MODELAÇÃO DA INUNDAÇÃO FLUVIAL DO BAIXO MONDEGO

RIVER FLOOD MODELING OF BAIXO MONDEGO

Elsa ALVES
Associada APRH, Doutora em Engenharia Civil, Investigadora Auxiliar, LNEC

Lourenço MENDES
Engenheiro Civil, Bolseiro de Investigação, LNEC

RESUMO: A região do Baixo Mondego tem sido sujeita a inundações cuja extensão importa caracterizar, em particular no contexto da aplicação da diretiva de avaliação e gestão dos riscos de inundações (2007/60/CE), com o objetivo reduzir o risco e as consequências prejudiciais que lhes estão associadas.
O presente trabalho apresenta os resultados da modelação das inundações no Baixo Mondego, no trecho compreendido entre a confluência do rio Ceira e o limite de propagação da maré a jusante. Neste trecho, com cerca de 44.7 km de extensão, o sistema de defesa contra cheias inclui o controlo dos caudais de cheias nas albufeiras a montante, os diques de proteção nas margens direita e esquerda ao longo de cerca de 36 km e o sistema de inundação controlada dos campos.
Neste artigo descreve-se a metodologia utilizada, justificam-se os cenários de simulação adotados, incluindo o funcionamento do sistema de inundação controlada do Baixo Mondego, analisam-se os resultados, dando-se ênfase aos níveis e velocidades atingidos e à propagação das inundações e apresentam-se os mapas de inundação.

Palavras-chave: modelação numérica, rio Mondego, inundações, diques de proteção, sifões e dique fusível.

ABSTRACT: The region of Baixo Mondego has been subject to flooding whose extension needs to be characterized, particularly in the context of the application of the directive on the assessment and management of flood risks (2007/60/EC), in order to reduce the risk and adverse consequences associated with floods.
This work presents the results of river flood modeling in the Baixo Mondego region, in the reach between the confluence of the river Ceira and the limit of tidal propagation downstream. In this reach, with 44.7 km long, the flood defense system includes the control of flood flows in reservoirs located upstream, the protection dikes along the right and left margins over 36 km and the flooding controlled system of the fields.
In this paper the methodology used is described, the adopted simulation scenarios are justified, including the operation of the flooding controlled system of Baixo Mondego, the results are analyzed, with emphasis on the flood levels and velocities and flood propagation and the flood maps are presented.

Keywords: numerical modeling, river Mondego, flooding, flood protection dikes, siphons and fuse plug spillway.

1. INTRODUÇÃO

A região do Baixo Mondego tem sido sujeita a inundações de origem fluvial cuja extensão importa caracterizar, em particular no contexto da aplicação da diretiva de avaliação e gestão dos riscos de inundações (2007/60/CE), com o objetivo de reduzir o risco e as consequências prejudiciais que lhes estão associadas.

O trecho do rio Mondego em estudo tem cerca de 44.7 km de extensão, estando compreendido entre a confluência do rio Ceira e o limite de propagação da maré a jusante (Figura 1). Este trecho integra-se no conjunto de intervenções realizadas no âmbito do Plano Geral do Aproveitamento Hidráulico da bacia do Mondego, elaborado em 1962 e executado parcialmente na década de 1980, que incluíram a regularização fluvial do leito central do rio Mondego, a construção de barragens a montante para o controlo de cheias e produção de energia e a realização de obras de rega e enxugo dos campos do Baixo Mondego. A descrição detalhada dessas intervenções pode ser encontrada em Sanches (1996) e em Lencastre (2004) pelo que apenas se referem os aspetos mais relevantes para o enquadramento do presente estudo.

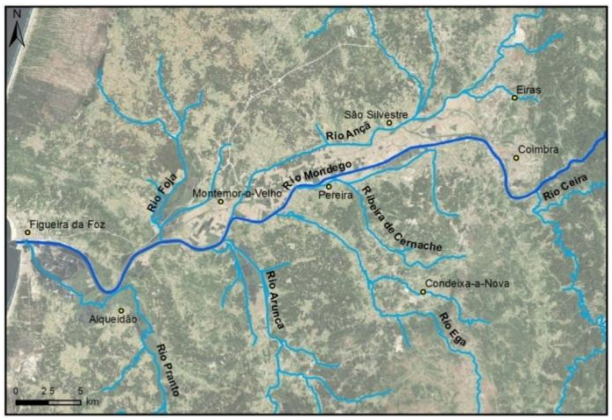


Figura 1 - Rede hidrográfica no trecho final do rio Mondego.

As obras de regularização do leito central do rio Mondego a jusante do Açude-Ponte de Coimbra implicaram a alteração do traçado do rio e da configuração da secção transversal e a construção de diques longitudinais nas margens direita e esquerda para evitar a inundação dos campos marginais. O leito central tem uma secção transversal tipo trapezoidal com larguras no fundo entre 88.0 e 142.2 m. A cota do topo dos diques varia entre 3.9 e 19.2 na margem esquerda e entre 4.1 e 19.5 na margem direita. O leito central foi dimensionado para a cheia centenária amortecida de 1200 m^3/s associada aos caudais de cheias com período de retorno de 25 anos dos afluentes do Baixo Mondego.

Para evitar o galgamento dos diques em situações de ocorrência de caudais superiores a 1200 m^3/s em Coimbra, foram executadas quatro estruturas de descarga ao longo do leito central que constituem o sistema de inundação controlada dos campos. O funcionamento pleno das quatro estruturas permite a descarga de um caudal total de 760 m^3/s.

A caracterização do comportamento hidráulico do trecho regularizado do rio Mondego reveste-se de grande importância no contexto da proteção contra cheias dos campos do Baixo Mondego, em particular, após os eventos de cheias ocorridos em 2001 que originaram o galgamento e rotura dos diques de proteção e a inundação prolongada dos campos marginais. Nesse âmbito procedeu-se à simulação numérica das condições de escoamento no leito central do rio Mondego a jusante da confluência do rio Ceira utilizando um modelo unidimensional e à simulação das inundações na planície do Baixo Mondego aplicando um modelo bidimensional.

Após a introdução, descreve-se a metodologia utilizada na implementação dos modelos e justificam-se os cenários de simulação adotados. Apresentam-se os resultados das simulações que permitiram caracterizar as condições de escoamento ao longo do rio Mondego e elaborar as cartas de zonas inundáveis em Coimbra e na planície do Baixo Mondego. Finalmente, são apresentadas as conclusões do estudo.

Este artigo foi apresentado no 12º Congresso da Água e selecionado para submissão e possível publicação na *Recursos Hídricos*, tendo sido aceite pela Comissão de Editores Científicos Associados em 30 de maio de 2014. Este artigo é parte integrante da Revista *Recursos Hídricos* , Vol. 35, Nº 2, 41-54, novembro de 2014.
© APRH, ISSN 0870-1741 | DOI 10.5894/rh35n2-4

2. METODOLOGIA

2.1. Considerações gerais

No estudo das inundações do rio Mondego a jusante da confluência com o rio Ceira, a complexidade do funcionamento conjunto do leito regularizado e seus afluentes e do sistema de inundação controlada dos campos do Baixo Mondego, impõe que sejam consideradas hipóteses quanto ao funcionamento do sistema:

1) As inundações nas margens do rio Mondego a jusante do Açude-ponte de Coimbra resultam fundamentalmente das cheias ocorridas naquele curso de água e, consequentemente, do funcionamento das estruturas de descarga ou do galgamento/rotura dos diques longitudinais. As eventuais inundações nos campos do Baixo Mondego resultantes das cheias nos afluentes não são tidas em consideração neste estudo. Esta hipótese resulta de se admitir que a sua extensão é relativamente limitada e localizada.

2) Decorrente da hipótese anterior, a modelação das condições de escoamento no leito regularizado do rio Mondego e nas respetivas margens é feita em separado, utilizando dois modelos numéricos diferentes. Atendendo às características geométricas do leito central do rio Mondego, considera-se que a hipótese de unidimensionalidade permite reproduzir adequadamente as condições de escoamento que aí ocorrem. O escoamento na margem direita, resultante do funcionamento das estruturas de descarga, é simulado com um modelo bidimensional, admitindo interação entre o escoamento na margem e no leito principal na zona da confluência com o leito periférico direito.

2.2. Metodologia

A metodologia para a prossecução dos objetivos deste estudo assenta numa análise da bibliografia e da informação de base disponível, na simulação computacional de eventos extremos de cheias e do funcionamento das estruturas de descargas na margem direita e na elaboração de cartas de inundação. Em Alves e Mendes (2012) é analisada a informação relativa aos dados geométricos, hidráulicos e da exploração de albufeiras e são identificados os limites da informação disponível, em particular no que se refere à inexistência de dados de níveis e caudais ao longo do rio Mondego.

Para a aplicação dos modelos numéricos e posterior elaboração de cartas de inundação foram seguidos os seguintes passos:

- Construção de um modelo digital do terreno composto pela informação do leito central e das margens do rio Mondego

Após a delimitação da área de estudo procedeu-se à construção de um modelo digital do terreno. Os elementos topo-hidrográficos disponibilizados consistiram no levantamento disponibilizado pelo INAG do rio Mondego desde a foz até ao Açude-Ponte de Coimbra e no levantamento hidrográfico da albufeira do Açude-Ponte de Coimbra. Na caracterização das margens foi utilizada a topografia de Coimbra e a Carta Militar M888. Este modelo digital do terreno permite caracterizar um domínio extenso com 220 km² e incorpora informação detalhada relativa às estruturas existentes (açudes, soleiras, esporões, diques). Refira-se que na construção do modelo digital do terreno, foi considerado o sistema de referencial PT-TM06/ETRS89 - European Terrestrial Reference System 1989.

- Classificação da superfície do modelo digital do terreno em classes de rugosidade

A aplicação dos modelos numéricos de simulação do escoamento requer a definição de coeficientes de rugosidade no leito do rio Mondego bem como nas margens. Tendo em conta este objetivo foi necessário identificar o tipo de ocupação das margens do Mondego utilizando a Carta de Ocupação do Solo (COS'90) do Instituto Geográfico Português, à escala 1:25 000, datada de 1990, e as imagens aéreas da BING-Microsoft datadas de 2009.

Numa fase inicial, e para a zona em estudo, agruparam-se as subclasses de ocupação do solo definidas na COS'90 em 12 classes consideradas representativas do tipo de ocupação na zona e da resistência que oferecem ao escoamento. Posteriormente, os limites das áreas associadas a cada uma das 12 classes foram verificados e corrigidos mediante a comparação com imagens aéreas da BING-Microsoft datadas de 2009. Na Figura 2 apresenta-se a ocupação do solo na zona em estudo.

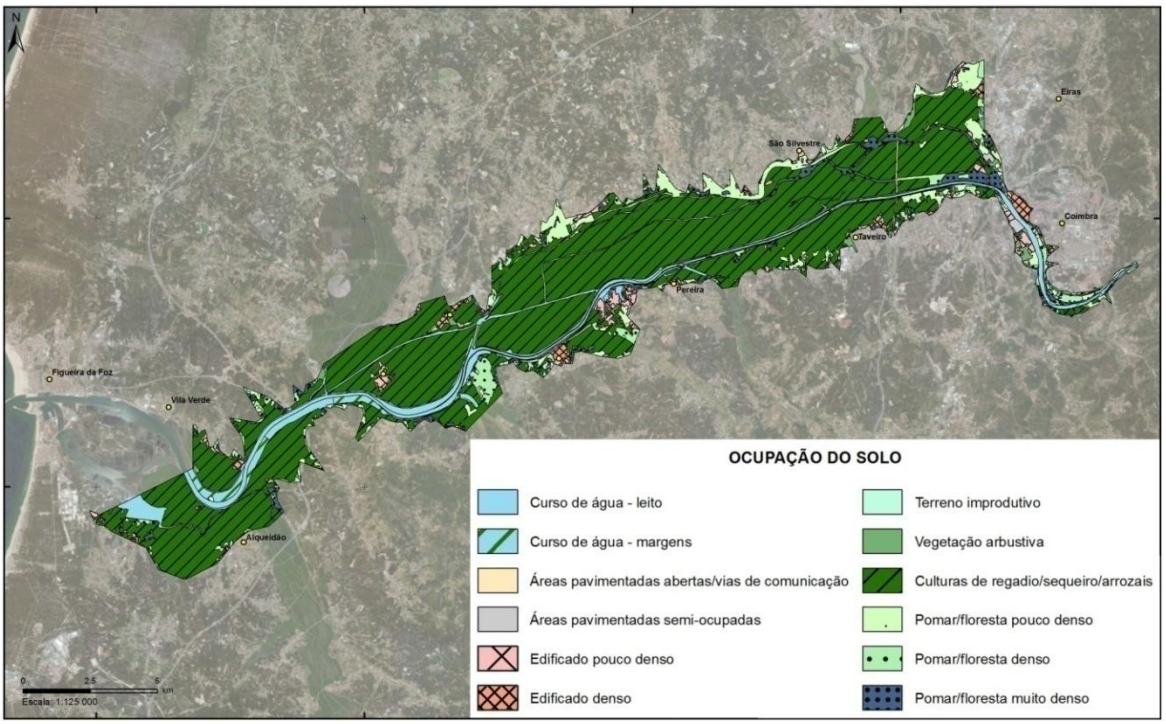


Figura 2 - Ocupação do solo na zona do Baixo Mondego.

- Aplicação dos modelos numéricos

Neste estudo foram utilizados dois modelos numéricos na simulação das condições de escoamento no leito central do rio Mondego e nas margens.

As condições de escoamento no leito central do rio Mondego foram determinadas com o software HECRAS – River Analysis System, desenvolvido pelo Hydrologic Engineering Center do U. S. Army Corps of Engineers

A simulação das inundações nas margens do rio Mondego foi efetuada com o modelo numérico CCHE2D, desenvolvido no National Center for Computational Hydroscienceand Engineering, Universidade do Mississippi, EUA (Jia e Wang 2001). Trata-se de um modelo numérico bidimensional destinado a aplicações fluviais, tendo a capacidade de simular o escoamento numa malha bidimensional em regime não-permanente. O modelo tem em conta fenómenos como cheias, turbulência, transporte de sedimentos e qualidade da água.

Os modelos HECRAS e CCHE2D foram utilizados em conjunto com o programa ARCGIS que permite a preparação dos dados geométricos e de rugosidade e a produção de mapas com os resultados da modelação.

A aplicação dos modelos pressupõe a definição dos cenários de simulação, a malha de cálculo e as condições iniciais e de fronteira para cada cenário. A descrição dos cenários de simulação e as respetivas condições iniciais e de fronteira são apresentadas na secção 3.

A análise da informação de base revelou a inexistência de registos de valores de níveis e caudais no trecho regularizado do rio Mondego, o que inviabilizou a calibração dos coeficientes de rugosidade dos modelos. Atendendo aos limites da informação de base, efetuaram-se várias hipóteses de trabalho quanto aos coeficientes de rugosidade e à influência do nível da maré no estudo e na definição dos cenários de simulação.

Com base nos resultados da aplicação dos modelos, procedeu-se à elaboração das cartas de zonas inundáveis no Baixo-Mondego para os vários cenários de simulação.

3. CENÁRIOS DE SIMULAÇÃO

3.1. Considerações sobre os caudais de cheia no Baixo Mondego

O caudal afluente ao limite de montante do trecho do rio Mondego em estudo corresponde à soma do caudal efluente da barragem da Aguieira e de todas as afluências ao rio até essa secção. Entre essas afluências, a contribuição do rio Ceira é a mais importante.

A construção do Açude-Ponte de Coimbra permite a articulação dos regimes de exploração dos aproveitamentos da Aguieira (rio Mondego), Fronhas (rio Alva) e Raiva com o regime de caudais na tomada de água para rega e outros fins. O açude entrou em funcionamento em 1981 e cria um volume total de 1.6 hm^3. O nível de Pleno Armazenamento (NPA) está fixado à cota 18.0 permitindo garantir a alimentação dos canais de rega (25 m^3/s). O nível de máxima cheia (NMC), à cota 19.0, corresponde ao caudal de 2000 m^3/s valor da cheia milenária modificada pelas albufeiras da Aguieira e de Fronhas.

O Açude-Ponte de Coimbra é operado com nível aproximadamente constante (NPA = 18.0). Durante cheias intensas as comportas elevam-se acima da superfície livre do escoamento. Nestas situações, o efeito do armazenamento na albufeira criada pelo açude é reduzido ao do volume de água contido no leito em condições naturais. Este tipo de funcionamento é característico das barragens vulgarmente designadas de barragens móveis.

Na Figura 3 apresentam-se os caudais médios diários efluentes do Açude-Ponte de Coimbra entre 1 de janeiro de 1987 e 31 de julho de 2012. Num período de mais de 25 anos, os caudais médios diários ultrapassaram os 1000 m^3/s durante vários eventos de cheia. Nessa figura é evidente a importância dos eventos de cheia de 2001, em que os caudais médios diários aproximaram-se de 1800 m^3/s, valor superior ao caudal de dimensionamento do leito regularizado do rio Mondego.

Em 27 de janeiro de 2001 a cheia ocorrida na bacia hidrográfica do rio Mondego (Figura 4) teve como consequência a rotura dos diques a jusante de Coimbra e a inundação do vale. De acordo com o estudo de Rodrigues *et al.* (2001) o valor de caudal atingiu os 1940 m^3/s no Açude-Ponte de Coimbra. Se não existisse qualquer controlo na bacia a montante (em particular a barragem da Aguieira) o valor teria sido de 2800 m^3/s ao invés do valor anteriormente referido. O mesmo estudo apresenta o caudal afluente à Figueira da Foz que, em regime natural teria sido de 3400 m^3/s mas, com o encaixe na barragem da Aguieira, terá atingido o valor de 2470 m^3/s.

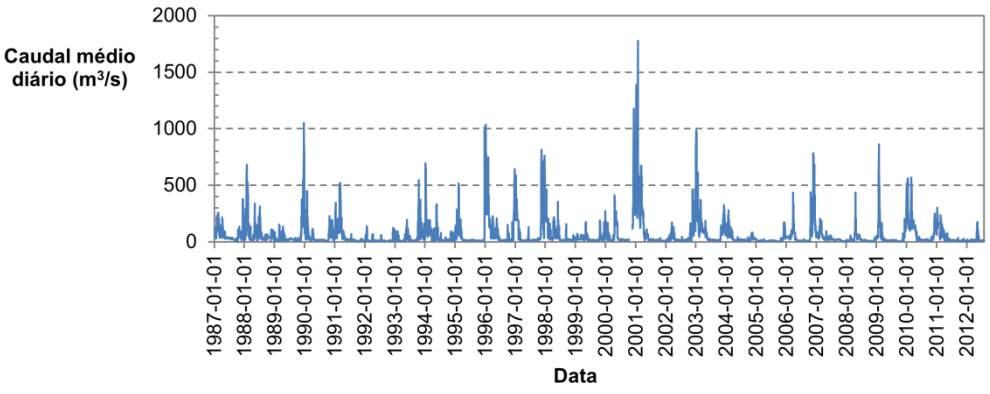


Figura 3 - Caudais médios diários efluentes do Açude-Ponte de Coimbra.

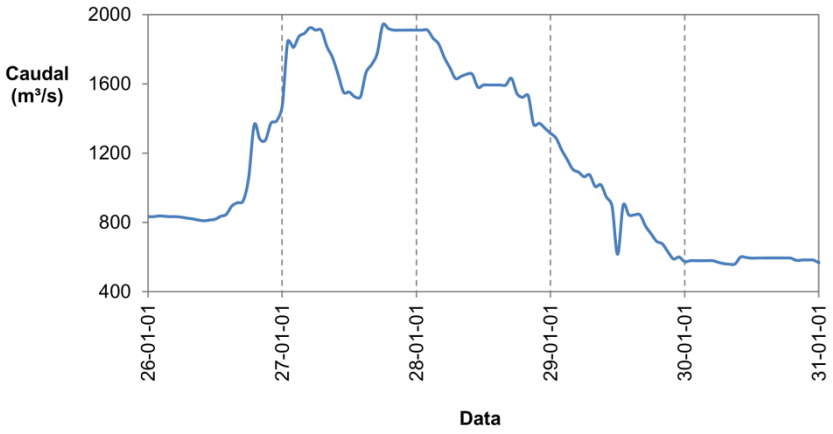


Figura 4 - Caudal afluente ao Açude-Ponte de Coimbra entre 26 e 31 de janeiro de 2001.

Na Figura 5 representa-se a relação entre os níveis na albufeira do Açude-Ponte de Coimbra e os caudais descarregados relativos ao período de 1 de dezembro de 2000 a 31 de janeiro de 2001, no qual ocorreram caudais elevados no rio Mondego. Como se pode observar, para caudais inferiores a cerca de 1200 m^3/s os níveis mantêm-se próximo do NPA e o caudal efluente é função da abertura das comportas e do número de comportas em funcionamento. Acima daquele valor, os caudais efluentes resultam da curva de vazão do descarregador do açude.

Em relação aos caudais nos afluentes do rio Mondego na zona em estudo (a jusante da confluência com o rio Ceira), uma vez que não existe informação hidrométrica disponível, refere-se, no Quadro 1, a estimativa das cheias em regime natural extraída do Plano de Gestão das Bacias Hidrográficas do Mondego, Vouga e Lis (PGBH, 2012).

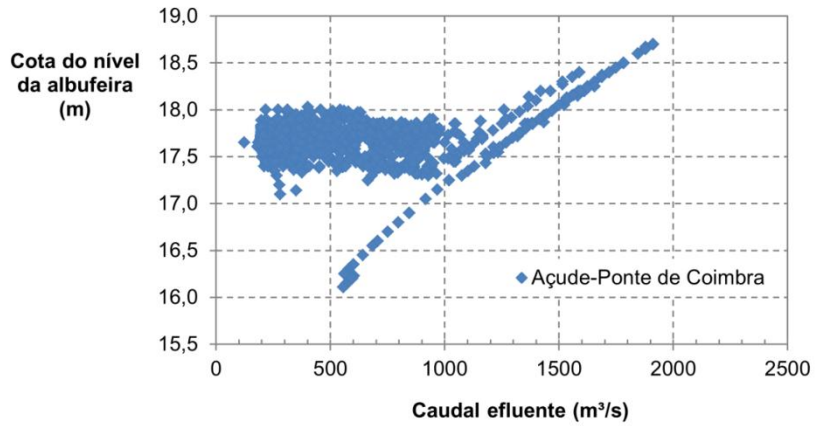


Figura 5 - Relação entre cotas do nível na albufeira do Açude-Ponte de Coimbra e caudais descarregados no período de 1 de dezembro de 2000 a 31 de janeiro de 2001.

Quadro 1 - Estimativas das cheias em regime natural na bacia do rio Mondego (extraído de PGBH do Mondego, Vouga e Lis).

Curso de água	Área da bacia (km^2)	Caudal de ponta de cheia (m^3/s)				
		T = 5 anos	T = 10 anos	T = 25 anos	T = 50 anos	T = 100 anos
Mondego – Açude-Ponte de Coimbra	4919.6	1395	1725	2131	2453	2756
rio Ceira	734.0	359	452	566	654	737
Vala de Pereira	75.7	71	91	116	135	153
rio Ega	173.6	128	164	207	240	272
rio Arunca	507.5	276	349	437	506	571
rio Pranto	257.0	170	216	272	315	356
Vala de Ançã	112.8	94	121	153	178	201
Vala Real	329.6	202	257	324	375	423
rio Foja	164.6	123	158	200	231	262

3.2. Funcionamento das estruturas de descarga

Como foi referido na Introdução, o leito central do rio Mondego foi dimensionado para o caudal em Coimbra de 1200 m^3/s associado aos caudais de cheias com período de retorno de 25 anos nos afluentes a jusante do Açude-Ponte.

Para evitar o galgamento dos diques em situações de ocorrência de caudais superiores a 1200 m^3/s em Coimbra, foram executadas quatro estruturas de descarga ao longo do leito central. As estruturas estão localizadas a montante da confluência do leito periférico esquerdo com o leito central e consistem num dique fusível e três descarregadores em sifão a jusante deste. As descargas são iniciadas de jusante para montante, diretamente para o vale central (margem direita), e posteriormente drenadas através da rede de enxugo e conduzidas até à estação elevatória da Foja que bombeia estes caudais para o leito central (Lencastre, 2004). No Quadro 2 indicam-se as condições de funcionamento das estruturas de descarga.

3.3. Influência no nível de maré no troço final do rio Mondego

Os níveis do escoamento no troço final do rio Mondego são influenciados pela propagação da maré no estuário do Mondego. A caracterização desses níveis é fundamental para estabelecer as condições de fronteira de jusante nos modelos matemáticos. Para tal analisaram-se os níveis horários da superfície livre do escoamento no trecho final do leito central junto à estação elevatória do rio Foja, entre abril de 2004 e janeiro de 2012 procurando-se estabelecer uma relação com os caudais médios diários efluentes do Açude-Ponte de Coimbra (Alves e Mendes 2012). Como seria de esperar, constatou-se que o efeito da influência da maré nos níveis do escoamento reduz-se com o aumento do caudal. Para caudais inferiores a cerca de 400 m^3/s, os níveis médios do escoamento podem apresentar variações médias ligeiramente superiores a 2 m, entre baixa e preia mares. No entanto, no período referido, o caudal médio efluente no Açude-Ponte de Coimbra foi inferior a 870 m^3/s o que não permitiu caracterizar os níveis a jusante para situações de cheias intensas.

Quadro 2 - Estruturas de descarga controlada no leito regularizado do rio Mondego.

Caudal em Coimbra (m^3/s)	Descarregador	Tipo	Caudais de funcionamento (m^3/s)	Período de retorno (anos)	Capacidade de descarga (m^3/s)
1200	4	Sifão	1200-1400	25	200
1400	3	Sifão	1400-1600	75	200
1600	2	Sifão	1600-1800	200	200
1800	1	Dique fusível	1800-2000	400	160

3.4. Cenários de simulação

Os cenários de simulação tiveram como objetivos caracterizar as condições de escoamento no trecho do rio Mondego a jusante da confluência com o rio Ceira e obter as cartas de zonas inundáveis e caracterizar as inundações originadas pelo sistema de descargas existente no dique da margem direita. Nos estudos de Alves e Mendes (2012, 2014) são apresentados os resultados de um conjunto alargado de cenários de simulação que procuram caracterizar as inundações do rio Mondego bem como avaliar a influência nos resultados da rugosidade e no nível de maré a jusante. Desse conjunto, foram selecionados três cenários que se enunciam no Quadro 3 e cujos resultados serão analisados na secção 4.

O cenário I tem como objetivo simular o funcionamento do leito regularizado do rio Mondego considerando a situação idêntica à do projeto, quanto aos caudais em Coimbra e nos afluentes do Baixo Mondego. No cenário II é propagado o hidrograma da cheia de janeiro de 2001 (Figura 4) considerando os caudais nos afluentes estimados por Rodrigues *et al.* (2001). Consequentemente, as condições de fronteira de montante dos cenários I e II são, respetivamente, o caudal e o hidrograma de cheia em Coimbra. As condições de fronteira de jusante são os níveis correspondentes ao efeito da maré nas condições de escoamento. Em ambos os cenários, na simulação da contribuição dos afluentes do Baixo Mondego assume-se que os respetivos caudais são constantes no tempo. Importa referir que no cenário II, assume-se o não funcionamento das estruturas de descarga.

No cenário III, pretende-se caracterizar as inundações na margem direita originadas pelo funcionamento das estruturas de descarga. Neste cenário é simulado um período de quatro dias que se inicia com a ocorrência do caudal em Coimbra de 2000 m^3/s, que desencadeia o funcionamento das estruturas de descarga. As descargas são iniciadas de jusante para montante com um desfasamento de duas horas, que foi estabelecido com base na análise da evolução do caudal em vários hidrogramas de cheia afluente ao Açude-Ponte de Coimbra. Admite-se que o sistema de inundação controlada funciona em pleno ao longo de um dia, pelo que após as descargas o caudal no leito regularizado, inicialmente igual a 2000 m^3/s em Coimbra, diminui progressivamente até 1200 m^3/s, valor que se mantém até à foz. Esta evolução dos caudais ocorre ao longo do primeiro dia, sendo que depois as descargas do sistema de inundação controlada cessam. Nos restantes três dias de simulação, o caudal no rio Mondego decresce de 1200 m^3/s para 800 m^3/s.

Refira-se que no cenário III, as condições de fronteira correspondem aos caudais descarregados nos sifões e no dique fusível e afluentes ao rio Mondego (Quadros 2 e3).As condições de fronteira a jusante são os níveis compatíveis com o escoamento do caudal no rio. As condições iniciais correspondem à condição de "leito seco", ou seja, ausência de escoamento na margem no início da simulação.

Quadro 3 - Cenários de simulação.

Cenário	Objetivo	Caudais
I	Caracterização do funcionamento do leito regularizado do rio Mondego	rio Mondego em Coimbra: 1200 m^3/s afluentes do Baixo Mondego: 1296 m^3/s simulação unidimensional em regime permanente
II	Caracterização do funcionamento do leito regularizado do rio Mondego e mapeamento das inundações	rio Mondego: hidrograma da cheia de 2001 (caudal máximo: 1940 m^3/s) afluentes do Baixo Mondego: 1695 m^3/s simulação unidimensional em regime variável
III	Caracterização das inundações originadas pelas estruturas de descarga	rio Mondego em Coimbra: 2000 m^3/s estruturas de descarga: 760 m^3/s simulação bidimensional em regime variável

4. RESULTADOS

4.1. Condições de escoamento no rio Mondego e inundações a montante do Açude-Ponte de Coimbra

Os resultados das simulações dos cenários I e II são apresentados nas Figuras 6 e 7, respetivamente. Nestas figuras representa-se o perfil longitudinal da superfície livre (no caso do cenário II corresponde aos valores máximos das alturas de água), a cota dos diques da margem direita e esquerda e a cota do fundo do rio. O Açude-Ponte de Coimbra está a uma distância de cerca de 36.35 km da fronteira de jusante. No cenário I observa-se que a cota da superfície livre se aproxima da cota de coroamento dos diques nos últimos 10 km do trecho em estudo, em resultado da contribuição dos afluentes do Baixo Mondego e do efeito da maré nesse troço.

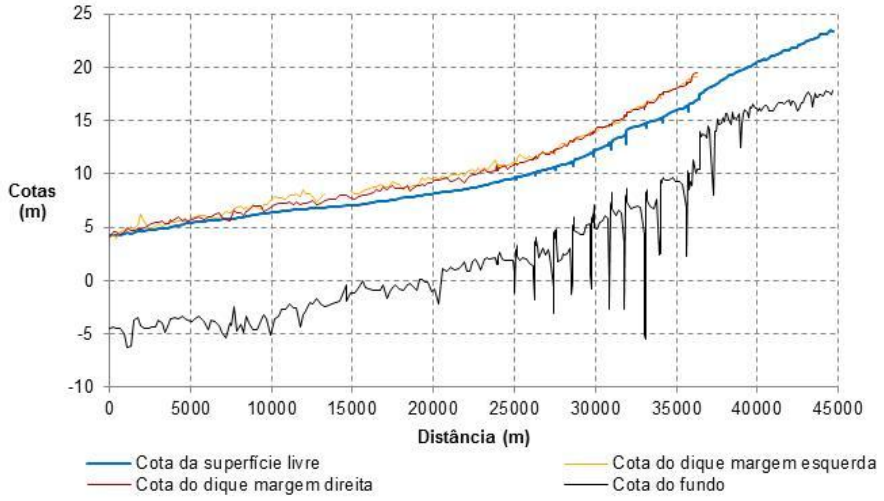


Figura 6 - Perfil longitudinal da superfície livre para o cenário I.

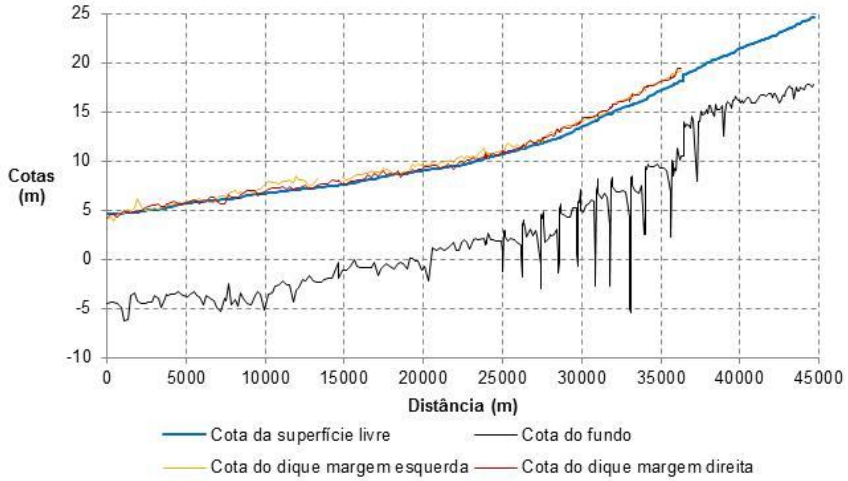


Figura 7 - Perfil longitudinal da superfície livre (valores máximos) para o cenário II.

No caso da simulação do hidrograma da cheia de janeiro de 2001 (cenário II), os níveis da superfície livre ao longo do trecho regularizado do rio Mondego aproximam-se da cota de coroamento dos diques, ultrapassando-as em vários troços, dando origem ao seu galgamento. Os resultados evidenciam que o não funcionamento do sistema de inundação controlada do Baixo Mondego (hipótese desfavorável admitida neste cenário) conduz a níveis próximos ou superiores à cota de coroamento dos diques, sendo que a sua permanência no tempo pode enfraquecer e levar à rotura dos diques. Em termos de velocidades máximas atingidas no leito regularizado do rio Mondego a jusante do Açude-Ponte, obtiveram-se valores compreendidos entre 2.5 m/s na zona de montante e 0.8 m/s próximo da foz.

A montante do Açude-Ponte observa-se a inundação das margens do rio Mondego junto à Cidade de Coimbra para o cenário II. O mapeamento das zonas inundáveis é apresentado na Figura 8.

Apesar da inexistência de dados de níveis e caudais ao longo do rio Mondego que permitissem validar o modelo, os resultados parecem consentâneos com a informação recolhida pela DRAOT-Centro aquando da cheia de 2001 (Santos *et al.* 2002). No estudo de Santos *et al.* (2002), é referido que no Centro Náutico do Choupalinho, localizado a montante da Ponte de Santa Clara, a cota do nível de inundação terá atingido os 20.86 m e na secção da Ponte Europa os 21.05 m. De acordo com as simulações realizadas, obteve-se nas secções do Parque do Choupalinho (km 38.3) e da Ponte Europa (km 39.4), respetivamente, 20.3 m e 21.0 m, valores muito próximos dos levantamentos, confirmando a validade dos resultados.

Figura 8 - Zonas inundáveis junto a Coimbra para o cenário II.

4.2. Inundações na margem direita originadas pelo funcionamento das estruturas de descarga

O funcionamento pleno das quatro estruturas de descarga (três sifões e um dique fusível), simulado no cenário III, resulta na inundação generalizada dos campos da margem direita do rio Mondego. Na Figura 9, apresentam-se os mapas das áreas inundadas ao fim de 8 h, 20 h e 40 h após o início das descargas, verificando-se que a inundação se estende progressivamente para jusante atingindo a zona da Ereira.

Na Figura 9 estão assinalados três pontos ao longo da margem direita, designados por 12C, 9C e 6C, para os quais se apresenta na Figura 10 a evolução das alturas de água. Verificam-se tempos de chegada da inundação relativamente próximos nos pontos 12C e 9C, respetivamente, 5 h e 6 h, dada a proximidade destes pontos com os dois sifões localizados mais a jusante. Nestes pontos o valor máximo da altura de água, que não ultrapassa os 0.85 m, é atingido aproximadamente ao fim de um dia de simulação, registando-se a sua redução gradual ao longo do tempo. A jusante, no ponto 6C, os níveis máximos atingidos são da ordem dos 1.45 m, observando-se uma maior permanência no tempo da inundação.

A análise das alturas de água nos pontos 12C, 9C e 6C, permitiu encontrar a velocidade média de propagação da onda de cheia entre estes pontos, obtendo-se um valor da ordem de 0.21 m/s.

Na Figura 11, referente à evolução das velocidades de escoamento dos pontos 12C, 9C e 6C, observam-se velocidades inferiores a 0.80 m/s. Os pontos 12C e 9C registam valores elevados durante aproximadamente 18 h, o que corresponde ao período de funcionamento das estruturas de descarga, após o qual a velocidade se reduz para cerca de 0.20 m/s até cessar o escoamento.

O produto da altura de água pela velocidade do escoamento é um dos parâmetros utilizados para representar o grau de perigo associado a uma dada cheia. Em Viseu (2006) são sintetizados os valores disponíveis na literatura considerados como limites para o grau de perigo para pessoas e destruição de bens. O valor 1 m²/s assume-se como valor máximo no que diz respeito ao perigo para a vida humana. Como se pode observar na Figura 11, na inundação gerada no cenário III os valores do produto da altura de água e pela velocidade do escoamento são inferiores a 0.6 m^2/s nos pontos de análise considerados.

Por último, importa realçar que o escoamento na margem direita, designadamente as velocidades e alturas de água, assim como o tempo de permanência da inundação, dependem da qualidade da informação de base utilizada, em particular, do modelo digital do terreno, e dos cenários considerados, designadamente, do tempo durante o qual ocorrem as descargas, bem como das condições de escoamento no rio Mondego e afluentes. Consequentemente, os resultados obtidos não podem ser generalizados a outros cenários de eventos de cheias e funcionamento do sistema de inundação controlada dos campos do Baixo Mondego.

5. CONCLUSÕES

Neste estudo procedeu-se à modelação numérica das inundações do rio Mondego a jusante da confluência com o rio Ceira, incluindo as originadas pelo sistema de inundação controlada do Baixo Mondego. Descreveram-se as hipóteses consideradas quanto ao funcionamento conjunto do leito regularizado e seus afluentes e do sistema de inundação controlada e definiram-se os cenários de simulação.

A análise dos resultados permite elaborar as seguintes conclusões:

- No cenário mais desfavorável de conjugação de caudais elevados em Coimbra (cerca de 2000 m^3/s) e não funcionamento do sistema de inundação controlada do Baixo mondego, os níveis da superfície livre no leito regularizado aproximam-se da cota de coroamento dos diques, ultrapassando-as em vários troços, podendo dar origem ao seu galgamento e eventual rotura.
- No cenário de funcionamento do sistema de inundação controlada do Baixo Mondego considerado neste estudo, constata-se a inundação generalizada da margem direita do vale do Mondego. Após terminar o funcionamento das estruturas de descarga, as velocidades do escoamento na margem direita reduzem-se substancialmente. As alturas de escoamento tendem a ser progressivamente maiores à medida que se caminha para jusante, devido à concentração do escoamento, em particular, na zona da confluência do rio Foja com o rio Mondego, dando origem à inundação prolongada da margem nessa zona.

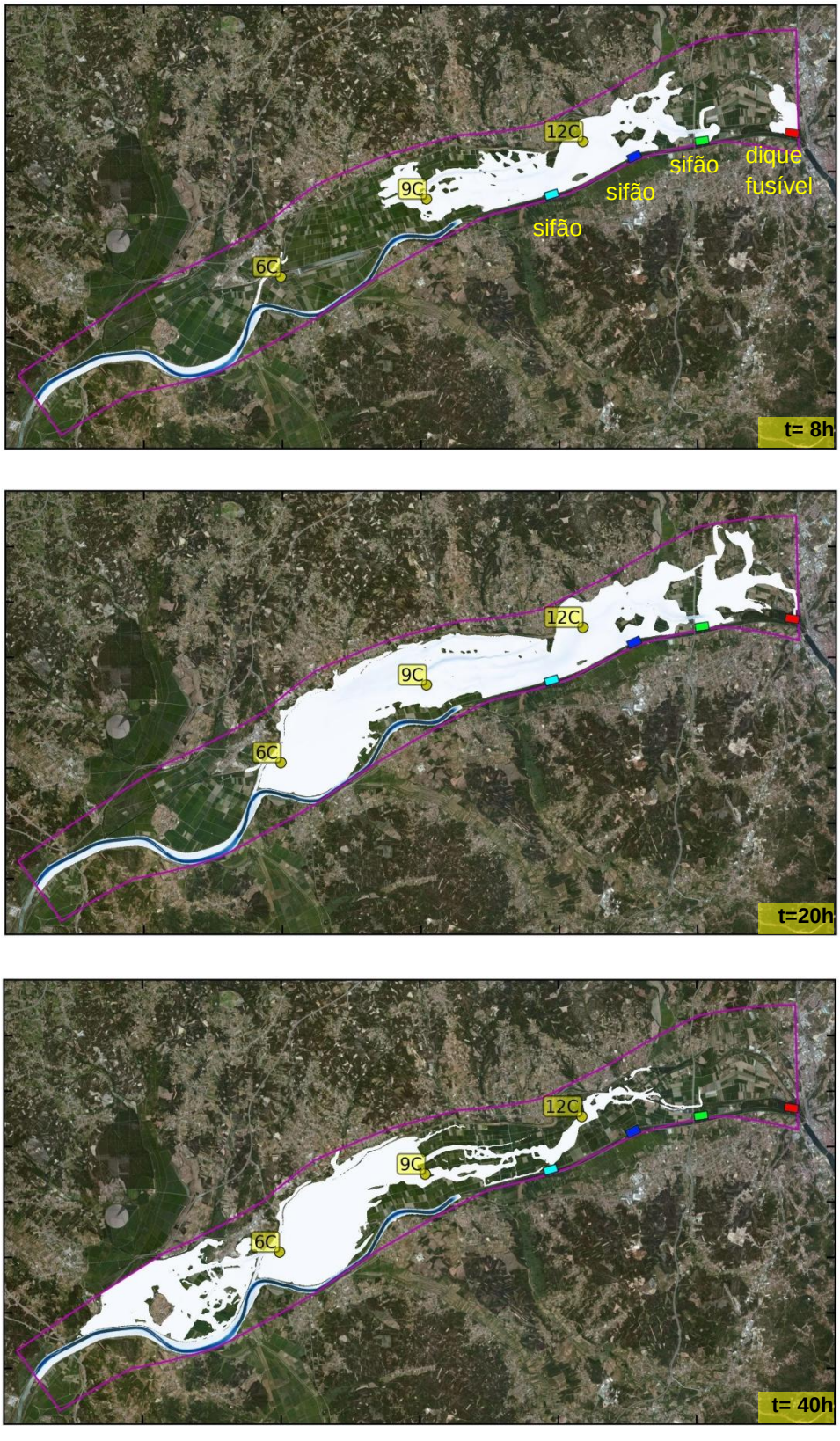


Figura 9 - Inundações na margem direita do rio Mondego em vários instantes de tempo originadas pelo sistema de inundação controlada (cenário III).

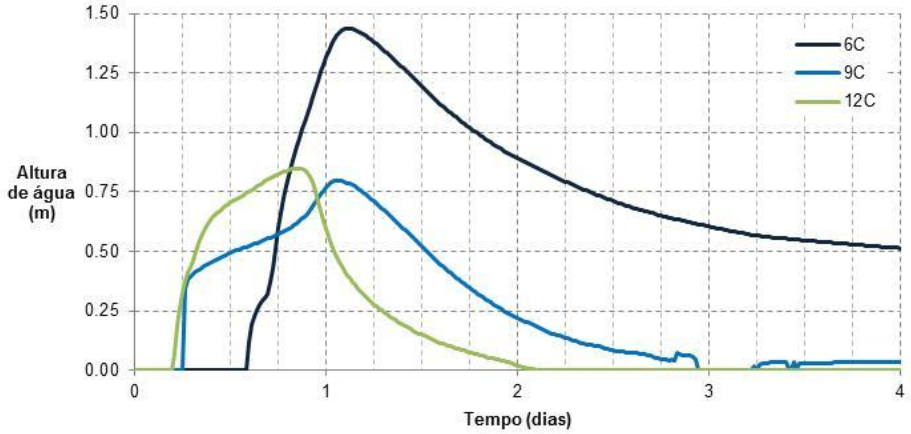
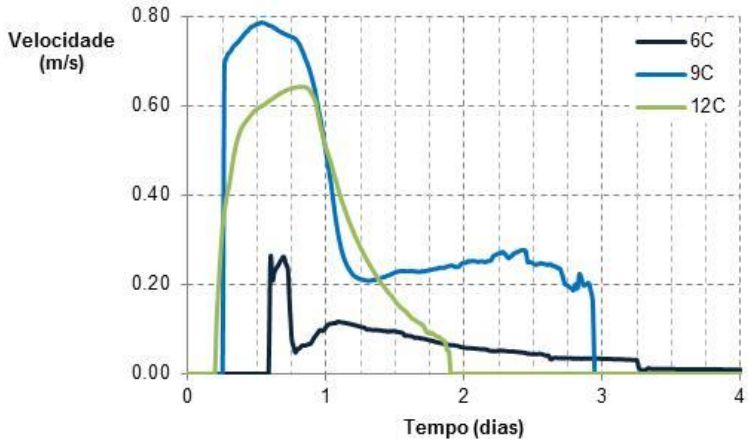


Figura 10 - Alturas de água nos pontos 12C, 9C e 6C para o cenário III.

a)



b)

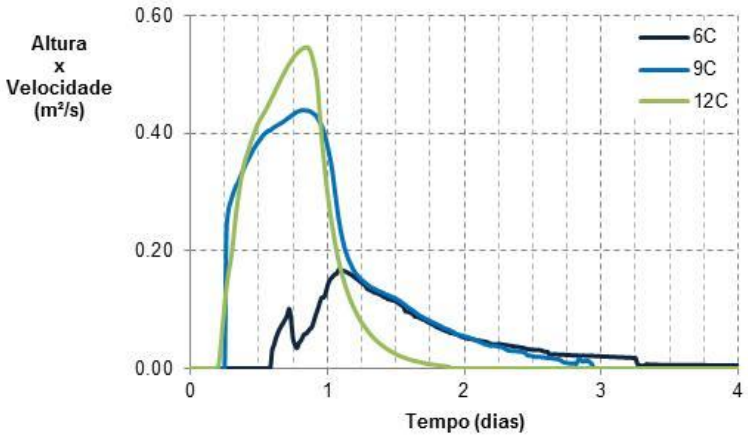


Figura 11 - Velocidade (a) e produto da altura pela velocidade (b) nos pontos 12C, 9C e 6C para o cenário III.

AGRADECIMENTOS

Agradece-se o financiamento da Administração de Região Hidrográfica do Centro através do projeto "Modelação de dados geográficos e modelação matemática dos recursos hídricos superficiais e subterrâneos a prestar no âmbito do desenvolvimento e implementação do sistema de informação geográfica para o planeamento e gestão dos recursos hídricos sob jurisdição da ARH do Centro, I.P.", financiado pelo QREN, Mais Centro – Programa Operacional Regional do Centro e União Europeia / Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional.

BIBLIOGRAFIA

Alves, E., Mendes, L. S. (2012). Estudo das inundações do rio Mondego a jusante da confluência do rio Ceira. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Relatório 333/2012 – NRE.

Alves, E., Mendes, L. S. (2014). Estudo das inundações do rio Mondego a jusante da confluência do rio Ceira. Fase 2 Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Relatório – NRE. (em fase de conclusão).

Antunes, H.A., Palrilha, P.M., Rocha, J.S., Proença, J.B. e Reis, I.F. (2001). Avaliação da Ocorrência de Cheia em janeiro de 2001 e Intervenções para a Regularização, Controle de Cheias e Gestão das Crises na Bacia do Mondego. Relatório da Comissão Interministerial Avaliação e Intervenções na Bacia do Mondego, Coimbra.

Jia, Y. e Wang, S. (2001). CCHE2D: Two-dimensional Hydrodynamic and Sediment Transport Model for Unsteady Open Channel Flows Over Loose Bed. National Center for Computational Hydroscience and Engineering - School of Engineering - The University of Mississippi.

Lencastre, A. (2004). *Hidráulica Fluvial e Agrícola*. Memórias Técnicas. Volume III. Laboratório Nacional de Engenharia Civil.

PGBH (2012). Plano de Gestão das Bacias Hidrográficas dos rios Vouga, Mondego e Lis, Integrados na Região Hidrográfica 4. Consórcio AquaplanCentro.

Rodrigues, R., Brandão, C.; Costa, J. P. (2001). Hidrologia das cheias do Mondego de 26 e 27 de janeiro de 2001, Instituto da Água.

Sanches, R. (1996). *O problema secular do Mondego e a sua resolução*. Laboratório Nacional de Engenharia Civil. Lisboa.

Santos, F. S.; Marques, A. S.; Mendes, P. A. (2002). Estudo hidráulico e hidrológico do rio Mondego na zona de intervenção do Programa Polis em Coimbra. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Departamento de Engenharia Civil, Laboratório de Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente.

Viseu, T. (2006). *Segurança dos vales a jusante de barragens. Metodologias de apoio à gestão do risco*. Dissertação de Doutoramento, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa.

Zhang, Y. (2006). CCHE-GUI – Graphical Users Interface for NCCHE Model: User's Manual – Version 3.0. National Center for Computational Hydroscience and Engineering - School of Engineering - The University of Mississippi.