

APLICAÇÃO DE UMA METODOLOGIA DE ANÁLISE DE RISCO DE INUNDAÇÕES À ZONA RIBEIRINHA DO PESO DA RÉGUA

Application of a Flood Risk Analysis Methodology to the River Banks of Peso da Régua

SANDRA CUNHA ⁽¹⁾ e FRANCISCO TAVEIRA-PINTO ⁽²⁾

⁽¹⁾ Estudante de Mestrado, FEUP,
Rua do Dr. Roberto Frias, s/n, 4200-465 Porto, ec08022@fe.up.pt

⁽²⁾ Professor Catedrático, FEUP,
Rua do Dr. Roberto Frias, s/n, 4200-465 Porto, fpinto@fe.up.pt

Resumo

A ocorrência de uma cheia origina sempre uma inundação, embora estas não resultem sempre da primeira. A análise e a gestão de riscos de inundação não dispensam o conhecimento de alguns conceitos essenciais ao seu pleno entendimento, tais como: perigo, probabilidade, custos, planos de emergência, mapas de risco e crise. Os seus objetivos principais passam pela redução da vulnerabilidade e pela correta definição de zonas de risco.

Tendo em conta as diretrizes da Diretiva 2007/60/CE de 23 de Outubro de 2007 foi desenvolvido um estudo para a cidade do Peso da Régua, no qual se pretendeu avaliar as condições existentes, dada a frequente ocorrência de cheias na zona ribeirinha. Para a concretização do objetivo final, que consistiu na determinação dos danos causados por uma inundação, foi utilizado o software HEC-FDA Flood Damage Reduction Analysis, desenvolvido pela U.S. Army Corps of Engineers, que possibilitou a realização de uma análise baseada no risco, para o local definido.

Palavras-chave: Cheia, risco, Peso da Régua, HEC-FDA.

Abstract

The occurrence of a flood and the risk associated with it is of great complexity, both in its perception as in the actions that can be taken to minimize them. The analysis and management of flood risks needs to know some key concepts to their full understanding, such as risk, probability, costs, plans, maps of risk and crisis. Their main objectives are the reduction of vulnerability and the correct definition of risk areas.

Taking into consideration the guidelines of the EU Directive 2007/60/EC, a study for the city of Peso da Régua was developed, to evaluate the existing conditions, given the frequent occurrence of floods in the riverside area. To achieve the main objective, which consisted on the determination of the damage caused by a flood, it was used the software HEC-FDA - Flood Damage Reduction Analysis, developed by the U.S. Army Corps of Engineers, which made possible the development of a risk-based analysis to a specific location.

Keywords: Flood, risk, Peso da Régua, HEC-FDA.

1. Introdução

A inundação é um fenómeno que envolve dois aspetos concretos, a exposição e as perdas. Pelo facto de o risco de inundação ser um conceito ao qual está inerente alguma incerteza, fácil é de compreender que da vontade de poder prever e controlar essa mesma incerteza, surge a necessidade de a conhecer.

A Diretiva Comunitária n.º 2007/60/CE relativa à avaliação e gestão dos riscos de inundações surge no quadro de a ação comunitária no domínio da política da água, para dar resposta ao aumento de ocorrências e da gravidade dos seus impactos. As inundações aumentam continuamente em todos os países. A cada ano elas surgem com impacto redobrado, acarretando a destruição de cidades e vilas, perdas agrícolas, doenças e mortes.

As inundações podem acontecer na sequência de diversos fatores. Entre eles, destacam-se as precipitações prolongadas e intensas, o derretimento rápido da neve ou o degelo na primavera. Outras inundações são causadas por precipitações rápidas mas muito fortes em terrenos bastante planos, sem grande capacidade de drenagem superficial. No caso das chuvas frequentes que se precipitam em grande quantidade e em muito pouco tempo, a capacidade de retenção do solo e do leito dos rios é excedida, o que provoca inundações que formam as chamadas planícies de inundação. Estas surgem, em geral, em terrenos próximos a linhas de água.

O principal objetivos do trabalho que está na base deste artigo consiste em avaliar as condições atuais da zona considerada como zona de risco, e determinar as consequências da ocorrência frequente de inundações.

Pretende-se assim delinear um cenário que reproduza fielmente as características hidráulicas e económicas associadas a este fenómeno, à data de hoje, para este local específico.

Assim, e com referência ao caso de estudo da cidade do Peso da Régua, procedeu-se à análise do risco de inundação, através da aplicação de um software desenvolvido nos Estados Unidos, o HEC-FDA. Para tal foi realizado o estudo hidráulico de caracterização, assim como levantamentos locais para reconhecimento das condições físicas e económicas do cenário existente.

A concretização deste trabalho teve como base um conjunto de outros estudos de referência, bibliografia adequada ao tema, estudo e aplicação de um software, assim como o tratamento de dados obtidos em levantamentos de campo. Como principal resultado obteve-se a quantificação dos danos causados por uma inundação, numa zona específica, designada como zona de risco.

2. Inundações e Seus Riscos

2.1. O risco

É através da leitura de textos científicos ou mesmo de relatos populares que surge a utilização da chamada “linguagem do risco”. Alguém que viva próximo de locais onde frequentemente ocorram fenómenos naturais com consequências diretas nas populações e no seu modo de vida, tem consciência de um certo risco que corre.

A análise de risco deve estar presente por exemplo, em todos os aspetos a avaliar no âmbito do ordenamento do território, para que se possam indicar áreas favoráveis ou desfavoráveis para a construção de habitações. Pode-se considerar que quem fala em riscos utiliza frequentemente as palavras “probabilidade”, “possibilidade”, e “complexidade”. Pode-se também referir aos “custos” de obras ou de outras medidas aconselhadas para a “prevenção”, e da necessidade de elaborar as “cartas de risco”.

Nem sempre o perigo progride para a manifestação completa do risco, por vezes o rio que estava prestes a transbordar, não transborda. Outras vezes evolui nesse sentido dando origem ao “acidente” ou à “catástrofe”, quando ocorrem por exemplo grandes cheias. Caso tais fenómenos culminem em prejuízos elevados, feridos ou mortos, são de imediato caracterizados como “drama” ou “tragédia”. É neste momento que os “planos de emergência” se revelam fundamentais para gerir a “crise”.

A fórmula compósita do risco engloba o processo que acarreta perigo, o tal acontecimento provável, definido como “hazard” para os anglófonos, “aléa” para os franceses, “riesgo” para espanhóis, e por vezes como “perigosidade” pelos portugueses. A tradução de “hazard” para perigo, é que corresponde a um erro de conceito-base, uma vez que em inglês existe uma palavra para a correta tradução que é “danger”. Combinando o evento provável (H) com a vulnerabilidade (V), obtém-se a expressão do risco, ou seja, $R = H \times V$.

É fundamental que se conheçam bem as áreas de risco, com a noção clara do fenómeno natural e vulnerabilidade (população, património, edifícios, estradas, infraestruturas). Só com esse conhecimento se podem fazer planos de prevenção e de intervenção rápida em caso de alerta.

A Diretiva 2007/60/CE de 23 de Outubro de 2007, define risco de inundação como a “*combinação da probabilidade de inundações e das suas potenciais consequências prejudiciais para a saúde humana, o ambiente, o património cultural e as atividades económicas*”.

2.2. Conceito de cheia e de inundação

A ocorrência de uma cheia está associada a um caudal muito elevado num curso de água, resultante de precipitação intensa com o conseqüente transbordo do leito do rio e a inundação das suas margens. É importante que se faça uma distinção entre os conceitos de “cheia” e de “inundação”, muitas vezes empregues erradamente como sinónimos. Efetivamente todas as cheias provocam inundações, mas nem todas as inundações são consequência de cheias.

Uma situação de cheia numa secção de um curso de água, sob o ponto de vista estritamente hidrológico ocorre sempre que a precipitação dá origem à ocorrência de escoamento superficial direto, que se traduz na formação de um hidrograma de cheia. No entanto na linguagem corrente e para o comum das pessoas, a noção de cheia de um rio está associada à inundação dos terrenos marginais e à ocorrência de danos físicos e prejuízos materiais. As cheias podem ser divididas em pequenas cheias, perfeitamente localizadas ou então em grandes cheias de carácter generalizado. Este último tipo de cheia tem sido desde sempre preocupação constante pelo que se foram desenvolvendo diversos meios para combater os seus efeitos, nomeadamente pela construção de estruturas de defesa (barragens, diques, obras de regularização fluvial, etc.), delimitação de áreas suscetíveis de serem inundadas e criação de sistemas de aviso. As cheias são fenómenos naturais, consequência do carácter aleatório dos processos hidrológicos, cujo estudo interessa aprofundar para se minimizarem os riscos delas decorrentes.

Na Diretiva 2007/60/CE de 23 de Outubro de 2007, a definição de inundação apresentada é a seguinte “*cobertura temporária por água de uma terra normalmente não coberta por água. 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, e pode excluir as inundações com origem em redes de esgotos*”.

2.3. Gestão dos riscos de inundação

De uma forma genérica, entende-se que a gestão dos riscos de inundação deve contemplar os aspetos mais relevantes tais como custos e benefícios, a amplitude das inundações, as vias de evacuação da água, as zonas com potencial de retenção de cheias, a gestão dos solos e da água, a alteração dos leitos fluviais, o ordenamento do território, a afetação dos solos, promovendo a conservação da natureza.

Sobre as zonas inundáveis devem ser tomadas ações que se dividem em quatro grupos:

- Modificação das cheias;
- Modificação do impacto das cheias;
- Modificação da vulnerabilidade;
- Gestão dos recursos naturais e culturais.

A gestão dos riscos de inundação, dita de uma forma redundante, corresponde ao processo de gestão de uma situação existente de risco de inundação. Imprimindo mais algum rigor à definição, interessa referir que a gestão inclui o planeamento de um sistema que reduza o risco de inundação.

São por isso considerados dois níveis distintos, o primeiro como o nível operacional, e o segundo, o nível de projeto. Estes dois aspetos da gestão, a situação existente e o planeamento devem ser analisados individualmente, sendo para isso necessário definir em que consiste cada um deles.

De acordo com alguns estudos desenvolvidos, as etapas operacionais para a gestão de uma situação existente de risco de inundação são as indicadas na Figura 1.

Os acontecimentos prováveis devem ser combinados com a vulnerabilidade ao risco. A vulnerabilidade das pessoas ou objetos numa área, deve ser ponderada com a frequência da ocorrência da inundação.

Um bom processo de análise de risco elabora mapas, utilizando para o efeito Sistemas de Informação Geográfica (GIS) com base na análise de vulnerabilidade, de forma combinada com os mapas topográficos. Tais mapas servem para identificar pontos fracos do sistema de defesa contra as inundações, ou para conduzir à necessidade de se elaborar um novo projeto.

3. A Diretiva e a sua Aplicabilidade

O Parlamento Europeu e o Conselho da União Europeia, tendo em consideração uma série de premissas, fizeram aprovar a Diretiva n.º 2007/60/CE relativa à avaliação e gestão dos riscos de inundações. Esta Diretiva surge no quadro de ação comunitária no domínio da política da água.

A Diretiva define uma aplicação em três fases distintas: avaliação preliminar dos riscos de inundações, definição de cartas de zonas inundáveis e cartas de risco de inundações e por fim o desenvolvimento de planos de gestão de riscos de inundações.

A Diretiva n.º 2007/60/CE foi transposta para a legislação portuguesa através da aprovação do Decreto-Lei n.º 115/2010, de 22 de Outubro. Nos termos deste decreto-lei em cada região hidrográfica ou em cada unidade de gestão definida para o efeito, será avaliado o risco de inundação e as respetivas medidas para a sua mitigação.

Ficou assim determinado que as Administrações das Regiões Hidrográficas devem elaborar cartas de zonas inundáveis e cartas de riscos de inundações, indicativas das potenciais consequências prejudiciais associadas a diferentes cenários de inundações, incluindo as atividades que possam potenciar o aumento dos riscos de inundação.

Tendo em vista a redução dos impactos negativos das inundações nas zonas em causa, as Administrações das Regiões Hidrográficas devem também elaborar planos de gestão dos riscos de inundações, centrados na prevenção, proteção, preparação e previsão destes fenómenos, devidamente articulados com os planos de gestão das bacias hidrográficas.

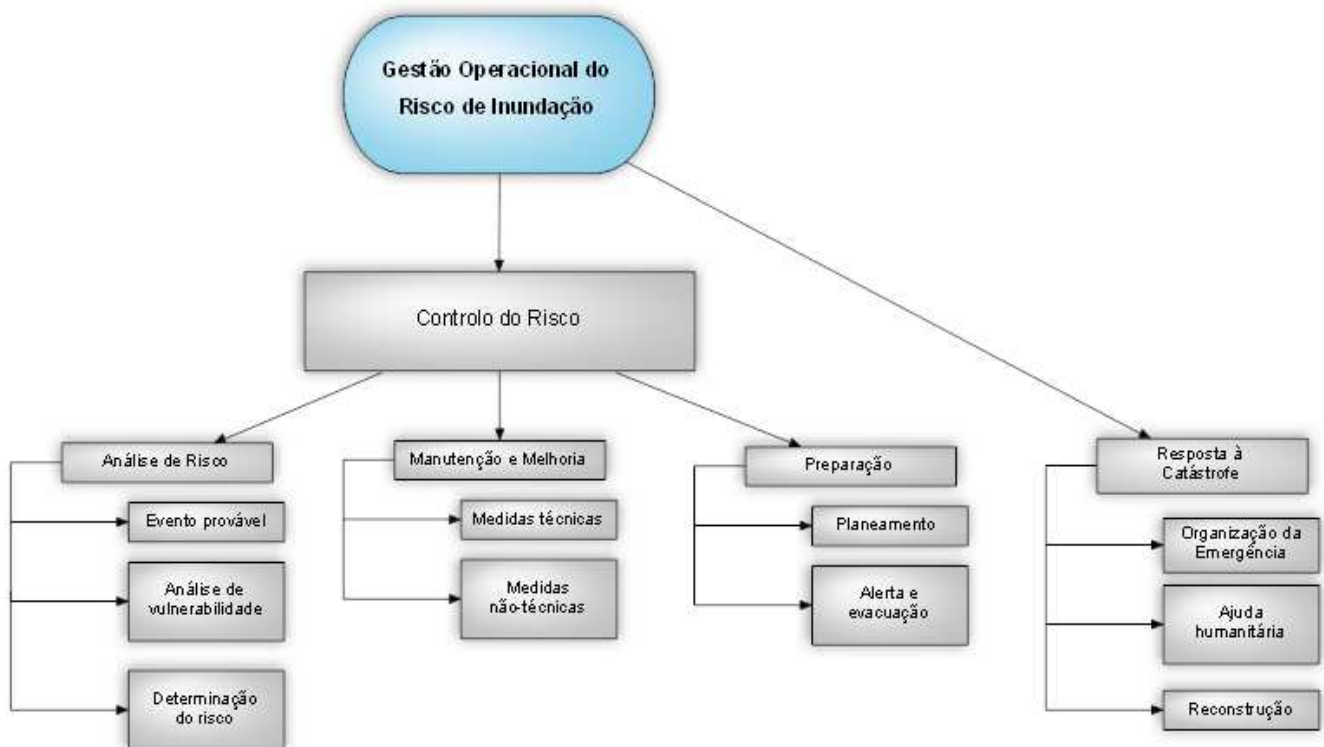


Figura 1. Etapas operacionais para a gestão de riscos de inundação.

Estes planos devem ter em conta as características próprias das zonas a que se referem e prever soluções específicas para cada caso, assim como o previsto nos planos de emergência da proteção civil.

De uma forma geral as atividades humanas contribuem diretamente para o aumento da probabilidade de ocorrência de inundações e dos impactos negativos associados. A elaboração da Diretiva Comunitária teve em consideração as chamadas alterações climáticas, e alguns aspetos das mesmas, nomeadamente o aumento da dimensão dos aglomerados urbanos e dos bens económicos nas proximidades de zonas de risco de inundações, assim como a redução da capacidade natural de retenção do solo.

Considerando que a gestão dos riscos de inundações tem como objetivos reduzir a probabilidade de ocorrência e/ou os seus impactos, devem ser considerados os seguintes elementos-chave:

- **Prevenção:** prevenir os danos causados pelas inundações, evitando a construção de casas e indústrias em áreas que atualmente estão sujeitas a inundações, pela futura adaptação ao risco de inundações, e através da correta utilização dos solos, contemplando práticas agrícolas e florestais adequadas;
- **Proteção:** tomada de medidas, tanto estruturais como não estruturais, para reduzir a probabilidade de cheias e/ou o seu impacto num local específico;
- **Preparação:** informar a população sobre os riscos de inundação e o que fazer em caso de ocorrência;
- **Resposta de emergência:** planos de emergência a aplicar na ocorrência uma inundação;
- **Recuperação:** regresso às condições normais logo que possível e aplicação de medidas de mitigação de impactos sociais e económicos sobre a população afetada.

Devem assim os estados-membros e a comissão trabalhar em conjunto com o objetivos de aplicar um programa eficaz de proteção, prevenção e mitigação de inundações.

4. Caso de Estudo: Cidade do Peso da Régua

4.1. Caracterização

O rio Douro nasce na serra de Urbion (Cordilheira Ibérica), a cerca de 1700 m de altitude. Ao longo do seu percurso de 927 km até à foz no Oceano Atlântico, junto à cidade do Porto, atravessa o território espanhol numa extensão de 597 km, serve de fronteira ao longo de 122 km, sendo os últimos 208 km percorridos em Portugal. A área total da sua bacia é de 97 603 km², dos quais 18 643 km² (19,1%) em território Português e 78 960 km² (80,9%) em território espanhol.

Para o troço do rio Douro, situado na cidade do Peso da Régua, pretendeu-se realizar uma avaliação das condições existentes nesta zona específica dada a importância das cheias que ali ocorrem periodicamente.

Para realizar este estudo foram efetuados levantamentos de campo que permitiram conhecer mais detalhadamente e caracterizar o cenário atual.

A metodologia aplicada considerou os diferentes caudais de cheia para diferentes períodos de retorno, assim como a delimitação das zonas limite de cheia. Com base nas zonas inundáveis conhecidas foi possível aplicar um software para a determinação dos prejuízos causados pela ocorrência de cheias.

Os recursos hídricos da bacia do Douro são essencialmente renováveis e dependentes da precipitação, proveniente das massas de ar mediterrânica e atlântica. A análise do escoamento nos afluentes portugueses do rio Douro permite concluir que estes têm um comportamento bastante semelhante relativamente às probabilidades de ocorrência. No entanto, à medida que se caminha para o interior, observa-se uma influência crescente das características mediterrânicas, que se reflete na distribuição mais extrema dos caudais, com estiagens ainda mais marcadas do que no litoral.

São numerosos os dados históricos que retratam eventos de cheias memoráveis no rio douro, nomeadamente no Peso da Régua, tendo uma grande parte deles sido compilados recentemente num trabalho realizado pelo IHRH (2007) para a Câmara Municipal do Peso da Régua. É aí que se podem encontrar algumas ilustrações sobre as cheias de 1962, entre as quais se destaca a apresentada na Figura 2.



Figura 2. Cheia de 1962, 15h, Avenida D. João Franco, Régua.

4.2. Simulação de risco de inundação através do modelo HEC-FDA

O HEC-FDA Flood Damage Reduction Analysis é um software desenvolvido pela U.S. Army Corps of Engineers que realiza uma análise baseada no risco, permitindo calcular o prejuízo anual esperado (danos esperados anuais) de forma a avaliar estudos de redução dos danos causados pelas inundações. Com a sua aplicação podem-se realizar as seguintes avaliações:

- Análise hidráulica e hidrológica;
- Análise económica;
- Formulação de cenários e avaliação.

O programa HEC-FDA permite realizar uma análise integrada dos aspetos hidráulicos, hidrológicos e económicos na avaliação do risco de inundação, associado a uma realidade existente ou a um determinado projeto.

A análise hidrológica e a análise económica são realizadas de forma independente, mas de forma coordenada com a configuração e layout do estudo. A sua aplicação tem como objetivos primordial integrar a formulação e a avaliação de projetos de redução de riscos de inundação.

O programa permite ainda quantificar o fator de incerteza para as seguintes funções, quando aplicável:

- Caudal/Probabilidade (discharge-frequency function);
- Caudal/Nível de água (stage-discharge function);
- Nível de água/Dano (stage-damage function).

Os dados resultantes da análise hidráulica são incorporados na análise económica através da criação de um cenário de redução do dano da inundação. Os cenários são elaborados de acordo com o dano anual esperado (*expected annual damage*) associados a um ano base (*analysis year*) permitindo obter um dano anual equivalente (*equivalent annual damage*) para o período de vida definido para o projeto.

O procedimento de cálculo do programa faz uso de regras analíticas de análise de risco para conceber e valorizar as medidas de redução do risco. Esta abordagem tem em conta o risco e os fatores de incerteza associados. Os valores reais das variáveis de projeto não são muitas vezes conhecidos, pelo que têm de ser descritos através de uma distribuição de probabilidade usando os parâmetros média e desvio padrão, no caso de uma distribuição normal, ou os valores máximos e mínimos, no caso de uma distribuição triangular.

O HEC-FDA é um software concebido para uma utilização interativa. O programa utiliza uma interface gráfica (GUI), componentes hidráulicos, hidrológicos, económicos, base de dados e permite a obtenção de resultados gráficos e a produção de relatórios. A interface do programa está concebida para que seja de fácil utilização e uso eficiente.

Para realizar um estudo de redução dos danos de inundação parte-se de um plano referente às condições-base atuais. Calculam-se assim os danos relativos a esse plano-base assim como a eventuais planos alternativos que venham a incluir medidas de minimização.

No final do estudo obtém-se a quantificação dos danos face ao cenário atual. Caso seja definido um plano alternativo obtém-se a quantificação deste, podendo ser determinada a redução dos danos através da comparação dos planos alternativos com o plano representativo do cenário-base.

A zona em estudo deve ser definida espacial e temporalmente com base na recolha de informações relativas ao curso de água, à zona sujeita à inundação, à avaliação económica dos bens afetados, e a eventuais medidas de mitigação do risco.

A informação relativa ao curso de água em estudo deve ser analisada em detalhe para que se definam claramente as características da zona em estudo.

É necessário especificar a posição do curso de água, com base na qual será delimitada a zona em risco de inundação, o posicionamento de elementos-base, e o perfil do rio naquela secção.

A zona sujeita ao dano (*damage reach*) localiza-se no interior da zona em estudo, onde são conhecidas ocorrências de inundações. Esta posição é definida em relação a um ponto específico da área em estudo, geralmente o da cota de fundo do rio. A zona onde pode ocorrer a inundação pode situar-se na margem direita, esquerda ou em ambas, e será delimitada por estações (*stations*) de início e de fim, definidas como distâncias ao longo do rio.

Dentro da área sujeita a inundações deve ser indicada a posição em termos topográficos de todos os elementos relevantes. Essa localização será usada para calcular a probabilidade de ocorrência de determinados fluxos de caudais, de níveis de subida de água e os danos causados, com as devidas incertezas associadas, para essa área específica.

Numa primeira fase, o projeto será analisado com referência ao cenário atual, ou seja, o cenário em que não se aplicou qualquer solução para a mitigação do risco. Os projetos alternativos que se possam vir a definir serão comparados com o projeto-base, a fim de identificar a solução que seja economicamente mais vantajosa. Assim, para se definir o risco e os recursos de projeto para um período específico de tempo de vida, será implementada uma fase de análise no ano base e em anos futuros. O ano base é o primeiro ano em que a análise é realizada, sendo o ano futuro o ano horizonte do projeto, caso esta simulação se aplique. Os resultados dos diferentes anos são utilizados para a realização de cálculos sobre as perdas anuais de um projeto específico.

4.2.1. Análise hidráulica

Nesta fase são analisados os dados hidrológicos e hidráulicos necessários para a avaliação de risco. Os dados incluem o perfil do rio na secção em estudo, e os caudais associados a períodos de retorno.

Os níveis de água ao longo do rio são os valores conhecidos por observação e registo. A cada perfil definido estão associados um conjunto de dados, resultantes do registo de diversas ocorrências de cheia.

Para cada nível de água, é necessário introduzir os dados de probabilidade de ocorrência para cada período de retorno, cota do fundo do curso de água, e valor da cota atingida para cada caudal associado.

O perfil da superfície da água pode ser definido utilizando dois grupos de dados: caudal do rio e/ou nível da água. O valor do caudal é introduzido para cada estação definida ao longo do rio e por probabilidade de ocorrência de inundação, associado ao nível de água atingido para os valores indicados.

O programa pede que sejam introduzidos oito níveis de água (correspondentes a oito períodos de retorno) e portanto a oito probabilidades de ocorrência de cheia (*exceedance probability flood events*).

As probabilidades são iguais a 0.50, 0.20, 0.10, 0.04, 0.02, 0.01, 0.004 e 0.002, que correspondem respetivamente aos períodos de retorno de 2, 5, 10, 25, 50, 100, 250 e 500 anos. As funções de probabilidade (ou de frequência) de ocorrência podem ser analíticas ou gráficas.

Será usado o procedimento analítico, sempre que a função de probabilidade possa ser desenvolvida com uma distribuição do tipo Log Pearson III (método utilizado para o cálculo da função de incerteza, da média, do desvio-padrão e do número de registos equivalentes).

O método analítico é geralmente usado para funções de probabilidade irregulares, ou seja quando o fluxo de caudal não é regular.

4.2.2. Análise económica

Para a quantificação dos danos, depois de realizada a análise hidrológica, será necessário realizar a análise económica. Primeiramente tem de ser definida a categoria do dano, em função do tipo de estrutura. A categoria do dano agrupa diferentes tipos de estruturas com características semelhantes, tais como: comerciais, residenciais, industriais, espaços abertos e edifícios públicos. Para a determinação do valor monetário de uma estrutura atribuída a uma categoria de dano será utilizado um índice de preço.

A análise económica requer a seleção de uma função de probabilidade de ocorrência para cada projeto, para um ano específico e para a zona de risco.

Para cada tipo de estrutura identificada é definida a relação entre a profundidade da água e o dano, o valor da estrutura em si, e o valor do seu recheio. A função profundidade-dano define a percentagem da estrutura atingida por um determinado nível de cheia. O dano percentual é afetado à estrutura de forma a obter uma única função de profundidade-dano relativa àquela estrutura específica. A profundidade zero é a associada ao rés-do-chão de cada estrutura. Também para esta função deve ser definida a incerteza, devendo ser utilizada uma das já mencionadas, normal, triangular ou logarítmica.

Deverá ser elaborado um inventário das estruturas, sendo atribuídas a cada uma determinadas categorias de dano, tipo de ocupação, curso de água e módulo estrutural. O módulo especifica qual o ano de projeto, sendo reagrupadas as estruturas para facilitar a análise. A definição dos módulos estruturais deve ocorrer antes de se desenvolver o inventário das instalações. Para o cálculo do dano provocado pela inundação são utilizadas funções que relacionam o nível de água com a percentagem do dano (*depth percent damage functions*) sendo que o programa calcula uma função (*stage damage function*) sobre os danos de cada categoria, com referência ao índice de localização (*index location*) através da utilização do inventário das estruturas.

4.2.3. Análise de resultados

O HEC-FDA permite obter uma ampla gama de resultados, a análise de risco de inundação (*Flood Risk Performance*), dano anual esperado (*Damage by Year*) e dano equivalente para um determinado período de tempo definido (*Damage by Analysis Year*). Os resultados podem ser apresentados sob a forma de tabelas ou de gráficos, que evidenciam com clareza as informações que foram definidas para o cenário do projeto, para o ano em apreço e para as zonas de risco definidas (*damage reaches*) do curso de água.

O projeto-base é definido para um ano de realização da análise e é aplicado a todo o período de análise que venha a ser definido para a duração do projeto. O estado atual (*without project condition*) é o cenário-base relativamente ao qual se poderão comparar os cenários sucessivamente criados. As zonas de risco são definidas como as que estão potencialmente sujeitas ao risco de inundação, e utilizadas para definir a estrutura dos dados para o cálculo e em particular para o posicionamento das estruturas.

O cálculo do HEC-FDA baseia-se no dano associado a um evento específico de probabilidade de ocorrência.

O objetivos hidrológico neste estudo de redução dos danos de inundação consiste na determinação do dano anual esperado ao longo de um troço do curso de água, após a ocorrência de cheias. O método a seguir tem em consideração os caudais, iguais ou superados para um determinado período de retorno. Ao período de retorno, Tr , está associada a probabilidade de ocorrência, p , de acordo com a seguinte expressão:

$$Tr = \frac{1}{p} \Leftrightarrow p = \frac{1}{Tr} \quad [1]$$

Para uma probabilidade anual de ocorrência de um evento de inundação, p , pode ser estimado o correspondente dano, D . Este será baseado na profundidade da inundação e no valor das estruturas inundadas. O dano anual esperado (*expected annual damage*) é o valor médio dos danos que serão provocados por inundações, considerando todas as probabilidades de ocorrência anuais, durante um determinado número de anos. Esta definição é traduzida matematicamente através da seguinte expressão:

$$EAD = \int_0^1 D(p) dp \quad [2]$$

O cálculo desta expressão é realizado em três fases distintas:

1. Determinação da curva de caudal / probabilidade de ocorrência (*discharge-frequencies*): Calcula a probabilidade do caudal Q ser igualado ou superado para um determinado período de retorno Tr ;
2. Determinação da relação entre o nível de água e o caudal (*discharge-stage*): Calcula para um determinado caudal, numa zona definida para o curso de água, qual o nível de água que é atingido;
3. Determinação da relação entre os danos causados e o nível de água atingido (*damage-stage*). Calcula os valores a que os danos poderão ascender para uma determinado nível de água atingido.

Associando os resultados obtidos para cada uma das relações acima referidas, obtém-se uma função de dano-probabilidade de ocorrência (*damage-exceedance*) que será integrada para obter o dano anual esperado (*expected annual damage*).

Na Figura 3 apresenta-se uma ilustração das funções calculadas pelo programa sendo que a zona sombreada abaixo da curva da função de dano-probabilidade de ocorrência corresponde ao dano anual esperado, traduzido pela expressão [2] acima indicada.

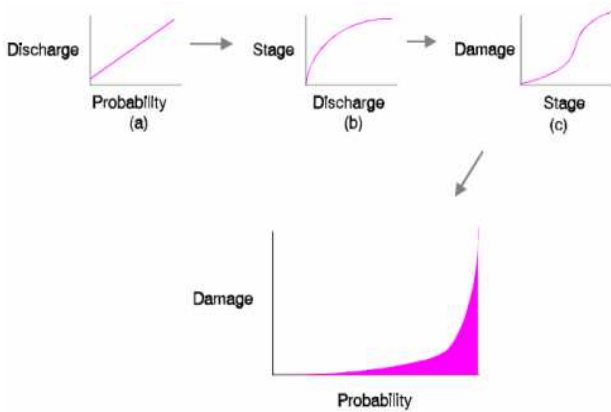


Figura 3. Transformação de funções no cálculo dos danos associados às inundações.

O procedimento computacional utilizado pelo software HEC-FDA utiliza o método de Monte Carlo para proceder à integração numérica da curva de probabilidade de ocorrência de danos (*damage-exceedance*) para uma zona de risco.

A função probabilidade de ocorrência de danos é obtida com base nas funções anteriormente referidas: Caudal / probabilidade de ocorrência (*discharge-frequencies*), Nível de água / caudal (*discharge-stage*) e Danos causados / nível de água (*damage-stage*).

A simulação de Monte Carlo é utilizada para gerar novas configurações para cada uma das curvas descritas. Para cada uma destas novas curvas, é gerado um novo valor de dano anual esperado.

Por outras palavras, para cada intervalo de probabilidade de excedência d_p , é utilizado um valor representativo de p^* , a partir do qual é encontrado o valor do caudal Q^* utilizando a curva de distribuição, o correspondente nível de água H^* utilizando a curva de caudal-nível de água e por fim os consequentes danos D^* a partir da curva de dano-nível de água.

Continuando este processo e integrando os resultados é encontrado o dano anual esperado. A simulação de Monte Carlo continua a ser processada em centenas de ciclos, até que os valores estatísticos sejam coerentes.

A simulação de Monte Carlo é utilizada para melhorar a sensibilidade na análise a realizar, uma vez que integra todas as possibilidades de ocorrência aleatórias que advêm das funções acima indicadas.

4.3. Aplicação do HEC-FDA ao caso de estudo

Para a aplicação do software ao caso de estudo foram utilizados dois elementos de base fundamentais: o levantamento batimétrico, fornecido pelo Instituto Portuário e dos Transportes Marítimos (IPTM) e a cartografia digital do Peso da Régua, fornecida pela Câmara Municipal.

A cartografia fornecida permitiu referenciar os locais que constituem a zona de estudo, associando-os às cotas topográficas. Através do levantamento batimétrico obteve-se o perfil transversal do rio Douro no troço em apreço.

Estes dois levantamentos estão referenciados ao nível médio do mar, ou seja ao nivelamento geral do país, aspeto que foi confirmado, uma vez que os levantamentos acima de Crestuma, por não estarem sujeitos ao regime de marés são articulados com a topografia local.

A zona de risco definida para o estudo é a representada na Figura 4, sobre a cartografia local.

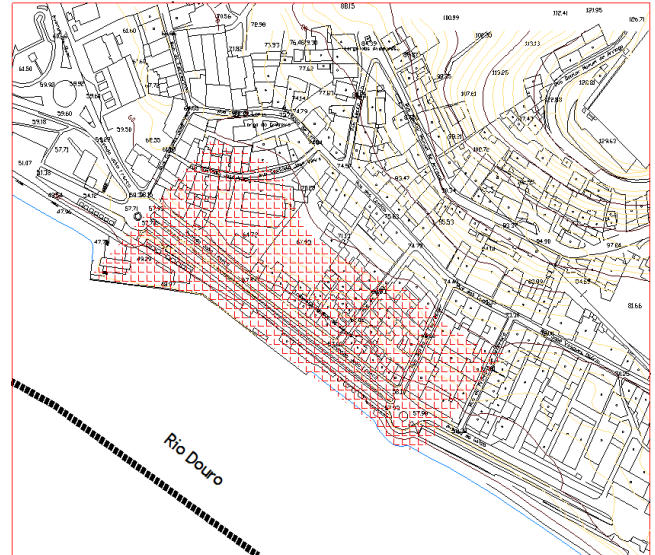


Figura 4. Zona de risco em estudo.

4.3.1. Estudo Hidráulico

Para o desenvolvimento do estudo hidráulico foi necessário conhecer os caudais associados a vários períodos de retorno.

Estes dados foram obtidos após consulta de publicação sobre inundações no rio Douro, onde a partir do mais completo registo de caudais máximos instantâneos anuais e utilizando a Lei de Gumbel, foram determinados para o Peso da Régua, os caudais de cheia para diferentes períodos de retorno, obtendo-se a relação expressa na Figura 5.

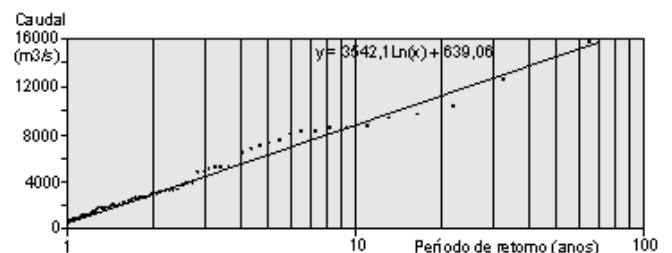


Figura 5. Relação caudal/período de retorno para o Peso da Régua.

De forma a conhecer-se a cota atingida para os caudais de cheia obtidos a partir da expressão anterior, foi considerada a relação entre os caudais de cheia e as cotas registadas no Peso da Régua.

Foi ainda necessário atribuir mais um ponto, correspondente à cota 42 (fundo do rio), com base no levantamento batimétrico, associado a um caudal mínimo, para se conseguir realizar a aproximação logarítmica ao comportamento do curso de água.

A relação obtida é traduzida pela seguinte expressão, que permite calcular as cotas de cheia em função do caudal,

$$y = 7.7956 \ln(x) - 8.7779 \quad [3]$$

Os dados de base utilizados para inserção no HEC-FDA são os que estão compilados no Quadro 1.

Quadro 1. Dados hidráulicos para inserir no HEC-FDA.

Período de Retorno (anos)	Probabilidade de Excedência	Caudal (m ³ /s)	Cota (m)
2	0.5000	3094	53.85
5	0.2000	6339	59.45
10	0.1000	8795	62.00
25	0.0400	12040	64.46
50	0.0200	14495	65.90
100	0.0100	16951	67.13
245	0.0041	20125	68.46
300	0.0026	21771	69.08

4.3.2. Estudo económico

É nesta fase que são incluídos todos os dados relacionados com os edifícios (habitações, indústrias, hospitais, escolas, edifícios públicos, etc.) para os quais se pretende avaliar os efeitos de uma inundação. Cada estrutura foi inserida individualmente no HEC-FDA.

Não existindo ou não estando disponível um arquivo territorial, que compile a informação dos vários aspetos relacionados com as estruturas existentes de forma georreferenciada, seria interessante que os municípios desenvolvessem, um levantamento cadastral, que permitiria a importação de ficheiros de bases de dados com diversos elementos necessários para este e outro tipo de estudo.

O HEC-FDA pode importar três tipos de dados, a categoria dos danos, o tipo de ocupação e os dados relativos ao imóvel. As categorias de dano consideradas para a zona em estudo foram: habitação, comércio e edifícios públicos. Na zona de risco considerada não estão localizadas indústrias, pelo que não se considerou esta categoria.

Todas as estruturas têm, assim, uma categoria e um tipo de classe de ocupação associados. No levantamento de campo com apoio topográfico, é feita a determinação das cotas de soleira.

Os dados referentes à valorização das estruturas das habitações foram obtidos através de pesquisa no local e consulta a agências de imobiliário. A determinação da percentagem do conteúdo relativamente ao valor da estrutura foi atribuída nesta fase considerando o tipo de ocupação.

A relação entre a profundidade e os danos é o instrumento mais importante na análise do custo-benefício em projetos de redução do risco de inundações. A função matemática profundidade-dano define a relação entre a profundidade da água acima ou abaixo da cota do rés-do-chão de cada estrutura e conteúdos em análise, e os danos que podem ser associados àquela quantidade de água. Estas funções são processadas de forma independente para a estrutura e para os conteúdos.

Depois de se caracterizar o tipo de ocupação, é necessário definir para cada estrutura registada no levantamento, as suas características individuais, incluindo a sua localização relativamente às estações atrás definidas, o valor da estrutura e do conteúdo, a cota do rés-do-chão, a indicação da existência de pisos enterrados, entre outros parâmetros que podem adicionalmente ser inseridos, mas que não são de carácter obrigatório. Assim, cada estrutura é associada à zona de risco em estudo, ao ano de análise, e às condições de projeto. O preenchimento do valor do conteúdo nesta caracterização individual não é obrigatório, pelo que o HEC-FDA calcula o seu valor tendo em conta os elementos considerados para cada tipo de ocupação, associando a respetiva percentagem. É ainda no menu de análise económica que são determinadas as funções nível de água-dano (*Stage-Damage Functions*). O HEC-FDA define esta função como a relação direta entre o custo económico e os danos provocados por uma inundação ocorrida para uma determinada zona de risco. São funções específicas que podem ser introduzidas ou geradas pelo HEC-FDA para um determinado projeto, ano de análise, curso de água e zona de danos, tendo em conta os elementos das estruturas existentes e a sua classe de ocupação.

No menu de cálculo representado na Figura 6, deve ser selecionado o projeto e o ano de análise que se pretende calcular. Para este estudo foi considerado apenas um projeto-base (*without project condition*).

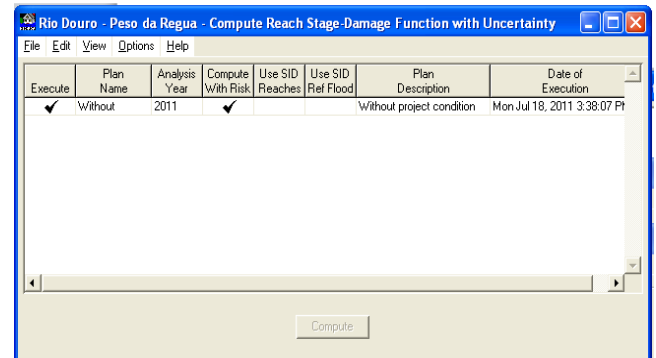


Figura 6. Cálculo automático da função nível de água-dano.

No HEC-FDA pode ser consultada a listagem das funções geradas para a zona de risco considerada, obtendo-se também o seu detalhe, pontos considerados e o desvio-padrão obtido.

Para este caso de estudo foram geradas pelo HEC-FDA três funções, para cada categoria definida: comércio (Figura 7), habitação (Figura 8) e edifícios públicos (Figura 9), que contabilizam os danos causados em valores monetários para cada nível que a água venha a atingir. Os gráficos gerados para estas funções evidenciam os níveis atingidos pela água e o valor correspondente de prejuízos causados, tendo em conta os parâmetros que foram introduzidos para cada categoria. O programa calcula assim as curvas de nível de água-dano para cada categoria e para cada zona de risco (*damage reach*), com referência à secção do rio considerada e ao índice de localização (*index location*). O índice de localização foi definido atrás quando se configurou a zona de risco, e a altura de água foi introduzida no menu de análise hidráulica, quando se caracterizou a secção do rio.

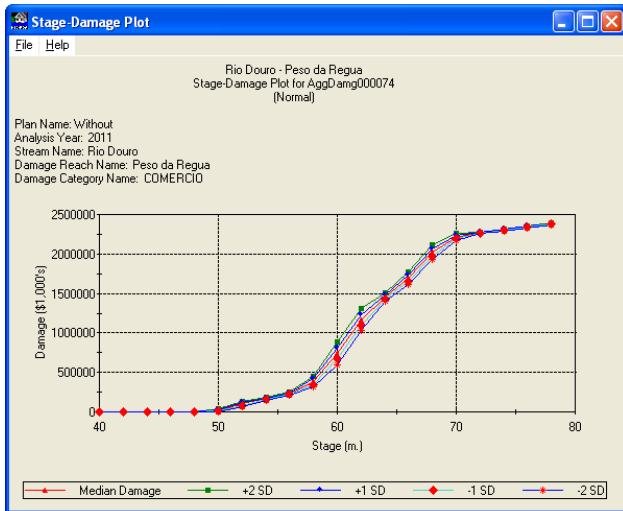


Figura 7. Função nível de água-dano para a categoria Comércio.

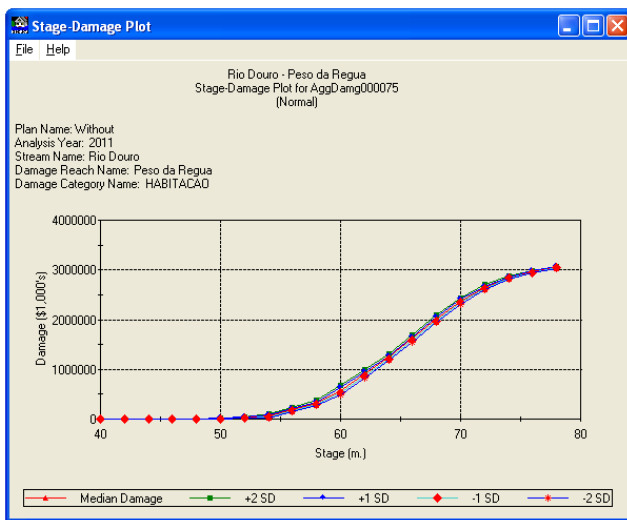


Figura 8. Função nível de água-dano para a categoria Habitação

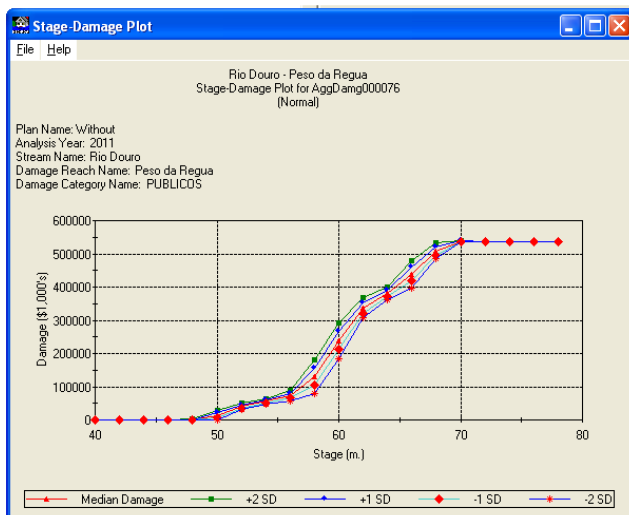


Figura 9. Função nível de água-dano para a categoria Edifícios Públicos.

Para a categoria Comércio, o gráfico mostra que os danos começam a ocorrer quando a cota sobe acima dos 50 m, isto porque a maior parte das instalações comerciais estão localizadas na Avenida D. João Franco que é o arruamento que se encontra à cota mais baixa.

Para a categoria Habitação, o gráfico evidencia que os danos começam a ocorrer quando a cota se aproxima dos 55 m, tendo até este nível de água, um valor de danos muito residual.

Para a categoria Edifícios Públicos, podemos verificar através do gráfico produzido que os danos começam a ocorrer quando a cota chega aos 50 m, sendo a partir deste valor muito elevados, dado o seu grande valor patrimonial.

4.4. Resultados obtidos

A análise de resultados (*Evaluation*) permite fazer a revisão do estudo, pela aplicação de dois tipos de análise e visualização de resultados:

- Cálculo automático dos danos anuais esperados e comportamento do projeto;
- Cálculo automático dos danos equivalentes anuais para o ano horizonte do projeto e cenários criados.

Neste estudo apenas foi aplicada a primeira análise, visto que não foram definidos cenários futuros ou implementação de medidas de minimização dos danos. O procedimento utilizado no cálculo automático é o método de Monte Carlo que já foi descrito anteriormente.

O cálculo automático dos danos anuais esperados resulta de uma combinação das funções de probabilidade de excedência, funções de nível de água-caudal e do inventário das estruturas introduzidas no HEC-FDA.

Para as zonas de risco onde não existam estruturas de minimização de danos o cálculo do FDA baseia-se no dano residual associado a um evento específico de excedência de probabilidade de ocorrência.

Por defeito o programa considera que 5% de dano residual, associado a uma probabilidade de ocorrência de 0,01 são valores consistentes, pelo que se deve aceitar este critério, a menos que se obtenham valores mais adequados ao estudo em curso. Seleciona-se assim o cenário para o qual se pretende realizar a avaliação.

O relatório mais relevante produzido pela seleção da caixa “General Information Reports” é o “Monte Carlo Analysis Summary” que permite obter o número de iterações realizadas, a variação média anual de danos esperados e o erro associado a cada uma das médias obtidas.

Tendo em conta os valores considerados para cada categoria de danos estabelecida, o seu valor é superior para a categoria “comércio”, por razões evidentes, devido à existência de muitas estruturas desta tipologia na zona de estudo considerada e porque o valor do seu conteúdo é consideravelmente superior ao de uma habitação comum.

A representação desta análise é efetuada no gráfico comparativo entre os danos para cada categoria, produzido pelo HEC-FDA, Figura 10.

Por último, a caixa “Expected Annual Damage” consiste na produção de quatro relatórios de danos anuais esperados com base em:

- Categorias de danos;
- Redução de danos;

- Cenários e ano de análise;
- Ano de análise.

No caso de estudo presente apenas tem aplicabilidade o relatório produzido de acordo com as categorias de danos, uma vez que o cenário de avaliação é único e ocorre apenas para um ano específico de análise, por categoria de dano, ascendendo a um valor total superior a 600.000€.

O resultado total obtido de cerca de 600.000 € corresponde ao integral da função probabilidade de excedência – danos representada pelo integral da área sob a curva a preto, para uma probabilidade de 0,01 representada no gráfico da Figura 10.

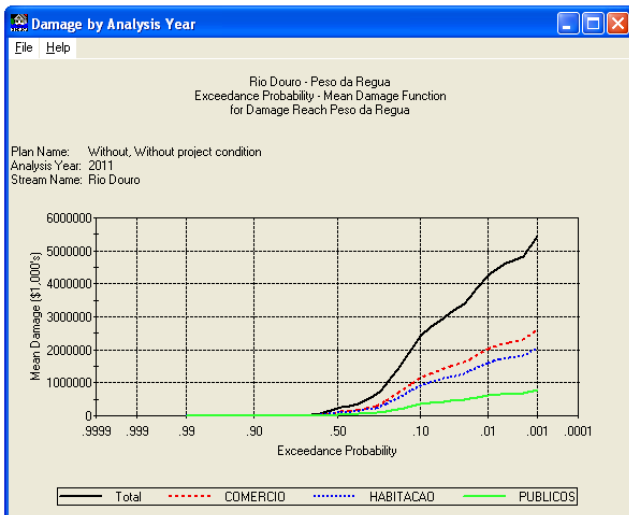


Figura 10. Gráfico Probabilidade de Excedência-Danos.

Este valor representa a média de todos os valores de danos possíveis, em relação ao cenário existente na zona baixa do Peso da Régua, para o ano de análise de 2011, para o rio Douro, cujo cálculo considerou o método de Monte Carlo, fazendo uso das três relações em que se baseia o HEC-FDA:

- Caudal / Probabilidade;
- Caudal / Nível de água;
- Nível de água / Dano.

5. Considerações Finais

Os benefícios e as melhorias resultantes de uma correta avaliação de riscos devem ser consideradas, aplicadas e monitorizadas ao longo de toda a vida de um projeto, e sempre comparadas com o cenário base de uma situação existente.

Assim, o cenário base avaliado neste caso de estudo deverá constituir um modelo sobre o qual poderão ser propostas alterações tendo em vista a redução dos riscos de inundação.

Com este estudo foram avaliados de forma objetiva os custos que estão diretamente associados a uma ocorrência de inundação para a zona considerada como zona de risco.

Este tipo de análise localizada pode ser expandida e reproduzida para áreas mais extensas, permitindo verificar a repetição de resultados em toda a zona possível de ser afetada, ou seja, esta simplificação permitiu desenvolver a metodologia para futuras aplicações da mesma natureza.

Muito embora existam os instrumentos legais que permitiriam já ter sido feito muito mais no campo da prevenção e da minimização, existe aparentemente uma certa inércia operacional, por razões que se desconhecem, muitas vezes atribuída aos decisores, mas que também pode ser imputada ao alheamento das instituições assim como do público em geral, que potenciam por vezes o aumento dos efeitos das inundações e as suas perdas e danos. Não pode deixar de ser sugerido o estímulo para o desenvolvimento desta temática junto das populações, antecipando as ocorrências, e melhorando os sistemas de alerta e aviso.

Referências

- Aires, C., Pereira, D., Azevedo, T. (2000). *Inundações do Rio Douro: Dados Históricos e Hidrológicos*, I Jornadas do Quaternário da APEQ, Faculdade de Letras – Universidade do Porto, Porto.
- Baecher, G., Fouloula-Georgiou, E. e Keeney, R. (2000). *Risk Analysis and Uncertainty in Flood Damage Reduction Studies*, National Academy Press, Washington.
- Carvalho, L. (2009). *A Importância do Rio na Cidade – Análise do Risco de Inundação no Perímetro Urbano da Cidade de Leiria*, Dissertação de Mestrado em Ordenamento do Território e Planeamento Ambiental, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa.
- Hydrologic Engineering Center (2008). *HEC-FDA Flood Damage Reduction Analysis – User's Manual – Version 1.2.4.*, US Army Corps of Engineers.
- Instituto da Água (2003). *As Cheias no Douro Ontem, Hoje e Amanhã*, Ministério das Cidades, Ordenamento do Território e Ambiente.
- Instituto de Hidráulica e Recursos Hídricos (2007). *Carta de Zonas Inundáveis na Área de Intervenção do Município do Peso da Régua*, Relatório Final.
- Lencastre, A. (2006). Franco, F.M., *Lições de Hidrologia*, Fundação da Faculdade de Ciências e Tecnologia – Universidade Nova de Lisboa, Lisboa.
- Plate, E. (2002). *Flood Risk and Flood Management*, Journal of Hydrology, 2-11, Elsevier Science B.V., Karlsruhe.
- Ramos, C. (2008). *Risco de Cheias e Ordenamento do Território*, Curso Nova Diretiva Europeia Avaliação e Gestão de Riscos de Inundações Fluviais e Costeiras, FUNDEC, Instituto Superior Técnico, Lisboa.
- Rebelo, F. (2010). *Geografia Física e Riscos Naturais*, Imprensa da Universidade de Coimbra, Coimbra.
- Rocha, J. (2001). *O Risco das Inundações e a sua Gestão – Uma Visão Nacional e Uma Visão Europeia*, LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Núcleo de Recursos Hídricos e Estruturas Hidráulicas, Lisboa.
- Sá, S., Machado, A. (2009). *Questões Significativas da Gestão da Água no Contexto Transfronteiriço*, Jornadas Luso-Espanholas de Participação Pública, Peso da Régua.