cheias assim como nos tempos de concentração das bacias hidrográficas. Os factores agravantes das cheias para além de antrópicos podem ter origem natural, como os estreitamentos naturais dos vales e obstáculos transportados pelas cheias (Ramos, 2005). Relativamente aos factores de origem antrópica, é frequente associá-los apenas à ocupação indevida dos leitos de cheia. No entanto, a intervenção humana condiciona, para além da vulnerabilidade, a susceptibilidade às cheias através do estreitamento dos canais dos rios ou construções no leito maior, aumentando os factores de risco decorrentes das mesmas.

Todos estes factores, em conjunto ou separadamente, contribuem para a ocorrência de cheias e inundações. Na Europa, estas situações são recorrentes e cada vez mais mostram a sua força de destruição a nível social e económico. Mais de 350 casos de grandes cheias foram reportados na Europa desde 1980, em que 200 destes ocorreram depois do ano 2000. Este aumento de registos nas últimas décadas deve-se, em parte, à evolução tecnológica que possibilita uma maior e mais fácil troca de informação assim como às alterações do uso do solo (EEA 2012a).

Na Europa os desastres naturais que mais danos causaram, em termos económicos, foram as cheias e as tempestades de acordo com o anteriormente referido. No ano 2002 atingiu-se um recorde com inundações graves em seis Estados-Membros da União Europeia (EU) e danos materiais que atingiram mais de 20 mil milhões de euros. Várias cidades europeias lidam com questões de gestão dos riscos de inundações numa base regular (EEA 2012b).

A Figura 2.1 mostra que os fenómenos de cheias e inundações têm um peso significativo no período de tempo analisado, nos países pertencentes à Agência Europeia do Ambiente (27 países da UE em conjunto com o Liechtenstein, Islândia, Noruega, Suíça e Turquia), juntamente com as tempestades. Cerca de 64% dos danos reportados no período em questão foram relacionados com eventos hidrometeorológicos (tempestades, cheias e movimentos de massas), representando um aumento em

danos de 9 mil milhões de Euros nos anos de 1980, para 13 mil milhões de Euros na primeira década do século XXI. Este aumento deve-se principalmente ao crescimento da população e às actividades humanas nas zonas de risco, assim como à melhoria de transferência de informação entre países (EEA 2012a).

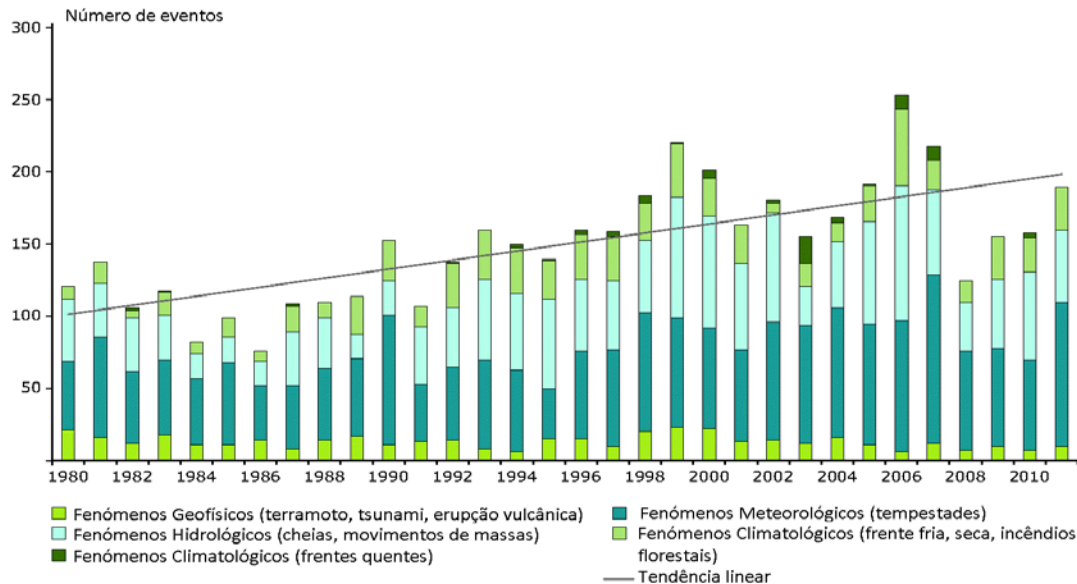


Figura 2.1. Desastres Naturais que afectaram os países da EEA entre 1980 e 2011
Adaptado de EEA, 2012b

Apesar da controvérsia inicial, é actualmente aceite pela maior parte da comunidade científica e pela população em geral que as alterações climáticas constituem um dos principais problemas à escala global. Tal reflecte-se na vasta elaboração de estudos e relatórios no sentido da adaptação a estas alterações. A alteração do clima tem consequências graves tanto para o ser humano como para o ambiente, e as consequências esperadas podem sentir-se a longo prazo ou a curto prazo, como é o caso dos eventos extremos. Com isto, as principais alterações climáticas que se fazem sentir são os aumentos de temperatura e as alterações nos regimes de precipitação e escoamento (IPCC 2012).

As previsões do relatório do Painel Intergovernamental sobre Alterações Climáticas (IPCC) de 2007 apontam para um aumento de temperatura **média** no Verão na ordem dos 6°C em Portugal e em Espanha até 2070, o que significa que o Sul da Europa provavelmente irá enfrentar períodos mais extensos de seca e escassez de água. Em contrapartida, o Norte da Europa enfrentará períodos de precipitação mais frequentes, tendência já observada nos últimos anos, aumentando a susceptibilidade a inundações apesar de potenciais benefícios para o sector agrícola. No entanto,

prevê-se um aumento de fenómenos extremos, como precipitações intensas responsáveis por inundações rápidas em toda a Europa (IPCC 2007).

Os impactos dos fenómenos extremos e os desastres daí resultantes dependem não só dos fenómenos em si, como da exposição e vulnerabilidade das comunidades e dos sistemas naturais a esses fenómenos (IPCC 2012). Estes conceitos fazem parte da base da compreensão e gestão dos riscos naturais, onde a exposição indica a presença de pessoas, recursos e serviços ambientais, infra-estruturas, ou bens económicos, sociais e culturais que poderão ser afectados. Em termos de vulnerabilidade, pode-se definir como a predisposição ou propensão de pessoas ou bens serem afectados (IPCC 2012). A gestão e adaptação a desastres naturais carecem de um maior aprofundamento dos conceitos de vulnerabilidade e de exposição a fenómenos extremos. Estes devem ser entendidos de modo a aumentar a resiliência das comunidades/sociedades a desastres naturais, que se pode traduzir na capacidade de adaptação e recuperação perante factores ou condições extremas de forma atempada e eficiente.

Com o aumento considerável da ocorrência de fenómenos extremos em várias regiões do planeta devido às variações do clima, os riscos de inundações e as áreas afectadas pelas secas estão a aumentar exponencialmente. Alguns dos países mais afectados por estes fenómenos, como a Austrália e os países do Reino Unido, reconheceram estas alterações e procederam ao desenvolvimento de medidas de adaptação e práticas de gestão de risco no sector hídrico com a definição de políticas e estratégias na gestão dos recursos hídricos (Rocha, Roebeling e Alves 2012).

O desenvolvimento sustentável, por muitos entendido como o desenvolvimento que atende às necessidades do presente sem comprometer a capacidade das gerações futuras de satisfazerem as suas próprias necessidades (IPCC 2007), pode reduzir a vulnerabilidade à mudança do clima, aumentando a capacidade de adaptação e a resiliência das nações.

2.2. Cheias em Portugal

Durante muitos anos o ordenamento do território foi elaborado através do Plano Rodoviário Nacional, em que as estradas “arrastavam” as urbanizações, ou o contrário, e pela EDP, que “levava luz” onde esta fosse solicitada ajudando a consolidar uma urbanização desordenada (Schmidt 2008). O resultado da “criação” destas urbanizações desordenadas tem as consequências graves que se fazem sentir nos dias de hoje como as crescentes ocorrências de inundações e a destruição de ecossistemas naturais.

Portugal testemunhou, ao longo da sua história, os efeitos, tanto providenciais como devastadores, de grandes cheias e inundações, com maior frequência de cheias rápidas, devido às características das precipitações que desencadeiam este tipo de cheias e das bacias hidrográficas afectadas. Destacam-se as cheias de 1967 e 1983 na região de Lisboa, as cheias de 1978, 1979 e 1997 no vale do Tejo, as cheias de 1997 na região do Alentejo e Algarve, entre outras ocorrências. Nos últimos anos, este assunto tem vindo a ser alvo de preocupação constante, devido ao aumento da frequência de episódios extremos. Esta preocupação tem elevado interesse a nível europeu, pois, os eventos de cheias e inundações, principalmente a nível de sistemas fluviais, são, dos desastres naturais, os mais frequentes e que têm causado maiores danos económicos na maioria dos países (IPCC 2012).

Em Portugal, a avaliação no domínio do ordenamento do território foi num primeiro momento impulsionada por fontes externas à UE. No entanto, a integração na UE cada vez mais assente e necessária (exigida), teve reflexos nas políticas ambientais e de coesão e uma influência crescente na evolução das políticas do ordenamento do território. Contudo, o ordenamento do território não faz parte das competências formais da UE, enquanto que o sector do ambiente faz, através das políticas comunitárias, o que leva a uma exposição das decisões mais intensa através da obrigatoriedade de transposição das directivas comunitárias.

Em 2007 foi publicada a Directiva 2007/60/CE sobre a Avaliação e Gestão do Risco de Inundações, transposta para a legislação nacional pelo Decreto-Lei n.º 115/2010 de 22 de Outubro. Este Decreto-Lei veio complementar a Lei n.º 58/2005 (Lei da Água), que transpõe a Directiva Quadro de Água - DQA (Directiva 2000/60/CE) para a legislação nacional, que constitui um instrumento importante da gestão da água e estabelece um quadro estratégico para a protecção e gestão sustentável das águas. Os objectivos da DQA contribuem para uma atenuação dos efeitos das inundações, mas a redução dos riscos de inundações não é um dos principais objectivos desta, que também não tem em conta as futuras alterações das inundações em consequência das alterações climáticas. A elaboração de planos de gestão de bacias hidrográficas no âmbito da DQA, e de planos de gestão dos riscos de inundações no âmbito da Directiva 2007/60/CE constituem elementos de uma gestão integrada das bacias hidrográficas.

Com a entrada para a UE, Portugal começou a sentir maior pressão para cumprir prazos e requisitos legislativos. Esta pressão ocorreu principalmente ao nível das autarquias locais, sendo que os fundos europeus dependiam, entre 1992 e 1995, da aprovação dos Planos Directores Municipais (PDM). Este processo foi assim apressado, o que teve como consequência o incumprimento de vários objectivos impostos. Entre eles está o de “garantir a conveniente utilização dos recursos naturais, do ambiente e do património cultural” (DL n.º 208/82, artigo 3º) e o de sujeitar os planos à participação pública (DL n.º 208/82, artigo 13º) (Schmidt 2008).

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A maior cheia do século XX registada em Portugal foi a cheia de Fevereiro de 1979, na bacia hidrográfica do rio Tejo, que se prolongou por nove dias e causou danos catastróficos. As principais cheias ocorridas em Portugal a partir do século XX são apresentadas na Tabela 2.1.

Tabela 2.1. Principais cheias ocorridas desde o início do séc. XX
Fonte: PROCIV e EM-DAT, 2013

Ano	Mês	Bacia / Local
1909	Dezembro	Douro
1948	Janeiro	Continente
1962	Janeiro	Norte e Centro
1967	Novembro	Tejo
1978	Fevereiro	Tejo e Sado
1979	Fevereiro	Tejo
1983	Novembro	Tejo e zona de Cascais
1989	Dezembro	Tejo e Douro
1997	Novembro	Baixo Alentejo
2000/2001	Dezembro a Março	Douro e Tejo
2001	Janeiro	Mondego
2010	Fevereiro	Madeira

Quaresma (2008) realizou uma pesquisa bastante extensa de eventos hidro-geomorfológicos em Portugal Continental, datados em jornais nacionais, e o levantamento documental final revelou a ocorrência de 1 018 eventos, sendo que 82% dos casos registados foram cheias. Zêzere, *et al* (2013) completaram esta pesquisa alargando o período analisado entre 1865 e 2010, no âmbito do projecto Disaster. Entre desastres de origem hidrológica (cheias/inundações) e de origem geomorfológica (movimentos de massa em vertente), foram registadas ao longo deste período 1 903 ocorrências que implicaram a morte de 1 310 pessoas, a evacuação de 14 200 e o desaparecimento de 41 800. As cheias ou inundações foram as principais responsáveis por estas ocorrências.

Na Figura 2.2 é possível observar o número de casos ocorridos no período analisado, sendo que a sua evolução temporal não denota qualquer tendência evidente de aumento. Entre 1936 e 1967 ocorreu o maior número de cheias/inundações e entre 1947 e 1969 o maior número de movimentos de massa em vertente.

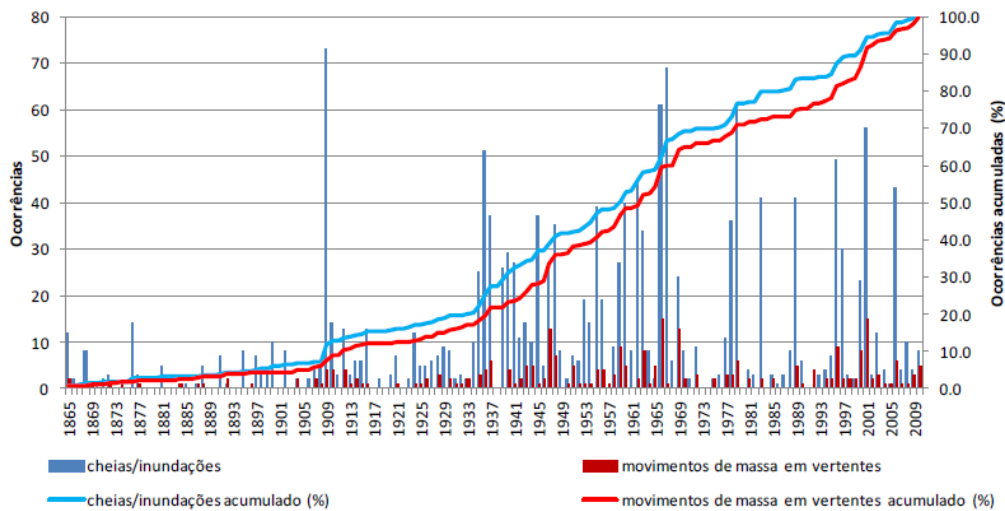


Figura 2.2. Ocorrências de Eventos Hidro-Geomorfológicos (Cheias e Movimentos de Massa)
Fonte: Zêzere et al., 2013

A EM-DAT constitui uma base de dados internacional sobre desastres naturais desde 1900 até o presente. O objectivo desta base de dados é proporcionar uma base para a avaliação da vulnerabilidade a desastres naturais e tecnológicos e o estabelecimento de normas prioritárias. Os desastres, para serem incluídos nesta base de dados têm que satisfazer um dos seguintes critérios: registo de 10 ou mais mortes, 100 ou mais pessoas afectadas, declaração do estado de emergência e pedido de ajuda internacional (EM-DAT 2013).

A Figura 2.3 representa as percentagens dos dez desastres naturais com maior impacto em Portugal, seguindo os critérios da base de dados internacional EM-DAT. Como se pode verificar, as inundações são um desastre frequente e com relevância ao nível de prejuízos causados, assim como ao nível de pessoas afectadas. Juntamente com os incêndios, as inundações representam uma parcela importante dos desastres em Portugal, pelo que é necessária a redução e prevenção destes efeitos tanto a nível ambiental como a nível social. Apesar de não existirem dados fidedignos que permitam uma estimativa dos custos anuais médios resultantes das consequências das inundações em Portugal, os prejuízos resultantes das cheias são frequentemente avultados, podendo conduzir a perda de vidas humanas e bens. Na Figura 2.4 pode-se observar a distribuição espacial dos principais perigos que ocorrem em Portugal continental, de acordo com o Programa Nacional da Política de Ordenamento do Território (PNPOT), que foi aprovado pela Lei n.º 58/2007, de 4 de Setembro.

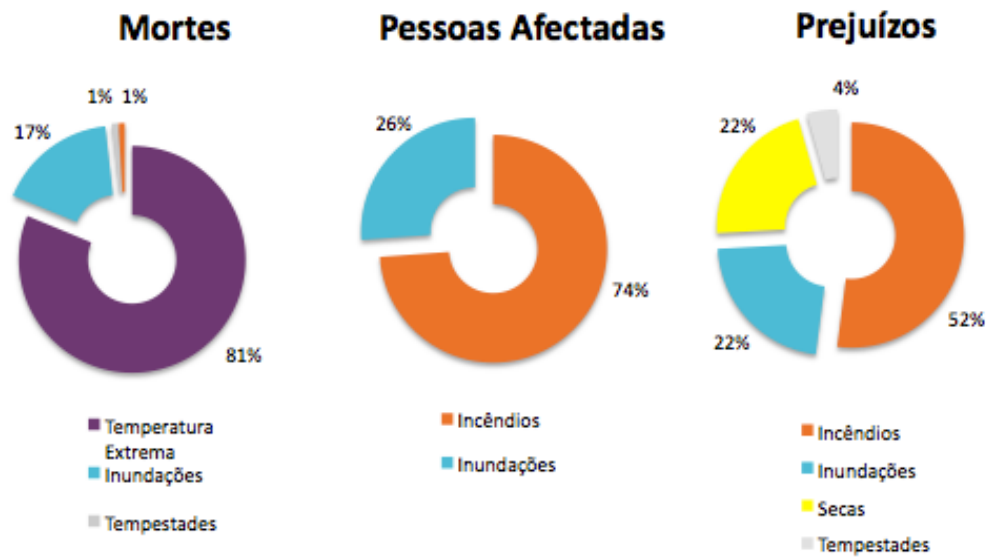


Figura 2.3. Dados de desastres naturais em Portugal
Adaptado de EM-DAT, 2013

O registo de perdas causadas pelos desastres é a base para uma avaliação de risco, pois com estatísticas de desastres naturais num sistema de base de dados, como é o exemplo referido, a análise de tendências temporais e espaciais torna-se simplificada.

A gravidade de ocorrências como os fenómenos extremos (cheias e secas) é uma das razões que leva tanto decisores políticos como a comunicação social, e mesmo a população em geral, a reconhecerem a importância da recente aposta na criação de sistemas de indicadores que permitam a avaliação sistemática das dinâmicas territoriais (Ferrão e Mourato 2011). Ferrão (2011) refere ainda que Portugal necessita de uma mudança nas políticas de ordenamento do território, na medida em que os representantes das comunidades científicas e técnicas, políticas e dos cidadãos, ponderem a construção no território de forma mais justa e que preze a qualidade de vida de todos.

Neste contexto, o PNPOP assume como um dos principais problemas para o ordenamento do território em Portugal a “insuficiente salvaguarda e valorização dos recursos naturais e ineficiente gestão dos riscos”. Este programa refere que para enfrentar os problemas definidos é necessária, para além de instrumentos de gestão territorial eficazes, a contribuição das políticas relacionadas com o ordenamento do território (como a política do ambiente e a gestão dos riscos), assim como a participação activa por parte dos cidadãos. As situações de risco, onde se inclui o risco de inundações, é então uma das prioridades da política de ordenamento do território, sendo considerada uma condicionante fundamental da organização e objectivos do PNPOP, e ainda uma obrigatoriedade nos demais instrumentos de gestão territorial.

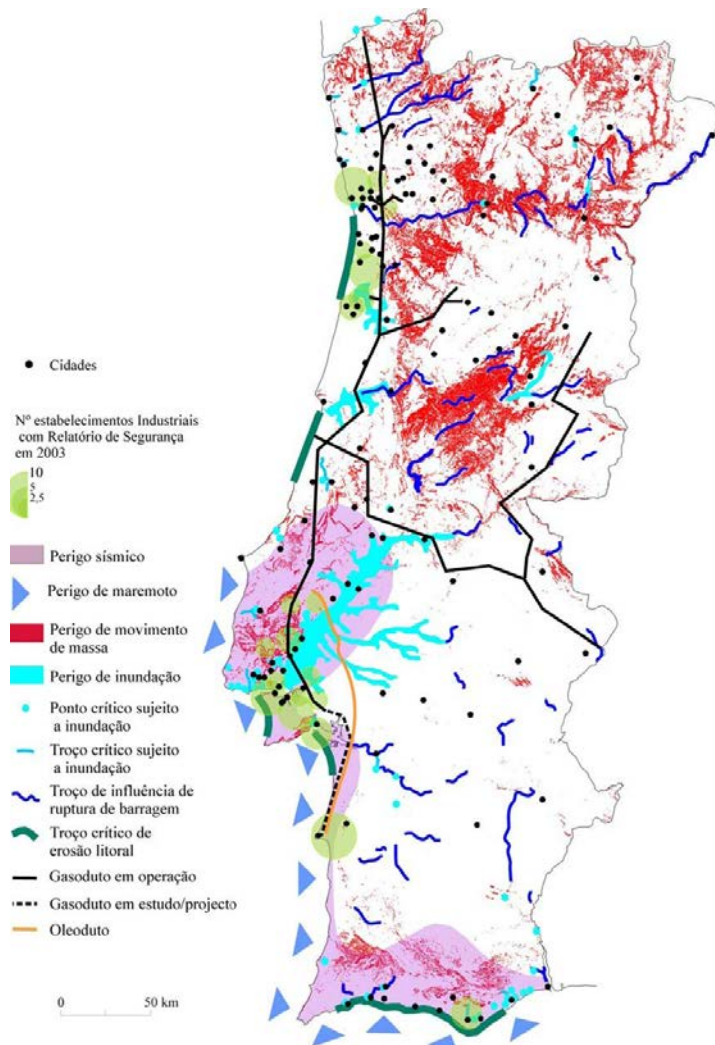


Figura 2.4. Principais perigos em Portugal Continental
Fonte: Relatório PNPOT, 2007

No contexto das alterações climáticas, várias estratégias de adaptação têm vindo a ser implementadas por vários países e Portugal destaca-se com a elaboração de vários estudos relativos à adaptação às alterações climáticas, como a Estratégia Nacional de Adaptação às Alterações Climáticas (ENAA) e os projectos do CCIAM (*Climate Change Impacts Adaptation and Modelling*²) relativos a estudos dos impactes das alterações climáticas e medidas de adaptação (por exemplo o SIAM I e SIAM II). Estas estratégias implicam a gestão de riscos que estão subjacentes a estas alterações e para tal a elaboração de vários estudos de modo a conhecer e compreender melhor os riscos de forma a que a prevenção e adaptação sejam possíveis. É de destacar o projecto que está a

² Projectos disponíveis no site <http://www.sim.ul.pt/cciam/>

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

decorrer pelo SIAM (CIRAC - Cartas de Inundação e Risco em cenários de Alterações Climáticas) até ao final de 2013, que pretende investigar as vulnerabilidades do território português a inundações, tanto de origem fluvial, como de origem marítima, no contexto das alterações climáticas esperadas.

O aumento das situações de risco de inundações em Portugal deve-se essencialmente à crescente ocupação de terrenos situados em zonas de potencial inundação, como os leitos de cheia. Assim, subsiste a identificação destas como potenciais zonas de risco de inundações, bem como a definição de medidas que proíbam essas ocupações ou, se já ocupadas, medidas de prevenção. Este processo, da identificação e cartografia das zonas inundáveis em Portugal, está a decorrer até ao final do ano de 2013 ao abrigo da Directiva 2007/60/CE.

A elaboração das cartas de zonas inundáveis era já prevista no Decreto-Lei n.º 364/98 de 21 de Novembro de 1998. Aqui se definiu a responsabilidade dos municípios “com áreas urbanas ou urbanizáveis atingidas por cheias, nomeadamente as ocorridas, no mínimo, desde a década de 60” na demarcação das zonas inundáveis, à escala adequada, abrangendo os perímetros urbanos das áreas atingidas pela maior cheia conhecida. A maioria dos municípios optou por assinalar estas áreas nos seus PDM, mas sem indicar caudais, períodos de retorno ou alturas de água (ARH Tejo 2012).

O quadro legal em Portugal e na UE vem facilitar os esforços de adaptação às alterações climáticas. Relativamente ao planeamento e gestão dos recursos hídricos, verifica-se que a legislação aplicável vem de encontro à integração, tanto com os planos de gestão das bacias hidrográficas como à adaptação às alterações climáticas que se têm vindo a fazer sentir.

A maioria dos estudos relacionados com cheias e inundações refere-se a inundações urbanas, devido aos impactes que provocam nas actividades comerciais, serviços, transportes e alagamento de áreas residenciais. De facto, estas inundações foram as que trouxeram maior prejuízo para Portugal, sendo de realçar as ocorridas na zona da área metropolitana de Lisboa.

A Agência Portuguesa do Ambiente (APA) disponibiliza, através do Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos (SNIRH), uma carta de cheias do continente, onde são identificados, entre outros elementos, marcas de cheia, pontos críticos de inundação e troços críticos. Esta carta resulta da compilação dos elementos disponibilizados por diferentes entidades e obtidos por diferentes metodologias (Figura 2.5). Esta cartografia de cheias constitui actualmente um documento de referência que deverá ser melhorado e actualizado.

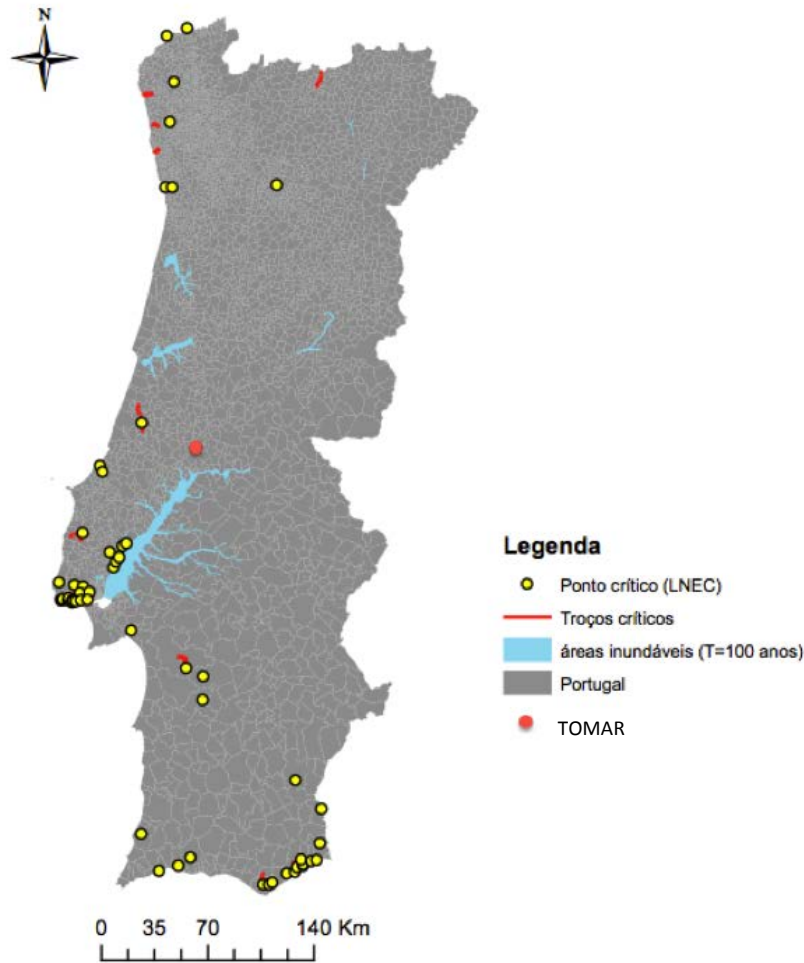


Figura 2.5. Marcas de cheias, zonas críticas e pontos críticos de inundações
Adaptado de INAG, 2010

Como se pode observar na Figura 2.5, a existência de situações críticas de cheias e inundações concentram-se nas bacias do Tejo, Douro e Vouga, e os pontos críticos alargam-se para a zona do Algarve, verificando-se que um destes está localizado na cidade de Tomar.

A ENAAC seguiu uma abordagem por sectores, identificando medidas de adaptação sectoriais de forma mais consistente. Um dos sectores estratégicos da ENAAC são os recursos hídricos, sendo que as alterações climáticas terão um impacto significativo na distribuição temporal e espacial da disponibilidade dos recursos hídricos, na qualidade da água e no risco de ocorrência de cheias e secas. A nível nacional torna-se um desafio a definição de estratégias e políticas de gestão de sistemas de recursos hídricos, uma vez que se não forem consideradas as alterações climáticas nestes processos de planeamento e gestão torna-se mais difícil e complexa a resolução de situações extremas e críticas ENAAC. Uma adaptação bem-sucedida aos impactes das alterações climáticas nos

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

recursos hídricos depende não só, de legislação nacional e europeia eficaz, mas também da extensão da capacidade de integração da gestão da água com outras políticas.

A gestão dos recursos hídricos integra diversas competências da administração no que diz respeito à qualidade e quantidade da água, reconhecendo o potencial valor ambiental, social e económico. O domínio da água em Portugal é composto por várias entidades regionais e nacionais, sendo que a entidade responsável pelo acompanhamento e execução das políticas nacionais no domínio dos recursos hídricos é a APA, que enquanto autoridade nacional da água tem como funções garantir a gestão sustentável, o planeamento e o licenciamento das águas.

A Carta Europeia da Água, proclamada pelo Conselho da Europa em Maio de 1968, apesar da antiguidade, ainda é uma referência em questões de princípios, designadamente os princípios XI e XII: *“A gestão dos recursos hídricos deve inserir-se no âmbito da bacia hidrográfica natural e não no das fronteiras administrativas e políticas”* e *“A água não tem fronteiras. É um bem comum que impõe uma cooperação internacional”*.

A legislação inerente aos recursos hídricos em Portugal é vasta e está permanentemente sujeita a alterações parciais e sucessivas que se acumulam ao longo de décadas. Esta lacuna legislativa torna-se explícita na relação entre os diplomas legais das políticas de recursos hídricos com os planos de acção para cumprir os objectivos definidos pelas leis. Esta situação tem reflexo na dificuldade de exercer qualquer função relativa aos recursos hídricos por parte das administrações públicas, privadas e mesmo do cidadão comum (Pato 2007).

No contexto de políticas europeias, com a emergência das primeiras directivas comunitárias nos anos de 1970, houve a necessidade de articular as políticas de recursos hídricos com mecanismos económicos e sociais em consolidação com a emergente indústria da água. No entanto, foi no ano de 2000 que a DQA surgiu de modo a estabelecer o quadro de acção comunitária para a protecção das massas de água. Esta directiva apresenta-se como um dos principais instrumentos da política da UE relativa à água.

Os períodos históricos das políticas hídricas nacionais distinguem-se nos conteúdos legislativos, no quadro institucional e nos modelos de governação que o Estado português foi definindo nas diferentes circunstâncias históricas. Os problemas ambientais surgem nas políticas de recursos hídricos nacionais a partir de 1974. Até essa data, o paradigma de governação centrava-se no domínio das obras públicas, mantendo a visão hidráulica das políticas de recursos hídricos (Pato 2007).

Em Portugal, a legislação relativa aos recursos hídricos era caracterizada por alguma ineficácia em criar relações entre as entidades governamentais e as administrações dos recursos hídricos. Esta

problemática manifestou-se na incapacidade de cooperação dos vários domínios inerentes aos recursos hídricos. Considerado um bem público, a água é assim um importante tema em permanente avaliação e cada vez mais se torna alvo de políticas e leis rigorosas no que diz respeito ao seu potencial de utilização, aos objectivos de protecção e valorização e à sua gestão integrada. Conclui-se que o problema da gestão da água não se relaciona com a escassez de meios disponíveis para tal gestão, mas sim à falta de uma estrutura que se adapte à definição e concretização de objectivos concretos (Pato 2007).

O Plano Nacional da Água é o instrumento estratégico de gestão das águas, que estabelece os princípios e as regras de orientação da política nacional da água, a aplicar pelos Planos de Gestão de Região Hidrográfica (PGRH) e por outros instrumentos de planeamento de recursos hídricos. Tem como principais objectivos assegurar a gestão integrada e sustentável da água, promovendo a sustentabilidade ambiental, económica e financeira da utilização dos recursos hídricos (INAG 2010a).

2.3. Gestão dos riscos de inundações

Um aspecto chave para a prevenção e redução dos riscos de inundações é a disponibilização de informação fiável sobre os níveis de risco através de mapas de inundações (mapas de zonas inundáveis). Para além de identificarem zonas passíveis de serem inundadas, estes mapas também fornecem informações úteis para as operações de emergência em situações de cheias. A maioria dos projectos de cartografia de inundações na Europa teve início no fim dos anos de 1990, como consequência das grandes cheias registadas nesse período. Como resultado, vários países europeus possuem mapas de inundações elaborados pelas organizações governamentais e indústrias de seguros. Assim, a gestão dos riscos de inundações é essencial na preparação de respostas a situações de emergência.

A gestão do risco de inundações é uma componente intrínseca da gestão integrada dos recursos hídricos, pelo que muitos dos planos de gestão de bacia hidrográfica elaborados na UE referem aspectos ligados às cheias, nomeadamente para justificar intervenções profundas em massas de água. O segundo ciclo de planeamento da gestão das bacias hidrográficas terá de ser coordenado com os primeiros planos de gestão dos riscos de inundações (EEA 2012a).

As políticas específicas de prevenção de cheias e inundações encontram-se implementadas em vários países da Europa, e a Directiva das Inundações da Comissão Europeia (CE), publicada em 2007, é um excelente exemplo da importância dada a este tema pela UE. É ainda do interesse da CE reforçar as

ligações com os sistemas de alerta de cheias, de modo a ser criado um sistema de alerta a nível europeu (EEA 2010).

Conceitos

No contexto de uma gestão integrada e sustentável dos riscos é importante sistematizar os conceitos que são comuns por forma a uniformizar designações equivalentes, e ajustar potenciais ambiguidades semânticas que dificultam a comunicação e a justificação e implementação de medidas

Dependendo da origem ou da natureza dos riscos, podem-se distinguir usualmente três tipos de riscos (INAG 2010a): Riscos naturais, Riscos tecnológicos e Riscos mistos. Os riscos de inundações enquadram-se na tipologia de riscos naturais, ou seja, resultam de fenómenos naturais e do comportamento dos sistemas naturais, que poderá ser mais ou menos alterado em função de intervenções antropogénicas.

De acordo com o Decreto-Lei n.º 115/2010, são definidos os seguintes conceitos:

- Inundação - *“cobertura temporária por água de uma terra fora do leito normal, resultante de cheias provocadas por fenómenos naturais como a precipitação, incremento do caudal dos rios, torrentes de montanha e cursos de água efémeros correspondendo estas a cheias fluviais, ou de sobrelevação do nível do mar nas zonas costeiras”* (D.L. n.º 115/2010);
- Risco de Inundação - *“a combinação da probabilidade de inundações e das suas potenciais consequências prejudiciais para a saúde humana, o ambiente, o património cultural e as actividades económicas”* (D.L. n.º 115/2010).

A redução dos riscos de inundações implica um conhecimento da natureza deste tipo de eventos. Uma classificação dos diferentes tipos de inundações ajuda a identificar certas características que requerem atenção quando se pretende mitigar estes riscos.

Qualquer classificação de inundações é sempre um pouco arbitrária, mas algumas distinções podem ser úteis entre os seguintes tipos de cheias (EEA 2012c):

- Cheias fluviais: ocorrem quando o nível da água em canais, lagos ou reservatórios sobe cobrindo terrenos normalmente secos. As causas podem ser precipitação intensa ou persistente, degelo ou acumulação de detritos que bloqueiam o escoamento no canal. A severidade deste fenómeno varia consoante o padrão de escoamento do rio e características do meio como a constituição do solo e o nível das águas subterrâneas.

- Cheias rápidas: decorrem de precipitações intensas localizadas. A gravidade do seu impacto em ambientes urbanos deve-se à vasta impermeabilização dos solos e à insuficiente capacidade dos sistemas de drenagem. São difíceis de prever devido à imprecisão associada aos padrões de precipitação local e à sua curta duração.
- Cheias costeiras: ocorrem quando o nível normal do mar é ultrapassado devido ao aumento da ondulação provocada por tempestades, marés altas ou tsunamis. A sua previsão é difícil, mas a análise de riscos pode ser realizada através da utilização de modelos.
- Cheias do lençol freático: dão-se quando a água subterrânea existente próxima da superfície emerge em quantidades excessivas num determinado local ou ao longo do seu trajecto. Podem dever-se a precipitações persistentes, aumento do nível do mar ou aluimento de terras. A sua previsão é possível caso existam dados relativos ao fluxo das águas subterrâneas.
- Cheias devidas a falhas nas barragens: decorrem de erro humano na construção de barragens. As consequências, típicas de cheias súbitas, podem ser devastadoras. Acresce o perigo associado ao arrastamento de material de construção da própria barragem. Estas falhas não podem ser previstas, sendo possível a sua modelação e avaliação através de análise de risco.

Os primeiros três tipos de cheias ocorrem em quase toda a Europa. O risco de cheias rápidas evidencia-se mais nas zonas altas do mediterrâneo e zonas montanhosas devido à topografia e padrões de precipitação. São também típicas de zonas urbanas em que o solo impermeabilizado conduz a um aumento do volume e da velocidade do escoamento, diminuindo o tempo de base do hidrograma de cheia e aumentando o caudal de ponta de cheia.

As cheias rápidas são caracterizadas pelo rasto de destruição que causam após chuvas intensas e têm como principal característica o começo inesperado. São provavelmente as cheias mais perigosas devido à sua velocidade de formação e propagação, e pelo facto de ocorrerem dentro de poucos segundos a algumas horas, com pouco ou quase nenhum tempo de aviso. Os factores que contribuem para este tipo de cheias, para além dos factores condicionantes e agravantes referidos anteriormente, são a intensidade e duração de precipitação, as condições de superfície e a topografia e declive da bacia hidrográfica (EEA 2010).

Legislação Nacional

A primeira legislação aplicada à questão do risco de inundações foi nos termos do domínio público hídrico. O primeiro diploma que estabeleceu expressamente os instrumentos de prevenção dos riscos de inundações foi o Decreto-Lei n.º 468/71, de 5 de Novembro. Posteriormente foram criadas as chamadas “zonas adjacentes”, zonas consideradas como terrenos ameaçados pelas cheias, que poderiam ser classificadas como tal pelos próprios municípios.

A Lei n.º 54/2005, que estabelece a titularidade dos recursos hídricos, alargou a classificação das áreas ameaçadas pelas cheias como zonas adjacentes, processo este que hoje em dia pode ser iniciado não só pelo Governo e pelos municípios, mas também pela autoridade nacional da água (APA) e pela autoridade nacional de conservação da natureza (Instituto de Conservação da Natureza e das Florestas).

A Lei da Água estabelece o quadro estratégico para a gestão sustentável das águas e exige a elaboração de planos de gestão das bacias hidrográficas, onde se inserem objectivos de prevenção e protecção contra riscos de cheias e inundações. Esta lei refere ainda que no caso de ausência de delimitação e classificação de zonas ameaçadas pelas cheias, compete aos instrumentos de gestão territorial estabelecer as restrições necessárias para a redução dos riscos e efeitos das cheias.

Em termos de gestão do território o PNPOT, que estabelece as bases de ordenamento do território, tem como um dos vectores de planeamento o risco, onde os riscos de cheias e inundações são referidos nos problemas para o ordenamento do território em Portugal. Desta forma, qualquer instrumento de gestão do território está obrigado a ter em consideração os riscos de inundações. Neste contexto, destaca-se a Reserva Ecológica Nacional - REN - um dos primeiros documentos a definir zonas de risco em Portugal, criada em 1983 pelo Decreto-Lei n.º 321/83, de 5 de Julho, com o intuito de proteger os espaços produtivos, agrícolas e urbanos de modo a contribuir para o uso sustentável do território. O documento actualmente em vigor é o Decreto-Lei 166/2008, de 22 de Agosto. Trata-se de um elemento de restrição de utilidade pública, no qual se estabelecem um conjunto de condicionamentos ao uso, ocupação e transformação do solo e que concede ao risco de inundações uma atenção sem precedentes nos diplomas que abordam o regime da REN.

Relativamente à gestão dos riscos de inundações, vários outros diplomas abordam este risco, o Quadro de Referência Estratégico Nacional (Resolução do Conselho de Ministros n.º 86/2007) e o Plano de Implementação da Estratégia Nacional de Desenvolvimento Sustentável (Resolução do Conselho de Ministros n.º 109/2007, de 20 de Agosto) são exemplos de diplomas enquadradores ao nível nacional. No entanto, o documento que marcou a regulamentação do risco de inundações foi a Directiva 2007/60/CE do Parlamento Europeu e do Conselho de 23 de Outubro relativa à avaliação e

gestão dos riscos de inundações, que prevê a elaboração de planos de gestão dos riscos de inundações até 2015 pelos Estados-Membros. Este documento corresponde a uma ferramenta poderosa na avaliação de riscos de inundações, pois são estabelecidas prioridades, apoia decisões técnicas, financeiras e políticas e pretende a protecção de pessoas e bens na medida em que dispõe de informação rigorosa e eficaz destes riscos (INAG 2010a).

A transposição desta directiva para a legislação nacional foi realizada pelo Decreto-Lei n.º 115/2010, que estabelece um quadro estratégico para a avaliação e gestão dos riscos de inundações, com o objectivo de reduzir as consequências prejudiciais para a saúde humana, incluindo perdas humanas, o ambiente, o património cultural, as infra-estruturas e as actividades económicas.

É estabelecido no DL n.º 115/2010 que, em cada região hidrográfica ou em cada unidade de gestão que venha a ser definida, seja avaliado o risco de inundação e as respectivas medidas suplementares para a sua mitigação. Para o efeito, há que proceder à elaboração, pelas Administrações das Regiões Hidrográficas (ARH), de cartas de zonas inundáveis e de cartas de riscos de inundação. Estas devem indicar as potenciais consequências prejudiciais associadas a diferentes cenários de inundações e incluir a avaliação das actividades que provocam o aumento do risco de inundações.

As ARH devem elaborar os planos de gestão dos riscos de inundação, centrados na protecção, preparação e previsão destes fenómenos, em estreita articulação com os planos de gestão das bacias hidrográficas. Os mapas de risco de inundações e os planos de gestão devem ser coordenados com a DQA. A Directiva 2007/60/CE e as medidas adoptadas para aplicá-la estão directamente ligadas à implementação da DQA, que exige uma acção coordenada para alcançar um “bom estado” de todas as massas de água da UE, designadamente das águas superficiais e subterrâneas, até 2015. Determina igualmente como devem ser geridos os recursos hídricos com base nas bacias hidrográficas naturais.

Os planos de gestão dos riscos de inundações devem incorporar os seguintes elementos:

- Avaliação preliminar do risco de inundações: este passo tem como objectivo a avaliação do nível de risco de inundações para cada bacia hidrográfica ou unidade de gestão e deve seleccionar as áreas relativamente às quais existem riscos potenciais. (Prazo: Dezembro de 2011, no entanto Portugal avisou com antecedência, que esta avaliação irá constar nas cartas de zonas inundáveis, no final de 2013);
- Cartas de riscos de inundações e cartas de zonas inundáveis: Os Estados Membros devem elaborar, ao nível da região hidrográfica ou unidade de gestão, cartas de zonas inundáveis e cartas de risco de inundações, com a identificação de cenários de probabilidade de inundação - elevada, média ou fraca. Essas cartas devem indicar as

potenciais consequências prejudiciais dos cenários referidos (Prazo: Dezembro de 2013);

- Planos de gestão dos riscos de inundações: Para cada região hidrográfica ou unidade de gestão são elaborados planos de gestão de riscos de inundações. No caso de bacias hidrográficas abrangendo o território de dois ou mais estados membros, estes devem cooperar para que seja estabelecido um único plano de gestão. Os mapas de risco de inundações e os planos de gestão devem ser coordenados com a DQA. (Prazo: Dezembro de 2015).

Portugal dispõe, hoje em dia, de mecanismos que permitem responder a situações de emergência relacionadas com eventos meteorológicos extremos, como é o exemplo do Sistema de Vigilância e Alerta de Recursos Hídricos (SVARH). No entanto, o IPCC e o SIAM referem, com um assinalável grau de confiança, ser expectável que as alterações climáticas venham a aumentar a probabilidade e/ou a magnitude de vários eventos meteorológicos extremos, como sejam tempestades, cheias ou secas. Está em decurso o projecto *Cartas de Inundações e de Risco em Cenários de Alterações Climáticas* (CIRAC) que tem como objectivo principal a investigação das vulnerabilidades do território português a inundações no contexto das alterações climáticas esperadas. Paralelamente, encontra-se em fase final o projecto DISASTER – Desastres naturais de origem hidro-geomorfológica em Portugal: base de dados SIG para apoio à decisão no ordenamento do território e planeamento de emergência. Este último projecto pretende fornecer uma base de dados relativos a desastres hidrológicos (cheias) e geomorfológicos (deslizamentos) ocorridos em Portugal, de forma a potenciar uma base fidedigna para os processos de avaliação de riscos e aplicação de medidas de protecção e redução dos efeitos deste tipo de desastres.

2.4. Modelos matemáticos e integração com SIG

A elaboração de cartografia de cheias resulta da aplicação de modelos hidrológicos e hidráulicos. A modelação matemática consiste na representação matemática de um sistema real, tendo como base o levantamento e interpretação dos dados desse sistema de modo a simular os vários processos e prever situações futuras assim como compreender melhor o funcionamento do sistema (Chow, Maidment e Mays 1988). O desenvolvimento de modelos matemáticos para aplicação no sector dos recursos hídricos é um tema bastante estudado e constantemente desenvolvido por vários investigadores. A abordagem pormenorizada deste tema não faz parte do âmbito da presente dissertação; como tal, apenas será realçada a sua aplicação na gestão dos recursos hídricos e

mitigação de riscos de inundações, integrando os mesmos na metodologia proposta para a cartografia de zonas inundáveis.

O desenvolvimento exponencial das aptidões informáticas nas últimas décadas tem possibilitado a criação de bases de dados e a aplicação de modelos matemáticos de grande alcance no que diz respeito à gestão de recursos hídricos ao nível da bacia hidrográfica. No entanto, a complexidade dos modelos computacionais tornaram a previsão e identificação de áreas inundáveis bastante difícil para técnicos inexperientes. Assim, tornou-se essencial o desenvolvimento de *software* simples e de fácil aplicação, de modo a facilitar a integração destes modelos com as novas tecnologias de informação geográfica, para uma gestão integrada dos riscos de inundações. Surgem assim os modelos apoiados em Sistemas de Informação Geográfica (SIG), cada vez mais divulgados e disponíveis gratuitamente (Santos, et al. 2006).

No decorrer das últimas décadas, os SIG têm vindo a sofrer transformações na sua composição. Estes sistemas são, hoje em dia, ferramentas fundamentais a áreas de investigação desde que se pretenda manipular, obter ou produzir dados espaciais. A aquisição de informação digital está cada vez mais acessível, possibilitando a sua integração nas mais diversas áreas e para a mais diversas finalidades. Portugal foi pioneiro, na Europa, na criação de uma interface de informação espacial, o Sistema Nacional de Informação Geográfica (SNIG) em 1990, disponibilizado ao público na internet em 1995.

A aquisição de dados necessários a uma visão clara dos problemas das cheias e das inundações é um trabalho multidisciplinar, que exige a cooperação entre as várias entidades responsáveis. A utilização de boas bases de dados é essencial à tomada de decisões. Em todos os pontos de vista, técnico (hidrologia, hidráulica e de engenharia civil), administrativo, social, económico e legal, os dados estão relacionados entre si, o que conduz a uma integração dos SIG com esta problemática. Esta integração é reforçada no Plano Nacional da Água que refere que “qualquer política relacionada com a gestão dos recursos hídricos deve assentar na distribuição temporal e espacial da água” (INAG 2010a).

Cada vez mais existe a necessidade de criar sistemas integrados no desenvolvimento de políticas de ambiente. Esta necessidade foi reforçada com a comunicação da Comissão Europeia em 2008 da criação do Sistema de Informação Ambiental Partilhada (*Shared Environmental Information System - SEIS*). Portugal não fica atrás na criação de sistemas de informação, com a existência de vários sistemas de informação específicos como é o caso do SNIT (Sistema Nacional de Informação Territorial), SNIRH (Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos) e o SNIG (Sistema Nacional de Informação Geográfica). Em Fevereiro de 2011, foi lançado o Sistema Nacional de Informação Ambiental - SNIAmb - de modo a garantir a estruturação e divulgação de dados de referência para o apoio ao desenvolvimento e avaliação das políticas ambientais, assim como para dar resposta às

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

solicitações da UE (Decreto Regulamentar n.º 53/2007, de 27 de Abril).

A INSPIRE (*Infrastructure for Spatial Information in the European Community*) é uma iniciativa para a informação espacial a nível europeu. Esta infra-estrutura pretendeu, com a sua criação em 2007 pela Comissão Europeia (Directiva 2007/2/EC do Parlamento Europeu e do Conselho, de 14 de Março), estabelecer um quadro legal com o objectivo de harmonizar a disponibilização de informação geográfica a nível europeu, nomeadamente para suportar a infra-estrutura de informação geográfica europeia.

Na pesquisa realizada, tanto em recursos hídricos como em problemas hidrológicos, verificou-se que a variação espacial tem um papel determinante e apoia-se bastante em metodologias que recorrem a SIG. Assim, a integração de modelos hidrológicos e hidráulicos com os SIG torna-se uma área com elevado interesse para o estudo do risco de inundações, e também para a tomada de decisões relacionadas com o planeamento e o ordenamento do território.

A partir dos SIG é possível a manipulação de dados espaciais tais como a combinação de informações topográficas, como o tipo e ocupação do solo, condições meteorológicas relativas a bacias hidrográficas, possibilitando a simulação de diferentes cenários e os efeitos consequentes de alterações da informação. “A aplicação dos modelos hidrológicos ao nível das bacias hidrográficas com o auxílio dos SIG constitui um avanço quantitativo na caracterização dos parâmetros hidrológicos e no apoio à tomada de decisão no contexto da gestão eficiente da ocupação do solo e dos recursos hídricos” (Santos, et al. 2006).

Esta integração (SIG e Modelação) deve ser encarada no âmbito da gestão integrada, tendo em vista o desenvolvimento sustentável que, de modo geral, pode ser entendido como a satisfação das necessidades de hoje de modo a assegurar as opções do futuro.

Na perspectiva dos SIG, as potencialidades dos modelos hidrológicos e hidráulicos em caracterizar e simular as variações espaciais permitem obter resultados que contribuem para a definição de leitos de cheia, áreas de risco de cheias, zonas inundáveis e para o planeamento da própria bacia hidrográfica. Na perspectiva dos modelos hidrológicos e hidráulicos, os SIG permitem o relacionamento e a referência de dados provenientes de diferentes fontes de informação.

Considerando a importância dos estudos hidrológicos e hidráulicos apoiados em SIG para a elaboração de cartas de zonas inundáveis, foi feita uma pesquisa de modelos que integrassem estas duas componentes, a modelação e uma plataforma SIG, e o resultado foi vasto. Com o *software* ArcGIS disponível para estudantes gratuitamente e mediante um curso de aplicação de SIG aos recursos hídricos, os modelos HEC-HMS e HEC-RAS surgiram como uma possível solução à integração de SIG e modelação. Estes modelos, desenvolvidos pelo *Hydrological Engineering Center* (HEC) do

U.S. Army Corps of Engineers (USACE) dos EUA, possuem extensões que são directamente aplicadas no ArcGIS (HEC-GeoHMS e HEC-GeoRAS), possibilitando uma preparação de dados geométricos e geográficos mais precisa e indicada à modelação requisitada. Foram então seleccionados para a proposta de metodologia realizada no âmbito da Directiva 2007/60/CE, de 23 de Outubro, visto serem familiares às instituições portuguesas pelo que foram já utilizados na elaboração de planos de gestão das regiões hidrográficas como o da região do Tejo e Centro (Ribeiras do Oeste), assim como em estudos mais pormenorizados na caracterização de cheias e inundações.

A importância dos SIG é bastante reconhecida no que diz respeito à divulgação de informação ao público, pois possibilitam a criação de interfaces na internet que permitem a qualquer utilizador o acesso à informação geográfica de maneira bastante fácil. A legislação europeia realça esta importância nas Directivas relativas à gestão dos recursos hídricos, tal como a Lei n.º 58/2005 de 29 de Dezembro, como base de apoio às decisões técnicas e políticas e especialmente à participação pública.

3. METODOLOGIA

A maioria dos métodos utilizados para a estimativa de frequência de inundações são definidos para serem conceptualmente simples e fáceis de usar, não serem muito exigentes em termos de volume e formatação dos dados de entrada, e permitirem estabelecer previsões com base em pressupostos subjacentes a um ambiente estacionário. Numa primeira parte do presente capítulo é apresentado o caso de estudo seleccionado para a aplicação da metodologia proposta. Posteriormente, segue-se a descrição dos modelos utilizados para a modelação hidrológica e hidráulica.

3.1. Caso de estudo

A área de estudo abrange os distritos de Santarém e Leiria, inserindo-se essencialmente no primeiro. A bacia hidrográfica considerada tem a secção de referência na estação hidrométrica da Fábrica da Matrena, no rio Nabão, com uma área aproximada de 1024 km², e situa-se na Orla Mesocenozóica Ocidental e na Bacia terciária do Tejo e do Sado. Está inserida na região Hidrográfica do Rio Tejo (RH5 – Figura 3.1) abrangendo os concelhos de Alvaiázere, Ansião, Condeixa-a-Nova, Ferreira do Zêzere, Figueiró dos Vinhos, Leiria, Penela, Pombal, Tomar e Vila Nova de Ourém.

A bacia hidrográfica do rio Nabão desenvolve-se, de montante para jusante, desde a zona de Santiago da Guarda, a norte de Ansião, passando a Oeste pela Serra do Sicó, Abiul, Gondemaria, Serra de Aire, Outeiro Grande, Delongo, e a Este por Maças de Caminho, Alvaiázere, Águas Belas, Olalhas, desaguando no Rio Zêzere perto da localidade da Foz do Rio.

O vale do Rio Nabão, de orientação geral Norte-Sul, apresenta-se encaixado com uma variação aproximada de cotas de cumeada entre os 500 m (sendo as mais elevadas nas Serras de Sicó (553 m) e Aire (679 m)) e os 100 m na confluência com o Rio Zêzere (FBO 2003).

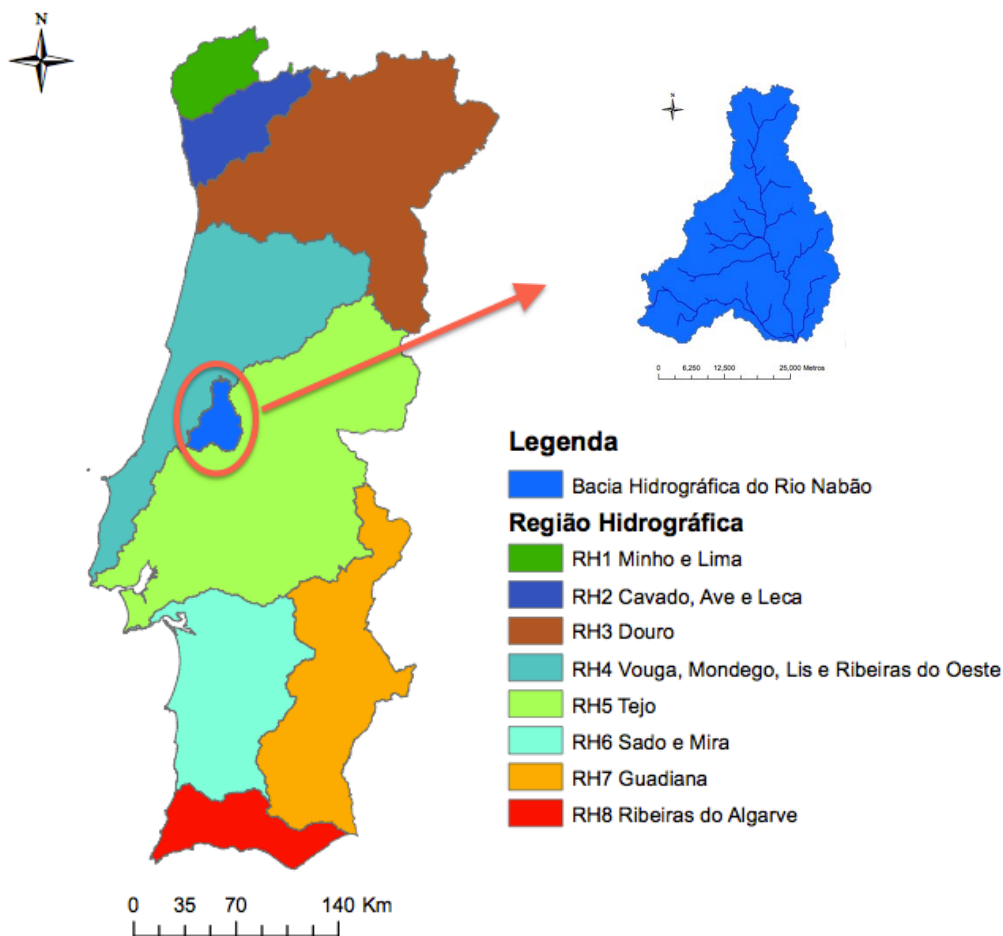


Figura 3.1. Localização da Bacia Hidrográfica do Rio Nabão

Apresenta um relevo diversificado, ocorrendo as zonas de relevo mais acentuado nas Serras de Sicó, Alvaiázere e Aire. Os declives mais suaves correspondem às formações detríticas das depressões terciárias e os declives mais acentuados aos relevos jurássicos que constituem o maciço calcário estremenho (FBO 2003). As principais linhas de água afluentes do rio Nabão são, na margem direita, a Ribeira da Murta e a Ribeira das Pias, com orientação geral Noroeste-Sudoeste, e na margem esquerda a Ribeira de Seiça e o Rio Bezelga, que apresentam variações na orientação Este-Oeste para Noroeste-Sudoeste.

Na bacia hidrográfica do rio Nabão podem identificar-se três unidades hidrogeológicas: maciço calcário jurássico, bacias de sedimentação carbonatada e detrítica terciárias e os terrenos detríticos de cobertura.

METODOLOGIA

O rio Nabão é um dos afluentes da margem direita do rio Zêzere, e tem classificação decimal 301 54 02. Por sua vez, o rio Zêzere é afluente principal da margem direita do rio Tejo com classificação 301 54.

A cabeceira do rio Nabão localiza-se no concelho de Ansião. Desde essa secção até à estação hidrométrica da Fábrica da Matrena, o rio percorre cerca de 57 km e apresenta um declive médio de 0,05 %.

Existem duas secções no rio Nabão equipadas com estações hidrométricas (Figura 3.2), a de Agroal e a de Fábrica da Matrena. Ambas registam caudais em regime natural, sujeitos à variabilidade sazonal e interanual dos escoamentos.

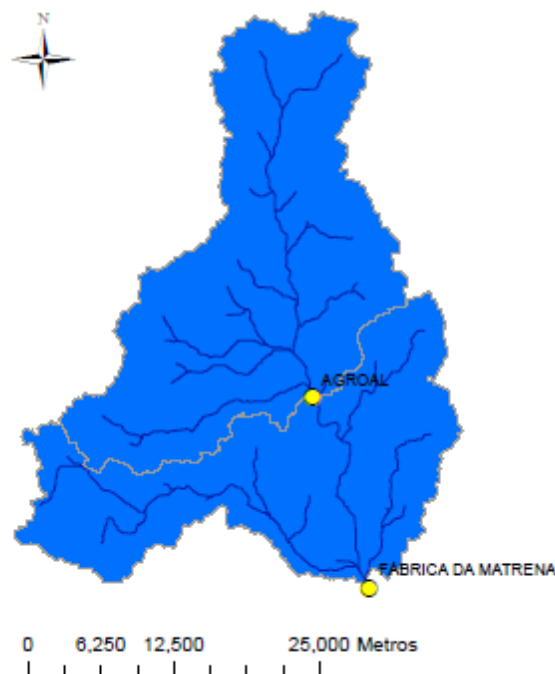


Figura 3.2. Localização das estações hidrométricas na bacia hidrográfica

3.1.1. Características da bacia hidrográfica

Como se pode observar na Figura 3.3, a ocupação do solo na bacia hidrográfica em estudo é constituída maioritariamente por florestas e as zonas urbanas concentram-se pontualmente na zona Oeste da bacia, Tomar destaca-se como o centro urbano principal na bacia hidrográfica do rio Nabão.

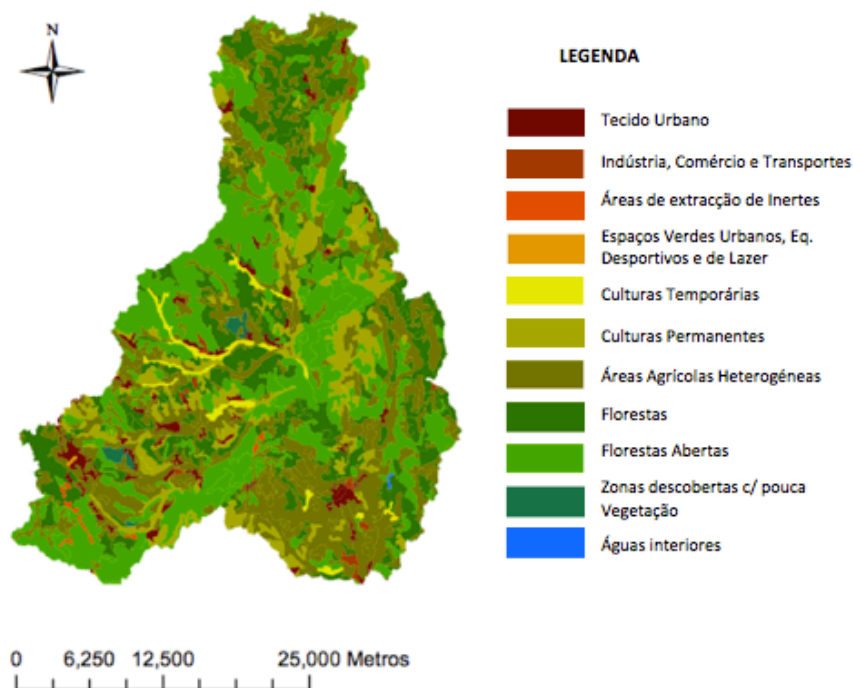


Figura 3.3. Ocupação e Uso do Solo (CLC 2006)

A caracterização geomorfológica e geológica da região foi desenvolvida num estudo hidrológico e hidráulico do rio Nabão, no âmbito do programa POLIS na cidade de Tomar, realizado em 2003 pela FBO Consultores. Segundo este estudo, a bacia hidrográfica em estudo está inserida na Orla Mesocenozóica Ocidental e na Bacia Terciária do Tejo e Sado. A Orla Mesocenozóica Ocidental, que apresenta uma grande variedade de tipos litológicos, é constituída, essencialmente, por formações de idades jurássica e cretácica, cobertas por formações plio-quadernárias.

Os grupos litológicos dominantes são constituídos por formações predominantemente detríticas da base do Mesozóico, do Jurássico superior, do Cretácico e do Terciário, formações margosas com inúmeras intercalações detríticas do Jurássico superior e Cretácico, e formações francamente calcárias. Em relação às últimas, as de maior espessura são as correspondentes ao Dogger, que constituem os importantes maciços da Estremadura.

A Bacia Terciária do Tejo e Sado, limitada a Norte e a Este pela Orla Mesocenozóica e a Sul pelo Maciço Hespérico, é composta por séries detríticas continentais paleogénicas e neogénicas, com intercalações marinhas e salobras, que correspondem aos terrenos miocénicos.

Na Figura 3.4 estão representados grupos litológicos da bacia hidrográfica em estudo, verificando-se a presença predominante de formações calcárias e arenitos.

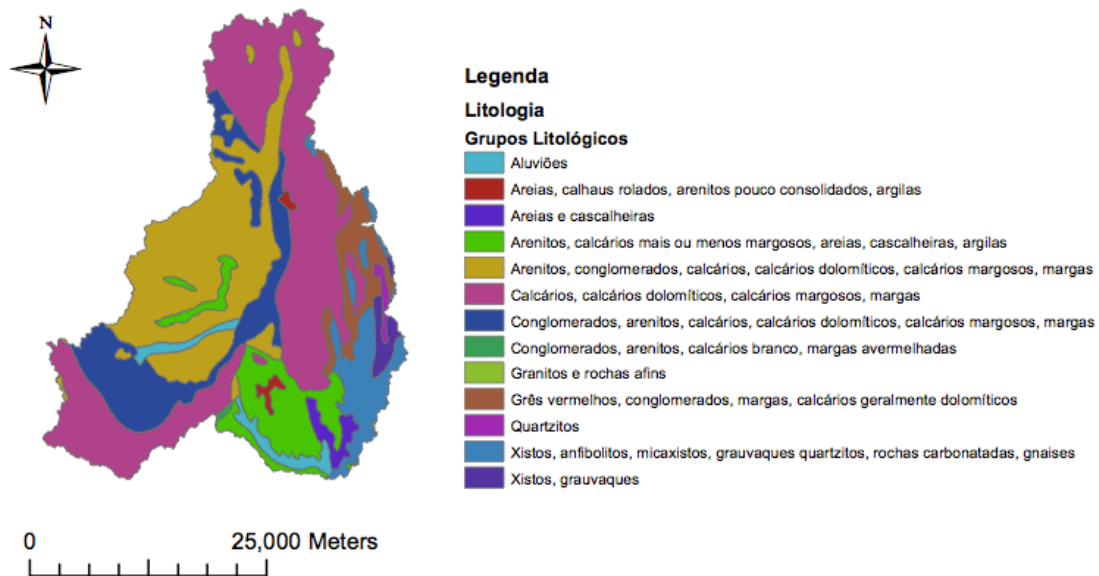


Figura 3.4. Carta Litológica da área de estudo

3.1.2. Registo histórico de cheias em Tomar

Tomar apresenta um registo centenário de cheias e inundações, que tendo um impacto maior e mais visível na cidade, afectam também, pontualmente, a restante área do município. O estudo hidrológico e hidráulico do rio Nabão realizado no âmbito do Programa Polis da cidade de Tomar faz referência a cheias ocorridas em Tomar, com destaque para três grandes cheias:

- 22 de Dezembro de 1909 (cota 51,45), na cantaria da farmácia Torres Pinheiro está uma placa que assinala a altura de água atingida: cerca de 95 cm acima do nível do calcetamento do passeio.
- 19 de Novembro de 1852 (cota 51,60), mais ou menos 1,75 – 1,80 m acima do actual passeio.
- 20 de Janeiro de 1941 (a mais pequena das três), na cidade atingiu 1 m de altura.

Em consultas a jornais *online*, desde 1976 até 2006, destacam-se mais quatro cheias que coincidiram com registos de caudais máximos nas estações hidrométricas de Agroal e da Fábrica da Matrena:

- 10 de Fevereiro de 1979 (Estação hidrométrica Fábrica da Matrena $Q = 473,6 \text{ m}^3/\text{s}$);
- 7 de Dezembro de 2000 (Estação hidrométrica Fábrica da Matrena $Q = 544,5 \text{ m}^3/\text{s}$), atingiu a cota 50,60 a montante do Açude dos Frades;
- 5 de Novembro de 2006 (Estação hidrométrica Fábrica da Matrena $Q = 200,6 \text{ m}^3/\text{s}$);

- 25 de Novembro de 2006 (Estação hidrométrica de Agroal $Q = 113,93 \text{ m}^3/\text{s}$; Fábrica da Matrena $Q = 328,94 \text{ m}^3/\text{s}$).



Figura 3.5. Cheia de Novembro de 2006 no centro da cidade de Tomar
Fonte: Jornal online - www.cidadetomar.pt

A cidade de Tomar encontra-se particularmente susceptível à ocorrência destes fenómenos hidrológicos já que é atravessada pelo rio Nabão. As consequências revelam-se imediatas, tanto no que diz respeito aos impactes físicos como económicos. O estudo das cheias e inundações do rio Nabão constitui assim um estudo de particular relevância para a população de Tomar.

3.2. Modelo hidrológico-hidráulico

A metodologia adoptada na presente dissertação pretende, de um modo geral, ser acessível e de ampla divulgação, constituindo um contributo para a preparação e elaboração de cartas de zonas inundáveis a incorporar nos Planos de Gestão de Riscos de Inundações em Portugal.

A principal componente de qualquer modelo hidrológico é, como já foi referido, a precipitação. Os dados de precipitação podem ser obtidos de diversas formas, sendo a mais indicada a monitorização através de estações de controlo (postos udométricos e udográficos). O modelo hidrológico escolhido - HEC-HMS - simula os processos de transformação de precipitação em escoamento. Os dados geométricos são criados em ambiente SIG e exportados para o modelo HMS através da ferramenta HEC-GeoHMS. Com os valores de precipitação introduzidos como dados de entrada, o modelo deduz as perdas, determina o excesso de precipitação através de hidrogramas unitários sintéticos, e propaga a onda de cheia através de métodos de *routing* dando origem a um hidrograma de cheia. Os

METODOLOGIA

caudais de ponta de cheia obtidos são introduzidos na modelação hidráulica, com o modelo HEC-RAS, onde se conseguem extrair as alturas de água e assim delimitar as áreas inundáveis. O HEC-RAS simula o escoamento unidimensional e cria perfis de cota da superfície livre para determinadas condições de escoamento. Os dados geométricos necessários ao modelo em questão podem ser criados em ambiente SIG, utilizando a ferramenta HEC-GeoRAS, que permite a exportação desses dados para o modelo hidráulico RAS. Posteriormente, o resultado final da modelação hidráulica pode ainda ser exportado novamente para o formato SIG e assim visualizar os mapas de zonas inundáveis.

A metodologia proposta encontra-se exemplificada na Figura 3.6. Em seguida são descritas as três etapas realizadas: a análise estatística das precipitações máximas diárias anuais; modelação hidrológica; modelação hidráulica.

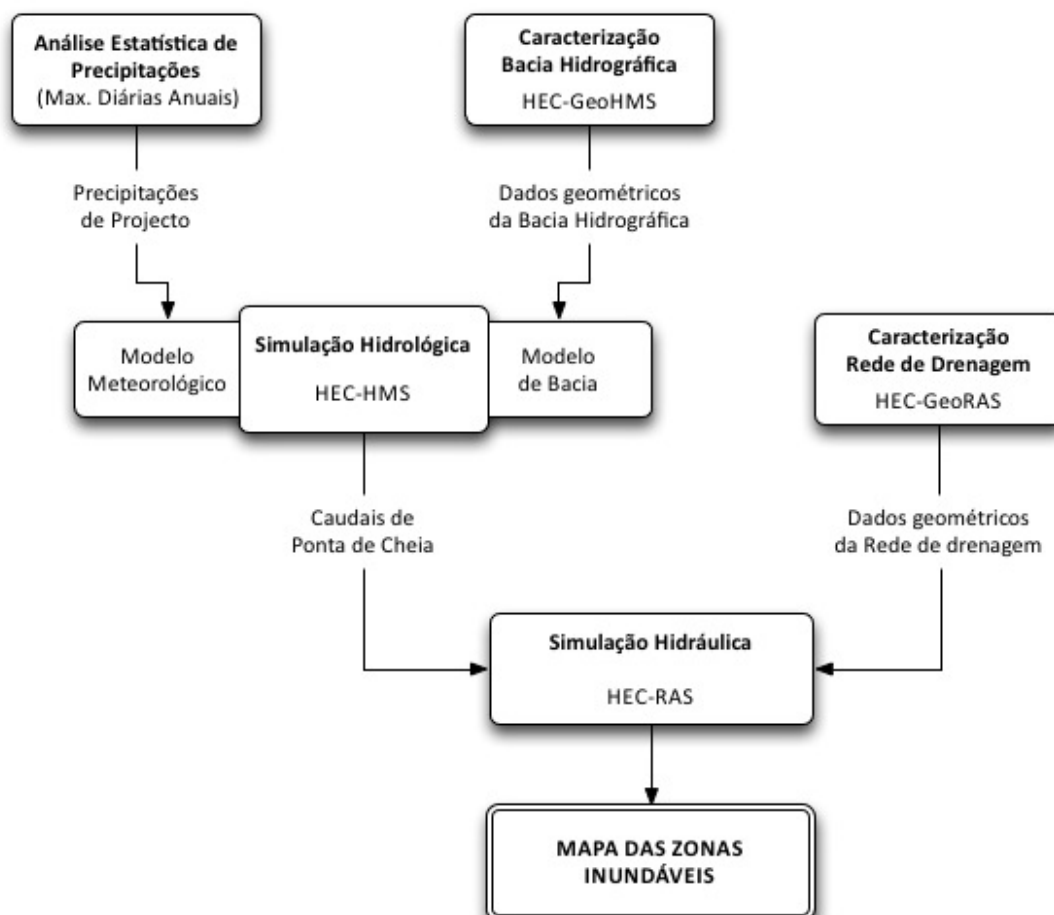


Figura 3.6. Fluxograma da metodologia proposta

3.2.1. Análise estatística de precipitações máximas diárias anuais

O Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos (SNIRH) disponibiliza os dados relativos à rede meteorológica e à rede hidrométrica. Em Portugal continental a rede meteorológica é composta por 792 estações meteorológicas/udométricas/udográficas e a rede hidrométrica por 717 estações (SNIRH, 2012).

A precipitação é a principal causa da ocorrência de cheias, especialmente em bacias hidrográficas localizadas em zonas interiores. Tanto as precipitações prolongadas, com durações superiores ao dia, como as precipitações intensas de curta duração podem ser a origem de eventos de cheias e inundações. Como já foi referido anteriormente, a zona de estudo é frequentemente sujeita a inundações, as quais são essencialmente resultantes de precipitações intensas de curta duração.

Um dos estudos de precipitações intensas em Portugal Continental diz respeito ao trabalho realizado por Brandão *et al*, 2001, que foi actualizado em 2004. Quando a informação hidrométrica não é suficiente para a determinação de caudais de ponta de cheia, o conhecimento das precipitações intensas é fundamental para essa determinação, especialmente em zonas urbanas onde a frequência de ocorrência toma elevada importância na delimitação de zonas inundáveis (Brandão, *et al.*, 2001). O estudo de Brandão (2001) baseou-se na análise de 27 postos uográficos em Portugal Continental que possuíam séries com o maior número de anos de registos e com boa qualidade de valores (poucas falhas) de forma a representarem, da forma mais aproximada possível, as diversas regiões do país.

O primeiro passo para o estudo e análise de cheias passa pela análise e tratamento estatístico das séries de precipitações máximas de curta duração. A análise estatística, desenvolvida no âmbito do presente trabalho, considerou as séries de precipitações máximas diárias anuais dos postos meteorológicos que se encontram na proximidade da bacia hidrográfica em estudo. Em paralelo, foi realizada a análise das precipitações intensas de curta duração com recurso às curvas IDF propostas por Brandão (2001). Este primeiro passo é talvez o mais importante na modelação hidrológica, pois os dados obtidos, ou seja, as precipitações de projecto para os períodos de retorno admitidos, são as principais componentes de entrada do modelo hidrológico. Estas vão definir o modelo meteorológico onde são inseridos os valores de precipitações, de modo a obter os respectivos hidrogramas de cheia correspondentes aos períodos de retorno analisados.

Para os estudos de simulação das afluências à secção de referência da bacia hidrográfica em estudo foram identificados 17 postos uográficos com séries de registos de precipitação máxima diária anual entre os 20 e os 77 anos. Esta informação é actualmente de fácil obtenção através, por exemplo, do portal SNIRH, que divulga os registos de precipitações da rede uométrica/uográfica nacional da

responsabilidade da APA. A localização dos postos com influência na bacia hidrográfica em estudo é apresentada na Figura 3.7.

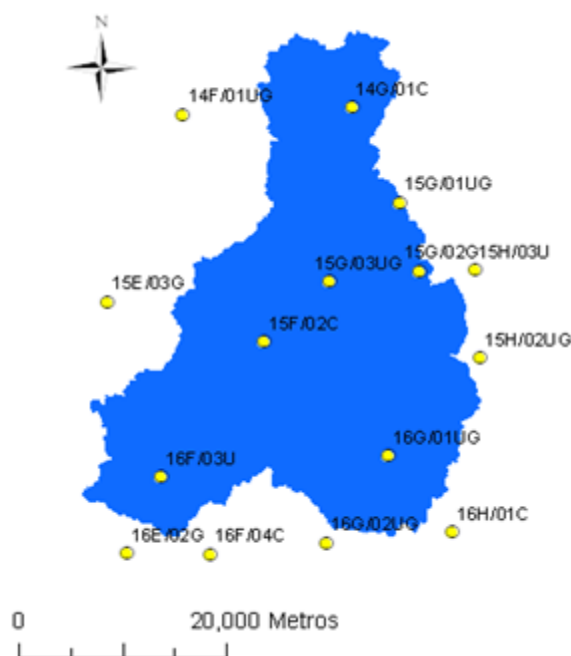


Figura 3.7. Localização das estações udométricas/udográficas

As principais características das estações meteorológicas seleccionadas encontram-se listadas na Tabela 3.1.

Tabela 3.1. Principais características das estações meteorológicas com influência na BH do rio Nabão
Fonte: SNIRH

Estação	Código	Altitude (m)	Latitude (°N)	Longitude (°W)	Bacia Hidrográfica
Pombal	14F/01UG	95	39,903	-8,625	Mondego
Ansião	14G/01C	217	39,910	-8,435	Tejo
Caranguejeira	15E/03G	103	39,739	-8,708	Ribeiras do Oeste
Caxarias	15F/02C	132	39,705	-8,531	Tejo
Alvaiázere	15G/01UG	335	39,827	-8,381	Tejo
Rego da Murta	15G/02G	241	39,767	-8,357	Tejo
Freixianda	15G/03UG	116	39,758	-8,459	Tejo
Ferreira do Zêzere	15H/02UG	348	39,692	-8,290	Tejo
Beco	15H/03U	289	39,768	-8,296	Tejo
Minde	16E/02G	222	39,520	-8,684	Tejo
Boleiros	16F/03U	316	39,587	-8,647	Tejo
Pedrogão	16F/04C	116	39,520	-8,591	Tejo

Degracias	13F/02UG	326	40,010	-8,522	Mondego
Tomar	16G/01UG	76	39,606	-8,392	Tejo
Carrazede	16G/02UG	80	39,530	-8,462	Tejo
Barragem de Castelo de Bode	16H/01C	153	39,540	-8,320	Tejo

Para os estudos de cheias são normalmente consideradas as precipitações intensas com durações inferiores ao dia, as quais não são disponibilizadas nas bases de dados referidas anteriormente. Assim, a análise das precipitações intensas de curta duração teve por base a análise estatística das séries de precipitação máxima diária anual, registadas em cada um dos postos que foram considerados com influência sobre a bacia hidrográfica em estudo. Cada uma das séries de precipitação máxima diária anual foi analisada segundo a distribuição assintótica de extremos do tipo I (Lei de Gumbel). O estudo de adaptabilidade foi realizado através do teste estatístico de hipótese não paramétrico do *Qui-Quadrado* (χ^2) e do teste de *Kolmogorov-Smirnov*. A selecção final baseou-se neste último teste.

Com base neste ajustamento estimou-se, para cada posto, o valor de precipitação máxima correspondente a um período de 24 horas, para períodos de retorno de 2, 10, 50, 100 e 500 anos. Por ponderação através do método dos polígonos de Thiessen das precipitações máximas correspondentes aos períodos de retorno considerados, foi possível determinar a precipitação máxima diária na bacia hidrográfica em estudo. Este método consiste em traçar os polígonos formados pelas mediatrizes dos segmentos de recta entre os postos meteorológicos, limitando cada polígono a área de influência desse posto na área da bacia hidrográfica, dentro da qual se considera a precipitação uniforme e igual à do posto (Chow, *et al.*, 1988). Através da seguinte expressão é determinada a precipitação ponderada na bacia hidrográfica do rio Nabão:

$$P_{BH} = \frac{\sum_i P_i \times A_i}{A_{BH}}$$

onde P_i é a precipitação estimada em cada posto meteorológico i (mm) e para cada período de retorno, pela distribuição de Gumbel, A_i é a área correspondente a cada posto (km^2) e A_{BH} é a área da bacia (km^2).

Como foi referido, as precipitações a considerar no estudo hidrológico têm durações inferiores ao dia, logo é necessário estabelecer relações de carácter local para a obtenção das mesmas. O Serviço Meteorológico Nacional possui cartas que indicam os coeficientes de repartição de precipitações diárias em precipitações com durações inferiores ao dia, nomeadamente de 12, 6, 3, 2 e 1 horas.

Com base nos valores de altura de precipitação e na respectiva duração de precipitação, foi possível determinar para cada período de retorno as correspondentes curvas de possibilidade udométrica,

$$h = at^n$$

com h expresso em mm e t em horas. Esta equação representa, em coordenadas logarítmicas, uma recta

$$\log(h) = \log(a) + n \log(t)$$

Através dessas curvas de possibilidade udométrica foi possível determinar, para a bacia hidrográfica, para vários períodos de retorno e para diferentes durações a altura de precipitação ponderada na bacia. Os resultados obtidos são posteriormente inseridos no modelo meteorológico HEC-HMS, descrito mais à frente.

3.2.2. Análise estatística das séries de registos hidrométricos

O cálculo dos caudais de ponta de cheia foi efectuado por dois métodos, através da análise estatística dos dados hidrométricos e pela modelação hidrológica no programa HEC-HMS.

Como foi referido anteriormente, verifica-se a existência de duas estações hidrométricas na bacia hidrográfica do rio Nabão, a estação de Agroal e a estação de Fábrica da Matrena, ambas com dados disponíveis no SNIRH. As características de ambas encontram-se na Tabela 3.2.

Tabela 3.2. Características principais das estações hidrométricas do rio Nabão

Estação	Código	Latitude (°n)	Longitude (°w)	Área drenada (km ²)	Altitude (m)	Dimensão série q máx. Inst.
Agroal	15G/02	39,679	-8,437	608,49	88	11
Fábrica da Matrena	16G/01	39,532	-8,379	1047,15	50	16

A série de caudais máximos instantâneos da EH Fábrica da Matrena foi prolongada com recurso às curvas de vazão disponíveis no SNIRH, o que resultou numa série de 23 valores, possibilitando a análise estatística destes dados. Já a série da estação de Agroal não apresentou uma série de registos

suficiente longa para uma análise fiável, verificando-se a fraca qualidade da série e posterior rejeição do tratamento estatístico, pelo que não foi analisada.

Seleccionou-se a função de distribuição de Gumbel para a determinação dos caudais máximos instantâneos para os períodos de retorno de 2, 10, 50, 100 e 500 anos. Estes valores de caudais máximos instantâneos referem-se à secção da estação hidrométrica da Fábrica da Matrena. Como para a análise de cheias são necessários os caudais referentes a mais do que uma secção, nomeadamente a jusante da secção de referência, esta estimativa serve apenas para uma análise comparativa entre estes resultados e os obtidos por simulação hidrológica através do recurso aos modelos seleccionados.

3.2.3. Modelo hidrológico

Para a análise de cheias em bacias hidrográficas, devem ser consideradas durações de precipitação iguais ou superiores ao tempo de concentração da bacia hidrográfica em estudo, de modo a que toda a área da bacia contribua em simultâneo para o escoamento na secção de referência. No entanto, no modelo HEC-HMS as durações de precipitação, são limitadas aos valores pré-definidos pelo modelo. Como tal, foram simulados apenas eventos de precipitação de duração de 24 horas, associados aos diferentes períodos de retorno, de modo a avaliar a resposta da bacia a estas simulações.

O tempo de concentração de uma bacia hidrográfica é definido como o tempo que uma gota de água caída no ponto hidráulicamente mais afastado da secção de referência demora a chegar até esta secção (Lencastre e Franco, 2006). Pode também ser definido como o tempo necessário para que toda a área da bacia hidrográfica contribua, em simultâneo, para o escoamento na secção de referência. Este parâmetro foi calculado por três fórmulas empíricas: *Temez*, *Kirpich* e *Giandotti*. Aplicadas estas expressões à bacia hidrográfica, foi adoptado o valor correspondente à média destes três resultados. As expressões utilizadas foram as seguintes:

$$\textit{Temez} \quad t_c = 0,3 \left(\frac{L}{i_m^{0,25}} \right)^{0,76}$$

onde t_c corresponde ao tempo de concentração em horas, L o comprimento da linha de água principal em quilómetros e i_m o declive médio da linha de água principal;

$$\textit{Kirpich} \quad t_c = 0,663 \frac{L^{0,77}}{i_m^{0,385}}$$

em que as variáveis representam o mesmo que na fórmula anterior,

$$Giandotti \quad t_c = \frac{4\sqrt{A}+1,5L}{0,8\sqrt{h_m}}$$

nesta expressão, t_c e L têm o mesmo significado que os anteriores e A corresponde à área da bacia hidrográfica em km^2 e h_m a altura média da bacia hidrográfica em metros.

Construção da geometria do modelo de bacia (HEC-GeoHMS)

O *software* utilizado para todo o pré-processamento de dados geométricos a partir do Modelo Digital do Terreno (MDT) foi o HEC-GeoHMS (*Hydrologic Engineering Center - Geospatial Hydrologic Modeling System*) do *US Army Corps of Engineers*. Esta escolha suportou-se no facto de se tratar de uma ferramenta de domínio público do programa ArcGIS. O programa permite aos utilizadores visualizar a informação hidrológica espacial, realizar análises espaciais, delimitar bacias hidrográficas e redes de drenagem, documentar as características dessas bacias e das correspondentes redes de drenagem, bem como a produção de dados de entrada para os modelos hidrológicos (HEC, 2010).

Uma análise hidrológica baseia-se nos seguintes elementos básicos: linhas de água, bacias hidrográficas e sub-bacias. Caracterizar estes elementos é então uma parte fundamental dos estudos hidrológicos. Esta caracterização é facilmente realizada através de um MDT, visto este conter informação suficiente para delinear a rede de drenagem superficial, dependendo da resolução do mesmo. Este processo segue um conjunto de operações de análise espacial, as quais são descritas em seguida, de acordo com o manual do HEC-GeoHMS (HEC, 2010). A ESRI Portugal disponibiliza gratuitamente um modelo digital do terreno de Portugal continental e regiões autónomas, com resolução de 30 metros, o qual foi utilizado como base do processamento dos dados espaciais. A metodologia utilizada pela ESRI consistiu na recolha de imagens do satélite Terra ASTER (*Advanced Spaceborn Thermal Emission and Reflection Radiometer*) e posterior criação de mosaicos de imagens no *software* ArcGIS Desktop 9.3.1.

Inicialmente o MDT obtido passa pelo processo de pré-tratamento do terreno, seguindo a ordem de passos da extensão HEC-GeoHMS, de acordo com a sequência apresentada na Figura 3.8.

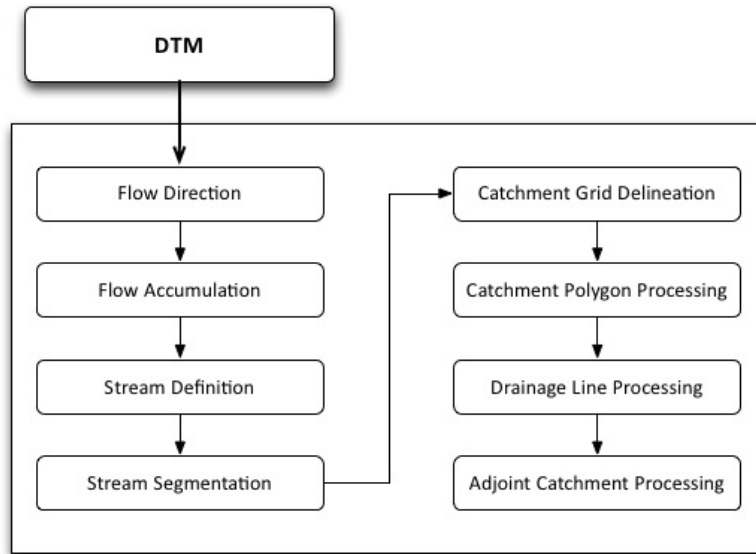


Figura 3.8. Ferramentas do pré-processamento do terreno com o HEC-GeoHMS

Fonte: (Fleming e Doan 2010)

Antes de se proceder a estas operações, é feito o preenchimento das células do MDT de forma a evitar que o modelo forme linhas ou pontos sem escoamento (com a operação *Fill Sinks*), isto corresponde a eliminar as depressões do MDT com o aumento da cota dos pontos que constituem essas depressões (Figura 3.9). Estas depressões devem então ser removidas do MDT, para se proceder à delimitação da rede de drenagem.

De seguida é necessário calcular a direcção do escoamento (*Flow Direction*) de todas as células da matriz no MDT (Figura 3.10). A direcção de escoamento foi fundamentada no princípio simples de que a água, no seu percurso, se move para o menor potencial possível, ou seja, é identificada a célula vizinha mais próxima em relação à qual o declive é máximo. O algoritmo que descreve as direcções do escoamento foi desenvolvido por O'Callaghan & Mark (1984) e ficou conhecido como Algoritmo Determinístico de 8 direcções de fluxo (D8), representado na Figura 3.10.

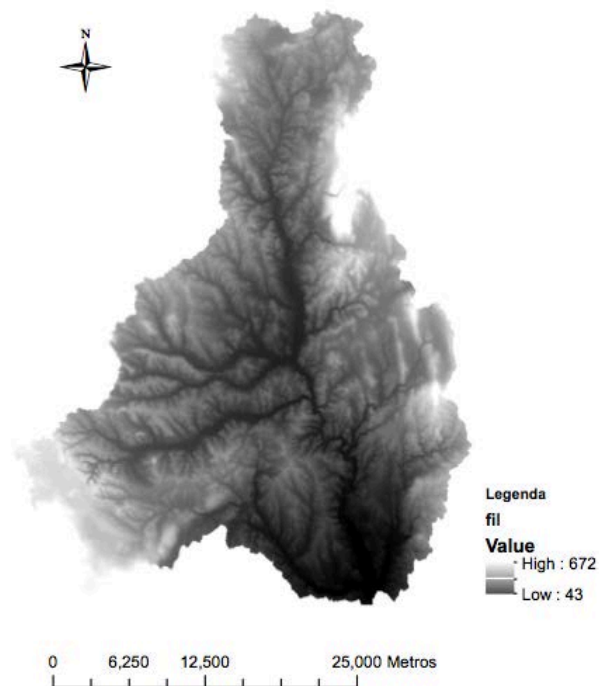


Figura 3.9. Modelo digital do terreno com preenchimento de depressões (*Fill Sinks*)

Posteriormente é estimado o número de células que contribuem com o escoamento para cada célula analisada. O escoamento acumulado (*Flow Accumulation*) pode ser obtido a partir da matriz da direcção do escoamento. Assim, o escoamento acumulado pode ser definido como o valor real da área total, cujo fluxo, que se movimenta de célula para célula seguindo as direcções calculadas com o algoritmo anterior, escoam para cada célula (Figura 3.11).

A rede de drenagem superficial é então extraída a partir dos dados do escoamento acumulado, sendo que são definidas as áreas de drenagem (*Catchment*) para cada segmento de rio extraído com a operação de definição de segmentos (*Stream Definition*). O resultado final do pré-processamento do terreno é a delimitação da bacia e sub-bacias hidrográficas e da rede de drenagem (*Drainage Line*) representada na Figura 3.12.

Após este processo, seguem-se a extracção das características topográficas que podem ser usadas para estimar os parâmetros hidrológicos. Esta etapa diz respeito à preparação dos dados de entrada no modelo hidrológico e rectificação das operações anteriores. Primeiro é criado um projecto (HMS Project Setup), onde é definido o ponto da secção de referência e correspondente área de projecto. De seguida, procede-se com o processamento dos dados da bacia gerada (Basin Processing).

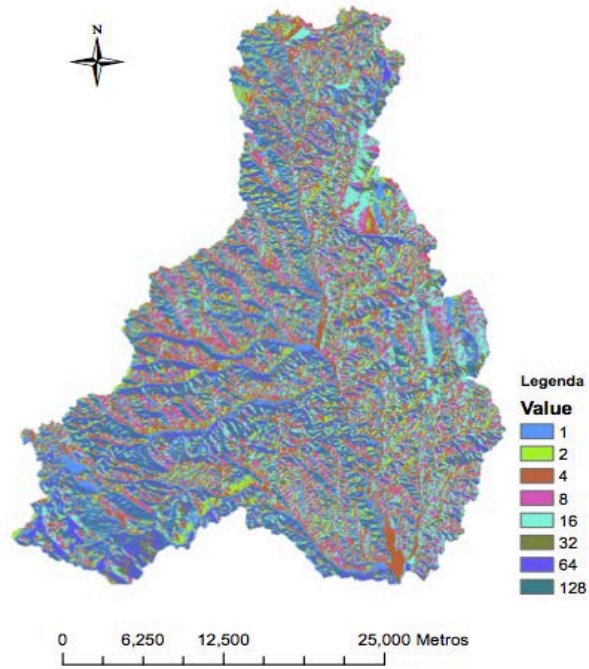
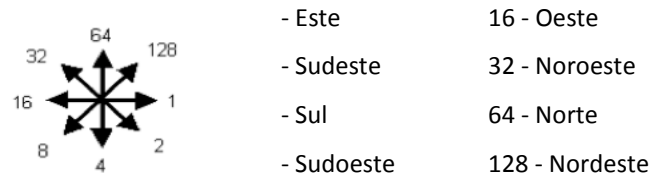


Figura 3.10. Direcção do escoamento

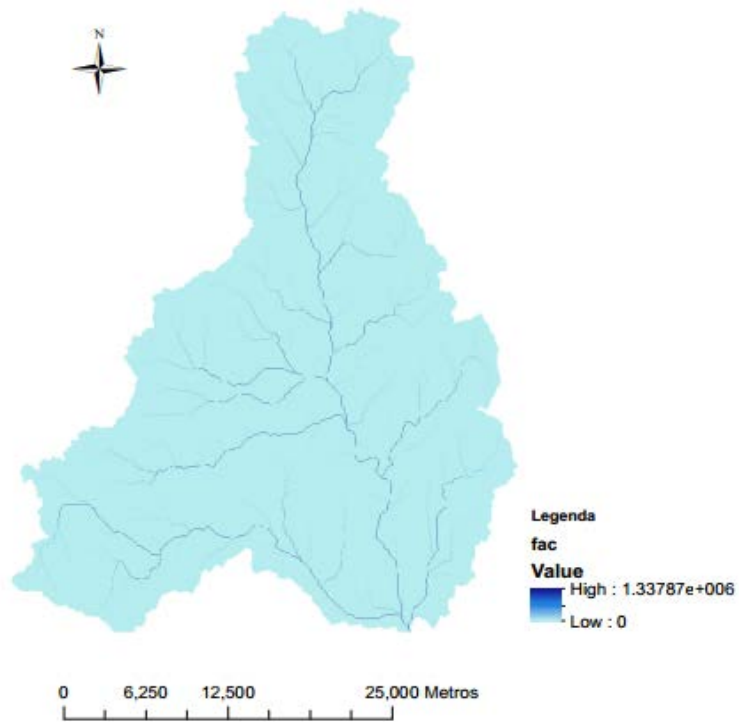


Figura 3.11. Escoamento acumulado

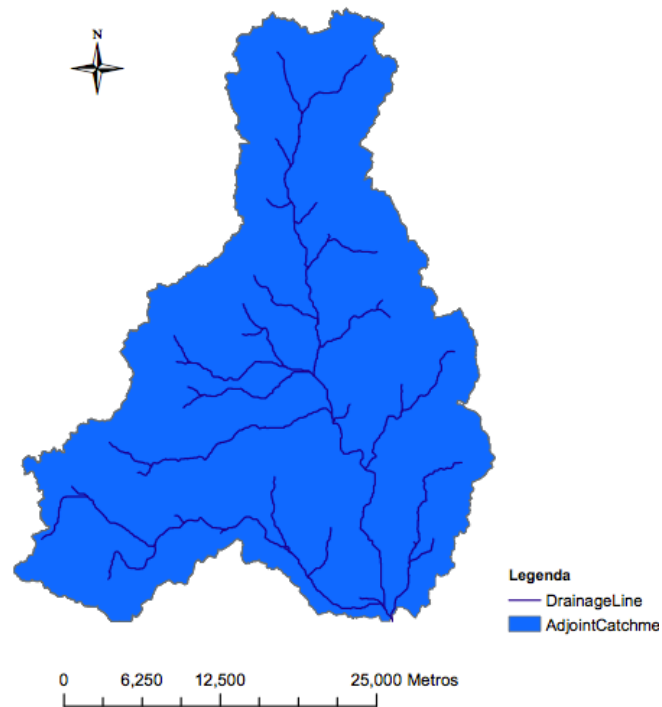


Figura 3.12. Rede de drenagem

As áreas de drenagem inicialmente criadas pelo programa são delimitadas para cada segmento de rio, de modo a facilitar operações futuras que estabelecem relações entre as duas componentes, ou seja são criadas sub-unidades hidrológicas individuais. Contudo, a quantidade de áreas de drenagem criadas pode ser demasiado elevada para posterior análise no modelo hidrológico, e pouco representativa da situação real. Para o caso de estudo optou-se por dividir a bacia inicialmente criada, em duas “sub-bacias” (através da ferramenta *Basin Merge*): uma com secção de referência na estação hidrométrica do Agroal e a outra com a secção de referência inicialmente estabelecida (estação hidrométrica da Fábrica da Matrena), representadas na Figura 3.13. Esta divisão teve em consideração a possível obtenção de dados hidrométricos de ambas as estações para a calibração do modelo hidrológico HEC-HMS. Para uma análise comparativa foi também realizada a simulação hidrológica para a bacia hidrográfica como um todo, ou seja, sem estar dividida em sub-unidades.

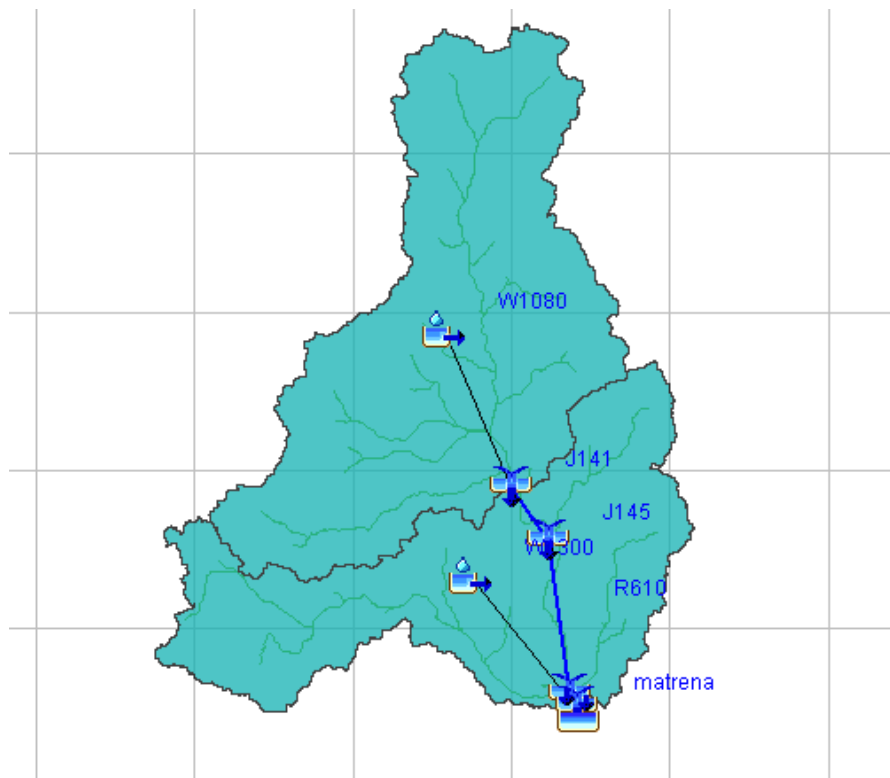


Figura 3.13. Bacia hidrográfica do rio Nabão, dividida em duas sub-unidades

Consideram-se então as características topográficas da bacia hidrográfica em estudo, da sub-bacia definida e da rede de drenagem associada. As operações para esta caracterização incluem a determinação do comprimento das linhas de água e o declive médio tanto das linhas de água como da bacia hidrográfica.

Depois de serem extraídas as características fisiográfica o utilizador tem a possibilidade de calcular alguns parâmetros hidrológicos. A partir de dados espaciais como, por exemplo, a carta de ocupação e uso do solo (CLC 2006) para determinar a percentagem de áreas impermeáveis e a carta de número de escoamento (Atlas do Ambiente³) para a estimativa do número de escoamento médio das sub-bacias. Estes parâmetros são escolhidos de modo a incorporar os modelos de perdas de precipitação e transformação de precipitação em escoamento, que fazem parte do modelo hidrológico HEC-HMS, como se poderá verificar posteriormente. Os processos hidrológicos podem ser definidos nesta etapa, o que não impede o utilizador de, mais tarde, no programa HEC-HMS fazer as alterações necessárias, ou efectuar várias simulações com os diferentes processos disponíveis no programa.

Finalmente, depois de toda a preparação dos dados geométricos necessários à modelação hidrológica, é criado o projecto HMS. No ArcGIS são criadas as componentes do modelo de bacia que são directamente importadas no HEC-HMS. As restantes componentes (modelo meteorológico e

³ Disponível no site: <http://sniamb.apambiente.pt/atlas/>

especificações de controlo) e os parâmetros hidrológicos não estimados com recurso ao SIG (por exemplo o tempo de concentração) são definidos paralelamente e introduzidos manualmente no modelo para se proceder à simulação de escoamento.

Simulação hidrológica (HEC-HMS)

Na sequência da utilização da extensão HEC-GeoHMS, foi escolhido o *software* HEC-HMS para a modelação hidrológica, como foi referido anteriormente. O sistema de modelação hidrológica HEC-HMS foi criado de modo a simular o escoamento superficial que resulta da precipitação, representando a bacia hidrográfica como um sistema de componentes interdependentes. Algumas das vantagens associadas a esta escolha são a versatilidade de escolha de processos hidrológicos e informações a integrar, bem como a ligação com os SIG criada pela extensão HEC-GeoHMS ser de domínio público. Inclui componentes para representar a precipitação e inclui processos de determinação da infiltração, do escoamento de superfície e do escoamento de base (HEC, 2010b)). Uma das principais limitações deste modelo é o facto de não processar redes não dentríticas, ou seja, as redes de drenagem devem ser ramificadas em forma de árvore. Trata-se de um modelo fisicamente baseado e agregado, onde é assumido que a bacia é reproduzida como um grupo interligado de áreas e os processos hidrológicos podem ser representados pelos parâmetros que reflectem as condições médias dessas áreas.

As principais componentes das simulações, já referidas, são: o **modelo de bacia**, o **modelo meteorológico** (precipitações de projecto determinadas na análise estatística) e as **especificações de controlo** (Figura 3.14). Adicionalmente, podem ser introduzidas séries temporais, como as séries de precipitação e de caudais; funções de dados emparelhados que se traduzem na relação entre uma variável dependente e uma independente, para calibração do modelo.

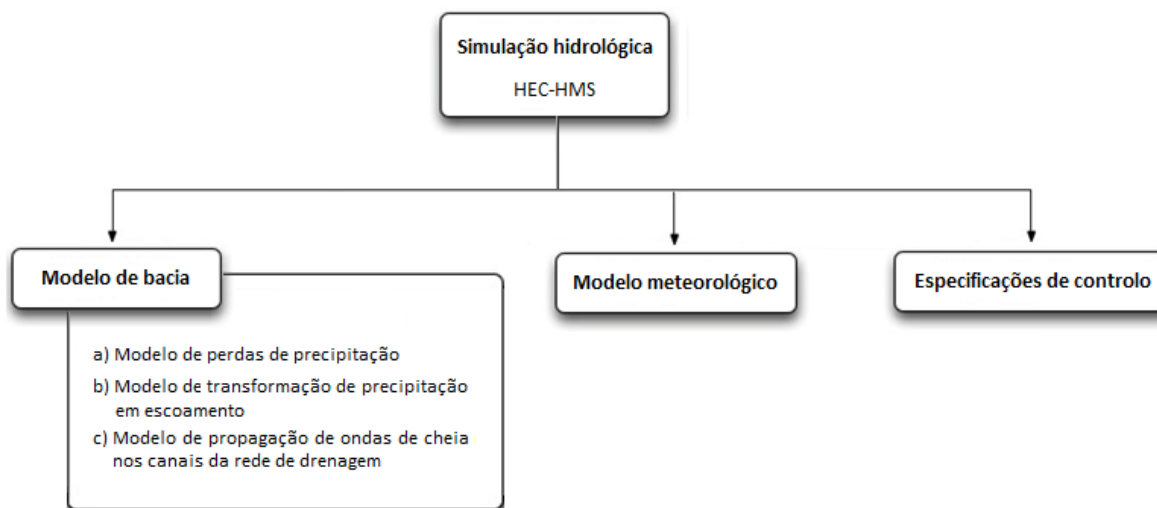


Figura 3.14. Componentes da simulação hidrológica

Modelo de Bacia – fornece a descrição física da bacia hidrográfica, através dos elementos hidrológicos, determinados com o HEC-GeoHMS em ambiente SIG, com possibilidade de definir novos elementos no HEC-HMS, tais como:

- Sub-bacias: áreas de drenagem que recebe a precipitação;
- Troços: rios e ribeiros, que representam o movimento da água em canais abertos;
- Reservatórios: barragens e lagos;
- Junções: confluências de duas linhas de água;
- Desvios: bifurcações e pontos de captação de água;
- Fontes: nascentes;
- Depressões: pontos de saída ou lagos terminais.

A principal entrada de água no sistema é feita através da precipitação. Os únicos elementos que “recebem” precipitação e outros *inputs* meteorológicos são as sub-bacias, e dividem-se em segmentos de modo a calcular a infiltração (perdas da precipitação), o escoamento de superfície (métodos de transformação da precipitação em escoamento) e escoamento de base (métodos de *baseflow*). Considera-se que a precipitação e a infiltração são uniformemente distribuídas pelas correspondentes áreas de drenagem.

A aplicação do programa segue os seguintes passos básicos:

1. Criar um projecto;
2. Introduzir séries temporais, dados GRID e dados emparelhados;

3. Criar o modelo de bacia;
4. Criar o modelo meteorológico;
5. Criar as especificações de controlo;
6. Criar e executar a simulação;
7. Análise de resultados;
8. Criar outras alternativas de simulação (diferentes cenários), executá-las e comparar os resultados.

No final destas etapas é possível alterar os dados introduzidos e adicionar outros modelos de bacia, pontos de controlo, ou qualquer outra componente. Podem-se alterar as selecções feitas e ajustar os valores dos parâmetros de modo a melhorar os resultados.

Cada um dos elementos hidrológicos que compõem o modelo de bacia tem editores de componentes onde são indicados o nome do modelo de bacia, o nome do elemento, a sua descrição e a ligação imediatamente a jusante do elemento. Todos estes elementos calculam o fluxo que os atravessa através de métodos específicos e este é transferido para o elemento a jusante, ou então, se não houver ligação a jusante, o fluxo é armazenado. Esta característica é bastante importante para o seguimento da metodologia proposta, pois para a delimitação de zonas inundáveis é seleccionado o troço crítico (troço do rio Nabão que atravessa a cidade de Tomar) sujeito a inundações periódicas e, com a modelação hidrológica no HEC-HMS, é possível extrair os dados de caudais de ponta de cheia correspondentes ao troço em questão.

O HEC-HMS considera que todo o solo e a água numa bacia hidrográfica são caracterizados por superfície impermeável e superfície permeável. A superfície impermeável é a porção da bacia onde toda a precipitação aí ocorrida é escoada sem que ocorra infiltração, evaporação ou outro meio de perdas de precipitação, ao contrário da superfície permeável que está sujeita às perdas de precipitação. O modelo considera vários métodos para estimar estas perdas, como o modelo Green-Ampt, *Initial and Constant Rate*, *Deficit and Constant Rate* e o *SCS Curve Number*.

Após a introdução de dados geométricos no HEC-HMS procede-se à escolha dos modelos hidrológicos necessários à determinação dos caudais de ponta de cheia. Este processo faz parte da criação do modelo de bacia atrás descrito.

a) Modelo de Perdas de Precipitação

O modelo de perdas de precipitação aplicado foi o modelo do SCS, que engloba como parâmetros o número de escoamento (CN), as perdas iniciais (I_a) e a percentagem de área impermeável. Este modelo assume um evento de precipitação como um todo, onde o excesso de precipitação (P_e), ou escoamento directo é sempre menor ou igual à precipitação total (P). Além disso, depois de se iniciar o escoamento superficial, a altura de água que fica retida na bacia (F_a) é menor ou igual ao potencial máximo de retenção de água na bacia (S). Considera-se ainda uma certa quantidade de precipitação para a qual não ocorre escoamento de superfície, de modo que o escoamento potencial é igual a $P - I_a$ (Chow *et al.*, 1998). Assim a hipótese assumida por este modelo é que a razão entre as quantidades de precipitação e de escoamento é igual:

$$\frac{F_a}{S} = \frac{P_e}{P - I_a}$$

onde P_e é o excesso de precipitação, P a precipitação total, F_a as perdas contínuas, I_a as perdas iniciais e S a retenção potencial máxima.

Com base em vários estudos o SCS propôs a relação empírica para as perdas iniciais e retenção potencial máxima (Chow *et al.*, 1988):

$$I_a = 0,2S \quad \text{e} \quad S = \frac{25400}{CN} - 254$$

onde CN é o número de escoamento da bacia hidrográfica. Com base nesta relação o excesso de precipitação, ou seja, o escoamento de superfície é então determinado pela seguinte equação:

$$P_e = \frac{(P - I_a)^2}{P - I_a + S}$$

Os factores que determinam o número de escoamento (CN) são o tipo hidrológico do solo e a utilização e condições de superfície. Os dados de CN foram obtidos pelo Atlas da Água (SNIRH 2010), para condições de humedecimento médias – AMC II. Para a determinação de caudais de cheia é comum considerar-se o solo bem humedecido, logo utiliza-se o CN para as condições AMC III. Foi utilizada a seguinte expressão para converter os valores de número de escoamento (Chow *et al.*, 1988):

$$CNIII = \frac{23 \times CNII}{10 + 0,13 \times CNII}$$

Os valores de CN para AMC II encontram-se disponíveis em formato *raster*, sendo possível a extração dos mesmos para a área de interesse em ambiente SIG e posterior conversão para AMC III, pela aplicação da expressão anterior. A estimação deste parâmetro em modelação hidrológica permite introduzir a informação resultante do uso e ocupação do solo noutra parâmetro hidrológico essencial ao estudo de cheias, o tempo de concentração.

b) Modelo de transformação de precipitação em escoamento

Para a transformação de precipitação em escoamento o HEC-HMS, mais uma vez, disponibiliza vários métodos. O método aplicado foi novamente o do SCS, concretamente o modelo do hidrograma unitário (SCS), que utiliza uma representação discreta do excesso de precipitação e determina o hidrograma de cheia com base no tempo de resposta da bacia (*Tlag*). É um modelo empírico que procura estabelecer uma relação entre a precipitação e o escoamento directo, e é dos hidrogramas sintéticos mais utilizados em estudos hidrológicos (Chow *et al.*, 1988).

c) Modelo de propagação de ondas de cheia nos canais da rede de drenagem

A propagação das ondas de cheia nos canais foi efectuada com recurso ao modelo do tempo de resposta - *Lag*, que se baseia na consideração de uma velocidade média de escoamento no canal e no comprimento do canal, onde o quociente dos dois constitui o parâmetro de entrada do modelo - o tempo de percurso. Os valores de velocidade pressupostos, visto não terem sido identificados valores expectáveis, variaram consoante os perfis longitudinais dos segmentos, tendo em conta o tempo de concentração da unidade hidrológica onde se inserem esses segmentos.

Modelo Meteorológico – descreve as condições atmosféricas a considerar na simulação do escoamento, nomeadamente a precipitação, de modo a estabelecer os hietogramas de projecto. Foram inseridas as precipitações associadas a diferentes frequências de ocorrência, nomeadamente

às que correspondem os períodos de retorno de 2, 10, 50, 100 e 500 anos, a partir da análise estatística das séries de precipitações máximas diárias realizadas anteriormente.

Especificações de controlo – estabelecem o intervalo de tempo em que se pretende realizar a simulação, o utilizador define a data de início e a data de fim da simulação, assim como o passo de cálculo dos processos hidrológicos utilizados na simulação. O programa não impõe limitações quanto ao intervalo de tempo a ser definido.

Resumidamente, a metodologia desenvolvida para a estimativa dos caudais de ponta de cheia, com o modelo HEC-HMS, na bacia hidrográfica em estudo seguiu os seguintes passos:

- Avaliação das perdas de água nas sub-bacias modeladas e, conseqüentemente, a estimativa da precipitação útil que contribuirá para o escoamento utilizando o método do SCS;
- Determinação dos tempos de concentração e de resposta de cada sub-bacia, por ponderação dos resultados de diferentes fórmulas empíricas, como parâmetros do método de transformação do hidrograma unitário do SCS;
- Estimativa dos tempos de percurso, a partir de pressupostos de velocidades de escoamento nos cursos de água, para determinação da propagação da onda de cheia nos mesmos;
- Introdução das precipitações de projecto no modelo meteorológico, para os eventos de precipitação com frequências de ocorrência de 50%, 10%, 2%, 1% e 0,2%, a que correspondem os períodos de retorno de 2, 10, 50, 100 e 500 anos, respectivamente, e definição do intervalo de tempo da precipitação constante e duração da chuvada a ser considerada;
- Especificações de controlo, em que se define o intervalo de tempo em que ocorre a simulação;
- Simulação hidrológica HEC-HMS para estimar os caudais de cheia e simular os respectivos hidrogramas de cheia resultantes da ocorrência de uma determinada precipitação sobre a bacia.

3.2.4. Modelo hidráulico

O HEC-RAS é um modelo hidráulico que permite simular o escoamento unidimensional permanente e variável ao longo de um canal natural ou artificial. A topografia do canal e das zonas inundáveis é

METODOLOGIA

caracterizada pelo levantamento topográfico de secções transversais ao longo do troço do rio em estudo. Permite facilmente a integração com SIG.

O HEC-GeoRAS é um conjunto de ferramentas para utilização num ambiente SIG. Fornece uma interface entre o programa ArcGIS e o *software* HEC-RAS. A sua utilização baseia-se especificamente no pré-processamento de dados espaciais para uso no modelo HEC-RAS e tratamento dos resultados do mesmo modelo em ambiente SIG. O processamento da informação do terreno no ArcGIS, utilizando esta ferramenta permite a criação e exportação de ficheiros geométricos para a análise de sistemas de canais. Neste ficheiro constam dados sobre a geometria e atributos dos canais fluviais e respectivos leitos, bem como a localização de eventuais estruturas hidráulicas existentes (HEC, 2012).

A definição das características geométricas e hidráulicas do troço em análise caracteriza-se como o passo mais importante da modelação hidráulica. A informação altimétrica disponível não se mostra suficiente para uma boa modelação hidráulica, pois para a escala disponível do MDT, de 30 metros, não permite uma boa representação morfológica do leito maior e principalmente do leito menor (Calçada, Portela e Matos 2002). Desta forma, recorreu-se à carta militar da zona de Tomar (Carta 310) que foi digitalizada e georeferenciada no programa ArcGIS para a construção de um MDT com maior detalhe. Foram extraídas as curvas de nível assim como os pontos de elevação e, através da ferramenta do ArcGIS *topo to raster*, construiu-se um MDT hidrologicamente mais correcto, a partir do qual foram traçadas as secções transversais no troço do rio Nabão que atravessa a cidade de Tomar com um comprimento de cerca de 10 km.

A informação detalhada da geometria da rede de drenagem é extraída a partir do MDT, o formato do MDT para a preparação dos dados pode ser o de uma Rede Irregular de Triângulos - RIT - ou matricial - GRID. Na determinação de uma RIT que possibilitasse uma definição mais detalhada das superfícies topográficas associadas aos cursos de água, utilizou-se a metodologia descrita nos seguintes passos:

1. Conversão da matriz de cotas do modelo *raster* em superfícies de contorno por utilização das ferramentas do *Spatial Analyst* do ArcGIS. Estas fazem a interpolação dos dados de cada célula.
2. Determinação das linhas de quebra em formato vectorial.
3. Construção da RIT, com a ferramenta *Create TIN*, com linhas de contorno distanciadas de 5 em 5 metros (curvas de nível).

As *layers* necessárias ao modelo hidráulico (*RAS Layers*) são os eixos das linhas de água que constituem a rede de drenagem e as secções transversais. Existe a opção de criar mais *layers*, sejam elas as margens do leito, as linhas que definem o centro de massa do escoamento, uso do solo (para

o valor de coeficiente de rugosidade de *Manning*), pontes, áreas de armazenamento, entre outras. Quanto mais rigorosa for a informação espacial de que se dispõe, mais rigorosos serão os resultados da simulação (HEC, 2012).

Segue-se a descrição do pré-processamento dos dados a partir do Modelo Digital do Terreno (MDT), a preparação dos temas vectoriais (2D e 3D) e a transferência de informação para o programa HEC-RAS, referentes ao troço em estudo do rio Nabão, que corresponde ao troço do rio que atravessa a cidade de Tomar.

Criação das *layers* (RAS layers)

Os dados geométricos necessários à modelação em HEC-RAS contêm informação sobre as secções transversais, margens do rio, estruturas hidráulicas, e outras características físicas do rio principal em estudo. O pré-processamento em SIG passa por atribuir estas mesmas características para posteriormente serem importadas no HEC-RAS. Cada uma das características é armazenada em classes individuais (*feature class*) a que se denominam *RAS Layers*.

Ao criar a primeira *layer* é gerada uma base de dados onde todas as *RAS Layers* criadas irão ser armazenadas. As características essenciais à modelação hidráulica em HEC-RAS são: *Stream Centerline* (rios) e *XS Cut Lines* (secções transversais). Opcionalmente são criadas outras características geométricas como a definição das margens do leito, as linhas que definem o centro de massa do escoamento na linha de água, as linhas que definem as passagens hidráulicas e/ou pontes, entre outras.

Todas as características geométricas possuem atributos associados que são preenchidos com informação proveniente do MDT ou de dados introduzidos com outra informação, como a ocupação e uso do solo. Para a delimitação de algumas características pode ser utilizada informação de apoio, como imagens de satélite, de modo a proceder à localização de certas características como pontes e passagens hidráulicas.

As características geográficas de ocupação e uso do solo também podem servir de auxílio no que diz respeito à extracção dos valores do coeficiente de rugosidade de *Manning*. Para tal, é adicionada a carta de ocupação e uso do solo (CLC 2006), que contém a informação do solo abrangida pelas secções transversais, sendo depois criada uma tabela onde são atribuídos os respectivos valores consoante o código do uso de solo. A correspondência entre os valores de coeficientes de rugosidade e as classes do uso do solo baseou-se em tabelas publicadas por Chow, 1988 e no manual do utilizador do HEC-RAS.

METODOLOGIA

Após a importação dos dados geométricos no programa HEC-RAS, é possível fazer as alterações necessárias, ajustes e completar características das *layers* importadas, tal como criar novos elementos de geometria ou apagar elementos criados em SIG.

O passo seguinte no HEC-RAS consiste na introdução no modelo dos dados relativos ao escoamento. Estes dados são os inerentes aos **caudais de ponta de cheia**, que foram determinados com a modelação hidrológica no programa HEC-HMS, e as **condições de fronteira**, que têm como função estabelecer a altura inicial da água. A condição adoptada consistiu na equação de Manning (*Normal Depth*) que tem como parâmetro o declive médio do troço em estudo, tal como indicado no manual do utilizador (Brunner 2010).

Os dados de escoamento - caudais de ponta de cheia - são inseridos a montante de cada um dos rios do sistema. Pelo menos um valor deve ser inserido para cada rio. Quando um valor é inserido a montante do rio assume-se que se mantém constante até que seja inserido outro valor de escoamento no mesmo rio (junções de rios). A alteração e variação do escoamento pode ser efectuada, indicando as secções transversais onde ocorre essa variação (imediatamente a jusante de pontes, por exemplo).

Para delimitar a zona inundada são calculadas as alturas de água nas secções transversais. Dado a cota de 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.

Por último, procede-se à exportação dos dados geométricos (alturas de água) inseridos na base de dados para o formato XML (*Extensible Markup Language*) e posteriormente para o formato SDF (*Spatial Data File*) de forma a ser importada novamente no SIG e proceder à visualização e análise dos resultados.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O processamento de dados geométricos realizado, segundo a metodologia pela extensão HEC-GeoHMS, possibilitou a observação e extracção de algumas características fisiográficas da bacia hidrográfica criada em ambiente SIG, tais como o declive (Figura 4.1) e o número de escoamento para condições antecedentes de humidade do solo AMC II, estimado a partir da carta do Atlas do Ambiente (Figura 4.2).

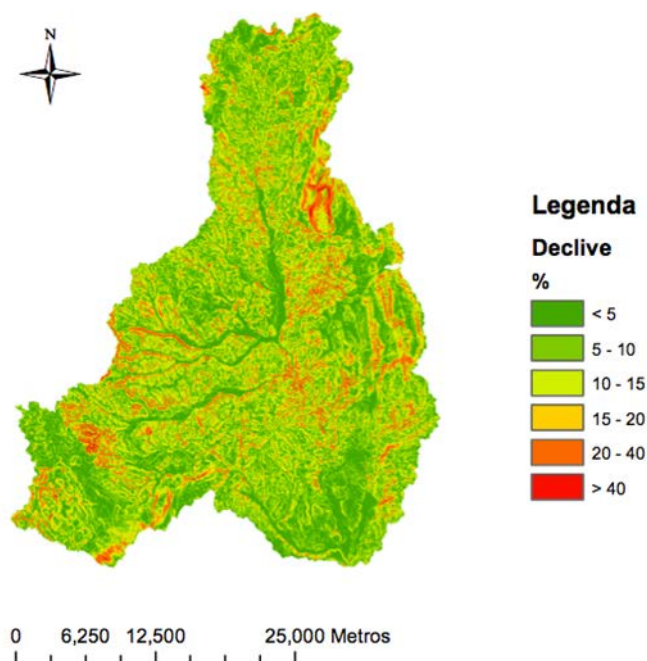


Figura 4.1. Classes de declive

A sobreposição da zona de estudo com a carta de números de escoamento para condições antecedentes AMC II disponibilizada no atlas da água, resultou no mapa da Figura 4.2. A partir deste mapa foi possível calcular a média para a bacia hidrográfica e para as sub-bacias com as secções de referência nas estações hidrométricas do Agroal e da Fábrica da Matrena ($CN_{BHTotal} = 87$, $CN_{Agroal} = 85$, $CN_{FM} = 89$).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

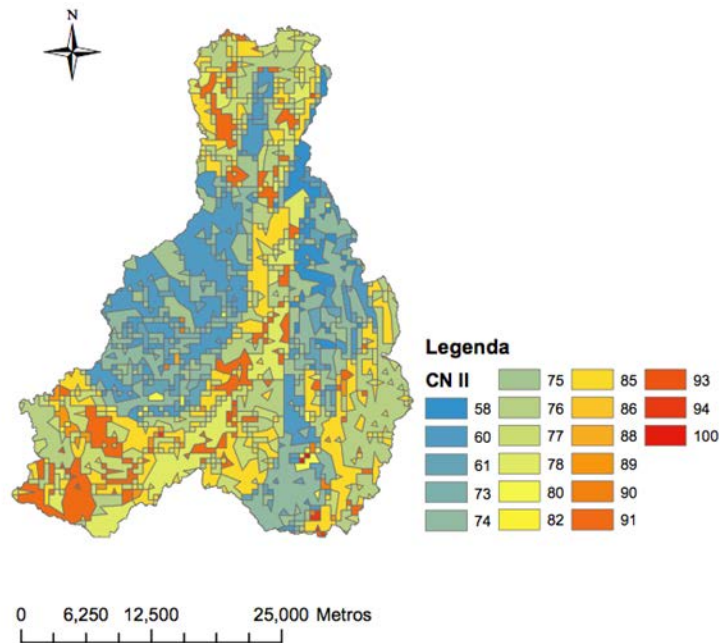


Figura 4.2. Número de escoamento CN (AMC II)

O tempo de concentração da bacia hidrográfica em estudo foi calculado através de três fórmulas empíricas descritas na metodologia. O valor do tempo de concentração da bacia hidrográfica adoptado foi de 18 horas. Para a simulação hidrológica no programa HEC-HMS, visto a bacia hidrográfica estar dividida em duas sub-bacias, foi necessário introduzir os tempos de concentração para a secção da estação hidrométrica do Agroal, como para a secção de referência na Fábrica da Matrena. Estes foram calculados segundo as fórmulas empíricas anteriores e obtiveram-se os tempos de concentração da Tabela 4.1, onde foram adoptados os valores médios como parâmetros de entrada para a modelação hidrológica.

Tabela 4.1. Valores dos tempos de concentração para a bacia hidrográfica e para a sub-bacia inseridos no programa HEC-HMS

Bacias	Giandotti	Temez	Kirpich	Adoptado
Sub-bacia Agroal	16,80	13,18	8,94	13
Bacia hidrográfica				
Fábrica da Matrena	19,30	19,22	13,50	18

Na Tabela 4.2 apresentam-se as características sintetizadas da bacia hidrográfica, a maioria extraída do Modelo Digital do Terreno, em ambiente SIG (ArcGIS):

Tabela 4.2. Principais características da bacia hidrográfica do rio Nabão

CARACTERÍSTICAS	
Área da BH (Km ²)	1024
Altitude Máxima BH (m)	672
Altitude Mínima BH (m)	43
Altitude Média BH (m)	217
Altura Média BH (m)	191
Declive Médio BH (m/m)	0,098
Número de Escoamento (CN II)	74
Número de Escoamento (CN III)	87
Tempo de concentração (h)	18

Na análise estatística das precipitações máximas diárias anuais, as estações meteorológicas com influência na bacia hidrográfica (16) foram sujeitas aos testes de ajustamento do *Qui-quadrado* e de *Kolgomorov - Smirnov* e seleccionaram-se 13 estações onde o ajustamento se mostrou adequado. Assim, pela análise estatística das precipitações máximas, estimaram-se precipitações para cada período de retorno e, através do método dos polígonos de Thiessen, obteve-se a precipitação ponderada da bacia em estudo para cada período de retorno (Tabela 4.3).

A estimativa de precipitações através da análise dos registos de pluviosidade dos postos com influência na bacia hidrográfica que se pretende analisar, conduz a uma estimativa com uma representatividade bastante aceitável na zona de estudo. No entanto, pretendeu-se demonstrar a utilização dos elementos apresentados por Brandão (2001), visto tratar-se de um método com aplicação directa em vários locais em Portugal continental, permitindo assim comparar os resultados obtidos pelos dois métodos (Tabela 4.3). Verificou-se que os dois conjuntos de resultados não apresentaram diferenças significativas, as precipitações escolhidas foram as que se consideram mais representativas do local, logo da análise das séries correspondentes às estações localizadas próximas da zona de estudo.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Tabela 4.3. Precipitações ponderadas da bacia hidrográfica do rio Nabão para os períodos de retorno de 2, 10, 50, 100 e 500 anos

Período de Retorno	BH Nabão (Prec. Ponderada, mm)	IDF Coimbra - altura de precipitação (mm)
2	51,22	52,13
10	75,24	78,50
50	96,31	101,89
100	105,21	111,41
500	125,79	134,37

A partir dos resultados da Tabela 4.3 procedeu-se à construção das curvas de possibilidade udométrica - CPU (para a bacia hidrográfica do rio Nabão) de modo a calcular a intensidade média de precipitação. Para a determinação da intensidade média de precipitação a partir das curvas IDF de Coimbra apenas foi necessário recorrer aos parâmetros apresentados por Brandão (2001). Com estes valores de intensidade média de precipitação foi possível proceder ao cálculo do caudal de ponta de cheia através do método racional (Tabela 4.4) apenas para fins comparativos.

Tabela 4.4. Caudais de cheia estimados pelo método racional

Período de Retorno	Q (m ³ /s) CPU	Q (m ³ /s) IDF
2	187	185,5
10	274,4	279,1
50	351,4	362,3
100	384,4	396,1
500	459	477,7

A análise estatística dos dados hidrométricos das estações de Agroal e da Fábrica da Matrena foi realizada com base na lei de Gumbel, como se descreveu anteriormente. A série de registos da estação hidrométrica do Agroal era demasiado curta para se proceder a uma análise estatística fiável, logo apenas foram estimados os caudais de cheia na estação hidrométrica da Fábrica da Matrena para os períodos de retorno de 2, 10, 50, 100 e 500 anos como se pode verificar na Tabela 4.5.

Tabela 4.5. Caudais de ponta de cheia estimados por análise estatística da série de registos da estação hidrométrica Fábrica da Matrena

Período de Retorno	Q (m ³ /s)
2	134
10	327
50	496
100	568
500	733

A série de registos da estação hidrométrica analisada, como foi referido, mostrou-se demasiado curta pelo que se teve que prolongar esta série com base nas curvas de vazão. Este método de estimação de caudais de ponta de cheia apresenta um rigor inferior ao desejável, principalmente devido à pequena dimensão da série de registos disponível. De seguida procede-se então à análise dos resultados da modelação hidrológica com o programa HEC-HMS.

Modelação Hidrológica

Os resultados das simulações no modelo hidrológico HEC-HMS encontram-se na Tabela 4.6, nomeadamente os valores dos caudais de ponta de cheia em m³/s na secção de referência da bacia hidrográfica. Foi feita a simulação para eventos de precipitação com duração de 24 horas, de modo a garantir que a totalidade da área da bacia hidrográfica contribuía para o escoamento e assim obter valores de caudais para possíveis cenários de cheia. Os resultados apresentados representam a simulação feita para a bacia hidrográfica total e a simulação feita com divisão da bacia.

Tabela 4.6. Caudais de ponta de cheia obtidos no HEC-HMS

Período de Retorno	Caudal de cheia (m ³ /s) (Dividida)	Caudal de cheia (m ³ /s) (Total)
2	209,2	215,4
10	484,5	499,2
50	726,4	734,5
100	810,5	834,2
500	1050,2	1069,8

As diferenças entre os resultados obtidos não são significativas, pelo que se optou por introduzir no modelo hidráulico os valores dos caudais da simulação hidrológica da bacia hidrográfica dividida em

RESULTADOS E DISCUSSÃO

sub-unidades. Esta opção deve-se ao facto de ser permitido analisar, directamente no programa HEC-HMS, o troço do rio Nabão que foi escolhido para a delimitação das zonas inundáveis. Este troço atravessa a cidade de Tomar e situa-se entre a estação hidrométrica do Agroal (montante) e a Fábrica da Matrena (jusante).

Uma limitação da aplicação deste modelo ao caso de estudo diz respeito à distribuição da precipitação, pois na realidade a precipitação terá uma distribuição espacial diferente. Contudo, a simulação tentou estimar os cenários críticos, sendo que o modelo meteorológico reflecte situações extremas de precipitações intensas. De seguida, nas Figuras 4.3, 4.4 e 4.5, apresentam-se os hidrogramas de cheia e respectivos hietogramas resultantes da simulação efectuada, na secção de referência da bacia analisada para os períodos de retorno de 50, 100 e 500 anos.

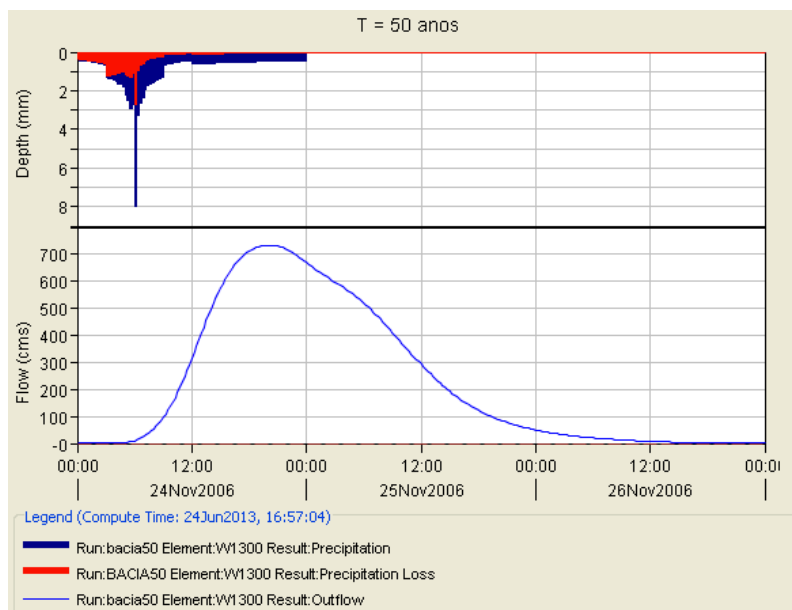


Figura 4.3. Hidrograma de cheia para o período de retorno de 50 anos

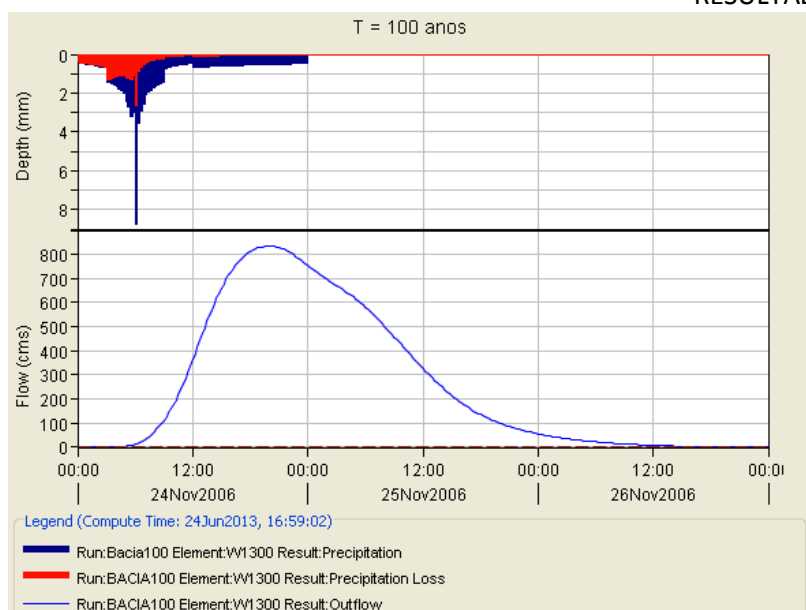


Figura 4.4. Hidrograma de cheia para o período de retorno de 100 anos

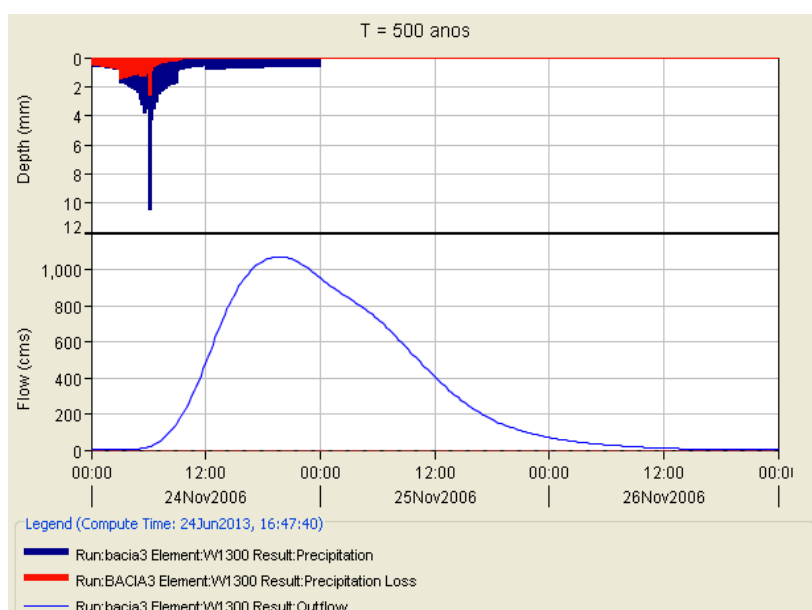


Figura 4.5. Hidrograma de cheia para o período de retorno de 500 anos

Modelação hidráulica

O troço do rio Nabão seleccionado para a delimitação de áreas inundáveis com o modelo HEC-RAS para os períodos de retorno em análise, foi o correspondente ao atravessamento da cidade de Tomar (Figura 4.6). Nesta zona, o rio Nabão atravessa a cidade num percurso de cerca de 10 km. Uma vez que um valor é introduzido a montante do troço, então presume-se que o caudal é constante até que outro valor conflua para esse troço. Os valores de caudais inseridos como dados de entrada no

RESULTADOS E DISCUSSÃO

modelo hidráulico são os obtidos na modelação hidrológica da bacia hidrográfica dividida anteriormente realizada. As condições de fronteira foram estabelecidas com base no declive do troço em estudo, que foi calculado em SIG.

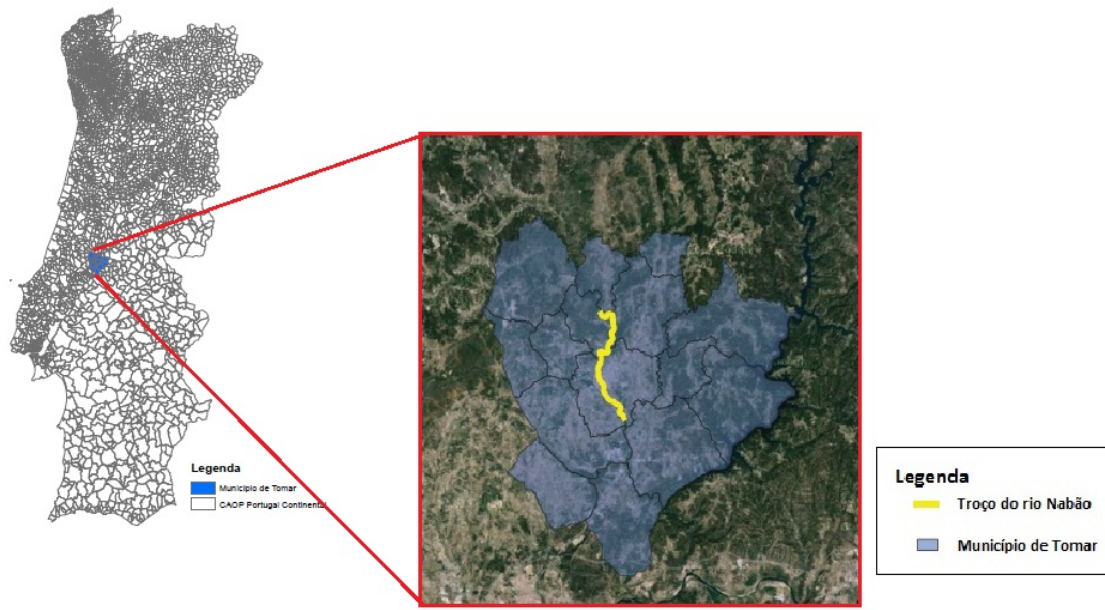


Figura 4.6. Enquadramento do troço analisado no Município de Tomar

A geometria do troço do rio Nabão que foi elaborada no ArcGIS, com a extensão HEC-GeoRAS. Os passos para esta etapa foram seguidos conforme descrito na metodologia. A geometria das secções transversais é fundamental para a análise de escoamento no canal. Para tal, estas são especificadas ao longo do canal e vão caracterizar a capacidade de escoamento e definir as alturas de água para a delimitação das áreas pretendidas. As cotas das secções são extraídas do MDT em que é criado um formato 3D, importado no HEC-RAS. As secções transversais encontram-se na Figura 4.7.

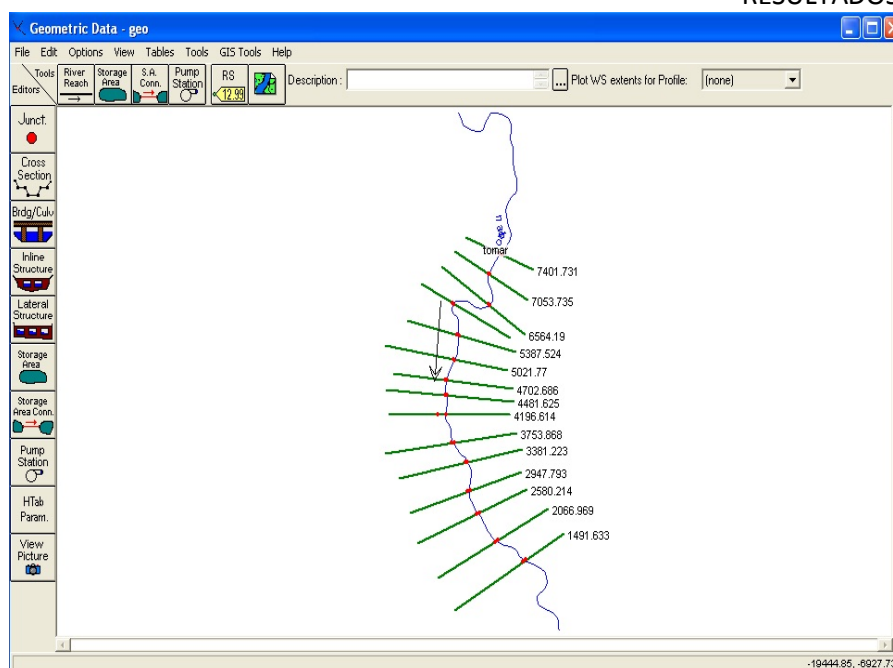


Figura 4.7. Geometria do trecho do rio Nabão em estudo e respectivas secções transversais

As secções transversais criadas apresentam vales acentuados do leito do canal, principalmente na zona mais a jusante. Por observação das imagens de satélite, o terreno encontra-se densamente urbanizado na zona em estudo. Como resultado da utilização de um MDT, os edifícios e estradas não se encontram cotados, o que limitou esta abordagem para a delimitação com maior rigor das áreas inundadas, visto que as alturas de água resultantes da simulação não têm em conta as alterações artificiais do terreno. Em algumas secções observou-se uma inclinação brusca dos vales, o que se justifica pela menor qualidade dos dados geométricos, pois apesar do SIG efectuar interpolações com base em pontos cotados, estas têm sempre incertezas associadas. Esta característica faz com que as áreas inundáveis não se alterem muito, independentemente do valor de caudal inserido, devido à área inundada se encontrar num vale com secções laterais muito verticalizadas, função da resolução vertical do MDT utilizado.

Com o auxílio da extensão HEC-GeoRAS, foi possível criar os mapas de inundação construídos a partir das alturas de água simuladas na modelação hidráulica. Nas Figuras 4.8, 4.9 e 4.10, são apresentadas as áreas de zonas inundáveis obtidas pela modelação hidráulica realizada para três períodos de retorno.

RESULTADOS E DISCUSSÃO



Figura 4.8. Mapa de inundação para um período de retorno de 50 anos



Figura 4.9. Mapa de inundação para um período de retorno de 100 anos



Figura 4.10. Mapa de inundação para um período de retorno de 500 anos

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Verificam-se pequenas diferenças nas áreas obtidas para as três simulações efectuadas, o que se constata nas áreas inundadas para os períodos de retorno de 50, 100 e 500 anos de 1,51 km², 1,57 km² e 1,70 km² respectivamente. A principal, e mais importante, limitação da aplicação da metodologia proposta para este caso de estudo foi o modelo digital de terreno utilizado. Como foi referido, o MDT constitui uma base fundamental tanto para a modelação hidrológica, como para a modelação hidráulica. Nesta última, o MDT adquire especial relevância pelo facto do resultado final depender fortemente da qualidade do MDT. Apesar da construção de um novo modelo a partir da carta militar, este não possuía o detalhe requerido para a delimitação de áreas inundadas com o rigor pretendido.

Pequenas diferenças nas elevações do terreno podem resultar em alterações de áreas inundáveis bastante significativas. Como se demonstrou, o MDT utilizado não será o mais adequado para este tipo de modelação. Na falta de medições no terreno, uma resolução de 10 metros, ou idealmente 5 metros, será a mais adequada e com precisão adequada para estes estudos, pelo que não foi possível executar uma análise detalhada às áreas obtidas assim como às respectivas alturas de água.

Como consequência da resolução insuficiente do MDT, os resultados não conduziram ao detalhe desejado para a determinação de alturas de escoamento ao longo dos cursos de água e para a consequente definição de zonas inundáveis. Assim, os resultados obtidos constituem uma demonstração das potencialidades dos SIG aplicados aos modelos hidrológicos e hidráulicos. Contudo, a metodologia proposta mostra-se bastante robusta para tais análises, desde que se disponha do necessário levantamento de dados topográficos (processo de recolha de dados em campo), para a posterior delimitação de áreas inundáveis, facilitando a integração de SIG e modelos hidráulicos.

5. CONCLUSÕES

A modelação hidrológica e hidráulica cada vez mais se realiza acoplada aos SIG. Com a metodologia proposta neste trabalho verificou-se que a delimitação de áreas inundáveis com recurso a modelos matemáticos integrados, em ambiente SIG, é bastante acessível e necessária. O estudo realizado na bacia hidrográfica do rio Nabão mostrou-se de grande interesse pelo facto de se tratar de uma zona com um historial de cheias de vários anos. Os registos históricos recolhidos levaram à escolha do troço analisado na cidade de Tomar, onde se verificaram os principais eventos de cheias e inundações. Assim, após a recolha dos dados possíveis através dos mais diversos métodos que vão desde a informação bibliográfica, meteorológica, hidrométrica e também fotográfica, foi feito o tratamento e análise dos mesmos, de modo a avaliar o risco de inundação em termos de áreas inundadas.

Como resultado da modelação hidrológica, encontraram-se algumas limitações como a escolha dos períodos de retorno e duração dos eventos de precipitação. No entanto, dispõe-se de elementos suficientes para que se possa realizar a modelação de acordo com os cenários propostos no Decreto-Lei n.º 115/2010 de 22 de Outubro. A principal limitação do desenvolvimento da metodologia proposta para a determinação das áreas inundáveis na cidade de Tomar foi, sem dúvida, a resolução do MDT. No entanto, esta limitação aplica-se a este trabalho pela impossibilidade de adquirir um MDT com a devida resolução, com o qual a metodologia proposta deverá obter os resultados desejados com a devida calibração e ajustes necessários a qualquer bacia hidrográfica do país. A cartografia a utilizar deve ser de escala inferior a 1:10 000 e o mais actualizada possível, com informação detalhada de toda a superfície do terreno.

Assim, as áreas de inundação obtidas com a modelação hidráulica são uma demonstração do potencial destas ferramentas. Com a possibilidade de efectuar levantamentos topográficos em pontos estratégicos do rio, medições de campo e bases cartográficas de elevada qualidade, esta metodologia permitirá a delimitação com elevados níveis de confiança das áreas inundáveis, assim como as zonas inundáveis que as cheias poderão originar.

No decorrer do trabalho, foram assumidos alguns pressupostos no que diz respeito aos métodos utilizados. Mais uma vez, a informação recolhida depende da zona em estudo e da disponibilidade da mesma, pelo que para desenvolver um plano de gestão de riscos de inundações será absolutamente necessário garantir a qualidade dos dados utilizados, com destaque para o MDT.

CONCLUSÕES

Com o desenvolvimento do presente trabalho a ocorrência de erros associados à execução de tarefas em ambientes SIG por principiantes na matéria foi algo que não pôde ser evitado, o que tornou a fase inicial deste trabalho bastante mais longa do que o desejado. Os fóruns e tutoriais tiveram um papel muito importante para ultrapassar algumas dessas dificuldades.

Concluiu-se, que a metodologia apresentada pretende constituir um elemento de suporte à decisão e contribuir para a avaliação e gestão dos riscos de inundações em Portugal, com os devidos aperfeiçoamentos dos dados de entrada. No entanto, corresponde apenas à primeira etapa (a mais demorada) da gestão destes riscos, devendo estar sempre presente a participação pública como auxílio à elaboração destes mapas.

Os estudos hidrológicos e hidráulicos são complexos, na medida em que englobam todo um processo com diferentes vertentes e vários métodos. São, sem dúvida, o elemento mais importante em qualquer estudo de recursos hídricos, o que os torna de elevado interesse e desafiantes. A elaboração de cartas de zonas inundáveis mostrou-se de elevada complexidade, na simples medida de estabelecer critérios e regras para tal determinação. Contudo, pretendeu-se um reconhecimento da importância que suporta a elaboração de tais mapas, e finalmente definir uma proposta de metodologia que, se considera, ser de aplicação relativamente fácil.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANPC. *Autoridade Nacional de Protecção Civil*. 2013. <http://www.proteccaocivil.pt> (acedido em Novembro de 2012).
- ARH Tejo. *Plano de Gestão da Bacia Hidrográfica do Tejo*. Administração da Região Hidrográfica do Tejo, I. P., 2012.
- Brandão, C. “Análise de precipitações intensas - Tese de Mestrado em Hidráulica e Recursos Hídricos.” Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, 1995.
- Brandão, C., R. Rodrigues, e J. da Costa. “Análise de fenómenos extremos de precipitações intensas em Portugal Continental.” Direcção dos Serviços de Recursos Hídricos. Instituto da Água, I. P., 2001.
- Brunner, G. *HEC-RAS, River Analysis System Hydraulic Reference Manual*. USACE, 2010.
- Caetano, M., V. Nunes, e A. Nunes. *CORINE Land Cover 2006 for Continental Portugal*. Relatório técnico, Instituto Geográfico Português, 2009.
- Calçada, M., M. Portela, e J. Matos. “Análises de cheias e delimitação de zonas inundáveis em Timor-Leste: abordagem por modelação geográfica.” *Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos, 7º Congresso da Água*. 2002.
- Chow, V., D. Maidment, e L. Mays. “Applied Hydrology - International Edition.” McGraw-Hill, 1988.
- EEA. *European Environment Agency*. 2012b. <http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/figures/natural-disasters-in-eea-member-1> (acedido em Fevereiro de 2013).
- EEA. *European Waters - current status and future challenges - a synthesis*. European Environment Agency, 2012a.
- EEA. *Floods - vulnerability, risks and management*. Technical Paper, European Environment Agency, 2012c.
- EEA. *Mapping the impacts of natural hazards and technological accidents in Europe - an overview of the last decade*. European Environment Agency, 2010.
- EM-DAT. *The International Disaster Database*. 2013. <http://www.emdat.be/> (acedido em Fevereiro de 2013).
- FBO. *Estudo Hidrológico e Hidráulico do Rio Nabão na Zona de Intervenção do Programa Polis na Cidade de Tomar*. FBO Consultores, 2003.

Error! Reference source not found. Error! Reference source not found.

Ferrão, J. *O ordenamento do território como política pública*. Fundação Calouste Gulbenkian, 2011.

Ferrão, J., e J. Mourato. "Evaluation and spatial planning in Portugal: from legal requirement to source of policy-learning and institutional innovation." In *De la Evaluación Ambiental Estrategica a la Evaluación de Impacto Territorial: reflexiones acerca de la tarea de evaluación*, de J. Dasí, 141 - 166. Universitat de Valencia, 2011.

Fleming, M., e J. Doan. *HEC-GeoHMS Geospatial Hydrological Modeling Extention. User's Manual*. USACE, 2010.

INAG. *Plano Nacional da Água*. Instituto da Água, I.P., 2010a.

IPCC. *Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Intergovernmental Panel on Climate Change, 2007.

IPCC. *Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation*. Intergovernmental Panel on Climate Change, 2012.

Lencastre, A., e F. Franco. *Lições de Hidrologia*. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, 2006.

Lopes, A., e M. Fragoso. "A tempestade de 23 de Dezembro de 2009. Causas meteorológicas e impactes na Região Oeste de Portugal Continental." *Territorium*, 19, 2012: 23-31.

Pato, J. *Valor da água como bem público*. Tese de Doutoramento, Universidade de Lisboa, 2007.

Pereira, S., J. Zêzere, I. Quaresma, J. Verde, I. Fonseca, e E. Reis. "GIS database on hydro-geomorphologic disasters in Portugal (DISASTER Project)." *Actas de la XII Reunión Nacional de Geomorfología*. Santander, 2012. 163-166.

Quaresma, I. *Inventariação e Análise de Eventos Hidro-Geomorfológicos com carácter danoso em Portugal continental*. Tese de Mestrado, Universidade de Lisboa, 2008.

Quintela, A., e M. da Silva. "A modelação hidrológica em Portugal nos últimos 25 anos do século XX, nas perspectivas determinística, probabilística e estocástica." *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 7, 2002.

Rebelo, F. *Riscos Naturais e Acção Antrópica*. Imprensa da Universidade de Coimbra, 2003.

Rocha, J. "O risco das inundações e a sua gestão. Uma visão nacional e uma visão europeia." Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 1998.

- Rocha, J., P. Roebeling, e H. Alves. *O desenvolvimento e a implementação de Planos de Bacia*. Universidade de Aveiro, 2012.
- Santos, S., A. Monteiro, S. Mourato, e P. Fernandez. “Os sistemas de informação geográfica na modelação hidrológica.” *XII Congresso Nacional de Tecnologias de Informação Geográfica*. Granada: El acceso a la información espacial y las nuevas tecnologías geográficas, 2006. 465-479.
- Scharffenberg, W., e M. Fleming. *HEC-HMS Hydrological Modeling System. User's Manual*. USACE, 2010.
- Schmidt, L. “Ambiente e políticas ambientais: escalas e ajustes.” In *Itinerários. A investigação dos 25 anos do ICS*, de M. Cabral, K. Wall, F. Aboim, & F. da Silva, 285-314. Universidade de Lisboa, 2008.
- Silva, M. “Integração de ferramentas de SIG na modelação hidrológica de pequenas bacias hidrográficas - Tese de Mestrado em Engenharia do Ambiente.” Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2009.
- SNIRH. *Atlas da Água*. 2010. <http://geo.snirh.pt/AtlasAgua> (acedido em Dezembro de 2012).
- Tavares, A., A. Andrade, e P. Santos. “Avaliação das áreas inundáveis a partir de registos históricos e paleohidrogeomorfológicos. Aplicação ao ordenamento do município de Soure.” *Actas do VIII Congresso Nacional de Geologia*. 2010.
- Zêzere, J., A. Pereira, e P. Morgado. “Perigos Naturais e Tecnológicos no Território de Portugal Continental.” Centro de Estudos Geográficos, Faculdade de Letras da Universidade de Lisboa, 2006.
- Zêzere, J., S. Pereira, I. Quaresma, P. Santos, e M. Santos. “Desastres de origem hidrogeomorfológica em Portugal Continental no período 1865-2010.” *VI Congresso Nacional de Geomorfologia*. Coimbra, 2013. 124-127.