

EVOLUÇÃO DA HIDROMORFOLOGIA DO BAIXO MONDEGO FACE A CENÁRIOS DE SUBIDA DO NÍVEL DO MAR

SILVA, JOANA RAMOS (1); RODRIGUES, ANTÓNIO CARMONA (2)

1. Mestre em Engenharia e Gestão da Água, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, Campus de Caparica, 2829-516 Caparica, Portugal, srs.joana@gmail.com

2. Professor Auxiliar, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, Campus de Caparica, 2829-516 Caparica, Portugal, acr@fct.unl.pt

RESUMO

O presente estudo incide sobre o previsível efeito da subida do nível do mar na hidromorfologia do troço de jusante de um rio com leito aluvionar. O caso de estudo é o rio Mondego, em Portugal, conhecido por ter uma forte dinâmica sedimentar e que num passado relativamente recente foi sujeito a importantes obras de regularização fluvial com diversos objectivos, como a defesa e controlo de cheias, a drenagem agrícola e a rega dos férteis campos adjacentes.

Foi desenvolvido um modelo matemático que permite simular a longo prazo a evolução do fundo móvel de um rio. É um modelo de dinâmica sedimentar, unidimensional, que permite simular escoamentos de caudais em regime *quasi*-permanente em canais de topografia simples. Com base em estudos especificamente desenvolvidos para o rio Mondego, no que diz respeito aos caudais líquidos, foi considerado o caudal dominante calculado para o período posterior à construção de algumas barragens na bacia hidrográfica e que vieram modificar o regime natural do rio. Quanto aos caudais sólidos, recorreu-se a valores medidos durante os estudos preparatórios das obras de regularização fluvial.

Foram realizados testes de validação do modelo, para determinadas situações teóricas, que vieram assegurar a confiança na robustez numérica do modelo e na sua aplicação prática aos cenários de subida do mar que foram considerados.

O modelo foi aplicado ao trecho terminal do rio, numa extensão de cerca de 40 km, na zona conhecida por Baixo Mondego, desde a cidade de Coimbra até à foz no Oceano Atlântico, junto à cidade da Figueira da Foz.

O modelo foi aplicado a 20 diferentes cenários num horizonte temporal de 100 anos, combinando a subida do nível do mar, com o caudal sólido afluído e com o diâmetro médio dos sedimentos. Os resultados obtidos vieram demonstrar e quantificar os efeitos expectáveis, isto é, a subida do nível do mar poderá implicar a subida generalizada do fundo do rio, reduzindo a sua capacidade de vazão e agravando de novo o risco de cheias e a drenagem dos campos.

Palavras-chave: hidráulica fluvial, subida do nível do mar, hidromorfologia, modelação computacional, transporte de sedimentos, Baixo Mondego.

Tema: Água, Território e Adaptação à Variabilidade Climática (Tema 3).

1. INTRODUÇÃO

No que diz respeito às alterações climáticas, pese embora haver sinais inequívocos dos seus possíveis efeitos, não há contudo certezas nas previsões. Mas a subida do nível médio do mar (*sea level rise* – SLR), que se tem acentuado ultimamente, é uma realidade incortornável para climatologistas e oceanógrafos (Holling, 1994; Oliver-Smith, 2009). Com efeito, o 5º Relatório de Avaliação (AR5 – *Fifth Assessment Report*) do *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC), indica que o nível do mar está a aumentar a nível global, e que este aumento tem vindo a acelerar desde os tempos pré-industriais e irá acentuar-se ainda mais durante o século XXI (IPCC, 2013).

Os dois principais processos físicos que estão na génese da subida do nível do mar são a expansão térmica da água devido à penetração de energia térmica nos oceanos e o descongelamento dos glaciares e dos mantos de gelo da Groenlândia e Antárctida (Nicholls & Cazenave, 2010). De acordo com o 5º Relatório do IPCC (2013), os cenários mais prováveis de subida do nível médio do mar são os apresentados no Quadro 1.

Quadro 1 SLR até 2100, cenários projectados pelo IPCC no 5º Relatório. Adaptado de (IPCC, 2013).

Cenário	Média da subida (m)	Intervalo (m)	Limite
RCP2.6	0,44	0,28-0,61	Inferior
RCP4.5	0,53	0,36-0,71	
RCP6.0	0,55	0,38-0,73	
RCP8.5	0,74	0,52-0,98	Superior

O risco de ultrapassagem do limite superior (0,98m) é elevado, cerca de 17%, e terá lugar se determinados sectores do manto de gelo da Antárctida começarem a derreter, resultando em subidas do nível do mar que podem ir até 1,2 ou 1,5 m (IPCC, 2013).

Realizaram-se vários estudos para a projeção do nível do mar na costa portuguesa. Lopes *et al.* (2011) estimou um valor máximo de 0,42 m (antes do 5º Relatório do IPCC que aumentou, de um modo geral, as projeções). Contudo, há ainda pouca investigação dedicada a impactos ao nível dos estuários, em particular no estuário do Mondego. Num trabalho publicado em 2013, foram utilizados para um estudo no estuário do Douro os valores de SLR de 0,28 m, 0,42 m e 1,00 m para os próximos 100 anos (Mendes, Vaz, & Dias, 2013; Lopes, *et al.*, 2011).

O presente estudo incide sobre o efeito da subida do nível do mar nas dinâmicas fluviais, nomeadamente na hidromorfologia, um factor que nos dias de hoje não é ainda com frequência um dado tido em conta nas simulações de previsão da dinâmica sedimentar fluvial.

Para prever a evolução da morfologia fluvial é preciso conhecer as interações entre os caudais líquidos e os caudais sólidos, uma vez que a hidromorfologia é um processo algo complexo que resulta da relação entre a fase líquida e a fase sólida do escoamento. O transporte e a deposição de sedimentos são fenómenos que ocorrem nos leitos dos rios aluvionares, bem como nos estuários e zonas costeiras, evoluindo de acordo com a hidrodinâmica.

Neste trabalho o sistema fluvial em estudo foi o Baixo Mondego, mais precisamente os cerca de 44 km do rio Mondego (37 km) e o braço Norte do estuário (7 km), que vão desde Coimbra à Figueira da Foz, onde o rio desagua no Oceano Atlântico. A bacia hidrográfica do rio Mondego possui uma área de 6 671 km², e está dividida em três sub-bacias principais, de acordo com o sistema fluvial natural e as obras hidráulicas realizadas: a bacia de montante dominada pelo sistema Agueira-Raiva-Fronhas (3 750 km²); a bacia intermédia, de Raiva a Coimbra (1 207 km²) e a bacia a jusante de Coimbra (campos do Baixo Mondego) (1 714 km²).

Nos anos 70 e 80 do séc. XX foram projectadas e construídas obras de regularização fluvial nesta bacia, com vista ao controlo do transporte sólido e assoreamento a jusante de Coimbra, de modo a evitar as cheias frequentes na cidade de Coimbra e no Baixo Mondego. As cheias entretanto ocorridas em Janeiro de 2001 vieram demonstrar que a gestão de um empreendimento com fins múltiplos, como uma barragem, em condições de segurança, exige a procura de soluções óptimas que só poderão ser encontradas com base em critérios rigorosamente científicos (Carmo, 2004).

O presente estudo teve dois objetivos principais: o primeiro foi desenvolver um modelo computacional genérico que simule a longo prazo a hidromorfologia de um rio, incorporando a subida do nível do mar como um dos dados de entrada; o segundo foi a aplicação do modelo desenvolvido ao Baixo Mondego, permitindo a previsão da evolução da hidrodinâmica e dinâmica sedimentar deste trecho de acordo com diferentes cenários de SLR.

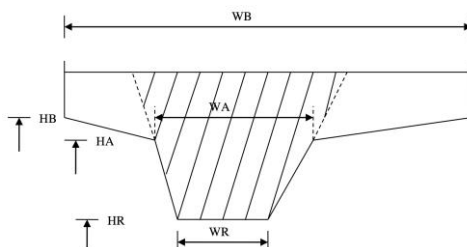
O modelo abordado neste trabalho tem por base um modelo hidráulico e de transporte sólido desenvolvido no Departamento de Ciências e Engenharia do Ambiente – Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa (DCEA – FCT/UNL), desenvolvido em linguagem Fortran (Rodrigues, A. C., 1986).

Informação mais detalhada encontra-se na dissertação de mestrado “Análise Computacional da evolução da hidromorfologia do Baixo Mondego em resultado da subida do nível do mar” (Silva, 2015).

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Modelo Desenvolvido

As hipóteses de base do modelo são as seguintes: escoamento unidimensional, 1DH (1-D Longitudinal), regime incompressível, canal relativamente simples e acentuados. O coeficiente não varia com a altura de secção para secção.



unidimensional, 1DH (1-D *quasi*-permanente, fluido com topografia declives do fundo pouco de resistência de Chézy água, mas pode variar de

Figura 1 Secção transversal tipo (Rodrigues, A. C., 1986).

Como se pode observar na Figura 1, a secção transversal é caracterizada por três níveis e três larguras: HR (ou ZB) (nível/cota do fundo), HA (nível/cota da margem), HB (nível/cota acima do qual a largura de armazenamento permanece constante), WR (largura do fundo), WA (largura da margem) e WB (largura de armazenamento).

Para cada simulação começa-se por fazer uma selecção dos dados gerais, referentes às secções transversais, às condições de fronteira, aos caudais laterais e às estruturas de

controlo consideradas. No que diz respeito às condições de fronteira de montante são fornecidos valores de caudais líquidos (Q) e caudais sólidos (S). A jusante, a condição de fronteira é dada por valores de alturas de água (H). No que se refere aos caudais afluentes laterais, os valores de Q e S são especificados como fontes pontuais em funções temporais tabeladas. O ciclo de cálculo principal é então iniciado, utilizando-se sucessivamente:

- Um método de Runge-Kutta de 4ª ordem aplicado aos escoamentos em regime *quasi*-permanente, permitindo o cálculo de alturas de água e velocidades de escoamento;
- A equação de Engelund-Hansen para o cálculo do transporte sólido total:

$$S = 0,05\rho_s \frac{Lu^2}{Q} \frac{(IR)^{3/2}}{\sqrt{g} \left(\frac{\rho_s}{\rho} - 1\right)^2 D} \quad (2.1)$$

ρ_s - massa volúmica dos sedimentos (kg/m³)

L - largura do rio (m)

u - velocidade média do escoamento (m/s)

I - declive do fundo do rio (m/m)

R - raio hidráulico (m)

g - aceleração da gravidade (m/s²)

ρ - densidade da água (kg/m³)

D - diâmetro médio das partículas (D_{50}) (m)

- Um método de diferenças finitas explícito aplicado à equação do balanço de sedimentos, baseado na aproximação de tipo Lax, para a obtenção das novas cotas de fundo nas secções transversais.

Com base nos diversos resultados que vão sendo obtidos para cada intervalo de tempo, o modelo determina também o volume de assoreamento (ou desassoreamento) acumulado.

2.2. Dados de Entrada

Relativamente aos dados geométricos, a informação relativa a levantamentos do leito do rio Mondego, a jusante do Açude-Ponte de Coimbra, foi disponibilizada em formato digital. Parte dessa informação provém principalmente dos levantamentos topográficos realizados pela *Hidroprojecto* (Hidroprojecto, 1977). Com base nas diferenças geométricas identificadas através dos dados fornecidos e estimados, foram definidas 206 secções de cálculo no trecho em estudo (Quadro 2), distanciadas, em média, de cerca de 200 metros.

No que respeita ao perfil longitudinal foram atribuídas cotas de fundo (HR) e cotas de margem (HA) para os 44 km do trecho em estudo. Pode-se assim dividir o trecho em estudo em 3 troços de acordo com o declive de fundo (Quadro 2):

Quadro 2 Delimitação e características longitudinais do trecho em estudo.

	Distância (km)			Secção (J)		Declive do fundo (I)
	De	a	Total	De	A	
Troço 1	0,00	13,25	13,25	1	72	0,00071
Troço 2	13,25	37,01	23,76	72	177	0,00025
Troço 3	37,01	43,99	6,99	177	206	0,00033

Quadro 3 Dados de entrada relativos às condições de fronteira.

Dados na fronteira	
Montante	Jusante
Caudal líquido, Q=340 m ³ /s	Cota inicial do plano de água, H=0 m
Caudal sólido, S=varia consoante o cenário	

Os dados relativos às condições de fronteira de caudais líquidos afluentes, de caudais sólidos afluentes e de níveis de água a jusante (nível do mar), são apresentados no Quadro 3. Foram utilizadas as cotas referentes ao nivelamento geral do país (cotas topográficas). Para a selecção dos valores atendeu-se ao seguinte:

- $Q = 340 \text{ m}^3/\text{s}$ ($=Q_D$); a utilização do caudal dominante justifica-se nesta abordagem por se tratar de um caudal que, em regime permanente e constante, teria os mesmos efeitos hidromorfológicos que a sucessão temporal dos caudais fluviais. O valor de caudal médio registado mais recentemente na Açude-Ponte de Coimbra é de $97 \text{ m}^3/\text{s}$.
- $S = 1,5 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$; valor de caudal sólido médio para o qual as obras de regularização foram projectadas;
- $S = 3,0 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$; o valor médio de S registado em Coimbra era de $7,5 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ antes das obras, mas actualmente os valores calculados têm sido desta ordem de grandeza.

Foram ainda considerados os caudais líquidos e sólidos dos 6 principais afluentes laterais ao Baixo Mondego: rio Ançã, ribeira de Cernache, rio Ega, rio Arunca, rio Foja e rio Pranto.

Quanto ao material sólido de fundo a equação de Engelund-Hansen utiliza um único valor para o diâmetro característico dos sedimentos. Optou-se por simular dois tipos de cenários no que se refere ao diâmetro médio das partículas (D_{50}):

- $D_{50} = 2,6 \text{ mm}$; O valor registado para o diâmetro médio do rio Mondego em Coimbra;
- $D_{50} = 2,2 \text{ mm}$; Foi também utilizado este diâmetro porque D_{50} diminui de montante para jusante e este valor foi registado em Vila Pouca (10 km a jusante do Açude-Ponte Coimbra). Portanto, em regra, nos primeiros 10 km do trecho em análise, as partículas do fundo do leito variam entre areia grosseira e cascalho fino (Ferreira & Cunha, 1970).

Para a subida do nível médio do mar foram considerados os seguintes valores nos próximos 100 anos (2115): 4, 6, 8, 10 e 12 mm/ano. Optou-se pelo valor de subida do nível médio do mar de 0,4 m, por se tratar de um valor próximo da média do limite mínimo estimado pelo IPCC (44 cm) e do valor de SLR, previsto por Lopes *et al.* (2011) para a costa portuguesa.

Por outro lado, seleccionou-se o valor de 1,20 m em 100 anos como limite máximo, com o objectivo de considerar um valor de SLR que atenda aos cenários mais desfavoráveis de alterações climáticas e uma consequente aceleração da subida do nível médio do mar.

Os cenários definidos para as simulações computacionais efectuadas para o trecho em estudo são apresentadas de seguida no Quadro 4.

Quadro 4 Dados de entrada que distinguem os 20 cenários simulados e valor atribuído ao caudal líquido (caudal dominante).

Cenário	S	SLR	Q (=Q _D)	D ₅₀	Cenário	S	SLR	Q (=Q _D)	D ₅₀
	l/s	mm/ano	m ³ /s	mm		l/s	mm/ano	m ³ /s	mm
C1	1,5	4	340	2,2	C11	1,5	8	340	2,6
C2	3,0	4	340	2,6	C12	3,0	8	340	2,2
C3	1,5	4	340	2,6	C13	1,5	10	340	2,2
C4	3,0	4	340	2,2	C14	3,0	10	340	2,6
C5	1,5	6	340	2,2	C15	1,5	10	340	2,6
C6	3,0	6	340	2,6	C16	3,0	10	340	2,2
C7	1,5	6	340	2,6	C17	1,5	12	340	2,2
C8	3,0	6	340	2,2	C18	3,0	12	340	2,6
C9	1,5	8	340	2,2	C19	1,5	12	340	2,6
C10	3,0	8	340	2,6	C20	3,0	12	340	2,2

2.3. Aferição do Modelo

Embora não se possa efectivamente realizar uma calibração matemática no verdadeiro sentido, uma vez que não é possível comparar os resultados do modelo com a realidade, entendeu-se proceder a alguns testes de aferição ou de sensibilidade do modelo para se poder avaliar a sua confiança e robustez numérica. Foram seleccionadas quatro situações “estereotipadas”, relativas a cenários cujos resultados têm uma solução qualitativa conhecida.

O Teste 1 considerou um cenário de regime uniforme, onde o caudal sólido é igual à capacidade de transporte sólido. Pela equação de Engelund-Hansen, foi obtido o valor $S=0,0095 \text{ m}^3/\text{s}$. Nesta situação espera-se que parâmetros como a altura de água e a velocidade de escoamento não variem ao longo do canal. Por conseguinte, as curvas referentes às cotas de fundo e superfície livre serão paralelas, e as curvas referentes às cotas de fundo, assim como as curvas da superfície livre, para 1, 10 e 100 anos, serão coincidentes. Também é de esperar um volume de assoreamento nulo, tendo sido obtido ao fim de 100 anos o valor de $2\,254 \text{ m}^3$, residual face ao volume anual de transporte sólido (0,76%) (Figura 2).

No Teste 2 foi tido em conta um cenário de Caudal Sólido Nulo. Logo, a solução qualitativa esperada revela que as cotas de fundo e da superfície livre diminuem e, por conseguinte, haja erosão generalizada e crescente no horizonte temporal de 100 anos. Como se pode constatar na Figura 2 os resultados obtidos através do modelo desenvolvido são os esperados.

O Teste 3 refere-se a uma situação de duplicação do caudal sólido afluído. Para obter o S deste teste foi considerado o valor calculado para a capacidade de transporte sólido. Neste caso tem-se $S=0,019 \text{ m}^3/\text{s}$. Face ao elevado valor atribuído ao caudal sólido, espera-se que todos os anos as cotas de fundo e superfície livre subam, sendo também previsível a longo prazo um volume significativo de assoreamento. Neste teste de calibração os volumes de assoreamento obtidos foram quase simétricos dos valores verificados no Teste 2.

No Teste 4 considerou-se um cenário de Subida do Nível do Mar a Jusante. O 4º Teste de calibração distingue-se dos restantes por ser o único que atribui um valor não nulo ao parâmetro SLR. O *output* de valores relativos às cotas de fundo e superfície livre foram os qualitativamente esperados, tal como os obtidos para volumes de assoreamento (Figura 2). Deste modo, confirma-se a validade do modelo desenvolvido.

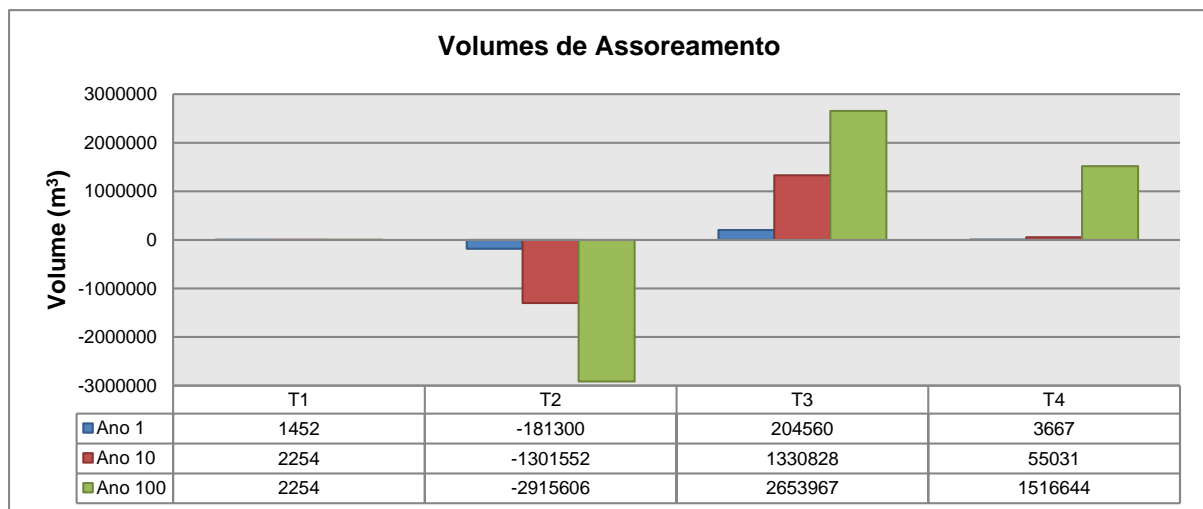


Figura 2 Gráfico dos volumes de assoreamento obtidos para os testes de calibração do modelo.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com base no *output* do modelo desenvolvido é possível criar resultados sob a forma gráfica com a evolução dos perfis longitudinais nos próximos 100 anos (2015 a 2115), tal como exemplificado na Figura 3. O perfil longitudinal permite observar o seguinte em relação às cotas de fundo iniciais: a jusante do troço inicial mais declivoso, onde se localizam as soleiras de fixação de fundo, verifica-se um acentuado aumento tanto do nível da superfície livre como da cota de fundo do rio.

Na análise da resposta do leito aluvionar às previsões de subida do nível do mar para 100 anos, analisou-se tanto o *output* das cotas de fundo (ZB) das secções iniciais e finais de cada cenário, como também a média de ZB; posteriormente, os declives do fundo e, por fim, as curvas resultantes das cotas de fundo iniciais observáveis no perfil longitudinal.

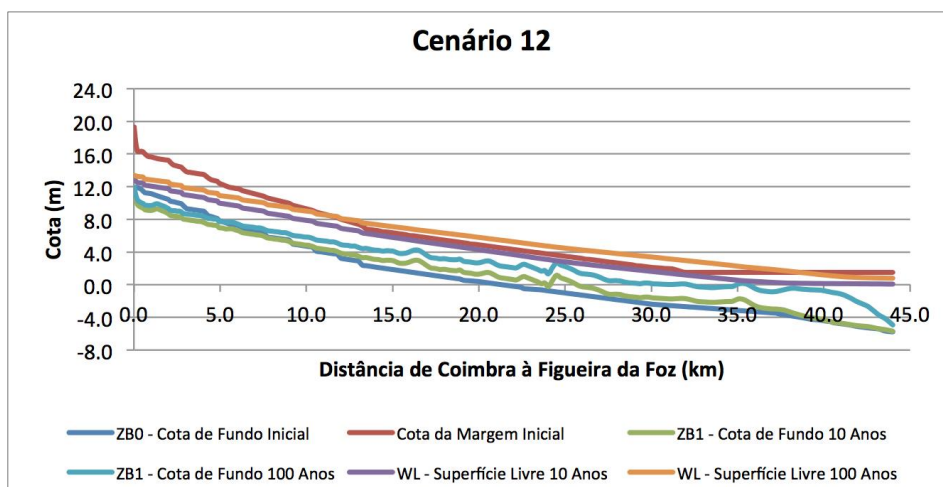


Figura 3 Evolução do perfil longitudinal do leito aluvionar do Baixo Mondego, Cenário 12.

Em relação ao valor médio da subida da cota do fundo ZB (100 anos) registaram-se valores de cerca de 1,63 m. Constatou-se que, dos vários factores, o que tem mais influência neste resultado é claramente o caudal sólido afluído, seguido da subida do nível do mar. Por fim, com menos influência, o tamanho médio dos sedimentos. No que respeita ao caudal sólido, os cenários com $S=3,0 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ apresentam médias de cota de fundo mais elevadas. Quanto ao SLR, quanto maior o seu valor, maior será a subida média. O tamanho médio das partículas tem pouca influência, mas cenários com $D_{50}=2,2 \text{ mm}$ resultam em médias superiores (Quadro 5). Tendo em conta estes valores, constata-se que nos próximos 100 anos a média da cota de fundo móvel irá aumentar em mais de 1,50 m.

No que diz respeito ao declive do fundo, tendo em consideração os *inputs*, verificou-se que o D_{50} é de longe o que tem mais impacto, com os cenários de $D_{50}= 2,6 \text{ mm}$ a apresentar declives maiores, a que se segue o S e, por último, o SLR, sendo que os cenários com $S= 3,0 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ e valores de SLR inferiores apresentam os maiores declives (Quadro 5).

Quadro 5 Resultados relativos às cotas de fundo.

Cenário	Cota de Fundo (ZB)	
	Média	Declive
Máximo	C20 (3,27 m)	C2 (0,000290)
Mínimo	C3 (2,86 m)	C17 (0,000269)

Observando o perfil longitudinal da Figura 3 é possível constatar que a morfologia do rio

tende a adaptar-se a uma nova situação de equilíbrio hidromorfológico conduzindo a um declive médio igual ao que existia anteriormente, mas a longo prazo. Pode ainda servir de exemplo para esta situação as 11 estruturas visíveis, já não tão perceptíveis no perfil das cotas de fundo para 100 anos. Portanto, de acordo com o modelo, para qualquer cenário nos próximos 100 anos, as 11 estruturas deixarão de estar bem definidas no leito aluvionar. No perfil longitudinal pode também observar-se a influência dos afluentes laterais, sendo o caso mais pronunciado o do rio Arunca, com um caudal dominante de $Q=15,90 \text{ m}^3/\text{s}$ e um caudal sólido médio com um valor de $S= 0,00018 \text{ m}^3/\text{s}$.

Para uma melhor compreensão da relação entre os volumes de assoreamento e os dados de entrada é em seguida apresentado um gráfico de barras com os valores dos volumes de assoreamento para todos os cenários de simulação no horizonte temporal de 100 anos.

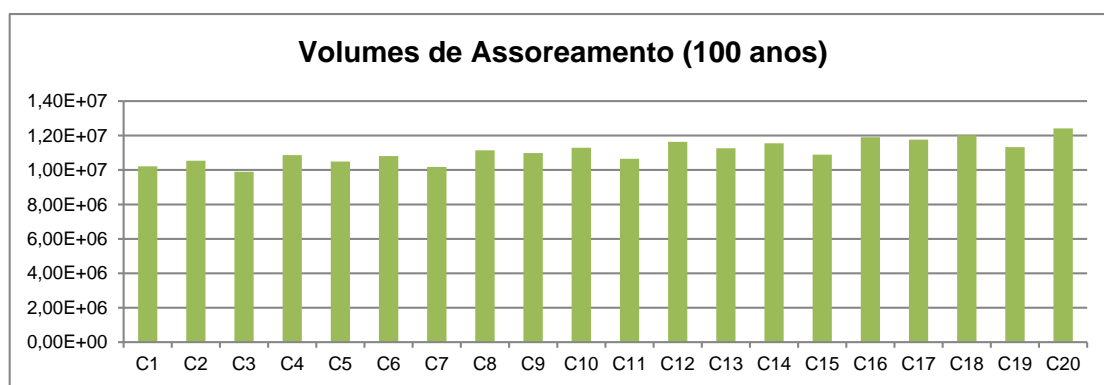


Figura 4 Volumes totais de assoreamento para todos os cenários, ao fim de 100 anos.

Com base na Figura 4 verifica-se que todo o *input* variável considerado, isto é, a subida do nível do mar, o caudal sólido e o diâmetro médio das partículas tem bastante influência. Tanto o S como o D_{50} têm importância semelhante, sendo os cenários com $S= 3,0 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ e com $D_{50}= 2,2 \text{ mm}$ os que implicam um maior volume de assoreamento. Como se pode observar também o SLR terá influência. Quanto maior o valor atribuído a SLR, tanto maior será o volume de assoreamento. Logo, os valores maiores e menores verificam-se para os cenários C20 ($\approx 12,41 \times 10^6 \text{ m}^3$) e C3 ($\approx 9,90 \times 10^6 \text{ m}^3$).

Para melhor compreender a evolução do leito aluvionar de acordo com o modelo desenvolvido foram calculadas taxas médias de assoreamento anual (Figura 5).

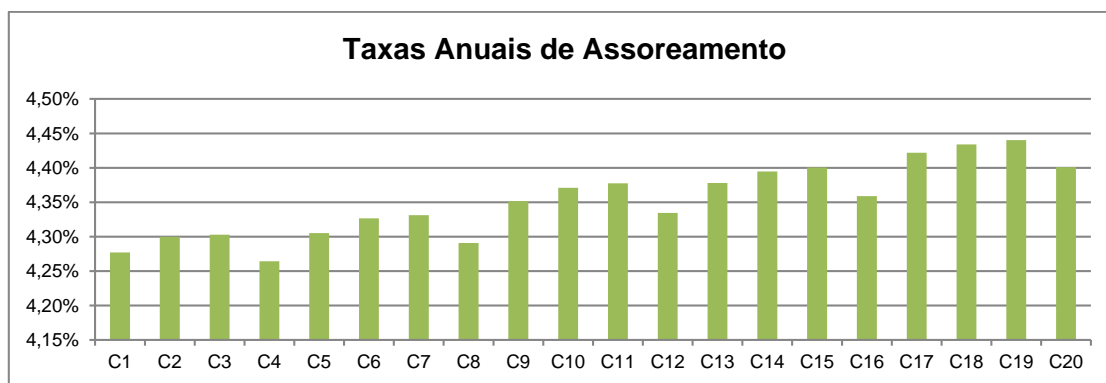


Figura 5 Taxas anuais médias de assoreamento para os 20 cenários de acordo com as simulações para 100 anos.

Relativamente às taxas anuais de assoreamento constata-se que a subida do nível do mar é o *input* com maior influência, seguido pelo diâmetro dos sedimentos e pelo caudal sólido,

este último com pouco impacto. Quanto ao SLR e D_{50} , quanto maior o seu valor também maior será a taxa anual de assoreamento; em relação ao valor de S, quando é igual a $S = 1,5 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ o cenário apresenta maior taxa de assoreamento. Por isso, as maiores e menores taxas anuais de assoreamento (100 anos) verificam-se para os cenários C19 (4,44%) e C4 (4,26%).

Os volumes e as taxas anuais de assoreamento obtidos devem ser analisados tendo em conta alguns factores, nomeadamente nos primeiros anos simulados em que se prevê que S seja superior, próximo dos $3 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ considerados, e depois venha a diminuir ao longo dos 100 anos até cerca de $1,5 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$, o que daria origem a volumes de assoreamento superiores nestes primeiros anos e diminuiria o impacto do caudal sólido no assoreamento ao longo do tempo. Contudo, também se deve considerar que nos primeiros anos o SLR não se antevê que seja de 4 mm/ano, mas sim mais próximo de 3 mm/ano, tal como se verificou na última década. Neste caso é previsível que haja uma aceleração da SLR durante o século que poderá ir até 1,2 m, dando origem a volumes de assoreamento crescentes e a um aumento do impacto da subida do nível do mar no horizonte temporal de 100 anos.

O *output* referente à superfície livre (WL) e às alturas de água (H) também é analisado, devido à sua importância na gestão do Baixo Mondego, designadamente em tudo o que diz respeito à drenagem e enxugo dos campos agrícolas adjacentes ao rio.

Quanto às médias do nível da superfície livre WL (100 anos) registaram-se valores de cerca de 6,0 m, em muitos casos superiores às cotas das margens. Observando os resultados obtidos constatou-se que entre os *inputs* variáveis considerados na simulação, o que tem mais influência é o caudal sólido, sendo maiores as médias de WL quando $S = 3,0 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$, de seguida o SLR, que quanto maior o valor atribuído, maior a média e, por fim, o tamanho médio dos sedimentos, em que cenários com $D_{50} = 2,2 \text{ mm}$ têm maior média de WL.

Relativamente aos declives das curvas da superfície livre registaram-se valores inferiores mas semelhantes aos que se verificaram para as cotas de fundo. A influência dos *inputs* variáveis nos valores destes declives será a mesma que para os declives das curvas das cotas de fundo, isto é, por ordem decrescente de importância, D_{50} , S e SLR. Com os cenários com tamanho médio das partículas de 2,6 mm, caudal sólido de $3,0 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ e subida do nível do mar de 4 mm/ano a apresentar maiores declives. Porém, é de realçar que, apesar de possuírem a mesma ordem de influência dos *inputs*, de acordo com o modelo, o SLR terá mais efeito nos declives de WL que de ZB1 (Quadro 6).

Quadro 6 Resultados relativos à superfície livre e alturas de água.

Cenário	Cotas da superfície livre (WL)		Alturas de água (H)
	Média	Declive	Média
Máximo	C20 (6,30 m)	C2 (0,000297)	C19 (3,05 m)
Mínimo	C3 (5,83 m)	C17 (0,000274)	C2 (2,95 m)

4. CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS

O assoreamento foi no passado o grande problema no Baixo Mondego e prevê-se que se possa voltar a verificar. De acordo com os resultados obtidos através do modelo desenvolvido, há um impacto significativo do SLR nas cotas de fundo e superfície livre dos rios aluvionares ao longo de todo o perfil longitudinal para simulações de 100 anos.

Relativamente às simulações para 100 anos e à influência do SLR, conclui-se o seguinte: nas secções iniciais há pouca influência da subida do nível do mar nas cotas de fundo; as médias de ZB e WL têm o máximo e mínimo para os mesmos cenários, sendo que SLR tem

alguma influência nestes valores; por último, as cotas de fundo nas secções mais a jusante são apenas influenciadas pelo SLR.

Quanto ao caudal sólido, foi possível depreender a relevância de alcançar o valor projetado, de $S=1,5 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$. De acordo com o modelo haverá mais assoreamento nos primeiros anos devido sobretudo ao caudal sólido, e depois a situação tende a estabilizar, passando o SLR a ser o principal responsável pela deposição de sedimentos. Daí a importância de alcançar o valor para o qual as obras de regularização fluvial foram projectadas.

No que diz respeito ao diâmetro médio dos sedimentos constatou-se que os cenários a que foram atribuídos valores inferiores ($D_{50}= 2,2 \text{ mm}$), verificaram maiores alterações no leito aluvionar e uma maior subida da altura de água do rio.

É ainda de realçar que os cenários com $\text{SLR}= 6 \text{ mm/ano}$ e $\text{SLR}= 8 \text{ mm/ano}$ são os que apresentam maior probabilidade de ocorrência na costa portuguesa nos próximos 100 anos, logo os valores obtidos para os cenários C5 a C12 poderão ser vistos como os mais prováveis.

Recomenda-se para uma adequada gestão do Baixo Mondego um acompanhamento regular do sistema fluvio-marítimo, em particular um constante controlo dos caudais líquidos e um programa regular de monitorização de caudais sólidos, da granulometria do material do leito e da batimetria do fundo do rio.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ARH Centro. (2011). Planos de Gestão de Bacia Hidrográfica dos rios Vouga, Mondego e Lis Integrados na Região Hidrográfica 4. *Anexo IV - Fichas de Caracterização para Efeitos de Participação Pública*. Ministério da Agricultura, Mar, Ambiente e Ordenamento do Território.
- Carmo, J. S. (2004). *Modelação em Hidráulica Fluvial e Ambiente*. Coimbra: Imprensa da Universidade de Coimbra.
- Hidroprojecto. (1977). Regularização do Baixo Mondego. Projecto do Leito Central. Lisboa.
- Holling, C. S. (1994). An Ecologist's view of the Malthusian Conflict. In K. Lindahl-Liessling, & H. Landberg, *Population, Economic Development and the Environment*. Nova Iorque: Oxford University Press.
- IPCC. (2013). *AR5 - Fifth Assessment Report*. IPCC. IPMA. (2014). *Despacho nº 3244/2014*. Lisboa: Diário da República, 2ª série — Nº 41.
- Lopes, C. L., Silva, P. A., Dias, J., Rocha, A., Picado, A., Plecha, S., et al. (2011). Local sea level change scenarios for the end of the 21 sr century and potential physical impacts in the lower Ria de Aveiro (Portugal). *Continental Shelf Research*, 31, 1515-1526.
- Mendes, R., Vaz, N., & Dias, J. M. (2013). Potential impacts of the mean sea level rise on the hydrodynamics os the Douro river estuary. *Journal of Coastal Research, Special Issue No. 65*, 1951-1956.
- Nicholls, R. J., & Cazenave, A. (2010). Sea-Level Rise and Its Impact on Coastal Zones. *Science*, 328, 1517.
- Oliver-Smith, A. (2009). *Sea Level Rise and the Vulnerability of Coastal Peoples* -

Responding to the Local Challenges of Global Climate Change in the 21st Century.
Alemanha: InterSecTions - Publication Series of UNU-EHS.

Ribeiro, J. L. (2001). *Zonas húmidas costeiras e ordenamento territorial: o caso do estuário do Mondego.* Coimbra: Imprensa da Universidade de Coimbra.

Rodrigues, A. C. (1986). *COBRA - Um Modelo para a Simulação de Processos Hidrodinâmicos em Canais Simples. Manual de utilização.* Lisboa: Faculdade de Ciências e Tecnologia - Universidade Nova de Lisboa.

Silva, J. (2015, Maio). *Análise Computacional da evolução da hidromorfologia do Baixo Mondego em resultado da subida do nível do mar.* FCT – Universidade Nova de Lisboa. Lisboa, Portugal.