

LUÍS DIAS¹ FRANK BRAUNSCHWEIG²

NUNO GROSSO³ HUGO COSTA³ PEDRO GARRETT³

GUIA METODOLÓGICO PARA A PRODUÇÃO DE

CARTOGRAFIA DE RISCO DE INUNDAÇÕES

1. Climate Change Impacts Adaptation and Modeling research group – FC-UL. Bolseiro de Doutoramento da Fundação para a Ciência e Tecnologia com a referência SFRH/BD/70435/2010.

2. Action Modulers, Consultores de Segurança S.A. Marine Environment and Technology Center (Maretec) – IST-UL.

3. Climate Change Impacts Adaptation and Modeling research group.

ÍNDICE

- 5 índice de figuras
- 8 índice de tabelas

11 INTRODUÇÃO

15 CONCEITOS

- 16 cheias e inundações
- 16 exposição
- 16 suscetibilidade
- 17 vulnerabilidade
- 17 risco
 - 17 risco de inundações
 - 18 período de retorno
 - 19 hietogramas de projeto
 - 20 modelação hidrológica
 - 21 curvas de dano
 - 22 curvas probabilidade-dano
- 23 cartografia de risco de inundação
 - 24 mapas de áreas inundáveis
 - 24 mapas de perigosidade a inundação
 - 24 mapas de caracterização dos elementos expostos
 - 25 mapa de risco de inundação

27 METODOLOGIA

- 28 dados observados de precipitação
 - 28 obtenção e tratamento de dados meteorológicos
 - 34 obtenção de períodos de retorno
 - 42 definição de hietogramas de projeto
- 46 modelação hidrológica
 - 47 informação necessária
 - 49 resultados a obter
- 50 avaliação de risco de inundação e produção de cartografia
 - 50 informação necessária
 - 53 obtenção e aplicação de curvas de dano
 - 58 cálculo do dano médio anual
 - 62 resultados a obter

69 CONSIDERAÇÕES FINAIS

- 71 agradecimentos

73 BIBLIOGRAFIA

ÍNDICE DE FIGURAS

- 12 **Figura 1.** Frequência de ocorrência de inundações na União Europeia. Fonte: adaptado de Schmidt-Thomé et al. (2006).
- 20 **Figura 2.** Representação esquemática dos modelos 2D e 3D. Fonte: Tranco-so et al. (2009).
- 22 **Figura 3.** Curvas profundidade-dano para os danos tangíveis, diretos, primários. Fonte: adaptado de Markau (2003), Reese et al. (2003), Meyer and Messner (2005) e Sterr et al. (2005)
- 23 **Figura 4.** Exemplo de curva probabilidade-dano relativa à estrutura dos edifícios da Avenida Almirante Reis (Lisboa), obtida através da interpolação linear dos períodos de retorno analisados. Fonte: produção do autor.
- 25 **Figura 5.** Diferentes tipos cartografia relacionada com inundações. Da esquerda para a direita: Mapa de áreas inundáveis, Mapa de perigosidade de inundação, Mapa de exposição a inundações e mapa de risco de inundações. Fonte: produção do autor com recurso a dados da Câmara Municipal de Lisboa e da modelação hidrodinâmica.
- 29 **Figura 6.** Precipitações diárias máximas para os anos hidrográficos entre 1960 e 2000 (estação meteorológica IGIDL). Fonte: produção do autor.
- 35 **Figura 7.** Exemplo da aplicação da função densidade da distribuição de Gumbel para diferentes parâmetros de escala e posição. O exemplo com $\alpha = 13.08$ e $\beta = 47.91$ correspondem aos parâmetros da amostra de máximos anuais de precipitação (ano hidrológico) entre 1961 e 2000 para a estação hidrográfica do IGIDL (Lisboa). Fonte: produção do autor
- 36 **Figura 8.** Exemplo da aplicação da função de probabilidades acumuladas da lei de Gumbel para os diferentes parâmetros apresentados na Figura 18. Fonte: produção do autor.
- 40 **Figura 9.** Ajuste das Leis de Gumbel (Valores extremos tipo I) e Pearson III à amostra máximos anuais de precipitação observada entre 1961 e 2000. Fonte: produção do autor.
- 40 **Figura 10.** Resultado da aplicação da técnica de Monte Carlo para a obtenção de intervalos de confiança nos valores estimados pela aplicação da lei de Gumbel (esquerda) e Pearson III (direita). Nesta figura pode-se observar o maior grau de incerteza associado a uma distribuição de três parâmetros comparativamente a uma de dois. Fonte: produção do autor
- 45 **Figura 11.** Hietograma de blocos alternados (esquerda) e de blocos decrescentes (direita) obtidos através da aplicação da curva IDF para o período de retorno de 100 anos, ajustada à precipitação obtida para o mesmo período de retorno, através da aplicação da lei de Gumbel à amostra de precipitações diárias máximas anuais da estação meteorológica do IGIDL – Lisboa. Fonte: produção do autor.

- 46 **Figura 12.** Hietogramas de blocos alternados para os períodos de retorno de 2, 10, 100 e 500 anos obtidos através da aplicação da curva IDF para os respetivos período de retorno, ajustados à precipitação obtida para os mesmos, através da aplicação da lei de Gumbel à amostra de precipitações diárias máximas anuais da estação meteorológica do IGIDL – Lisboa. Fonte: produção do autor.
- 48 **Figura 13.** Modelo digital de terreno com resolução vertical de 0.001 metros e resolução espacial horizontal de 10 metros - imagem superior (parte central da cidade de Lisboa) e de 5 metros - imagem inferior (zona de Algés). Fonte: produção do autor com recurso a dados da Câmara Municipal de Lisboa, Câmara Municipal de Oeiras e Município I.M., S.A.
- 48 **Figura 14.** Cartas com informação de uso e ocupação do solo. Fonte: produção do autor com recurso a dados da Câmara Municipal de Lisboa e Agencia Europeia do Ambiente.
- 49 **Figura 15.** Cartas de Perigosidade de inundação da bacia da baixa – Avenida Almirante Reis – Avenida da Liberdade. Esquerda - extensão da inundação associada a diferentes probabilidades (períodos de retorno). Direita - profundidade de inundação para o período de retorno de 100 anos. Fonte: produção do autor com recurso a dados da Câmara Municipal de Lisboa e da modelação hidrodinâmica.
- 51 **Figura 16.** Esquema de procedimento metodológico para a avaliação socioeconómica do risco de inundação considerando a população, o valor económico dos elementos expostos e os equipamentos fundamentais e mais vulneráveis em caso de inundação. A azul destaca-se o procedimento abordado neste guia. Fonte: adaptado de Meyer et al. (2009c).
- 52 **Figura 17.** Mapas de elementos expostos. Número de pisos (esquerda) e funções dos edifícios no rés-do-chão (direita), exposto a uma inundação com o período de retorno de 500 anos. Fonte: produção do autor com recurso a dados da Câmara Municipal de Lisboa e da modelação hidrodinâmica.
- 53 **Figura 19.** Curvas profundidade-dano utilizadas no cálculo de risco para a estrutura do edifício (esquerda) e para os seus conteúdos (direita). Fonte: adaptado de Markau (2003) e de Reese et al. (2003).
- 54 **Figura 18.** Esquema metodológico para a avaliação de Risco de inundação com recurso a curvas profundidade-dano. Fonte: adaptado de De Moel and Aerts (2010)
- 56 **Figura 20.** Exemplo da afectação da altura da água ao edifício. A vermelho representa-se um determinado edifício e a azul os pixeis que contêm a altura da água. (a) edifícios sem inundação, (b) edifícios com a grelha onde se encontra armazenada a altura da água, (c) selecção dos pixeis da grelha proximos ao edifício, (d) cálculo da média dos pixeis seleccionados em (c). Fonte: produção do autor.

- 57 **Figura 21.** Seleção dos edifícios com atividades de comércio, serviço, equipamentos e escritórios localizados no rés-do-chão (a). Aplicação da curva de dano relativa aos ativos fixos - comércio, serviços, equipamentos e escritórios localizados no rés-do-chão para a altura da água de uma inundação com período de retorno de 500 anos (b). Fonte: produção do autor com recurso a dados da Câmara Municipal de Lisboa e da modelação hidrodinâmica.
- 58 **Figura 22.** Representação gráfica da média do dano dos ativos fixos não industriais (R/C) para o período de retorno de 500 anos. Fonte: produção do autor.
- 59 **Figura 23.** Cálculo do dano para diferentes períodos de retorno (10, 50 e 100 anos). Fonte: produção do autor com recurso a dados da Câmara Municipal de Lisboa e da modelação hidrodinâmica.
- 59 **Figura 24.** Valores de dano associados a diferentes probabilidades de ocorrência (esquerda) e a sua interpolação para a definição da curva probabilidade-dano dos ativos fixos não industriais – R/C (direita). Ambos os gráficos não têm uma escala linear atribuída ao eixo das abcissas. Fonte: produção do autor.
- 60 **Figura 25.** Curvas probabilidade dano para os ativos fixos não industriais (R/C) localizados na baixa de Lisboa segundo a abordagem (a) – esquerda - e (b) - direita. Ambos os gráficos têm uma escala linear atribuída ao eixo das abcissas. Fonte: produção do autor.
- 61 **Figura 26.** Dano médio anual obtido através da aproximação (a) –esquerda - e (b) – direita – para cada edifício da baixa potencialmente afetado por inundações. Fonte: produção do autor com recurso a dados da Câmara Municipal de Lisboa e da modelação hidrodinâmica.
- 66 **Figura 27.** Agregação da média dos danos médios anuais para os módulos de calculo b (esquerda) e a (direita). Fonte: produção do autor com recurso a dados da Câmara Municipal de Lisboa e da modelação hidrodinâmica.

ÍNDICE DE TABELAS

- 19 **Tabela 1.** Períodos de retorno e probabilidades.
- 19 **Tabela 2.** Parâmetros a e b das curvas IDF para diferentes períodos de retorno e durações relativos a Lisboa (IGIDL). Fonte: Brandão et al. (2001)
- 21 **Tabela 3.** Categorias de dano e exemplos (a azul evidencia-se a categoria de dano estudada).
Fonte: Dutta et. al. (adaptado), 2003.
- 29 **Tabela 4.** Valor da precipitação diárias máximas anual medida na estação meteorológica do IGIDL para os anos hidrológicos entre 1961 e 2000.
- 30 **Tabela 5.** Principais estatísticas descritivas, respetivas fórmulas e valores obtidos como resultado da análise da amostra apresentada na Tabela 4.
- 31 **Tabela 6.** Parâmetros necessários à realização do teste não paramétrico do número de inflexões e respetivos valores da amostra em análise. Neste caso não se pode rejeitar a hipótese de aleatoriedade da amostra para um nível de significância de 0.05 (ou um nível de confiança de 0.95).
- 32 **Tabela 7.** Parâmetros necessários à realização do teste não paramétrico de Independência e respetivos valores da amostra em análise. Para essa amostra e com um nível de confiança de 95%, não se pode rejeitar a hipótese de independência.
- 33 **Tabela 8.** Parâmetros necessários à realização do teste não paramétrico de homogeneidade e respetivos valores da amostra em análise. Neste caso não se pode rejeitar a hipótese de homogeneidade da amostra para um nível de confiança de 95%.
- 34 **Tabela 9.** Parâmetros necessários à realização do teste não paramétrico de estacionariedade e respetivos valores da amostra em análise. Neste caso não se pode rejeitar a hipótese de estacionariedade da amostra para um nível de confiança de 95%.
- 38 **Tabela 10.** Resultados obtidos através da utilização dos fatores de probabilidade da distribuição de Gumbel e Pearson III de diferentes quantis.
- 41 **Tabela 11.** Valores dos períodos de retorno obtidos com a aplicação da lei de Gumbel e Pearson III e respetivos valores inferiores e superiores do intervalo de confiança de 95% resultantes da aplicação do método de Monte Carlo. Nesta tabela é possível verificar-se uma maior amplitude entre os limites inferiores e superiores do intervalo de confiança resultante da aplicação da lei Pearson III comparativamente com a lei de Gumbel.
- 43 **Tabela 12.** Dados necessários e resultado do cálculo do tempo de concentração da bacia em estudo, segundo a fórmula de Temez.
- 45 **Tabela 13.** Aplicação da curva IDF relativa ao período de retorno de 10 anos definida por Brandão et al. (2001) para a estação do IGIDL em Lisboa, ao período de retorno de 10 anos de precipitação (77.1 mm) obtido através do ajuste da lei de Gumbel (Tabela 11) para a amostra de valores de precipitação diária máxima anual (Tabela 4).
- 52 **Tabela 14.** Elementos levantados relativos à caracterização e ocupação dos diferentes edifícios expostos na bacia em estudo. Os elementos relacionados com a ocupação do edifício foram recolhidos tanto para o rés-do-chão como para a cave. Este levantamento é necessariamente georreferenciado e armazenado num SIG.
- 55 **Tabela 15.** Expressões matemáticas utilizadas em cada categoria de dano na avaliação de risco, onde y corresponde ao dano causado em percentagem e x à altura da água. Fonte: adaptado de Markau (2003) e de Reese et al. (2003).
- 56 **Tabela 16.** Função de dano para o cálculo de risco dos ativos fixos não industriais (R/C).
- 60 **Tabela 17.** Exemplo de cálculo necessário para a obtenção do dano médio anual dos ativos fixos não industriais (R/C), aplicada à abordagem (a). Os valores apresentados encontram-se arredondados à segunda casa decimal.
- 63 **Tabela 18.** Resultado do cálculo do dano médio anual para as diferentes categorias de dano aplicadas a parte bacia em avaliação. São mostrados os valores para a totalidade da bacia e desagregado por áreas (Baixa, Av. Liberdade, Av. Almirante Reis). Na coluna referente ao dano o primeiro valor apresentado, para uma determinada categoria, foi obtido através da abordagem (b) e o segundo através da abordagem (a). Os valores de dano médio anual encontram-se arredondados à segunda casa decimal.
- 64 **Tabela 19.** Matriz de inquérito a preencher para a aplicação do pairwise comparison method. Fonte: adaptado de Malczewski (1999)
- 64 **Tabela 20.** Matriz preenchida com o resultado de 12 inquéritos realizados a peritos na área de seguros de inundações.
- 65 **Tabela 21.** Matriz de procedimentos para o cálculos dos pesos a atribuir a cada categoria de dano, com o objetivo da construção de um único mapa ou indicador que reflita o risco global de uma área. O valor n corresponde ao número de inquéritos realizados. Fonte: adaptado de Malczewski (1999)
- 65 **Tabela 22.** Matriz de cálculo dos pesos das categorias de dano com base nos 12 inquéritos realizados. Os valores apresentados encontram-se arredondados à terceira casa decimal.
- 66 **Tabela 23.** Cálculo do risco agregado dos danos médios anuais obtidos para a área da baixa de Lisboa com recurso à abordagem (a). O valor de dano médio anual da estrutura do edificado é igual ao valor apresentado na Tabela 17 para esta abordagem. Os restantes valores foram calculados com recurso a um SIG conforme descrito anteriormente. Os valores de apresentados encontram-se arredondados à terceira casa decimal.
- 66 **Tabela 24.** Resultado do risco agregado para o total da bacia em estudo e para três áreas contidas nessa bacia. Conclui-se através desta tabela que a área com maior risco é a Avenida da Liberdade. Os valores apresentados encontram-se arredondados à segunda casa decimal.



INTRODUÇÃO

*"Água, tomada em moderação,
não faz mal a ninguém."*

Mark Twain

As inundações fazem parte dos vários riscos naturais a que a sociedade contemporânea está exposta, sendo um dos principais fenómenos responsáveis por perdas humanas, económicas e ambientais no contexto mundial (Schmidt-Thomé et al., 2006, EEA et al., 2008). Estas são responsáveis por um terço das perdas económicas como resultado de catástrofes naturais na Europa, sendo o evento mais frequente, juntamente com as tempestades de vento neste território (EEA et al., 2008).

Com a crescente consciencialização dos perigos e danos associados em consonância com o aumento da magnitude e do número de fenómenos extremos de precipitação (Bladé et al., 2010, Kharin et al., 2007, Santos and Miranda, 2006, Dias, 2013, Vicente-Serrano et al., 2011), é necessário aprofundar-se o conhecimento científico neste contexto interdisciplinar onde se incluem as alterações climáticas (Pall et al., 2011, Min et al., 2011, IPCC, 2013, IPCC, 2012), a avaliação de risco e a criação de estratégias de adaptação para a criação de sistemas mais resilientes a estes fenómenos.

Estas preocupações têm também, e de forma crescente, reflexo no sector dos seguros verificando-se um investimento cada vez mais considerável por parte deste

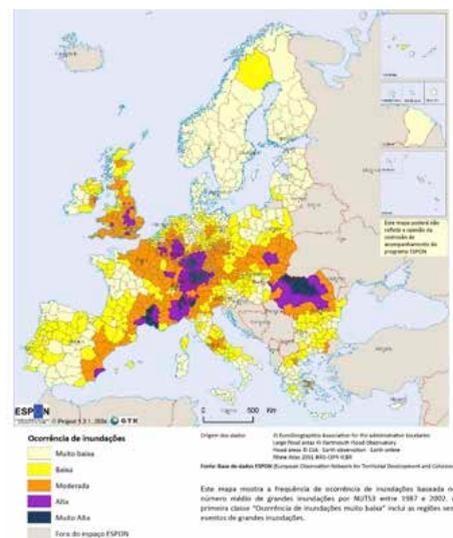


Figura 1. Frequência de ocorrência de inundações na União Europeia. Fonte: adaptado de Schmidt-Thomé et al. (2006).

sector na avaliação e controlo do risco de inundações (e.g. Leurig and Dlugolecki, 2013, Kron, 2005, Thieken et al., 2006).

É neste contexto que surge o projeto de investigação “*Cartas de Inundações e de Risco em Cenários de Alterações Climáticas*” (CIRAC) em parceria entre a Associação Portuguesa de Seguradoras e o grupo de investigação *Climate Change Impacts Adaptation and Modelling* (CCIAM) da Faculdade de Ciências da Universidade de

Lisboa. Este documento foi desenvolvido no âmbito deste projeto e é parte integrante de uma tese de Doutoramento em desenvolvimento com o título Provisório “As alterações climáticas, as inundações e a cidade. Contributos para o estudo da resiliência urbana em situações de chuva torrencial”.

Os resultados da modelação hidrológica apresentados ao longo deste documento foram igualmente obtidos no âmbito do projeto CIRAC, numa parceria entre a empresa Action Modulers S.A e o CCIAM, utilizando uma versão integrada dos programas MOHID Land e Storm Water Management Model.

O objetivo deste documento consiste na apresentação de uma metodologia que permita a quantificação do risco de inundação associado ao ambiente construído materializado nos edifícios. Existem no entanto especificidades que condicionam as metodologias de análise, nomeadamente a dimensão da bacia e o tipo de inundação que aí ocorre. Não sendo possível tratar a totalidade dos casos, a abordagem que aqui se apresenta centra-se nas cheias rápidas em bacias de pequena dimensão. A metodologia proposta pode ser utilizada para a avaliação do risco de inundação em cenários de alterações climáticas.

No entanto e devido à complexidade de procedimentos necessários para obtenção de dados de precipitações extremas resultantes dos modelos que realizam esses cenários, optou-se por não incluir este processo neste guia.

A primeira parte deste documento dedica-se aos conceitos fundamentais nos temas relacionados com a avaliação de risco de inundações, cujo domínio é fundamental para a compreensão do restante conteúdo do documento.

A segunda parte apresenta os procedimentos metodológicos para a avaliação de risco de inundação. Esta avaliação é iniciada com os processos necessários para a definição de probabilidades de ocorrência associadas aos fenómenos de inundações, abordando-se seguidamente estratégias que visam a otimização da modelação hidrodinâmica para a obtenção de áreas inundáveis e outras características da inundação. Por fim é proposto um método de quantificação do risco de inundações baseado no dano medio anual para diferentes categorias de dano. Nesta última parte ainda é proposto a integração das diferentes categorias de dano num único indicador com o objetivo de se proceder a uma leitura global do risco a que uma determinada área está exposta.



CONCEITOS

*"Por vezes esquecemos que o ciclo da água
e o ciclo da vida são apenas um."*

Jacques Yves Cousteau

cheias e inundações

As cheias consistem no transbordo de um curso de água relativamente ao seu leito natural, podendo ser lentas ou rápidas. As cheias lentas resultam de precipitações consideráveis com uma duração de vários dias ou semanas, enquanto as cheias rápidas ocorrem como resultado de precipitações extremas e normalmente de curta duração. As inundações, para além de englobarem as cheias, incluem também a submersão de terrenos como resultado da subida dos lençóis freáticos ou da sobrecarga dos sistemas de drenagem (Julião et al., 2009).

Segundo a Diretiva Comunitária 2007/60/CE relativa à avaliação e gestão dos riscos de inundações e entretanto transposta para o regime jurídico nacional, a inundação é definida como a “cobertura temporária por água de uma terra normalmente não coberta por água”, onde se “inclui as cheias ocasionadas pelos rios, pelas torrentes de montanha e pelos cursos de água efémeros mediterrânicos, e as inundações ocasionadas pelo mar nas zonas costeiras” podendo-se “excluir as inundações com origem em redes de esgotos”. Esta definição é concretizada para a realidade nacional através do Decreto-Lei nº 115/2010, onde a inundação compreende a “cobertura temporária por água de uma parcela do terreno fora do leito normal, resultante de cheias provocadas por fenómenos naturais como a precipitação, incrementando o caudal dos rios, torrentes de montanha e cursos de água efémeros correspondendo estas a cheias fluviais, ou

de sobrelevação do nível das águas do mar nas zonas costeiras”.

exposição

A exposição consiste na presença de pessoas, bens ou outros elementos potencialmente sujeitos a danos em áreas onde a inundação ocorre (ver e.g. UNISDR, 2004, UNISDR, 2009, SEC, 2010), podendo ser quantificada pelo número ou valor dos elementos que se encontram dentro dessa área (Merz et al., 2007). Desta forma, um determinado elemento muito frágil a inundações mas que não se encontre exposto a esse fenómeno, terá sempre um risco nulo (Bruijn et al., 2009).

suscetibilidade

No contexto de um estudo relacionado com cheias e inundações, o conceito de suscetibilidade tem várias interpretações. Para alguns autores a suscetibilidade resume-se à predisposição de uma determinada área para ser afetada por estes fenómenos. Esta avaliação tem em conta fatores físicos do terreno, não integrando a probabilidade de ocorrência de inundações (Julião et al., 2009).

Com maior relevância para a avaliação de risco de inundações, o conceito de suscetibilidade é também aplicado aos elementos afetados por uma inundação. Neste caso o conceito refere-se ao processo de geração de dano, estando dependente de uma ou mais características da inundação e da constituição dos elementos afetados (Schanze, 2006).

vulnerabilidade

O termo vulnerabilidade refere-se às características que definem a maior ou menor capacidade de um elemento (população ou ativo) resistir quando exposto a um evento de inundação (Schanze, 2006). A vulnerabilidade compreende a suscetibilidade, a exposição e o valor dos elementos (EXCIMAP, 2007), podendo ser expressa nos efeitos tangíveis, intangíveis, diretos e indiretos causados sobre o elemento ou conjunto de elementos em análise (Dutta et al., 2003).

risco

O risco é definido de forma genérica como a probabilidade de ocorrência de consequências ou perdas danosas (morte, ferimentos, bens, meios de produção, interrupções nas atividades económicas ou impactos ambientais) que resultam da interação entre o meio natural ou dos perigos induzido pelo homem e as condições de vulnerabilidade dos elementos (UNISDR, 2004, ISO 31010, 2009).

risco de inundações

O conceito de risco de inundações encontra-se formalmente definido tanto nas normas europeias como nas nacionais consistindo, segundo a Decreto-lei nº 115/2010 que estabelece um quadro para a avaliação e gestão dos riscos de inundações, na “combinação da probabilidade de inundações, tendo em conta a sua magnitude, e das suas potenciais consequências prejudiciais para a saúde humana, o ambiente, o património cultural, as infraestruturas e

as atividades económicas, sendo as suas consequências prejudiciais avaliadas através da identificação do número e tipo de atividade afetada, podendo por vezes ser apoiada numa análise quantitativa.” Ou seja, é necessário analisar-se as inundações com recurso a diferentes probabilidades de ocorrência, efetuar-se a caracterização dos elementos expostos e, sempre que se verificar relevante, proceder-se à efetiva quantificação do risco de inundações.

O cálculo do risco de inundações está bastante estabilizado na literatura, consistindo no produto entre a consequência da inundação e a sua probabilidade de ocorrência (UNISDR, 2004, Meyer et al., 2009c, Gouldby and Samuels, 2005).

$$\text{Risco} = \text{Consequência} \times \text{Probabilidade} \quad (1)$$

A Probabilidade reflete a frequência que um evento com uma determinada magnitude ocorre. Quando se avalia o risco de inundação este conceito é normalmente traduzido pelo período de retorno, que corresponde ao valor inverso da probabilidade de ocorrência e equivale ao número médio de anos entre dois eventos de igual magnitude.

A Consequência é definida de diferentes formas por diferentes autores, consistindo nas adversidades potenciais decorrentes da inundação e tendo em atenção os fatores de vulnerabilidade dos elementos e magnitude dos eventos (Kron, 2005, UNISDR, 2004, EXCIMAP, 2007).

Tomando como exemplo a abordagem que o *International Strategy for Disaster Reduction* das Nações Unidas utiliza para calcular o Risco, as consequências são avaliadas através da equação (2).

$$\text{Consequência} = \text{Valor} \times \text{Suscetibilidade (magnitude)} \times \text{Exposição} \quad (2)$$

Onde o Valor dos elementos é normalmente expresso em unidades monetárias ou no número de vidas humanas;

A Suscetibilidade, como referido anteriormente, expressa a geração de dano que varia com as características da inundação (magnitude do evento), podendo se situar no intervalo entre 0% (não suscetível) e 100% (suscetibilidade máxima);

E a Exposição corresponde à presença ou ausência do elemento na altura do evento, sendo um parâmetro binário que pode assumir o valor de 0 (não exposto) ou 1 (exposto).

Os critérios de Valor, Suscetibilidade e Exposição são parâmetros de vulnerabilidade dos elementos e a magnitude é uma característica da inundação que tem como consequência o dano em potencial que um determinado evento pode causar. A relação entre a suscetibilidade e a magnitude do evento é normalmente expressa através de curvas de dano para efeitos do cálculo do risco. Estas relações são fundamentais no processo de quantificação do risco de inundações, sendo um tema desenvolvido ao longo deste trabalhoⁱ.

Como referido, a teorização do risco pode ser apresentado de diferentes formas, sendo exemplo a formulação apresentada pela Comissão Europeia nas suas orientações sobre a avaliação e mapeamento do risco (ver SEC, 2010). Neste documento o

ⁱ ver por exemplo a secção Curvas de dano

risco é definido como a função do produto entre a probabilidade, a exposição e a vulnerabilidade.

$$\text{Risco} = \text{Probabilidade} \times \text{Exposição} \times \text{Vulnerabilidade} \quad (3)$$

Neste caso a Exposição e a Vulnerabilidade são parâmetros que definem a Consequência à imagem do ilustrado na função (1), variando o conceito de vulnerabilidade do anteriormente apresentado, uma vez que exclui da sua formulação a exposição, contendo no entanto tanto o valor como a suscetibilidade.

Ambas as formas de contabilizar o risco apresentadas permitem chegar aos mesmos resultados, embora com diferenças nos passos de cálculos. Neste guia adotou-se a abordagem das Nações Unidas com pequenas modificações discutidas posteriormente.

período de retorno

O período de retorno consiste na probabilidade de repetição de uma inundação com uma determinada magnitude, sendo geralmente definido pelo número médio em anos entre a ocorrência de dois eventos sucessivos com uma magnitude idêntica (Andrade et al., 2006). Os períodos de retorno, que traduzem uma probabilidade de ocorrência, relacionam-se com a probabilidade de excedência obtida através da equação (4), onde p é a probabilidade de excedência e T o tempo, que normalmente é definido em anos.

$$p = \frac{1}{T} \quad (4)$$

Tabela 1. Períodos de retorno e probabilidades.

Período de retorno em anos	2	5	10	20	50	100	500
Probabilidade de excedência	0.5	0.2	0.1	0.05	0.02	0.01	0.002
Probabilidade de não excedência	0.5	0.8	0.9	0.95	0.98	0.99	0.998

Neste contexto a probabilidade de excedência está diretamente relacionada com a probabilidade que um evento de uma determinada magnitude tem em ser excedido. Com significado inverso pode também ser obtida a probabilidade de não excedência, sendo calculado através da equação (5) onde p e T correspondem respetivamente à probabilidade e ao tempo.

$$p = 1 - \frac{1}{T} \quad (5)$$

Na Tabela 1 são apresentados os períodos de retorno mais habituais nos estudos hidrológicos e respetivas probabilidades.

hietogramas de projeto

Os Hietogramas de projeto descrevem como a precipitação de um dado evento poderá estar distribuída ao longo do tempo. Para a sua realização são utilizadas curvas de intensidade-duração-frequência

(IDF) que caracterizam a relação entre a intensidade de precipitações e a duração para uma determinada frequência, sendo esta definida pelo período de retorno. Esta caracterização encontra-se publicada por Brandão et al. (2001) para 27 estações meteorológicas udométricas de Portugal continental onde são definidos os parâmetros necessários para a definição destes hietogramas para precipitações com diferentes durações e períodos de retorno. Brandão et al. (2001) verificaram que as curvas do tipo potencial são as que melhor se ajustam na relação entre a intensidade e a duração para um determinado período de retorno em Portugal continental. Na equação (6) é apresentada a formulação teórica da equação desta curva, onde I descreve a intensidade definida em milímetros/hora, D a duração em minutos, e a e b são parâmetros da curva IDF.

$$I = aD^b \quad (6)$$

Tabela 2. Parâmetros a e b das curvas IDF para diferentes períodos de retorno e durações relativos a Lisboa (IGIDL). Fonte: Brandão et al. (2001)

Período de retorno (anos)	2		5		10		20		50		100		500	
	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b
De 5 a 30 minutos	176.46	-0.529	214.32	-0.499	239.69	-0.486	264.16	-0.477	295.96	-0.467	319.86	-0.461	375.21	-0.451
De 30 min. a 6 horas	251.82	-0.628	345.32	-0.634	407.36	-0.637	466.92	-0.639	544.07	-0.641	601.92	-0.642	735.65	-0.644
De 6 a 48 horas	362.78	-0.698	545.58	-0.721	670.81	-0.732	792.97	-0.739	953.23	-0.747	1074.5	-0.752	1357.3	-0.76

Estes autores verificaram também quebras nas intensidades de precipitação para diferentes durações. Estas resultam de diferentes processos meteorológicos que estão na sua origem. Desta forma são definidos três trechos (duração de 5 a 30 minutos, de 30 minutos a 6 horas, de 6 a 48 horas) para as curvas IDF relativas a um determinado período de retorno para uma dada estação meteorológica.

Na Tabela 2 são apresentados os parâmetros das curvas IDF para o posto meteorológico do Instituto Geofísico do Infante D. Luís (IGIDL), localizado no jardim botânico da Faculdade de Ciências em Lisboa.

modelação hidrológica

Os modelos hidrológicos consistem na representação simplificada de parte do ciclo hidrológico. O seu objetivo consiste na simulação de uma determinada realidade para efeitos de previsão ou compreensão do seu comportamento. Estes modelos necessitam de informações relativas à precipitação e escoamentoⁱⁱ para a área em estudo que corresponde normalmente a uma bacia ou sub-bacias hidrográficas. Os modelos hidrológicos resolvem o balanço de água para cada célula de uma dada grelha, para cada período de tempo e para cada trecho da linha de

ⁱⁱ Caso estes valores não existam, poderão ser extrapolados através de técnicas de regionalização.

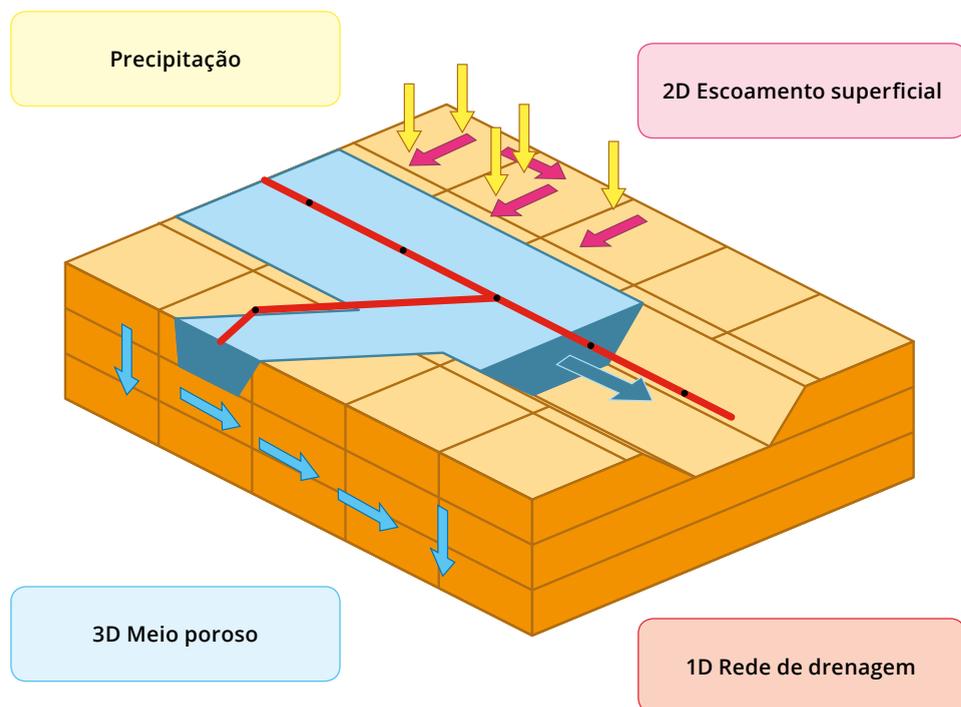


Figura 2. Representação esquemática dos modelos 2D e 3D. Fonte: Trancoso et al. (2009).

água. Utilizando estes métodos e para executar mapas de risco de inundações, é necessário transformar os valores de descarga em níveis de inundação. Existem algumas soluções para esta finalidade, sendo exemplo os modelos hidrodinâmicos 1D, 2D e 3D (EXCIMAP, 2007).

Os modelos 1D são tipicamente usados para modelar os canais dos rios ou as redes de drenagem urbanas. Este tipo de modelos descreve a variação de uma determinada variável (por exemplo fluxo de água ou concentração de sedimentos) numa única direção horizontal (x ou y). Os modelos 2D modelam variáveis nas duas dimensões horizontais (x, y). Estes modelos calculam a velocidade de fluxos, a propagação, a duração e a subida do nível da água. Por último, os modelos 3D calculam as variáveis em análise tanto nas dimensões horizontais como na vertical (x, y, z) - Figura 2. Estes modelos são úteis para modelar inundações em bacias onde o solo tem características diferenciadas na vertical e que possam influenciar o fenómeno de inundação em estudo (MRC/WUP-FIN, 2008, Trancoso et al., 2009).

curvas de dano

As curvas de dano consistem em expressões matemáticas que relacionam uma

característica da inundação (e.g. profundidade, velocidade, duração, etc.) com o dano potencialmente causado por essa mesma característica nos elementos expostos. Ou seja, estas curvas representam a suscetibilidade dos elementos expostos como resultado da magnitude do evento de inundação.

As curvas de dano são habitualmente obtidas com recurso a informações de perdas causadas por inundações com determinadas características observadas no passado. Existem, no entanto, outras formas de as obter nomeadamente em testes de resistência de materiais em laboratórios, ou recorrendo-se a peritos para a sua formulação empírica (Dutta et al., 2003, EXCIMAP, 2007, Schanze et al., 2006).

A relação entre magnitude do evento e suscetibilidade dos elementos expostos está presente nas diferentes categorias de dano que resultam de um evento de inundação. As principais categorias de dano são divididas em prejuízos tangíveis e intangíveis. Os danos tangíveis podem ser expressos através de valores monetários ou percentagem de dano e subdividem-se em duas subcategorias: os danos diretos e indiretos (Tabela 3). Destas, os danos tangíveis diretos primários, serão aqueles cuja abordagem será mais aprofundada neste guia.

Tabela 3. Categorias de dano e exemplos (a azul evidencia-se a categoria de dano estudada).

Fonte: Dutta et. al. (adaptado), 2003.

CLASSIFICAÇÃO		EXEMPLOS	
Tangíveis	Diretos	Primários	Estruturas, bens e stocks
		Secundários	Recuperação ambiental
	Indiretos	Primários	Interrupção da produção
		Secundários	Impactos na economia regional e nacional
Intangíveis			População - Saúde e danos psicológicos

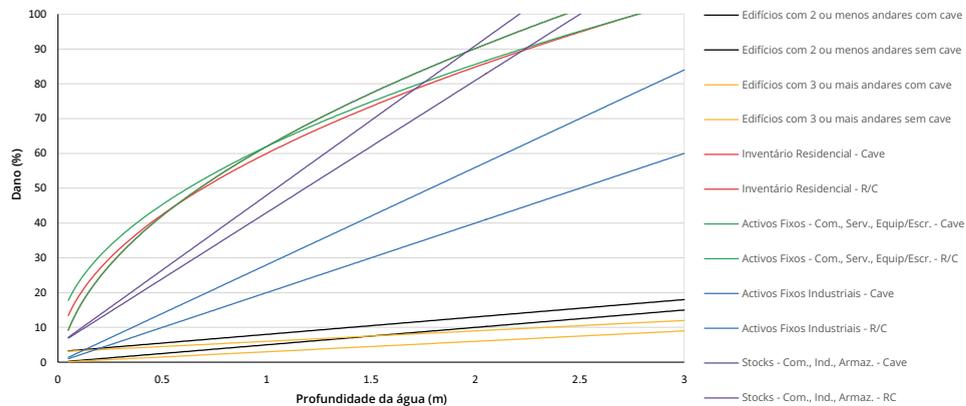


Figura 3. Curvas profundidade-dano para os danos tangíveis, diretos, primários. Fonte: adaptado de Markau (2003), Reese et al. (2003), Meyer and Messner (2005) e Sterr et al. (2005)

Na Figura 3 são apresentadas as curvas de dano adotadas neste trabalho para a avaliação de risco. Estas curvas relacionam a profundidade da inundação com os danos tangíveis diretos primários, estando divididos em estrutura do edifício, inventário residencial, ativos fixos e stocks.

curvas probabilidade-dano

A avaliação do risco com recurso a curvas que relacionam a probabilidade de excedência das perdas, ou o período de retorno com o respetivo dano, são de particular importância pois permitem a estratificação do risco e a definição de estratégias para a sua redução (IPCC, 2012). A utilização destas curvas permite obter o dano médio anual de uma determinada área ou elemento exposto (Meyer et al., 2009b).

Quando se calcula o dano para uma probabilidade de excedência (P_i), obtêm-se apenas os valores do dano (D) para um episódio de inundação com uma determinada característica. Este cálculo representa um ponto da curva probabilidade-dano

correspondendo ao risco para esse período de retorno após a aplicação da fórmula apresentada na equa o (1). Com a realização deste cálculo para diferentes períodos de retorno obtemos diferentes pontos da curva que, através do ajuste de uma função (por exemplo polinomial, exponencial, etc.) a esses pontos ou da sua interpolação linear, resultam na curva probabilidade-dano.

A área abaixo dessa curva dá-nos o dano médio anual dos elementos expostos na área em estudo. O cálculo desta área pode ser obtido de diferentes formas como através do cálculo do integral da função que descreve a curvaⁱⁱⁱ, sendo no entanto mais habitual proceder-se à aproximação dessa área, recorrendo-se às fórmulas (7) e (8) onde \bar{D} corresponde ao dano médio anual ou risco, (D_i) ao dano médio de dois pontos conhecidos da curva e $\Delta P = |P_i - P_{i-1}|$ à probabilidade do intervalo entre esses dois pontos (Meyer et al., 2009a)

iii Para se calcular o integral da curva representada na Figura 4 é necessário transformar-se o eixo das ordenadas para uma escala linear.

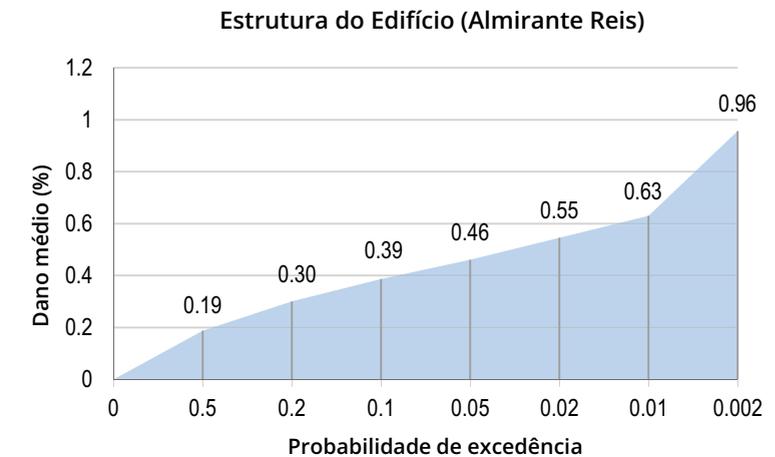


Figura 4. Exemplo de curva probabilidade-dano relativa à estrutura dos edifícios da Avenida Almirante Reis (Lisboa), obtida através da interpolação linear dos períodos de retorno analisados. Fonte: produção do autor.

$$\bar{D} = \sum_{i=1}^K D[i] \times \Delta P_i \quad (7)$$

$$D[i] = \frac{D(P_{i-1}) + D(P_i)}{2} \quad (8)$$

A curva probabilidade dano terá uma menor incerteza associada quanto maior for o número de períodos de retorno analisados uma vez que se assume que os danos apresentam um comportamento linear entre dois pontos da curva conhecidos. Normalmente verifica-se uma sobrestimação dos danos quando se compara uma curva obtida através da análise de seis períodos de retorno (e.g. 2, 5, 10, 20, 50, 100 anos) com outra onde os danos são contabilizados para todos os período de retorno entre o ano 1 e o ano 100 (e.g. 1, 2, 3, ..., 98, 99, 100 anos). No entanto, a diminuic o da incerteza destas curvas encontra-se limitada pelo tempo de processamento necessário para a obtenção da informação de danos para a quantidade de períodos de retorno analisados, e pela

capacidade dos modelos hidrológicos em produzirem o detalhe necessário para diferenças de precipitações tão baixas associadas a esses períodos de retorno (Ward et al., 2011).

cartografia de risco de inundação

A cartografia de risco de inundações engloba a representação geográfica das características das inundações, dos elementos expostos e o resultado da avaliação de risco desses elementos segundo vários critérios. O objetivo desta cartografia consiste na diferenciação dos diferentes elementos segundo o maior ou menor risco associado às inundações, resultando numa ferramenta fundamental para a sua gestão e planeamento de medidas mitigadoras ou de adaptação a este fenómeno. Esta cartografia engloba os mapas de áreas inundáveis, os mapas de

suscetibilidade, de elementos expostos e de risco de inundações, entre outras.

mapas de áreas inundáveis

Os mapas de áreas inundáveis consistem na delimitação geográfica das áreas que poderão ser afetadas por inundações de acordo com uma ou várias probabilidades. Estes são os mapas mais comuns dentro desta temática e podem apresentar as inundações desagregadas pelas diferentes probabilidades ou agregadas por diferentes níveis qualitativos de inundações: i) inundações com baixa probabilidade (e.g. período de retorno superior a 100 anos); ii) inundações com probabilidade moderada (e.g. com um períodos de retorno igual ou inferior a 100 anos e superior a 50 anos) e iii) inundações de alta probabilidade (e.g. período de retorno inferior a 50 anos) (EXCIMAP, 2007). Embora a agregação da informação em níveis qualitativos seja de melhor compreensão para a comunidade em geral, a sua utilidade é reduzida para a quantificação do risco de inundações.

mapas de perigosidade a inundações

A cartografia de perigosidade representa a delimitação de áreas onde a inundações pode ocorrer, desagregada por diferentes graus de probabilidade (baixo, médio e alto ou períodos de retorno), tendo associado informações sobre o tipo de inundações, a extensão da inundações, a profundidade e, onde seja pertinente, a velocidade e/ou direção das correntes relevantes (De Moel et al., 2009). Visto serem mapas que podem conter bastante informação é habitual serem subdivididos em mapas de

profundidade de inundações e de fluxo e propagação de cheia.

mapa de profundidade de inundações

Os mapas de profundidade de inundações representam a diferença entre o nível de inundações e o terreno para um determinado episódio ou probabilidade de ocorrência. Os valores podem derivar de modelos hidrodinâmicos (2D e 3D), de análises estatísticas, de observações realizadas nas áreas inundadas (durante um episódio de inundações ou através das marcas deixadas, por exemplo em edifícios), de inquéritos realizados à população, etc. (EXCIMAP, 2007).

mapa de fluxo e propagação de cheias e inundações

Os mapas de fluxo e propagação de cheias representam as direções e velocidades da água dominantes ou num determinado momento de uma inundações. Tanto a informação necessária como o seu processamento consiste em trabalho muito especializado, sendo a sua execução particularmente difícil. Por estes motivos existem poucos exemplos deste tipo de cartografia (EXCIMAP, 2007).

mapas de caracterização dos elementos expostos

Consiste na representação cartográfica dos elementos expostos às inundações e da sua tipificação, podendo englobar temas diversos como o ambiente, o património histórico, as infraestruturas, as atividades económicas ou outros relevantes para o objetivo da análise de risco (Schanze et al., 2006). A caracterização dos elementos expostos pode ser considerada como o elencar de parâmetros das características

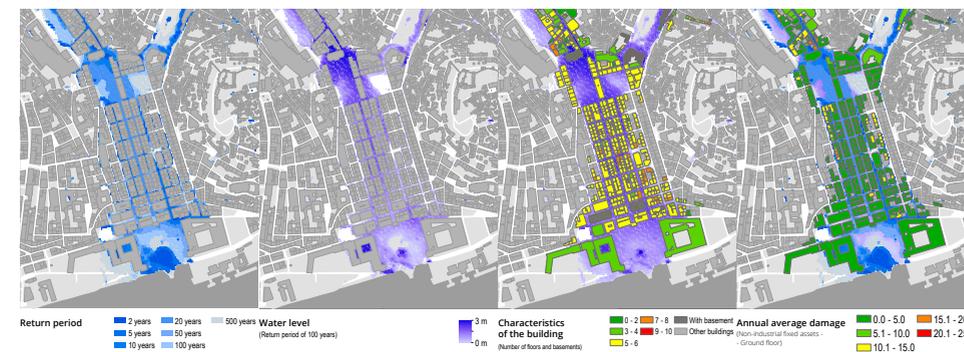


Figura 5. Diferentes tipos cartografia relacionada com inundações. Da esquerda para a direita: Mapa de áreas inundáveis, Mapa de perigosidade de inundações, Mapa de exposição a inundações e mapa de risco de inundações. Fonte: produção do autor com recurso a dados da Câmara Municipal de Lisboa e da modelação hidrodinâmica.

ou parâmetros que lhes conferem vulnerabilidade, não existindo no entanto, qualquer referência a uma maior ou menor capacidade desse elemento em resistir às inundações. Existindo essa referência ou discretização passamos a ter mapas de vulnerabilidade a inundações (ver e.g. Fekete, 2010).

mapa de risco de inundações

Os mapas de risco de inundações espacializam as potenciais consequências adversas associadas às inundações sendo estas resultado da agregação das perdas associadas a vários graus de probabilidade de ocorrência de inundações. O risco pode ser apresentado em valor monetário ou em alternativa em percentagem de dano.

Existem ainda alguns exemplos onde o risco é apresentado de forma qualitativa.

A diretiva comunitária nº 2007/60/CE e o Decreto-Lei que faz a transposição desta diretiva para a legislação Portuguesa, definem que as cartas de risco de inundações devem expressar o número de habitantes e/ou atividades económicas nas áreas potencialmente afetados, as instalações que poderão causar poluição no caso de inundações ou outras informações que se verifiquem relevantes. No entanto a identificação destes elementos e a sua caracterização apenas nos dão parâmetros de vulnerabilidade (EXCIMAP, 2007), sendo necessária uma análise mais aprofundada para se obter cartografia de risco de inundações.



METODOLOGIA

*"Não se pode atravessar o mar
ficando parado a olhar para a água."*

Rabindranath Tagore

Esta secção encontra-se dividida em três partes fundamentais onde se pretende concretizar uma visão geral sobre as principais temáticas para o mapeamento do risco de inundações. A primeira parte introduz os principais passos necessários para o tratamento de dados de precipitação com o objetivo de se obter valores para os diferentes períodos de retorno e, a partir destes, definir hietogramas de projeto a serem utilizados na modelação hidrológica. Esta primeira parte é baseada em dois documentos fundamentais relacionados com hidrologia estatística, recomendando-se a sua leitura para um maior aprofundamento destes temas (ver Naghettini and Pinto, 2007, Naghettini and Portela, 2011).

Na segunda parte são realizadas algumas considerações sobre a modelação hidrológica, nomeadamente sobre a qualidade dos dados necessários e quais os principais resultados a obter para a avaliação do risco de inundações. É necessário ter em atenção que esta segunda parte é apenas introdutória, sendo necessário recorrer a outras fontes para a realização da modelação hidrológica.

Finalmente na terceira parte é apresentada uma metodologia para avaliação do risco de inundações em bacias de pequenas dimensões.

Cada um dos passos descritos é exemplificado através de dados referentes a um caso de estudo desenvolvido para uma bacia da cidade de Lisboa, que abarca a zona da Baixa e as zonas das Avenidas da Liberdade e Almirante Rei.

dados observados de precipitação obtenção e tratamento de dados meteorológicos

A obtenção de dados de precipitação, necessários para a obtenção de períodos de retorno, e de caudais, necessários para a calibração e validação dos modelos hidrológicos podem ser obtidos gratuitamente através do sítio do Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos (SNIRH)^{iv}. Esta fonte tem dados relativos a um grande número de estações meteorológicas e hidrométricas garantindo uma boa cobertura de informação para o território nacional. Existem outras fontes importantes que podem ser consultadas sendo exemplo o Instituto Português do Mar e da Atmosfera^v

No entanto, os dados de precipitação utilizados neste guia foram obtidos junto do Instituto Geofísico do Infante D. Luís. Esta instituição é parte integrante da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, tendo ao seu dispor o primeiro observatório meteorológico em Portugal. A estação meteorológica localiza-se em terrenos adjacentes ao edifício da Escola Politécnica em Lisboa.

Os dados analisados correspondem à precipitação diária acumulada entre os anos hidrológicos^{vi} de 1961 e 2000. Desta

^{iv} <http://snirh.pt/> (consultado 10/2013).

^v <https://www.ipma.pt/> (consultado 10/2013).

^{vi} O ano hidrológico tem início a 1 de outubro (os dados diários da amostra têm início a 1/10/1961 e terminam a 30/09/2000)

Tabela 4. Valor da precipitação diárias máximas anual medida na estação meteorológica do IGIDL para os anos hidrológicos entre 1961 e 2000.

Ano hidrológico	(x_i)						
1961	46.5	1971	60.2	1981	54.0	1991	26.6
1962	91.2	1972	34.9	1982	60.3	1992	59.6
1963	56.3	1973	46.4	1983	95.6	1993	73.4
1964	47.4	1974	37.0	1984	42.6	1994	55.0
1965	55.9	1975	53.8	1985	43.2	1995	44.0
1966	42.6	1976	51.5	1986	42.9	1996	53.2
1967	89.2	1977	56.6	1987	44.1	1997	92.6
1968	82.9	1978	53.7	1988	41.4	1998	57.7
1969	52.8	1979	65.7	1989	45.2	1999	78.1
1970	37.3	1980	38.5	1990	44.6	2000	53.2

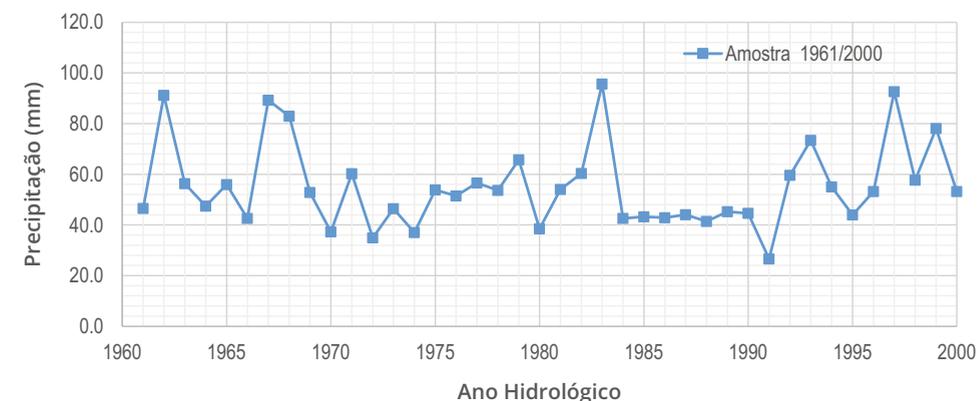


Figura 6. Precipitações diárias máximas para os anos hidrográficos entre 1960 e 2000 (estação meteorológica IGIDL). Fonte: produção do autor.

amostra diária foram retirados os valores anuais máximos de precipitação diária para cada ano hidrológico (x_i), obtendo-se um total de 40 valores ($N = 40$). Os valores das precipitações diárias máximas anuais são apresentados na Tabela 4.

Com a finalidade de se perceber o comportamento da amostra são utilizadas algumas análises estatísticas, designadas

por estatísticas descritivas. Entre estas estão as medidas de tendência central (média, moda e mediana), as medidas de dispersão (variância e desvio padrão) e o coeficiente de assimetria. Na Tabela 5 são apresentadas as fórmulas de cálculo de algumas estatísticas descritivas e os resultados obtidos para a amostra de precipitações apresentadas na Tabela 4. Esta tabela não procura ser exaustiva apresentando

Tabela 5. Principais estatísticas descritivas, respetivas fórmulas e valores obtidos como resultado da análise da amostra apresentada na Tabela 4.

	Fórmula	Valor da amostra (Tabela 4) ^{vii}
Média	$\bar{X} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i$	55.2
Variância	$S_x^2 = \frac{N}{N-1} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{X})^2$	281.2
Desvio padrão	$S_x = \sqrt{S_x^2}$	16.8
Coefficiente de assimetria	$g_x = \frac{N^2 \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{X})^3}{(N-1)(N-2)(S_x)^3}$	1.0301

exclusivamente as análises estatísticas necessárias ao longo deste guia.

As amostras em hidrologia devem ser constituídas por variáveis aleatórias simples e extraídas de uma única população. Existem, no entanto, várias situações que podem influenciar essas premissas e consequentemente a qualidade da amostra, implicando que os resultados obtidos a partir da sua análise sejam enviesados. Para verificar essa mesma qualidade terá de ser avaliado previamente as hipóteses de aleatoriedade, de independência, de homogeneidade e de estacionariedade da amostra. Com a finalidade de se verificar essas características existem vários testes que serão paramétricos, caso os dados da amostra tenham sido obtidos de uma população com distribuição Normal ou qualquer outra distribuição de distribuição cujo modelo seja conhecido. Este não é o caso dos dados amostrais das variáveis hidrológicas de extremos, recorrendo-se por isso a testes não paramétricos. Existindo uma multiplicidade de testes que podem ser utilizados para este fim e não se pretendendo abordar a sua totalidade, são apresentados seguidamente quatro testes

vii Com exceção do coeficiente de assimetria, os valores encontram-se arredondados à primeira casa decimal.

com o objetivo de avaliar cada uma das características referidas.

teste de hipótese de aleatoriedade

O teste de hipótese de aleatoriedade não possibilita comprovar que uma amostra é aleatória, mas sim provar que ela não o é. Uma amostra hidrográfica é considerada aleatória quando a variação dos seus valores decorre de causas naturais. Na eventualidade de se ter deslocado a estação de local, de uma avaria do sistema de medição ou outro qualquer facto que implique modificações nos valores medidos que não estejam relacionados com causas naturais, a amostra deixa de ser aleatória.

A hipótese de aleatoriedade pode ser avaliada com recurso ao teste não paramétrico do número de inflexões. Este número de inflexões (p) pode ser obtido através da contagem do número de “picos” e de “vales” por observação do gráfico apresentado na Figura 6. Um valor excessivamente grande ou pequeno de inflexões significa que a amostra não é aleatória.

Se uma amostra com N elementos é aleatória, o valor esperado de inflexões $E[p]$ é obtido através da fórmula apresentada

Tabela 6. Parâmetros necessários à realização do teste não paramétrico do número de inflexões e respetivos valores da amostra em análise. Neste caso não se pode rejeitar a hipótese de aleatoriedade da amostra para um nível de significância de 0.05 (ou um nível de confiança de 0.95).

Parâmetros	Valores	Parâmetros	Valores
$N =$	40	$ T =$	1.41
$E[p] = \frac{2(N-2)}{3} =$	25.33	$\alpha =$	0.05
$Var[p] = \frac{16N-29}{90} =$	6.79	$1-\alpha/2 =$	0.975
$p =$	29	$\Phi^{-1}(1-\alpha/2) =$	1.96
$T = \frac{p-E[p]}{\sqrt{Var[p]}} =$	1.41	$ T > \Phi^{-1}(1-\alpha/2)$	Não rejeitar

para este parâmetro na Tabela 6, onde a variância $Var[p]$ é aproximada pela equação também presente nessa tabela.

A teoria demonstra que o número de inflexões calculado para diferentes amostras com um tamanho superior a 30 elementos segue um comportamento próximo de uma distribuição normal. Neste sentido a estatística do teste da aleatoriedade pode ser formulado conforme descrito na Tabela 6 para o parâmetro T , sendo a hipótese de aleatoriedade rejeitada para um nível de significância α quando $|T| > \Phi^{-1}(1-\alpha/2)$ ^{viii}. O valor de Φ^{-1} corresponde ao inverso da função de probabilidade acumuladas da distribuição normal padrão (ou seja com média 0 e desvio padrão 1) que pode ser obtida através da inversa da função descrita na equação (9)^{ix}, onde z é o valor da amostra da distribuição normal padrão.

viii Por se tratar de um teste bilateral temos $(1-\alpha/2)$.

ix A função inversa da função de probabilidades acumuladas da distribuição normal padrão pode ser obtida para diferentes valores através da consulta de tabelas criadas para o efeito (ver e.g. Naghettini and Pinto 2007, pp 135). Existem também vários programas informáticos que disponibilizam o seu cálculo. A título de exemplo, o Microsoft Excel disponibiliza a função `INV.NORMAL(probabilidade;média; desv_padrao)`. Para a distribuição normal padrão será `INV.NORMAL(probabilidade;0;1)`.

$$\Phi(z) = \int_{-\infty}^z \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{z^2}{2}} dz \quad (9)$$

Com a não rejeição da hipótese de aleatoriedade da amostra é conveniente confirmar se os elementos que a constituem são independentes. Para que tal se verifique é necessário que nenhuma observação da amostra influencie a ocorrência ou a não ocorrência de outro valor contido nessa mesma amostra. Neste sentido, uma amostra de valores máximos anuais de precipitação terá uma dependência previsivelmente baixa, sendo difícil que um máximo anual tenha influência ou seja influenciado por outro máximo anual. Existem no entanto outras análises onde esta influência entre acontecimentos pode acontecer, sendo exemplo os caudais médios diários onde um dado valor observado num dia está frequentemente condicionado pelo valor do dia anterior.

teste de hipótese de independência

Existem vários testes de hipótese de independência, sendo aqui apresentado a formulação de Wald-Wolfowitz. A estatística deste teste é dada pela equação do

Tabela 7. Parâmetros necessários à realização do teste não paramétrico de Independência e respectivos valores da amostra em análise. Para essa amostra e com um nível de confiança de 95%, não se pode rejeitar a hipótese de independência.

Parâmetros	Valores	Parâmetros	Valores
$S_2 = \sum_{i=1}^N (X_i)^2 =$	10968.35	$ T =$	0.79
$E[R] = -\frac{S_2}{N-1} =$	-281.24	$\alpha =$	0.05
$S_4 = \sum_{i=1}^N (X_i)^4 =$	9957732.12	$1 - \alpha/2 =$	0.975
$Var[R] = \frac{S_2^2 - S_4}{N-1} + \frac{S_4^2 - S_4}{(N-1)(N-2)} - \frac{S_2^2}{(N-1)^2} =$	2818051.44	$\Phi^{-1}(1 - \alpha/2) =$	1.96
$R = \sum_{i=1}^{N-1} X_i X_{i+1} + X_N X_1 =$	1042.88	$ T > \Phi^{-1}(1 - \alpha/2)$	Não rejeitar
$T = \frac{R - E[R]}{\sqrt{Var[R]}} =$	0.79	—	—

parâmetro R apresentada na Tabela 7, onde X_i corresponde a uma dada observação contida na amostra de dimensão N menos a média da amostra. Para um conjunto de amostras com observações independentes pode-se demonstrar que a estatística R segue uma distribuição Normal de média $E[R]$ e variância $Var[R]$ (Tabela 7). A estatística deste teste pode ser formulada conforme descrito na Tabela 7 para o parâmetro T , o qual segue uma distribuição normal padrão. Sendo um teste bilateral a hipótese de aleatoriedade é rejeitada para um nível de significância α quando $|T| > \Phi^{-1}(1 - \alpha/2)^x$.

teste de hipótese de homogeneidade

O teste que se segue pretende verificar a hipótese de homogeneidade da amostra, ou seja se todos os elementos que a constituí são da mesma população. A

^x Ver nota vii e viii.

identificação da presença de duas populações numa dada amostra e mais provável em séries longas de valores médios, visto que fenómenos meteorológicos excepcionais (e.g. El Niño) vão implicar diferenças significativas nos valores da precipitação que nem sempre são facilmente detetáveis nos máximos anuais de precipitação.

Para testar a hipótese de homogeneidade de uma dada amostra com N elementos é necessário dividi-la em duas subamostras que, caso o valor de N seja par devem ter o mesmo número de elementos ($N_1 = N/2$). Se N for ímpar então a primeira subamostra deve ter um elemento a menos que a segunda ($N_2 = (N+1)/2; N_1 = N - N_2$). A subamostra N_1 contém a primeira parte da amostra e N_2 a segunda parte. Seguidamente, ordena-se por ordem crescente a amostra N e verifica-se onde se encontra cada um dos valores de N_1 e

Tabela 8. Parâmetros necessários à realização do teste não paramétrico de homogeneidade e respectivos valores da amostra em análise. Neste caso não se pode rejeitar a hipótese de homogeneidade da amostra para um nível de confiança de 95%.

Pârametros	Valores	Parâmetros	Valores
$V =$	17	$ T =$	1.28
$N =$	40	$\alpha =$	0.05
$N_1 =$	20	$1 - \alpha/2 =$	0.975
$E[V] = 1 + \frac{2N_1(N - N_1)}{N} =$	21	$\Phi^{-1}(1 - \alpha/2) =$	1.96
$Var[V] = \frac{2N_1(N - N_1)[2N_1(N - N_1) - N]}{N^2(N - 1)} =$	9.74	$ T > \Phi^{-1}(1 - \alpha/2)$	Do not reject
$T = \frac{V - E[V]}{\sqrt{Var[V]}} =$	-1.28	—	—

N_2 na série ordenada. Caso um valor de N pertença a N_1 atribui-se a esse registo o valor 1, caso pertença a N_2 atribui-se o valor 2. Esta análise dá origem a uma coluna designada por m com a ordem de classificação de cada valor. Ou seja, se $m_i = 1$ então X_i é um elemento de N_1 , se $m_i = 2$ então X_i é um elemento de N_2 . O valor de V apresentado na Tabela 8 consiste no número de vezes em que $m_i \neq m_{i+1}$.

A estatística do teste de hipótese é dada pelo parâmetro V , podendo-se demonstrar que, no caso das amostras serem homogéneas, a estatística deste parâmetro segue uma distribuição Normal de média igual a $E[V]$ e variância $Var[V]$, conforme apresentado na Tabela 8. A estatística deste teste pode ser formulada conforme descrito na mesma tabela para o parâmetro T , o qual segue uma distribuição normal padrão. Sendo um teste bilateral a hipótese de homogeneidade é rejeitada para um nível de significância α quando $|T| > \Phi^{-1}(1 - \alpha/2)^{xi}$.

^{xi} Ver nota vii e viii.

teste de hipótese de estacionariedade

O último teste referenciado neste guia verifica a hipótese de estacionariedade dos elementos da amostra. Uma amostra não é estacionária quando existem tendências ou variações bruscas nos seus valores, tendo em atenção a ordem cronológica dos acontecimentos registados. Um exemplo de tendência pode estar relacionado com as variabilidades ou alterações climáticas, influenciando o comportamento das precipitações e dos seus extremos a longo prazo. Apesar de esta alteração poder implicar uma não estacionariedade da amostra, é particularmente difícil de ser verificada através dos testes de estacionariedade. Este tipo de fenómenos são consideravelmente longos e as amostras habitualmente avaliadas não têm um período suficientemente prolongado de observações para que a influencia destas modificações se torne uma evidência.

As variações bruscas podem verificar-se, por exemplo, em medições de caudais de um rio antes e após a construção de uma barragem, sendo menos comuns em dados de precipitação, podendo, no

Tabela 9. Parâmetros necessários à realização do teste não paramétrico de estacionariedade e respetivos valores da amostra em análise. Neste caso não se pode rejeitar a hipótese de estacionariedade da amostra para um nível de confiança de 95%.

Parâmetros	Valores	Parâmetros	Valores
$r_s = 1 - \frac{6 \sum_{i=1}^N (m_i - T_i)^2}{N^3 - N} =$	0.022	$\alpha =$	0.05
$Var[r_s] = \frac{1}{N-1} =$	0.026	$1 - \alpha/2 =$	0.975
$T = \frac{r_s}{\sqrt{Var[r_s]}} =$	0.139	$\Phi^{-1}(1 - \alpha/2) =$	1.96
$ T =$	0.139	$ T > \Phi^{-1}(1 - \alpha/2)$	Não rejeitar

entanto, resultar de uma avaria na estação udométrica.

O teste não paramétrico de Spearman é um teste de hipótese de estacionariedade que tem como objetivo a identificação de uma eventual tendência numa dada amostra hidrológica ao longo do tempo. A estatística do teste tem como base o coeficiente r_s apresentado na Tabela 9 onde N é o número de elementos que constituem a amostra, T_i o número de ordem do elemento de ordem i da amostra e m_i o número de valores menores ou iguais ao elemento de ordem i da amostra.

A estatística do teste de hipótese é dada pelo parâmetro r_s , podendo-se demonstrar que, não havendo correlação entre o valor m_i e T_i a distribuição deste parâmetro segue uma distribuição Normal de média igual a $E[r_s] = 0$ e variância $Var[R]$, conforme apresentado na Tabela 9. A estatística do teste de Spearman pode ser formulada conforme descrito na mesma tabela para o parâmetro T , o qual segue uma distribuição normal padrão. Sendo um teste bilateral a hipótese de aleatoriedade é

rejeitada para um nível de significância α quando $|T| > \Phi^{-1}(1 - \alpha/2)$ ^{xii}.

Da aplicação dos diferentes testes de hipóteses verifica-se que não se pode rejeitar a hipótese de aleatoriedade, independência, homogeneidade e estacionariedade dos elementos da amostra de valor das precipitações diárias máximas anuais, observados na estação meteorológica do IGIDL para o período entre 1961 e 2000.

obtenção de períodos de retorno de retorno

A análise estatística para o cálculo de períodos de retorno de precipitações máximas anuais são obtidos através da teoria de valores extremos. Esta teoria define a lei de Gumbel como a distribuição mais utilizada para a representação de máximos sendo designada habitualmente apenas por Gumbel. Para além da lei de Gumbel, e com a mesma finalidade, são utilizadas outras distribuições estatísticas como a Pearson III,

^{xii} Ver nota vii e viii.

a Log-Pearson III, a Generalizada de Valores Extremos (GEV), entre outras. Estas leis consistem em modelos probabilísticos amplamente estabelecidos na literatura, sendo aquelas que em teoria melhor se adequam às características intrínsecas mais comuns nas amostras de variáveis hidrológicas para valores extremos máximos (Naghetini and Portela, 2011).

A função densidade probabilidade da Lei de Gumbel $f(x)$ é apresentada na equação (10).

$$f_x(x) = \frac{1}{\alpha} \exp\left[-\frac{x-\beta}{\alpha} - \exp\left(-\frac{x-\beta}{\alpha}\right)\right] \quad (10)$$

para $-\infty < x < +\infty, -\infty < \beta < +\infty, \alpha > 0$

Com a finalidade de se ajustar a lei de Gumbel à amostra de valores máximos

anuais de precipitação é necessário obter os valores de α e β , que correspondem respetivamente, aos parâmetros de escala e posição desta distribuição. Na Figura 7 são apresentados alguns exemplos com a finalidade de ilustrar o comportamento da função mediante diferentes parâmetros. Estes parâmetros são calculados com recurso às equações (11), onde $Var[X]$ corresponde à variância da amostra, e (12) onde $E[X]$ consiste na média da amostra. Nesta distribuição o coeficiente de assimetria é constante ($\gamma = 1.1396$), sendo por esse motivo designada por função de dois parâmetros.

$$Var[X] = \frac{\pi^2 \alpha^2}{6} \Leftrightarrow \alpha = \sqrt{\frac{6Var[X]}{\pi^2}} \quad (11)$$

$$E[X] = \beta + 0.57721566\alpha \Leftrightarrow \beta = E[X] - 0.57721566\alpha \quad (12)$$

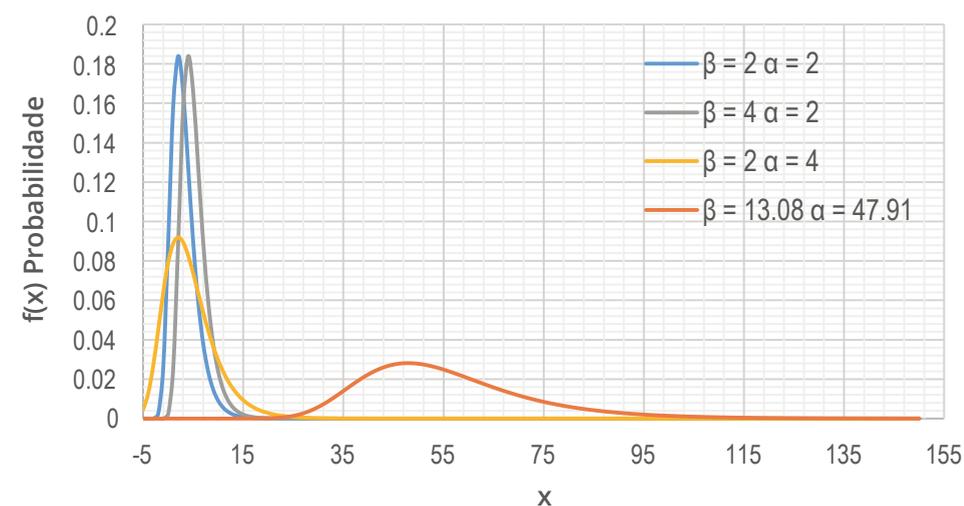


Figura 7. Exemplo da aplicação da função densidade da distribuição de Gumbel para diferentes parâmetros de escala e posição. O exemplo com $\alpha = 13.08$ e $\beta = 47.91$ correspondem aos parâmetros da amostra de máximos anuais de precipitação (ano hidrológico) entre 1961 e 2000 para a estação hidrográfica do IGIDL (Lisboa). Fonte: produção do autor

Recorde-se que a média da amostra ou o valor esperado $E[X]$ de máximas anuais de precipitações é de 55.2 e a sua variância $Var[X]$ de 281.2. Com a aplicação das equações (11) e (12) temos $\alpha = 47.91$ e $\beta = 13.08$.

A função de probabilidades acumuladas da distribuição de Gumbel $F(x)$ é dada pela equação (13).

$$F_x(x) = \exp\left[-\exp\left(-\frac{x-\beta}{\alpha}\right)\right] \quad (13)$$

Na Figura 8 são apresentados alguns exemplos da função de probabilidades acumuladas para a lei de Gumbel e do ajuste desta Lei aos parâmetros da amostra dos máximos anuais de precipitação. Nesta figura são ainda representados os valores dessa amostra e a correspondente probabilidade empírica de não excedência,

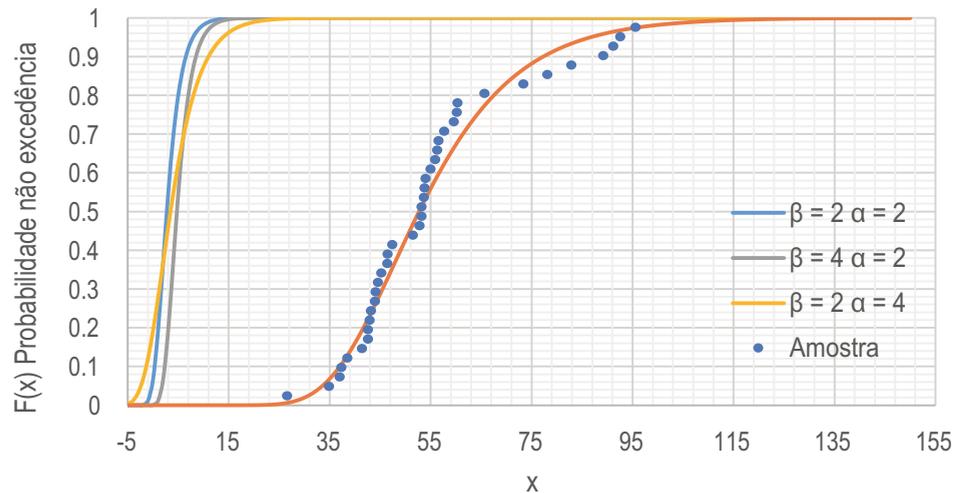


Figura 8. Exemplo da aplicação da função de probabilidades acumuladas da lei de Gumbel para os diferentes parâmetros apresentados na Figura 18. Fonte: produção do autor.

calculada através da fórmula postulada por Weibull. Esta fórmula permite a estimação da probabilidade de não excedência, não enviesadas para todas as distribuições (Naghattini and Pinto, 2007).

A fórmula de Weibull é descrita na equação (14) onde i corresponde à posição de um determinado elemento da amostra após ordenação por ordem crescente de todos os seus elementos e N à dimensão da amostra, que para os máximos anuais de precipitação entre 1961 e 2000 é de 40.

$$F = \frac{i}{N+1} \quad (14)$$

A Figura 8 permite uma primeira percepção visual do ajuste da Lei de Gumbel à distribuição da amostra, no entanto a representação gráfica e respetiva avaliação visual deve ser feita com recurso ao papel de

probabilidades (ver como exemplo Figura 9). Para esta lei é também importante verificar-se se o coeficiente de assimetria ou parâmetro de posição da amostra ($\gamma[X] = 1.0301$) se encontra próximo do da Lei de Gumbel ($\gamma = 1.1396$) o que é o caso. Estes são dois indicadores que podem contribuir para a escolha desta distribuição em detrimento de outras, existindo no entanto outros critérios que podem influenciar essa escolha. Tanto esses critérios como a representação da função num papel de probabilidades serão discutidos posteriormente neste guia.

Sendo esta lei a escolhida, os quantis da distribuição (equivalendo aos períodos de retorno) podem ser obtidos através da equação (15), onde T corresponde ao período de retorno pretendido (em anos).

$$x[T] = \beta - \alpha \ln\left[-\ln\left(1 - \frac{1}{T}\right)\right] \quad (15)$$

Como referido anteriormente, existem várias distribuições que podem ser aplicadas para o cálculo estatístico de períodos de retorno de precipitações máximas anuais. Não sendo o objetivo apresentar todas as distribuições existentes, julga-se pertinente a exposição de outra distribuição, uma vez que é recomendada a aplicação de diferentes distribuições na estimação dos períodos de retorno, para escolher-se aquela que tenha melhor ajuste à amostra em análise (Naghattini and Pinto, 2007, Naghattini and Portela, 2011). Neste sentido é apresentada a Lei Pearson III visto ser a mais aplicada neste tipo de estudos a seguir à de Gumbel.

A função densidade probabilidade de uma distribuição de Pearson III $f(x)$ é

apresentada na equação (16) onde α , β e γ são respetivamente, o parâmetro de escala, de forma e de posição. A distribuição de Pearson III é uma função de três parâmetros visto que, ao contrário da Lei de Gumbel, o parâmetro de posição não é constante.

$$f_x(x) = \frac{1}{\alpha\Gamma(\beta)} \left(\frac{x-\gamma}{\alpha}\right)^{\beta-1} \exp\left(-\frac{x-\gamma}{\alpha}\right) \quad (16)$$

para $\gamma < x < \infty$

Os parâmetros α , β e γ são estimados através das equações (17), (18) e (19), onde $\gamma[X]$ é o coeficiente de assimetria da amostra, $Var[X]$ a sua variância e $E[X]$ a sua média.

$$\gamma[X] = \frac{2}{\sqrt{\beta}} \Leftrightarrow \beta = \left(\frac{2}{\gamma[X]}\right)^2 \quad (17)$$

$$Var[X] = \alpha^2\beta \Leftrightarrow \alpha = \sqrt{\frac{Var[X]}{\beta}} \quad (18)$$

$$E[X] = \alpha\beta + \gamma \Leftrightarrow \gamma = \frac{E[X]}{\alpha\beta} \quad (19)$$

A função de probabilidades acumuladas da distribuição Pearson III $F(x)$ é calculada através da equação (20).

$$F_x(x) = \frac{1}{\alpha\Gamma(\beta)} \int_{\gamma}^{\infty} \left(\frac{x-\gamma}{\alpha}\right)^{\beta-1} \exp\left(-\frac{x-\gamma}{\alpha}\right) dx \quad (20)$$

Para a distribuição Pearson III não existe uma forma analítica simples que permita o cálculo de quantis (Naghattini and Portela, 2011). Visto ser esta a informação necessária,

Tabela 10. Resultados obtidos através da utilização dos fatores de probabilidade da distribuição de Gumbel e Pearson III de diferentes quantis.

T	$1 - \frac{1}{T}$	K_{Gumbel}^F	x_f (Gumbel)	K_{Normal}^F	$K_{Pearson}^F$	x_f (Pearson III)
2	0.500	-0.164	52.44	0	-0.167	52.40
5	0.800	0.719	67.26	0.842	0.750	67.77
10	0.900	1.305	77.07	1.282	1.335	77.58
20	0.950	1.866	86.48	1.645	1.877	86.57
50	0.980	2.592	98.67	2.054	2.556	98.05
100	0.990	3.137	107.80	2.326	3.050	106.34
500	0.998	4.395	128.89	2.878	4.159	124.94

correspondendo à obtenção das precipitações associadas a um determinado período de retorno, existem outras abordagens que simplificam o seu cálculo. Esta abordagem está disponível para distribuição de Pearson III, bem como para outras distribuições, recorrendo à utilização de fatores de probabilidade para o cálculo de quantis, tendo sido introduzida por Chow (1954).

Neste método os quantis são obtidos através da equação (21), onde x_f corresponde ao quantil da probabilidade de não excedência F , sendo equivalente a um determinado período de retorno \bar{X} corresponde à média da distribuição da amostra e S_x ao seu desvio padrão. O valor de K_{DIST}^F é obtido através do cálculo da expressão do fator de probabilidade de uma determinada distribuição.

$$x_f = \bar{X} + K_{DIST}^F S_x \quad (21)$$

As equações (22) e (23) permitem calcular os fatores de probabilidade para a lei de Gumbel e de Pearson III respetivamente. O valor de g_x da equação (23) refere-se ao coeficiente de assimetria da amostra.

$$K_{Gumbel}^F \cong -\frac{\sqrt{6}}{\pi} \left\{ 0.57721566 + \ln \left[\ln \left(1 - \frac{1}{T} \right) \right] \right\} \quad (22)$$

$$\begin{aligned} K_{Pearson}^F &= K_{Normal}^F + (K_{Normal}^F)^2 - 1)k + \\ &+ \frac{1}{3}(K_{Normal}^F)^3 - 6K_{Normal}^F)k^2 - \\ &- (K_{Normal}^F)^2 - 1)k^3 + K_{Normal}^F k^4 + \\ &+ \frac{1}{3}k^5 \text{ sendo } k = \frac{g_x}{6} \end{aligned} \quad (23)$$

Para o cálculo dos fatores de probabilidade da lei de Pearson III é necessário obter-se os fatores de probabilidade da lei normal. Estes correspondem ao inverso da função de probabilidade acumuladas da distribuição normal padrão, que pode ser obtida através da inversa da função descrita na equação (9)^{xiii}.

Como referido anteriormente, um dos vários critérios para a escolha de uma determinada Lei em detrimento de outras consiste na visualização das distribuições num gráfico de probabilidades. Estes gráficos têm no eixo das ordenadas valores e gradação nas unidades da amostra e no eixo das abcissas uma escala transformada

^{xiii} Ver também nota viii

de probabilidades. Desta forma, aos valores da amostra têm de ser atribuídas probabilidades empíricas de não excedência, existindo várias fórmulas que permitem essa atribuição com diferentes níveis de adequação para diferentes objetivos (ver Naghettini and Portela, 2011).

Neste caso específico pretende-se verificar o ajuste visual da distribuição Pearson III e Gumbel à amostra de valores extremos. Nesse sentido, e para a atribuição da probabilidade empírica de não excedência à amostra, foi utilizada a fórmula de Weibull por ser aquela que tem como atributos o não enviesamento das probabilidades de não excedência para todas as distribuições. A aplicação desta fórmula foi apresentada anteriormente sendo o procedimento adotado para a visualização da amostra, num gráfico de probabilidades, idêntico ao descrito para a representação da amostra na Figura 8.

Para se atribuir ao eixo das abcissas uma escala linear de probabilidades é necessário considerar-se o que se pretende retirar da observação do gráfico, visto existirem vários papéis de probabilidade como os referentes à distribuição Normal ou à distribuição de Gumbel.

A comparação visual de duas distribuições (Gumbel e Pearson III) e a respetiva aderência à amostra é preferencialmente realizada com recurso ao papel de Probabilidades da lei Normal. Por seu lado, quando se compara uma amostra com uma única distribuição de extremos deve-se utilizar o papel de probabilidades dessa distribuição. Esta situação normalmente ocorre quando já se tem conhecimento da lei de extremos com melhor ajuste à amostra (Naghettini and Portela, 2011).

Na Figura 9 são apresentados os dados da amostra após ordenação crescente e atribuição da probabilidade empírica de não excedência formulada por Weibull, bem como o resultado do ajuste da lei de Gumbel e Pearson III à amostra. Da sua observação pode-se concluir que ambas as distribuições têm um comportamento e ajuste relativamente idêntico à amostra.

Quando as distribuições têm ajustes idênticos à amostra, deve-se optar por aquela que tem menos parâmetros. Como referido a distribuição de Pearson III consiste num modelo com três parâmetros, resultando da sua aplicação uma maior flexibilidade e consequentemente uma maior aderência à amostra. Mas esta aderência é conseguida à custa do terceiro parâmetro que é obtido a partir da amostra, o que aumenta a incerteza dos valores estimados (ver Figura 10). Por outro lado a distribuição de Gumbel é ajustada mantendo-se o parâmetro de posição (ou coeficiente de assimetria) da sua distribuição constante, sendo este igual a 1.1396. Este parâmetro tem o valor de 1.0301 na amostra, sendo ambos os valores bastante próximos. Quando esta situação se verifica temos mais um argumento para escolher a lei de Gumbel relativamente a outras distribuições.

Existem no entanto, vários testes de aderência das leis estatísticas à amostra, sendo exemplo o teste de qui-quadrado, de Kolmogorov-Smirnov, de Anderson-Darling ou de Filliben. Estes testes apresentam, em geral deficiências na obtenção das diferenças entre a distribuição de frequências das leis de extremos e da amostra nas caudas superiores e inferiores (Naghettini and Pinto, 2007). No caso da análise de valores de máximos anuais de precipitação, as

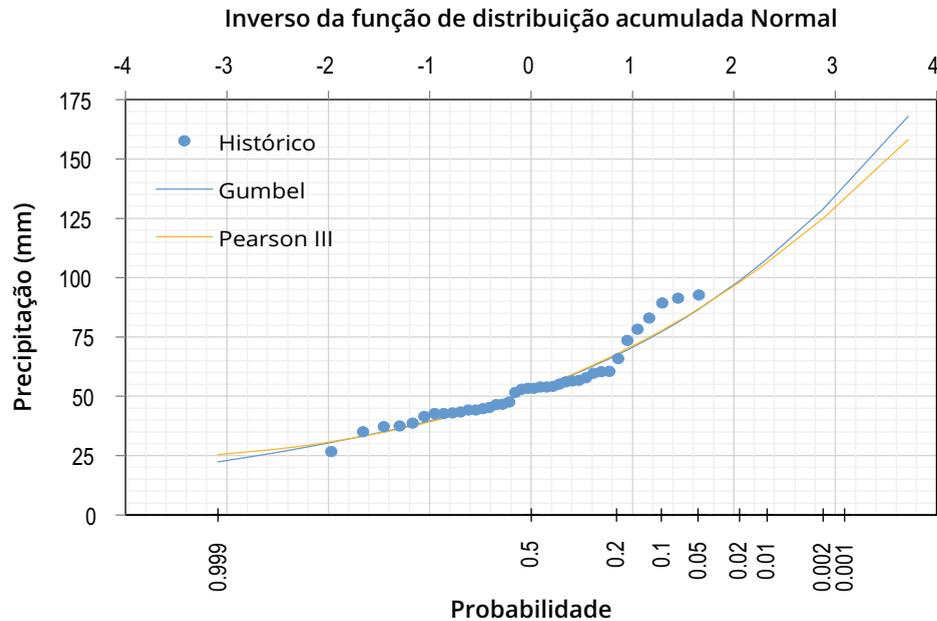


Figura 9. Ajuste das Leis de Gumbel (Valores extremos tipo I) e Pearson III à amostra máximos anuais de precipitação observada entre 1961 e 2000. Fonte: produção do autor.

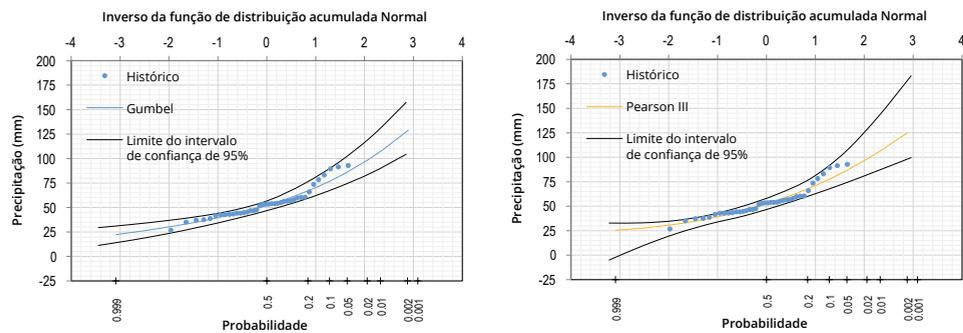


Figura 10. Resultado da aplicação da técnica de Monte Carlo para a obtenção de intervalos de confiança nos valores estimados pela aplicação da lei de Gumbel (esquerda) e Pearson III (direita). Nesta figura pode-se observar o maior grau de incerteza associado a uma distribuição de três parâmetros comparativamente a uma de dois. Fonte: produção do autor

Tabela 11. Valores dos períodos de retorno obtidos com a aplicação da lei de Gumbel e Pearson III e respectivos valores inferiores e superiores do intervalo de confiança de 95% resultantes da aplicação do método de Monte Carlo. Nesta tabela é possível verificar-se uma maior amplitude entre os limites inferiores e superiores do intervalo de confiança resultante da aplicação da lei Pearson III comparativamente com a lei de Gumbel.

Período de retorno	2	5	10	20	50	100	500	
Probabilidade de não excedência	0.5	0.8	0.9	0.95	0.98	0.99	0.998	
Gumbel	Valor inferior do intervalo de confiança de 95% (mm)	46.9	59.7	67.7	75.0	83.8	90.6	104.3
	Ajuste da Lei de Gumbel Máximos (mm)	52.4	67.3	77.1	86.7	98.7	107.8	128.9
	Valor superior do intervalo de confiança de 95% (mm)	57.0	77.1	90.6	103.6	119.6	132.2	157.3
Pearson III	Intervalo de confiança inferior de 95% (mm)	46.8	60.1	67.8	74.2	82.0	87.2	98.1
	Ajuste da Lei de Pearson III (mm)	52.4	67.8	77.6	86.5	98.0	106.3	124.9
	Intervalo de confiança superior de 95% (mm)	58.5	76.9	92.7	107.4	129.1	144.1	178.2

diferenças nas caudas superiores são as mais importantes visto que correspondem aos valores dos períodos de retorno mais elevados. Esta situação torna os testes de aderência atualmente disponíveis, de utilização limitada para esta finalidade (Naghetini and Portela, 2011). Por este motivo a sua aplicação não foi tida em conta para a escolha da lei estatística com melhor ajuste à distribuição da amostra^{xiv}.

A aplicação das leis de extremos e a consequente obtenção de quantis contem um certo nível de incerteza independente do método aplicado. Esta incerteza está presente desde o início da análise, com a obtenção dos parâmetros necessários para uma distribuição a partir de uma amostra. A amostra de precipitações diárias máximas anuais apenas contém um número reduzido de observações, não sendo possível uma caracterização exata

^{xiv} Para obter mais informações sobre os testes de aderência consultar Naghetini and Pinto (2007), pp 270 - 286.

de toda a sua população, uma vez que esta é infinita.

No entanto esta incerteza pode ser estimada com recurso a diferentes métodos, sendo exemplo o método de Monte Carlo. Este método consiste na geração de várias séries (nunca menos de 5000) de números aleatórios entre 0 e 1 com a mesma dimensão da amostra. Seguidamente, para cada uma das séries aleatórias geradas, é ajustada a distribuição que foi inicialmente considerada para o cálculo dos períodos de retorno, obtendo-se os fatores de probabilidade dessa distribuição para cada valor de cada uma das séries (para a lei de Gumbel pode ser aplicada a equação (22) e para a lei de Pearson III a equação (23)). Com a aplicação da equação (21) aos fatores de probabilidade são obtidas séries de valores aleatórios de precipitação ajustada à distribuição. Finalmente, para cada uma dessas séries são obtidos os quantis de precipitação desejados (equivalentes aos

períodos de retorno) e feita a estimação dos intervalos de confiança. Ou seja, para um nível de significância de 0.05 (ou intervalo de confiança de 95%) são escolhidas as séries aleatórias geradas que correspondem ao percentil 2.5% para o limite inferior do intervalo de confiança e ao percentil 97.5% para o superior (Ver Tabela 11)^{xv}.

Das diferentes análises apresentadas conclui-se que a lei mais adequada para a obtenção de períodos de retorno tendo por base a amostra de valores de precipitação diária máxima anual apresentada na Tabela 4 é a lei de Gumbel, sendo os seus valores utilizados para a obtenção dos hietogramas de projeto.

definição de hietogramas de projeto

Os hietogramas de projeto resultam da necessidade de se distribuir a precipitação diária em períodos de tempo mais curtos, com a finalidade de se proceder à modelação hidrológica de uma determinada bacia hidrográfica. Dependendo da dimensão dessa bacia e da capacidade do modelo hidrológico, os hietogramas podem ser desenhados para uma precipitação com maior ou menor duração e subdivididos em períodos ou blocos de tempo mais curtos ou longos.

A escolha da duração dos hietogramas tem subjacente o tempo de processamento do modelo hidrológico (quanto maior

^{xv} Visto a extensão da análise necessária para o cálculo de incertezas utilizando o método de Monte Carlo, existem vários softwares que incorporam o seu algoritmo. Os intervalos de confiança ilustrados na Figura 10 e quantificados na Tabela 11 foram obtidos através do programa Hydrognomon (disponível em <http://hydrognomon.org/>)

for a duração do hietogramas maior será o tempo de processamento) e o tempo de concentração da bacia, ou seja o tempo de percurso da água precipitada entre o extremo mais longínquo da bacia hidrográfica e uma determinada secção da linha de água (Martins, 2000). Assim, após ser atingido o máximo de precipitação do hietograma, a sua restante duração deverá ser superior ou igual ao tempo de concentração da bacia, de forma a garantir que o pico máximo precipitado que afete o início da bacia chega ao seu final, garantindo-se desta forma que a extensão máxima da inundação é modelada.

A escolha dos blocos de tempo do hietograma tem em atenção o fenómeno que se pretende modelar, sendo mais espaçados no caso de cheias progressivas e de bacias com grandes dimensões, ou mais curtos na modelação de bacias de pequenas e medias dimensões atingidas por cheias rápidas.

A bacia hidrográfica tida como exemplo desenvolve-se a partir da Baixa de Lisboa para norte através das Avenidas da Liberdade e Almirante Reis, podendo ser considerada uma bacia de pequenas dimensões, normalmente assolada por cheias rápidas. Neste sentido o período de tempo dos hietogramas deve ser o mais pequeno possível.

Existem várias formulações para se obter o tempo de concentração de uma determinada bacia. Visto que, para o caso aqui abordado, apenas é necessário uma aproximação do valor de tempo de concentração, é apresentada um único exemplo descrito na equação (24), segundo a fórmula proposta por Temez (1978), onde t_c é o tempo de concentração em horas,

Tabela 12. Dados necessários e resultado do cálculo do tempo de concentração da bacia em estudo, segundo a fórmula de Temez.

L_b (Km)	Z_{max} (m)	Z_{min} (m)	i_m (m/m)	t_c (h)
4.81	80.42	4.24	0.07	1.63

L_{bk} o comprimento do curso de água principal da bacia em quilómetros e i_m o declive médio do curso de água principal da bacia. O parâmetro i_m pode ser obtido através da diferença de cotas entre a extremidade a montante (Z_{max}) e a jusante (Z_{min}) do curso de água principal sobre o seu comprimento em metros (L_{bm}).

$$t_c = 0.3 \left(\frac{L_{bk}}{i_m} \right)^{0.76} \text{ sendo } i_m = \frac{Z_{max} - Z_{min}}{L_{bm}} \quad (24)$$

A obtenção do comprimento e dos dados necessários para o cálculo do declive da linha de água principal, podem resultar de diferentes procedimentos onde se inclui a medição *in situ*. No entanto o facto da bacia hidrográfica em estudo estar fortemente artificializada levanta alguns desafios, uma vez que os diferentes cursos de água que a compõe se encontram canalizados, fazendo parte do sistema de drenagem da própria cidade de Lisboa. Como apenas se pretende ter uma noção do valor do tempo de concentração pode-se recorrer a um modelo digital de terreno para se delinear os cursos de água teóricos e destes seleccionar aquele que tenha a maior extensão, correspondendo ao curso de água principal^{xvi}.

O tempo de concentração da bacia, obtido através da fórmula de Temez, corresponde

^{xvi} Esta operação é facilmente realizada com recurso a um sistema de informação geográfica

ao tempo necessário para a água percorrer toda a bacia no caso de esta se encontrar num estado próximo do natural. Tendo em atenção que a bacia em estudo é composta por solos impermeáveis e sistemas artificiais de drenagem, os tempos de concentração serão bastante mais baixos. No entanto, esta análise permite decidir a duração do hietograma tendo em atenção o tipo de modelação que se pretende realizar.

Tendo em atenção o tempo de concentração e o tipo de inundações que ocorrem nesta bacia, optou-se por hietogramas com a duração de 4 horas dividido em blocos alternados de 5 minutos.

Os hietogramas associados a precipitações com diferentes períodos de retorno são normalmente obtidos com recurso a curvas Intensidade-Duração-Frequência (IDF), que como já foi referido, foram definidas por Brandão et al. (2001) para várias estações meteorológicas do território nacional, tendo em atenção as quebras da evolução da intensidade de precipitação identificadas por aqueles autores. Consequentemente a curva IDF para um determinado período de retorno é constituída por três trechos, sendo o primeiro válido entre os 5 e os 30 minutos, o segundo entre os 30 minutos e as 6 horas e o terceiro entre as 6 e 48 horas (ver Tabela 2).

Para algumas estações verificam-se descontinuidades nas transições entre

estes trechos consecutivos devido às suas expressões distintas. Na construção dos hietogramas com pequenos incrementos de tempo baseados nos trechos da curva IDF, podem surgir blocos de precipitação com valores negativos, relativos às estações meteorológicas onde estas descontinuidades se verificam. Caso esta situação aconteça, utiliza-se normalmente, para esse passo de tempo, o trecho da curva IDF imediatamente anterior ao aparecimento dessa descontinuidade (Portela et al., 2000).

Os dados relativos às curvas IDF definidas por Brandão et al. (2001) para o posto udométrico do IGIDL de Lisboa apresentam uma descontinuidade entre o segundo (30 minutos a 6 horas) e o terceiro trecho (6 a 24 horas) dessas curvas, quando aplicados a hietogramas com blocos de duração de 5 minutos. No entanto, e visto que a duração dos hietogramas a definir são compostos por durações de 4 horas, esta descontinuidade não é relevante para os cálculos efetuados.

A divisão em blocos necessários para a realização dos hietogramas da precipitação associada a um determinado período de retorno, podem ser obtidos através da aplicação da equação (6) com recurso aos parâmetros a e b apresentados na Tabela 2.

A Tabela 13 sintetiza os procedimentos necessários para a obtenção de um hietograma com blocos de precipitação de 5 minutos decrescentes, para um evento com duração de quatro horas e um período de retorno de 10 anos ($P(5 \text{ min})_{(T10)mm}$). A precipitação total deste período de retorno é de 77.1 mm e foi obtida a partir da amostra de valores de precipitação diária máxima anual com recurso à Lei de Gumbel (Tabela 11).

Os procedimentos ilustrados nesta tabela consistem na aplicação dos parâmetros da curva IDF da estação do IGIDL para a obtenção da intensidade de precipitação em milímetros por hora para cada período de 5 minutos ($I_{(mm/h)}$ – 6ª coluna da tabela), seguido da multiplicação dessa intensidade pela duração em horas correspondente ao passo de tempo i , para se obter as respetivas precipitações acumuladas ($P(D)_{mm}$ – 7ª coluna da tabela). O cálculo seguinte tem como objetivo ajustar as precipitações calculadas no passo anterior. Esta necessidade deriva do diferencial existente entre a intensidade de precipitação, para o período de 24 horas, associada ao período de retorno de 10 anos que esteve na base do cálculo das curvas IDF e o valor obtido para as mesmas condições utilizando a amostra que serve de base a este guia (77.1 mm). Para tal e após determinar a precipitação associada à curva IDF para uma duração de 24 horas (corresponde à última linha da 6ª coluna da Tabela 13 – 78.5 mm), calcula-se o rácio entre estes dois valores. Da multiplicação deste rácio pelos valores de $P(D)_{mm}$ obtêm-se as precipitações acumuladas ajustadas a esta amostra ($P(D)_{(T10)mm}$ – 8ª coluna da tabela). Finalmente, os valores a utilizar na construção do hietograma resultam do cálculo da precipitação para os blocos de 5 minutos ($(P(5 \text{ min})_{(T10)mm})$ – última coluna da tabela), através da diferença entre as precipitações acumuladas ajustadas de duas durações consecutivas ($P(D)_{(T10)mm_i} - P(D)_{(T10)mm_{i-1}}$ para $i > 1$). A única exceção diz respeito ao primeiro bloco onde o valor é igual à respetiva precipitação acumulada ajustada ($P(D)_{(T10)mm}$ para $i = 1$).

O hietograma que resulta diretamente da Tabela 13 consiste, e como referido

Tabela 13. Aplicação da curva IDF relativa ao período de retorno de 10 anos definida por Brandão et al. (2001) para a estação do IGIDL em Lisboa, ao período de retorno de 10 anos de precipitação (77.1 mm) obtido através do ajuste da lei de Gumbel (Tabela 11) para a amostra de valores de precipitação diária máxima anual (Tabela 4).

i	$D_{(\text{min})}$	$D_{(h)}$	a	b	$I_{(mm/h)} = \frac{P(D)_{mm}}{aD_{(\text{min})}^b}$	$P(D)_{mm} = D_{(h)} \cdot I_{(mm/h)}$	$\frac{P(D)_{(T10)mm}}{77.1} = \frac{77.1}{78.5} \times P(D)_{mm}$	$P(5 \text{ min})_{(T10)mm}$
1	5	0.08	239.69	-0.486	109.64	9.14	8.97	8.97
2	10	0.17	239.69	-0.486	78.28	13.05	12.81	3.84
3	15	0.25	239.69	-0.486	64.28	16.07	15.78	2.97
4	20	0.33	239.69	-0.486	55.89	18.63	18.30	2.52
5	25	0.42	239.69	-0.486	50.14	20.89	20.52	2.22
6	30	0.50	407.36	-0.637	46.67	23.34	22.94	2.40
...
48	240	4.00	407.36	-0.637	12.41	49.64	48.75	0.37
—	1440	24.00	670.81	-0.732	3.27	78.50	77.10	—

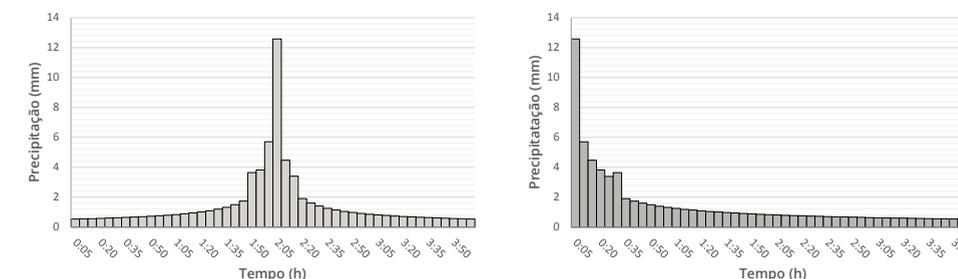


Figura 11. Hietograma de blocos alternados (esquerda) e de blocos decrescentes (direita) obtidos através da aplicação da curva IDF para o período de retorno de 100 anos, ajustada à precipitação obtida para o mesmo período de retorno, através da aplicação da lei de Gumbel à amostra de precipitações diárias máximas anuais da estação meteorológica do IGIDL – Lisboa. Fonte: produção do autor.

anteriormente, num hietograma de blocos de 5 minutos decrescentes, ou seja o valor com maior precipitação é atribuído ao primeiro bloco de tempo, decrescendo este valor até às 4 horas. Verifica-se no entanto um ligeiro aumento da precipitação na passagem do primeiro (5 a 30 minutos) para o segundo trecho (30 minutos a 6 horas) da curva IDF no período de retorno ilustrado. Esta situação verifica-se para todas as transições entre curvas IDF da estação do IGIDL.

O hietograma de blocos alternado difere do de blocos decrescente apenas na ordenação de valores. Neste o valor mais elevado de precipitação encontra-se centrado na distribuição e os restantes valores do hietograma de blocos decrescentes são alocados de forma alternada à direita e esquerda desse valor central (Figura 11).

A Figura 12 ilustra alguns dos hietogramas utilizados na modelação hidrológica para a bacia hidrográfica em estudo. Nesta

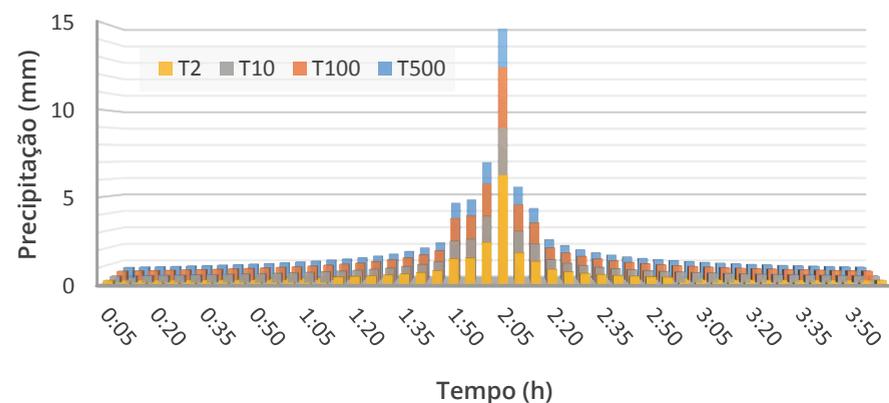


Figura 12. Hietogramas de blocos alternados para os períodos de retorno de 2, 10, 100 e 500 anos obtidos através da aplicação da curva IDF para os respetivos período de retorno, ajustados à precipitação obtida para os mesmos, através da aplicação da lei de Gumbel à amostra de precipitações diárias máximas anuais da estação meteorológica do IGIDL – Lisboa. Fonte: produção do autor.

figura não são representados os hietogramas para o período de retorno de 5, 20 e 50 anos também utilizados na modelação.

modelação hidrológica

A avaliação de risco de inundações engloba a execução de diversas tarefas. A primeira das quais consiste na produção de dados científicos que caracterizem a inundação a que determinado sistema se encontra exposto. Essa caracterização consiste na definição de períodos de retorno e na definição de hietogramas de projeto, tendo em conta as características da área em estudo. Todos estes procedimentos têm como objetivo fundamental a espacialização da inundação, recorrendo-se para esse efeito, a modelos que permitem simular o comportamento da água precipitada num determinado espaço

físico. O modelo Mohid^{xvii}, adotado para a realização da modelação hidrodinâmica que ilustra este guia, permite modelar o escoamento superficial e a rede de drenagem principal da cidade, correspondendo a um modelo 2D apesar de incorporar alguns componentes de um modelo 3D, acopla a simulação da rede de drenagem. Este tipo de modelos são os mais adequados para o tipo de bacia em estudo onde a permeabilidade do solo é bastante baixa e as maiores inundações resultam de cheias rápidas (ver e.g. De Moel et al., 2009, Ernst et al., 2010, EXCIMAP, 2007). Este modelo permite obter dados importantes para a criação de mapas de perigosidade como a altura, a direção e a velocidade da água, bem como a extensão da inundação.

Realizam-se seguidamente, algumas considerações a ter em conta no processo de modelação hidrodinâmica nomeadamente

^{xvii} Este modelo pode ser obtido em <http://www.action-modulers.pt/>

a importância do detalhe da informação utilizada nesse processo e as suas implicações para os resultados obtidos. É de referir que a modelação hidrodinâmica propriamente dita e os seus processos não são discutidos de forma exaustiva neste documento.

informação necessária

Existem fundamentalmente três grandes grupos de informação necessária para a simulação de inundações com recurso a modelação hidrodinâmica.

O primeiro consiste num modelo digital de terreno (MDT) e, dependendo da bacia em estudo, nas bases de dados geográficas referentes à rede artificial de drenagem.

Para a produção de cartografia de risco de inundação à microescala deve-se optar por MDT com uma resolução horizontal entre o metro e os 10 metros e uma resolução vertical nunca inferior a 0,5 metros (Ernst et al., 2010). Estas características permitem identificar pequenas alterações no relevo, sendo um fator fundamental para uma correta modelação de inundações. Não menos importante é a inclusão neste modelo digital de terreno de barreiras à circulação da água, nomeadamente os edifícios presentes na bacia. Não obstante, o nível de detalhe do MDT pode ser alterado construído com um menor nível de detalhe e resolução com o objetivo de diminuir o tempo de análise. Quanto maior for a resolução do MDT maior será o número de iterações realizadas pelos modelos hidrodinâmicos para atingir os resultados pretendidos.

A rede de drenagem tem um papel fundamental quando a bacia se localiza

em áreas bastante artificializadas, devendo conseguir-se um compromisso entre o pormenor da rede utilizada e a capacidade de modelação. Mais uma vez, quanto maior pormenor tiver a rede de drenagem maior será o tempo de processamento do modelo, podendo mesmo torna-lo instável.

As fontes de informação para este primeiro grupo de informação consistem, fundamentalmente, em dados obtidos junto dos serviços municipais (topografia e sistemas artificiais de drenagem) ou levantamentos realizados por instituições governamentais^{xviii} (topografia). No entanto, e dependendo da localização ou do detalhe pretendido pode ser necessário efetuar-se um levantamento topográfico próprio, recorrendo-se com frequência a levantamentos Lidar^{xix} (*Laser Detection and Ranging*). Resta referir que a obtenção dos sistemas artificiais de drenagem devidamente caracterizados (altura e localização dos coletores, perímetro e forma das condutas, etc.) é especialmente difícil, visto tratarem-se de estruturas que se encontram em funcionamento há muitos anos e a prática do seu levantamento e caracterização sistematizada nem sempre se encontra implementada.

O segundo grupo de dados a obter corresponde ao uso e ocupação do solo. Esta recolha de informação tem como objetivo a definição dos diferentes elementos constituintes da bacia e a atribuição de múltiplos critérios tanto de impermeabilização como de rugosidade, de forma a simular o mais corretamente possível o comportamento da água na bacia hidrográfica em estudo.

^{xviii} Sendo exemplo o Instituto Geográfico Português ou o Instituto Geográfico do Exército.

^{xix} Esta técnica consiste num sistema Laser Aerotransportado, que faz a medição direta de elevações.

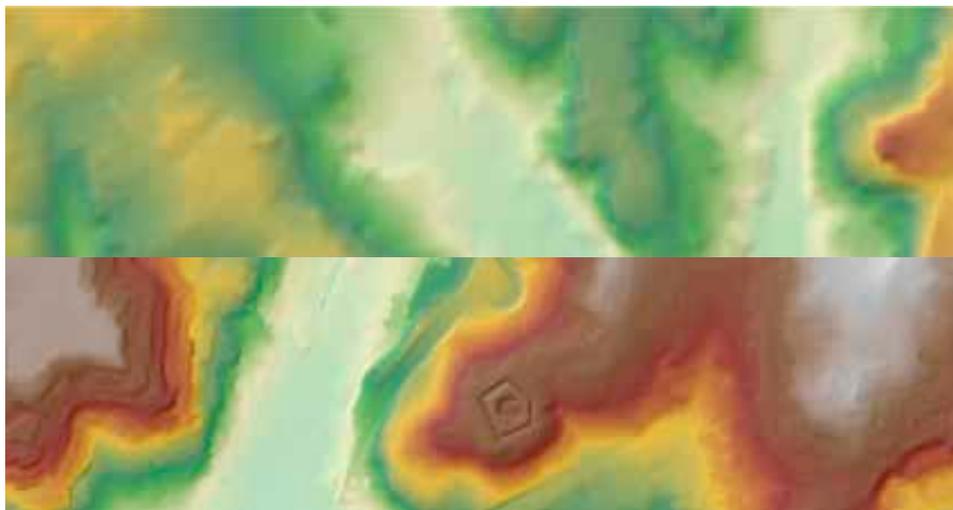


Figura 13. Modelo digital de terreno com resolução vertical de 0.001 metros e resolução espacial horizontal de 10 metros - imagem superior (parte central da cidade de Lisboa) e de 5 metros - imagem inferior (zona de Algés). Fonte: produção do autor com recurso a dados da Câmara Municipal de Lisboa, Câmara Municipal de Oeiras e Município I.M., S.A.



Figura 14. Cartas com informação de uso e ocupação do solo. Fonte: produção do autor com recurso a dados da Câmara Municipal de Lisboa e Agencia Europeia do Ambiente^{xxii}.

Normalmente os organismos europeus recomendam a utilização de cartas como a *Corine Land Cover*^{xx} (unidade mínima cartografada de 25 hectares), embora existam outras fontes com informação mais detalhada como a Carta de Ocupação do Solo^{xxi} (COS2007 – unidade mínima carto-

xx <http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/corine-land-cover-2006-raster> (consultado 10/2013).

xxi <http://www.igeo.pt/produtos/CEGIG/Cos2007.htm> (consultado 10/2013).

grafada de 1 hectare), a fotointerpretação, a cartografia municipal, entre outras (ver e.g. Bruijn et al., 2009, Julião et al., 2009).

O terceiro e último grupo de dados correspondem a informações históricas, sendo informação de grande importância tanto para efeitos de calibração como de validação dos modelos hidrodinâmicos. As

xxii <http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/urban-atlas> (consultado 10/2013).

informações a serem recolhidas incluem: mapas de inundações previamente executados; registos históricos dos níveis de caudal; registos históricos e trabalhos prévios sobre a velocidade de escorrência e marcas de inundação (ex.: em edifícios ou outras estruturas); recolha de eventos de inundação através de fontes secundárias (ex.: notícias de jornais); recurso a fotografias aéreas e imagens de satélite, uma vez que a deteção remota pode trazer informações relevantes para validar modelos através da comparação entre os resultados obtidos pela modelação hidrodinâmica de um determinado evento com a imagem obtida desse mesmo evento (EXCIMAP, 2007).

resultados a obter

Os modelos hidrodinâmicos são aconselhados para a modelação de inundações, tendo como finalidade a produção de cartas de risco. Estes permitem obter, para um determinado episódio de inundação, as áreas inundáveis; a profundidade da inundação (como resultado da diferença entre o nível de inundação e o terreno) e a distribuição da velocidade e direção do caudal (caso se utilize modelos 2D). Esse episódio terá associado uma determinada probabilidade de ocorrência que se traduz no seu período de retorno. A conjugação de um ou vários elementos que

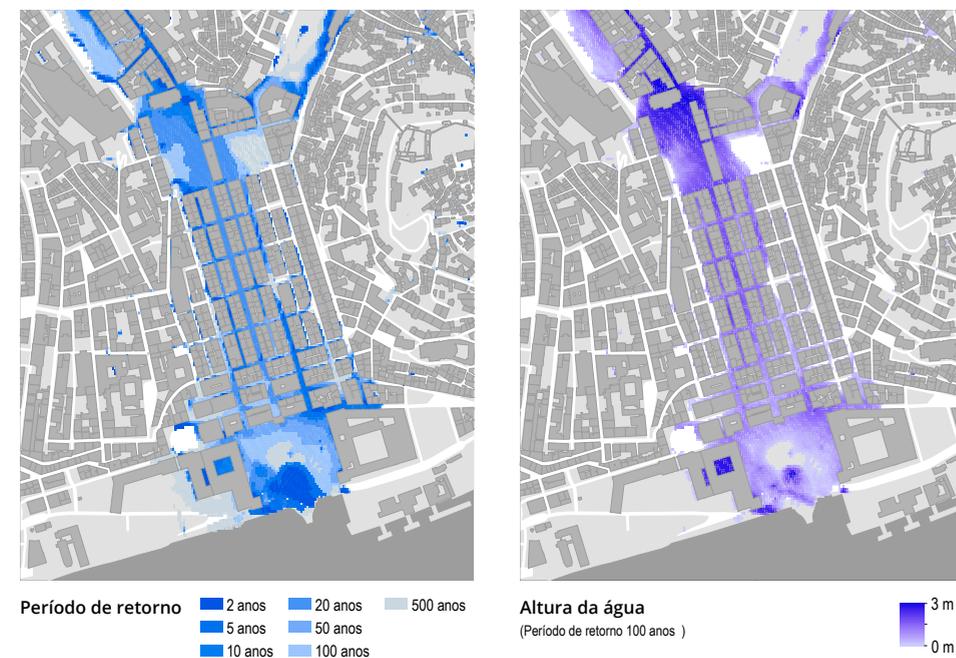


Figura 15. Cartas de Perigosidade de inundação da bacia da baixa - Avenida Almirante Reis - Avenida da Liberdade. Esquerda - extensão da inundação associada a diferentes probabilidades (períodos de retorno). Direita - profundidade de inundação para o período de retorno de 100 anos. Fonte: produção do autor com recurso a dados da Câmara Municipal de Lisboa e da modelação hidrodinâmica.

caracterizam a inundação com a probabilidade de ocorrência dessa inundação permite-nos obter mapas de perigosidade (EXCIMAP, 2007).

São ilustrados na Figura 15 alguns dos resultados obtidos após modelação das inundações para a bacia hidrográfica em estudo. Esta modelação é realizada com base numa grelha com resolução espacial de quatro metros que considera os edifícios presentes ao longo da bacia. Foram calculadas as alturas da água máxima resultantes da precipitação associada à respetiva probabilidade de ocorrência, para todos os períodos de retorno considerados e pontos da grelha.

avaliação de risco de inundação e produção de cartografia

Após a caracterização das inundações da área em estudo inicia-se o processo de avaliação de risco, sendo necessária a obtenção e tratamento de diversas informações. Estas podem ser definidas em três grandes grupos, consistindo i) na caracterização dos elementos presentes nas áreas inundáveis, ii) na definição de critérios que relacionem as características da inundação com o dano causado nos elementos expostos e iii) na quantificação do risco para esses elementos. Estes dados terão um maior ou menor detalhe consoante o âmbito da análise, ou seja, se o território a avaliar consistir numa bacia hidrográfica de grandes dimensões (ex. o rio Tejo) então o

detalhe dos elementos expostos traduzidos na ocupação do solo será menor do que numa bacia de pequenas dimensões (EXCIMAP, 2007).

Também os critérios para a avaliação do risco podem ser mais ou menos detalhados mediante o objetivo da análise. Estes podem incluir fatores sociais, ambientais, económicos, etc. (Meyer et al., 2009c), sendo apresentado na Figura 16, de forma esquemática, um procedimento que pode ser adotado para a avaliação do risco de inundações considerando vários fatores. Neste esquema é destacado a azul o procedimento explorado neste guia, que corresponde à avaliação de risco para diferentes categorias de edificado.

informação necessária

Após serem realizados todos os procedimentos para a obtenção das áreas inundáveis associadas a diferentes períodos de retorno^{xxiii}, é necessário fazer-se o levantamento dos elementos expostos. Os organismos europeus sugerem de forma mais ou menos direta a utilização da carta de uso e ocupação do solo *Corine Land Cover* para este fim (EXCIMAP, 2007). Sendo uma cartografia realizada segundo os mesmos critérios para todos os estados membros da União Europeia, a sua utilização é indicada para a avaliação do risco em bacias transnacionais e de grandes dimensões. No entanto se a escala de análise consiste numa bacia hidrográfica de pequenas dimensões esta carta é insuficiente pois apenas dispõe de informação de elementos com uma área superior ou igual a 25 hectares. Neste sentido é necessário recorrer-se

xxiii Como descrito na secção *Modelação Hidrológica*

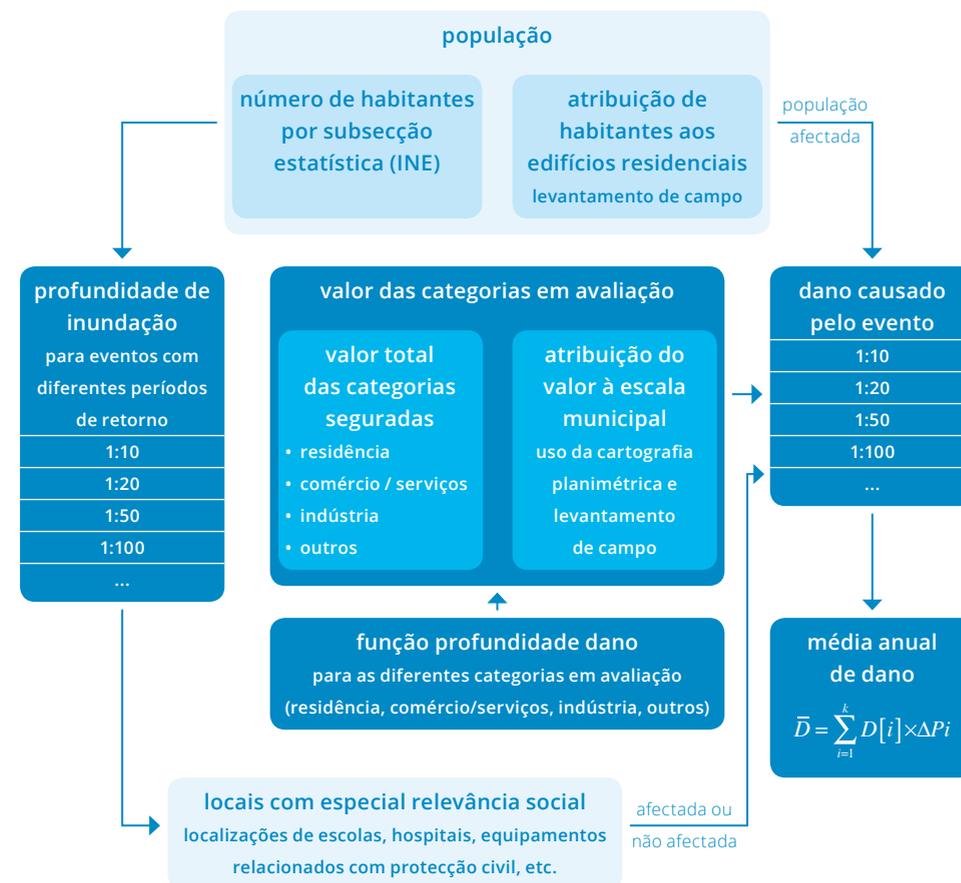


Figura 16. Esquema de procedimento metodológico para a avaliação socioeconómica do risco de inundação considerando a população, o valor económico dos elementos expostos e os equipamentos fundamentais e mais vulneráveis em caso de inundação. A azul destaca-se o procedimento abordado neste guia. Fonte: adaptado de Meyer et al. (2009c).

a outras fontes ou mesmo executar um levantamento dos elementos expostos. Este é o caso do exemplo que ilustra este guia, onde se procura avaliar o risco associado a cada edifício, com base numa série de curvas de dano, construídas para diferentes ocupações e características de edifícios. Neste sentido é necessária informação mais detalhada dos elementos expostos, nomeadamente o número de pisos de cada edifício e as funções localizadas no

rés-do-chão e cave. A decisão do número de elementos a caracterizar e do detalhe desse levantamento tem em conta dois critérios. O primeiro diz respeito à extensão da inundação para o período de retorno mais elevado. Ou seja é razoável proceder-se apenas ao levantamento dos elementos que são efetivamente afetados pelas inundações (Merz et al., 2007, Schanze et al., 2006, Meyer et al., 2009c). O segundo refere-se aos critérios que se pretendem

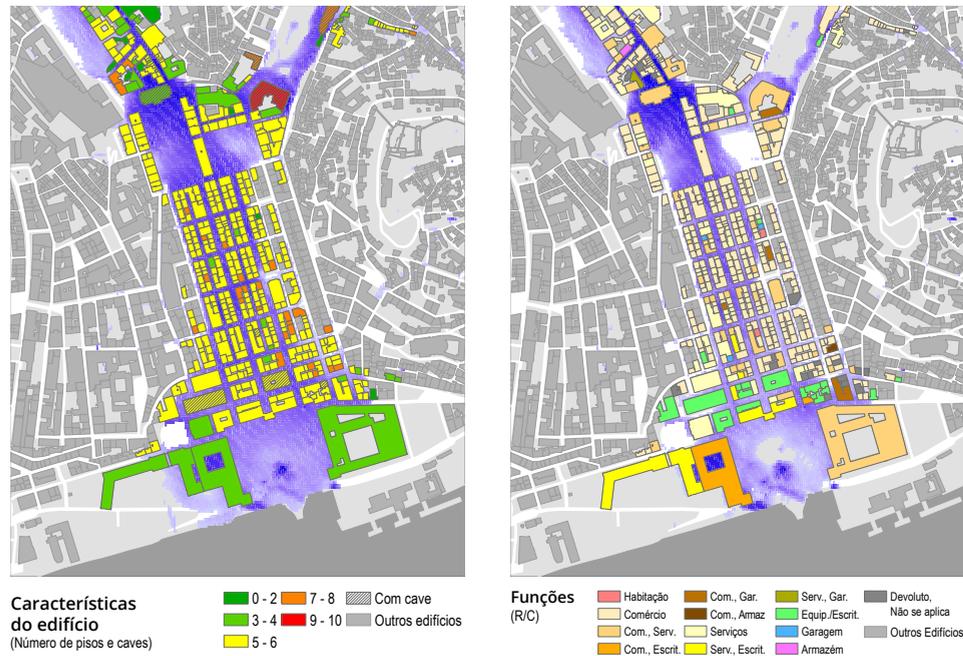


Figura 17. Mapas de elementos expostos. Número de pisos (esquerda) e funções dos edifícios no rés-do-chão (direita), exposto a uma inundação com o período de retorno de 500 anos. Fonte: produção do autor com recurso a dados da Câmara Municipal de Lisboa e da modelação hidrodinâmica.

Tabela 14. Elementos levantados relativos à caracterização e ocupação dos diferentes edifícios expostos na bacia em estudo. Os elementos relacionados com a ocupação do edifício foram recolhidos tanto para o rés-do-chão como para a cave. Este levantamento é necessariamente georreferenciado e armazenado num SIG.

Características do edifício	Ocupação (R/C e Cave)	
Nº de andares	Habitação	Comércio
Existência de Cave	Serviços	Equipamentos/Escritórios
Devolutos	Armazém	Garagem

avaliar. Tendo em atenção as categorias de dano ilustradas na Figura 3, os elementos a serem levantados devem conter o detalhe necessários para a aplicação de cada uma das curvas de dano apresentada nessa mesma figura.

Na Figura 17 são mostrados dois exemplos dos resultados do levantamento

realizado para a bacia avaliada, como resultado dos elementos recolhidos para esta avaliação (Tabela 14). É importante sublinhar que estes são os elementos necessários para a avaliação do risco de inundações neste caso específico, tendo de se adaptar a caracterização dos elementos expostos ao contexto em que se pretende realizar a avaliação.

obtenção e aplicação de curvas de dano

As curvas de dano relacionam uma determinada característica da inundação com o prejuízo causado (em unidades monetário ou percentagens) num dado elemento exposto. Visto que as características dos elementos expostos variam de forma considerável de região para região é conveniente proceder-se à construção destas curvas com recurso a dados históricos de prejuízos causados por inundações para a área em estudar (ver e.g. Bruijn et al., 2009, Meyer et al., 2009c, Wünsch et al., 2009, Meyer and Messner, 2005). Existem no entanto outras possibilidades para a definição destas curvas como a consulta a peritos, testes de resistência realizados em laboratórios de engenharia civil ou inquéritos realizados à população afetada (Dutta et al., 2003).

A bibliografia existente sobre a definição e aplicação de curvas de dano refere a sua utilização em diferentes contextos e finalidades, nomeadamente para i) a relação da velocidade e profundidade da água necessárias para uma pessoa ser arrastada (e.g. Jonkman et al., 2008); ii) o dano causado em veículos automóveis

(e.g. Xia et al., 2011); iii) o dano causado em áreas agrícolas, de pastoreio e em infraestruturas rodoferroviárias (e.g. De Moel and Aerts, 2010); iv) danos causados em edifícios com diferentes níveis de desagregação (e.g. Wünsch et al., 2009); v) curvas criadas para diferentes dimensões de indústrias e comércio (e.g. Ming-Daw Su et al., 2009), entre outros. Existem também exemplos na literatura onde a tipificação das características das inundações e dos danos causados por estas são efetuados de forma sistemática há mais de 60 anos (ver e.g. Dutta et al., 2003, Merz et al., 2004), ou ainda de definição de curvas sintéticas obtidas por especialistas (ver e.g. Veerbeek and Zevenbergen, 2009).

Presentemente não existem bases de dados com informação suficientemente sistematizada para a definição de curvas de dano no território nacional. Por conseguinte, as curvas adotadas neste guia resultam da literatura e na consulta a peritos nesta área, sendo esta consulta realizada com o objetivo de se escolher as que tenham uma maior adequação à realidade nacional. Desta forma as curvas aplicadas são adaptadas do estudo *Micro-scale Risk Evaluation of Flood-prone Coastal Lowlands*, publicadas em diferentes estudos (ver e.g. Meyer and Messner, 2005, Sterr et al., 2005). Através

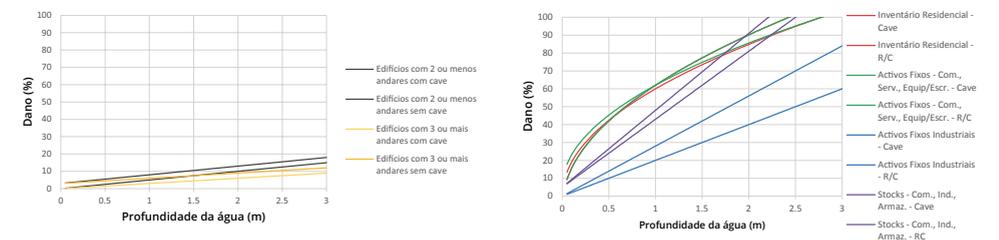


Figura 19. Curvas profundidade-dano utilizadas no cálculo de risco para a estrutura do edifício (esquerda) e para os seus conteúdos (direita). Fonte: adaptado de Markau (2003) e de Reese et al. (2003).

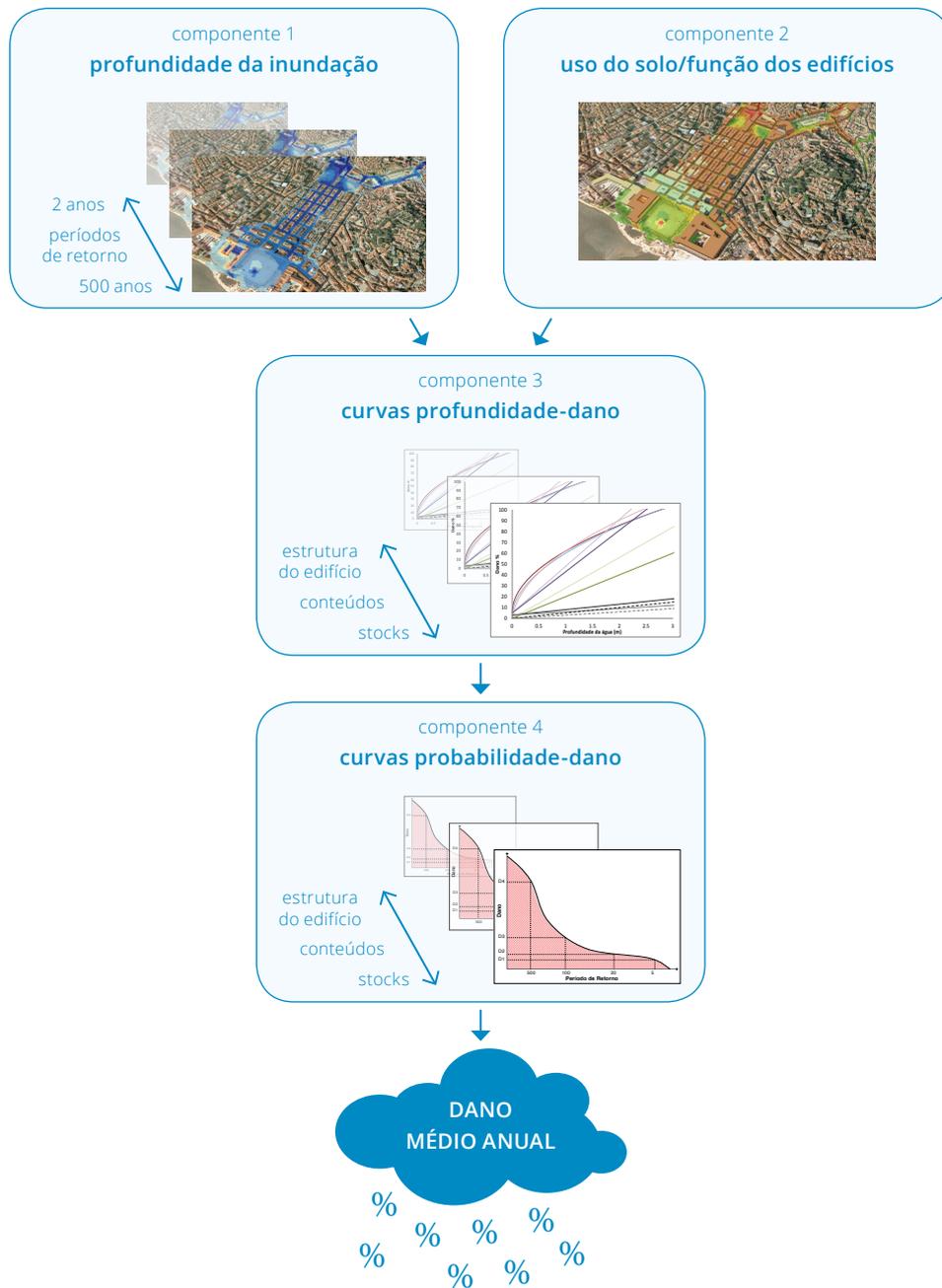


Figura 18. Esquema metodológico para a avaliação de Risco de inundação com recurso a curvas profundidade-dano. Fonte: adaptado de De Moel and Aerts (2010)

Tabela 15. Expressões matemáticas utilizadas em cada categoria de dano na avaliação de risco, onde Y corresponde ao dano causado em percentagem e x à altura da água. Fonte: adaptado de Markau (2003) e de Reese et al. (2003).

		Categoria de dano	Função	
Estrutura ^{xxiv}	Edifício com dois ou menos andares	Sem cave	$Y = 5x$	
		Com cave	$Y = 3 + 5x$	
	Edifício com três ou mais andares	Sem cave	$Y = 3x$	
		Com cave	$Y = 3 + 3x$	
Inventário residencial ^{xxv}		Cave	$Y = 68\sqrt{x} - 6$	
		R/C	$Y = 60\sqrt{x}$	
Conteúdo	Ativos Fixos ^{xxvi}	Comércio, serviços, escritórios e equipamentos	Cave	$Y = 68\sqrt{x} - 6$
			R/C	$Y = 57\sqrt{x} + 5$
		Industriais	Cave	$Y = 28x$
		R/C	$Y = 20x$	
	Stocks - comércio, indústria, armazéns	Cave	$Y = 5 + 43x$	
	R/C	$Y = 3 + 38x$		

da aplicação destas curvas são obtidas percentagens de dano associadas à altura da água da inundação. Por este motivo estas curvas são designadas como curvas profundidade-dano.

Cada curva apresentada na Figura 19 dispõe de uma fórmula matemática a ser aplicada consoante as características dos elementos a avaliar. Estas são apresentadas na Tabela 15 onde se divide as categorias de dano em estrutura e conteúdos do edifício. As fórmulas associadas à estrutura permitem calcular o dano para todo o edifício, enquanto as fórmulas associadas ao conteúdo possibilitam a diferenciação do cálculo do dano para o rés-do-chão ou

para a cave consoante o piso onde uma determinada atividade é realizada.

Com a definição das curvas de dano e estando previamente realizado o levantamento dos elementos expostos e a modelação hidrológica com resultados para a altura da água em diferentes períodos de retorno, estão recolhidos os elementos necessários para a operacionalização da avaliação do risco. Esta avaliação é normalmente efetuada com recurso a sistemas de informação geográfica (SIG). A metodologia abaixo descrita baseia-se no caso de estudo da baixa de Lisboa para a categoria de dano dos ativos fixos do comércio, serviços escritórios e equipamentos localizados no rés-do-chão - doravante designada como ativos fixos não industriais (R/C).

O primeiro passo da avaliação de risco consiste na atribuição da altura da água, obtida através da modelação hidrológica, aos elementos expostos, que neste caso específico são os edifícios.

^{xxiv} O termo estrutura de edifício deve ser interpretada de forma lata compreendendo, para além dos elementos estruturantes dos prédios, as suas paredes, os revestimentos as redes de abastecimento e restantes elementos que fazem parte integrante do edifício.

^{xxv} Entende-se por inventário residencial todos os bens que se encontram numa fração com uso habitacional.

^{xxvi} Bens imóveis localizados de forma permanente dentro de uma fração ou edifício (ex.: máquinas industriais, servidores, câmaras frigoríficas, etc.)

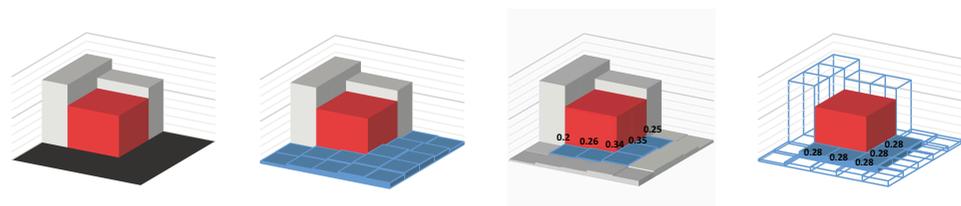


Figura 20. Exemplo da afectação da altura da água ao edifício. A vermelho representa-se um determinado edifício e a azul os pixels que contêm a altura da água. (a) edifícios sem inundação, (b) edifícios com a grelha onde se encontra armazenada a altura da água, (c) selecção dos pixels da grelha próximos ao edifício, (d) cálculo da média dos pixels seleccionados em (c). Fonte: produção do autor.

Tendo presente que num SIG a altura da água de uma inundação, obtida por qualquer modelo hidrodinâmico, é armazenada numa estrutura em grelha e os edifícios são representados através de polígonos, é necessário executar alguns procedimentos para a afetação dos valores dessa grelha aos polígonos. Tomando como exemplo um único edifício sobreposto à informação da altura da água, teremos vários pixels da grelha contíguos ou próximos do polígono que representa esse edifício (Figura 20 – b). Os valores mais próximos desse polígono serão aqueles que o irão afetar nesse cenário de inundação. Neste sentido estes serão os pixels seleccionados (Figura 20 – c) para calcular a média dos valores da altura da água no edifício (Figura 20 – d). Este valor é então atribuído ao polígono que representa o edifício. Note-se que para todos os períodos de retorno avaliados, a localização e o número de pixels seleccionados para um determinado edifício devem ser equivalentes.

Após esta operação e com a aplicação direta da função que descreve a curva de profundidade-dano aos diferentes polígonos que contêm a média da altura da água da inundação, obtemos uma percentagem de dano. Tomando como exemplo a curva para a categoria de dano ativos fixos não industriais (R/C) - descrita na Tabela 16, o dano da inundação representada na Figura 20 será igual a $68\sqrt{0.28} - 6$. Isto equivale a um dano aproximadamente igual 30% do total dos ativos fixos não industriais presentes no rés-do-chão desse edifício. Este cálculo terá de ser executado para todos os edifícios da bacia onde as atividades económicas referidas estão presentes.

Para ilustrar os procedimentos necessários para o cálculo do dano de uma bacia de pequenas dimensões com recurso a um SIG, tomemos como exemplo a Baixa de Lisboa, a inundação que aí ocorre com um período de retorno de 500 anos e a categoria de dano ativos fixos não industriais

Tabela 16. Função de dano para o cálculo de risco dos ativos fixos não industriais (R/C).

Categoria de dano			Função
Conteúdo	Ativos fixos	Comércio, serviços, escritórios, etc.	R/C
			$Y = 68 + \sqrt{x} - 6$

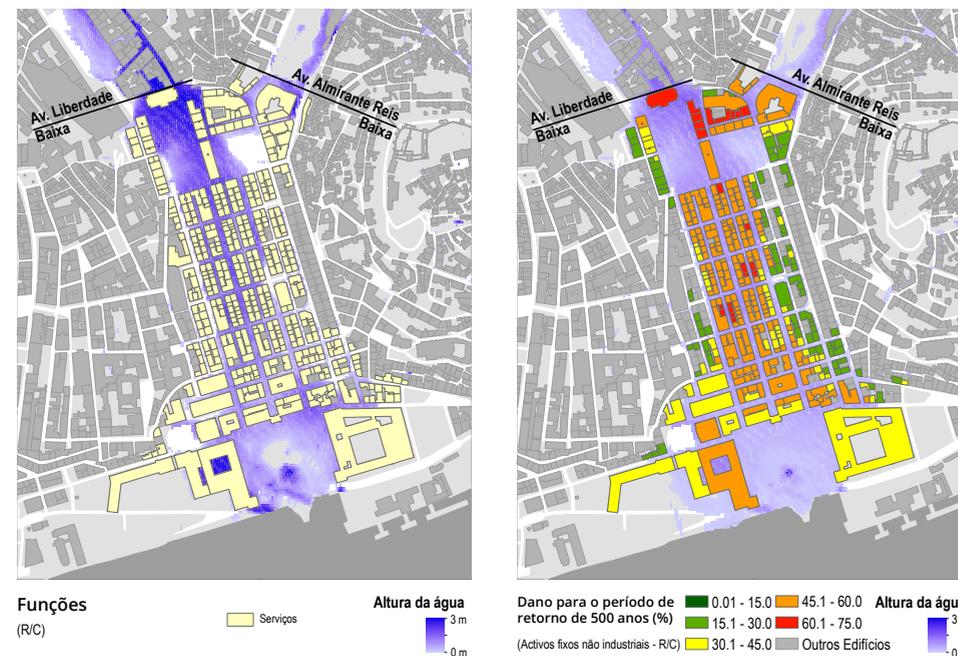


Figura 21. Seleção dos edifícios com atividades de comércio, serviço, equipamentos e escritórios localizados no rés-do-chão (a). Aplicação da curva de dano relativa aos ativos fixos - comércio, serviços, equipamentos e escritórios localizados no rés-do-chão para a altura da água de uma inundação com período de retorno de 500 anos (b). Fonte: produção do autor com recurso a dados da Câmara Municipal de Lisboa e da modelação hidrodinâmica.

(R/C). Os procedimentos necessários para esse cálculo encontram-se ilustrados na Figura 21, sendo realizados após a afetação da altura da água aos edifícios para o período de retorno de 500 anos. Nesta figura a imagem (a) corresponde à seleção dos edifícios onde existem ativos fixos não industriais no rés-do-chão e a imagem (b) resulta da aplicação da função da Tabela 16 aos edifícios previamente seleccionados.

Esta operação permite obter o dano expectável para uma inundação com um período de retorno de 500 anos, que para o caso ilustrado varia entre 0 e 75% relativamente aos edifícios com atividades não industriais associadas ao rés-do-chão.

A média dos danos na baixa de Lisboa para um evento com esta magnitude e nesta categoria de dano é de 44.66%. Teoricamente, para se calcular o risco da inundação associado a este período de retorno, seria ainda necessário multiplicar o dano obtido para cada edifício pela probabilidade de ocorrência do evento. Esta operação vai distribuir o valor do dano pelo número de anos que, em termos médios, a inundação demora a ocorrer. No entanto o que seria obtido consistiria apenas no dano médio anual para uma inundação com estas características e não o dano médio de todas as inundações que poderão ocorrer nesta secção da bacia. Este objetivo é conseguido através da construção de curvas probabilidade-dano,

processo que será explicado com maior pormenor na próxima secção.

cálculo do dano médio anual

O cálculo do dano médio anual resultante de inundações é obtido através de uma aproximação que pretende representar todos os eventos que, teoricamente, podem ocorrer numa dada bacia. Esta aproximação resulta da construção de curvas probabilidade-dano (Meyer et al., 2009a). Como referido a média do dano para o período de retorno de 500 anos dos ativos fixos não industriais (R/C) para a secção da bacia ilustrada é de 44.66%. Se se colocar este valor num gráfico onde o eixo das ordenadas corresponde à percentagem de dano e o eixo das abcissas às diferentes probabilidades associadas aos períodos de retorno avaliados (que neste caso são as probabilidades de não excedência de 0.5, 0.2, 0.1, 0.05, 0.02, 0.01 e 0.002) obtemos o primeiro ponto da curva probabilidade-dano (Figura 22).



Figura 22. Representação gráfica da média do dano dos ativos fixos não industriais (R/C) para o período de retorno de 500 anos. Fonte: produção do autor.

Os restantes pontos serão obtidos com o cálculo do dano médio da área para as inundações associadas aos diferentes períodos de retorno modelados. O método para estes cálculos é idêntico ao descrito para o período de retorno de 500 anos, apresentando-se na Figura 23 o resultado desses cálculos para o período de retorno de 10, 50 e 100 anos. Os valores médios de dano para estes períodos de retorno na categoria de dano ativos fixos não industriais (R/C) são respetivamente de 6.74%, 18.46% e 26.94%. Os restantes valores associados aos períodos de retorno avaliados correspondem a 2.02% (2 anos), 4.3% (5 anos) e 15.85% (20 anos).

Concluída a quantificação do dano para todos os períodos de retorno modelados e as respetivas médias do dano da área em avaliação, temos os dados necessários para terminar a construção da curva probabilidade-dano da Figura 23. Colocando nesse gráfico os restantes valores de dano

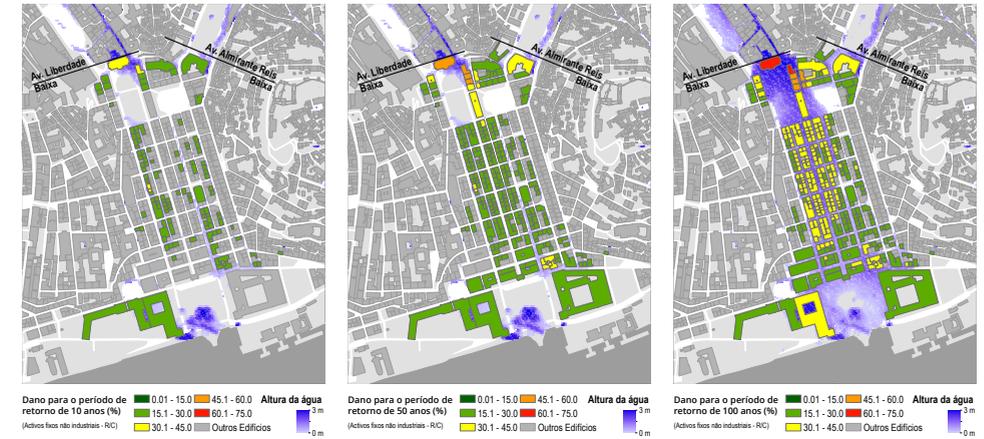


Figura 23. Cálculo do dano para diferentes períodos de retorno (10, 50 e 100 anos). Fonte: produção do autor com recurso a dados da Câmara Municipal de Lisboa e da modelação hidrodinâmica.

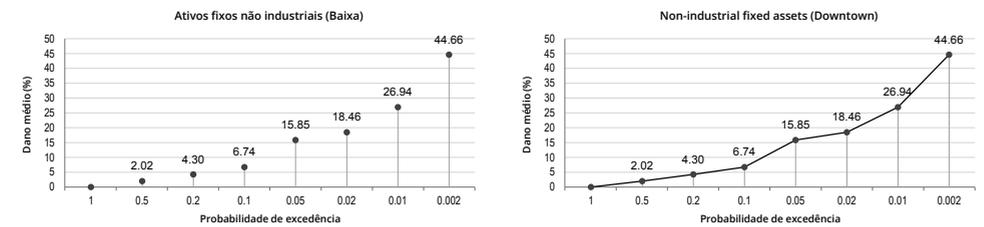


Figura 24. Valores de dano associados a diferentes probabilidades de ocorrência (esquerda) e a sua interpolação para a definição da curva probabilidade-dano dos ativos fixos não industriais - R/C (direita). Ambos os gráficos não têm uma escala linear atribuída ao eixo das abcissas. Fonte: produção do autor.

em conformidade com a probabilidade de não excedência a que se referem, obtêm-se sete pontos que, após a sua interpolação, resultam na curva probabilidade-dano para os ativos fixos não indústrias localizados no rés-do-chão dos edifícios da baixa de Lisboa (Figura 24).

Normalmente a inundações com o período de retorno de dois anos é modelada para confirmar que os valores dessa precipitação não têm qualquer consequência na avaliação de risco. Verificada esta situação

a curva probabilidade-dano tem o seu início na probabilidade de excedência associada a esse período de retorno. No caso da secção da bacia em estudo verifica-se que neste período de retorno já existe dano, significando que a curva tem o seu início num período de retorno mais baixo. Esta situação está relacionada com a entrada em carga de alguns coletores de águas pluviais da cidade de Lisboa já identificadas em estudos anteriores (ver EMARLIS, 2007).

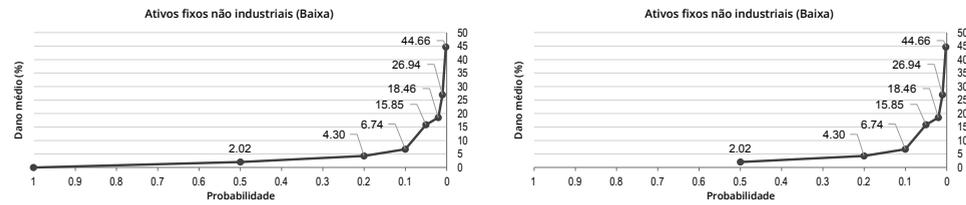


Figura 25. Curvas probabilidade dano para os ativos fixos não industriais (R/C) localizados na baixa de Lisboa segundo a abordagem (a) – esquerda - e (b) - direita. Ambos os gráficos têm uma escala linear atribuída ao eixo das abscissas. Fonte: produção do autor.

Tabela 17. Exemplo de cálculo necessário para a obtenção do dano médio anual dos ativos fixos não industriais (R/C), aplicada à abordagem (a).^{xxvii} Os valores apresentados encontram-se arredondados à segunda casa decimal.

i	Probabilidade (P)	Dano (D)	$D[i] = \frac{D(P_{i-1}) + D(P_i)}{2}$	$\Delta P[i] = P_i - P_{i-1} $	$D[i] \times \Delta P_i$
1	0.5	2.02	1.01	0.5	0.51
2	0.2	4.30	3.16	0.3	0.95
3	0.1	6.74	5.52	0.1	0.55
4	0.05	15.85	11.28	0.05	0.56
5	0.02	18.46	17.16	0.03	0.51
6	0.01	26.94	22.7	0.01	0.23
7	0.002	44.66	35.8	0.008	0.29

$$\bar{D} = \sum_{i=1}^K D[i] \times \Delta P_i = 3.60$$

Quando a curva probabilidade-dano não tem um valor nulo para o período de retorno de 2 anos pode-se optar por diferentes aproximações para se ultrapassar essa situação. Uma das possibilidades consiste na assunção de que mesmo após a verificação da existência de dano neste período de retorno, a curva termina neste ponto (ver e.g. Veerbeek and Zevenbergen, 2009, Ernst et al., 2010), aceitando-se a subestimação do valor dos danos médios anuais que daí advém (abordagem (b) da Figura 25). Outra possibilidade consiste no prolongamento da curva até ao período de retorno teórico de um ano atribuindo a este ponto o valor de media de dano zero, assumindo-se uma sobrestimação dos danos (abordagem (a) da Figura 25).

Apesar destas aproximações permitirem uma aproximação ao dano médio anual, é conveniente obter-se a probabilidade a partir da qual o dano é efetivamente zero, implicando todavia um aumento do número de períodos de retorno a ter em conta na avaliação de risco (Ward et al., 2011).

Após a construção da curva probabilidade dano pode-se calcular o dano médio anual da categoria de dano a que essa curva se refere. Como referido na secção Curvas Probabilidade-Dano, esse dano médio anual é obtido através do cálculo da área que se encontra abaixo da curva probabilidade

^{xxvii} Para se obter o valor de $D[1]$ e $P[1]$ considerou-se que $D_0 = 0$ e $P_0 = 1$, conforme descrito para a abordagem (a).

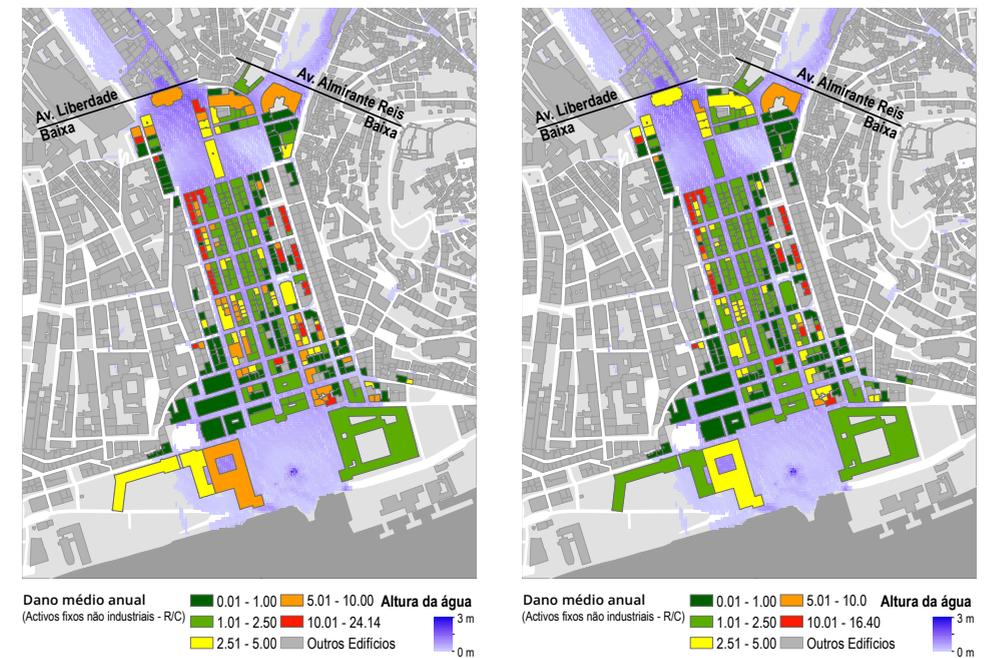


Figura 26. Dano médio anual obtido através da aproximação (a) – esquerda - e (b) – direita – para cada edifício da baixa potencialmente afetado por inundações. Fonte: produção do autor com recurso a dados da Câmara Municipal de Lisboa e da modelação hidrodinâmica.

dano, existindo diferentes abordagens para esse cálculo. A primeira das quais consiste no cálculo do integral da função que define a curva. Neste caso será necessário definir essa função com recurso a um gráfico em que ambos os eixos tenham uma escala linear e onde a curva esteja representada. Serve de exemplo para esta abordagem os gráficos apresentados na Figura 25. No entanto, e como também referido anteriormente, é mais habitual recorrer-se a uma aproximação do cálculo desta área recorrendo-se às equações (7) e (8).

A Tabela 17 sintetiza os procedimentos a adotar para a obtenção do dano médio anual, tomando como exemplo a categoria de dano ativos fixos não industriais (R/C).

Neste caso, é expectável uma perda anual que ronda os 3.6% do total de ativos fixos não industriais, localizados no rés-do-chão dos edifícios presentes na parte da bacia hidrográfica correspondente à baixa de Lisboa. No entanto, este valor resulta da avaliação individual de cada edifício, que foi realizada em ambiente SIG, tornando-se possível espacializar a informação e apresentar o risco para cada edifício avaliado (Figura 26).

Terminada a quantificação das perdas relativas a esta categoria de dano será necessário aplicar todos os passos descritos para esta quantificação às restantes categorias que se pretenderem avaliar. No caso que serve de exemplo a este guia (Tabela

15) ter-se-á ainda de calcular o dano para os ativos fixos localizados na cave dos edifícios, bem como os ativos fixos industriais, o inventário residencial e os stocks. Estas três categorias de dano têm de ser avaliadas separadamente para a cave e para o rés-do-chão à imagem do que ocorre para os ativos fixos industriais. Resta referir a categoria de dano relacionada com a estrutura do edifício apresentada na Tabela 15. Nesta são indicadas quatro fórmulas a aplicar consoante o número de pisos e a ausência ou presença de caves. A quantificação do dano desta categoria resulta da aplicação direta da fórmula correspondente à característica do edifício em causa (tendo em atenção o número de andares e a existência ou ausência de caves), sendo os restantes procedimentos idênticos aos das restantes categorias de dano.

resultados a obter

A Tabela 18 resume os resultados da aplicação desta metodologia para todas as categorias de dano. Nesta tabela são apresentados os valores correspondentes à área da Baixa cuja obtenção ilustra este guia e também os resultados correspondentes aos troços da bacia que se desenvolvem ao longo da Avenida da Liberdade e da Avenida Almirante Reis. Note-se que os danos não são exclusivos destas duas Avenidas, integrando todas as áreas que as circundam e que no seu conjunto correspondem à sub-bacia da Avenida da Liberdade e da Avenida Almirante Reis. São ainda incluídos os valores totais de toda a bacia.

Para cada uma destas categorias de dano é possível a espacialização da informação através de mapas de risco como exemplificado para os ativos fixos não industriais

(R/C) na Figura 26. Podendo considerar-se que a avaliação de risco se encontra terminada, alguns autores propõem ainda formas de agregar toda a informação das diferentes componentes do dano, num único mapa ou indicador (ver e.g. Meyer et al., 2009c).

agregação das categorias de dano

A execução de tal agregação é conseguida através da atribuição de pesos a cada uma dessas categorias de dano que reflitam a sua importância relativamente às restantes. Normalmente esta operação resulta da consulta a especialistas na área, existindo várias formas de o fazer. A mais indicada consiste na realização de inquéritos individuais, embora as entrevistas em grupo também sejam possíveis mas com maiores limitações devido a enviesamentos causados pela maior influência de certas pessoas em relação a outras (CE, 2004). A importância desta consulta é definida por vários autores como o ponto crucial da participação das partes interessadas em toda a análise de risco, no caso de se pretender a agregação da informação do dano num único mapa ou indicador (ver e.g. Bruijn et al., 2009, Schmidt-Thomé et al., 2006).

Existindo várias metodologias para definir os pesos a atribuir a cada critério (ver Malczewski, 1999), são seguidamente ilustrados os procedimentos para a aplicação de apenas uma dessas metodologias. Essa metodologia é designada por pairwise comparison method (PCM) para múltiplos decisores e foi escolhida por ser uma das mais adequadas neste contexto (Malczewski, 1999).

O PCM consiste numa tabela de dupla entrada onde é pedido a cada interveniente,

Tabela 18. Resultado do cálculo do dano médio anual para as diferentes categorias de dano aplicadas a parte bacia em avaliação. São mostrados os valores para a totalidade da bacia e desagregado por áreas (Baixa, Av. Liberdade, Av. Almirante Reis). Na coluna referente ao dano o primeiro valor apresentado, para uma determinada categoria, foi obtido através da abordagem (b)^{xxviii} e o segundo através da abordagem (a). Os valores de dano médio anual encontram-se arredondados à segunda casa decimal.

	Total da bacia		Baixa		Av. Liberdade		Av. Almirante Reis	
	Dano (%)	Elementos expostos	Dano (%)	Elementos expostos	Dano (%)	Elementos expostos	Dano (%)	Elementos expostos
Estrutura do edifício	0.13 0.18	1001	0.04 0.06	368	0.22 0.29	285	0.14 0.20	348
Inventário Residencial CV	0.02 0.04	1	0 0	0	0.02 0.04	1	0 0	0
Inventário Residencial RC	4.38 6.28	103	4.03 5.92	2	4.13 5.94	37	4.53 6.50	64
Ativos Fixos não industriais CV	4.22 6.00	16	2.78 3.69	2	4.20 5.97	9	4.82 6.98	5
Ativos Fixos não industriais RC	4.62 6.75	853	2.42 3.60	363	7.37 10.57	230	5.27 7.75	260
Ativos Fixos industriais CV	0.03 0.05	1	0 0	0	0 0	0	0.03 0.05	1
Ativos Fixos industriais RC	0	0	0	0	0	0	0	0
Stocks RC	2.44 3.47	53	0.72 1.1	4	2.72 3.83	27	2.40 3.45	22
Stocks CV	2.07 2.94	782	1.02 1.48	318	3.32 4.59	220	2.31 3.34	244

que escolha qual a importância de um elemento relativamente a outro. A Tabela 19 ilustra a forma de preenchimento da tabela para uma das categorias de dano, neste caso, a estrutura do edifício. Sendo um procedimento para múltiplos decisores é pedido a cada perito que preencha as células da tabela com o valor de 1 (mais importante) e 0 (menos importante), mediante

a sua opinião, devendo a sua leitura ser feita da categoria de dano identificada na coluna em relação à da linha. Como exemplo e observando a Tabela 19, se o entrevistado considerar que a estrutura do edifício é mais importante que o inventário residencial então deve atribuir o valor 1 à célula que fica na interceção da coluna da estrutura do edificado (a) com a linha do inventário

^{xxviii} Esta abordagem não é explorada de forma pormenorizada neste documento, sendo no entanto de referir que os resultados obtidos não resultam diretamente da curva apresentada na Figura 25 que apenas objetiva a ilustração desta abordagem. Nesta abordagem apenas são contabilizados os danos a partir do período de retorno em que um determinado edifício é afetado. Como exemplo

se um edifício é impactado a partir do período de retorno de 50 anos, então a curva desse edifício apenas é iniciada nesse ponto. Os valores apresentados na Figura 25 ilustrativos da abordagem (b) não refletem estas situações. No entanto os valores contabilizados em todos os resultados desta abordagem ao longo deste documento, refletem essas situações.

residencial (2) e o valor 0 à célula que fica na interseção da coluna inventário residencial (b) com a linha estrutura do edifício (1).

O entrevistado deve ter em especial atenção que é relativamente fácil dar respostas incoerentes durante o preenchimento da matriz. Como exemplo, o entrevistado pode afirmar, através do preenchimento da matriz, que a estrutura do edifício é mais importante do que o inventário residencial e que o inventário residencial

é mais importante que os ativos fixos não industriais. No entanto o mesmo entrevistado pode indicar na mesma matriz que esses ativos fixos são mais importantes que a estrutura do edifício. Esta ordem de importâncias dada às categorias de dano é teoricamente impossível, tornando a matriz incoerente. Esta situação implica uma especial atenção no seu preenchimento, sob pena do inquérito não poder ser considerado para a realização da agregação dos danos.

Tabela 19. Matriz de inquérito a preencher para a aplicação do pairwise comparison method. Fonte: adaptado de Malczewski (1999)

	Estrutura do edifício (a)	Inventário residencial (b)	Ativos fixos não industriais (c)	Ativos fixos industriais (d)	Stocks (e)
Estrutura do edifício (1)	0	0	1	1	0
Inventário residencial (2)	1	0	—	—	—
Ativos fixos não industriais (3)	0	—	0	—	—
Ativos fixos industriais (4)	0	—	—	0	—
Stocks (5)	1	—	—	—	0
Posição	$\sum a=2$	$\sum b$	$\sum c$	$\sum d$	$\sum e$

Tabela 20. Matriz preenchida com o resultado de 12 inquéritos realizados a peritos na área de seguros de inundações.

	Estrutura do edifício (a)	Inventário residencial (b)	Ativos fixos não industriais (c)	Ativos fixos industriais (d)	Stocks (e)
Estrutura do edifício (1)	0	4	8	10	10
Inventário residencial (2)	8	0	12	12	12
Ativos fixos não industriais (3)	4	0	0	8	5
Ativos fixos industriais (4)	2	0	4	0	1
Stocks (5)	2	0	7	11	0
Posição	16	4	31	41	28

Após a obtenção de um determinado número de inquéritos coerentemente preenchidos, são somadas todas as respostas obtidas em cada célula da grelha. O resultado desta operação é representado na Tabela 20 com dados reais, obtidos através de um inquérito realizado a 12 peritos que desempenham a sua atividade profissional no ramo dos seguros.

O passo seguinte no processo de obtenção do peso a atribuir às diferentes categorias de dano consiste no somatório de cada coluna da matriz para cada critério. Esta operação dá origem a uma classificação da importância das categorias de dano, embora ainda não padronizada (Tabela 20)

Para se proceder à normalização desses pesos é necessário efetuar algumas operações que se procuram ilustrados na Tabela 21.

Tabela 21. Matriz de procedimentos para o cálculos dos pesos a atribuir a cada categoria de dano, com o objetivo da construção de um único mapa ou indicador que reflita o risco global de uma área. O valor *n* corresponde ao número de inquéritos realizados. Fonte: adaptado de Malczewski (1999)

Categoria de dano	Classificação	Classe	Peso
Estrutura do edifício	$\sum a$	$a' = \sum a / (nc - n)$	$a' / \text{Domínio}$
Inventário residencial	$\sum b$	$b' = \sum b / (nc - n)$	$b' / \text{Domínio}$
Ativos fixos não industriais	$\sum c$	$c' = \sum c / (nc - n)$	$c' / \text{Domínio}$
Ativos fixos industriais	$\sum d$	$d' = \sum d / (nc - n)$	$d' / \text{Domínio}$
Stocks	$\sum e$	$e' = \sum e / (nc - n)$	$e' / \text{Domínio}$
	$\sum = nc$	$\sum = \text{Domínio}$	$\sum = 1$

Tabela 22. Matriz de cálculo dos pesos das categorias de dano com base nos 12 inquéritos realizados. Os valores apresentados encontram-se arredondados à terceira casa decimal.

Categoria de dano	Classificação	Classe	Peso
Estrutura do edifício	16	0.148	0.133
Inventário residencial	4	0.037	0.033
Ativos fixos não industriais	31	0.287	0.259
Ativos fixos industriais	41	0.380	0.342
Stocks	28	0.259	0.233
	120	1.111	1

A Tabela 22 mostra os valores obtidos para o inquérito realizado através da operacionalização dos procedimentos descritos na Tabela 21.

Obtidos os pesos para cada critério, calcula-se o risco agregado para a área em estudo. Visto que, neste caso específico, o dano medio anual é calculado separadamente para o rés-do-chão e para a cave, e as ponderações obtidas não fazem essa discriminação, é necessário calcular o valor médio de cada categoria de dano referente aos conteúdos. Ou seja, tomando como exemplo os ativos fixos não industriais e partindo do princípio que um edifício tem as atividades subjacentes a esta categoria no rés-do chão e na cave, os dois valores encontrados para esse edifício devem ser somados e o resultado dividido por dois. Por seu lado, se um edifício apenas tem um valor dessa categoria que corresponde ou

Tabela 23. Cálculo do risco agregado dos danos médios anuais obtidos para a área da baixa de Lisboa com recurso à abordagem (a). O valor de dano médio anual da estrutura do edificado é igual ao valor apresentado na Tabela 17 para esta abordagem. Os restantes valores foram calculados com recurso a um SIG conforme descrito anteriormente. Os valores de apresentados encontram-se arredondados à terceira casa decimal.

Categoria de dano	Dano, abordagem (a)	Peso	Dano ponderado
Estrutura do edifício	0.058	0.133	0.008
Inventário residencial	0.032	0.033	0.001
Ativos fixos não industriais	3.548	0.259	0.919
Ativos fixos industriais	0	0.342	0
Stocks	1.284	0.233	0.299
		Risco agregado =	1.227

Tabela 24. Resultado do risco agregado para o total da bacia em estudo e para três áreas contidas nessa bacia. Conclui-se através desta tabela que a área com maior risco é a Avenida da Liberdade. Os valores apresentados encontram-se arredondados à segunda casa decimal.

Risco agregado	Total da bacia	Baixa	Av. Liberdade	Av. Almirante Reis
Abordagem (a)	2.07	1.23	3.11	2.11
Abordagem (b)	1.43	0.83	2.19	1.45

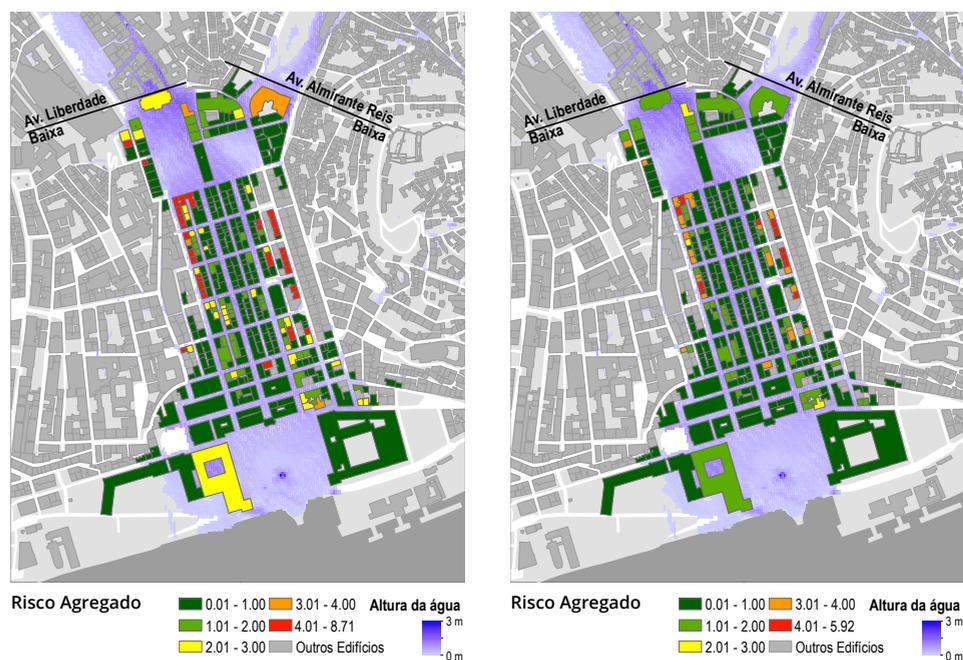


Figura 27. Agregação da média dos danos médios anuais para os módulos de cálculo b (esquerda) e a (direita). Fonte: produção do autor com recurso a dados da Câmara Municipal de Lisboa e da modelação hidrodinâmica.

à cave ou ao rés-do-chão, então esse valor é atribuído sem qualquer operação. Este cálculo tem de ser realizada para todas as categorias de dano com exceção da estrutura do edifício, que já contabiliza um valor médio para todo o edifício.

Se os mesmos cálculos forem realizados para toda a bacia e para os troços da Avenida da Liberdade e da Avenida Almirante reis podemos comparar cada uma das áreas e concluir qual a que apresenta maior risco, tendo em atenção as diferentes categorias de dano avaliadas (Tabela 24).

Esta informação pode ser espacializada, dando origem a mapas de risco agregado. Na Figura 27 são apresentados dois exemplos destes mapas para a baixa de Lisboa, consistido nos resultados finais do processo de avaliação de risco.

É de realçar que o processo de agregação dos diferentes danos possibilita uma leitura imediata do risco associado à área

em estudo, após serem conhecidos os pressupostos da sua avaliação que, para o exemplo apresentado, consistem na ponderação das diferentes categorias de dano. Por outro lado, e como referido anteriormente, a avaliação do risco pode terminar com a obtenção e mapeamento dos danos nas suas diferentes categorias. Esta informação consiste nos valores dos danos médios anuais de uma determinada categoria associados a um edifício ou área, podem variar entre 0 (sem perda) e 100% (perda total). Se se conhecer o valor total dessa categoria para o universo avaliado então poder-se-á converter essa percentagem em valores monetários. Com todas as percentagens de dano médio convertidas em valores monetários deixa de ser relevante o processo de agregação apresentado neste guia pois o risco total (representado neste guia como o risco agregado) não é mais que a soma de todos os valores encontrados para o edifício ou para as áreas avaliadas.



CONSIDERAÇÕES FINAIS

*"Não interessa se a água está fria
ou quente se vai ter de a atravessar."*

Pierre Teilhard de Chardin

O presente documento apresenta uma metodologia para a quantificação do risco de inundação, abordando os processos que permitem definir as probabilidades e as consequências inerentes à avaliação de risco. Estes métodos têm-se tornado cada vez mais importantes, combinando informações que podem ser reunidas em três grandes grupos que apresentam, neste contexto, um elevado nível de interligações entre eles. Esses grupos consistem i) nos dados meteorológicos e hidrométricos, ii) na modelação hidrológica e iii) na suscetibilidade dos elementos expostos.

No âmbito do primeiro grupo são apresentados procedimentos para definir períodos de retorno de precipitação diária máxima anual e, com base nestes, hietogramas de projeto. Os períodos de retorno são obtidos com recurso à teoria de valores extremos, comparando-se o resultado da aplicação da Lei de Gumbel e da Lei Pearson III aos valores de precipitação diária máxima anual da estação do IGIDL, localizada em Lisboa. Para ambas as leis foram calculados os intervalos de confiança dos valores estimados, permitindo avaliar a incerteza associada a esta estimação. No entanto não foram consideradas para esta estimação outras Leis estatísticas que poderão ser utilizadas como a Lei Log-Pearson III ou a distribuição Generalizada de Valores Extremos. Neste primeiro grupo, estão também incluídos os dados hidrométricos que, caso estejam disponíveis, podem ser utilizados para a estimação de caudais máximos instantâneos e áreas inundáveis, bem como para efeito de calibração e validação dos modelos hidrodinâmicos.

A bacia hidrológica que serve de suporte a este documento não dispõe de medições de caudais de acesso livre impossibilitando o seu tratamento estatístico. Por outro lado a modelação hidrodinâmica não é aprofundada neste guia, dada a complexidade de processos inerentes a este procedimento, o que impede uma análise detalhada, por exemplo, dos procedimentos de calibração e validação desses modelos, que podem ser importantes para a qualidade dos resultados obtidos.

O segundo grupo prende-se com a modelação hidrodinâmica. Neste documento explicitam-se quais os passos necessários para a operacionalização destes modelos e a sua influência nos resultados. Os modelos hidrodinâmicos necessitam de vários dados de entrada nomeadamente informações de uso e ocupação do solo, modelos digitais de terreno, tipos de solo, redes de drenagem etc. Estes dados nem sempre se encontram disponíveis com o detalhe e completude necessários. Por outro lado quanto mais detalhada e completa for a informação maior será o tempo de processamento dos modelos hidrodinâmicos. Esta situação implica um compromisso que tem consequências no nível de confiança associado à estimação das diferentes características da inundação que resultam da modelação (por exemplo, área inundada e altura de água). Note-se que esta situação não é exclusiva deste grupo uma vez que, e como referido, os próprios períodos de retorno têm um grau de incerteza associado à sua estimação.

O terceiro grupo é designado de forma genérica como suscetibilidade dos

elementos expostos. Neste documento e para este grupo de indicadores, são definidas e exemplificadas metodologias relacionadas com o levantamento dos elementos expostos e a caracterização da suscetibilidade desses elementos. Esta suscetibilidade é normalmente quantificada através de curvas de dano que consistem em representações gráficas dos danos esperados para determinado objeto ou conjunto de objetos, como resultado de uma característica específica da inundação. Após a definição das categorias de dano a avaliar, foram escolhidas curvas profundidade-dano e aplicadas de forma sistemática a um troço específico da bacia que ilustra este documento e demonstrados os cálculos necessários para a obtenção do dano médio anual de uma dessas categorias. Não obstante, são apresentados resultados das 5 categorias de dano avaliadas para a totalidade da bacia hidrográfica e para três sub-bacias que a constituem (Baixa, Avenida da Liberdade, Avenida Almirante Reis). Após estas operações, ainda é sugerida uma forma de agregação de toda a informação gerada num único mapa ou indicador, tendo como objetivo uma leitura imediata do risco associado à totalidade da bacia ou a parte desta. No entanto é de sublinhar que esta agregação não substitui os diferentes resultados obtidos para os danos médios anuais nas diferentes categorias estudadas, devendo ser vista como uma informação complementar a esses resultados.

Apesar da generalidade dos estudos realizados na Europa para a avaliação do risco de inundação utilizarem curvas de dano, a formulação destas curvas está revestida de

um certo nível de incerteza. Estas curvas são obtidas através de registos históricos de danos causados sobre os elementos expostos, não existindo para Portugal este tipo de registo sistemático. Por conseguinte foi necessário recorrer-se a informação de outros estudos aumentando-se a incerteza associada a este processo. Resta referir que o cálculo necessário para a obtenção do risco de inundações se encontra bastante estabilizado.

Em resumo este guia faz uma abordagem sistematizada ao procedimento do cálculo do risco de inundações e apresenta uma abordagem possível para este fim. Esta abordagem está conforme o estado da arte neste tema existindo algumas incertezas a ter em conta nos resultados obtidos.

agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer à i) Professora Maria Manuela Portela, Professor Saldanha Matos, Professora Maria Clara Mendes, Professor Filipe Duarte Santos, Professor Ramiro Neves e Engenheiro David Brito pela partilha de conhecimentos sobre as mais diversas matérias contidas neste documento; ii) Câmara Municipal de Lisboa, Câmara Municipal de Oeiras e Município S.A. pela cedência de informação geográfica de âmbito municipal; iii) Comissão de acompanhamento do projeto CIRAC e à Associação Portuguesa de Seguradores; iv) Fundação para a Ciência e Tecnologia pela atribuição da bolsa de Doutoramento com a referência SFRH/BD/70435/2010, no âmbito da qual é realizado este documento.



BIBLIOGRAFIA

*"Adoro os sons e o poder da água a cair,
quer sejam ondas ou uma cascata."*

Mike May

1. ANDRADE, C., PIRES, H. O., SILVA, P., TABORDA, R. & FREITAS, M. D. C. 2006. Zonas Costeiras. In: SANTOS, F. D. & MIRANDA, P. (eds.) Alterações Climáticas em Portugal Cenários, Impactos e Medidas de Adaptação, Projecto SIAM II. Lisboa: Gradiva.
2. BLADÉ, I., CACHO, I., CASTRO-DÍEZ, Y., GOMIS, D., GONZÁLEZ-SAMPÉRIZ, P., MIGUEZ-MACHO, G., FIZ, P., RODRÍGUEZ-FONSECA, B., RODRÍGUEZ-PUEBLA, C., SÁNCHEZ, E., MARCOS, G. S., VALERO-GARCÉS, B. & VARGAS-YÁÑEZ, M. 2010. Clima en España: Pasado, presente y futuro - Informe de evaluación del cambio climático regional. Fiz F. Pérez y Roberta Boscolo; Mº de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, Mº de Ciencia e Innovación.
3. BRANDÃO, C., RODRIGUES, R. & COSTA, J. P. D. 2001. Análise de Fenómenos Extremos - Precipitações Intensas em Portugal Continental. Lisboa: Direcção dos Serviços de Recursos Hídricos.
4. BRUIJN, K. D., KLIJN, F., ÖLFERT, A., PENNING-ROUSELL, E., SIMM, J. & WALLIS, M. 2009. Flood risk assessment and flood risk management. An introduction and guidance based on experiences and findings of FLOODsite (an EU-funded Integrated Project), Delft, the Netherlands, Deltares | Delft Hydraulics.
5. CE 2004. A Análise da Informação: Inquéritos Delphi. EVALSED - A Avaliação do Desenvolvimento Socioeconómico - Manual Técnico II: Métodos e Técnicas de Avaliação Lisboa: Observatório do QREN, Comissão Europeia.
6. CHOW, V. T. 1954. The log-probability law and its engineering applications. Proceedings of the American Society of Civil Engineers, 80, 1-25.
7. DE MOEL, H. & AERTS, J. 2010. Effect of uncertainty in land use, damage models and inundation depth on flood damage estimates. *Natural Hazards*, 1-19.
8. DE MOEL, H., VAN ALPHEN, J. & AERTS, J. C. J. H. 2009. Flood maps in Europe - methods, availability and use. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 9, 289-301.
9. DECRETO LEI N.º 115/2010 2010. Estabelece um quadro para a avaliação e gestão dos riscos de inundações, com o objectivo de reduzir as suas consequências prejudiciais, e transpõe a Directiva n.º 2007/60/CE, do Parlamento Europeu e do Conselho, de 23 de Outubro. Diário da República, 1.ª série - N.º 206, Decreto-Lei n.º 115/2010.
10. DIAS, L. 2013. City, climate change and floods. A contribution to the urban resilience study. In: KLIJN, F. & SCHWICKENDIEK, T. (eds.) Floodrisk 2012 - The 2nd European Conference on Flood Risk Management - Comprehensive Flood Risk Management. Rotterdam: CRC Press, Taylor & Francis Group.
11. DIRECTIVA 2007/60/CE 2007. Directiva do Parlamento Europeu e do Conselho, de 23 de Outubro de 2007, relativa à avaliação e gestão dos riscos de inundações.
12. DUTTA, D., HERATH, S. & MUSIAKE, K. 2003. A mathematical model for flood loss estimation. *Journal of Hydrology*, 277, 24-49.
13. EEA, WHO & JRC 2008. Impacts of Europe's changing climate—2008 indicator-based assessment, Copenhagen, Denmark, European Environment Agency.
14. EMARLIS 2007. Plano Geral de Drenagem de Lisboa - Fase C: Desenvolvimento do Plano Geral de Drenagem. Miraflores: ChiRoN, Engidro, Hidra.

15. ERNST, J., DEWALS, B., DETREMBLEUR, S., ARCHAMBEAU, P., ERPICUM, S. & PIROTTON, M. 2010. Micro-scale flood risk analysis based on detailed 2D hydraulic modelling and high resolution geographic data. *Natural Hazards*, 55, 181-209.
16. EXCIMAP 2007. Handbook on good practices for flood mapping in Europe. EU: European exchange circle on flood mapping.
17. FEKETE, A. 2010. Assessment of Social Vulnerability to River Floods in Germany, Bonn, University Institute for Environment and Human Security (UNU-EHS).
18. GOULDBY, B. & SAMUELS, P. 2005. Language of risk—project definitions. Integrated Flood Risk Analysis and Management Methodologies. Floodsite Project Report T32-04-01.
19. IPCC 2012. Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation - Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. In: FIELD, C. B., BARROS, V., STOCKER, T. F., DAHE, Q., DOKKEN, D. J., EBI, K. L., MASTRANDREA, M. D., MACH, K. J., PLATTNER, G.-K., ALLEN, S. K., TIGNOR, M. & MIDGLEY, P. M. (eds.) Cambridge University Press ed.: First Joint Session of Working Groups I and II.
20. IPCC 2013. Climate Change 2013: The Physical Science Basis (Final Draft Underlying Scientific-Technical Assessment). Intergovernmental Panel on Climate Change.
21. ISO 31010 2009. ISO/IEC 31010:2009 - Risk management - Risk assessment techniques. ISO/IEC.
22. JONKMAN, S. N., KOK, M. & VRIJLING, J. K. 2008. Flood Risk Assessment in the Netherlands: A Case Study for Dike Ring South Holland. *Risk Analysis*, 28, 1357-1374.
23. JULIÃO, R. P., NERRY, F., RIBEIRO, J., BRANCO, M. C. & ZÊZERE, J. 2009. Guia Metodológico para a Produção de Cartografia Municipal de Risco e para a Criação de Sistemas de Informação Geográfica (SIG) de Base Municipal, Lisboa, Autoridade Nacional de Protecção Civil.
24. KHARIN, V. V., ZWIERS, F. W., ZHANG, X. & HEGERL, G. C. 2007. Changes in Temperature and Precipitation Extremes in the IPCC Ensemble of Global Coupled Model Simulations. *Journal of Climate*, 20, 1419-1444.
25. KRON, W. 2005. Flood Risk = Hazard · Values · Vulnerability. *Water International*, 30, 58-68.
26. LEURIG, S. & DLUGOLECKI, A. 2013. Insurer Climate Risk Disclosure Survey: 2012 Findings & Recommendations. In: CERES (ed.). Boston: Ceres.
27. MALCZEWSKI, J. 1999. GIS and Multicriteria Decision Analysis, New York, Wiley.
28. MARKAU, H.-J. 2003. Risikobetrachtung von naturgefahren. Analyse, bewertung und management des risikos von naturgefahren am beispiel der sturmflutgefährdeten küstenniederungen schleswig-holsteins. Doktorgrades, Universität zu Kiel.
29. MARTINS, F. J. P. 2000. Dimensionamento hidrológico e hidráulico de passagens inferiores rodoviárias para águas pluviais. Mestre, Universidade de Coimbra.
30. MERZ, B., KREIBICH, H., THIEKEN, A. & SCHMIDTKE, R. 2004. Estimation uncertainty of direct monetary flood damage to buildings. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 4, 153-163.
31. MERZ, B., THIEKEN, A. H. & GOCHT, M. 2007. Flood Risk Mapping at the Local Scale: Concepts and Challenges. In: BEGUM, S., STIVE, M. J. F. & HALL,

- J. W. (eds.) Flood Risk Management in Europe. Springer Netherlands.
32. MEYER, V., HAASE, D. & SCHEUER, S. 2009a. Flood risk assessment in european river basins—concept, methods, and challenges exemplified at the mulde river. *Integrated Environmental Assessment and Management*, 5, 17-26.
33. MEYER, V. & MESSNER, F. 2005. National flood damage evaluation methods — A review of applied methods in England, the Netherlands, the Czech Republic and Germany. Leipzig, Germany, Department of Economics, Umweltforschungszentrum Leipzig-Halle. UFZ-Discussion Papers.
34. MEYER, V., MESSNER, F., HAASE, D. & SCHEUER, S. 2009b. Developing methodological foundations for GIS-based multicriteria evaluation of flood damage and risk. FLOODsite project report T10-08-13.
35. MEYER, V., SCHEUER, S. & HAASE, D. 2009c. A multicriteria approach for flood risk mapping exemplified at the Mulde river, Germany. *Natural Hazards*, 48, 17-39.
36. MIN, S.-K., ZHANG, X., ZWIERS, F. W. & HEGERL, G. C. 2011. Human contribution to more-intense precipitation extremes. *Nature*, 470, 378-381.
37. MING-DAW SU, JUI-LIN KANG & LING-FANG CHANG 2009. Industrial and Commercial Depth-Damage Curve Assessment. *Wseas Transactions on Environment and Development*, 5, 199-208.
38. MRC/WUP-FIN 2008. Hybrid 1D/2D/3D model manual. Hydrological, Environmental and Socio-Economic modelling Tools for the Lower Mekong Basin Impact Assessment/ FINDS. Vientiane, Lao PDR: Mekong River Commission and Finnish Environment Institute Consultancy Consortium.
39. NAGHETTINI, M. & PINTO, É. 2007. *Hydrologia Estatística*, Belo Horizonte, CPRM.
40. NAGHETTINI, M. & PORTELA, M. M. 2011. Probabilidade e estatística aplicadas à hidrologia. Lisboa: DECivil, IST.
41. PALL, P., AINA, T., STONE, D. A., STOTT, P. A., NOZAWA, T., HILBERTS, A. G. J., LOHMANN, D. & ALLEN, M. R. 2011. Anthropogenic greenhouse gas contribution to flood risk in England and Wales in autumn 2000. *Nature*, 470, 382-385.
42. PORTELA, M. M., MARQUES, P. & CARVALHO, F. F. D. 2000. Hietogramas de projecto para a análise de cheias baseada no modelo do hidrograma unitário do Soil Conservation Service (SCS). In: HÍDRICOS, A. P. D. R. (ed.) 5º Congresso da água - A água e o desenvolvimento sustentável: Desafios para o novo século. Lisboa: Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos.
43. REESE, S., MARKAU, H.-J. & STERR, H. 2003. Merk - Mikroskalige Evaluation der Risiken in überflutungsgefährdeten Küstenniederungen - Abschlussbericht. Ministerium für ländliche Räume, Landesplanung, Landwirtschaft und Tourismus des Landes Schleswig-Holstein.
44. SANTOS, F. D. & MIRANDA, P. 2006. Alterações Climáticas em Portugal Cenários, Impactos e Medidas de Adaptação - Projecto SIAM II, Lisboa, Gradiva.
45. SCHANZE, J. 2006. Flood risk management - A basic framework. In: SCHANZE, J., ZEMAN, E. & MARSALEK, J. (eds.) *Flood Risk Management: Hazards, Vulnerability and Mitigation Measures*. Springer Netherlands.
46. SCHANZE, J., ZEMAN, E. & MARSALEK, J. 2006. *Flood Risk Management: Hazards, Vulnerability and Mitigation Measures*. Springer Netherlands.

47. SCHMIDT-THOMÉ, P., KALLIO, H., JARVA, J., TARVAINEN, T., GREIVING, S., FLEISCHHAUER, M., PELTONEN, L., KUMPULAINEN, S., OLFERT, A., BÄRRING, L., PERSSON, G., RELVÃO, A. M. & BATISTA, M. J. 2006. Spatial Effects and Management of Natural and Technological Hazards in Europe, ESPON 1.3.1.
48. SEC 2010. Risk Assessment and Mapping Guidelines for Disaster Management, 21.12.2010 - 1626 final. Brussels: Commission staff working paper.
49. STERR, H., MARKAU, H.-J. & REESE, S. 2005. Analyses of previous vulnerability studies in the pilot site German Bight Coast (Task 27). FLOODsite Status-Report.
50. TEMEZ, J. R. 1978. *Calculo hidrometeorológico de caudales máximos en pequenas cuencas naturales*. Madrid: Ministerio de Obras Publicas y Urbanismo, Direccion General de Carreteras.
51. THIEKEN, A. H., PETROW, T., KREIBICH, H. & MERZ, B. 2006. Insurability and Mitigation of Flood Losses in Private Households in Germany. *Risk Analysis*, 26, 383-395.
52. TRANCOSO, A. R., BRAUNSCHWEIG, F., CHAMBEL LEITÃO, P., OBERMANN, M. & NEVES, R. 2009. An advanced modelling tool for simulating complex river systems. *Science of The Total Environment*, 407, 3004-3016.
53. UNISDR 2004. *Living with Risk. A global review of disaster reduction initiatives*. United Nations International Strategy for Disaster Reduction Secretariat (UNISDR) ed. New York and Geneva: United Nations.
54. UNISDR 2009. *UNISDR Terminology on Disaster Risk Reduction*. In: NATIONS, U. (ed.). Geneva, Switzerland: United Nations International Strategy for Disaster Reduction (UNISDR).
55. VEERBEEK, W. & ZEVENBERGEN, C. 2009. Deconstructing urban flood damages: increasing the expressiveness of flood damage models combining a high level of detail with a broad attribute set. *Journal of Flood Risk Management*, 2, 45-57.
56. VICENTE-SERRANO, S., TRIGO, R., PEZ-MORENO, J., LIBERATO, M., LORENZO-LACRUZ, J., BEGUERERÍA, S., MORÁN-TEJEDA, E. & EL KENAWY, A. 2011. Extreme winter precipitation in the Iberian Peninsula in 2010: anomalies, driving mechanisms and future projections. *Climate Research*, 46, 51-65.
57. WARD, P. J., DE MOEL, H. & AERTS, J. C. J. H. 2011. How are flood risk estimates affected by the choice of return-periods? *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 11, 3181-3195.
58. WÜNSCH, A., HERRMANN, U., KREIBICH, H. & THIEKEN, A. 2009. The Role of Disaggregation of Asset Values in Flood Loss Estimation: A Comparison of Different Modeling Approaches at the Mulde River, Germany. *Environmental Management*, 44, 524-541.
59. XIA, J., FALCONER, R. A., LIN, B. & TAN, G. 2011. Numerical assessment of flood hazard risk to people and vehicles in flash floods. *Environmental Modelling & Software*, 26, 987-998.