

UNIVERSIDADE DO ALGARVE

Faculdade de Ciências e Tecnologia

**Modelação morfodinâmica a longa escala temporal:  
aplicabilidade de um modelo baseado em processos**

Selma Maria Henriques Gabriel

Mestrado em Estudos Marinhos e Costeiros

(2010)

UNIVERSIDADE DO ALGARVE

Faculdade de Ciências e Tecnologia

**Modelação morfodinâmica a longa escala temporal:  
aplicabilidade de um modelo baseado em processos**

Selma Maria Henriques Gabriel

**Tese orientada por Dr. Flávio Martins**

Mestrado em Estudos Marinhos e Costeiros

(2010)

## **Agradecimentos**

Ao meu orientador, o Doutor Flávio Martins por todo o apoio, disponibilidade, paciência e partilha de conhecimentos.

E a todos aqueles, colegas e amigos, que directa ou indirectamente contribuíram para o “levar a bom termo” deste trabalho, o meu muito obrigado.

Este trabalho enquadrou-se nos objectivos do projecto PTDC/CLI/68488/2006: EVEDUS - Evolução do vale estuarino durante a subida eustática do nível do mar - Avaliação dos Impactos das alterações climáticas através da confrontação de dados paleoambientais com dois tipos de modelos.

*O conteúdo desta tese é da inteira responsabilidade do autor*

## Resumo

Os estudos de modelação morfológica e de enchimento de bacias englobam simulações levadas a cabo tradicionalmente por modelos conceptuais, geométricos, orientados por comportamento ou, mais recentemente, por modelos dinâmicos de difusão. O aumento da capacidade computacional, bem como o desenvolvimento de novas abordagens matemáticas, permite a aplicação de modelos mais complexos. A utilização conjunta de algoritmos numéricos que resolvem explicitamente as equações físicas dos processos relevantes, juntamente com a resolução de equações empíricas e semi-empíricas, cria a possibilidade de trabalhar com uma ampla gama de escalas espaço-temporais. No presente trabalho, aplica-se um modelo baseado em processos, com a finalidade de se obter a evolução morfodinâmica de longa escala temporal. O modelo utilizado é o sistema de modelação MOHID, que simula a hidrodinâmica, o transporte sedimentar, e a evolução da morfologia de fundo. Para este efeito, construiu-se batimetrias esquemáticas, representativas de uma zona costeira com comprimento variável (50 e 100 km) e 1 km de largura. O modelo considera a acção da maré, imposta na fronteira aberta, sendo negligenciadas as fontes de água. Os resultados das simulações para um período de 2000 anos foram comparados e validados com trabalhos resultantes de modelos com diferentes abordagens. Uma vez que a aplicação de um modelo baseado em processos exige um considerável esforço computacional, foram propostos e testados vários esquemas de extrapolação com a finalidade de o reduzir. Os resultados obtidos mostram uma diminuição do esforço computacional para 1/3, mantendo a consistência dos dados. Utilizando os dois esquemas de extrapolação que permitem obter os melhores resultados, simulou-se a evolução morfodinâmica para 10000 anos. A

influência da subida do nível do mar no preenchimento sedimentar e na evolução de fundo foi testada como um exemplo da aplicabilidade deste modelo. O conjunto de resultados obtidos no presente trabalho sugere que o sistema de modelação MOHID constitui um método promissor para avaliar a evolução morfodinâmica de um sistema natural em longas escalas temporais.

**Palavras-chave:** Modelo baseado em processos, MOHID, morfodinâmica de longo termo, evolução do fundo, esquema de extrapolação.

## **Abstract**

Long-term morphological and basin filling modelling studies traditionally comprehend simulations carried out by conceptual, geometric, behaviour-oriented or, more recently, dynamic abstracted diffusion models. The increase of computational capability and the development of new mathematical approaches, allowed the use of more complex models. In this approach, numerical algorithms are used to explicitly solve the physical equations of the relevant processes, coupled with empirical and semi-empirical equations, which will create the possibility of working with a wide range of time and space scales. In this work, a process based model will be applied in order to obtain a long-term morphodynamic evolution. The model used is the MOHID modelling system, which simulates the hydrodynamics, the sand transport and the bottom morphology. For that purpose schematic bathymetries were constructed, representing a coastal zone with variable length (50 and 100 km) and 1 km wide. The model considers a tidal input in an open boundary, while the freshwater input is neglected. The outcome from simulations of a 2 000 years' period were compared and validated with other modelling approaches. As the use of a process based model requires a considerable computational effort, several extrapolation schemes are proposed and tested against standard runs in order to

reduce it. The obtained results show a decrease in the computational load to one third, yet maintaining the consistency of the data. Using the two extrapolated schemes that allow better results, the morphodynamic evolution during 10 000 years was simulated. The influence of the sea-level rise in the sedimentary infilling and in the bottom evolution will be tested as an example of the applicability of this model. The outcome of this work suggests that MOHID modeling system is a promising method to evaluate the morphodynamic evolution of a natural system in long time scales.

**Keywords:** Process based model, MOHID, long term morphodynamics, bottom evolution, extrapolation scheme

# Índice

|  |    |
|--|----|
| 1. Introdução.....   | 15 |
| 1.1. Modelação morfodinâmica e preenchimento sedimentar de bacias .....          | 15 |
| 1.2. Sistema de Modelação MOHID.....   | 18 |
| 1.3. Objectivos .....  | 25 |
| 2. Modelo Morfodinâmico.....   | 26 |
| 2.1. Introdução .....  | 26 |
| 2.2. Parâmetros e condições iniciais: .....                                      | 26 |
| 2.3. Resultados e Discussão .....  | 28 |
| 3. Estudo de economia de tempo de cálculo.....                                   | 36 |
| 3.1 Introdução .....   | 36 |
| 3.2 Metodologia seguida.....   | 36 |
| 3.3 Resultados e discussão.....  | 41 |
| 4. Modelo evolutivo de 10 000 anos.....  | 52 |
| 4.1 Introdução .....   | 52 |
| 4.2 Definição das simulações.....  | 52 |
| 4.3 Resultados e Discussão .....   | 53 |
| 5. Aplicação de modelos morfodinâmicos em estudos de alterações climáticas. .... | 61 |
| 5.1 Introdução .....   | 61 |
| 5.2 Definição das simulações.....  | 61 |
| 5.3 Resultados e Discussão .....   | 63 |

|                      |    |
|----------------------|----|
| 6. Conclusões.....   | 70 |
| 7. Bibliografia..... | 73 |
| 8. Anexos.....       | 78 |



## Índice de Figuras:

|   |    |
|---|----|
| Figura 1 - Esquema representativo do fluxo de informação e método de funcionamento do Módulo SAND ao longo do tempo (T0- instante inicial, Tn- instante final). .....   | 22 |
| Figura 2 - Representação esquemática das batimetrias utilizadas pelo Mohid: I - visão em planta; II - visão em perfil; a – perfil rectilíneo; b – perfil rectilíneo acrescido de uma perturbação aleatória de $\pm 5\%$ ..... | 27 |
| Figura 3 - Comparação da evolução batimétrica para os perfis de 50 km, obtida a partir de um perfil inicial linear, com a obtida partindo de um perfil ao qual foi adicionado uma perturbação de $\pm 5\%$ .....              | 29 |
| Figura 4 - Comparação da evolução batimétrica para os perfis de 100 km, obtida a partir de um perfil inicial linear, com a obtida partindo de um perfil ao qual foi adicionado uma perturbação de $\pm 5\%$ .....             | 30 |
| Figura 5 - Evolução batimétrica obtida a partir de perfil inicial linear de 50 km. ....   | 31 |
| Figura 6 - Evolução batimétrica obtida a partir de perfil inicial linear de 100 km. ....  | 31 |
| Figura 7 - Resultados obtidos pelo MOHID para uma simulação de 300 anos, e respectiva comparação com resultados dos modelos intermédio e Delf3D de Hibma et al. (2003).....   | 33 |
| Figura 8 - Resultados dos perfis de 50 km, para uma simulação de 750 anos, e respectiva comparação com o modelo intermédio de Hibma et al. (2003) e o perfil de equilíbrio de Schuttelaars e Swart (2000).....                | 33 |
| Figura 9 - Resultados dos perfis de 100 km, para uma simulação de 750 anos, e respectiva comparação com o modelo intermédio de Hibma et al. (2003) e o perfil de equilíbrio de Schuttelaars e Swart (2000).....               | 34 |
| Figura 10 - Evolução batimétrica obtida pelo “run contínuo”, partindo de um perfil inicial linear ao qual foi adicionado uma perturbação de $\pm 5\%$ da elevação. ....   | 41 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 11 - Evolução batimétrica obtida com runs de 100 anos seguidos de extrapolação de 50 anos e respectiva comparação com os perfis obtidos pelo “Run Contínuo”. .....                    | 42 |
| Figura 12 - Evolução batimétrica obtida com runs de 100 anos seguidos de extrapolação de 100 anos e respectiva comparação com os perfis obtidos pelo “Run Contínuo”. .....                   | 42 |
| Figura 13 - Evolução batimétrica obtida com runs de 100 anos seguidos de extrapolação de 200 anos e respectiva comparação com os perfis obtidos pelo “Run Contínuo”. .....                   | 43 |
| Figura 14 - Evolução batimétrica obtida com runs de 50 anos seguidos de extrapolação de 100 anos e respectiva comparação com os perfis obtidos pelo “Run Contínuo”. .....                    | 43 |
| Figura 15 - Evolução batimétrica obtida com runs de 200 anos seguidos de extrapolação de 100 anos e respectiva comparação com os perfis obtidos pelo “Run Contínuo”. .....                   | 44 |
| Figura 16 - Variação ao longo do tempo do parâmetro “Volume de água” obtido para cada um dos casos considerados e respectiva linha de tendência.....   | 46 |
| Figura 17 - Variação ao longo do tempo do parâmetro “Volume erodido” obtido para cada um dos casos considerados e respectiva linha de tendência.....   | 46 |
| Figura 18 - Variação ao longo do tempo do parâmetro “Diferença relativa do volume erodido” obtido para cada um dos casos considerados e respectiva linha de tendência. ....                  | 47 |
| Figura 19 - Variação ao longo do tempo do parâmetro “Diferença relativa da profundidade máxima” obtido para cada um dos casos considerados e respectiva linha de tendência. ....             | 47 |
| Figura 20 - Variação ao longo do tempo do parâmetro “Erro quadrático médio” obtido para cada um dos casos considerados e respectiva linha de tendência.....                                  | 48 |
| Figura 21 - Evolução batimétrica obtida com simulações de 100 anos seguidas de 50 anos de extrapolação de 2ª ordem, e respectiva comparação com os perfis obtidos pelo “Run Contínuo”. ..... | 51 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 22 - Modelo da evolução batimétrica para 10 000 anos, obtida através de sucessivas simulações de 100 anos seguidas de extrapolação de 100 anos.....                                    | 53 |
| Figura 23 - Modelo da evolução batimétrica para 10 000 anos, obtida através de sucessivas simulações de 100 anos seguidas de extrapolação de 200 anos.....                                    | 54 |
| Figura 24 - Comparação dos modelos de evolução batimétrica para 10 000 anos, obtidos para os vários casos considerados. Divisão dos perfis em 3 sectores distintos.....                       | 54 |
| Figura 25 - Profundidade média de cada sector dos perfis batimétricos para os esquemas de extrapolação considerados, “Run100_Interp100” a verde e “Run100_Interp200” a azul. ....             | 56 |
| Figura 26 - Desvio padrão das profundidades de cada sector dos perfis batimétricos para os esquemas de extrapolação considerados, “Run100_Interp100” a verde e “Run100_Interp200” a azul..... | 57 |
| Figura 27 - Profundidade mínima de cada sector dos perfis batimétricos para os esquemas de extrapolação considerados, “Run100_Interp100” a verde e “Run100_Interp200” a azul.....             | 58 |
| Figura 28 - Profundidade máxima de cada sector dos perfis batimétricos para os esquemas de extrapolação considerados, “Run100_Interp100” a verde e “Run100_Interp200” a azul.....             | 59 |
| Figura 29 - Cenário de subida do nível do mar A1B do IPCC utilizado nas simulações, adaptado de Bindoff <i>et al.</i> , 2007.....   | 62 |
| Figura 30 - Evolução batimétrica calculada com imposição da maré e subida mínima do nível do mar, e respectiva comparação com os resultados só influenciados pela maré.                       | 64 |
| Figura 31 - Evolução batimétrica calculada com imposição da maré e subida máxima do nível do mar, e respectiva comparação com os resultados só influenciados pela maré.                       | 64 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 32 - Volume de água obtido para as várias simulações consideradas e respectiva linha de tendência. ....                            | 66 |
| Figura 33 - Volume total erodido obtido para as várias simulações consideradas e respectiva linha de tendência. ....                      | 66 |
| Figura 34 - Diferença relativa do volume erodido obtido para as várias simulações consideradas e respectiva linha de tendência. ....      | 67 |
| Figura 35 - Erro quadrático médio obtido para as várias simulações consideradas e respectiva linha de tendência. ....                     | 67 |
| Figura 36 - Diferença relativa da profundidade máxima obtido para as várias simulações consideradas e respectiva linha de tendência. .... | 68 |

## **Índice de tabelas:**

|  |    |
|--|----|
| Tabela 1 - Listagem dos casos considerados no estudo de impacto do uso de interpolação e respectivos instantes de análise..... | 40 |
| Tabela 2 - Listagem dos resultados dos diferentes parâmetros, para cada um dos grupos de dados considerados .....              | 45 |
| Tabela 3 - valores dos diferentes parâmetros utilizados na comparação dos dois esquemas de extrapolação considerados.....      | 56 |
| Tabela 4 - Valores dos diferentes parâmetros utilizados na análise das três simulações.<br>.....                               | 65 |

## **Índice de Anexos:**

|  |    |
|--|----|
| <b>Anexo I</b> – Executável para criação de batimetria com perfil rectilíneo acrescido de uma perturbação aleatória de +/- 5% da elevação..... | 78 |
| <b>Anexo II</b> - Executável para criação de batimetria extrapolada, aproximação a polinómio de 1ª ordem.....                                  | 79 |
| <b>Anexo III</b> - Executável para criação de batimetria extrapolada, aproximação a polinómio de 2ª ordem.....                                 | 82 |

# 1. Introdução

## 1.1. Modelação morfodinâmica e preenchimento sedimentar de bacias

Nas últimas décadas, a modelação, nas suas mais variadas abordagens, tem vindo a desempenhar um papel cada vez mais importante no estudo das zonas costeiras e dos vários processos que aí têm lugar. De entre estes processos, interessam-nos particularmente os que se encontram relacionados com a dinâmica costeira, mais precisamente com a dinâmica sedimentar, como por exemplo os processos de transporte, a modelação morfológica dos fundos, os processos de erosão versus deposição, o preenchimento de bacias, entre outros. Neste contexto, a modelação é utilizada como ferramenta de quantificação, interpretação e correlação dos vários processos, abrangendo várias escalas espaço-temporais. No final dos anos 60 surgiram as primeiras abordagens matemáticas, tendo como principal objectivo a simulação do preenchimento sedimentar de uma bacia a uma escala temporal geológica (e.g., Schwarzacher, 1966, Briggs e Pollack, 1967). Décadas mais tarde surgiu o trabalho de Allen e Allen (1990) que nos apresenta uma síntese bastante completa de todos estes modelos. Outra revisão, relacionada com modelos quantitativos estratigráficos e de preenchimento de bacias, pode ser encontrada em Paola (2000). Cao e Carling (2002a, 2002b) identificaram os principais factores que podem condicionar a qualidade dos resultados obtidos através de modelação. Desta forma temos por exemplo: a) as fracas suposições existentes nas formulações que estão na base da formulação do modelo; b) a utilização de soluções numéricas simplificadas; c) a implementação de relações sedimentares de validade por vezes questionável; d) o uso problemático da verificação e calibração destes modelos como uma afirmação inquestionável da sua veracidade.

A maioria dos modelos utilizados no estudo do preenchimento de bacias fluviais é do “tipo difusivo” (Flemmings e Jordan, 1989). São modelos sintéticos baseados na equação de conservação de massa, muito embora não considerem o transporte sedimentar como sendo um processo físico difusivo (Paola, 2000). Simulações baseadas unicamente em princípios de conservação de massa e regras geométricas são também utilizadas para quantificar comportamentos costeiros a larga escala (Cowell *et al.* 1995). Os processos dinâmicos são simulados tendo em conta uma série de parâmetros que definem a geometria, e que juntamente com regras comportamentais locais, fornecem uma formulação simples limitada pelo balanço sedimentar. A equação de conservação de massa considerando um transporte 1D pode ser escrita como:

$$\sigma + \frac{\partial \eta}{\partial t} = \frac{-1}{C_0} \frac{\partial q_s}{\partial X} \quad \text{Eq. 1}$$

em que  $\sigma$  é a taxa de subsidência (m/s),  $\eta$  a elevação da superfície sedimentar relativamente a um nível de referência (m),  $t$  é o tempo (s),  $C_0$  é o volume da concentração de sedimento no depósito,  $q_s$  é o fluxo sedimentar médio ao longo da bacia ( $\text{m}^2/\text{s}$ ) e  $X$  é a distância ao longo do eixo da bacia (m). A equação de difusão pode ser obtida a partir da equação do momento, mas apenas em contextos específicos (Paola *et al.*, 1992). Um pressuposto condicionante deste tipo de simulações é o facto da tensão de corte de fundo, na sua forma adimensional, ou de Shields, ter de ser constante, o que é obviamente difícil de obter em situações reais. Um outro problema de aplicabilidade da equação de difusão a situações reais, é a necessidade de imposição de valores constantes nas condições fronteira, como sejam o fornecimento sedimentar e o caudal do rio, entre outros. Deste modo, torna-se difícil a simulação de processos temporalmente dependentes, tais como o impacto das alterações climáticas em zonas costeiras, com este tipo de modelos.



No início da década de 90, o estudo das zonas costeiras a grandes escalas espaço-temporais passou a ser reconhecido como uma área de investigação por si só (List e Terwindt, 1995). Uma vez que o comportamento costeiro a larga escala não pode ser unicamente baseado na integração matemática dos processos físicos de pequena escala, surge uma abordagem alternativa que recorre à utilização de modelos conceptuais ou orientados por comportamento (de Vriend et al., 1993). São modelos quantitativos validados com base em observações ou por analogia com os comportamentos descritos em modelos geológicos qualitativos (Stive e Wang, 2003). Um exemplo é a aplicação de modelos na simulação da evolução estuarina, sem fazer uso de qualquer referência explícita a processos físicos, tais como ondas, vento e marés (Stolper, 2002). Este tipo de modelos tem por base princípios físicos essenciais, representados implicitamente através da definição das unidades geomorfológicas e de parâmetros que controlam a entrada de sedimento no sistema. Para isso utilizam geometrias e equações simplificadas para descrever tanto os processos morfodinâmicos, como o seu equilíbrio. Apresentam igualmente uma capacidade de previsão das alterações morfológicas a várias escalas temporais, desde décadas a milénios (Cowell e Thom, 1995; Stive e de Vriend, 1995). A integração do conceito de “fuzzy logic”, baseado na aplicação de um conjunto de regras empíricas simples, permite melhorar o desempenho dos modelos comportamentais de longa escala, nomeadamente no que diz respeito a processos não lineares de evolução costeira (Cowell e Zeng, 2003). A modelação orientada por comportamento está por vezes associada à utilização de softwares GIS, que funcionam como interface de obtenção de ficheiros de entrada, bem como para visualização dos resultados (Stolper, 2002).

Mais recentemente, com a descoberta de novos algoritmos, apareceram novas abordagens matemáticas que permitem a resolução de equações físicas acopladas a

equações empíricas e semi-empíricas. Tal desenvolvimento permite a aplicação de modelos mais complexos a escalas espaço-temporais mais abrangentes do que aquelas a que normalmente são aplicados, e para o qual foram inicialmente formulados. Estes modelos são baseados em processos, sendo desta forma denominados “process-based”, e resolvem explicitamente tanto as equações de conservação de massa, como a equação do momento, a uma, duas ou três dimensões. A modelação da morfodinâmica de zonas costeiras engloba vários processos, de entre os quais se destacam como mais relevantes, a hidrodinâmica, o transporte sedimentar e a evolução do fundo (Bernardes et al., 2006). No que diz respeito à comparação entre modelos baseados em processos e modelos conceptuais, esta pode ser realizada caso se adapte quer as formulações matemáticas, quer os princípios físicos usados em ambos os casos (Hibma et al., 2004a).

Neste trabalho, a abordagem seguida relaciona-se com a utilização de um modelo baseado em processos e, sempre que possível, a sua comparação com modelos conceptuais pré-existentes. Deste modo, pretende-se testar a aplicabilidade do sistema de modelação MOHID, descrito mais à frente, para simular a evolução morfodinâmica de longa escala temporal.

## **1.2. Sistema de Modelação MOHID**

Nesta secção descreve-se o modelo baseado em processos utilizado nas várias simulações. O MOHID ([www.mohid.com](http://www.mohid.com)) é um sistema de modelação de código aberto que tem vindo a ser desenvolvido no Instituto Superior Técnico durante os últimos 30 anos. É um sistema baroclínico tridimensional embora possa ser utilizado em simulações a uma e duas dimensões, dependendo do domínio em questão e do objectivo pretendido. Foi originalmente desenvolvido para efectuar simulações de curta duração,

entre dias e anos, sendo o presente trabalho uma das primeiras vezes em que este modelo é aplicado a estudos de escala milenar. Este sistema de modelação tem vindo a ser aplicado em diversos ambientes e casos de estudo, desde zonas costeiras e estuarinas, passando por simulações de processos oceânicos, tendo-se mostrado versátil e capaz de simular os mais variados processos existentes num sistema natural.

O MOHID segue uma filosofia de modelação integrada e orientada por objectos (Miranda *et al.*, 2000), sendo constituído por vários módulos que são escolhidos consoante o objectivo da simulação. Baseia-se no conceito de volume finito no que diz respeito à discretização das equações (Chippada *et al.*, 1998; Martins *et al.*, 1999, 2001), o que permite uma maior flexibilidade na subdivisão dos domínios tanto horizontal como verticalmente, bem como na implementação de coordenadas verticais adaptadas a cada caso particular. A malha horizontal é do tipo Arakawa C, ortogonal descentrada, e tem implementada uma geometria genérica na direcção vertical (Martins *et al.*, 2001). As condições de fronteira aberta podem ser impostas através da definição do seu valor ou definindo uma condição radiativa (Coelho *et al.*, 2002). Este modelo permite também definir zonas intertidais, onde pode ser implementada uma fronteira móvel que possibilita a definição de uma célula como água ou terra, dependendo das condições de maré e do nível impostos, para um dado momento. A rugosidade de fundo também é incorporada no modelo, de forma implícita e usando uma lei quadrática.

No presente trabalho, os processos tidos em conta são a hidrodinâmica, o transporte sedimentar e a evolução morfológica. A componente principal, que está na base das simulações levadas a cabo por este tipo de modelos, é a definição da hidrodinâmica de todo o sistema, a qual controla o modelo de transporte sedimentar e a sua interacção com o fundo. Esta abordagem possibilita a determinação da evolução batimétrica por acção das correntes locais, bem como a sua implicação sobre a circulação.

No módulo hidrodinâmico, o modelo resolve as equações primitivas baseadas nas equações de Navier-Stokes, para escoamentos incompressíveis, considerando as aproximações Boussinesq e de equilíbrio hidrostático (Martins *et al.*, 1998). As equações do momento para as componentes horizontais da velocidade (valores médios da decomposição de Reynolds) podem ser definidas sob a forma cartesiana como:

$$\begin{aligned} \partial_t u = & -\partial_x(uu) - \partial_y(uv) - \partial_z(uw) + fv - \frac{1}{\rho_0} \partial_x p + \partial_x((v_H + V)\partial_x u) + \\ & \partial_y((v_H + V)\partial_y u) + \partial_z((v_t + V)\partial_z u) \end{aligned} \quad \text{Eq. 2}$$

$$\begin{aligned} \partial_t v = & -\partial_x(vu) - \partial_y(vv) - \partial_z(vw) + fu - \frac{1}{\rho_0} \partial_y p + \partial_x((v_H + V)\partial_x v) + \\ & \partial_y((v_H + V)\partial_y v) + \partial_z((v_t + V)\partial_z v) \end{aligned} \quad \text{Eq. 3}$$

onde  $u$ ,  $v$  e  $w$  representam as componentes do vector velocidade nas direcções  $x$ ,  $y$  e  $z$  respectivamente,  $f$  o parâmetro de Coriolis,  $v_H$  e  $v_t$  a viscosidade turbulenta nas direcção horizontal e vertical,  $V$  a viscosidade cinemática molecular ( $1.3 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ), e  $p$  é a pressão. A velocidade vertical é calculada a partir da equação continuidade:

$$\partial_x u \pm \partial_y v \pm \partial_z w = 0 \quad \text{Eq. 4}$$

A equação utilizada para a superfície livre é obtida através da integração da equação da continuidade para toda a coluna de água, entre a cota  $a$  que se encontra a superfície livre ( $\eta(x,y)$ ) e o fundo ( $-h$ ):

$$\partial_t \eta = -\partial_x \int_{-h}^z u dz - \partial_y \int_{-h}^z v dz \quad \text{Eq. 5}$$

A aproximação hidrostática é definida por:

$$\partial_z p - g\rho = 0 \quad \text{Eq. 6}$$

em que  $g$  é a gravidade e  $\rho$  a densidade. Se a pressão atmosférica ( $p_{atm}$ ) for subtraída à pressão ( $p$ ) e a densidade for dividida entre uma densidade constante de referência ( $\rho_0$ ) e a variação ( $\rho'$ ). Após a integração entre a superfície livre e a profundidade  $z$ , relativamente à qual a pressão é calculada, obtém-se:

$$p(z) = p_{atm} + g\rho_0(\eta - z) + g \int_z^\eta \rho' dz \quad \text{Eq. 7}$$

Esta expressão relaciona a pressão definida para qualquer profundidade, com a pressão atmosférica à superfície da água, o nível do mar, e a pressão anómala integrada entre esse nível e a essa superfície. Usando esta equação e a aproximação de Boussinesq, o gradiente horizontal de pressão na direcção  $x_i$  pode ser definido tendo por base, três componentes principais:

$$\partial_{x_i} p = \partial_{x_i} p_{atm} \pm g\rho_0 \partial_{x_i} \eta \pm g \partial_{x_i} \int_z^\eta \rho' dz \quad \text{Eq. 8}$$

Deste modo, o gradiente de pressão total é a soma do gradiente de pressão atmosférica, da pressão barotrópica (relacionada com a elevação da superfície do mar) e da pressão baroclínica (relativa à distribuição da densidade).

O transporte sedimentar e a evolução morfológica são obtidos pelo módulo SAND, o qual vai receber como dados de entrada parâmetros e valores determinados por outros módulos do MOHID. A Figura 1 ilustra de um modo sintético o fluxo de informação envolvido no funcionamento do módulo SAND, bem como o tipo de informação adquirida. Desta forma é possível determinar o volume de sedimentos não consolidados que é transportado junto ao fundo, bem como compreender a dinâmica relacionada com a sua movimentação, deposição e erosão. A evolução morfológica ao longo do tempo é então estimada através da comparação entre as diversas batimetrias obtidas nas várias simulações.

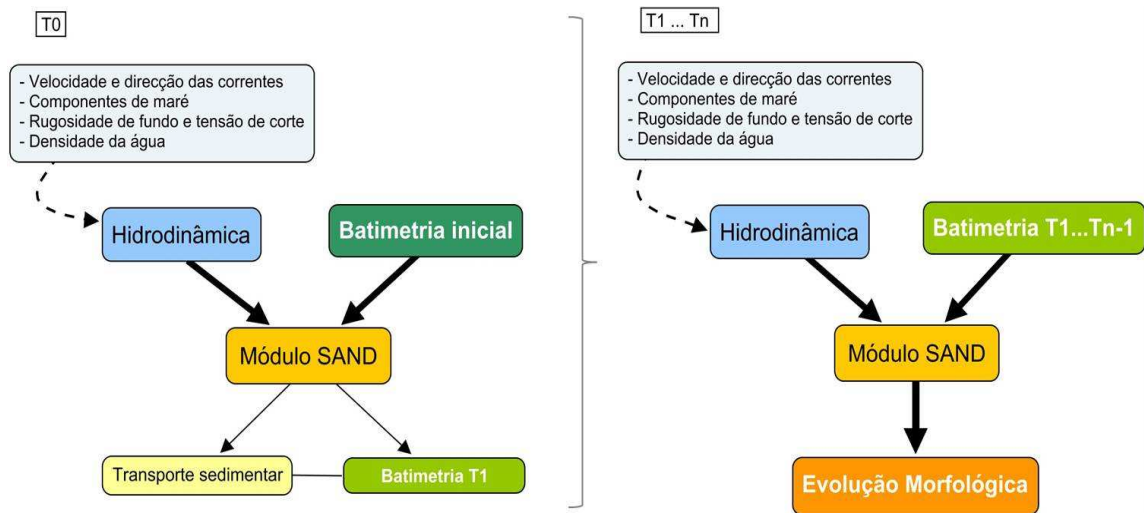


Figura 1 - Esquema representativo do fluxo de informação e método de funcionamento do Módulo SAND ao longo do tempo (T0- instante inicial, Tn- instante final).

A evolução do fundo é calculada através da equação de balanço de massa:

$$(1 - n) \frac{\partial n}{\partial t} + \text{div} \vec{q}_s = \frac{\theta_s}{\rho_s} \quad \text{Eq. 9}$$

sendo  $n$  a porosidade do sedimento,  $\theta_s$  a troca sedimentar entre a coluna de água e o fundo ( $\text{Kg}/(\text{m}^2 \text{s})$ ) e  $\rho_s$  a densidade seca do sedimento ( $\text{Kg}/\text{m}^3$ ).

Para determinar o transporte sedimentar é possível escolher a equação que melhor se adequa ao objectivo da simulação, bem como ao local de estudo. Assim, para ambientes fluviais e estuarinos em que o transporte é forçado unicamente por correntes, ou em que estas constituam o principal agente de transporte, podemos escolher entre as formulações de Meyer-Peter e Muller (1948) e de Ackers-White (1973). Em ambientes costeiros cuja hidrodinâmica resulta de uma acção combinada entre correntes e ondas, é possível optar pelas equações de Van Rijn (1984, 1993), Bailard (1981,1984), Dibajnia-Watanabe (1992) e Bijker (1968). Neste trabalho os fluxos sedimentares de fundo foram calculados segundo a formulação de Meyer-Peter e Muller (1948). Estes autores

descrevem uma relação empírica apoiada em experiências laboratoriais, sendo o transporte sedimentar de fundo ( $q_s$ ) representado por:

$$q_s = 8[(s - 1)g]^{1/2}[D_{50}(\tau' - \tau_c)]^{3/2} \quad \text{Eq. 10}$$

onde  $D_{50}$  representa o diâmetro do peneiro onde ficam retidos 50% do peso total da amostra,  $s$  é a densidade relativa dos sedimentos,  $\tau_c$  é a tensão de corte crítica e  $\tau'$  é a tensão de corte total, respectivamente calculadas por:

$$s = \frac{\rho_s}{\rho} \quad \text{Eq. 11}$$

$$\tau_c = 0.047\gamma_s D_{50} \quad \text{Eq. 12}$$

$$\tau' = \mu\tau_f \quad \text{Eq. 13}$$

em que  $\rho_s$  é a densidade do sedimento,  $\rho$  a densidade da água,  $\gamma_s$  é a diferença de densidades entre o sedimento e a água,  $\tau_f$  representa a tensão de corte no fundo e  $\mu$  é um factor de forma que indica a influência da rugosidade do fundo no transporte, calculado através da seguinte expressão:

$$\mu = \left( \frac{18 \log_{10} \left( \frac{12h}{K_{sc}} \right)}{C_{90}} \right)^{1.5} \quad \text{Eq. 14}$$

onde  $C_{90}$  é o coeficiente de Chézy baseado na rugosidade dada por  $D_{90}$  (diâmetro das partículas excedido apenas por 10% destas em peso) e  $K_{sc}$  é a rugosidade originada pela corrente.

Para o transporte de partículas em suspensão utilizou-se a formulação de Ackers-White (1973). A expressão assume que os sedimentos finos se encontram suspensos por acção da turbulência, estando esta dependente da dissipação de energia gerada pelo atrito no

fundo. Deste modo, o transporte em suspensão depende da tensão de corte no fundo. O diâmetro adimensional do grão ( $D_*$ ) pode ser determinado pela fórmula:

$$D_* = D_{35} \left[ \frac{g(s-1)}{v^2} \right]^{1/3} \quad \text{Eq. 15}$$

sendo  $v$  a viscosidade cinemática,  $g$  a gravidade,  $D_{35}$  representa o diâmetro do peneiro onde ficam retidos 35% do peso total da amostra, e  $s$  a densidade relativa dos sedimentos definida pela razão entre a densidade dos sedimentos e a densidade da água. A mobilidade dos sedimentos ( $F_{gr}$ ) é definida como:

$$F_{gr} = \frac{U_*^n}{\sqrt{gD_{35}(s-1)}} \left[ \frac{U}{\sqrt{32 \log(\alpha h/D_{35})}} \right]^{1-n} \quad \text{Eq. 16}$$

onde  $\alpha = 1/K_s$ , em que  $K_s$  é o coeficiente de rugosidade de Manning,  $h$  é a profundidade local,  $U_*$  é a velocidade de atrito e  $U$  é a velocidade. A equação adimensional geral de transporte sedimentar ( $G_{gr}$ ), pode ser expressa em função do diâmetro adimensional do grão,  $D_*$ , e da mobilidade dos sedimentos,  $F_{gr}$ , sob a forma de:

$$G_{gr} = C \left( \frac{F_{gr}}{A} - 1 \right)^m \quad \text{Eq. 17}$$

em que  $n$ ,  $m$ ,  $A$  e  $C$ , são coeficientes empíricos calibrados com recurso a um vasto conjunto formado por dados laboratoriais e de campo, definidos por:

$$n = 1 - 0.56 \log D_* \quad \text{Eq. 18}$$

$$A = \frac{0.23}{\sqrt{D_*}} + 0.14 \quad \text{Eq. 19}$$

$$m = \frac{9.66}{D_*} + 1.34 \quad \text{Eq. 20}$$

$$\log C = 2.86 \log D_* - (\log D_*)^2 - 3.53 \quad \text{Eq. 21}$$

A simulação do transporte sedimentar pelo MOHID necessita da definição das condições fronteira que controlam a circulação hidrodinâmica e a sua relação com a evolução dos fundos. Temos assim duas fronteiras verticais, que separam três domínios



diferentes. Relativamente ao limite entre a atmosfera e a massa de água (a superfície livre), considera-se uma fronteira fechada, não ocorrendo fluxos de massa entre elas. Ocorrem no entanto fluxos de quantidade de movimento, devido à tensão de corte do vento. Uma vez que se pretende determinar a interação entre a coluna de água e o fundo sedimentar, define-se esta fronteira como aberta, sendo a evolução dos fundos calculada pelas equações acima descritas.

### **1.3. Objectivos**

A abordagem seguida neste trabalho pretende dar resposta a três aspectos fundamentais:

- i) Testar a aplicabilidade de um modelo baseado em processos, no que diz respeito à simulação da evolução morfodinâmica de fundo a uma escala de tempo geológica (milhares de anos).
- ii) Desenvolver um método numérico que permita a redução do tempo de cálculo envolvido nas simulações, sem comprometer a qualidade e fiabilidade dos resultados obtidos, uma vez que o esforço computacional é um dos principais problemas da utilização de modelos com esta complexidade em simulações longa escala temporal.
- iii) Estudar a influência da subida do nível do mar no que diz respeito ao preenchimento sedimentar e evolução morfológica do fundo.

## **2. Modelo Morfodinâmico**

### **2.1. Introdução**

Neste capítulo descreve-se o modelo morfodinâmico simulado pelo sistema de modelação MOHID, as abordagens seguidas, os pressupostos, as simplificações e os parâmetros considerados. O ponto de partida deste trabalho foi tentar reproduzir com o este modelo, as simulações realizadas por Hibma e seus co-autores (2003, 2004a, 2004b). Estes autores comparam um modelo baseado em processos (Delf-3D) com um modelo do tipo conceptual, tendo para tal construído um modelo intermédio que mais não é do que a implementação de alguns parâmetros e simplificações do modelo conceptual no Delf-3D. Embora o MOHID e o Delf-3D sejam ambos modelos baseados em processos, quando comparados entre si são bastante distintos no que diz respeito à sua estrutura de modelação e ao modo como abordam o problema. Deste modo, e sempre que possível, ajustaram-se os parâmetros e impuseram-se as mesmas condições fronteira, facilitando assim a comparação dos resultados obtidos pelo sistema de modelação MOHID com os trabalhos de Hibma et al. (2003, 2004a, 2004b).

### **2.2. Parâmetros e condições iniciais:**

As simulações da morfodinâmica foram efectuadas a uma dimensão pelo sistema de modelação MOHID, já descrito anteriormente. As várias batimetrias utilizadas foram definidas como está ilustrado na Figura 2, de forma a serem comparáveis com os resultados dos modelos unidireccionais usados por Hibma et al. (2003, 2004a, 2004b). Todas as batimetrias apresentam uma malha ortogonal, dividida em células com 1km de

lado, representando um estuário esquemático, onde todas as suas fronteiras horizontais se encontram fechadas, com a excepção de uma, expondo no centro um canal estreito.

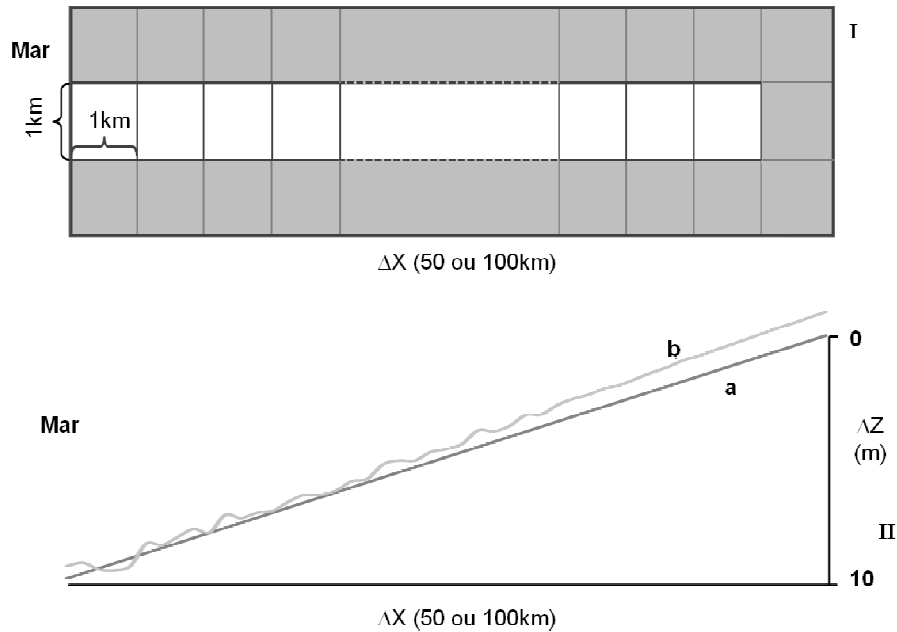


Figura 2 - Representação esquemática das batimetrias utilizadas pelo Mohid: I - visão em planta; II - visão em perfil; a - perfil rectilíneo; b - perfil rectilíneo acrescido de uma perturbação aleatória de  $\pm 5\%$ .

Com o objectivo de testar a influência da dimensão do estuário na evolução morfológica, compararam-se batimetrias com dois comprimentos distintos, 50 km e 100 km, respectivamente. Outro parâmetro cuja importância também se pretendeu avaliar, foi o tipo de perfil batimétrico imposto no início da simulação. Para tal, consideraram-se dois casos distintos. Num dos casos impôs-se um perfil rectilíneo desde os 10m de profundidade na fronteira aberta, e o nível do mar (0 m) no extremo oposto (Figura 2 - II a). No outro caso (Figura 2 - II b), temos um perfil rectilíneo ao qual se adicionou uma perturbação aleatória cujo valor oscila entre mais ou menos 5% do valor da profundidade num dado ponto. Estas batimetrias foram obtidas através de um pequeno programa escrito em FORTRAN 95, apresentado no Anexo I. Convencionalmente, as

profundidades são representadas com sinais positivos, sendo o sinal negativo indicador de valores acima do zero hidrográfico.

Relativamente aos parâmetros ambientais, apenas foi considerada a influência da maré, imposta na fronteira aberta. Considera-se apenas a componente mais importante,  $M_2$ , com uma amplitude de maré de 1.75m e uma fase na origem de 0 radianos. O transporte de fundo de sedimentos não consolidados é determinado segundo a formulação de Meyer-Peter e Muller (1948), descrita no capítulo anterior. A distribuição granulométrica do fundo sedimentar é definida pelos parâmetros  $D_{35}$ ,  $D_{50}$  e  $D_{90}$ , com os respectivos valores de 250, 200 e 100  $\mu\text{m}$ , por serem os valores utilizados nos trabalhos de Hibma et al. (2003, 2004a, 2004b).

### **2.3. Resultados e Discussão**

Numa primeira abordagem foram simulados 900 anos para cada um dos casos considerados, usando um tempo de cálculo por iteração de 60 segundos. Analisando os vários perfis batimétricos obtidos, é possível observar as alterações morfológicas ao longo do tempo, compreendendo assim em que medida a batimetria inicial, bem como o seu comprimento, afecta a evolução da morfologia de fundo. Na Figura 3 está representada a comparação entre a evolução batimétrica obtida a partir de um perfil inicial linear e a obtida partindo de um perfil inicial que tem associado uma perturbação de +/-5%, para o caso de estuários mais pequenos (50 km de comprimento). Na Figura 4, temos a mesma representação mas para a simulação de um estuário de maior comprimento (100 km). Como se pode observar nestas duas figuras, a batimetria imposta inicialmente não exerce grande influência na forma como se processa a evolução batimétrica, uma vez que em ambos os casos essa evolução ocorre

globalmente e de modo bastante semelhante. Assim, observa-se um aprofundar do perfil junto à fronteira aberta, indicando a predominância de fenômenos erosivos, enquanto a montante ocorre uma acumulação sedimentar. Os perfis que derivam de uma batimetria inicial linear, apresentam-se ligeiramente mais profundos e com menor sobrelevação, sendo esta diferença melhor observada nas batimetrias mais extensas (Figura 4).

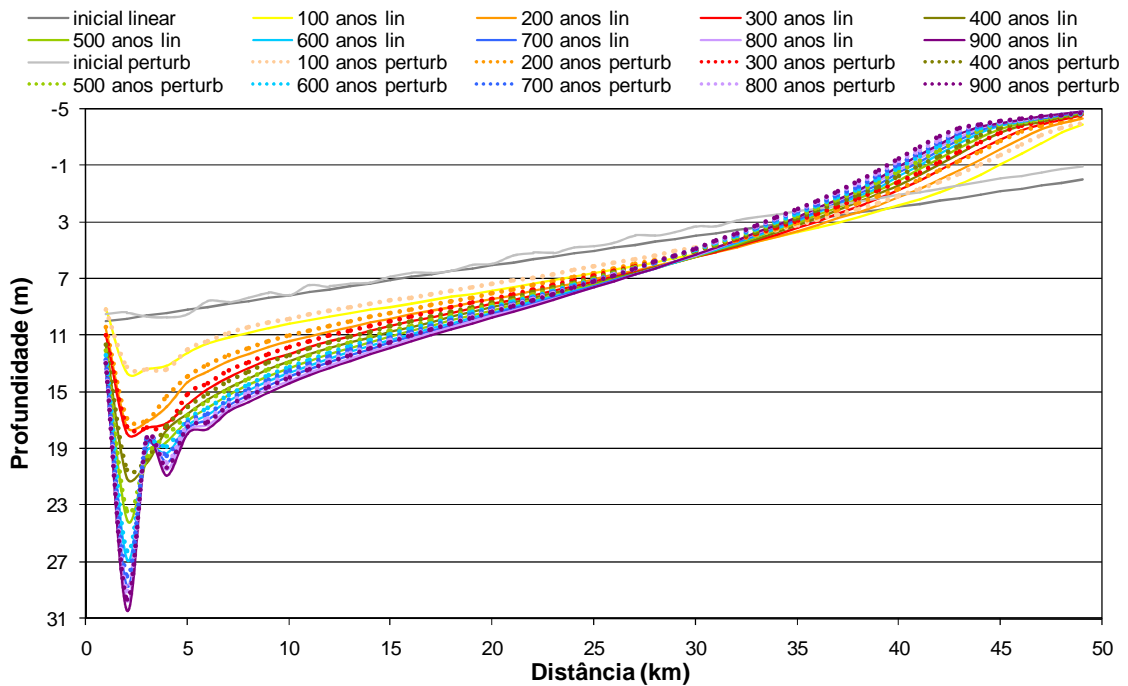


Figura 3 - Comparação da evolução batimétrica para os perfis de 50 km, obtida a partir de um perfil inicial linear, com a obtida partindo de um perfil ao qual foi adicionado uma perturbação de +/- 5%.

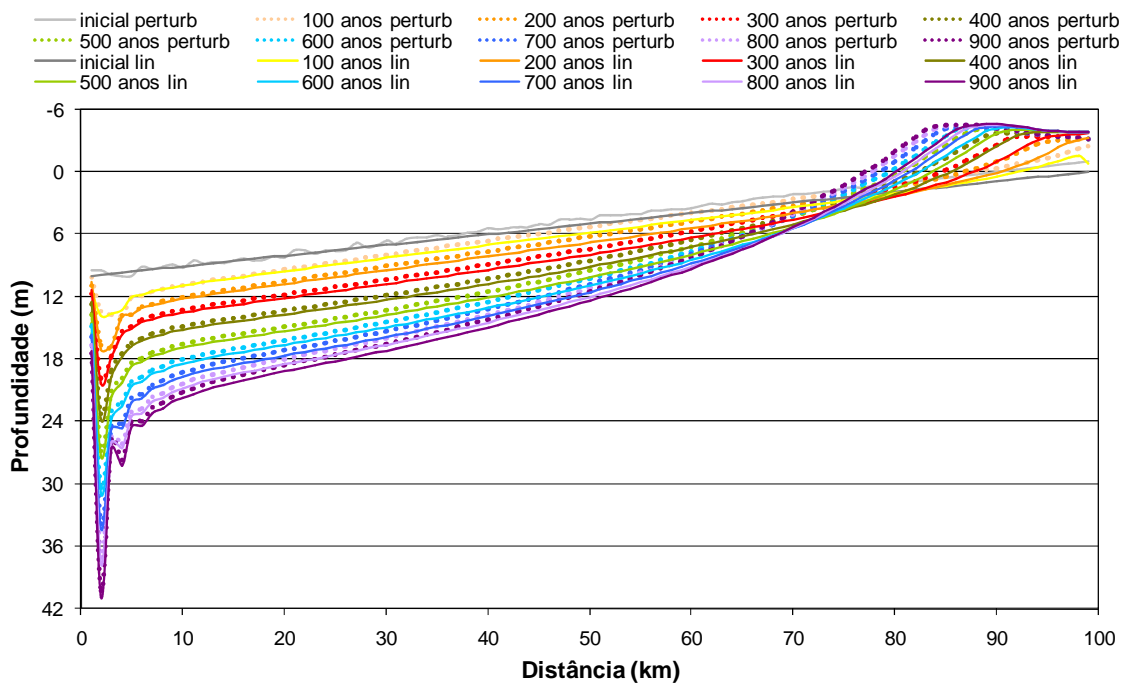


Figura 4 - Comparação da evolução batimétrica para os perfis de 100 km, obtida a partir de um perfil inicial linear, com a obtida partindo de um perfil ao qual foi adicionado uma perturbação de +/- 5%.

As simulações levadas a cabo por Hibma et al. (2003, 2004a, 2004b), utilizam como ponto de partida um perfil linear. Uma vez que não se verificam diferenças significativas entre o tipo de perfil imposto inicialmente e a evolução batimétrica, neste capítulo vamos apenas ter em conta os resultados das simulações definidas a partir de um perfil linear. A Figura 5 e a Figura 6 representam com maior detalhe a evolução batimétrica obtida pelo MOHID partindo de uma batimetria inicial linear. No caso do estuário com 50 km de comprimento (Figura 5), observa-se uma tendência para a obtenção de um perfil de equilíbrio a partir dos 500/600 anos de simulações. Ocorre então uma estabilização batimétrica, ou seja, permanecendo constantes as condições impostas no modelo, a evolução da morfologia de fundo não vai sofrer grandes alterações com a progressão das simulações. Tal não é observável no caso da batimetria mais extensa (Figura 6), em que simulações de 900 anos não são suficientes para a

obtenção do perfil de equilíbrio, embora se verifique uma tendência de aproximação entre perfis ao longo do tempo.

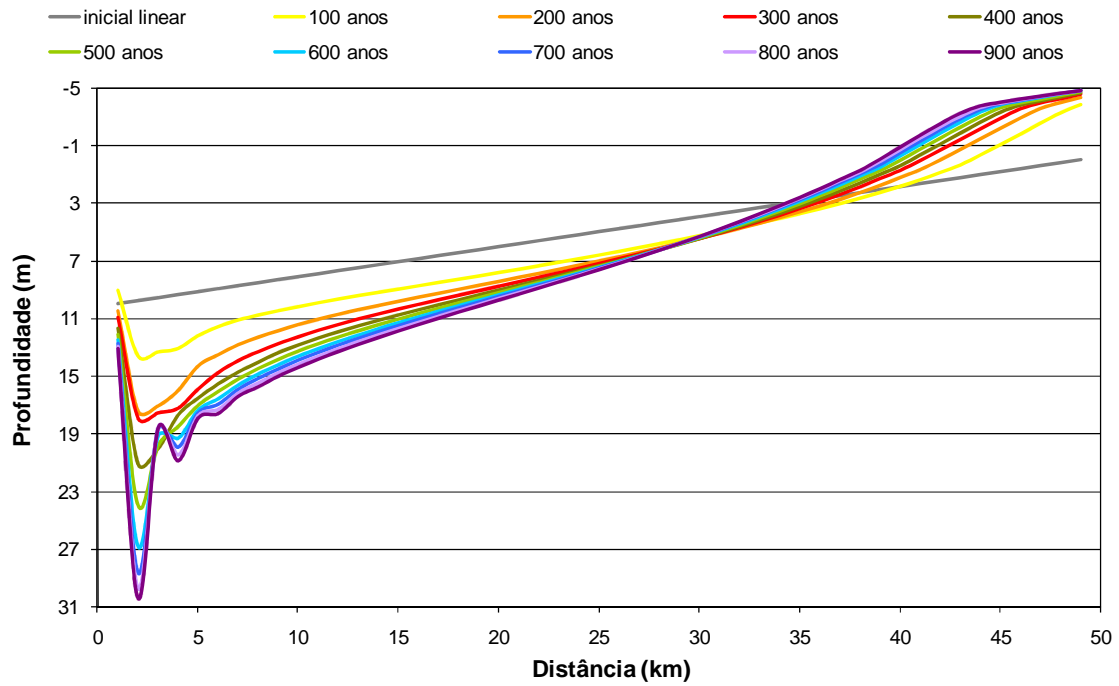


Figura 5 - Evolução batimétrica obtida a partir de perfil inicial linear de 50 km.

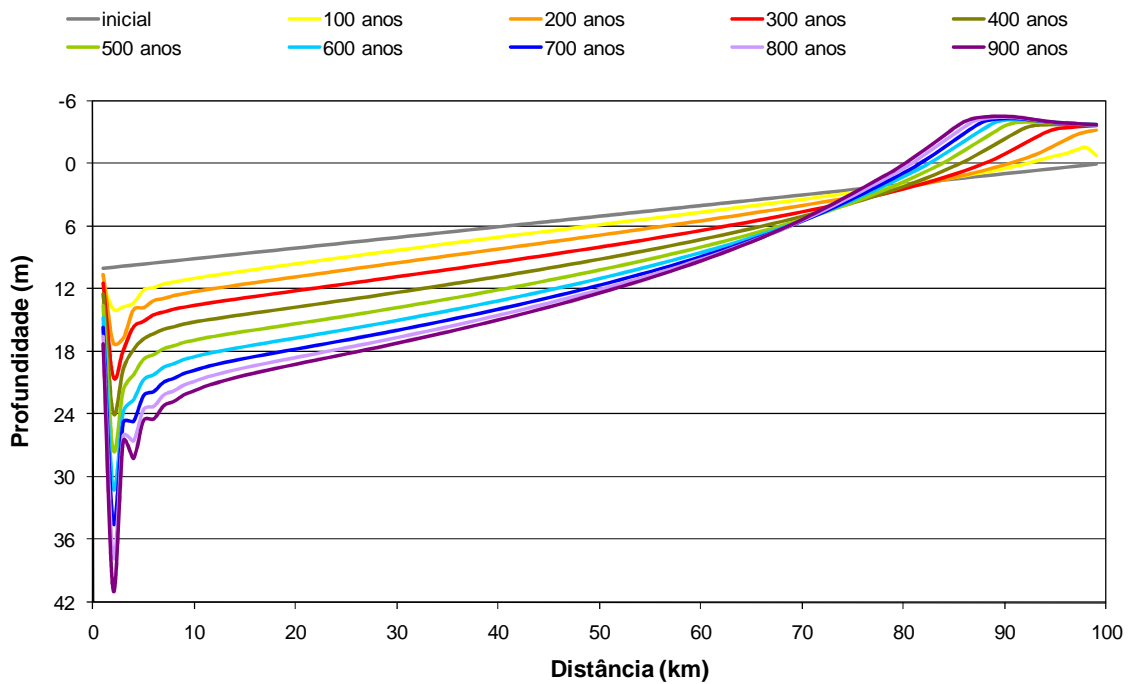


Figura 6 - Evolução batimétrica obtida a partir de perfil inicial linear de 100 km.

Seguidamente compararam-se os resultados obtidos pelo sistema de modelação MOHID, com outras abordagens numéricas referidas anteriormente. Na Figura 7 estão representados os resultados referentes a 300 anos de simulação, obtidos quer pelo MOHID, quer por Hibma et al. (2003) para os modelos Delf3D e intermédio. A Figura 8 e a Figura 9 ilustram os resultados da simulação de 750 anos para estuários de 50 e 100 km, respectivamente. A cor laranja está representada a batimetria determinada pelo MOHID, a preto encontra-se o perfil de equilíbrio obtido pelo modelo conceptual de Schuttelaars e Swart (2000), e a verde o modelo intermédio de Hibma et al. (2003). Apesar de serem abordagens numéricas distintas, e os modelos usarem discretizações diferentes, observam-se similaridades entre os vários perfis, as quais são particularmente evidentes nos resultados para simulações de 300 anos (Figura 7). Os resultados obtidos pelo MOHID distanciam-se dos alcançados pelas outras abordagens, em particular dos extremos do perfil. O acentuado aprofundamento do perfil deve-se provavelmente a um efeito de fronteira, efeito este também referido por Hibma et al. (2003). Uma solução provável para minimizar este efeito poderá passar pela implementação de uma zona de fronteira que inclua a zona correspondente ao delta de vazante, no perfil batimétrico inicial.



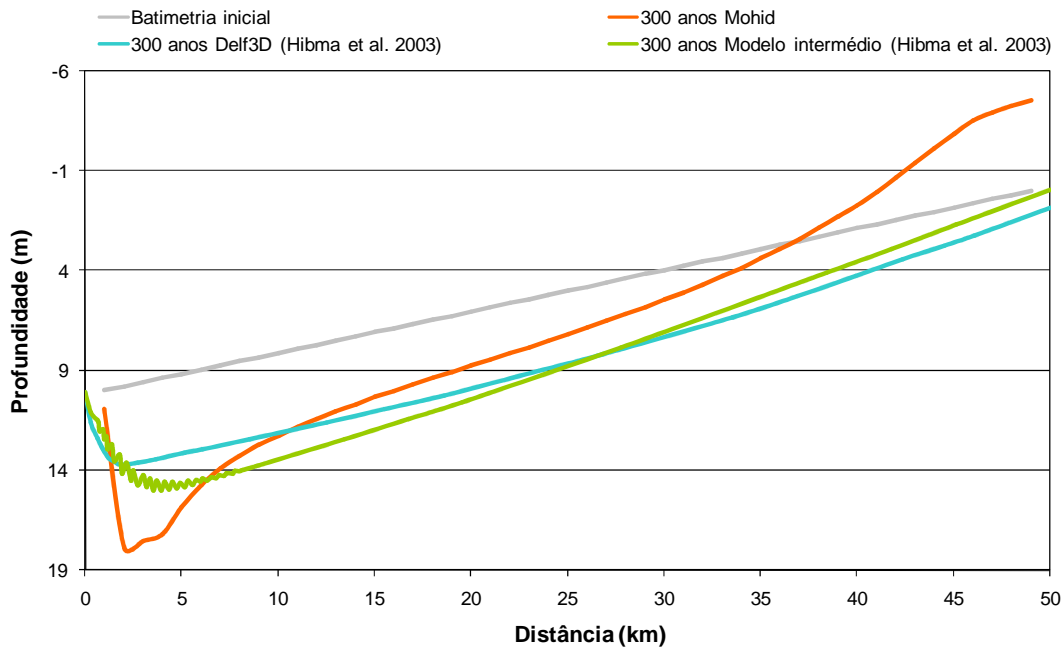


Figura 7 - Resultados obtidos pelo MOHID para uma simulação de 300 anos, e respectiva comparação com resultados dos modelos intermédio e Delf3D de Hibma et al. (2003).

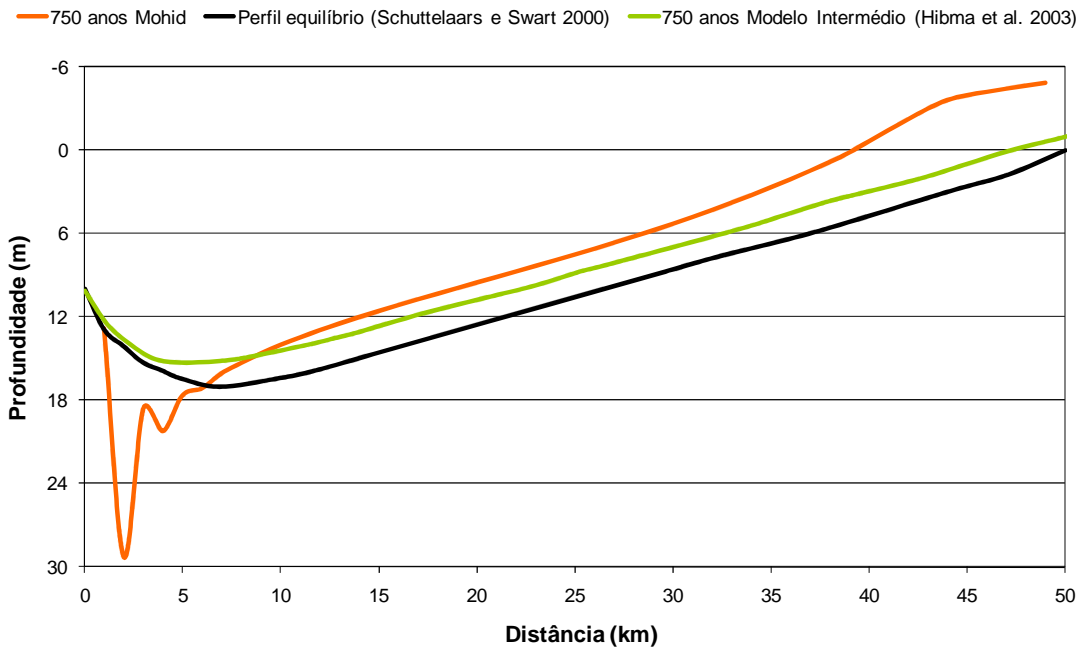


Figura 8 - Resultados dos perfis de 50 km, para uma simulação de 750 anos, e respectiva comparação com o modelo intermédio de Hibma et al. (2003) e o perfil de equilíbrio de Schuttelaars e Swart (2000).

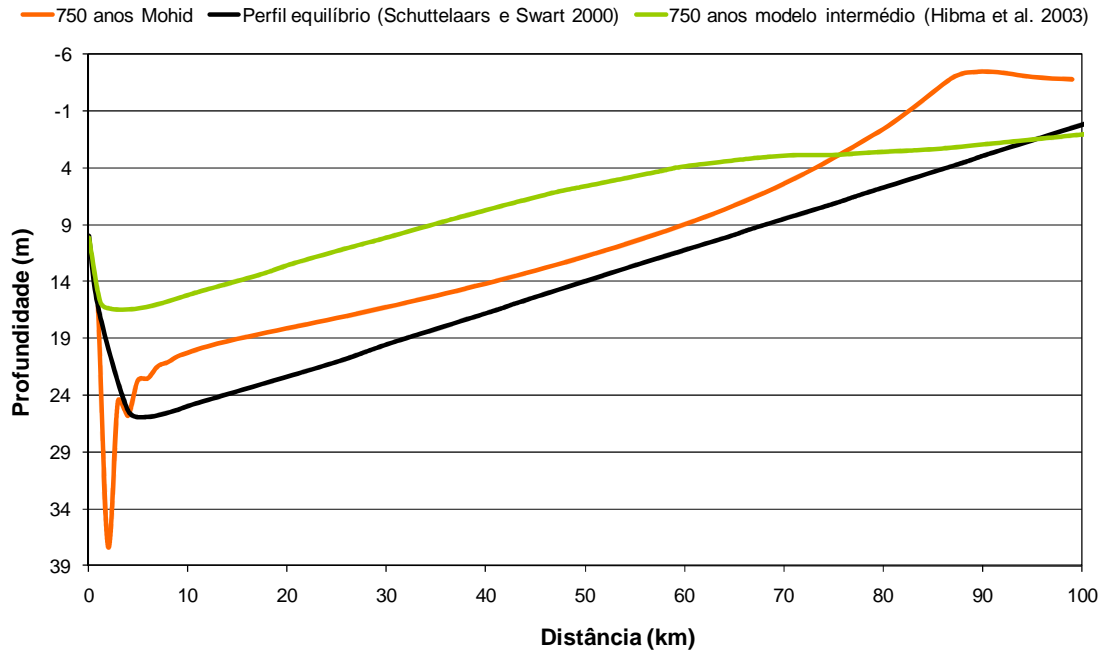


Figura 9 - Resultados dos perfis de 100 km, para uma simulação de 750 anos, e respectiva comparação com o modelo intermédio de Hibma et al. (2003) e o perfil de equilíbrio de Schuttelaars e Swart (2000).

O modelo de Schuttelaars e Swart (2000) prevê a obtenção de um único perfil de equilíbrio, para perfis batimétricos de comprimento constante e para casos em que a maré possa ser definida como uma frequência simples. Quando são impostas marés compostas, estas vão originar vários perfis de equilíbrio. Embora através do MOHID tenha sido implementada na fronteira aberta uma maré constituída por uma única componente ( $M_2$ ), devido às formulações numéricas incluídas neste modelo e que têm em conta o cálculo de termos não lineares como a advecção e o atrito no fundo, dá-se a produção de marés compostas (“overtides”) dentro do sistema. Uma outra questão prende-se com o facto de o perfil batimétrico não se manter constante ao longo do tempo, devido à ocorrência de uma deposição sedimentar na zona mais a montante do estuário. Uma vez que esta acumulação de sedimento não é retirada do sistema, dá-se então uma redução do comprimento efectivo do perfil ao longo das várias simulações, como pode ser observado na Figura 5 e na Figura 6. Todas estas questões justificam as

diferenças observadas entre o modelo morfodinâmico e as diversas abordagens numéricas encontradas na literatura, não invalidando a sua utilização nem pondo em causa a sua aplicabilidade.

## **3. Estudo de economia de tempo de cálculo**

### **3.1 Introdução**

Um dos principais entraves, se não o maior, a uma utilização mais generalizada de modelos numéricos baseados em processos em estudos de larga escala temporal, é o esforço computacional e de tempo envolvido no seu processamento. Na tentativa de minimizar este factor, analisaram-se várias estratégias que possibilitem a poupança de tempo de cálculo sem que a qualidade dos resultados seja afectada. O método escolhido para levar a cabo este estudo foi a interpolação numérica. Deste modo, testaram-se vários tipos de interpolação, bem como o melhor esquema para a sua aplicação, relacionando-se sempre os erros envolvidos entre os resultados obtidos pelo modelo morfodinâmico e as várias formas de combinar o uso da interpolação.

### **3.2 Metodologia seguida**

O ponto de partida para este estudo é o modelo da evolução de fundo de 2100 anos obtido pelo MOHID, ao qual se designou por “Run Contínuo”. As simulações foram levadas a cabo usando os mesmos pressupostos descritos no capítulo anterior, tendo-se optado por seguir a evolução de um perfil de 50 km com uma batimetria inicial linear acrescida duma perturbação de mais ou menos 5% da elevação em cada ponto. Relativamente ao tempo de cálculo, o modelo demora cerca de 7 minutos de processamento por ano de simulação, num computador pessoal com processador Pentium Intel Core 2, a 2.4Ghz, com 2Gb de RAM. A escolha da duração do modelo evolutivo esteve dependente da obtenção de uma tendência de equilíbrio. Como se pode

ver na Figura 10, aos 2100 anos essa tendência já se encontra bem estabelecida, sendo possível definir um padrão evolutivo constante ao longo do tempo.

Uma vez definido o modelo evolutivo que vai servir de referência para os estudos de economia de tempo, o passo seguinte passa pela análise dessa tendência evolutiva. Ao tentar perceber qual a melhor função que descreve o modo como se processa a evolução morfodinâmica, torna-se possível reproduzi-la numericamente. Foi então testada a aproximação da evolução temporal da profundidade do fundo em cada ponto a um polinômio de 1ª e 2ª ordem. Com esta finalidade, foram construídos dois programas em FORTRAN 95 (Anexo II e Anexo III) que permitem a obtenção de uma batimetria extrapolada para um dado instante de tempo, a partir das batimetrias determinadas pelo MOHID em instantes anteriores. Para o cálculo das extrapolações seguiu-se a formulação obtida pelo método das diferenças finitas descrito por Carnahan et al. (1969). Deste modo, as extrapolações de 1ª ordem foram determinadas segundo:

$$z_3 = z_1 + (t_3 - t_1) * \left( \frac{z_2 - z_1}{t_2 - t_1} \right) \quad \text{Eq. 22}$$

em que  $z_3$  é a profundidade a interpolar,  $t_3$  o instante de interpolação,  $z_1$  e  $z_2$  as profundidades do ponto correspondente em duas batimetrias calculadas pelo MOHID, referentes respectivamente aos instantes  $t_1$  e  $t_2$ . Neste caso concreto considerou-se as batimetrias dos dois últimos instantes de saída de resultados, apresentando 1 ano de intervalo de tempo entre eles. Seguindo o mesmo método temos a formulação utilizada nas interpolações de 2ª ordem:

$$z_4 = z_1 + (t_4 - t_1) * \left( \frac{z_2 - z_1}{t_2 - t_1} \right) + (t_4 - t_1) * (t_4 - t_2) * \left( \frac{\frac{z_3 - z_2}{t_3 - t_2} - \frac{z_2 - z_1}{t_2 - t_1}}{t_3 - t_1} \right) \quad \text{Eq. 23}$$

sendo  $z_4$  a profundidade a interpolar,  $t_4$  o instante de interpolação,  $z_1$ ,  $z_2$  e  $z_3$  correspondem às profundidades de três batimetrias referentes aos instantes  $t_1$ ,  $t_2$  e  $t_3$ , também neste caso relativos aos três últimos instantes de saída de resultados, os quais apresentam entre si intervalos temporais de um ano.

As batimetrias obtidas desta forma, designadas por batimetrias extrapoladas, foram construídas de modo a poderem ser lidas pelo MOHID. Assim, a batimetria extrapolada é introduzida no modelo e utilizada como batimetria inicial de uma nova simulação. Fazendo variar o tempo de duração das simulações, bem como o instante que se pretende extrapolar, obteve-se um vasto conjunto de resultados correspondentes aos vários casos considerados. Pretendeu-se então compreender a influência da variação do número de anos considerado na extrapolação, mantendo-se para tal o número de anos de cálculo com o modelo constante. Por outro lado, também se tentou perceber se a duração das simulações contínuas exerce algum tipo de interferência nos resultados obtidos, neste caso permanecendo constante o número de anos extrapolado. Assim considerou-se:

- ✓ “Run Contínuo” – resultados provenientes de simulações de 2100 anos, e que vão ser considerados como padrão, em relação aos quais todos os outros resultados vão ser comparados.
- ✓ Simulação de 100 anos seguida por extrapolação de 50 anos (“Run100\_Interp50”)
- ✓ Simulação de 100 anos seguida por extrapolação de 100 anos (“Run100\_Interp100”)
- ✓ Simulação de 100 anos seguida por extrapolação de 200 anos (“Run100\_Interp200”)
- ✓ Simulação de 50 anos seguida por extrapolação de 100 (“Run50\_Interp100”)
- ✓ Simulação de 200 anos seguida por extrapolação de 100 (“Run200\_Interp100”)

Em cada um dos casos considerados, obtiveram-se vários perfis batimétricos correspondentes a um determinado instante no tempo. Os vários instantes analisados estão listados na Tabela 1.

Uma vez que se trata de uma considerável quantidade de resultados, definiu-se uma série de parâmetros que caracterizam cada um dos perfis a analisar, facilitando assim a comparação entre os diferentes esquemas de interpolação considerados. Assim temos:

#### **Volume de Água por Unidade de Área (VA)**

$$VA = \sum(\text{profundidade})_{ao\_longo\_do\_perfil} \quad \text{Eq. 24}$$

#### **Volume Total Erodido por Unidade de Área (VTE)**

$$VTE = \sum(\text{prof}_{batim\_calculada} - \text{prof}_{batim\_inicial})_{ao\_longo\_do\_perfil} \quad \text{Eq. 25}$$

#### **Diferença Relativa Volume Total Erodido (DRVTE)**

$$DRVTE = Abs\left(\frac{VTE_{run\_contínuo} - VTE_{extrapolação}}{VTE_{run\_contínuo}}\right) * 100 \quad \text{Eq. 26}$$

#### **Diferença Relativa Profundidade Máxima (DRPM)**

$$DRVTE = Abs\left(\frac{\text{prof}_{máxrun\_contínuo} - \text{prof}_{máxextrapolação}}{\text{prof}_{máxrun\_contínuo}}\right) * 100 \quad \text{Eq. 27}$$

#### **Erro Quadrático Médio (EQM)**

$$EQM = \sqrt{\frac{1}{n} * \sum Abs(\text{prof}_{batim\_calculada} - \text{prof}_{batim\_inicial})_{ao\_longo\_do\_perfil}} \quad \text{Eq. 28}$$

$n$  = número de células que constituem o perfil batimétrico, neste caso 49.

#### **Tempo de Cálculo Poucado (TCP)**

$$TCP = \frac{anos_{run\_extrapolação}}{anos_{run\_cont} + anos_{run\_extrapolação}} \quad \text{Eq. 29}$$

Tabela 1 - Listagem dos casos considerados no estudo de impacto do uso de interpolação e respectivos instantes de análise.

| <b>Caso considerado</b> | <b>Instante analisado (anos)</b> |
|-------------------------|----------------------------------|
| Run 100 Interp 50       | 150                              |
|                         | 300                              |
|                         | 450                              |
|                         | 600                              |
|                         | 750                              |
|                         | 900                              |
|                         | 1050                             |
|                         | 1200                             |
|                         | 1350                             |
|                         | 1500                             |
|                         | 1650                             |
|                         | 1800                             |
| Run 100 Interp 100      | 1950                             |
|                         | 2100                             |
|                         | 200                              |
|                         | 400                              |
|                         | 600                              |
|                         | 800                              |
|                         | 1000                             |
|                         | 1200                             |
|                         | 1400                             |
|                         | 1600                             |
| Run 100 Interp 200      | 1800                             |
|                         | 2000                             |
|                         | 300                              |
|                         | 600                              |
|                         | 900                              |
|                         | 1200                             |
| Run 50 Interp 100       | 1500                             |
|                         | 1800                             |
|                         | 2100                             |
|                         | 150                              |
|                         | 300                              |
|                         | 450                              |
|                         | 600                              |
|                         | 750                              |
|                         | 900                              |
|                         | 1050                             |
|                         | 1200                             |
|                         | 1350                             |
| Run 200 Interp 100      | 1500                             |
|                         | 1650                             |
|                         | 1800                             |
|                         | 1950                             |
|                         | 2100                             |
|                         | 300                              |
| 600                     |                                  |
| 900                     |                                  |
| 1200                    |                                  |
| 1500                    |                                  |
| 1800                    |                                  |
| 2100                    |                                  |



### 3.3 Resultados e discussão

A Figura 10 ilustra o modelo evolutivo obtido pelo “Run Contínuo”, modelo esse que vai ser reproduzido através dos vários esquemas de extrapolação considerados.

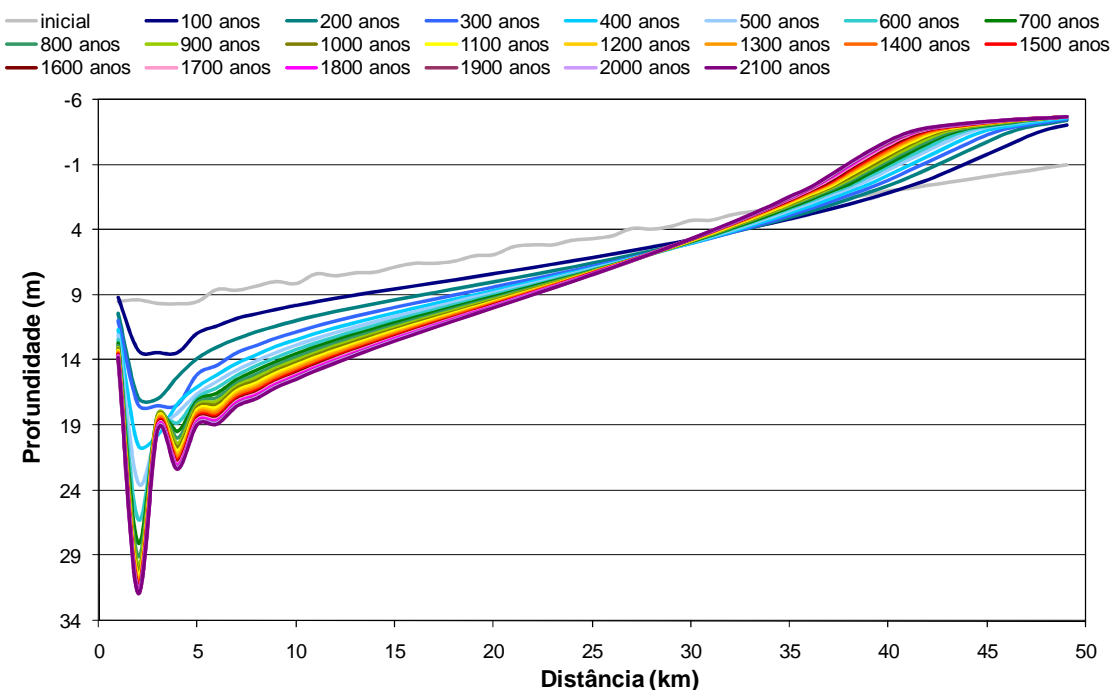


Figura 10 - Evolução batimétrica obtida pelo “run contínuo”, partindo de um perfil inicial linear ao qual foi adicionado uma perturbação de +/- 5% da elevação.

Começou-se por analisar os resultados da aproximação da tendência evolutiva dos perfis obtidos pelo MOHID a um polinómio de 1ª ordem, seguindo-se uma abordagem semelhante para as extrapolações de 2ª ordem.

#### EXTRAPOLAÇÕES DE 1ª ORDEM

Da Figura 11 à Figura 15 está representada a evolução dos perfis para cada um dos casos considerados, bem como a sua comparação com o modelo batimétrico de 2100 anos do “Run Contínuo”.

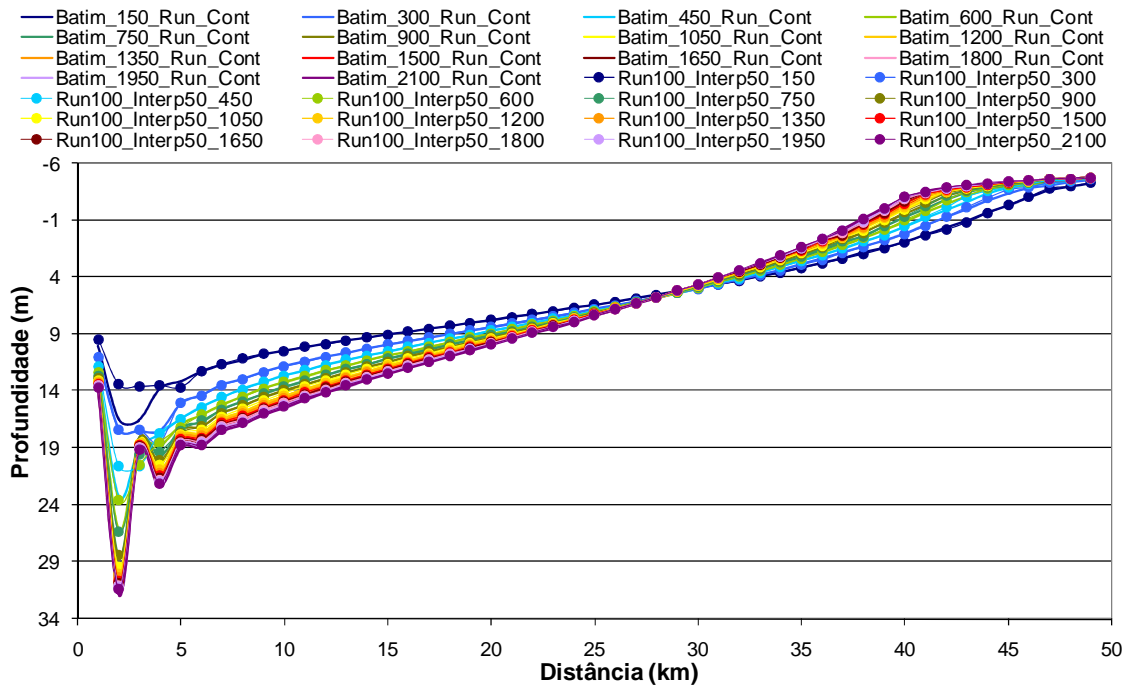


Figura 11 - Evolução batimétrica obtida com runs de 100 anos seguidos de extrapolação de 50 anos e respectiva comparação com os perfis obtidos pelo “Run Contínuo”.

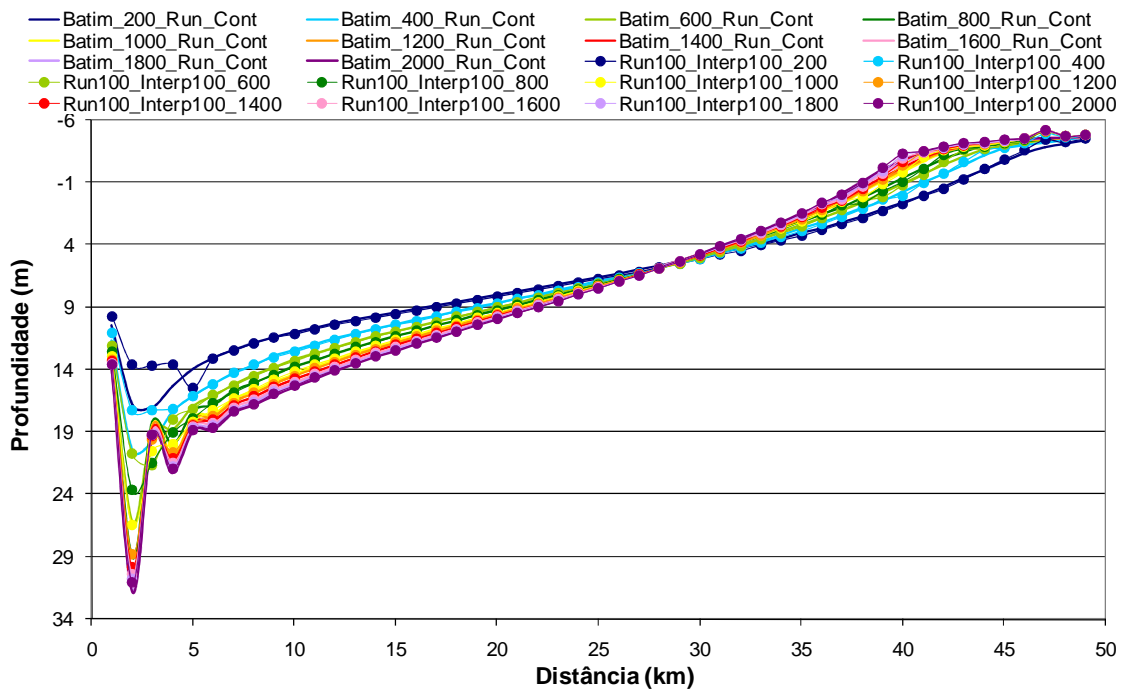


Figura 12 - Evolução batimétrica obtida com runs de 100 anos seguidos de extrapolação de 100 anos e respectiva comparação com os perfis obtidos pelo “Run Contínuo”.

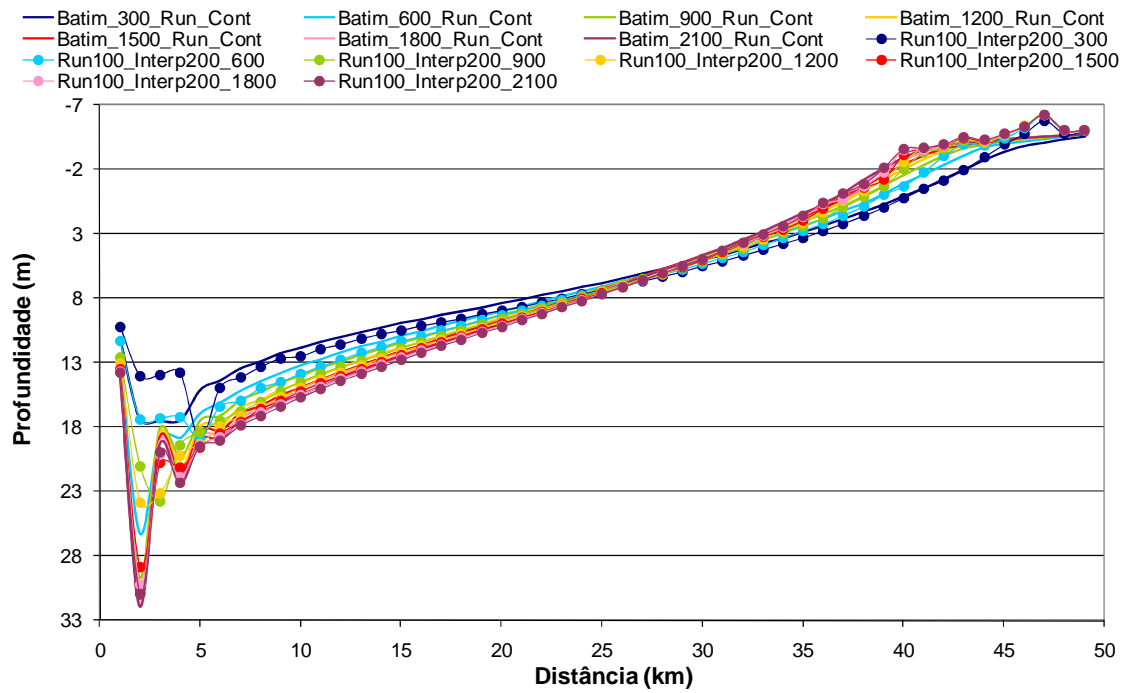


Figura 13 - Evolução batimétrica obtida com runs de 100 anos seguidos de extrapolação de 200 anos e respectiva comparação com os perfis obtidos pelo “Run Contínuo”.

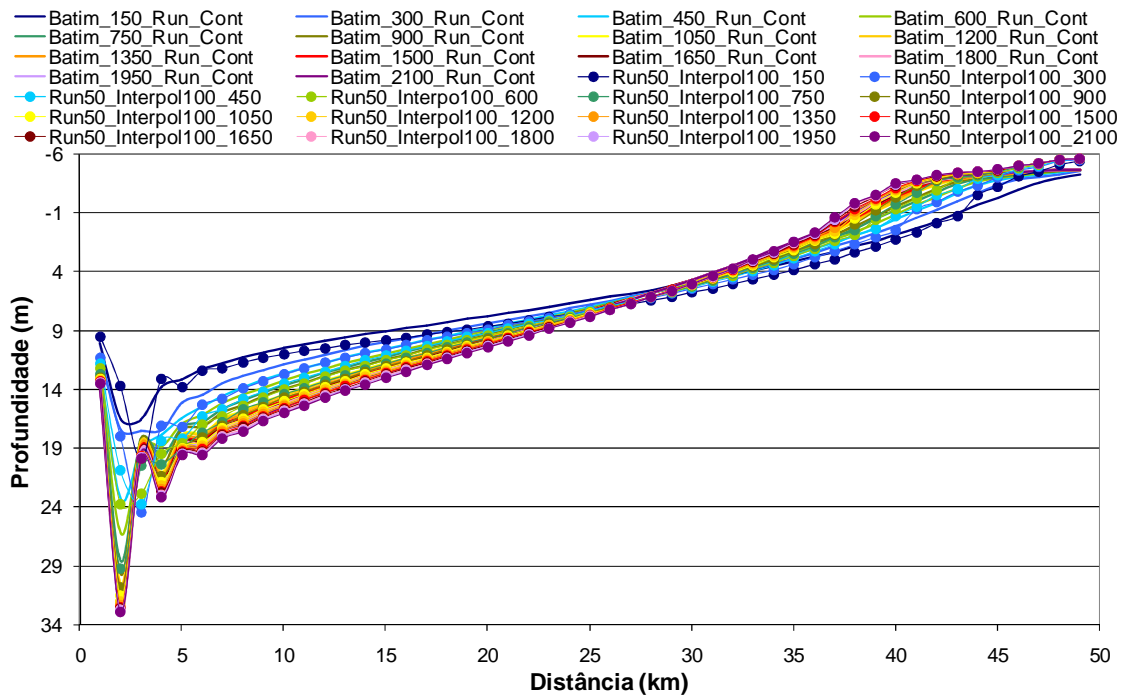


Figura 14 - Evolução batimétrica obtida com runs de 50 anos seguidos de extrapolação de 100 anos e respectiva comparação com os perfis obtidos pelo “Run Contínuo”.

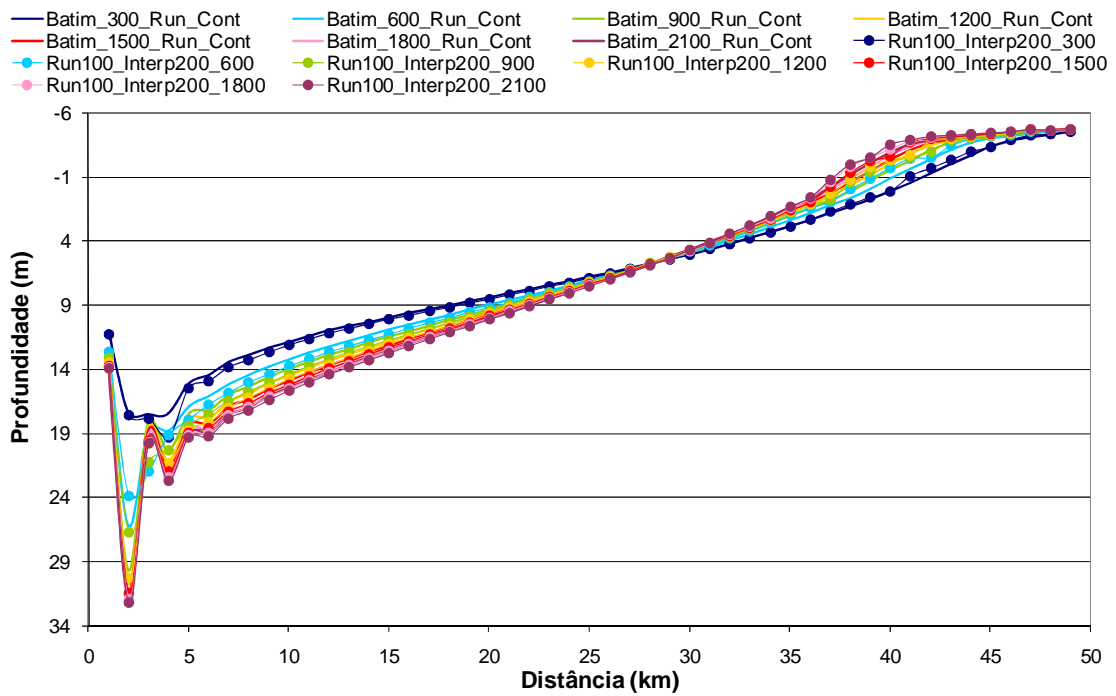


Figura 15 - Evolução batimétrica obtida com runs de 200 anos seguidos de extrapolação de 100 anos e respectiva comparação com os perfis obtidos pelo “Run Contínuo”.

Como se pode constatar, apenas uma análise visual destes gráficos torna-se significativamente confusa. Por esta razão, e de forma a facilitar a análise dos vários resultados obtidos e a sua comparação, utilizaram-se os parâmetros definidos anteriormente para esse efeito. Os resultados obtidos estão indicados na Tabela 2, sendo representados graficamente da Figura 16 à Figura 20.

Tabela 2 - Listagem dos resultados dos diferentes parâmetros, para cada um dos grupos de dados considerados

| Caso considerado   | Instante considerado (anos) | Volume de água (x10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> ) | Volume Total Erodido (x10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> ) | Dif. relativa profundidade máx (%) | Dif. relativa volume erodido (%) | Erro quadrático médio (m) | Tempo de cálculo poupado |
|--------------------|-----------------------------|---|---|------------------------------------|----------------------------------|---------------------------|--------------------------|
| Run Contínuo       | 150                         | 286.59  | 64.68   | -                                  | -                                | -                         |                          |
|                    | 200                         | 294.66  | 72.75   | -                                  | -                                | -                         |                          |
|                    | 300                         | 305.80  | 83.89   | -                                  | -                                | -                         |                          |
|                    | 400                         | 316.31  | 94.40   | -                                  | -                                | -                         |                          |
|                    | 450                         | 320.76  | 98.85   | -                                  | -                                | -                         |                          |
|                    | 600                         | 328.40  | 106.49  | -                                  | -                                | -                         |                          |
|                    | 750                         | 334.11  | 112.20  | -                                  | -                                | -                         |                          |
|                    | 800                         | 335.60  | 113.69  | -                                  | -                                | -                         |                          |
|                    | 900                         | 338.16  | 116.25  | -                                  | -                                | -                         |                          |
|                    | 1000                        | 342.35  | 120.44  | -                                  | -                                | -                         |                          |
|                    | 1050                        | 343.22  | 121.31  | -                                  | -                                | -                         |                          |
|                    | 1200                        | 344.08  | 122.16  | -                                  | -                                | -                         |                          |
|                    | 1350                        | 346.45  | 124.54  | -                                  | -                                | -                         |                          |
|                    | 1401                        | 347.22  | 125.31  | -                                  | -                                | -                         |                          |
|                    | 1500                        | 348.58  | 126.67  | -                                  | -                                | -                         |                          |
|                    | 1600                        | 349.90  | 127.99  | -                                  | -                                | -                         |                          |
|                    | 1650                        | 350.48  | 128.57  | -                                  | -                                | -                         |                          |
|                    | 1800                        | 352.21  | 130.30  | -                                  | -                                | -                         |                          |
|                    | 1950                        | 353.80  | 131.89  | -                                  | -                                | -                         |                          |
|                    | 2001                        | 354.31  | 132.40  | -                                  | -                                | -                         |                          |
| 2100               | 355.30                      | 133.39  | -   | -                                  | -                                |                           |                          |
| Run 100 Interp 50  | 150                         | 281.02  | 59.11   | 17.26                              | 8.62                             | 0.44                      |                          |
|                    | 300                         | 306.18  | 84.27   | 5.79                               | 0.45                             | 0.28                      |                          |
|                    | 450                         | 317.98  | 96.07   | 11.43                              | 2.81                             | 0.38                      |                          |
|                    | 600                         | 325.25  | 103.34  | 10.21                              | 2.96                             | 0.40                      |                          |
|                    | 750                         | 330.66  | 108.74  | 7.97                               | 3.08                             | 0.38                      |                          |
|                    | 900                         | 334.89  | 112.98  | 4.26                               | 2.82                             | 0.33                      |                          |
|                    | 1050                        | 338.00  | 116.09  | 3.87                               | 4.30                             | 0.37                      | 1/3                      |
|                    | 1200                        | 340.57  | 118.66  | 2.34                               | 2.87                             | 0.29                      |                          |
|                    | 1350                        | 342.81  | 120.90  | 2.04                               | 2.93                             | 0.28                      |                          |
|                    | 1500                        | 344.80  | 122.89  | 1.88                               | 2.98                             | 0.29                      |                          |
|                    | 1650                        | 346.60  | 124.69  | 1.80                               | 3.02                             | 0.30                      |                          |
|                    | 1800                        | 348.23  | 126.32  | 1.77                               | 3.05                             | 0.30                      |                          |
| 1950               | 349.74                      | 127.83  | 1.75  | 3.08                               | 0.31                             |                           |                          |
| 2100               | 351.17                      | 129.26  | 1.74  | 3.10                               | 0.31                             |                           |                          |
| Run 100 Interp 100 | 200                         | 291.37  | 69.46   | 8.94                               | 4.52                             | 0.59                      |                          |
|                    | 400                         | 310.91  | 89.00   | 15.81                              | 5.72                             | 0.50                      |                          |
|                    | 600                         | 325.08  | 103.17  | 17.44                              | 3.12                             | 0.54                      |                          |
|                    | 800                         | 332.83  | 110.92  | 18.59                              | 2.44                             | 0.54                      |                          |
|                    | 1000                        | 338.13  | 116.22  | 13.20                              | 3.50                             | 0.53                      | 1/2                      |
|                    | 1200                        | 342.25  | 120.34  | 6.22                               | 1.49                             | 0.42                      |                          |
|                    | 1400                        | 345.17  | 123.26  | 4.18                               | 1.64                             | 0.37                      |                          |
|                    | 1600                        | 347.55  | 125.64  | 3.26                               | 1.84                             | 0.35                      |                          |
|                    | 1800                        | 349.63  | 127.72  | 2.80                               | 1.98                             | 0.32                      |                          |
| 2000               | 351.49                      | 129.58  | 2.58  | 2.13                               | 0.33                             |                           |                          |
| Run 100 Interp 200 | 300                         | 312.08  | 90.17   | 8.34                               | 7.49                             | 0.88                      |                          |
|                    | 600                         | 326.21  | 104.30  | 28.06                              | 2.06                             | 0.85                      |                          |
|                    | 900                         | 340.29  | 118.38  | 19.87                              | 1.83                             | 0.85                      |                          |
|                    | 1200                        | 346.44  | 124.53  | 22.18                              | 1.94                             | 0.80                      | 2/3                      |
|                    | 1500                        | 352.47  | 130.56  | 7.63                               | 3.07                             | 0.67                      |                          |
|                    | 1800                        | 355.62  | 133.71  | 4.35                               | 2.62                             | 0.60                      |                          |
|                    | 2100                        | 358.05  | 136.14  | 2.93                               | 2.06                             | 0.56                      |                          |
| Run 50 Interp 100  | 150                         | 306.10  | 84.19   | 20.69                              | 30.15                            | 0.90                      |                          |
|                    | 300                         | 328.14  | 106.22  | 39.54                              | 26.63                            | 0.87                      |                          |
|                    | 450                         | 335.78  | 113.87  | 1.84                               | 15.19                            | 0.81                      |                          |
|                    | 600                         | 341.69  | 119.78  | 9.33                               | 12.48                            | 0.81                      |                          |
|                    | 750                         | 347.89  | 125.98  | 2.06                               | 12.29                            | 0.76                      |                          |
|                    | 900                         | 350.86  | 128.95  | 3.65                               | 10.92                            | 0.77                      |                          |
|                    | 1050                        | 353.05  | 131.14  | 3.10                               | 8.10                             | 0.71                      | 2/3                      |
|                    | 1200                        | 354.86  | 132.95  | 4.11                               | 8.83                             | 0.74                      |                          |
|                    | 1350                        | 356.47  | 134.56  | 4.06                               | 8.05                             | 0.74                      |                          |
|                    | 1500                        | 357.94  | 136.03  | 3.95                               | 7.40                             | 0.73                      |                          |
|                    | 1650                        | 359.30  | 137.39  | 3.70                               | 6.86                             | 0.71                      |                          |
|                    | 1800                        | 360.57  | 138.66  | 3.44                               | 6.42                             | 0.70                      |                          |
|                    | 1950                        | 361.78  | 139.87  | 3.24                               | 6.05                             | 0.68                      |                          |
| 2100               | 362.94                      | 141.03  | 3.06  | 5.73                               | 0.67                             |                           |                          |
| Run 200 Interp 100 | 300                         | 311.19  | 89.28   | 10.15                              | 6.43                             | 0.45                      |                          |
|                    | 600                         | 331.92  | 110.01  | 8.93                               | 3.30                             | 0.64                      |                          |
|                    | 900                         | 340.40  | 118.49  | 9.93                               | 1.93                             | 0.58                      | 1/3                      |
|                    | 1200                        | 347.27  | 125.36  | 1.32                               | 2.61                             | 0.45                      |                          |
|                    | 1500                        | 351.41  | 129.50  | 0.52                               | 2.24                             | 0.46                      |                          |
|                    | 1800                        | 255.52  | 132.61  | 0.86                               | 1.78                             | 0.46                      |                          |
| 2100               | 258.18                      | 135.27  | 0.84  | 1.41                               | 0.44                             |                           |                          |

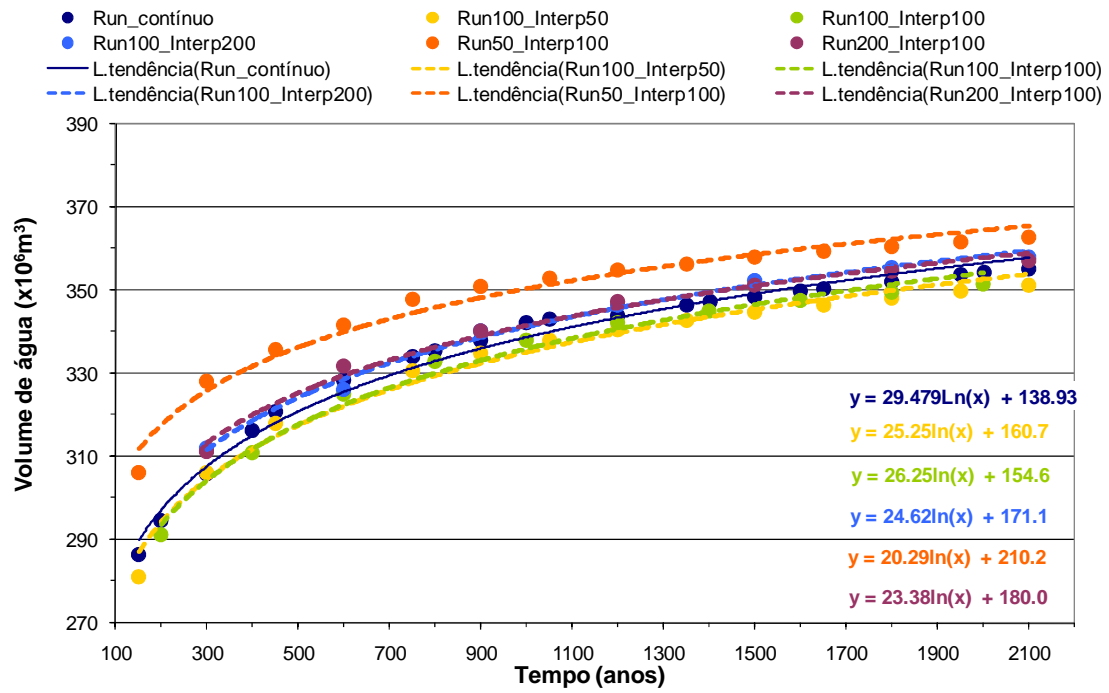


Figura 16 - Variação ao longo do tempo do parâmetro “Volume de água” obtido para cada um dos casos considerados e respectiva linha de tendência.

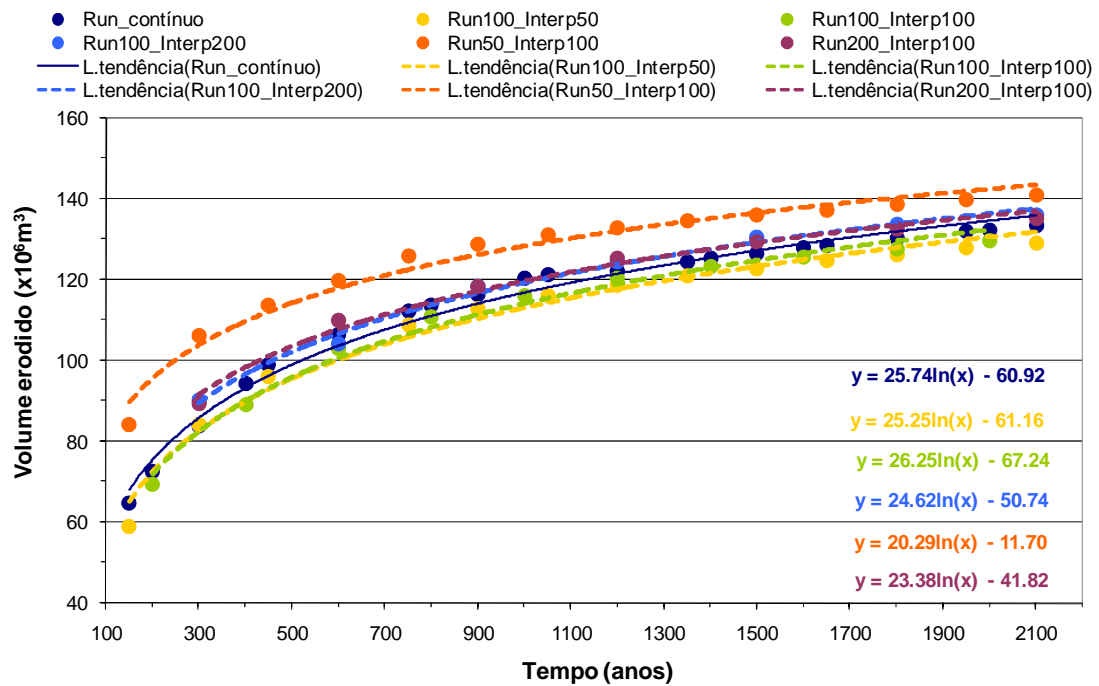


Figura 17 - Variação ao longo do tempo do parâmetro “Volume erodido” obtido para cada um dos casos considerados e respectiva linha de tendência.

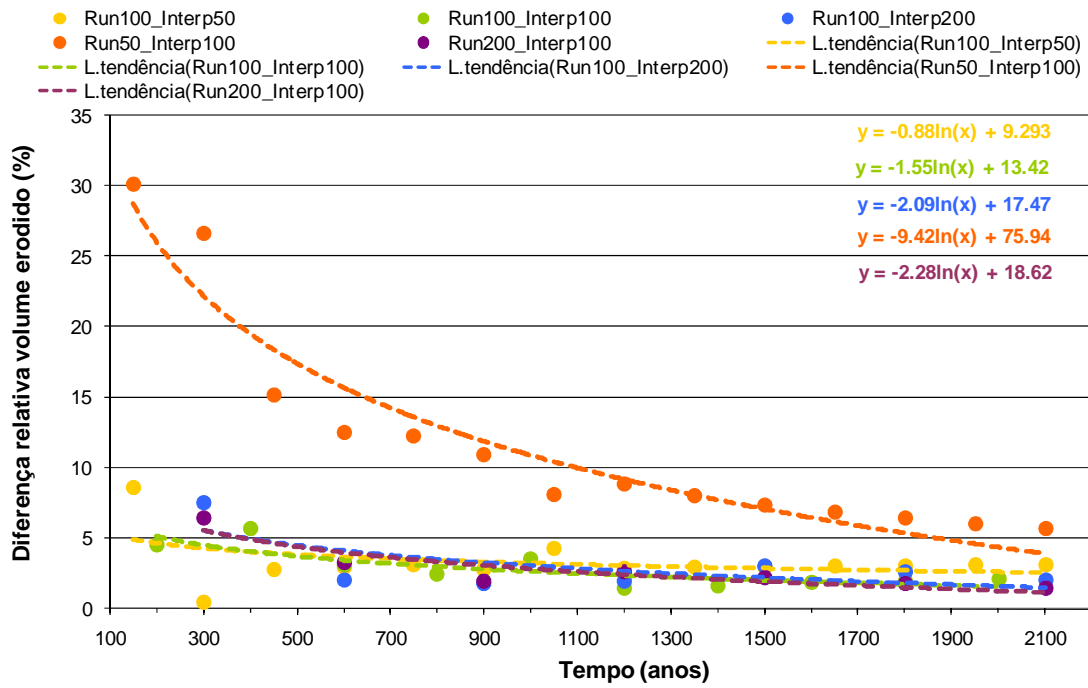


Figura 18 - Variação ao longo do tempo do parâmetro “Diferença relativa do volume erodido” obtido para cada um dos casos considerados e respectiva linha de tendência.

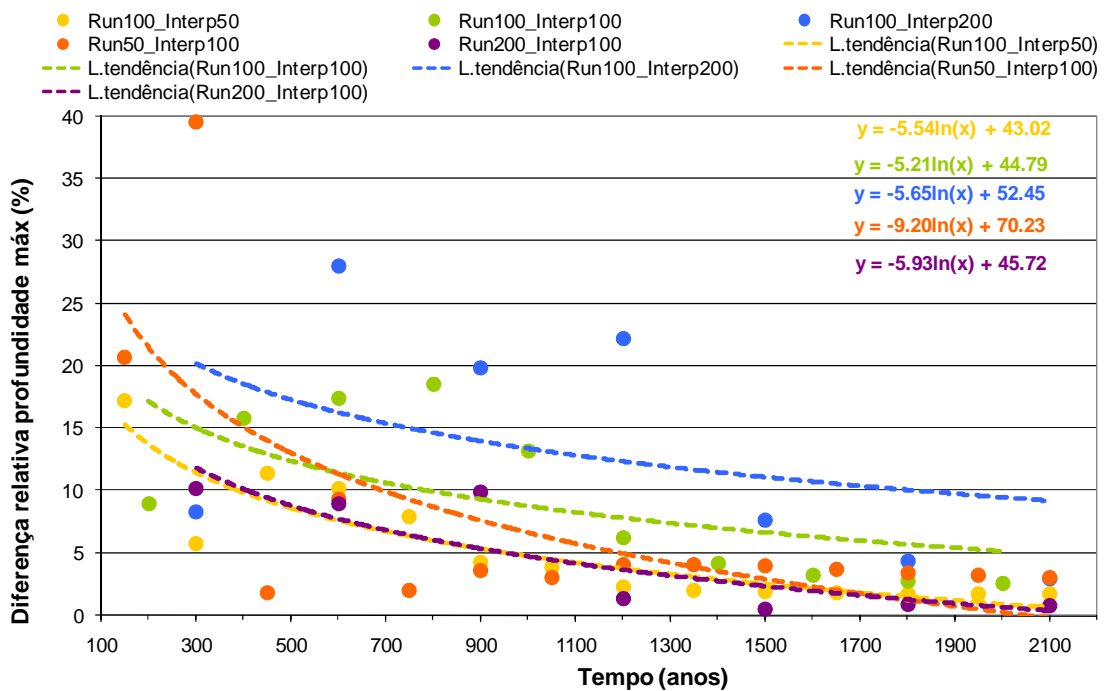


Figura 19 - Variação ao longo do tempo do parâmetro “Diferença relativa da profundidade máxima” obtido para cada um dos casos considerados e respectiva linha de tendência.

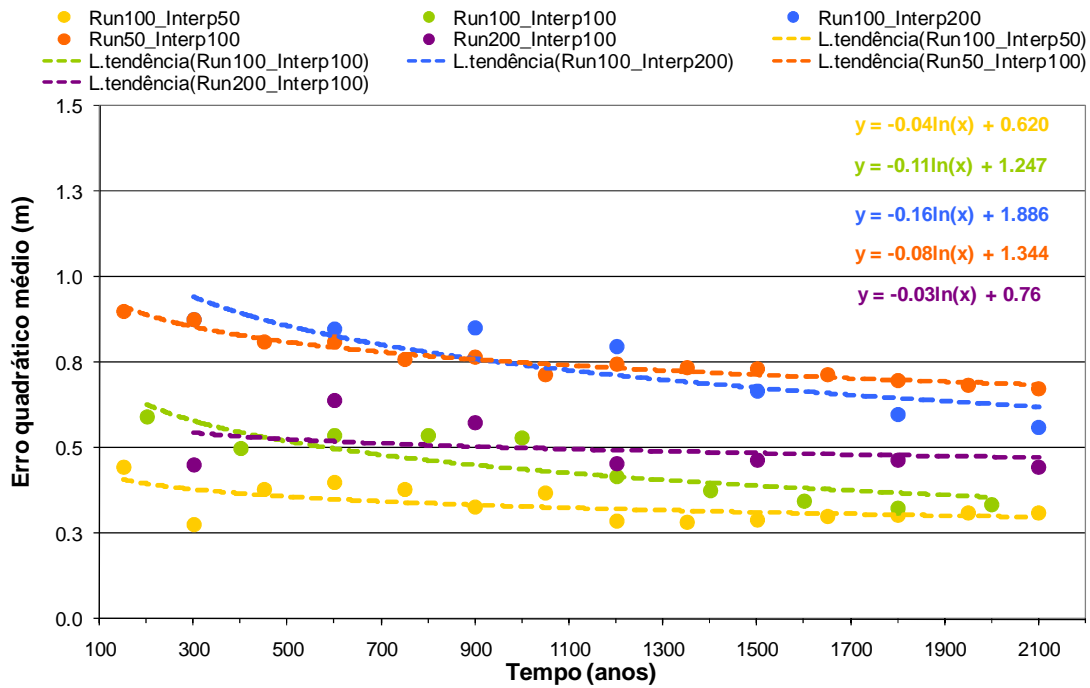


Figura 20 - Variação ao longo do tempo do parâmetro “Erro quadrático médio” obtido para cada um dos casos considerados e respectiva linha de tendência.

Na Figura 16 apresenta-se a variação do volume médio de água ao longo do tempo, determinado para cada perfil batimétrico obtido nos vários casos de estudo considerados. Observa-se o aumento desse volume ao longo do tempo, com uma tendência para a estabilização nos últimos anos de simulação. Os resultados obtidos pelo “Run50\_Interp100” são os que mais se afastam dos valores obtidos pelo “Run Contínuo”, para o parâmetro em causa. Os restantes casos considerados no esquema de extrapolação apresentam valores bastante próximos dos obtidos pelo modelo padrão: o “Run100\_Interp100” e o “Run100\_Interp50” com valores ligeiramente inferiores, enquanto o “Run100\_Interp200” e o “Run200\_Interp100” exibem valores mais elevados.

A representação gráfica do volume erodido ao longo da evolução dos perfis batimétricos está patente na Figura 17. O comportamento deste parâmetro para os vários casos de



estudo é semelhante ao observado para o parâmetro anterior (Figura 16). Assim, no que diz respeito ao volume erodido e sempre relativamente aos resultados obtidos pelo “Run Contínuo”, o “Run100\_Interp200” e o “Run200\_Interp100” apresentam valores ligeiramente superiores, enquanto o “Run100\_Interp100” e o “Run100\_Interp50” valores um pouco mais baixos. Nitidamente afastados do modelo padrão, encontram-se os resultados do “Run50\_Interp100”.

Os resultados obtidos para o parâmetro “diferença relativa do volume erodido” (Figura 18) mostram um claro afastamento entre o “Run50\_Interp100” e os restantes casos considerados. Estes apresentam um comportamento semelhante, seguindo uma tendência de diminuição deste parâmetro ao longo do tempo, ou seja, aproximando-se dos valores obtidos pelo “Run Contínuo”.

A Figura 19 apresenta a diferença relativa da profundidade máxima ao longo do tempo. Este parâmetro mostrou-se pouco útil na sua função de auxiliar à análise e escolha do melhor esquema de extrapolação. Tal prende-se com o facto de os valores obtidos apresentarem-se bastante dispersos, principalmente nos primeiros anos de simulação. Isto é facilmente explicado por este parâmetro ter uma natureza pontual, enquanto os outros são parâmetros integrais para todo o estuário. Contudo, a partir dos 1500 anos pode observar-se uma certa tendência de diminuição e aproximação dos valores ao longo do tempo.

Os resultados obtidos para o erro quadrático médio estão representados na Figura 20. A partir da observação dos vários casos considerados, identifica-se uma tendência de diminuição deste parâmetro ao longo do tempo, com o “Run100\_Interp50” a apresentar os valores mais baixos, ou seja, o esquema com os resultados mais próximos dos dados do “Run Contínuo”. Pelo contrário, o “Run50\_Interp100” apresenta valores de erro

quadrático mais elevados, afastando-se mais do comportamento do modelo evolutivo utilizado como padrão.

Relativamente ao tempo de cálculo poupado, como se pode ver na Tabela 2, os casos onde há uma maior economia (2/3) correspondem ao “Run100\_Interp200” e ao “Run50\_Interp100”. O “Run200\_Interp100” e o “Run100\_Interp50” constituem os que apresentam uma menor poupança, apenas 1/3 do tempo total gasto nas simulações com o “Run Contínuo”.

#### ❖ EXTRAPOLAÇÕES DE 2ª ORDEM

No que diz respeito aos resultados das extrapolações de 2ª ordem, não se observa qualquer relação entre a evolução batimétrica obtida pelo “Run Contínuo” e os vários casos considerados. A Figura 21 ilustra esta situação, mostrando como exemplo os resultados obtidos pelo “Run100\_Interp50”. Como se pode observar, os vários perfis obtidos através de extrapolação não apresentam qualquer tendência evolutiva. Tal indica que a evolução batimétrica calculada pelo MOHID não se ajusta a um polinómio de 2ª ordem.

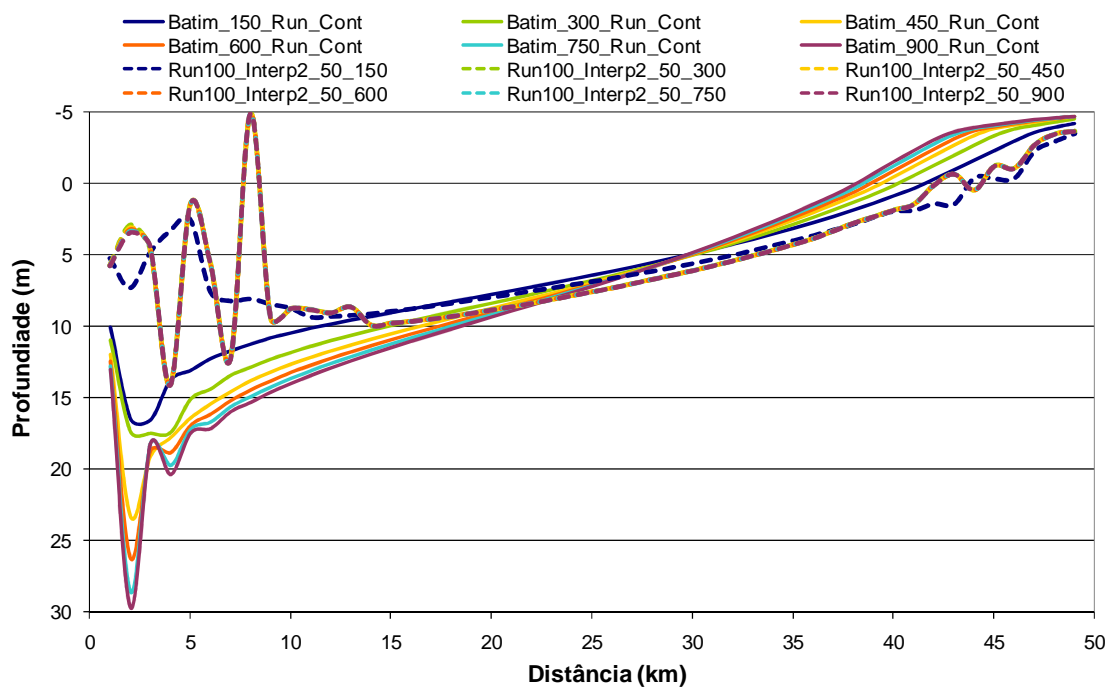


Figura 21 - Evolução batimétrica obtida com simulações de 100 anos seguidas de 50 anos de extrapolação de 2ª ordem, e respectiva comparação com os perfis obtidos pelo “Run Contínuo”.

Deste modo optou-se por considerar unicamente as extrapolações de 1ª ordem para a análise dos resultados obtidos pelos vários esquemas de extrapolação analisados. Considerando os resultados obtidos pelos vários parâmetros definidos para avaliar os vários casos de estudos, podemos eleger o “Run100\_Interp200” como sendo método de extrapolação que melhor combina o factor “custo/benefício”. As simulações de 100 anos seguidas por interpolações de 200 anos permitem poupar cerca de 2/3 do tempo de cálculo, sem no entanto comprometer a qualidade do modelo evolutivo e a sua semelhança com os dados obtidos pelo modelo morfodinâmico considerado como padrão. Os parâmetros que melhor permitem constatar essa semelhança são os que estão relacionados tanto com a variação do volume de água, como com a erosão ocorrida ao longo do perfil.

## **4. Modelo evolutivo de 10 000 anos**

### **4.1 Introdução**

Um dos principais propósitos da obtenção de um modelo evolutivo da morfodinâmica de fundo a larga escala temporal, é o de criar uma ferramenta matemática que facilite a interpretação dos processos de preenchimento sedimentar em zonas costeiras e estuarinas. A acumulação de sedimentos nestas zonas e a sua conseqüente evolução, tem vindo a ocorrer após o último máximo glacial, ou seja, ao longo dos últimos 18 mil anos BP (Dias et al. 2000). No presente capítulo apresenta-se um exercício ilustrativo da aplicabilidade do modelo morfodinâmico obtido pelo sistema de modelação MOHID a este tipo de problemáticas. Neste contexto, apresenta-se a simulação da evolução morfo-sedimentar de um estuário esquemático durante um período de 10 000 anos.

### **4.2 Definição das simulações**

As simulações apresentadas neste capítulo foram definidas segundo os mesmos critérios e parâmetros utilizados no modelo morfodinâmico descrito anteriormente no capítulo 2. Considerou-se uma batimetria inicial linear acrescida de uma perturbação de aproximadamente 5%, com 50 km de comprimento, e apenas se teve em conta a influência da maré impondo uma  $M_2$  na fronteira aberta. De forma a rentabilizar o tempo empregue na modelação, utilizou-se dois dos esquemas de extrapolação testados no capítulo 3, permitindo a diminuição do esforço computacional e a obtenção de tão longa simulação em tempo útil, mantendo a consistência dos resultados. Os casos escolhidos foram o “Run100\_Interp100” e o “Run100\_Interp200”. Uma vez que cada simulação de 100 anos demora cerca de 11 horas de cálculo, para simular 10 000 anos

de evolução demorar-se-ia 45 dias de cálculos consecutivos com o “Run Contínuo”. Nos casos considerados neste estudo, o tempo empregue foi aproximadamente 22 (“Run100\_Interp100”) e 15 dias (“Run100\_Interp200”). Em seguida, comparam-se então os resultados obtidos por estas duas abordagens.

### 4.3 Resultados e Discussão

Na Figura 22 e na Figura 23, estão representados os perfis batimétricos obtidos pelos dois esquemas de extrapolação considerados. A Figura 24 ilustra a comparação da evolução morfológica obtida em ambos os casos. As maiores diferenças observadas entre os vários perfis correspondem principalmente aos primeiros anos de simulação, ou seja, antes da estabilização do modelo evolutivo.

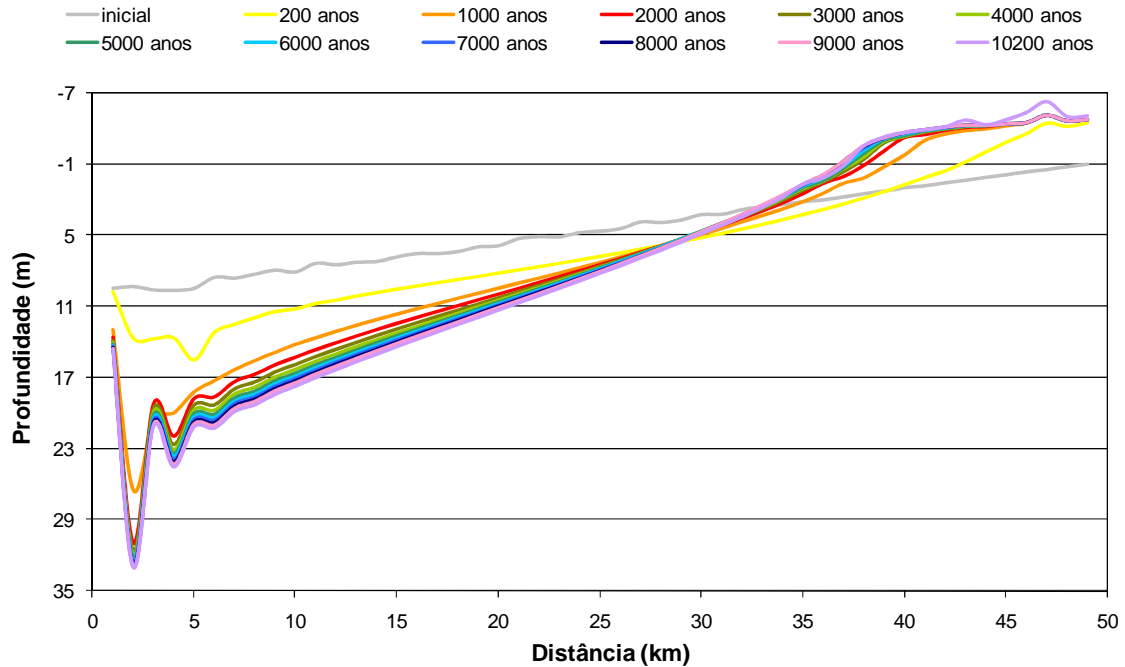


Figura 22 - Modelo da evolução batimétrica para 10 000 anos, obtida através de sucessivas simulações de 100 anos seguidas de extrapolação de 100 anos.

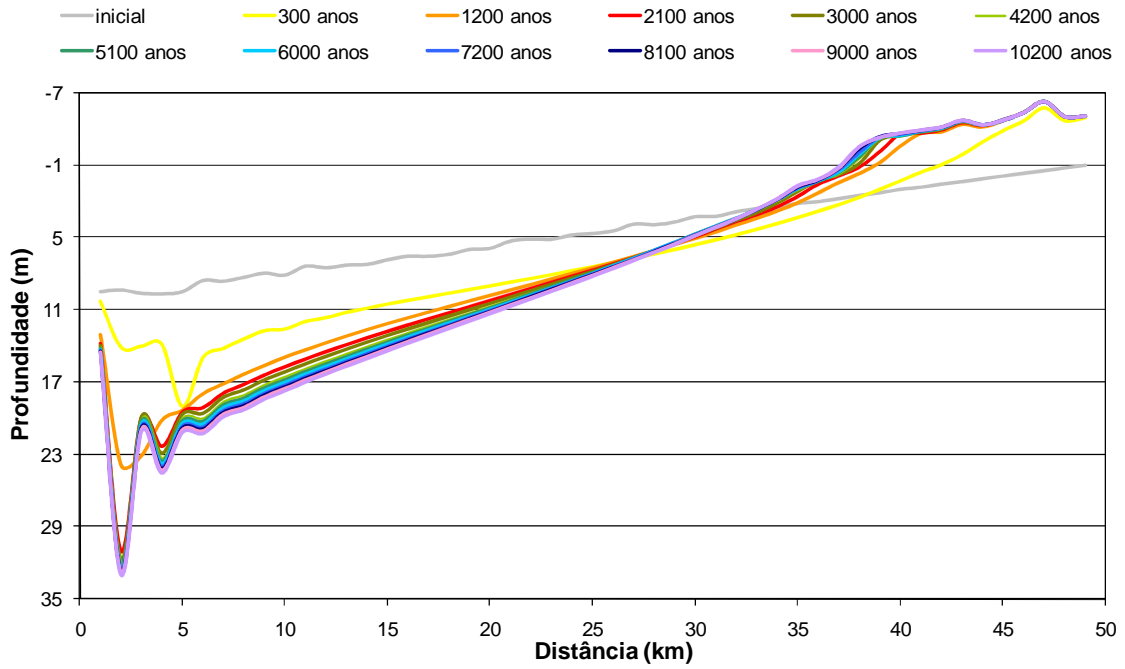


Figura 23 - Modelo da evolução batimétrica para 10 000 anos, obtida através de sucessivas simulações de 100 anos seguidas de extrapolação de 200 anos.

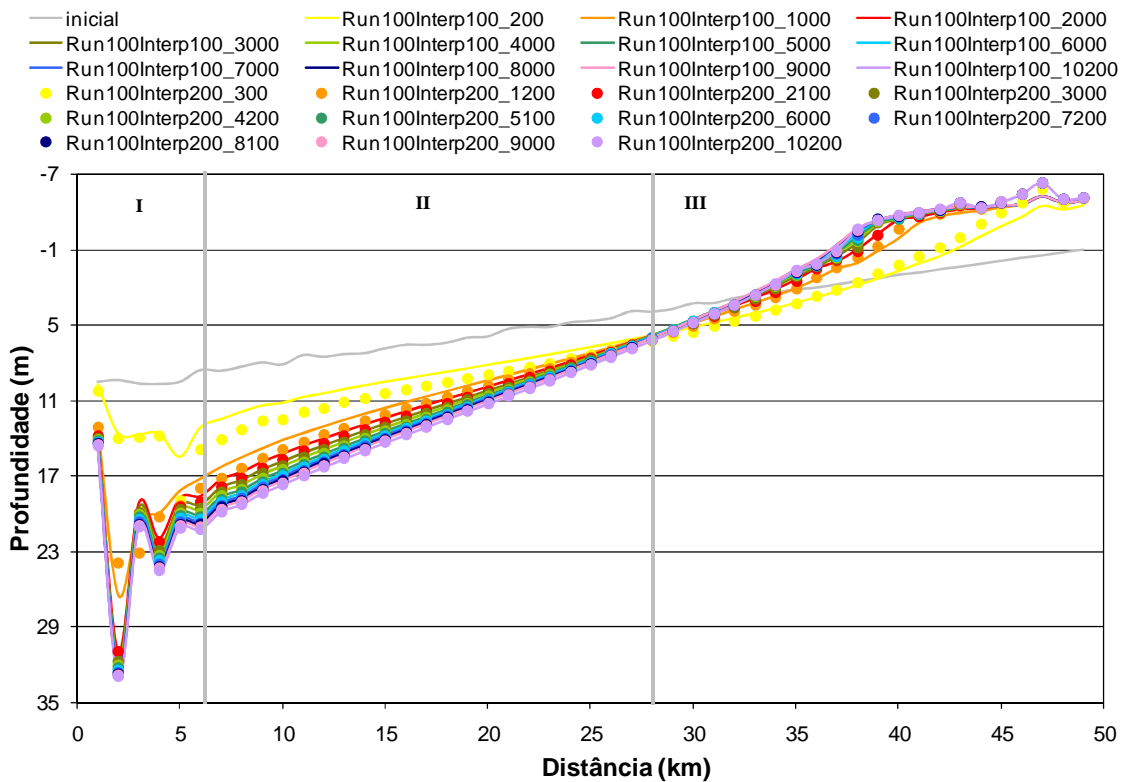


Figura 24 - Comparação dos modelos de evolução batimétrica para 10 000 anos, obtidos para os vários casos considerados. Divisão dos perfis em 3 sectores distintos.

Com o objectivo de melhor avaliar os resultados obtidos e de comparar os dois casos considerados, dividiu-se os vários perfis em três sectores (Figura 24). Esta divisão teve em conta a tendência evolutiva dos perfis, e o facto de se observar 3 comportamentos distintos. Assim temos:

✓ Sector I – Dos 0 aos 6 km, representa a zona imediatamente junto à fronteira aberta, onde é imposta a maré. No caso de um estuário, representaria a foz, local caracterizado pela presença de maiores velocidades, e onde ocorre uma forte erosão sobre o fundo arenoso.

✓ Sector II – Dos 7 aos 28 km. Zona do canal onde ocorre um aprofundamento contínuo e suave.

✓ Sector III – Dos 29 km até ao final do perfil. Zona a partir da qual ocorre uma inflexão do perfil, passando a ocorrer a acumulação de sedimentos e consequente sobre-elevação.

Em cada um destes sectores foram analisados vários parâmetros estatísticos, referentes a cada um dos perfis obtidos. Os parâmetros considerados para este efeito foram:

- Profundidade média
- Desvio padrão da profundidade
- Profundidade mínima
- Profundidade máxima

Na Tabela 3 apresenta-se a lista dos resultados obtidos para os vários parâmetros, relativamente a cada instante considerado nos dois modelos evolutivos, “Run100\_Interp100” e “Run100\_Interp200”.

Tabela 3 - valores dos diferentes parâmetros utilizados na comparação dos dois esquemas de extrapolação considerados.

| Run100_Interp100 |     | 200   | 1000  | 2000  | 3000  | 4000  | 5000  | 6000  | 7000  | 8000  | 9000  | 10200 |
|------------------|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Média            | I   | 13.21 | 19.21 | 20.54 | 21.04 | 21.39 | 21.68 | 21.92 | 22.13 | 22.30 | 22.46 | 22.62 |
|                  | II  | 8.90  | 10.67 | 11.32 | 11.68 | 11.92 | 12.12 | 12.29 | 12.45 | 12.57 | 12.68 | 12.79 |
|                  | III | 0.77  | -0.57 | -0.99 | -1.15 | -1.22 | -1.27 | -1.32 | -1.36 | -1.39 | -1.41 | -1.43 |
| Desvio Padrão    | I   | 1.89  | 4.45  | 5.79  | 5.90  | 5.95  | 5.98  | 6.00  | 6.02  | 6.05  | 6.07  | 6.10  |
|                  | II  | 1.93  | 3.08  | 3.44  | 3.63  | 3.77  | 3.88  | 3.95  | 4.01  | 4.06  | 4.11  | 4.17  |
|                  | III | 3.39  | 3.69  | 3.65  | 3.63  | 3.59  | 3.59  | 3.60  | 3.62  | 3.61  | 3.59  | 3.58  |
| Mínimo           | I   | 9.71  | 12.92 | 13.60 | 13.85 | 14.02 | 14.16 | 14.28 | 14.38 | 14.46 | 14.54 | 14.62 |
|                  | II  | 5.81  | 5.87  | 5.88  | 5.90  | 5.88  | 5.89  | 5.95  | 6.03  | 6.06  | 6.06  | 6.05  |
|                  | III | -4.52 | -5.16 | -5.16 | -5.16 | -5.16 | -5.16 | -5.16 | -5.16 | -5.16 | -5.16 | -5.16 |
| Máximo           | I   | 15.47 | 26.45 | 31.00 | 31.61 | 31.97 | 32.25 | 32.48 | 32.66 | 32.84 | 33.01 | 33.19 |
|                  | II  | 12.47 | 16.30 | 17.35 | 17.92 | 18.35 | 18.69 | 18.97 | 19.21 | 19.41 | 19.58 | 19.77 |
|                  | III | 5.49  | 5.39  | 5.33  | 5.31  | 5.26  | 5.25  | 5.31  | 5.38  | 5.39  | 5.37  | 5.35  |
| Run100_Interp200 |     | 300   | 1200  | 2100  | 3000  | 4200  | 5100  | 6000  | 7200  | 8100  | 9000  | 10200 |
| Média            | I   | 14.32 | 19.61 | 20.92 | 21.29 | 21.60 | 21.80 | 21.98 | 22.19 | 22.33 | 22.45 | 22.61 |
|                  | II  | 9.84  | 11.18 | 11.64 | 11.92 | 12.18 | 12.33 | 12.46 | 12.62 | 12.72 | 12.81 | 12.92 |
|                  | III | 0.46  | -0.82 | -1.12 | -1.26 | -1.34 | -1.37 | -1.39 | -1.42 | -1.44 | -1.45 | -1.46 |
| Desvio Padrão    | I   | 2.80  | 3.91  | 5.66  | 5.87  | 5.94  | 5.96  | 5.98  | 6.00  | 6.01  | 6.01  | 6.02  |
|                  | II  | 2.25  | 3.29  | 3.53  | 3.66  | 3.80  | 3.89  | 3.96  | 4.03  | 4.07  | 4.10  | 4.15  |
|                  | III | 3.89  | 3.99  | 3.91  | 3.87  | 3.82  | 3.81  | 3.81  | 3.83  | 3.85  | 3.85  | 3.84  |
| Mínimo           | I   | 10.24 | 13.09 | 13.78 | 13.96 | 14.11 | 14.20 | 14.29 | 14.39 | 14.46 | 14.52 | 14.60 |
|                  | II  | 6.31  | 6.11  | 6.08  | 6.11  | 6.07  | 6.05  | 6.07  | 6.13  | 6.18  | 6.22  | 6.25  |
|                  | III | -5.81 | -6.27 | -6.27 | -6.27 | -6.27 | -6.27 | -6.27 | -6.27 | -6.27 | -6.27 | -6.27 |
| Máximo           | I   | 18.98 | 23.90 | 30.96 | 31.71 | 32.07 | 32.28 | 32.44 | 32.63 | 32.75 | 32.84 | 32.97 |
|                  | II  | 14.14 | 17.17 | 17.89 | 18.25 | 18.63 | 18.89 | 19.10 | 19.35 | 19.52 | 19.68 | 19.86 |
|                  | III | 5.93  | 5.60  | 5.52  | 5.51  | 5.42  | 5.39  | 5.41  | 5.46  | 5.52  | 5.55  | 5.57  |

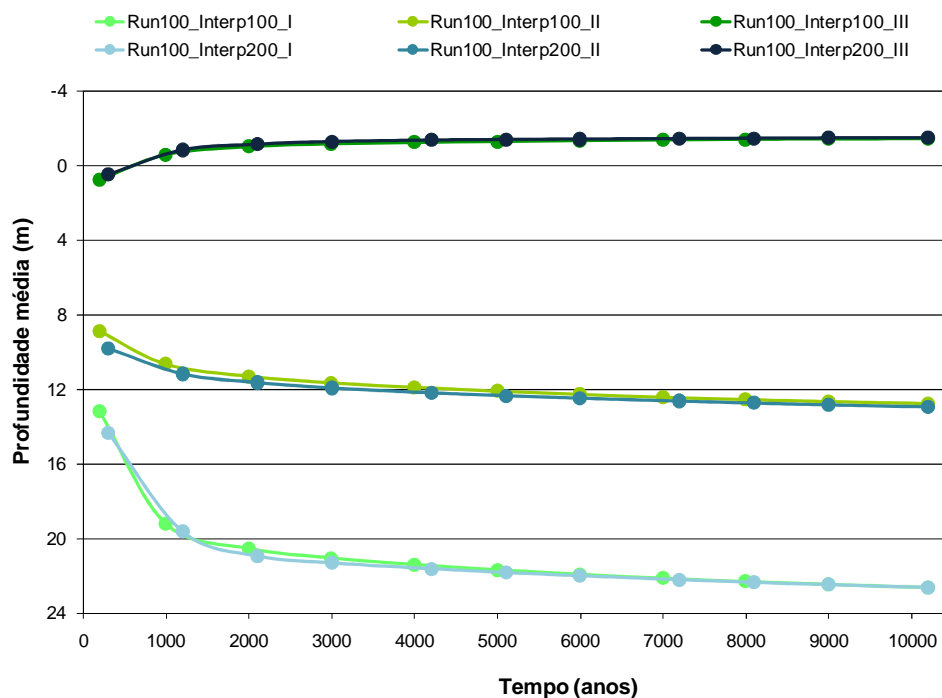


Figura 25 - Profundidade média de cada sector dos perfis batimétricos para os esquemas de extrapolação considerados, “Run100\_Interp100” a verde e “Run100\_Interp200” a azul.



A Figura 25 mostra a representação gráfica da variação das profundidades médias ao longo do tempo. Como se pode observar, os resultados obtidos para os dois casos considerados seguem a mesma tendência em qualquer um dos sectores analisados. Tanto no Sector I como no Sector II, observam-se as maiores diferenças entre as duas abordagens durante os primeiros anos de simulação. A partir dos 3000 anos essas diferenças dissipam-se e os dois modelos morfodinâmicos passam a ter uma evolução semelhante, o que acontece durante todo o tempo de simulação para o Sector III.

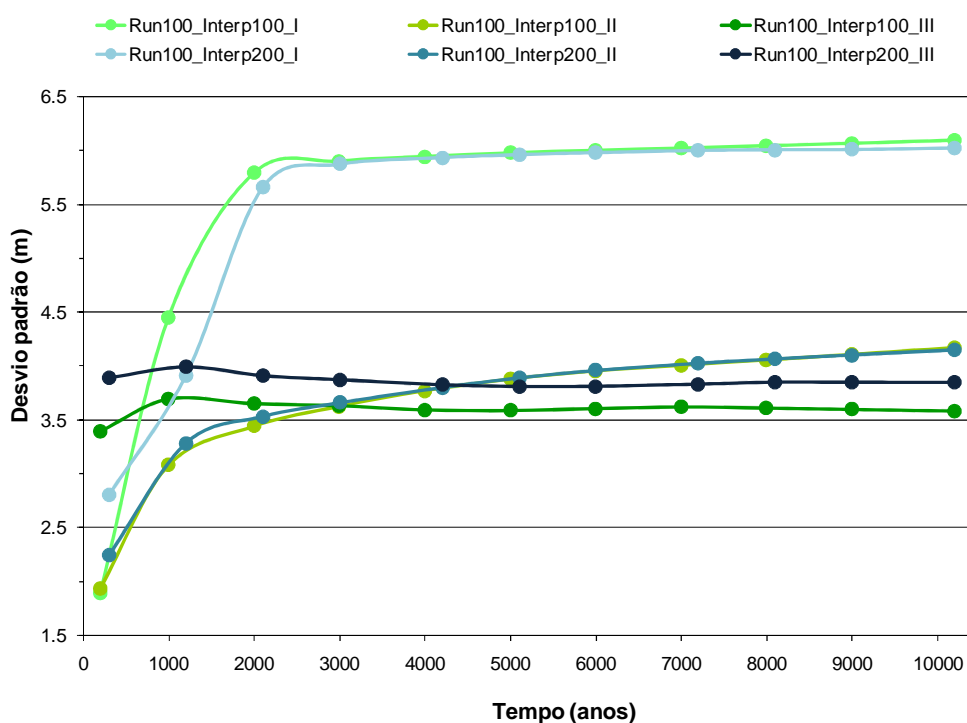


Figura 26 - Desvio padrão das profundidades de cada sector dos perfis batimétricos para os esquemas de extrapolação considerados, “Run100\_Interp100” a verde e “Run100\_Interp200” a azul.

Os resultados do desvio padrão estão patentes na Figura 26. À semelhança do que acontece para a profundidade média, as diferenças entre abordagens apenas se fazem sentir nos primeiros anos de simulação, sendo isto válido para os primeiros dois sectores dos perfis. Para o Sector III, os resultados obtidos pelo “Run100\_Interp100” e “Run100\_Interp200” apresentam uma mesma tendência evolutiva, paralela entre si.

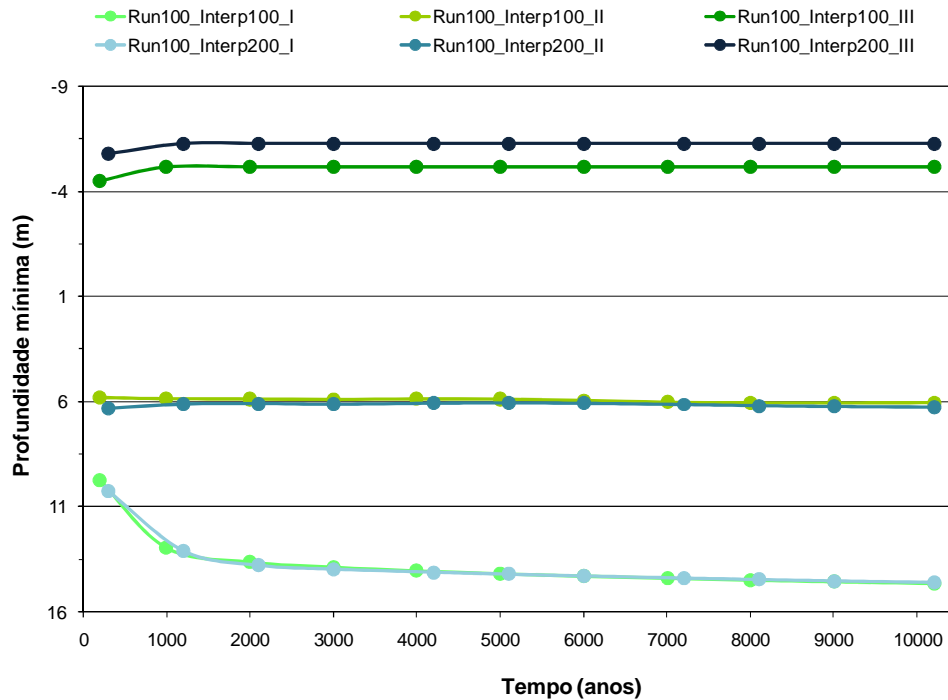


Figura 27 - Profundidade mínima de cada sector dos perfis batimétricos para os esquemas de extrapolação considerados, “Run100\_Interp100” a verde e “Run100\_Interp200” a azul.

Relativamente aos resultados para a profundidade mínima (Figura 27), verifica-se que os dois modelos evolutivos se comportam de modo praticamente igual durante o primeiro e segundo sector dos perfis, com ligeiras diferenças durante os primeiros 1000 anos. No terceiro sector, que diz respeito à zona dos perfis onde ocorre a deposição sedimentar, podemos observar que os resultados obtidos pelo “Run100\_Interp200” são acrescidos de um valor constante, quando comparados com os obtidos pelo outro caso considerado.

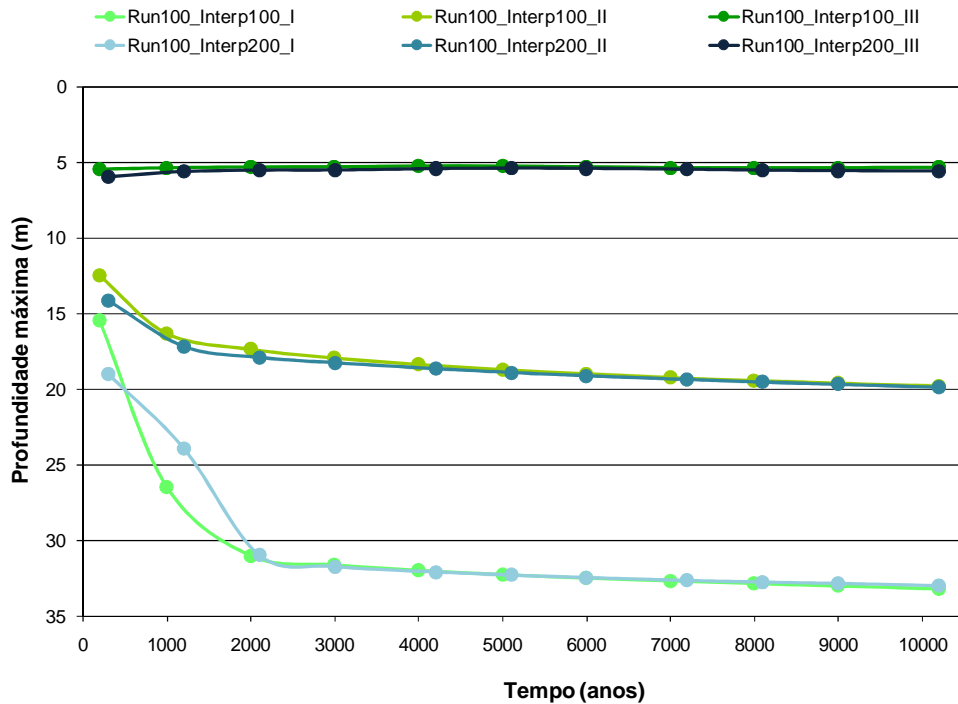


Figura 28 - Profundidade máxima de cada sector dos perfis batimétricos para os esquemas de extrapolação considerados, “Run100\_Interp100” a verde e “Run100\_Interp200” a azul.

Na Figura 28 temos a representação gráfica do valor máximo de profundidade, obtido nos vários sectores dos perfis batimétricos, ao longo duma simulação de 10000 anos. Em conformidade com os outros parâmetros estatísticos analisados, também a profundidade máxima segue o mesmo padrão de comportamento.

Deste modo, verifica-se que, para os três sectores, as duas abordagens de extrapolação consideradas apenas apresentam uma diferença significativa nos primeiros 2000 anos de simulação. Com o evoluir dos perfis ao longo do tempo, esbatem-se as desigualdades originadas pelo diferente modo de empregar o esquema interpolativo. Assim, através da análise de todos os resultados, e dado que a diferença entre estes só se faz sentir nos primeiros anos de simulação, para simulações de larga escala temporal é preferível optar pelo “Run100\_Interp200”. Este método, que considera simulações de 100 anos seguidos

de extrapolação de 200 anos, garante uma maior eficácia no que diz respeito à poupança de tempo de cálculo, e a mesma fiabilidade na qualidade dos resultados obtidos.

## **5. Aplicação de modelos morfodinâmicos em estudos de alterações climáticas.**

### **5.1 Introdução**

As zonas litorais são locais vulneráveis a cenários de alterações climáticas, principalmente no que diz respeito à subida do nível médio do mar, a qual tem um impacto directo na morfologia de estuários e sistemas costeiros. Tendo estes locais grande valor, quer do ponto de vista ecológico, como económico, é importante aprofundar o conhecimento destas zonas, tornando-o o mais interdisciplinar possível. O uso de modelos matemáticos contribui para esta finalidade, uma vez que é possível a sua utilização também como ferramenta de previsão.

Neste capítulo apresenta-se uma possível aplicação de modelos morfodinâmicos de longa escala, concretamente ao estudo da influência da subida do nível médio do mar. Deste modo comparou-se simulações que apenas têm a maré como principal condicionador, com simulações que combinam tanto a influência da maré como a subida do mar.

### **5.2 Definição das simulações**

Com o intuito de se perceber a influência da subida do nível do mar na evolução batimétrica, utilizou-se como base de comparação o modelo descrito e testado nos capítulos anteriores, partindo de um perfil inicial linear acrescido de uma perturbação de +/- 5% da elevação, com 50 km de comprimento. Como forma de economizar tempo de cálculo, foi utilizado o esquema de extrapolação formado por simulações de 100 anos

seguidos de extrapolação de 200 anos (“Run100\_Interp2002), uma vez que foi demonstrado nos capítulos 3 e 4 a consistência e fiabilidade dos resultados obtidos deste modo. Relativamente à subida do nível médio do mar, teve-se em conta os trabalhos de Church et al. (2001) e de Bindoff et al. (2007). Dos vários cenários apresentados nos relatórios do IPCC utilizou-se o A1B (Figura 29), que tem em conta um desenvolvimento alternativo das tecnologias energéticas, assumindo um equilíbrio entre o uso de combustíveis fósseis e não fósseis. Na Figura 29 está representada a variação do nível médio do mar a nível global segundo medições efectuadas ao longo do tempo, e a sua projecção para o futuro. Tendo em conta este cenário, foi considerado um valor máximo de 4.8 mm/ano e um valor mínimo de 2.2 mm/ano.

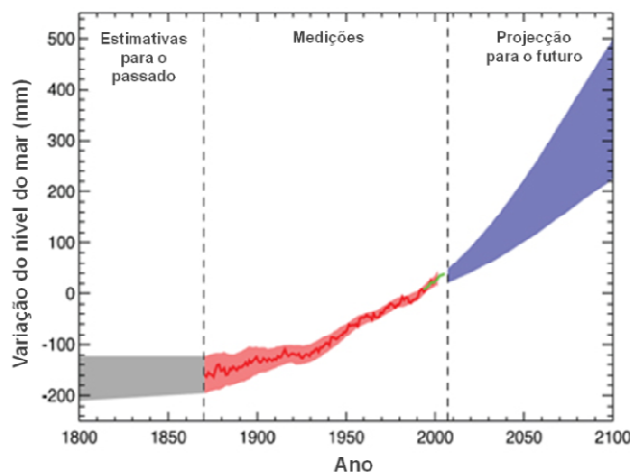


Figura 29 - Cenário de subida do nível do mar A1B do IPCC utilizado nas simulações, adaptado de Bindoff *et al.*, 2007.

Foram consideradas então três simulações distintas:

✓ “Run100\_Interp200\_M<sub>2</sub>” – Simulação que serve de base de comparação e em relação à qual se irá observar a influência da subida do nível do mar. O sistema foi forçado apenas por uma maré do tipo M<sub>2</sub> com uma amplitude constante de 1.75 m.

✓ “Run100\_Interp200\_M<sub>2</sub>\_submin” – Simulação em que foi imposta a acção da maré (M<sub>2</sub>), bem como a subida do nível do mar, com uma elevação de 2.2 mm/ano.

✓ “Run100\_Interp200\_M2\_submáx” – Simulação que considera tanto a maré como a subida do nível do mar, com uma elevação de 4.8 mm/ano.

A comparação entre as diferentes simulações consideradas foi feita nos mesmos moldes do capítulo 3, utilizando para este efeito os parâmetros aí definidos: Volume de Água, Volume Total Erodido, Diferença Relativa Volume Total Erodido, Diferença Relativa Profundidade Máxima e Erro Quadrático Médio.

### **5.3 Resultados e Discussão**

Os resultados obtidos para a evolução dos perfis sob a influência de uma subida mínima do nível do mar, e a sua comparação com a simulação que apenas tem em conta o efeito da maré, estão representados na Figura 30. Na Figura 31 encontra-se representada a comparação entre o modelo evolutivo que considera apenas a maré, e o modelo que simula a subida do nível do mar tendo em conta o valor máximo considerado. Como se pode observar pelos gráficos, as simulações que tem em conta a subida do nível do mar apresentam algumas diferenças quando comparadas com o modelo forçado apenas pela maré. Como seria espectável, as maiores diferenças na tendência evolutiva são encontradas nos resultados do modelo “Run100\_Interp200\_M2\_submáx”, uma vez que o valor imposto para a elevação é maior. Estas desigualdades fazem-se sentir principalmente na zona mais a montante do perfil, onde ocorre deposição sedimentar. As simulações que consideram a subida do nível do mar apresentam uma acumulação distribuída de forma mais gradual ao longo do perfil. Outra diferença também identificada é a quebra na tendência de equilíbrio observável no perfil equivalente a 2100 anos obtido pelo “Run100\_Interp200\_M2\_submáx” (Figura 31). Tal pode indicar uma destabilização do modelo, ou uma alteração ao perfil de equilíbrio.

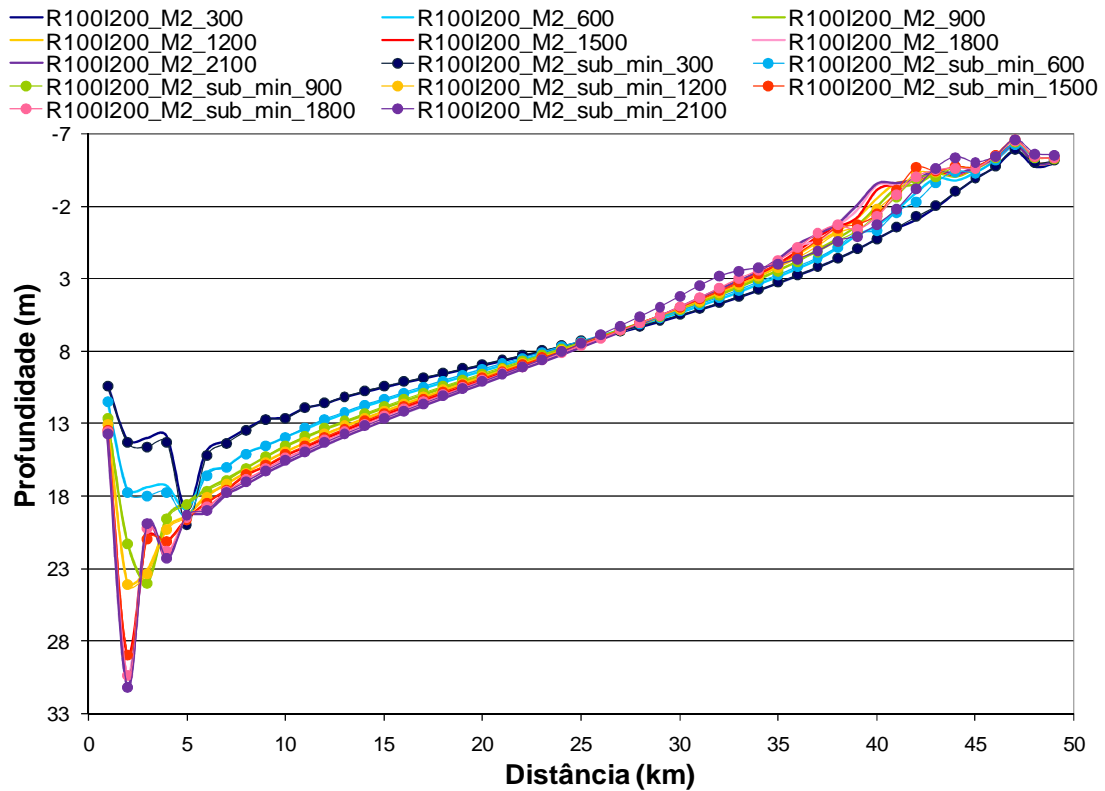


Figura 30 - Evolução batimétrica calculada com imposição da maré e subida mínima do nível do mar, e respectiva comparação com os resultados só influenciados pela maré.

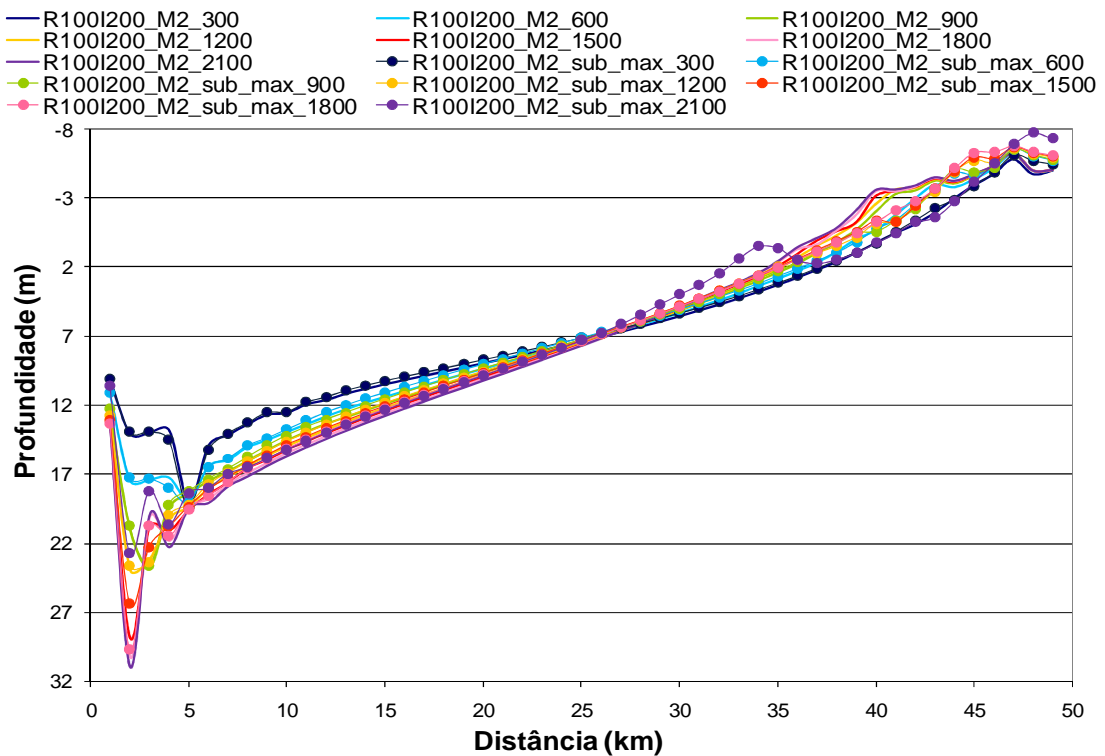


Figura 31 - Evolução batimétrica calculada com imposição da maré e subida máxima do nível do mar, e respectiva comparação com os resultados só influenciados pela maré.



Na Tabela 4 temos a listagem dos resultados obtidos para os vários parâmetros utilizados na comparação das três simulações. Estes mesmos resultados estão ilustrados da Figura 32 à Figura 35. Os parâmetros “Volume de Água” e “Volume Total Erodido”, apresentam um comportamento semelhante, como se pode observar na Figura 32 e na Figura 33. A simulação que tem em conta a subida mínima do nível do mar apresenta resultados muito próximos dos obtidos pela simulação que apenas considera a maré. Relativamente ao modelo com o valor máximo para o nível do mar, estes parâmetros apresentam uma tendência evolutiva semelhante embora com valores mais baixos, revelando uma diminuição da capacidade erosiva. Assim, o aumento do nível do mar leva a um incremento da coluna de água, a acção com o fundo diminui e, ocorre menor tendência erosiva ao longo do perfil.

Tabela 4 - Valores dos diferentes parâmetros utilizados na análise das três simulações.

| Caso considerado                             |             | Erro relativo<br>prof. relativa<br>(%) | Erro relativo<br>volume total<br>erodido (%) | Erro<br>quadrático<br>médio (m) | Volume de<br>água<br>(x106m <sup>3</sup> ) | Volume<br>Erodido<br>(x106m <sup>3</sup> ) |
|--|-------------|--|--|---------------------------------|--|--|
| <b>Run100_Interp200_</b><br><b>M2</b>        | <b>300</b>  | 8.34                                   | 7.49   | 0.88                            | 312.08                                     | 90.17                                      |
|  | <b>600</b>  | 28.06                                  | 2.06   | 0.85                            | 326.21                                     | 104.30                                     |
|  | <b>900</b>  | 19.87                                  | 1.83   | 0.85                            | 340.29                                     | 118.38                                     |
|  | <b>1200</b> | 22.18                                  | 1.94   | 0.80                            | 346.44                                     | 124.53                                     |
|  | <b>1500</b> | 7.63                                   | 3.07   | 0.67                            | 352.47                                     | 130.56                                     |
|  | <b>1800</b> | 4.35                                   | 2.62   | 0.60                            | 355.62                                     | 133.71                                     |
|  | <b>2100</b> | 2.93                                   | 2.06   | 0.56                            | 358.05                                     | 136.14                                     |
| <b>Run100_Interp200_</b><br><b>M2_submin</b> | <b>300</b>  | 4.96                                   | 0.64   | 0.36                            | 311.50                                     | 89.59                                      |
|  | <b>600</b>  | 3.16                                   | 0.29   | 0.40                            | 326.51                                     | 104.59                                     |
|  | <b>900</b>  | 0.90                                   | 0.32   | 0.38                            | 339.91                                     | 118.00                                     |
|  | <b>1200</b> | 0.74                                   | 0.50   | 0.39                            | 345.82                                     | 123.91                                     |
|  | <b>1500</b> | 0.27                                   | 0.50   | 0.41                            | 351.81                                     | 129.90                                     |
|  | <b>1800</b> | 0.32                                   | 0.41   | 0.45                            | 355.08                                     | 133.17                                     |
|  | <b>2100</b> | 0.76                                   | 0.03   | 0.69                            | 358.10                                     | 136.19                                     |
| <b>Run100_Interp200_</b><br><b>M2_submax</b> | <b>300</b>  | 2.27                                   | 8.03   | 0.46                            | 304.84                                     | 82.93                                      |
|  | <b>600</b>  | 1.34                                   | 6.99   | 0.51                            | 318.91                                     | 97.00                                      |
|  | <b>900</b>  | 0.67                                   | 5.92   | 0.61                            | 333.28                                     | 111.37                                     |
|  | <b>1200</b> | 1.22                                   | 4.53   | 0.69                            | 340.80                                     | 118.89                                     |
|  | <b>1500</b> | 8.76                                   | 4.97   | 0.74                            | 345.98                                     | 124.07                                     |
|  | <b>1800</b> | 1.89                                   | 3.75   | 0.72                            | 350.61                                     | 128.70                                     |
|  | <b>2100</b> | 26.59                                  | 13.77  | 1.14                            | 339.30                                     | 117.39                                     |

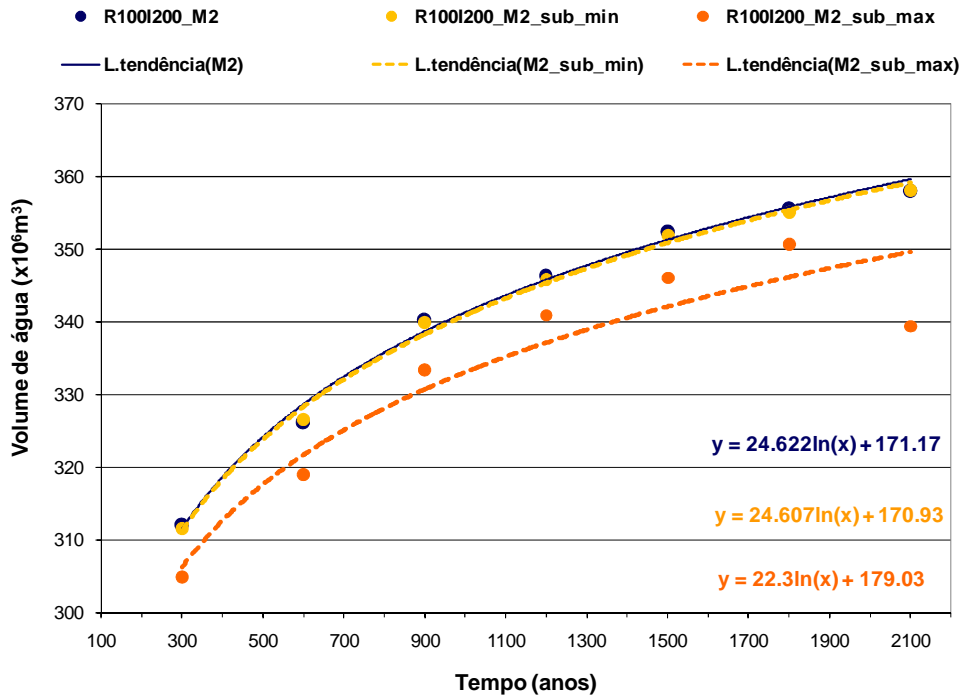


Figura 32 - Volume de água obtido para as várias simulações consideradas e respectiva linha de tendência.

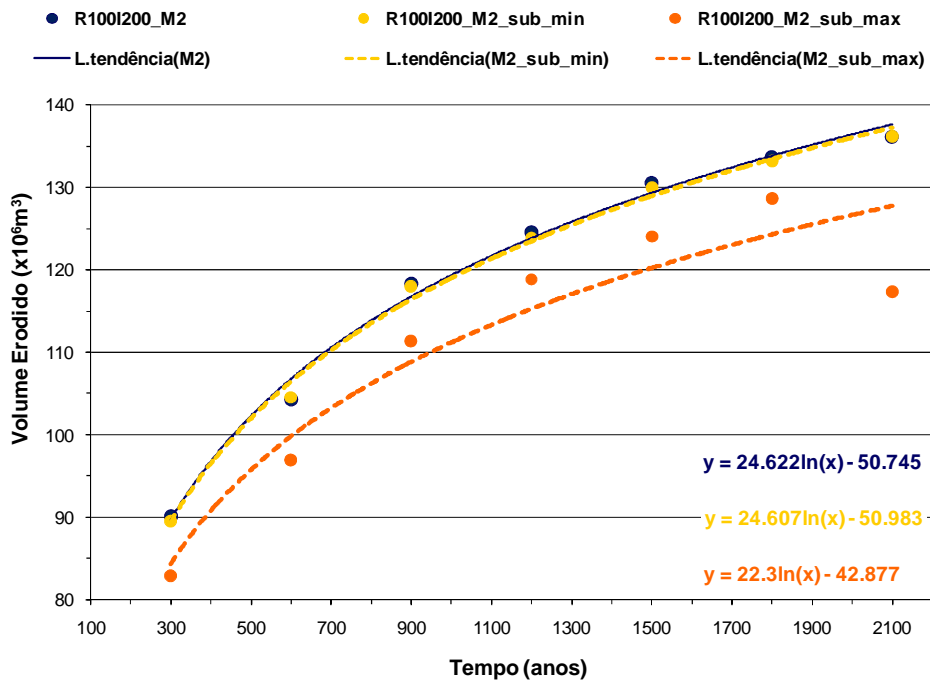


Figura 33 - Volume total erodido obtido para as várias simulações consideradas e respectiva linha de tendência.

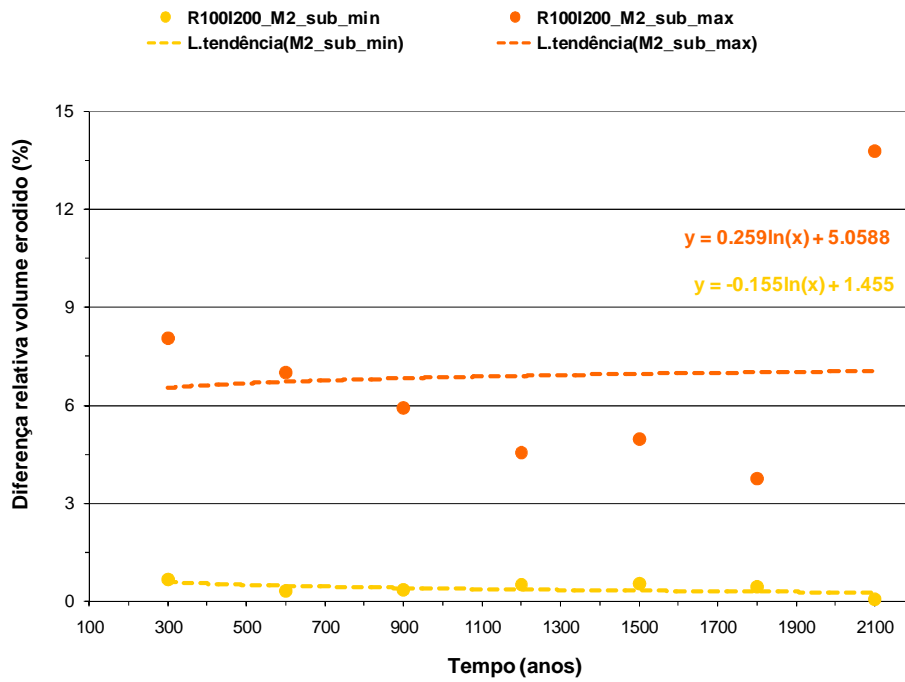


Figura 34 - Diferença relativa do volume erodido obtido para as várias simulações consideradas e respectiva linha de tendência.

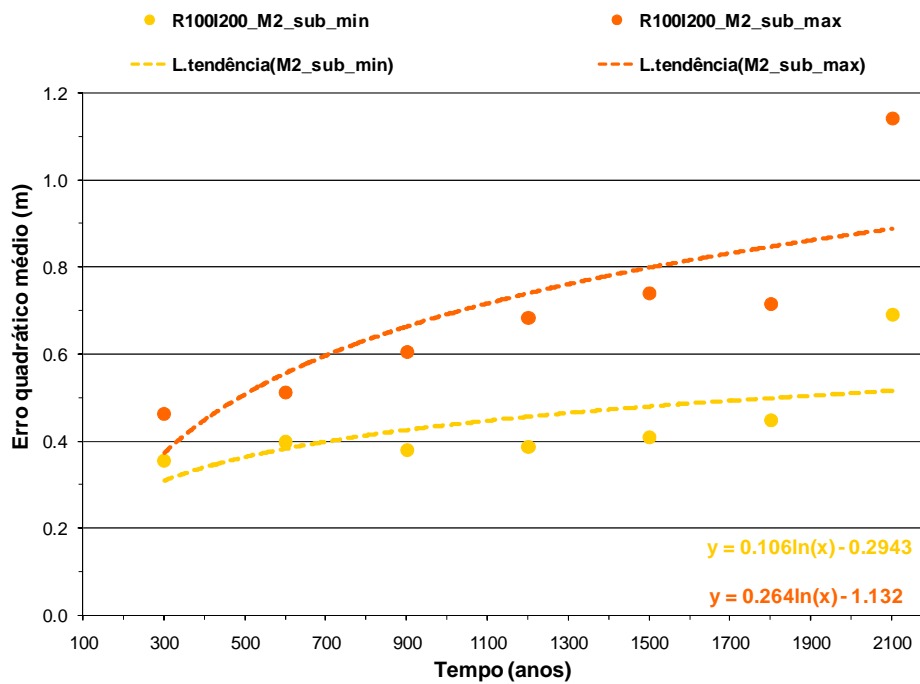


Figura 35 - Erro quadrático médio obtido para as várias simulações consideradas e respectiva linha de tendência.

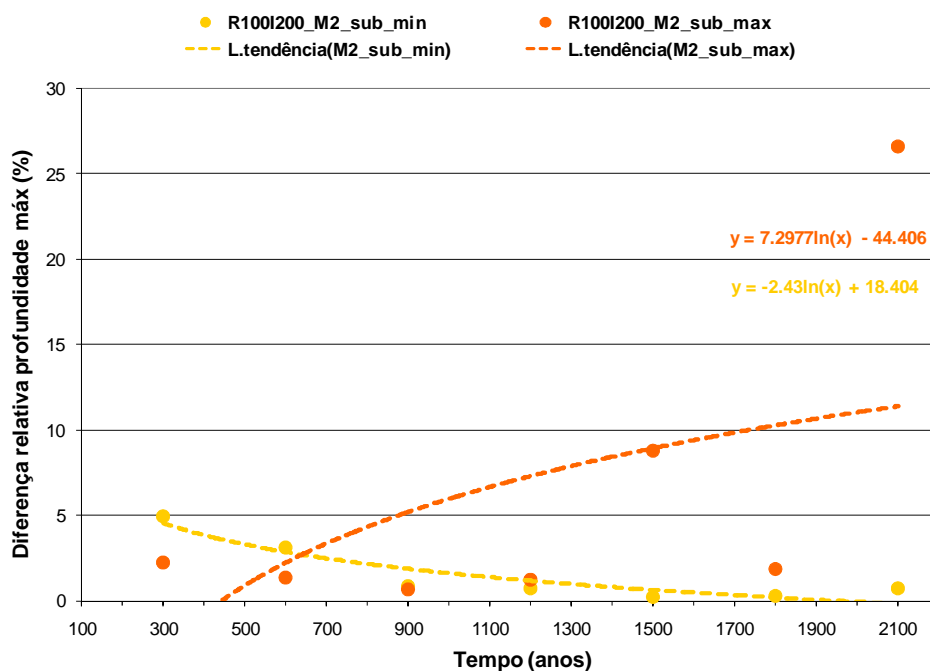


Figura 36 - Diferença relativa da profundidade máxima obtido para as várias simulações consideradas e respectiva linha de tendência.

Os resultados obtidos para os parâmetros “Diferença Relativa Volume Total Erodido” e “Erro Quadrático Médio”, estão indicados na Figura 34 e Figura 35, respectivamente. Para ambos os parâmetros, os valores mais baixos são relativos à simulação com nível mínimo de subida do mar, o que traduz a semelhança entre este modelo evolutivo e o que é utilizado como comparação, “Run100\_Interp200\_M2”, onde apenas é imposta a acção da maré.

A Figura 36 representa os valores obtidos para o parâmetro “Diferença Relativa da Profundidade Máxima”. Observa-se a clara alteração na tendência evolutiva da simulação que considera o valor máximo para a subida do nível do mar, com dois valores anómalos aos 1500 e 2100 anos. Mais uma vez, é observada a similaridade de resultados entre a simulação com uma subida mínima do nível do mar e o modelo forçado unicamente pela maré.

Analisando os vários modelos evolutivos obtidos para cada uma das simulações consideradas, bem como os valores determinados para os vários parâmetros, pode-se concluir que o valor de 2.2 mm/ano para a subida do nível do mar não produz alterações significativas na morfodinâmica de fundo ao longo do tempo.

## 6. Conclusões

A abordagem seguida neste trabalho apresenta uma componente teórica e outra experimental. Esta última relaciona-se sobretudo com o estudo da viabilidade e aplicabilidade de um modelo baseado em processos, o sistema de modelação MOHID, no âmbito da evolução morfodinâmica de longa escala temporal. Deste modo, não se tem em vista a aplicação directa a um sistema costeiro real, mas antes, a utilização de batimetrias esquemáticas. Assim, a avaliação do desempenho do modelo morfodinâmico é efectuada recorrendo à comparação com resultados obtidos por outros autores. As diferenças observadas, mais evidentes nas zonas de fronteira, devem-se principalmente ao facto de se relacionarem modelos que seguem diferentes abordagens de discretização matemática. Contudo, é possível constatar uma certa similaridade de comportamento entre os vários perfis obtidos pelos diferentes métodos. A evolução batimétrica determinada pelo MOHID apresenta uma tendência de equilíbrio, apesar de o modelo incluir na sua formulação termos de não linearidade, e de o comprimento do perfil ir mudando ao longo do tempo. Esta tendência faz-se sentir em qualquer um dos testes efectuados relativamente ao comprimento dos perfis, bem como ao tipo de batimetria considerada inicialmente. Não se identificam alterações significativas derivadas do facto de se iniciar os modelos evolutivos com uma batimetria linear ou com uma batimetria acrescida de uma perturbação que varia entre mais ou menos 5% da elevação.

Com o intuito de agilizar o tempo empregue no processamento das simulações, testaram-se vários esquemas de extrapolação, tendo em conta a aproximação a polinómios de 1ª e 2ª ordem. Os resultados obtidos através das interpolações de 2ª ordem apresentam grandes instabilidades, sendo assim excluídos da análise. De todos os

casos considerados, as simulações de 100 anos seguidas de extrapolação de 200 anos permitem a maior redução do esforço computacional, poupando 2/3 do tempo de cálculo, sem colocar em causa a consistência dos resultados. Os resultados obtidos para a evolução batimétrica de 10000 anos mostram o estabelecimento de um único padrão evolutivo a partir dos 2000 anos, independentemente do esquema de extrapolação utilizado.

Uma das vantagens da utilização de um modelo que resolve explicitamente os processos físicos é o facto de ser possível simular o impacto de diversas variáveis, como por exemplo a subida do nível médio do mar juntamente com a acção da maré. Estas simulações permitem observar algumas alterações significativas na evolução dos perfis, como por exemplo a diminuição da tendência erosiva sobre o fundo estuarino mais profundo à medida que o nível do mar aumenta, bem como, a deposição de sedimentos nas regiões menos profundas. O modelo morfodinâmico demonstra sensibilidade a estes parâmetros, podendo ser utilizado como ferramenta de teste de cenários em estudos de alterações climáticas.

O vasto conjunto de resultados obtido ao longo deste trabalho, sugere a utilização do sistema de modelação MOHID como um método promissor para avaliar a evolução morfodinâmica de um sistema natural em longas escalas temporais.

Contudo, importa mais uma vez salientar, que o presente trabalho consiste numa primeira abordagem à modelação de longa escala temporal através de um modelo baseado em processos. Assim, identificaram-se algumas questões para as quais não foi possível obter resposta, quer por se desviarem um pouco do âmbito dos objectivos definidos inicialmente, quer por escassez de tempo para testar algumas novas abordagens no contexto do presente trabalho. No entanto, considerou-se pertinente fazer

referência a algumas possíveis etapas que serão necessárias para dar continuidade ao trabalho aqui iniciado. Seguem-se alguns exemplos:

- Testar um perfil batimétrico inicial que inclua na fronteira aberta uma zona correspondente ao delta de vazante.
- Testar o modelo morfodinâmico com batimetrias 2D de diferentes configurações.
- Testar a inclusão de outros parâmetros, como por exemplo marés compostas por mais componentes, descargas fluviais, variação do sedimento de base.
- Aplicar o sistema de modelação MOHID a uma área de estudo, sendo necessário neste caso efectuar-se a calibração dos modelos com dados de campo, referentes às características sedimentares de fundo e do material em suspensão, aos fluxos hidrodinâmicos e às características batimétricas.



## 7. Bibliografia

- Ackers, P., White, W.R., 1973. Sediment Transport: New Approach and Analysis. *Journal of the Hydraulics Division*, 99 (11), 2041-2060.
- Allen, P.A., Allen, J.R., 1990. *Basin Analysis: Principles and Applications*. Oxford, Blackwell Scientific Publications, 451p.
- Bailard, J.A., 1984. A simplified model for longshore sediment transport. *Proceedings of the 19<sup>th</sup> Coastal Engineering Conference*, 1454-1470.
- Bailard, J.A., Inman, D.L., 1981. An energetics bedload model for plane sloping beach: local transport. *Journal of Geophysical Research*, 86 (C3), 2035-2043.
- Bernardes, M.E.C., Davidson, M.A., Dyer, K.R., George, K.J., 2006. Towards medium-term (order of months) morphodynamic modelling of the Teign estuary, UK. *Ocean Dynamics*, 56, 186-197.
- Bijker, E., 1968. Littoral drift as function of waves and currents, 11<sup>th</sup> Coastal Eng. Conf. *Proc. ASCE*, London, UK, 415-435.
- Bindoff, N.L., Willebrand, J., Artale, V., Cazenave, A, Gregory, J., Gulev, S., Hanawa, K., Le Quéré, C., Levitus, S., Nojiri, Y., Shum, C.K., Talley, L.D., Unnikrishnan, A., 2007. *Observations: Oceanic Climate Change and Sea Level*. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K.B., Tignor, M., Miller, H.L. (Eds.)). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 385-429.

- Briggs, L.I., Pollack, H.N., 1967. Digital model of evaporate sedimentation. *Science*, 155, 453-456.
- Cao, Z., Carling, P.A., 2002a. Mathematical modelling of alluvial rivers: reality and myth. Part I: general overview. *Water Maritime Eng., ICE* 154 (3), 207-220.
- Cao, Z., Carling, P.A., 2002b. Mathematical modelling of alluvial rivers: reality and myth. Part II: special issues. *Water Maritime Eng., ICE* 154 (4), 297-308.
- Carnahan, B., Luther, H.A., Wilkes, J.O., 1969. *Applied Numerical Methods*. John Wiley & Sons, Inc., 604p.
- Chippada, S., Dawson, C., Wheeler, M., 1998. Agodonov-type finite volume method for the system of shallow water equations. *Computer methods in applied mechanics and engineering*, 151 (01), 105-130.
- Church, J.A., Gregory, J.M., Huybrechts, P., Kuhn, M., Lambeck, K., Nhuan, M.T., Qin, D., Woodworth, P.L., 2001. Changes in sea level. In: *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (Houghton, J.T., et al. (eds.)). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 639-693.
- Coelho, H., Neves, R., White, M., Leitão, P., Santos, A., 2002. A Model for Ocean Circulation on the Iberian Coast. *Journal of Marine Systems*, 32 (1-3), 153-179.
- Cowell, P.J., Zeng, T.Q., 2003. Integrating Uncertainty Theories with GIS for Modeling Coastal Hazards of Climate Change. *Marine Geodesy*, 26, 5-18.
- Cowell, P.J., Roy, P.S., Jones, R.A., 1995. Simulation of large-scale coastal change using a morphological behaviour model. *Marine Geology*, 126, 45-61.

- Cowell, P.J., Thorn, B.G., 1995. Morphodynamics of coastal evolution. In: Coastal Evolution, R.W.G. Carter and C.D. Woodroffe (Eds.), Cambridge Univ. Press, 33-86.
- de Vriend, H.J., Capobianco, M., Chesher, T., de Swart, H.E., Latteux, B., Stive, M.J.F., 1993. Approaches to long-term modelling of coastal morphology: A review. Coastal Engineering, 21 (1-3), 225-269.
- Dias, J.M.A., Boski, T., Rodrigues, A., Magalhães, F., 2000. Coast line evolution in Portugal since the Last Glacial Maximum until present - a synthesis. Marine Geology 170, 177-186.
- Dibajnia, M., Watanabe, A., 1992. Sheet flow under nonlinear waves and currents. Coastal Engineering Journal, 2015-2029.
- do Carmo, M.C., 2005. Modelação do Transporte de Sedimentos em Ambientes Costeiros. Trabalho Final de Curso da Licenciatura em Engenharia do Ambiente, Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior Técnico, 51p.
- Flemmings, P.B., Jordan, T.E., 1989. A synthetic stratigraphic model of foreland basin development. Journal Geophysical Research, 94, 3851-3866.
- Hibma, A., Schuttelaars, H.M., de Vriend, H.J., 2004a. Initial formation and long-term evolution of channel–shoal patterns. Continental Shelf Research, 24, 1637-1650.
- Hibma, A., Schuttelaars, H.M., Wang, Z.B., 2003. Comparison of longitudinal equilibrium profiles of estuaries in idealized and process-based models. Ocean Dynamics, 53, 252-269.
- Hibma, A., Stive, M.J.F., Wang, Z.B., 2004 b. Estuarine morphodynamics. Coastal Engineering, 51, 765-778.

- List, J.H., Terwindt, J.H.J., 1995. Large-scale coastal behaviour. *Marine Geology*, 126, 1-3.
- Martins, F., Leitão, P., Silva, A., Neves, R., 2001. 3D modelling in the Sado estuary using a new generic coordinate approach. *Oceanologica Acta*, 24, nº1, S51-S62.
- Martins, F., Neves, R., Leitão, P., 1998. A three-dimensional hydrodynamic model with generic vertical coordinate. In: V. Babovic & L.C. Larsen (Eds.), *Proceedings of Hydroinformatics'98*, Balkema, Rotterdam., Vol. 2, 1403-1410,
- Martins, H, Santos, A., Coelho, E.F., Neves, R., Rosa, T.L., 1999. Numerical Simulation of Internal Tides. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering* 214 (6), 867-872.
- Meyer-Peter, E., Muller, R., 1948. Formulas for Bed-Load Transport. Report on Second Meeting of International Association for Hydraulic Research, *Proceedings of Second Meeting*, (Stockholm, Sweden), 39-64.
- Miranda, R., Braunschweig, F., Leitão, P., Neves, R., Martins, F., Santos, A., 2000. MOHID 2000 - A coastal integrated object oriented model. *Proceedings of Hydraulic Engineering Software VIII*, Lisbon, Portugal, 393-401.
- Paola, C., 2000. Quantitative Models of sedimentary basin filling. *Sedimentology*, 47 (1), 121-178.
- Paola, C., Heller, P.L., Angevine, C.L., 1992. The large scale dynamics of grain-size variation in alluvial basins, 1: Theory. *Basin Res.*, 4, 73-90.
- Schuttelaars, H.M., de Swart, H.E., 2000. Multiple morphodynamic equilibria in tidal embayments. *Journal of Geophysical Research*, vol. 105, nº C10, 24105-24118.
- Schwarzacher, W., 1966. Sedimentation in a subsiding basin. *Nature*, 5043, 1349-1350.

- Stive, M.J.E, Wang, Z.B., 2003. Chapter 13: Morphodynamic Modeling of Tidal Basins and Coastal Inlets. In: *Advances in Coastal Modeling*, V.C. Lakhan (Eds.), Elsevier Science B.V, 367-392.
- Stive, M.J.F., de Vriend, H.J., 1995. Modelling shoreface profile evolution. *Marine Geology*, 126, 235-248.
- Stolper, D., 2002. *Modelling the Evolution of Estuaries and Their Intertidal Zones*. PhD Thesis, University of Sydney, Sydney, 189 p.
- Van rijn, L.C., 1984. Sediment transport: Part I: Bed load transport; Part II: Suspended load transport; Part III: Bed forms and alluvial roughness. *Journal of Hydraulic Division* 110 (10), 1431-1456; 110 (11), 1613-1641; 110 (12), 1733-1754.
- Van rijn, L.C., 1993. *Principles of sediment transport in rivers, estuaries and coastal seas*. Aqua Publication, The Netherlands, Amsterdam.

## 8. Anexos

**Anexo I** – Executável para criação de batimetria com perfil rectilíneo acrescido de uma perturbação aleatória de +/- 5% da elevação.

```
PROGRAM Create_simple_batim
  use ifport
  IMPLICIT NONE
  ! Declaração das variáveis
  INTEGER i,j, ilb, jlb, iub, jub
  REAL profmax, profmin, perturb
  REAL, allocatable :: batim (:,:)
  CHARACTER(LEN=128) data_file_name
  ilb=1
  !iub=100
  jlb=1
  !jub=3
  perturb=0.05 ! 5% da profundidade local
  PRINT *, 'Give iub'
  READ *, iub
  PRINT *, 'Give jub'
  READ *, jub
  ! profmax é a profundidade do perfil na fronteira aberta (mar)
  PRINT *, 'Give profmax'
  READ *, profmax
  ! profmin é a profundidade do perfil do lado de terra
  PRINT *, 'Give profmin'
  READ *, profmin
  allocate (batim (ilb:iub,jlb:jub))
  ! Ler batimetria
  DO i=ilb,iub
  DO j=jlb,jub
    IF ((j.ge.jlb+1).and.(j.le.jub-1)) THEN
      batim(i,j)=profmax+((profmax-profmin)/(iub-2))-(((profmax-
profmin)/(iub-2))*i)
      batim(i,j)=batim(i,j)*(1+(2*perturb*rand()-perturb))
    ELSE
      batim(i,j)=-99.
    END IF
  END DO
  END DO
  ! Escrever ficheiro com a batimetria
  PRINT *, 'Give file name'
  READ *, data_file_name
  OPEN (UNIT=1,NAME=data_file_name,FORM='FORMATTED')
  DO i=ilb,iub
  DO j=jlb,jub
    WRITE (1,*) batim(i,j)
  END DO
  END DO
  CLOSE (1)
END PROGRAM
```

## Anexo II - Executável para criação de batimetria extrapolada, aproximação a polinómio de 1ª ordem.

```
PROGRAM INTERPOL_ORDEM1
implicit none
INTEGER, PARAMETER :: imax=50, jmax=3
INTEGER i, j, t1, t2, t3, ib, i_unidades, i_dezenas, i_centenas
REAL H1(imax,jmax), H2(imax,jmax), H3(imax,jmax), z1, z2, z3
CHARACTER (LEN=20)nome_ficheiro
CHARACTER (LEN=11)nname
CHARACTER(LEN=128) texto
!lê os ficheiros de batimetria
!ib é referente aos ficheiros de batimetria considerados para a
!extrapolação
t1=50
t2=51
call LEBATIM (t1, H1)
call LEBATIM (t2, H2)
!Cria a matriz H3 no instante t3 através da extrapolação de H1 e H2
t3=151
do i=1,imax
do j=1,jmax
H3(i,j)=-99.
if ((j.eq.2).and.(i.lt.imax)) then
z1=H1(i,j)
z2=H2(i,j)
call Interpol_ord1(z1,z2,z3,t1,t2,t3)
H3(i,j)=z3
endif
end do
end do
!escreve a batimetria extrapolada num ficheiro para ser lido pelo
!MOHID
nname="BatInterp_"
ib=151
i_centenas=int(ib/100)
i_dezenas=int((ib-i_centenas*100)/10)
i_unidades=int(ib-i_centenas*100-i_dezenas*10)
nome_ficheiro=nname //"00" // char(48+i_centenas) //
char(48+i_dezenas)// char(48+i_unidades)// ".dat"

open (unit=3,file=nome_ficheiro)
write (3,*) "FILL_VALUE      : -99"
write (3,*) "ILB_IUB          : 1      50"
write (3,*) "JLB_JUB          : 1      3"
write (3,*) "ORIGIN            : 61840  302562"
write (3,*) "GRID_ANGLE       : 0.000"
write (3,*) "COORD_TIP        : 3"
write (3,*) "LATITUDE         : 37"
write (3,*) "LONGITUDE        : 7"
write (3,*) "EVOLUTION        : 1"
```

```

write (3,*) "EVOLUTION_FILE :
C:\Selma\tese\Mohid_Gui\GeneralData\Batim_evolution_1D50.hdf5"
write (3,*) "PROD_NAME      : FUNDO"
write (3,*) "<BeginGridData2D>"

do i=1,imax
do j=1,jmax
    write (3,*) H3(i,j)
end do
end do
write (3,*) "<EndGridData2D>"
write (3,*) "<BeginXX>"
write (3,*) " 61840.00"
write (3,*) " 62840.00"
write (3,*) " 63840.00"
write (3,*) " 64840.00"
write (3,*) "<EndXX>"
write (3,*) "<BeginYY>"
write (3,*) " 302562.0"
write (3,*) " 303562.0"
write (3,*) " 304562.0"
write (3,*) " 305562.0"
write (3,*) " 306562.0"
write (3,*) " 307562.0"
write (3,*) " 308562.0"
write (3,*) " 309562.0"
write (3,*) " 310562.0"
write (3,*) " 311562.0"
write (3,*) " 312562.0"
write (3,*) " 313562.0"
write (3,*) " 314562.0"
write (3,*) " 315562.0"
write (3,*) " 316562.0"
write (3,*) " 317562.0"
write (3,*) " 318562.0"
write (3,*) " 319562.0"
write (3,*) " 320562.0"
write (3,*) " 321562.0"
write (3,*) " 322562.0"
write (3,*) " 323562.0"
write (3,*) " 324562.0"
write (3,*) " 325562.0"
write (3,*) " 326562.0"
write (3,*) " 327562.0"
write (3,*) " 328562.0"
write (3,*) " 329562.0"
write (3,*) " 330562.0"
write (3,*) " 331562.0"
write (3,*) " 332562.0"
write (3,*) " 333562.0"
write (3,*) " 334562.0"
write (3,*) " 335562.0"
write (3,*) " 336562.0"

```



```

write (3,*) " 337562.0"
write (3,*) " 338562.0"
write (3,*) " 339562.0"
write (3,*) " 340562.0"
write (3,*) " 341562.0"
write (3,*) " 342562.0"
write (3,*) " 343562.0"
write (3,*) " 344562.0"
write (3,*) " 345562.0"
write (3,*) " 346562.0"
write (3,*) " 347562.0"
write (3,*) " 348562.0"
write (3,*) " 349562.0"
write (3,*) " 350562.0"
write (3,*) " 351562.0"
write (3,*) " 352562.0"
write (3,*) "<EndYY>"
close (3)

```

END PROGRAM

```

SUBROUTINE Interpol_ord1(z1,z2,z3,t1,t2,t3)
  INTEGER t1, t2, t3
  REAL z1, z2, z3
  z3=z1+(t3-t1)*((z2-z1)/(t2-t1))
end subroutine
SUBROUTINE LEBATIM (ib,H)
  INTEGER imax, jmax, i, j
  PARAMETER (imax=50, jmax=3)
  INTEGER ib, i_unidades, i_dezenas, i_cenas
  CHARACTER (LEN=20)nome_ficheiro
  CHARACTER (LEN=11)nname
  CHARACTER(LEN=128) texto
  REAL H(imax,jmax)
  nname="Bathymetry_"
  i_cenas=int(ib/100)
  i_dezenas=int((ib-i_cenas*100)/10)
  i_unidades=int(ib-i_cenas*100-i_dezenas*10)
  nome_ficheiro=nname // "00" // char(48+i_cenas) //
char(48+i_dezenas)// char(48+i_unidades)// ".dat"
  open (unit=1,file=nome_ficheiro)
  read (1,*)texto
  do while (texto.ne."<BeginGridData2D>")
    read (1,*)texto
  end do
  do i=1,imax
    do j=1,jmax
      read (1,*) H(i,j)
    end do
  end do

  close (1)
end subroutine

```

**Anexo III** - Executável para criação de batimetria extrapolada, aproximação a polinómio de 2ª ordem.

```

PROGRAM INTERPOL_ORDEM2
implicit none
  INTEGER, PARAMETER: imax=50, jmax=3
  INTEGER i, j, t1, t2, t3, t4, ib, i_unidades, i_dezenas, i_centenas
  REAL H1(imax,jmax), H2(imax,jmax), H3(imax,jmax), H4(imax,jmax), z1,
  z2, z3, z4
  CHARACTER (LEN=20)nome_ficheiro
  CHARACTER (LEN=11)nname
  CHARACTER(LEN=128) texto
!lê os ficheiros de batimetria
!ib é referente aos ficheiros de batimetria considerados para a
!extrapolação
t1=99
t2=100
t3=101
call LEBATIM (t1, H1)
call LEBATIM (t2, H2)
call LEBATIM (t3, H3)
!Cria a matriz H4 no instante t4 através da extrapolação de H1, H2, H3
  t4=301
  do i=1,imax
  do j=1,jmax
    H4(i,j)=-99.
    if ((j.eq.2).and.(i.lt.imax)) then
      z1=H1(i,j)
      z2=H2(i,j)
      z3=H3(i,j)
      call Interpol_ord2(z1,z2,z3,z4,t1,t2,t3,t4)
      H4(i,j)=z4
    endif
  end do
  end do
!escreve a batimetria interpolada num ficheiro para ser lido pelo
MOHID
  nname="BatInterp2_"
  ib=301
  i_centenas=int(ib/100)
  i_dezenas=int((ib-i_centenas*100)/10)
  i_unidades=int(ib-i_centenas*100-i_dezenas*10)
  nome_ficheiro=nname // "00" // char(48+i_centenas) //
char(48+i_dezenas)// char(48+i_unidades)// ".dat"
  open (unit=3,file=nome_ficheiro)
  write (3,*) "FILL_VALUE : -99"
  write (3,*) "ILB_IUB : 1 50"
  write (3,*) "JLB_JUB : 1 3"
  write (3,*) "ORIGIN : 61840 302562"
  write (3,*) "GRID_ANGLE : 0.000"
  write (3,*) "COORD_TIP : 3"
  write (3,*) "LATITUDE : 37"
  write (3,*) "LONGITUDE : 7"

```

```

write (3,*) "EVOLUTION      : 1"
write      (3,*)              "EVOLUTION_FILE      :
C:\Selma\tese\Mohid_Gui\GeneralData\Batim_evolution_1D50.hdf5"
write (3,*) "PROD_NAME      : FUNDO"
write (3,*) "<BeginGridData2D>"
do i=1,imax
do j=1,jmax
    write (3,*) H4(i,j)
end do
end do
write (3,*) "<EndGridData2D>"
write (3,*) "<BeginXX>"
write (3,*) " 61840.00"
write (3,*) " 62840.00"
write (3,*) " 63840.00"
write (3,*) " 64840.00"
write (3,*) "<EndXX>"
write (3,*) "<BeginYY>"
write (3,*) " 302562.0"
write (3,*) " 303562.0"
write (3,*) " 304562.0"
write (3,*) " 305562.0"
write (3,*) " 306562.0"
write (3,*) " 307562.0"
write (3,*) " 308562.0"
write (3,*) " 309562.0"
write (3,*) " 310562.0"
write (3,*) " 311562.0"
write (3,*) " 312562.0"
write (3,*) " 313562.0"
write (3,*) " 314562.0"
write (3,*) " 315562.0"
write (3,*) " 316562.0"
write (3,*) " 317562.0"
write (3,*) " 318562.0"
write (3,*) " 319562.0"
write (3,*) " 320562.0"
write (3,*) " 321562.0"
write (3,*) " 322562.0"
write (3,*) " 323562.0"
write (3,*) " 324562.0"
write (3,*) " 325562.0"
write (3,*) " 326562.0"
write (3,*) " 327562.0"
write (3,*) " 328562.0"
write (3,*) " 329562.0"
write (3,*) " 330562.0"
write (3,*) " 331562.0"
write (3,*) " 332562.0"
write (3,*) " 333562.0"
write (3,*) " 334562.0"
write (3,*) " 335562.0"
write (3,*) " 336562.0"

```

```

write (3,*) " 337562.0"
write (3,*) " 338562.0"
write (3,*) " 339562.0"
write (3,*) " 340562.0"
write (3,*) " 341562.0"
write (3,*) " 342562.0"
write (3,*) " 343562.0"
write (3,*) " 344562.0"
write (3,*) " 345562.0"
write (3,*) " 346562.0"
write (3,*) " 347562.0"
write (3,*) " 348562.0"
write (3,*) " 349562.0"
write (3,*) " 350562.0"
write (3,*) " 351562.0"
write (3,*) " 352562.0"
write (3,*) "<EndYY>"
close (3)

```

End PROGRAM

SUBROUTINE Interpol\_ord2(z1,z2,z3,z4,t1,t2,t3,t4)

```

INTEGER t1, t2, t3, t4
REAL z1, z2, z3, z4
z4=z1+(t4-t1)*((z2-z1)/(t2-t1))+(t4-t1)*(t4-t2)*(((z3-z2)/(t3-t2))-
((z2-z1)/(t2-t1)))/(t3-t1)
end subroutine

```

SUBROUTINE LEBATIM (ib,H)

```

INTEGER imax, jmax, i, j
PARAMETER (imax=50, jmax=3)
INTEGER ib, i_unidades, i_dezenas, i_centenas
CHARACTER (LEN=20)nome_ficheiro
CHARACTER (LEN=11)nname
CHARACTER(LEN=128) texto
REAL H(imax,jmax)
nname="Bathymetry_"
i_centenas=int(ib/100)
i_dezenas=int((ib-i_centenas*100)/10)
i_unidades=int(ib-i_centenas*100-i_dezenas*10)
nome_ficheiro=nname // "00" // char(48+i_centenas) //
char(48+i_dezenas)// char(48+i_unidades)// ".dat"
open (unit=1,file=nome_ficheiro)
read (1,*)texto
do while (texto.ne."<BeginGridData2D>")
read (1,*)texto
end do
do i=1,imax
do j=1,jmax
read (1,*) H(i,j)
end do
end do
close (1)
end subroutine

```