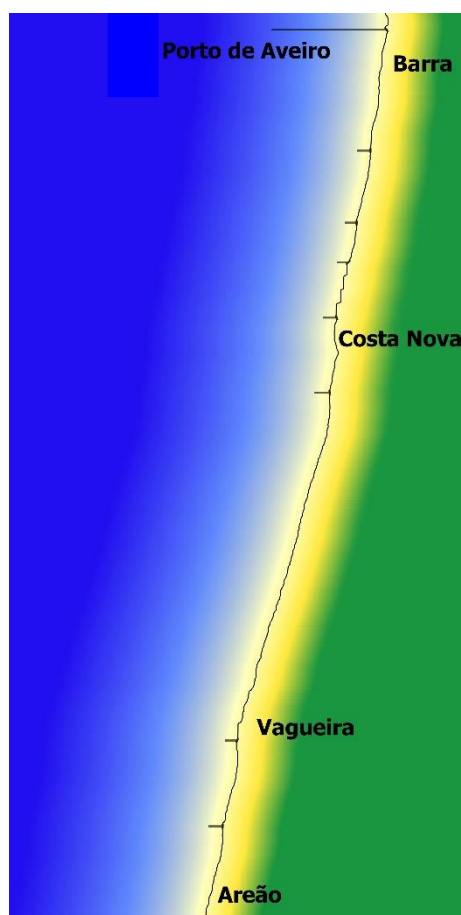


# SANDTRACK - Alimentação artificial das praias: uma metodologia integrada de suporte à gestão litoral

POCI-01-0145-FEDER-031779

## SandTrack

### Relatório VI – Relatório da tarefa 5.



Cofinanciado por:



UNIÃO EUROPEIA  
Fundo Europeu  
de Desenvolvimento Regional

**Autores:**

Ana Margarida Ferreira<sup>1</sup>, Carlos Coelho<sup>1</sup>

<sup>1</sup> RISCO & Universidade de Aveiro

**Março de 2021**

## **Resumo**

O presente relatório descreve as atividades referentes à modelação numérica de intervenções de alimentações artificiais de sedimentos através dos modelos numéricos LTC - Long Term Configuration, para avaliar a evolução da posição da linha de costa, e CS - Model, para avaliar a evolução dos perfis transversais. A aplicação complementar destes modelos resultou no desenvolvimento de um método com o objetivo de apresentar contributos para melhorar a capacidade de modelação numérica da evolução dos perfis transversais de praia. Para tal, descreve-se o processo de calibração e validação dos modelos, os cenários de alimentação artificial de sedimentos avaliados, o método desenvolvido e os resultados obtidos.

## **Abstract**

This technical report describes the tasks relating to numerical modelling of artificial nourishments through the numerical models LTC - Long Term Configuration, to evaluate the shoreline evolution, and the CS - Model, to evaluate the cross-shore beach profile evolution. The application of both models allowed the development of a method with the objective of present contributions to improve the numerical modeling capacity of the beach profiles evolution. For that purpose, the general aspects of the calibration and validation of the numerical models are described, it is presented the artificial nourishments interventions evaluated, it is described the proposed method and the main results are exposed.

## Índice

1. Introdução	2
2. Modelo numérico LTC	2
2.1 Domínio de cálculo	3
2.2 Clima de agitação	4
2.3 Calibração das simulações	10
2.4 Validação das simulações	13
2.5 Definição da situação de referência	16
3. Modelo numérico CS-Model	18
3.1 Perfis transversais tipo	19
3.2 Clima de agitação	21
3.3 Calibração e validação das simulações	22
3.4 Definição da situação de referência	26
4. Definição dos cenários de alimentação artificial de sedimentos	26
4.1 Clima de agitação / subida do nível médio da água do mar	27
4.2 Cenários de alimentação artificial de sedimentos	28
5. Evolução da posição da linha de costa	29
5.1 Situação de referência	30
5.2 Alimentações artificiais de sedimentos	31
6. Evolução do perfil transversal	33
6.1 Volume	33
6.2 Localização no perfil	35
7. Modelação da evolução dos perfis transversais por integração dos efeitos longitudinais	38
7.1 Descrição do método proposto	38
7.2 Aplicação do método proposto	41
8. Conclusões	46
9. Referências	48

## **1. Introdução**

O presente relatório foi elaborado no âmbito da Tarefa 5 do projeto de investigação científica “Sandtrack – Alimentação Artificial das Praias: uma Metodologia Integrada de Suporte à Gestão Litoral”. A Tarefa 5, designada como “Modelação Numérica da Evolução da Linha de Costa em Cenário de Alimentações Artificiais de Sedimentos”, refere-se à componente de modelação numérica de alimentações artificiais de sedimentos. O principal objetivo da tarefa corresponde a apresentar contributos que permitam descrever a evolução de alimentações artificiais de praias em diferentes cenários de alimentação artificial de sedimentos, através da aplicação de modelos numéricos. Para tal, aplicou-se o modelo numérico de evolução da posição da linha de costa LTC - Long Term Configuration e o modelo de evolução do perfil transversal de praia CS - Model. Posteriormente, foi desenvolvido e proposto um método com o objetivo de apresentar contributos para melhorar a capacidade de modelação da evolução dos perfis transversais de praia. O método proposto consiste na integração automática de efeitos relacionados com a subida do nível médio da água do mar, alimentações artificiais de sedimentos e efeitos do transporte sólido longitudinal na evolução do esquema que define a morfologia dos perfis transversais de praia, representados pelo CS-Model (Larson *et al.*, 2016).

Neste relatório são apresentadas e descritas as atividades referentes ao processo de calibração e validação dos modelos numéricos, os cenários de alimentação artificial de sedimentos avaliados, os resultados obtidos e o método desenvolvido com o objetivo de aumentar a capacidade de modelação da evolução dos perfis transversais de praia incorporando efeitos longitudinais. O documento inicia-se com a descrição da calibração e validação dos modelos numéricos (capítulo 2 e 3). No capítulo 4 descrevem-se os cenários de alimentação artificial de sedimentos avaliados. Nos capítulos 5 e 6, são apresentados os resultados do impacto das intervenções de alimentação artificial de sedimentos na evolução da posição da linha de costa e na evolução dos perfis transversais de praia. No capítulo 7 é apresentado e descrito o método proposto para aumentar a capacidade de modelação da evolução dos perfis transversais de praia, bem como a sua aplicação e resultados obtidos. No último capítulo, apresentam-se as principais conclusões do trabalho desenvolvido.

## **2. Modelo numérico LTC**

Os modelos numéricos de evolução da posição da linha de costa são uma generalização dos modelos analíticos, permitindo simular, mediante determinados cenários, a evolução da posição da linha de costa a médio e longo prazo. Desta forma, a aplicação dos modelos permite avaliar o impacto de eventuais medidas de mitigação ou adaptação ao problema de erosão (Coelho, 2005; Silva, 2010). Estes modelos baseiam-se na técnica de “uma linha” e permitem simular a evolução da posição da linha de costa para diferentes configurações de praia, podendo incluir diversos tipos de estruturas costeiras e condições fronteira, sob a ação da agitação marítima variável no espaço e no tempo (Silva, 2010). O principal pressuposto da teoria de uma linha é a de que o perfil ativo de praia é limitado no sentido do mar por uma profundidade de fecho, para lá da qual não existe movimento significativo do fundo, e que o perfil transversal se move paralelamente a si próprio. Não havendo alteração da forma do perfil de praia, a evolução da posição da linha de costa é apenas atribuída aos eventuais

gradientes no transporte sedimentar longitudinal (Silva, 2010). No presente estudo, as projeções de evolução da posição da linha de costa foram realizadas através da aplicação do modelo numérico LTC - Long Term Configuration (Coelho, 2005).

O LTC é um modelo de uma linha para aplicação a praias arenosas e considera que o transporte sedimentar longitudinal, juntamente com as condições fronteiras nos extremos da grelha modelada, são as principais causas das alterações na zona costeira, sendo, o transporte sedimentar longitudinal condicionado e/ou controlado pela ação das ondas, correntes, níveis de água, natureza dos sedimentos e sua fonte (Coelho, 2005).

Este modelo assume que cada onda atua individualmente durante um determinado período de tempo, o passo de tempo computacional, procedendo à sua transformação desde o largo até à rebentação, considerando os fenómenos de refração, empolamento e difração junto às estruturas costeiras. Para cada onda é estimado o transporte longitudinal induzido, fazendo-se um balanço sedimentar, em cada secção elementar da praia, através de uma equação de continuidade, e avaliando qual o volume de sedimentos em erosão e acreção. O volume calculado é distribuído pelo perfil transversal ativo definido entre o limite de espraiamento máximo da onda e a profundidade de fecho, verificando-se uma subida (acreção) ou descida (erosão) uniforme de todos os pontos do perfil ativo, sendo efetuadas correções a essas variações junto aos limites emerso e submerso do perfil (Coelho, 2005).

Através do LTC é possível avaliar a evolução da posição da linha de costa considerando a existência de diversas intervenções de defesa costeira, nomeadamente: fontes aluvionares pontuais (que poderão ser consideradas na simulação dos sistemas de *by-pass* de areias, representando uma entrada pontual de sedimentos no sistema), alimentações artificiais de areias, obras perpendiculares à linha de costa (esporões e quebra-mares portuários) e obras longitudinais aderentes.

Na aplicação do modelo LTC começou-se por definir o domínio de cálculo e analisou-se o clima de agitação a considerar nos processos de calibração e validação. Já durante o processo de calibração do modelo foram definidas as condições fronteira e os diferentes coeficientes e parâmetros de cálculo. Posteriormente, procedeu-se à validação dos pressupostos adotados, simulando a área de estudo ao mesmo tempo que foram consideradas as alimentações artificiais na análise da evolução morfológica e volumétrica dos atuais locais alvo de deposição dos dragados provenientes das dragagens de manutenção do porto de Aveiro.

## **2.1. Domínio de cálculo**

Na preparação do domínio de cálculo ou modelação, a identificação da posição da linha de costa foi realizada com base nos levantamentos do programa COSMO (2018). As 19 obras de defesa costeira existentes no trecho Barra-Vagueira foram incorporadas no domínio de modelação (8 esporões e 11 obras longitudinais aderentes) e as condições fronteira da grelha modelada foram definidas para extrapolação das condições de transporte sedimentar verificadas nos trechos elementares vizinhos às fronteiras (Figura 1a). A partir da posição da linha de costa foi construída uma malha topo hidrográfica regular segundo duas direções ortogonais (malha regular com 20 m de resolução na direção Oeste Este e 20 m de resolução na direção Sul-Norte), com uma extensão de 6x12 km<sup>2</sup>. A batimetria foi considerada regular e paralela baseada no perfil de Dean e a topografia foi aproximada a um declive constante e igual a 3%, tendo sido adotado como referencial o zero hidrográfico (ZH) (Figura 1).

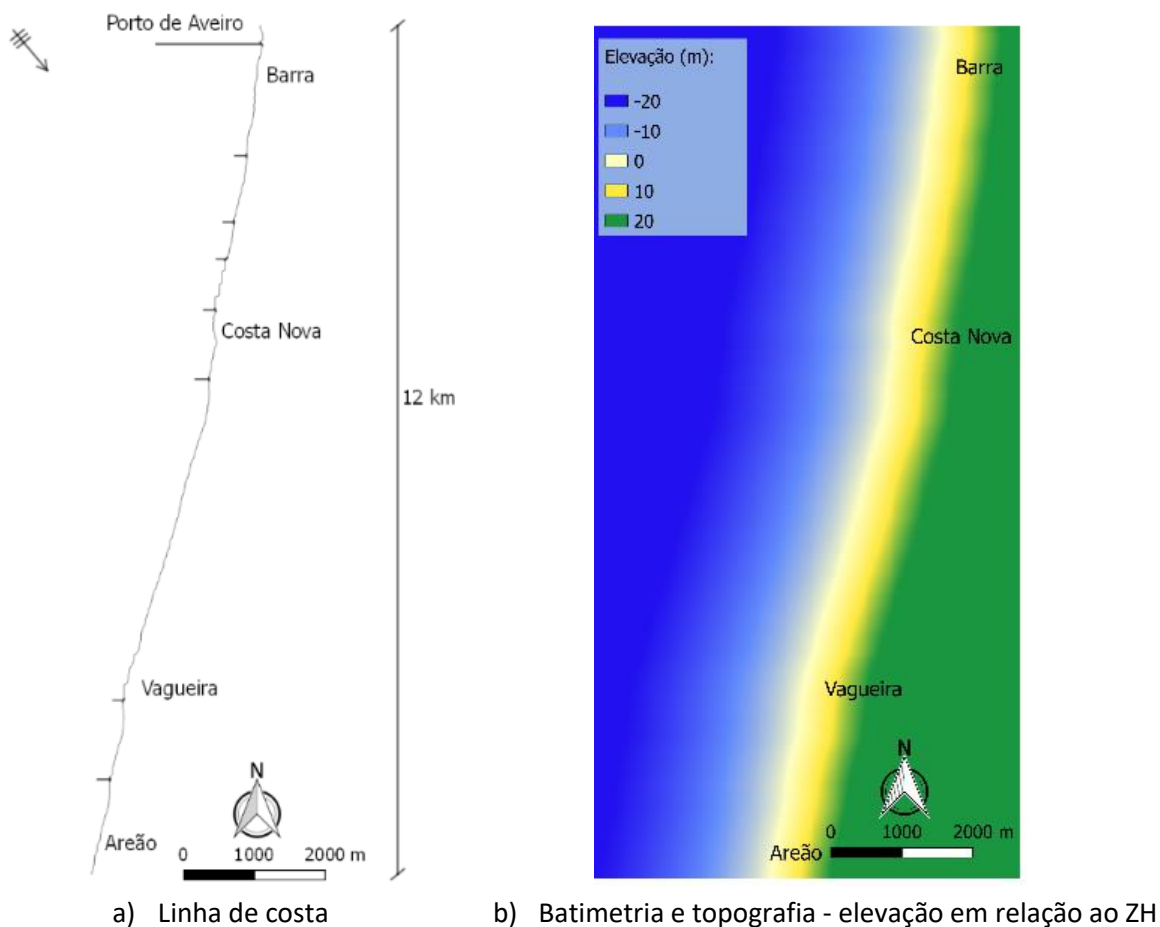


Figura 1. Domínio de modelação: trecho Barra-Vagueira

## 2.2. Clima de agitação

A agitação marítima incidente é considerada o principal agente de transporte de sedimentos que ocorre ao longo do litoral. A região costeira de Aveiro caracteriza-se por um clima de agitação marítima muito energético que resulta num elevado potencial de transporte sólido de sedimentos. Esta elevada capacidade de transporte de sedimentos associada ao défice sedimentar registado na região costeira localizada a Sul do Porto de Aveiro repercute-se num recuo generalizado da posição da linha de costa. Com o objetivo de se proceder à modelação numérica e à projecção de cenários futuros de evolução da posição da linha de costa, começou se por caracterizar o clima de agitação marítima representativo da zona de estudo e a correspondente capacidade de transporte sólido longitudinal.

A agitação marítima pode ser prevista através de modelos numéricos que resolvem equações que descrevem os processos de geração das ondas pelo vento (WMO, 1988). No presente estudo, foram consideradas 3 séries de climas de agitação marítima produzidas por modelos numéricos, para caracterizar a zona de estudo num cenário passado e em dois cenários futuros, considerando o efeito de alterações climáticas. No âmbito do projeto de investigação MarRisk (2017), a MeteoGalicia realizou uma avaliação das tendências passadas, presentes, regimes médios e extremos de agitação marítima na costa Atlântica da Península Ibérica com recurso a diferentes modelos do projeto CMIP5 (*Coupled Model Intercomparison Project 5*). Os resultados indicaram que o modelo MIROC5 (*Model for Interdisciplinary Research On Climate*) apresentava o melhor ajuste. Assim, os dados de agitação

obtidos após a realização do *downscaling* dinâmico foram estimados para um ponto ao largo na região costeira de Aveiro (10°W 40.50°N). A primeira série considerada, designada como Histórica, permitiu caracterizar o clima de agitação passado, contemplando 45 anos de registos (1960 a 2005). As séries futuras, designadas como RCP4.5 e RCP8.5 (*RCP - Representative Concentration Pathway*) caracterizam o clima de agitação futuro para diferentes evoluções de concentrações de gases de efeito de estufa, correspondendo a 20 anos de registos (2026 a 2045). Na série RCP4.5, as emissões de gases atingem o máximo até 2040 e depois decrescem. A série RCP8.5 corresponde ao cenário mais desfavorável, considerando-se que não são reduzidas as emissões de gases efeito de estufa, sendo as emissões de gases crescentes no tempo (IPCC, 2014).

As séries de registos de agitação marítima consideradas representam características da agitação ao largo. A agitação ao largo é entendida como agitação em águas profundas, que corresponde a uma profundidade superior a metade do comprimento de onda. No entanto, a quantificação do transporte sólido longitudinal de sedimentos ao longo da costa depende das características da agitação na rebentação. Assim, partindo das características da agitação ao largo, efetuou-se o estudo da propagação da onda, de forma a se obterem as características da agitação na rebentação. Na propagação da onda consideraram-se de forma simplificada os fenómenos de empolamento e refração, assumindo que a zona de estudo apresenta uma batimetria regular e paralela. Estes fenómenos ocorrem devido à interação da onda com as fronteiras sólidas naturais e artificiais (fundos, praias, estruturas portuárias e de defesa costeira).

No processo de cálculo começou-se por estimar a profundidade em que ocorre a rebentação,  $h_b$ , através do critério do índice de profundidade de rebentação (Eq. 1), com base no pressuposto inicial de que a altura de onda na rebentação é aproximadamente igual à altura de onda ao largo, considerando-se  $\gamma_b = 0.78$ .

$$\gamma_b = \frac{H_b}{h_b} \quad \text{Eq. 1}$$

O ângulo de incidência da onda na rebentação,  $\theta_b$ , foi calculado através da aplicação da lei de Snell, que relaciona a direção de propagação da onda com o comprimento de onda, Eq. 2, onde  $L_b$  representa o comprimento de onda na rebentação,  $L_0$  o comprimento de onda ao largo e  $\theta_0$  o ângulo de incidência da onda ao largo. Para o cálculo do ângulo de incidência da onda, por simplificação, considerou-se que a batimetria é paralela à linha de costa e define um ângulo aproximadamente igual a 15° (ângulo da linha de costa com o Norte, medido no sentido horário), em todo o trecho costeiro Barra-Vagueira.

$$\frac{\sin \theta_b}{L_b} = \frac{\sin \theta_0}{L_0} \quad \text{Eq. 2}$$

A altura de onda na rebentação foi obtida através da aplicação do coeficiente de empolamento ( $K_s$ ) e do coeficiente de refração ( $K_r$ ) à altura de onda ao largo (Eq. 3).

$$H_b = K_s K_r H_0 \quad \text{Eq. 3}$$

O coeficiente de refração depende do ângulo de incidência da onda, ao largo e na rebentação, Eq. 4, e o coeficiente de empolamento depende da profundidade ( $h_b$ ) e do comprimento de onda na rebentação ( $L_b$ ), Eq. 5. O comprimento de onda na rebentação é determinado através da Eq. 6 (Silva, 2010).

$$K_r = \sqrt{\frac{\cos \theta_0}{\cos \theta_b}} \quad \text{Eq. 4}$$

$$K_s = \frac{\cosh \frac{2\pi h_b}{L_b}}{\sqrt{\sinh \frac{2\pi h_b}{L_b} \cosh \frac{2\pi h_b}{L_b} + \frac{2\pi h_b}{L_b}}} \quad \text{Eq. 5}$$

$$L_b = L_0 \tanh \frac{2\pi h_b}{L_b} \quad \text{Eq. 6}$$

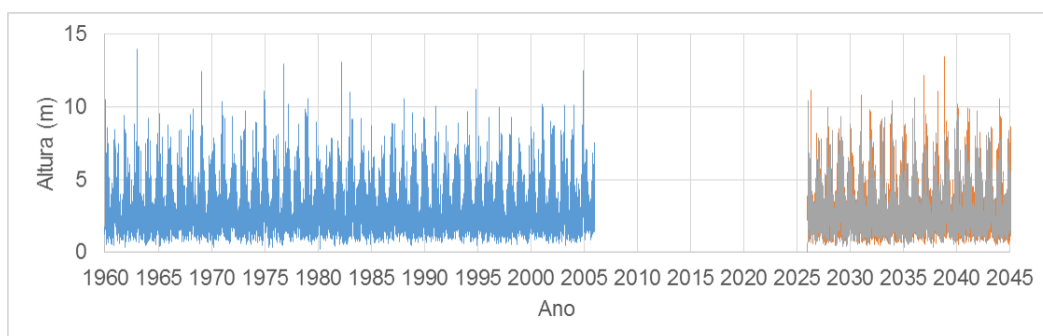
O comprimento da onda ao largo é calculado através da Eq. 7.

$$L_0 = \frac{gT^2}{2\pi} \quad \text{Eq. 7}$$

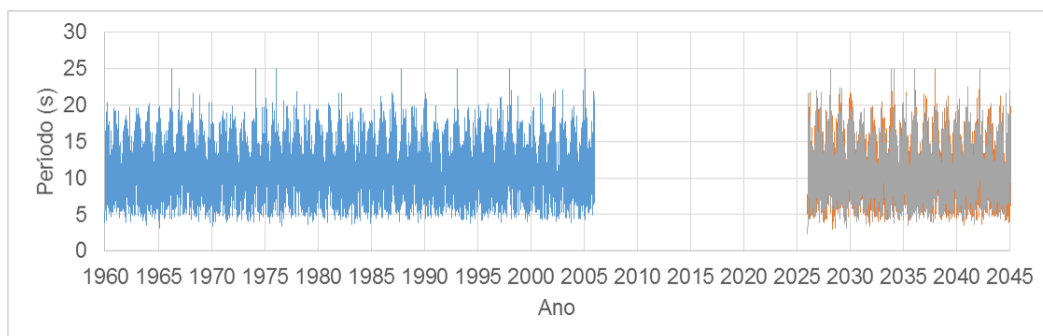
Conhecidas as características da onda na rebentação, aplicou-se a fórmula CERC (Eq. 8) para quantificar o volume de sedimentos em transporte. A fórmula CERC depende de parâmetros como: coeficiente empírico ( $k$ ); massa volúmica da água ( $\rho$ ); massa volúmica dos sedimentos ( $\rho_s$ ); aceleração da gravidade ( $g$ ); porosidade ( $n$ ); índice de profundidade de rebentação ( $\gamma_b$ ); altura de onda significativa ( $H_{sb}$ ); e ângulo de incidência da onda na rebentação ( $\theta_b$ ). Esta expressão é homogénea em termos de unidades, sendo o resultado uma relação do volume de sedimentos que atravessa uma secção transversal à linha de costa, em determinada unidade de tempo (CERC, 1984).

$$Q = k \left( \frac{\rho \sqrt{g}}{16\gamma_b^{\frac{1}{2}} (\rho_s - \rho) (1 - n)} \right) H_{sb}^{5/2} \sin(2\theta_b) \quad \text{Eq. 8}$$

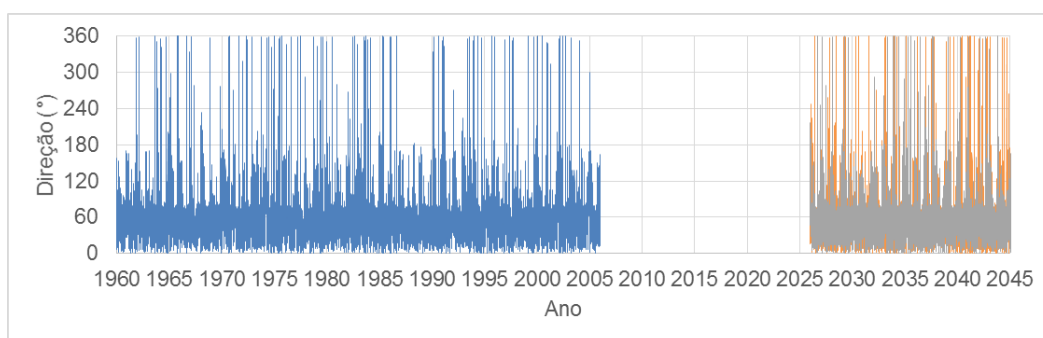
As três séries de clima de agitação ao largo consideradas neste estudo (Histórica, RCP4.5 e RCP8.5) apresentam a sequência cronológica representada na Figura 2. Na Tabela 1 e Tabela 2 apresentam-se os valores mínimos, médios e máximos das características da agitação marítima obtidos para as três séries, ao largo e após a propagação até à rebentação. Foi com base nos valores obtidos para a agitação na rebentação que se quantificou o transporte sólido longitudinal de sedimentos para os três cenários de agitação.



a) Altura de onda



b) Período de onda



c) Direção da onda (ângulo da onda com o Norte definido no sentido anti-horário)

— Histórica — RCP4.5 — RCP8.5

Figura 2. Séries cronológicas das características da agitação marítima ao largo

Tabela 1. Valores mínimos, médios e máximos das alturas de onda ao largo e na rebentação, para as três séries de agitação

Série	Altura de onda ao largo (m)			Altura de onda na rebentação (m)		
	Mín.	Méd.	Máx.	Mín.	Méd.	Máx.
Histórica	0.23	2.67	13.97	0.02	3.05	15.42
RCP 4.5	0.44	2.61	13.47	0.04	2.95	14.61
RCP 8.5	0.05	2.58	10.61	0.03	2.92	11.83

Tabela 2. Valor médio da direção das ondas ao largo e na rebentação, para as três séries de agitação (ângulo da onda com o Norte, definido no sentido anti-horário)

Série	Direção da onda ao largo (°)	Direção da onda na rebentação (°)
Histórica	55.33	68.98
RCP 4.5	53.76	68.25
RCP 8.5	53.49	68.20

O transporte sólido longitudinal de sedimentos foi calculado através da fórmula CERC e o valor do coeficiente empírico  $k$  foi definido de forma a que o resultado obtido para a série Histórica se aproximasse do valor de deriva litoral referido no relatório do Grupo de Trabalho de Litoral para o setor costeiro em análise, isto é,  $1.1 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{ano}$  (Santos *et al.*, 2014). Na Tabela 3 apresentam-se os parâmetros adotados para aplicação da fórmula. O transporte sólido foi quantificado na direção Norte-Sul (N-S), na direção Sul-Norte (S-N), valor líquido (diferença entre as componentes N-S e S-N) e bruto (soma das componentes N-S e S-N).

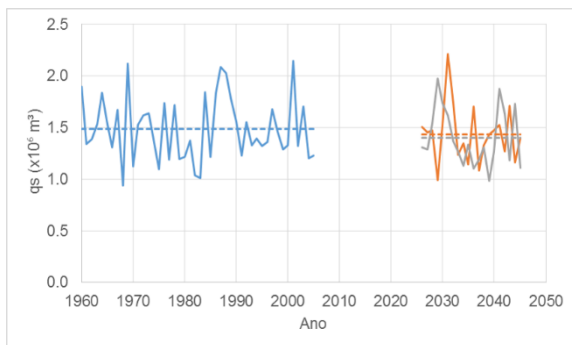
Tabela 3. Valores adotados para aplicação da fórmula CERC

$k$	$\rho$	$g$	$\Upsilon_b$	$\rho_s$	$n$
(-)	( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	( $\text{m}/\text{s}^2$ )	(-)	( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	(-)
0.04	1027	9.81	0.78	2650	0.4

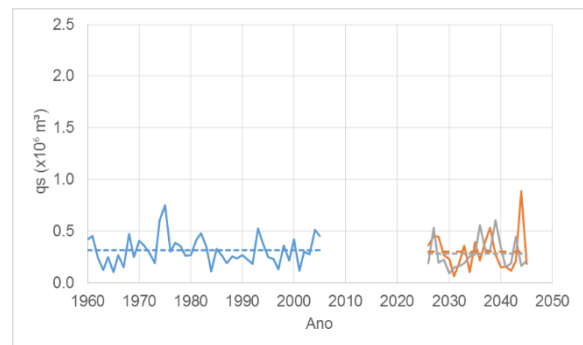
Na Figura 3 apresentam-se os resultados cronológicos obtidos para o transporte sólido anual de cada série de registos de ondas, sendo sintetizados na Tabela 4 os valores médios de transporte que caracterizam cada série. A análise dos resultados permite verificar que o transporte de sedimentos ocorre predominantemente na direção N-S, sendo a componente de transporte nessa direção significativamente superior à componente na direção S-N (valores médios de  $1.49 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{ano}$  e de  $0.31 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{ano}$  respetivamente para N-S e S-N, na série Histórica). Comparando os resultados obtidos para a série Histórica com os valores obtidos para as séries de cenários futuros (RCP4.5 e RCP8.5), conclui-se que o transporte sólido de sedimentos tende a decrescer nos cenários futuros devido à diminuição do caudal sólido em transporte na direção N-S, uma vez que, o valor do transporte na direção S-N é praticamente igual nas três séries de climas de agitação (Tabela 4 e Figura 3). A justificação para a diminuição do transporte sólido nas séries de cenários futuros relaciona-se com o facto dos rumos de proveniência das ondas apresentarem uma maior dispersão no quadrante W-N, verificando-se uma diminuição da frequência das ondas próximas dos rumos que potenciam o maior transporte sólido longitudinal, que no trecho em análise corresponde a um rumo ao largo de aproximadamente  $33^\circ\text{N}$ , no sentido anti-horário (Figura 4 e Figura 5).

Tabela 4. Valores médios do transporte sólido longitudinal ( $\times 10^6 \text{ m}^3/\text{ano}$ ), obtidos por aplicação da fórmula CERC

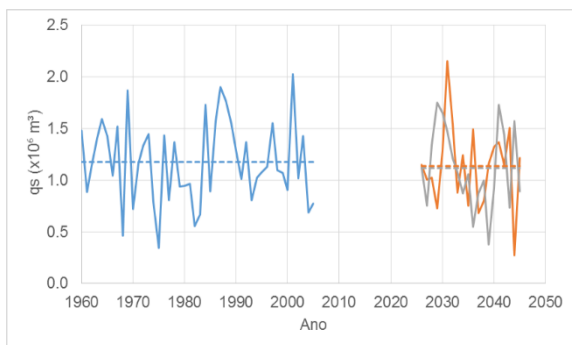
Série	N-S	S-N	Líquido	Bruto
Histórica	1.49	0.31	1.17	1.8
RCP 4.5	1.27	0.30	0.97	1.57
RCP 8.5	1.24	0.30	0.95	1.54



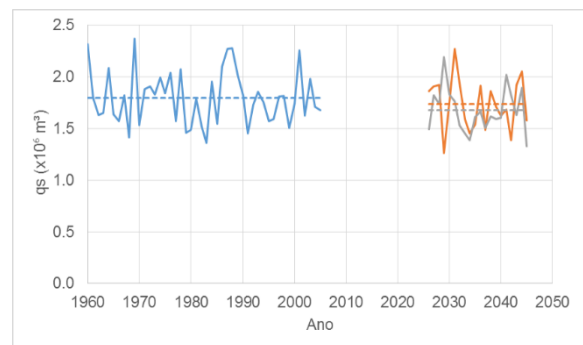
a) Direção N-S



b) Direção S-N



c) Líquido



d) Bruto

— Transporte sólido anual - série Histórica      — Transporte sólido anual - série RCP4.5      — Transporte sólido anual - série RCP8.5  
 - - - Valor médio de transporte sólido - série Histórica      - - - Valor médio de transporte sólido - série RCP4.5      - - - Valor médio de transporte sólido - série RCP8.5

Figura 3. Séries cronológicas de transporte longitudinal de sedimentos ( $q_s$ )

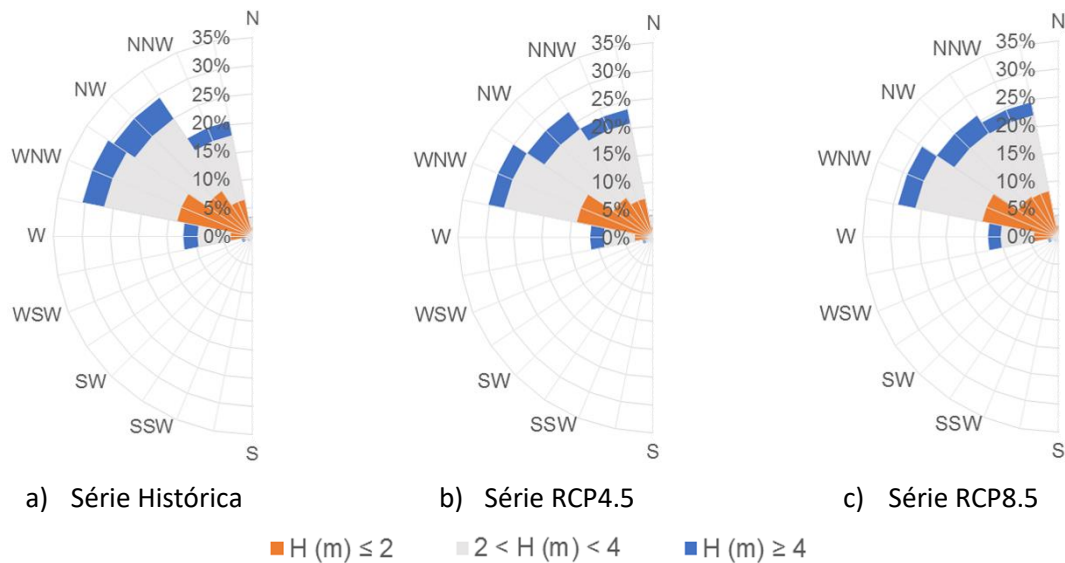


Figura 4. Rosa de rumos de alturas de onda ao largo ( $H$ ), para as diferentes séries de climas de agitação

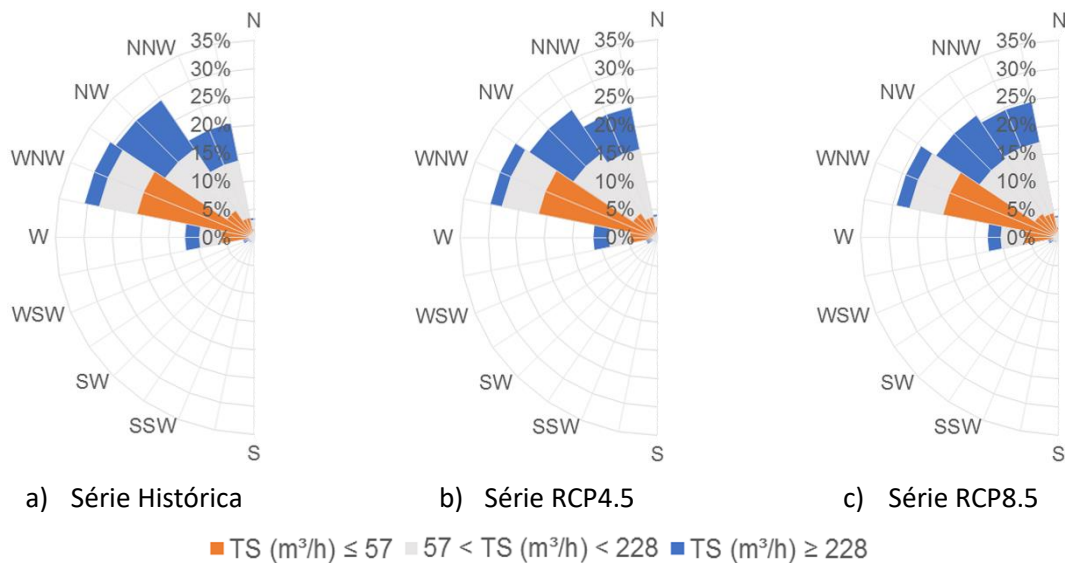


Figura 5. Rosa de rumos de transporte longitudinal de sedimentos ( $TS$ ), para as diferentes séries de climas de agitação

### 2.3. Calibração das simulações

O parâmetro considerado para calibração das simulações, foi o resultado da projeção da posição da linha de costa num horizonte temporal de 10 anos. O clima de agitação considerado correspondeu aos últimos 10 anos de registos da série Histórica (1996 a 2005) e definiu-se o cálculo do transporte sólido longitudinal de acordo com a fórmula CERC (Tabela 5). O valor do parâmetro de calibração  $k$  foi definido igual a 0.0025, diferente do valor adotado na avaliação prévia dos caudais sólidos de transporte longitudinal (secção 2.2). A diferença entre os dois valores de  $k$  adotados relaciona-se com o facto de ser difícil calibrar simultaneamente a posição da linha de costa e os caudais sólidos

longitudinais em transporte, como constatado em trabalhos anteriores (Baptista *et al.* 2014 e Universidade de Aveiro, 2015). Assim, os valores de caudal sólido longitudinal obtidos no modelo numérico devem ser ajustados em função da proporção entre os valores de  $k$  considerados na formulação de CERC.

Tabela 5. Valores adotados para aplicação da fórmula CERC, no modelo numérico LTC

$k$	$\rho$	$g$	$\Upsilon_b$	$\rho_s$	$n$
(-)	(kg/m <sup>3</sup> )	(m/s <sup>2</sup> )	(-)	(kg/m <sup>3</sup> )	(-)
0.0025	1027	9.81	0.78	2650	0.4

Na análise realizada dividiu-se a extensão de linha de costa do sector Barra-Vagueira em 12 trechos de 1 km de comprimento, permitindo obter a taxa média de variação da posição da linha de costa por cada trecho costeiro (Figura 6). Na Tabela 6 apresentam-se os resultados obtidos, verificando-se que a maioria dos trechos apresenta taxas de recuo da ordem de 3 m/ano. Os valores obtidos através de modelação numérica foram confrontados com valores da taxa de erosão propostos em estudos desenvolvidos por diversos autores, para a região em análise. Segundo Veloso-Gomes *et al.* (2006), entre 1980 e 1990 as taxas de recuo da posição da linha de costa na Costa Nova e na Vagueira foram estimadas em 3.7 e 3.9 m/ano, respetivamente. Lira *et al.* (2016) indicam que nos últimos 50 anos o sector em análise atingiu taxas de recuo da ordem de 8 m/ano, com recuos médios na globalidade do sector Barra-Vagueira na ordem dos 3.74 m/ano. Os resultados da simulação numérica apontam para recuos médios globais de 2.34 m/ano. Na Figura 7 comparam-se os valores médios das taxas de recuo da posição da linha costa propostas por Lira *et al.* (2016) ao longo de diferentes transeptos, com os valores médios obtidos numericamente em cada um dos trechos do sector em análise.

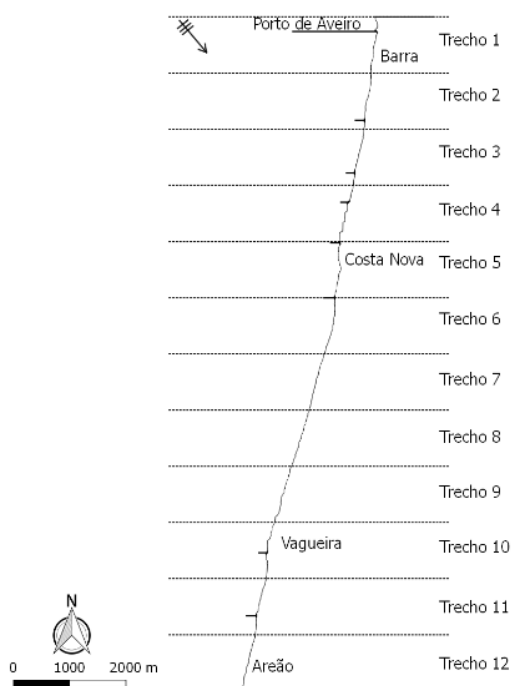
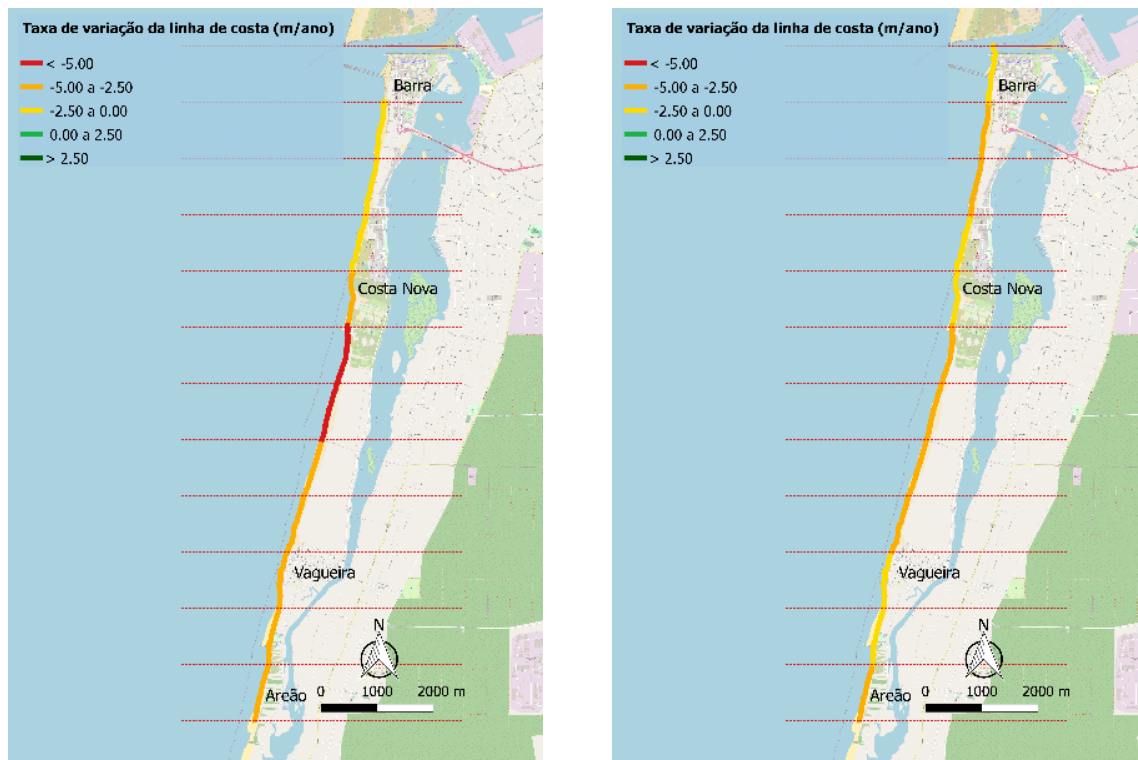


Figura 6. Divisão da linha de costa em trechos costeiros

Tabela 6. Taxas médias de recuo da posição da linha de costa, por trecho costeiro, ao fim de 10 anos de simulação

Trecho	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
<b>Recuo (m/ano)</b>	0.59	2.82	3.18	0.48	2.34	3.66	3.32	3.39	3.18	1.41	2.25	3.63



a) 50 anos (adaptado de Lira *et al.*, 2016)

b) 10 anos de simulação numérica

Figura 7. Variação média no tempo, da posição da linha de costa

A análise da Figura 7 permite verificar que nos trechos 4, 8, 9 e 12, os recuos médios da posição da linha de costa propostos por Lira *et al.* (2016) são similares aos obtidos através da simulação numérica, conduzindo a classificações iguais entre as projeções e a referência bibliográfica. Nos trechos 2 e 3, o modelo numérico sobreavalia as taxas de erosão, por comparação com os valores médios de Lira *et al.* (2016). Nos restantes trechos, o modelo numérico estima taxas de recuo da posição da linha de costa inferiores aos valores médios de Lira *et al.* (2016).

Apesar de se registarem algumas diferenças naturais neste tipo de modelação (devidas aos pressupostos de modelação, dificuldade em reproduzir as ações naturais e antrópicas ocorridas no período de análise, etc.), a comparação realizada permite verificar que as taxas de recuo médias obtidas através de modelação numérica são próximas dos valores referidos na bibliografia, concluindo-se que o processo de calibração está ajustado, permitindo a avaliação qualitativa de comportamentos similares em cenários futuros.

## 2.4. Validação das simulações

Para realizar o processo de validação do comportamento do modelo numérico, simulou-se a evolução da posição da linha de costa incorporando-se no *setup* de modelação as intervenções de alimentação artificial de sedimentos realizadas no trecho Barra-Vagueira, no período entre 2008 e 2017. Desta forma, foi possível comparar as taxas de recuo da posição da linha de costa por trecho costeiro obtidas no processo de validação, com as obtidas previamente no processo de calibração, avaliando-se a capacidade de reproduzir o impacto que as intervenções de alimentação artificial de sedimentos têm provocado na zona de estudo. A escolha deste período temporal de análise relaciona-se com o facto de se ter constatado que as intervenções de alimentação artificial no sector Barra-Vagueira se tornaram mais frequentes após o ano de 2009 (Pinto *et al.*, 2018).

O local de deposição dos sedimentos, o momento de intervenção e os volumes considerados na alimentação foram definidos com base no relatório de Pinto *et al.* (2018). Segundo este relatório, no período de 2009 a 2017 foram realizadas sete intervenções de alimentação artificial de sedimentos entre a Barra e a Vagueira, correspondendo a um volume total adicionado ao sistema costeiro de aproximadamente  $4.29 \times 10^6 \text{ m}^3$  (Tabela 7). Para as intervenções de alimentação artificial de sedimentos, cuja consulta da bibliografia existente não permitiu aferir com exatidão o local de deposição, a escolha para a definição da intervenção no modelo numérico considerou os seguintes limites: profundidade de fecho do perfil ativo de praia (DoC), linha de costa (LC) e limite de espraiamento da onda (Ru).

Tabela 7. Intervenções de alimentações artificiais de sedimentos realizadas no trecho Barra-Vagueira

Ano	Concelho	Volume ( $\times 10^6 \text{ m}^3$ )	Tipologia de deposição
2009	Costa Nova	1.10	Praia imersa (-5 m ZH / LC)
2010	Costa Nova	0.05	Praia imersa (-5 m ZH / LC)
2012	Praia Nova (Praia da Barra)	0.17	Praia imersa (DoC / LC)
2013	Praia Nova (Praia da Barra) e Costa Nova	1.61	Praia imersa (DoC / LC)
2014	Praia da Barra	0.22	Praia emersa (LC / Ru)
2016	Costa Nova - Mira	1.00*	Duna
2017	Praias da Costa Nova	0.15	Praia imersa (-6 m ZH / LC)

\*Nas simulações apenas foi considerado o volume de  $0.76 \times 10^6 \text{ m}^3$ , correspondendo ao volume de sedimentos depositado na 1ª fase do reforço do cordão dunar, entre a Costa Nova e Mira (Polis, 2015).

Na Figura 8 representam-se os locais definidos para a deposição das intervenções de alimentação artificial realizadas entre 2008 e 2017.

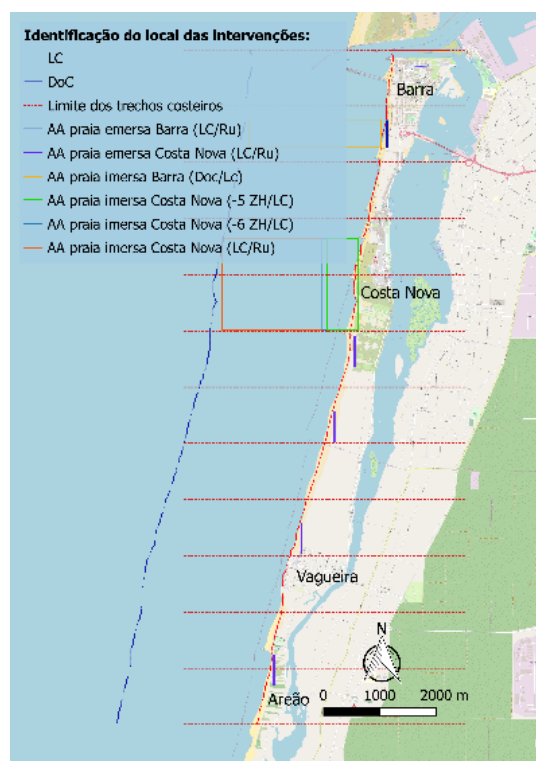


Figura 8. Área de deposição dos sedimentos, consideradas na simulação em modelo numérico

Na Tabela 8 e na Figura 9 comparam-se as taxas de variação da posição da linha de costa obtidas na calibração do modelo, sem intervenções de alimentação artificial (sem AA), com as obtidas no processo de validação, considerando intervenções de alimentação artificial (com AA). A análise dos resultados permite concluir que a introdução das alimentações artificiais de sedimentos no modelo se repercute numa diminuição das taxas de recuo da posição da linha de costa, passando o recuo médio anual global a situar-se na ordem de 1.89 m/ano (era de 2.52 m/ano). O impacto mais significativo é sentido nos trechos 2, 5, 6, 7 e 11, respetivamente com ganhos de 0.87 m/ano, 4.10 m/ano, 0.68 m/ano, 0.43 m/ano e 0.79 m/ano, por comparação com a situação sem alimentação. Este comportamento é confirmado nos registos de variação da posição da linha de costa observado nos últimos anos, no sector costeiro Barra-Vagueira (Fernandéz-Fernandéz, 2019).

Tabela 8. Recuo médio da posição da linha de costa (m/ano), por trecho costeiro, ao fim de 10 anos de simulação, sem e com alimentações artificiais de sedimentos

Trecho	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Sem AA	0.59	2.82	3.18	0.48	2.34	3.66	3.32	3.39	3.18	1.41	2.25	3.63
Com AA	0.59	1.95	3.17	0.36	-1.76	2.98	2.89	3.39	2.79	1.41	1.46	3.47

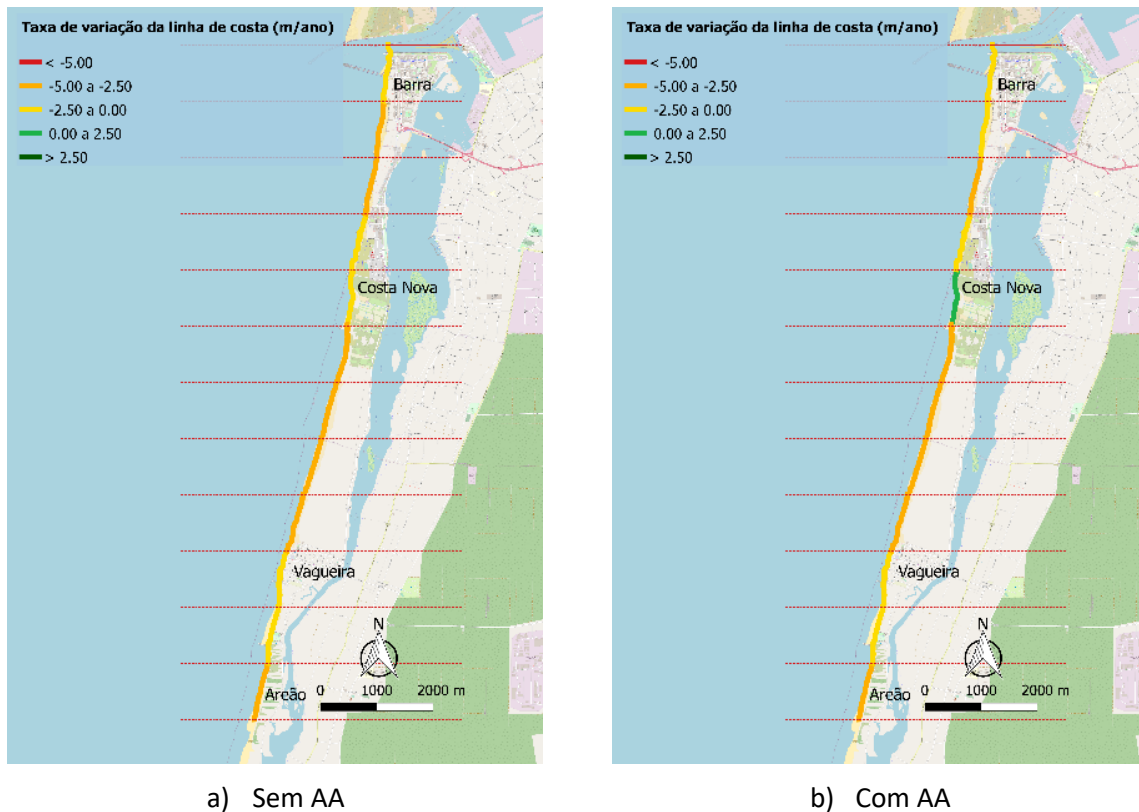


Figura 9. Variação média da posição da linha de costa, obtida através de simulação numérica

Além dos valores já apresentados, o impacto das alimentações artificiais de sedimentos no tempo, por trecho costeiro, também foi avaliado em termos de áreas de território mantido/ganho e volume de sedimentos mantido no trecho (Figura 10). Para essa análise comparou-se a posição da linha de costa e a topo-hidrografia da região em estudo, na situação de evolução natural, sem alimentação artificial, com a situação de serem realizadas alimentações artificiais. As intervenções de alimentação artificial de sedimentos realizadas entre a Barra e a Vagueira resultam na manutenção ou ganho de território e acréscimo do volume de sedimentos nos trechos, fazendo-se sentir com maior intensidade nos trechos específicos em que foram depositados os sedimentos.

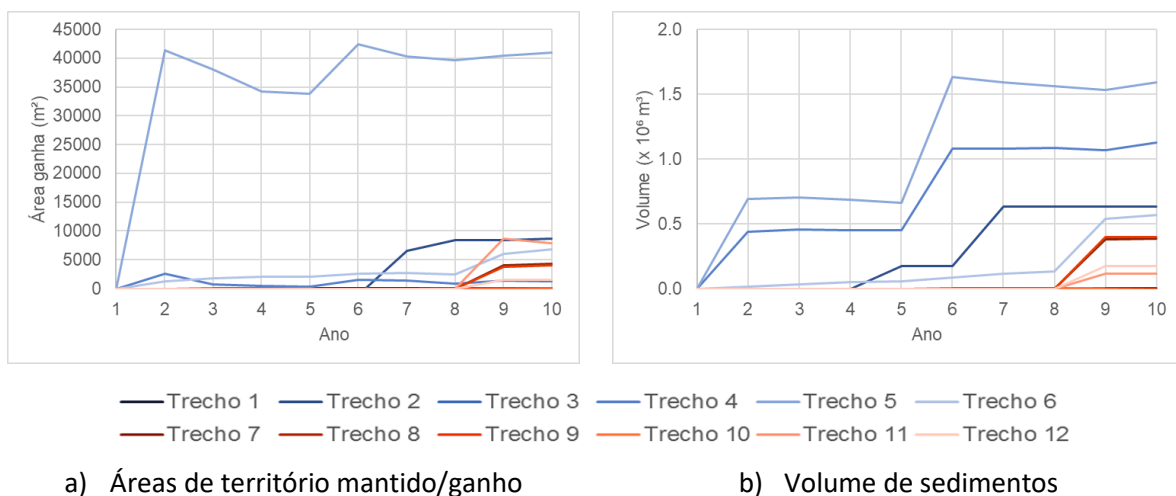


Figura 10. Impacto das alimentações artificiais de sedimentos por trecho costeiro, ao longo de 10 anos de simulação numérica

Os resultados obtidos permitem concluir que a modelação numérica consegue reproduzir genericamente o comportamento do sector costeiro Barra-Vagueira, sendo também sensível ao impacto das intervenções de alimentação artificial do sistema costeiro. Verifica-se que o impacto da alimentação artificial de sedimentos se propaga no tempo, mas as zonas mais influenciadas pelas intervenções são as que correspondem aos locais de depósito. Este fato pode dever-se à necessidade de reduzir a capacidade de transporte sedimentar longitudinal, para reproduzir convenientemente as taxas de recuo da linha de costa (aspeto referido no processo de calibração e evidenciado no valor de  $k$  das Tabela 3 e Tabela 5). Assim, os impactos positivos a sotamar podem estar a ser subavaliados, numa análise que é, portanto, conservativa.

## 2.5. Definição da situação de referência

Com o objetivo de se definir uma situação de referência para a projeção da evolução da linha de costa nos cenários futuros de transposição de sedimentos, foi avaliado o impacto de diferentes cenários de climas de agitação marítima futuros (incerteza associada à projeção de ações futuras) na projeção da evolução da posição da linha de costa, com o objetivo de se definir a agitação a considerar na modelação de cenários futuros. Para tal, na série de registos de ondas Histórica, foram identificados os 5 anos mais representativos da capacidade média anual de transporte sólido longitudinal (1962, 1971, 1995, 1996 e 1998). Foram também identificados anos extremos, representando os dois anos com maior capacidade de transporte sedimentar longitudinal (2001 e 1987) e com menor capacidade de transporte sedimentar longitudinal (1975 e 1968) (Figura 11).

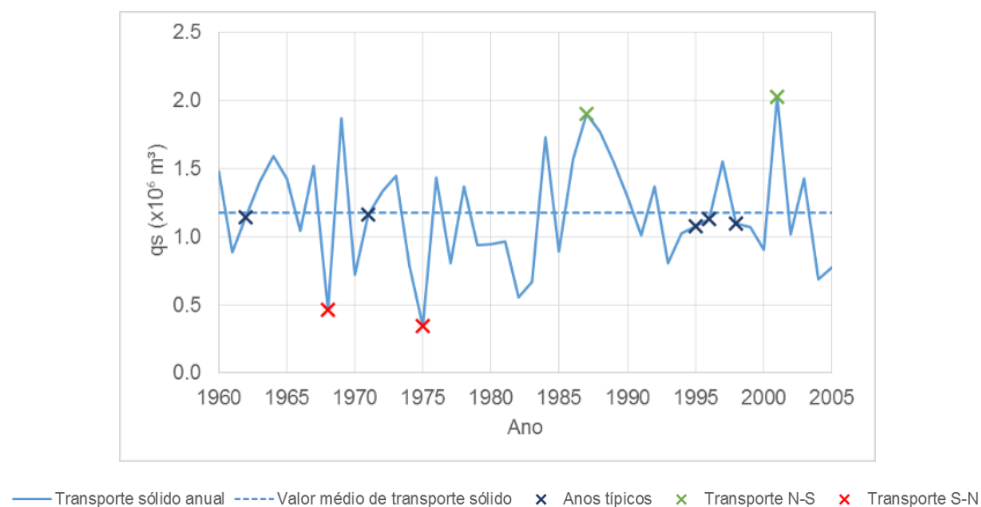


Figura 11. Valores líquidos de transporte sólido longitudinal anual (resultados da fórmula CERC): identificação dos anos típicos e anos extremos da série Histórica

Com os registos dos anos identificados como típicos e atípicos da série Histórica, geraram-se 14 cenários de agitação marítima, combinando os registos com diferentes sequências cronológicas e repetindo-se o cenário de agitação por seis vezes, a cada 5 anos, até perfazer uma série de 30 anos (Tabela 9).

Tabela 9. Cenários de sequência de agitação marítima gerados com base na série Histórica

Cenário	Registos de ondas considerados	Cenário	Registos de ondas considerados
A	1962; 1971; 1995; 1996; 1998	AA	1998; 1996; 1995; 1971; 1962
B	2001; 1962; 1971; 1995; 1996	BB	1998; 1996; 1995; 1971; 1987
C	1975; 1962; 1971; 1995; 1996	CC	1998; 1996; 1995; 1971; 1968
D	2001; 1962; 1987; 1971; 1995	DD	1998; 1996; 1987; 1995; 2001
E	1975; 1962; 1968; 1971; 1995	EE	1998; 1996; 1968; 1995; 1975
F	2001; 1962; 1975; 1971; 1995	FF	1998; 1996; 1968; 1995; 1987
G	1975; 1962; 2001; 1971; 1995	GG	1998; 1996; 1987; 1995; 1968

Através da utilização do modelo numérico LTC, modelou-se a evolução da posição da linha de costa num horizonte de 30 anos, obtendo-se a taxa média de variação da posição da linha de costa no trecho Barra-Vagueira ao longo do período de simulação (Figura 12). Os pressupostos de simulação relacionados com a batimetria e topografia da área de estudo, posição da linha de costa, condições fronteira da grelha modelada e parâmetros relacionados com a fórmula CERC foram mantidos iguais aos adotados no processo de calibração.

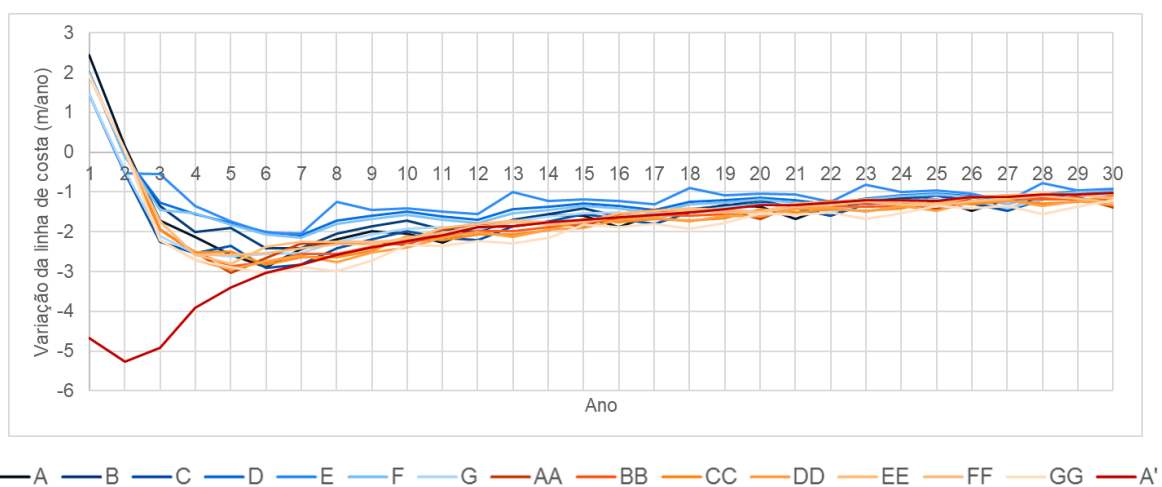


Figura 12. Influência do clima de agitação marítima na variação média da posição da linha de costa ao longo do tempo

Independentemente do cenário de agitação marítima considerado, o recuo médio da posição da linha de costa tende a convergir para um valor da ordem de 1 m/ano, ao fim de 30 anos de modelação (Figura 12). No entanto, a análise realizada indica que há um avanço médio da posição da linha de costa no primeiro ano de simulação. Considera-se que, este comportamento não é representativo do trecho em análise, uma vez que, o trecho Barra-Vagueira se apresenta em erosão, no cenário de não serem adotadas medidas de mitigação da erosão costeira. Os resultados também mostram efeitos de

sazonalidade do clima de agitação, com oscilações nas taxas de variação média da posição da linha de costa ao longo do tempo.

Com o objetivo de eliminar os dois comportamentos descritos anteriormente, verificou-se que o resultado da modelação melhora se for considerado um período de simulação prévio para estabilizar a batimetria e topografia da área de estudo e se for eliminada a sazonalidade associada aos registos cronológicos das ondas. Assim, definiu-se que a modelação de cenários futuros de evolução da posição da linha de costa deve ser realizada segundo os seguintes pressupostos de simulação:

- 1) O domínio de cálculo para consideração dos resultados de simulação deve ter um período prévio de 1 ano de simulação, permitindo que o modelo estabilize as características de batimetria e topografia;
- 2) O clima de agitação deve considerar exatamente o mesmo registo de alturas e direção das ondas, mas deve ser eliminado o comportamento sazonal ao ser gerada uma sequência aleatória de ocorrência das ondas, para introdução no *setup* do modelo.

Na Figura 12, o resultado do cenário A' corresponde ao estudo da evolução da posição da linha de costa a 30 anos, considerando os dois pressupostos de simulação indicados anteriormente. Neste caso, os registos de agitação marítima considerados são exatamente os mesmos que os utilizados no Cenário A, mas ordenados de maneira arbitrária através da função *random* do Excel, eliminando-se assim o efeito da sazonalidade. Como se pode verificar, ao fim do primeiro ano de simulação, o Cenário A' apresenta uma situação de erosão média elevada, que vai convergindo para o equilíbrio. Neste cenário também são eliminadas as oscilações na evolução da posição da linha de costa, sem prejuízo nos valores médios das taxas de recuo, uma vez que, apresentam ordens de grandeza idênticas aos restantes cenários de agitação.

### **3. Modelo numérico CS-Model**

A evolução morfológica do litoral dependente de diversos processos costeiros que atuam a diferentes escalas temporais. Devido à complexidade em reproduzir todos esses processos, é comum os modelos numéricos focarem-se num conjunto limitado de processos, que atuam sobre determinado intervalo de tempo, sendo os modelos divididos em três tipos, consoante os processos de evolução da morfologia de praia que descrevem: modelos de curto prazo, modelos de médio prazo e modelos de longo prazo. A escala temporal associada aos modelos de curto prazo relaciona-se com períodos de tempo que variam de horas a dias, por exemplo erosão das dunas devido a tempestades. Os modelos de médio prazo abrangem processos cujo tempo de atuação varia de meses a um ano, sendo associados geralmente a processos relacionados com sazonalidade. Os modelos de longo prazo simulam processos cujas consequências na morfologia costeira se repercutem de décadas a séculos, por exemplo subida do nível médio da água do mar (Marinho, 2018).

A nível da evolução do perfil transversal de praia, ocorrem processos costeiros a diferentes escalas de tempo. Segundo Larson *et al.* (2016), os processos transversais a considerar na modelação numérica da evolução transversal da morfologia de praia devem incluir os processos que atuam a médio/longo prazo (por exemplo processos relacionados com transporte de sedimentos devido à ação do vento, troca de material barra-berma, etc.) e processos de curta duração cujos efeitos na alteração do perfil de praia se repercutem por longos períodos (por exemplo erosão da duna induzida por tempestades). No presente estudo, as projeções da evolução morfológica dos perfis transversais de praia foram

realizadas através da aplicação do modelo numérico CS-Model (Larson *et al.*, 2016; Palalane *et al.*, 2016; Marinho, 2018).

O CS-Model é um modelo numérico de evolução dos perfis transversais de praia que simula os processos transversais numa perspetiva de médio/longo prazo, tendo em conta os processos relativos à erosão da duna, *overwash*, transporte eólico de sedimentos e troca de material barra-berma. O modelo descreve a evolução do perfil transversal de praia através de um conjunto de parâmetros morfológicos, recorrendo a um conjunto de equações de conservação de massa combinadas com equações que descrevem os processos transversais de transporte de sedimentos (Larson *et al.*, 2016; Marinho, 2018).

Para a aplicação do modelo, o utilizador começa por representar uma aproximação do perfil transversal de praia de acordo com o esquema utilizado pelo modelo apresentado na Figura 13, definindo os seguintes parâmetros: altura da duna ( $S$ ), localização do pé da duna do lado de terra e do lado de mar ( $Y_L$  e  $Y_S$  respetivamente), posição da crista da berma ( $Y_B$ ), volume da barra ( $V_B$ ), altura da berma ( $D_B$ ), inclinações das faces da duna ( $\beta_L$  e  $\beta_S$ ), inclinação da berma ( $\beta_F$ ) e profundidade de fecho ( $D_C$ ). Para além disso, são também definidos pelo utilizador parâmetros relacionados com as características dos sedimentos e transporte eólico dos sedimentos. Para o clima de agitação o utilizador indica as alturas de onda, direção, período e nível de maré (Palalane *et al.*, 2016, Marinho, 2018).

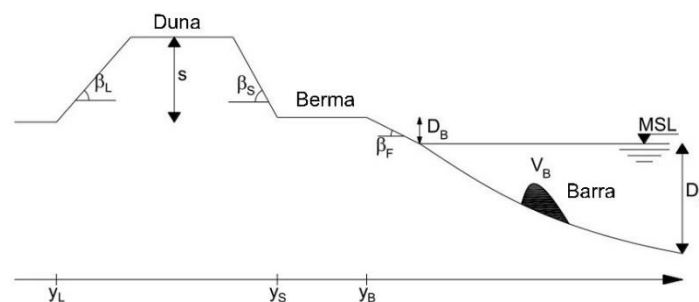


Figura 13. Esquema do perfil transversal de praia utilizado pelo CS-Model (adaptado de Marinho, 2018)

### 3.1. Perfis transversais tipo

O estudo da evolução do perfil transversal de praia no trecho costeiro Barra-Vagueira foi realizado para dois perfis de praia, nomeadamente: o perfil da praia da Costa Nova e o perfil da praia da Vagueira (perfil localizado a Norte da zona urbana da Vagueira). Na Figura 14 identifica-se a localização dos perfis selecionados. A esquematização inicial dos perfis e calibração do modelo foi realizada com base nos levantamentos de perfil emerso de praia disponibilizados no âmbito do programa COSMO (2020). À data, para cada perfil estão disponibilizados 6 levantamentos, compreendendo um período de aproximadamente 1 ano e três meses (Figura 15). A designação dos levantamentos e data de realização dos mesmos são apresentados na Tabela 10.

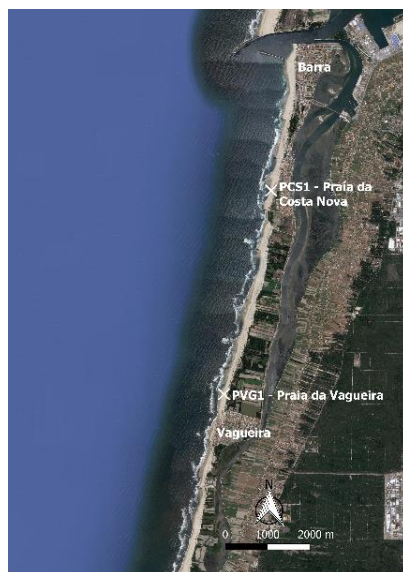
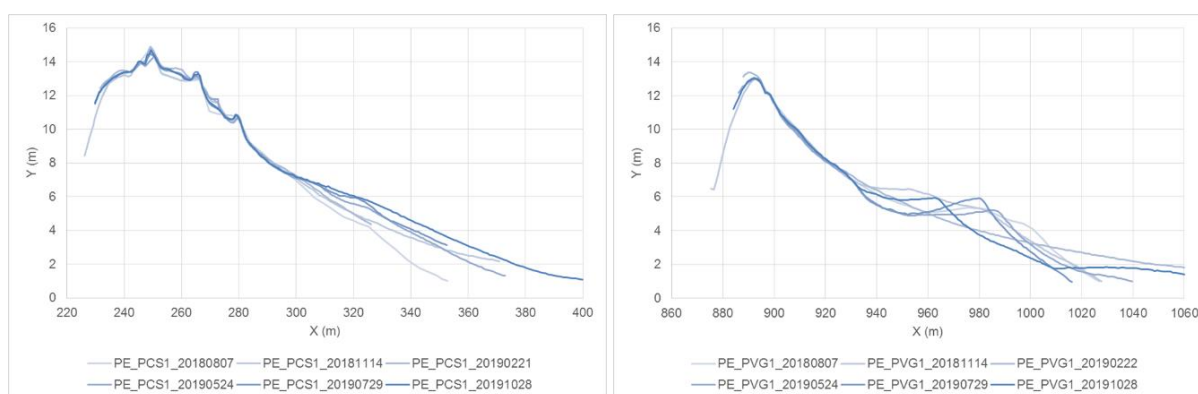


Figura 14. Localização dos perfis transversais seleccionados para calibração do CS-Model no trecho costeiro Barra-Vagueira



a) Praia da Costa Nova

b) Praia da Vagueira

Figura 15. Levantamentos dos perfis transversais de praia disponibilizados pelo programa COSMO

Tabela 10. Levantamentos de perfil emerso utilizados para calibração do modelo numérico (COSMO, 2020)

Praia da Costa Nova		Praia da Vagueira	
Designação	Data	Designação	Data
PE_PCS1_20180807	2018-08-07	PE_PVG1_20180807	2018-08-07
PE_PCS1_20181114	2018-11-14	PE_PVG1_20181114	2018-11-14
PE_PCS1_20190221	2019-02-21	PE_PVG1_20190221	2019-02-22
PE_PCS1_20190524	2019-05-24	PE_PVG1_20190524	2019-05-24
PE_PCS1_20190729	2019-07-29	PE_PVG1_20190729	2019-07-29
PE_PCS1_20191028	2019-10-28	PE_PVG1_20191028	2019-10-28

### 3.2. Clima de agitação

Para o clima de agitação utilizado como *input* do modelo fez-se coincidir o clima de agitação com o período dos levantamentos de perfil emerso, ou seja, de 7 de agosto de 2018 a 31 de dezembro de 2019. Para tal, utilizaram-se os registos de ondas geradas através do modelo de ondas WaveWatch3 cujas séries cronológicas de altura de onda, período e direção de onda ao largo são apresentadas na Figura 16 à Figura 18. O nível de maré foi definido como constante e igual a 2 m, valor referido ao ZH.

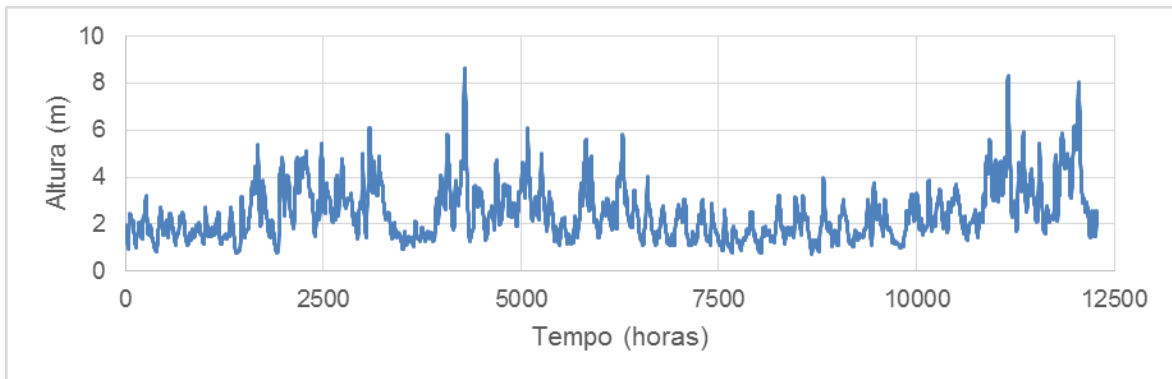


Figura 16. Série cronológica de alturas de onda ao largo utilizadas como *input* do CS-Model

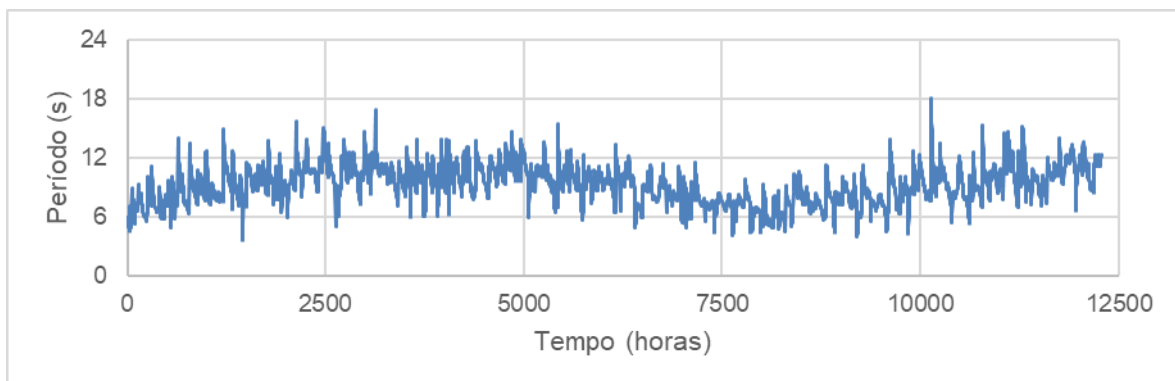


Figura 17. Série cronológica dos períodos de onda ao largo utilizados como *input* do CS-Model

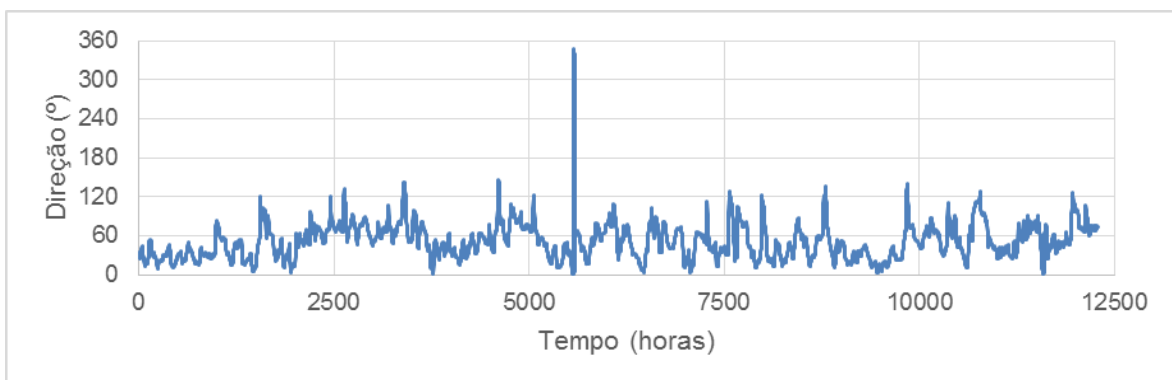


Figura 18. Série cronológica das direções de onda ao largo utilizadas como *input* do CS-Model (ângulo da onda com o Norte definido no sentido anti-horário)

### 3.3. Calibração e validação das simulações

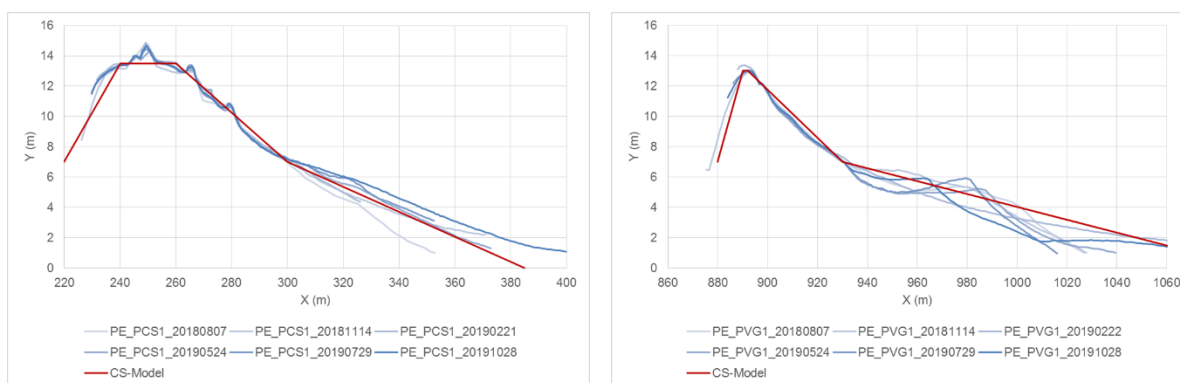
A calibração e validação das simulações foi realizada através dos seguintes parâmetros morfológicos: posição do pé da duna do lado de mar ( $Y_S$ ), posição da berma ( $Y_B$ ) e largura da berma. Para cada perfil transversal, com base nos levantamentos do programa COSMO, começou-se por identificar a evolução dos diferentes parâmetros morfológicos que descrevem a evolução do perfil de praia, sendo os valores apresentados na Tabela 11 e Tabela 12. Posteriormente, esquematizou-se o perfil transversal de praia de acordo com a representação utilizada pelo CS-Model (Figura 19). Na Tabela 13 são apresentados os valores adotados para os parâmetros morfológicos iniciais, características dos sedimentos e taxa de transporte eólico de sedimentos, para os dois perfis analisados.

Tabela 11. Valores dos parâmetros morfológicos que descrevem a evolução do perfil transversal da praia da Costa Nova (m)

Levantamento	$Y_S$	$Y_B$	Largura da berma
PE_PCS1_20180807	300.0	300.0	0.0
PE_PCS1_20181114	300.0	301.0	1.0
PE_PCS1_20190221	301.0	302.0	1.0
PE_PCS1_20190524	300.0	302.0	2.0
PE_PCS1_20190729	302.0	304.0	4.0
PE_PCS1_20191028	302.0	304.0	4.0

Tabela 12. Valores dos parâmetros morfológicos que descrevem a evolução do perfil transversal da praia da Vagueira (m)

Levantamento	$Y_S$	$Y_B$	Largura da berma
PE_PVG1_20180807	930.0	930.0	0.0
PE_PVG1_20181114	929.0	930.0	1.0
PE_PVG1_20190221	932.0	932.0	0.0
PE_PVG1_20190524	929.5	930.0	0.5
PE_PVG1_20190729	930.0	930.5	0.5
PE_PVG1_20191028	930.5	930.5	0.0



a) Praia da Costa Nova

b) Praia da Vagueira

Figura 19. Esquematisação do perfil transversal de praia

Tabela 13. Valores adotados para os parâmetros morfológicos iniciais, características dos sedimentos e taxa de transporte de areias

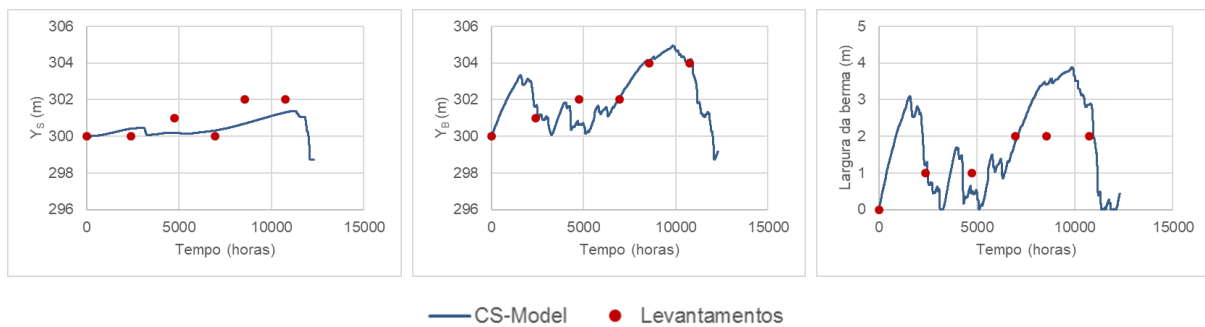
Perfil transversal	$Y_L$ (m)	$Y_S$ (m)	$Y_B$ (m)	$S$ (m)	$S_{max}$ (m)	$D_B$ (m)	$V_B$ (m <sup>3</sup> )	$\beta_L$ (rad)	$\beta_S$ (rad)	$\beta_F$ (rad)	$D_c$ (m)	$D_{50}$ (mm)	$Q_{winds}$ (m <sup>3</sup> /s)
Praia da Costa Nova	220	300	300	6.5	6.5	7	180	0.31	0.16	0.08	17	0.5	$0.1 \times 10^{-5}$
Praia da Vagueira	880	930	930	6.0	6.0	7	100	0.54	0.16	0.04	18	0.5	$0.9 \times 10^{-5}$

Na Figura 20 e Figura 21 compara-se a evolução dos diferentes parâmetros morfológicos, selecionados para calibração do modelo, obtidos através de modelação numérica com os valores resultantes da análise dos levantamentos. O desempenho do modelo na simulação da evolução dos perfis transversais de praia foi avaliado através de dois parâmetros estatísticos: erro médio ( $EM$ , Eq. 9) e índice de concordância de Willmott ( $d_r$ , Eq. 10). Em ambas as equações,  $P_i$  representa os valores previstos através de modelação,  $O_i$  representa os valores observados nos levantamentos e  $\bar{O}$  a média dos valores observados.

O erro médio foi definido como a diferença absoluta entre os conjuntos de dados observados e simulados para todas as amostras fornecidas. O índice de Willmott (Willmott *et al.*, 2012) é um parâmetro estatístico adimensional que indica a soma da magnitude das diferenças entre os valores previstos pelo modelo e os desvios observados em torno da média observada relativamente à soma das magnitudes dos desvios do modelo perfeito ( $P_i = O_i$  para todos os  $i$ ) e os desvios observados sobre a média observada (Willmott *et al.*, 2012). O parâmetro varia de -1 a 1, sendo aplicável a uma vasta gama de problemas relacionados com a análise de desempenho de modelos (Willmott *et al.*, 2012; Oliveira, 2016). O valor de 1 para o índice de concordância indica uma perfeita concordância entre valores modelados e observados, e um  $d_r = -1$  indica falta de concordância entre o modelo e a observação, ou variação insuficiente nas observações para testar adequadamente o modelo (El Masri *et al.*, 2015). Se  $d_r = 0.0$  significa que a soma da magnitude dos erros, e a soma dos desvios do modelo perfeito e a magnitude dos desvios observados são equivalentes (Willmott *et al.*, 2012).

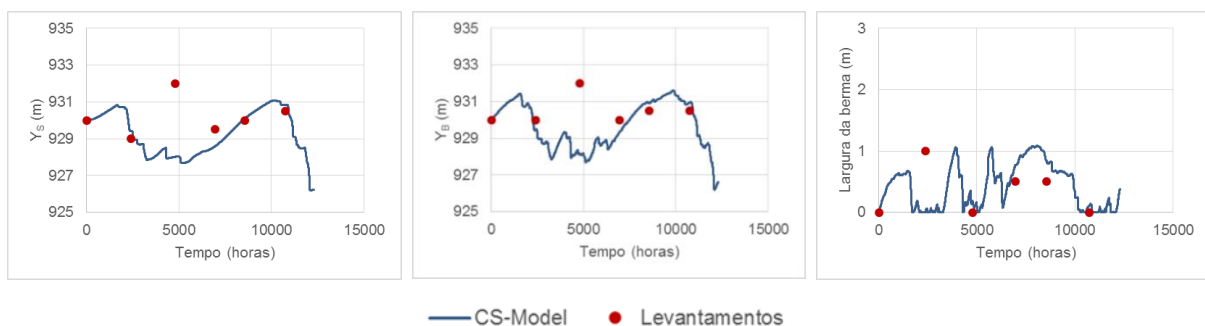
$$EM = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n |P_i - O_i| \quad \text{Eq. 9}$$

$$d_r = \begin{cases} 1 - \frac{\sum_{i=1}^n |P_i - O_i|}{2 \sum_{i=1}^n |O_i - \bar{O}|}, & \text{se } \sum_{i=1}^n |P_i - O_i| \leq 2 \sum_{i=1}^n |O_i - \bar{O}| \\ \frac{2 \sum_{i=1}^n |O_i - \bar{O}|}{\sum_{i=1}^n |P_i - O_i|} - 1, & \text{se } \sum_{i=1}^n |P_i - O_i| > 2 \sum_{i=1}^n |O_i - \bar{O}| \end{cases} \quad \text{Eq. 10}$$



a) Posição do pé da duna ( $Y_S$ )      b) Posição da berma ( $Y_B$ )      c) Largura da berma

Figura 20. Comparação da evolução dos parâmetros morfológicos do perfil da praia da Costa Nova obtidos através de modelação numérica com os valores dos levantamentos



a) Posição do pé da duna ( $Y_S$ )      b) Posição da berma ( $Y_B$ )      c) Largura da berma

Figura 21. Comparação da evolução dos parâmetros morfológicos do perfil da praia da Vagueira obtidos através de modelação numérica com os valores dos levantamentos

Na Tabela 14 e Tabela 15 são apresentadas as diferenças obtidas entre os valores dos levantamentos e os valores previstos através do CS-Model, para os diferentes parâmetros morfológicos analisados, e o erro médio dos resultados obtidos para cada parâmetro morfológico. Da análise dos resultados verifica-se que para o perfil transversal da praia da Costa Nova, com exceção de 1 levantamento, as diferenças entre valores previstos e observados são sempre inferiores a 1 m, obtendo-se um erro médio de 0.59 m para o valor de  $Y_S$ , um erro médio de 0.4 m para  $Y_B$  e de 0.53 m para a largura da berma.

Para o perfil transversal da praia da Vagueira, com exceção de 1 levantamento, os diferentes parâmetros morfológicos apresentam diferenças entre valores modelados e observados inferiores a 1 m, tendo-se um erro médio de 0.95 m para o valor de  $Y_s$ , um erro médio de 0.98 m para o parâmetro  $Y_B$  e um erro médio de 0.32 m para a largura da berma.

Os resultados obtidos para o índice de concordância de Willmott, em relação aos diferentes parâmetros morfológicos analisados, variam entre 0 e 0.8, concluindo-se que genericamente o modelo é capaz de reproduzir aquela que tem sido a evolução natural dos parâmetros morfológicos dos perfis transversais de praia analisados (Tabela 16).

Tabela 14. Diferença entre os valores previstos através de modelação numérica e observados para os diferentes parâmetros morfológicos analisados (m) - perfil transversal da praia da Costa Nova

Levantamento	$Y_s$	$Y_B$	Largura da berma
PE_PCS1_20180807	0.00	0.01	0.01
PE_PCS1_20181114	0.41	0.62	0.21
PE_PCS1_20190221	-0.81	-1.32	-0.51
PE_PCS1_20190524	0.32	0.17	0.15
PE_PCS1_20190729	-1.31	0.12	1.42
PE_PCS1_20191028	-0.70	0.17	0.87
Erro médio	0.59	0.40	0.53

Tabela 15. Diferença entre os valores previstos através de modelação numérica e observados para os diferentes parâmetros morfológicos analisados (m) - perfil transversal da praia da Vagueira

Levantamento	$Y_s$	$Y_B$	Largura da berma
PE_PVG1_20180807	0.00	0.00	0.00
PE_PVG1_20181114	0.42	-0.58	-0.99
PE_PVG1_20190222	-3.98	-3.80	0.18
PE_PVG1_20190524	-0.89	-0.63	0.27
PE_PVG1_20190729	0.10	0.44	0.35
PE_PVG1_20191028	0.33	0.44	0.11
Erro médio	0.95	0.98	0.32

Tabela 16. Valores obtidos para o índice de concordância de Willmott ( $d_r$ ) para os parâmetros morfológicos analisados

Perfil transversal	$Y_s$	$Y_B$	Largura da berma
Praia da Costa Nova	0.65	0.84	0.6
Praia da Vagueira	0.34	0.02	0.52

### 3.4. Definição da situação de referência

Concluído o processo de calibração do modelo CS-Model e tendo em conta os resultados apresentados anteriormente, verifica-se que os resultados previstos pelo modelo apresentam evoluções qualitativas idênticas às observadas. Constata-se que, apesar de existirem algumas discrepâncias entre os valores obtidos numericamente e os valores observados, próprias deste tipo de modelação devido a incertezas relacionadas com os pressupostos de modelação, dificuldade em reproduzir as ações naturais, etc., o modelo é capaz de reproduzir genericamente aquela que tem sido a evolução dos parâmetros morfológicos dos perfis transversais de praia analisados, no período definido para calibração e validação do modelo numérico. Assim, a análise da evolução morfológica dos perfis transversais de praia para os cenários futuros de transposição de sedimentos foi realizada com base na esquematização dos perfis transversais de praia cujos parâmetros morfológicos foram definidos no presente subcapítulo.

## 4. Definição dos cenários de alimentação artificial de sedimentos

O desempenho e longevidade das intervenções de alimentação artificial de sedimentos são condicionadas por múltiplos fatores. No presente estudo, com as simulações desenvolvidas pretendeu-se antecipar qual o desempenho e longevidade das intervenções de alimentação artificial de sedimentos, de forma a repor o trânsito sedimentar, mitigando os problemas de erosão costeira que se verificam no trecho costeiro Barra-Vagueira. Nesse sentido, pretendeu-se analisar os impactos que as diferentes possibilidades de deposição dos dragados têm na posição da linha de costa a sotamar das instalações portuárias. Para tal, foram avaliados diferentes cenários de alimentação artificial de sedimentos, começando-se por definir um volume de sedimentos a transpor e um local de deposição de referência. O volume de referência foi definido como 500 000 m<sup>3</sup>/ano, ligeiramente acima do histórico de intervenções de alimentações artificiais de sedimentos no trecho (Pinto *et al.*, 2018). O local de referência para a deposição dos sedimentos foi considerado como a área compreendida entre a linha batimétrica dos -12.00 m (ZH) e o limite de espraiamento, entre o 3.º e 5.º esporões do campo de esporões da Costa Nova (Pinto *et al.*, 2018).

No presente capítulo, começa-se por apresentar o clima de agitação utilizado como *input* dos modelos numéricos e posteriormente são descritos detalhadamente os cenários de transposição e deposição de sedimentos avaliados. Em todos os cenários testados as simulações não consideram o efeito da sazonalidade associada aos registos de ondas, uma vez que, esse efeito foi eliminado nos pressupostos adotados para a definição do clima de agitação marítima, pelo que não é avaliada a questão de realizar as intervenções em diferentes épocas do ano (verão ou inverno).

#### 4.1. Clima de agitação / subida do nível médio da água do mar

O cenário de agitação marítima utilizado como *input* dos modelos numéricos, para projeção da evolução morfológica do trecho costeiro Barra-Vagueira a 30 anos, foi gerado com base num estudo prévio em que se procurou identificar o impacto das alterações climáticas na projeção da evolução da posição da linha de costa. Foram considerados cenários de diferentes concentrações de gases de efeito de estufa combinadas com diferentes valores de subida do nível médio da água do mar. Para tal, com base nas séries de 20 anos de registos (2026 a 2045) de ondas RCP4.5 e RCP8.5, geradas no âmbito do projeto MarRisk e que foram apresentadas e discutidas anteriormente, geraram-se duas séries de agitação marítima. Nestas séries, repetiram-se os primeiros cinco e os últimos cinco anos de registos de ondas das séries, de forma a perfazer 30 anos de registos, horizonte temporal definido para a análise.

Os valores de subida do nível médio da água do mar avaliados foram selecionados com base no estudo dos valores indicados pela Agência Europeia do Ambiente (EEA, 2019). Apesar desses valores corresponderem a valores globais, é referido pela EEA (2019) que a nível regional os valores da subida do nível médio da água do mar tendem a ser  $\pm 20\%$  dos valores a nível global. Na Figura 22 apresenta-se a evolução da subida do nível do mar projetada para as duas concentrações de gases de efeito estufa consideradas no presente estudo (RCP4.5 e RCP8.5) que, segundo a EEA (2019), apresentam intervalos de incerteza representados na figura a sombreado. Com base na análise dos valores referidos, a avaliação da evolução da posição da linha de costa foi realizada considerando os seguintes cenários de taxas anuais de subida do nível médio da água do mar: 0 mm/ano, 5 mm/ano e 6 mm/ano, conjugados respetivamente com as séries do clima de agitação Histórica, RCP4.5 e RCP 8.5.

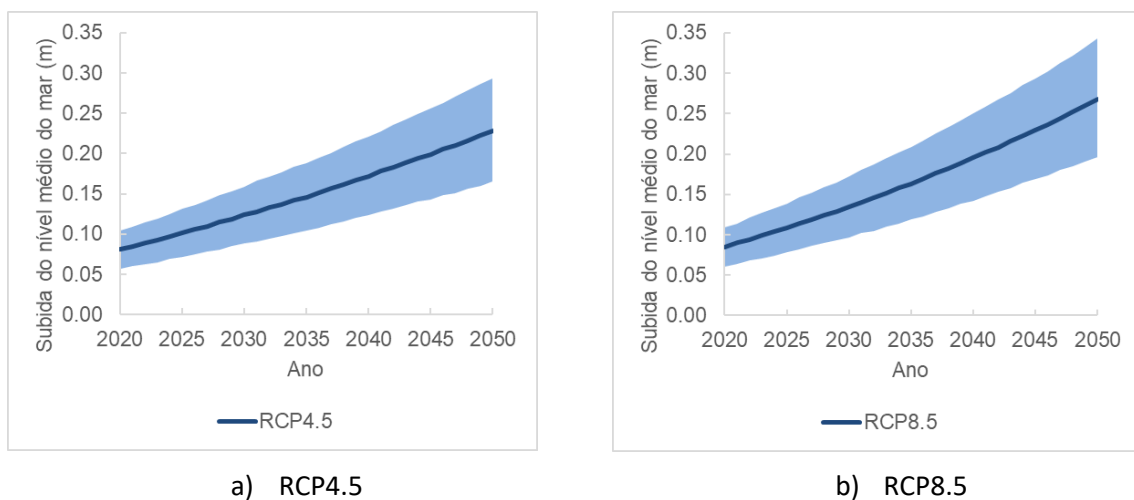


Figura 22. Valores projetados para a subida do nível médio da água do mar a nível global - a linha contínua indica os valores projetados e os intervalos a sombreado referem-se ao intervalo de incerteza (de acordo com EEA, 2019)

Os resultados obtidos mostraram que em termos médios globais, ao longo de todo o trecho costeiro, a taxa de recuo da posição da linha de costa pode agravar-se cerca de 21% num cenário de alteração do clima de agitação e subida da superfície da água do mar. Avaliando o comportamento ao longo dos diferentes trechos costeiros, registam-se impactos máximos nos trechos 3 e 5, na ordem dos 45%, sendo que em alguns trechos o efeito das alterações climáticas reduz ligeiramente as taxas de recuo de linha de costa esperadas.

#### 4.2. Cenários de alimentação artificial de sedimentos

Os desempenhos dos cenários de alimentação artificial de sedimentos foram avaliados através do impacto da deposição de sedimentos na evolução da posição da linha de costa, com recurso ao modelo LTC, e do seu impacto na evolução do perfil transversal de praia, com recurso ao modelo CS-Model. Os dois modelos assentam em pressupostos de funcionamento diferentes, sendo a simulação da deposição de sedimentos realizada de maneira distinta.

No LTC, o volume de sedimentos adicionado é depositado numa área definida pelo utilizador durante um determinado período de tempo (Coelho, 2005). Nestes cenários de alimentação artificial de sedimentos foi considerado um ritmo de deposição de 10 000 m<sup>3</sup>/dia. Os cenários de alimentação artificial avaliados foram definidos com base nos principais parâmetros que condicionam o seu desempenho e longevidade, nomeadamente: volume de sedimentos depositado, local de deposição dos sedimentos e frequência das intervenções. No modelo numérico LTC, o Cenário Base foi definido como a deposição de 500 000 m<sup>3</sup>/ano de sedimentos (operação com a duração de 50 dias), numa área em planta compreendida entre o limite de espraiamento e a linha batimétrica dos -12 m (ZH), na direção transversal à linha de costa, e entre o esporão 3 e 5 da Costa Nova, na direção longitudinal da linha de costa (Figura 23).

Na Figura 23 esquematiza-se os locais de deposição dos sedimentos avaliados com o modelo LTC, sendo um dos locais definido como Cenário Base (representado a laranja), o outro localizado a Norte do Cenário Base e os outros dois localizados a Sul. Para facilitar a análise e designação dos cenários, foi adotada a seguinte nomenclatura para definir a localização da deposição dos sedimentos em planta: CB, quando a deposição é no local definido para implementação do Cenário Base; N CB, para a deposição a Norte do local do Cenário Base; S CB indica a localização imediatamente a Sul do Cenário Base e Extremo S refere-se à área de deposição localizada mais a Sul da região modelada.

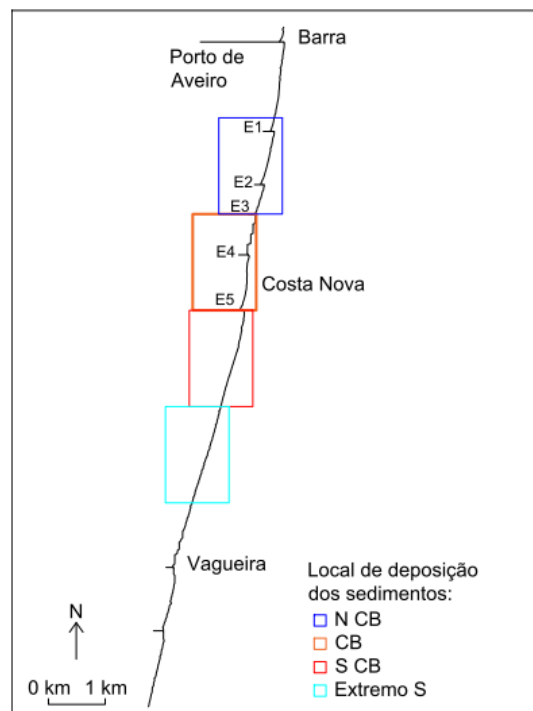


Figura 23. Identificação dos locais de deposição dos sedimentos em planta, para simulação com o LTC

Os cenários de frequência de intervenção avaliados foram: 250 000 m<sup>3</sup> de meio em meio ano; 500 000 m<sup>3</sup>/ano; 1 milhão de m<sup>3</sup> de 2 em 2 anos e 2 milhões de m<sup>3</sup> de 4 em 4 anos. Os vários cenários diferenciam-se entre si no volume de sedimentos depositado e intervalo de tempo entre a realização da deposição, tendo sido definidos com o objetivo de se perceber se é mais vantajoso, a nível de evolução da posição da linha de costa, realizar deposições de baixa magnitude em intervalos de tempo regulares ou intervenções de maior magnitude, mas mais espaçadas no tempo.

No CS-Model, a adição artificial de sedimentos é simulada através da manipulação dos parâmetros morfológicos que definem o perfil. A deposição de dragados na face da duna é realizada através da translação da posição do pé da duna e a adição de sedimentos no perfil de praia é realizada através da translação da posição da berma. Se se pretender simular a adição de sedimentos na zona da barra o volume a depositar é adicionado diretamente ao volume existente na barra. Esta intervenção é considerada instantânea no modelo de cálculo, pelo que o processo de simulação foi efetuado consecutivamente, ano a ano, considerando os volumes anuais adicionados no início de cada ano de simulação. O Cenário Base das simulações realizadas com recurso ao CS-Model correspondeu à deposição de 500 000 m<sup>3</sup>/ano de sedimentos na barra submersa do perfil. Os volumes testados foram os mesmos (100 000 m<sup>3</sup>/ano; 300 000 m<sup>3</sup>/ano; 500 000 m<sup>3</sup>/ano e 700 000 m<sup>3</sup>/ano).

Para a análise do impacto do local de deposição dos sedimentos no perfil transversal, testaram-se cenários de deposição de sedimentos na duna, na face da praia e na barra submersa (Figura 24).

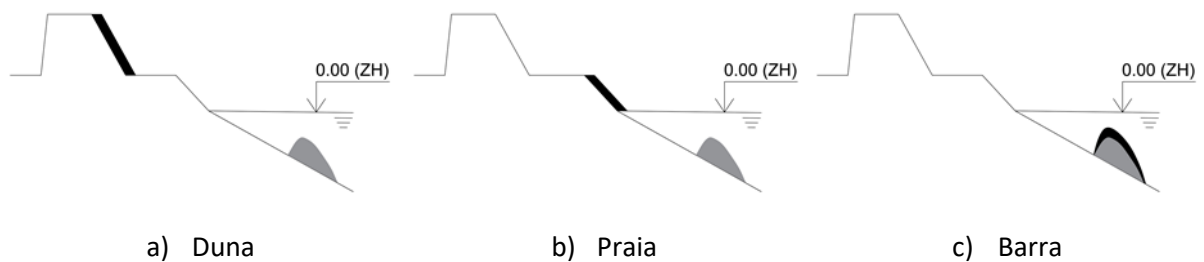


Figura 24. Identificação dos locais de deposição dos sedimentos em planta, para simulação com o CS - Model

## 5. Evolução da posição da linha de costa

No presente estudo, o impacto na evolução da posição da linha de costa dos diferentes cenários de alimentação artificial de sedimentos avaliados foi realizado através da quantificação das áreas de acreção ou erosão (ganho ou perda de área em planta) que cada solução induz no trecho costeiro em análise. Assim, a posição da linha de costa considerando a evolução natural, admitindo a manutenção das obras existentes, mas não acrescentando mais nenhuma intervenção, foi comparada com a posição da linha de costa nos diferentes cenários de intervenção. A análise foi realizada ao longo dos 30 anos de simulação, comparando a posição da linha de costa num determinado instante na situação e referência (sem intervenção), com a posição da linha de costa no mesmo instante, admitindo-se a realização de intervenções de mitigação da erosão costeira, identificando-se desta forma o impacto efetivo da intervenção.

A presente secção inicia-se com a apresentação da evolução da linha de costa a 30 anos no cenário de não ser realizada qualquer intervenção (situação de referência). Posteriormente, são apresentados,

discutidos e analisados os impactos que os diferentes cenários de alimentação artificial de sedimentos provocam na evolução da posição da linha de costa.

### 5.1. Situação de referência

Na Figura 25 apresenta-se a projeção da evolução natural da posição da linha de costa (situação de referência) a 30 anos (2020-2050), para o trecho costeiro Barra-Vagueira, onde se observa que o trecho apresenta uma tendência erosiva que conduz a uma perda de território ao fim de 30 anos, superior a 400 000 m<sup>2</sup> (Tabela 17).

Tabela 17. Evolução do trecho costeiro Barra-Vagueira com recurso ao LTC, para a situação de referência

	10 anos	20 anos	30 anos
Área perdida (m <sup>2</sup> )	270 482	347 114	401 703
Recuo médio (m)	22.54	28.93	33.48
Recuo médio anual (m/ano)	2.25	1.45	1.12

Como se verifica pelos resultados obtidos, a tendência erosiva é superior nos primeiros anos, tendendo a abrandar a taxa de erosão ao longo do tempo.

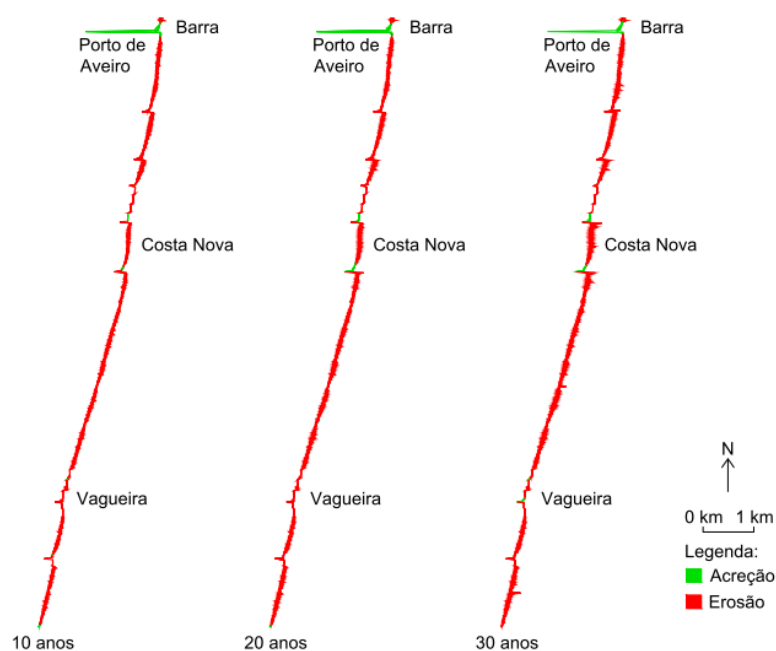


Figura 25. Evolução da posição da linha de costa para diferentes instantes de tempo

A Figura 25 mostra que as manchas de erosão têm maior importância nas zonas imediatamente a sul das obras existentes e têm tendência a aumentar ao longo do tempo. Entre a Barra e a Costa Nova, o máximo recuo da posição da linha de costa é de 125 metros, a Sul do esporão 5 da Costa Nova é de 97 metros e a Sul da Vagueira é de 68 metros.

## 5.2. Alimentações artificiais de sedimentos

A presente subsecção destina-se a apresentar os resultados da avaliação dos impactos que os diferentes cenários de alimentação artificial de sedimentos produzem na evolução da posição da linha de costa.

### 5.2.1. Volume

Os resultados obtidos para os diferentes cenários de volumes de alimentação artificial, sugerem que a redução da área de território perdida no trecho é tanto maior, quanto maior for o volume de sedimentos depositado anualmente (Figura 26). Ao fim de 30 anos de simulação, a transposição de 100 000 m<sup>3</sup>/ano conduz a uma redução de território erodido da ordem de apenas 1%, a transposição de 300 000 m<sup>3</sup>/ano de sedimentos representa uma diminuição de 14% das perdas, um sistema com capacidade de transpor 500 000 m<sup>3</sup>/ano reduz a área erodida em cerca de 20% e a transposição de 700 000 m<sup>3</sup>/ano tem um impacto da ordem dos 62% na redução do território erodido.

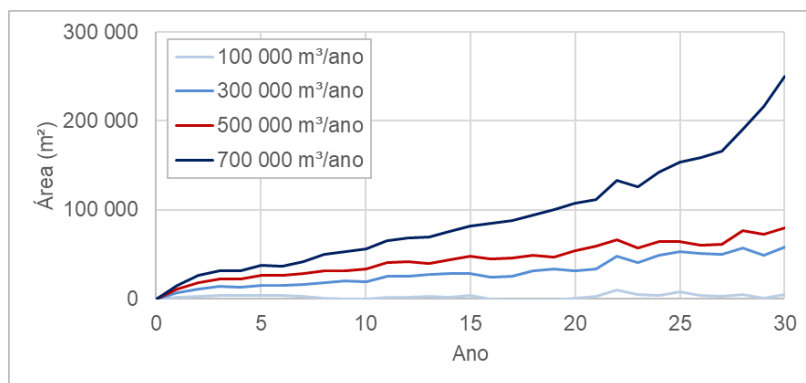


Figura 26. Evolução da área de território ganha no trecho, para os diferentes cenários de volume de sedimentos depositados

As zonas do setor costeiro mais influenciadas pela deposição de sedimentos são função do volume de sedimentos depositado. Para o menor volume de sedimentos transposto, 100 000 m<sup>3</sup>/ano, não se identifica uma zona do território que concentre maiores ganhos em relação às demais. Para os restantes valores de volume de sedimentos depositado avaliados as zonas do trecho mais influenciadas pela deposição de sedimentos correspondem aos trechos em que foram depositados os sedimentos (trecho 4 e trecho 5), sendo a evolução dos ganhos de área de território em cada trecho costeiro função do volume de sedimentos depositado. Ao longo dos 30 anos de simulação, o trecho 5 concentra cerca de 90% do total de área ganha no setor costeiro para o volume transposto anualmente de 300 000 m<sup>3</sup> de sedimentos. No cenário de serem depositados 500 000 m<sup>3</sup>/ano o trecho 5 é o que concentra a maior percentagem de ganhos de território (cerca de 80%, durante os 30 anos de simulação) e o trecho 4 apresenta uma tendência crescente de ganho de área que ao fim de 30 anos de simulação corresponde a cerca de 20% da área total de território ganha no setor costeiro. A deposição de 700 000 m<sup>3</sup>/ano de sedimentos é o cenário que conduz a uma maior diluição do impacto do volume de sedimentos transposto no setor costeiro. Ao fim de 30 anos de simulação o trecho 5, que nos primeiros anos de simulação concentrava praticamente a totalidade do ganho de área de território, apresenta uma tendência de perda que é acompanhada por uma evolução crescente

da percentagem de área ganha no trecho 4, verificando-se que, ao fim de 30 anos de simulação o trecho 5 concentra cerca de 48% do ganho total de território e o trecho 4 aproximadamente 43%.

### 5.2.2. Localização em planta

Para o trecho Barra-Vagueira, a deposição dos sedimentos na área definida como Extremo S é a solução que produz um maior impacto na redução da erosão do trecho. Para esta localização, ao fim 30 anos de simulação, a diminuição da perda de território erodido é da ordem dos 28%, o que representa uma melhoria de desempenho de cerca de 40%, quando comparada com a implementação definida no Cenário Base (Figura 27).

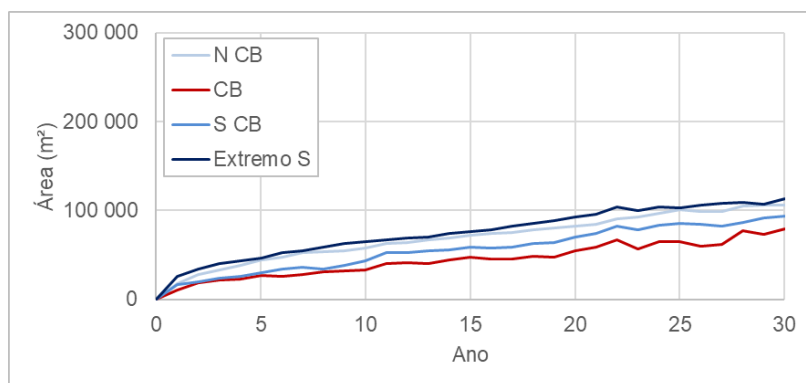


Figura 27. Evolução da área de território ganha no trecho, para as diferentes localizações de deposição dos sedimentos

A deposição dos sedimentos em diferentes locais do setor costeiro conduz a que as zonas do território mais influenciadas pela deposição dos sedimentos variem consoante o cenário. Genericamente, para as diferentes localizações testadas, as zonas do território que concentram os maiores ganhos de área de território correspondem às áreas abrangidas pela deposição de sedimentos. No Cenário Base o trecho 5 é o que concentra maiores ganhos de área de território (cerca de 80%), a deposição dos sedimentos a Norte do Cenário Base faz com que seja o trecho 3 a apresentar maiores ganhos (cerca de 65%), a deposição a Sul do Cenário Base conduz a que seja o trecho 6 a concentrar a maior parte dos ganhos (cerca de 65%) e a deposição no local definido como Extremo S leva a que seja o trecho 8 a apresentar a maior percentagem de ganho de território (cerca de 70%).

### 5.2.3. Frequência

Os resultados obtidos nos cenários que testaram a frequência de intervenção mostram que a deposição de 2 milhões de m<sup>3</sup> de sedimentos de 4 em 4 anos é a solução que conduz a impactos mais positivos ao longo do tempo, reduzindo-se ao fim de 30 anos de simulação a área erodida em cerca de 29%. Em contrapartida, a deposição de 250 000 m<sup>3</sup> duas vezes ao ano é o cenário que conduz a menores impactos, reduzindo-se neste caso o território erodido em apenas 10%. As outras duas frequências de intervenção analisadas apresentam uma evolução de área de território ganha similar e ao fim de 30 anos reduzem a erosão do território em cerca de 20% (Figura 28).

A zona onde são depositados os sedimentos (trechos 4 e 5) são os locais que absorvem os maiores impactos em termos de ganhos de área de território, para as diferentes frequências de intervenção,

mas a sua evolução é dependente da periodicidade da intervenção. A deposição de 2 milhões de  $m^3$  de sedimentos de 4 em 4 anos é o cenário que conduz a uma maior dispersão dos sedimentos na área de estudo, distribuindo-se ao fim de 30 anos, essencialmente pelos trechos 5, 4 e 6 (este último, correspondendo a movimento de sedimentos para Norte).



Figura 28. Evolução da área de território ganha no trecho, para as diferentes frequências de intervenção

## 6. Evolução do perfil transversal

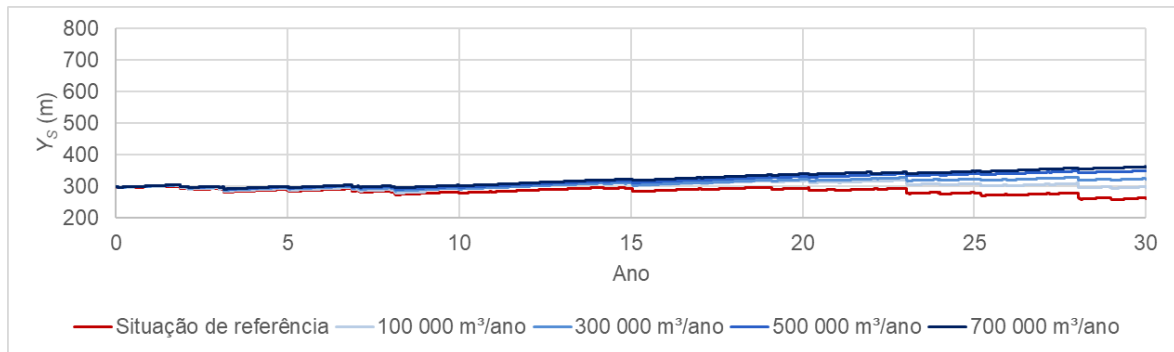
Na presente secção são apresentados, discutidos e analisados os impactos que os diferentes cenários de alimentação artificial de sedimentos provocam na evolução da morfologia dos perfis transversais de praia. Para tal, a evolução dos parâmetros morfológicos que definem os perfis transversais de praia considerando a sua evolução natural, isto é, sem ser realizada qualquer intervenção de deposição de sedimentos, designada como situação de referência, foi comparada com a evolução dos parâmetros morfológicos nos diferentes cenários de alimentação artificial.

### 6.1. Volume

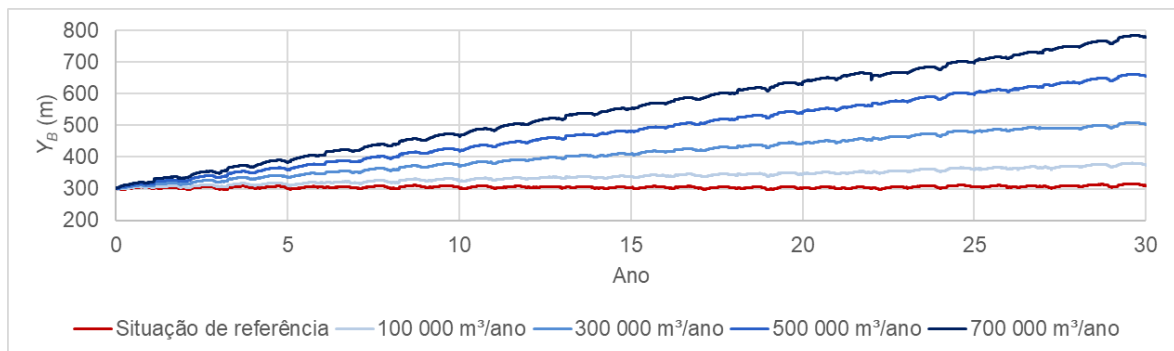
Para os diferentes cenários de alimentação artificial de sedimentos na barra submersa os resultados obtidos mostram que a posição do pé da duna do lado de mar e a posição da berma tendem a avançar em direção ao mar, sendo esse avanço crescente com o aumento do volume de sedimentos depositados e refletindo-se em alguns momentos em ganhos de largura de berma (Figura 29 e Figura 30). No entanto, a evolução e a ordem de grandeza do impacto dos cenários de deposição de sedimentos em termos de ganho de berma, para os dois perfis transversais de praia analisados é significativamente diferente. Para o perfil transversal da praia da Costa Nova, o avanço da posição da berma conduz a que a berma apresente uma largura crescente no tempo, que é tanto maior quanto maior o volume de sedimentos depositado. Ao fim de 30 anos de simulação, na situação de referência, a largura da berma é de aproximadamente 45 m, no cenário de serem depositados  $100\,000\ m^3/ano$  a largura da berma é de cerca de 77 m, para  $300\,000\ m^3/ano$  tem-se uma largura da berma próxima de 180 m, para  $500\,000\ m^3/ano$  a berma apresenta uma largura de 308 m e para a deposição anual de  $700\,000\ m^3/ano$  de sedimentos a berma apresenta uma largura de aproximadamente 417 m (Figura 29).

Para o perfil transversal da praia da Vagueira os valores da evolução do avanço da posição do pé da duna são similares aos valores da evolução do avanço da posição da berma, fazendo com que não se observem tendências significativas de crescimento da largura da berma, ao contrário do que acontece no perfil transversal da praia da Costa Nova (Figura 30).

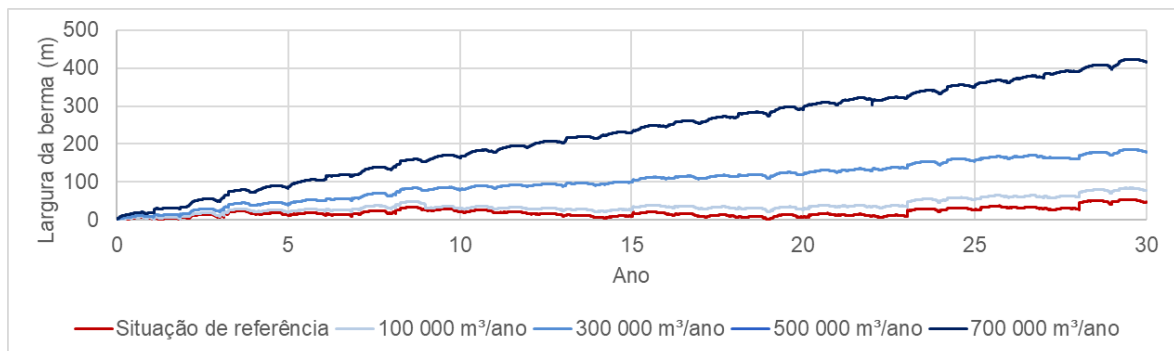
As diferenças observadas na evolução da morfologia dos dois perfis transversais são atribuídas à própria morfologia dos perfis (inclinações das faces da duna e berma) e ao parâmetro relativo ao transporte eólico dos sedimentos, uma vez que, estes foram os únicos parâmetros que variaram na modelação da evolução de cada perfil transversal.



a) Posição do pé da duna do lado de mar ( $Y_s$ )

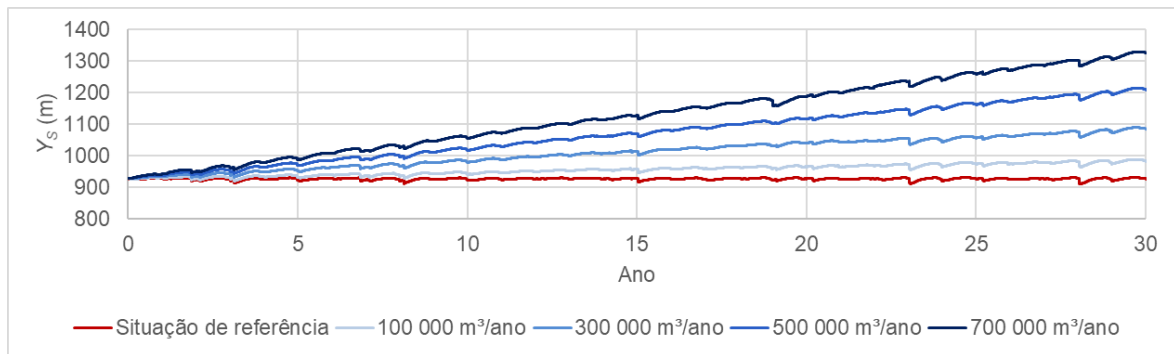


b) Posição da berma ( $Y_b$ )

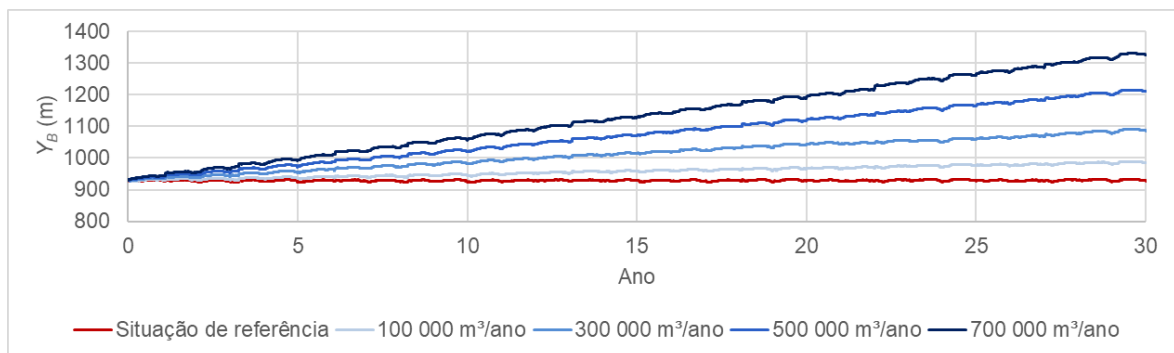


c) Largura da berma

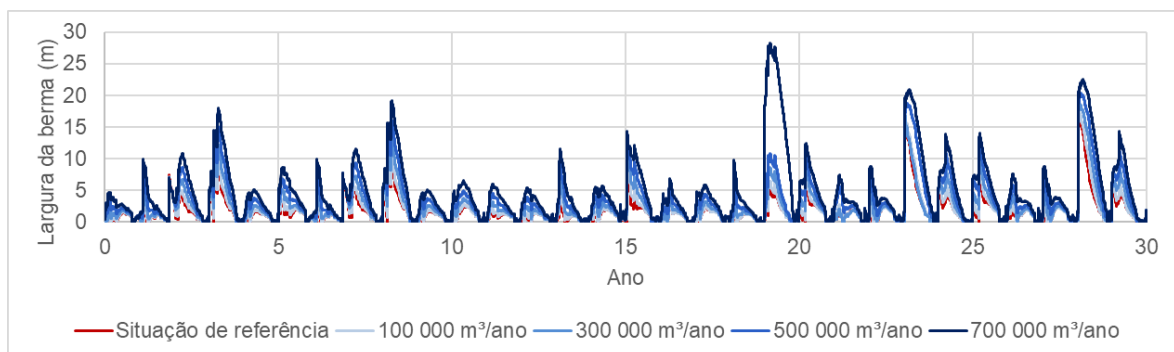
Figura 29. Evolução dos parâmetros morfológicos do perfil transversal da praia da Costa Nova, para os diferentes cenários de volume de sedimentos depositados



a) Posição do pé da duna do lado de mar ( $Y_s$ )



b) Posição da berma ( $Y_B$ )



c) Largura da berma

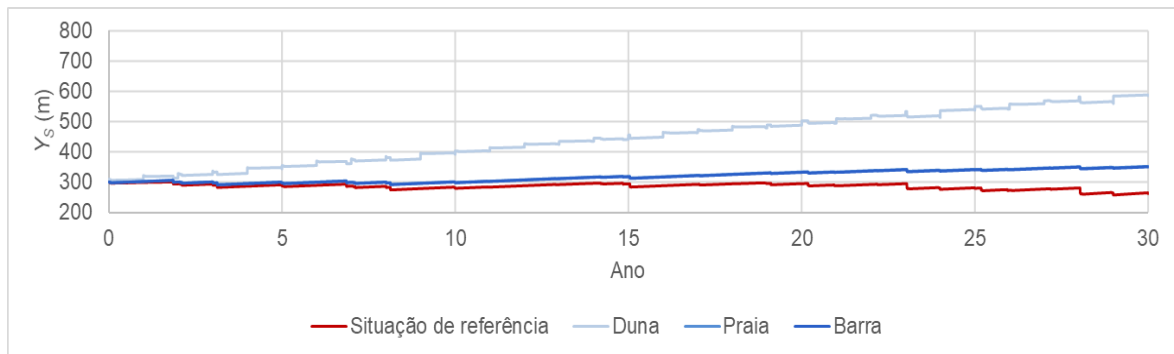
Figura 30. Evolução dos parâmetros morfológicos do perfil transversal da praia da Vagueira, para os diferentes cenários de volume de sedimentos depositados

## 6.2. Localização no perfil

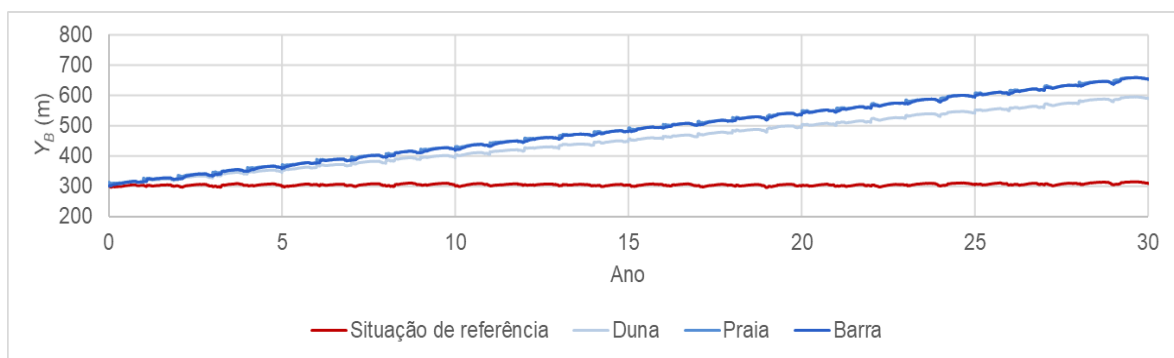
A análise dos resultados obtidos para a evolução dos parâmetros morfológicos do perfil de praia em função do local de deposição dos sedimentos permite concluir que, quer para o perfil transversal da praia da Costa Nova, bem como para o perfil transversal da praia da Vagueira, a deposição dos dragados na barra submersa e na praia são as soluções que conduzem a maiores avanços em direção ao mar, para os parâmetros posição do pé da duna e posição da berma, bem como a maiores ganhos de largura de berma.

Para o perfil transversal da Costa Nova, a deposição dos sedimentos na praia e na barra submersa conduz a um impacto positivo e a uma evolução da largura da berma crescente, ao longo dos 30 anos de simulação (na situação de referência, ao fim de 30 anos de simulação a largura da berma é de 45 m,

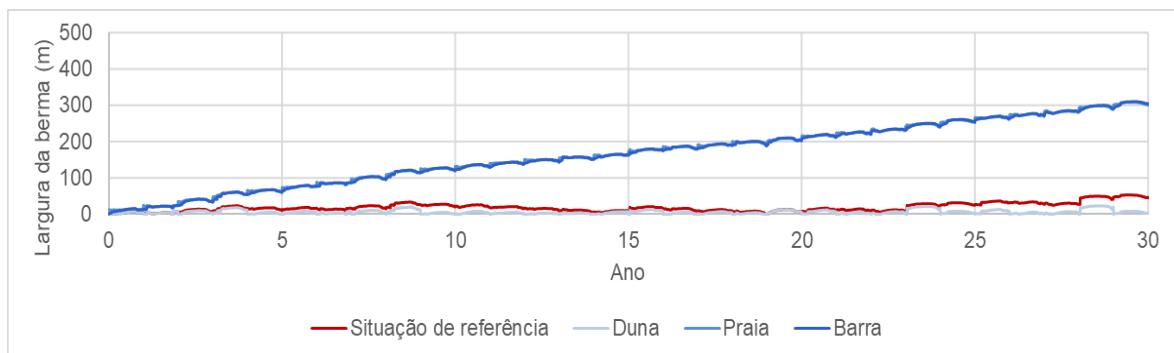
mas quando os sedimentos são depositados na praia a largura da berma é de 300 m e quando são depositados na barra, a berma passa a ter uma largura de aproximadamente 303 m). No entanto, este impacto positivo em termos de ganho de berma não é observado quando os sedimentos são depositados na duna. Neste caso, a adição artificial de sedimentos contribui para uma aumento do volume de sedimentos disponíveis na duna, mas reduz a largura da berma (ao fim de 30 anos de simulação, quando os sedimentos são depositados na duna, a largura que a berma apresenta é de 4 m) (Figura 31).



a) Posição do pé da duna do lado de mar ( $Y_s$ )



b) Posição da berma ( $Y_b$ )



c) Largura da berma

Figura 31. Evolução dos parâmetros morfológicos do perfil transversal da praia da Costa Nova, para os diferentes cenários de deposição no perfil

Para o perfil transversal da praia da Vagueira não se observam ganhos tão significativos da largura de berma, como os observados para o perfil transversal da praia da Costa Nova. Para os três esquemas de deposição avaliados, a evolução do avanço do parâmetro  $Y_s$  é similar ao avanço de  $Y_b$  e, portanto, independentemente do local de deposição dos sedimentos no perfil transversal, a realização de

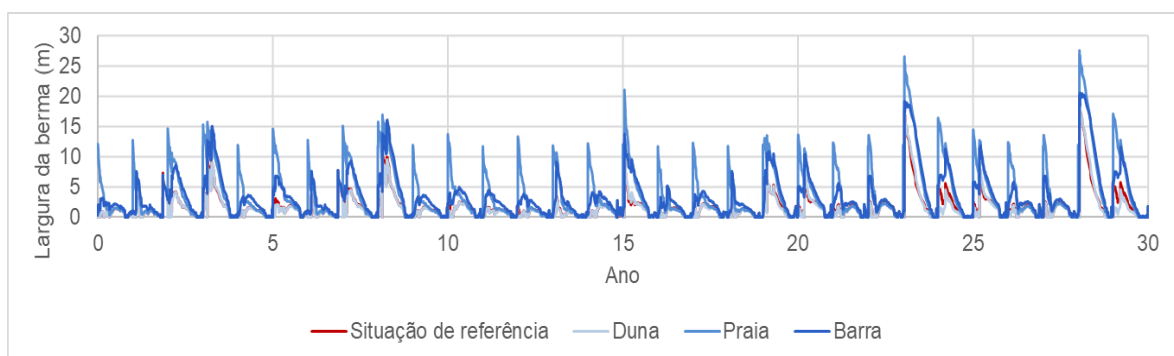
alimentações artificiais de sedimentos reflete-se sobretudo num aumento do volume da duna. À semelhança do resultado obtido para o perfil da Costa Nova, quando os sedimentos são depositados na duna, a largura que a berma apresenta é inferior à largura que a berma apresenta na situação de referência, contribuindo a deposição dos sedimentos para o aumento da robustez da duna (Figura 32).



a) Posição do pé da duna do lado de mar ( $Y_s$ )



b) Posição da berma ( $Y_B$ )



c) Largura da berma

Figura 32. Evolução dos parâmetros morfológicos do perfil transversal da praia da Vagueira, para os diferentes cenários de deposição no perfil

## **7. Modelação da evolução dos perfis transversais por integração de efeitos longitudinais**

O desempenho e longevidade das alimentações artificiais de sedimentos depende de vários fatores relacionados com a sua execução, quantidade de sedimentos disponíveis e dinâmica sedimentar. Os modelos numéricos são uma importante ferramenta para prever e descrever o desempenho das intervenções, permitindo discutir cenários de intervenção numa perspetiva de médio-longo prazo. Contudo, devido à complexidade dos processos físicos relacionados com a evolução da morfologia costeira, cada modelo foca-se num conjunto limitado de processos, sendo os modelos normalmente divididos em dois tipos: modelos de evolução da posição da linha de costa e modelos de evolução dos perfis transversais. Face ao exposto, existem ainda lacunas na modelação numérica da evolução das zonas costeiras numa perspetiva de médio-longo prazo.

No presente trabalho, apresenta-se contributos com o objetivo de melhorar a capacidade de modelação numérica da evolução dos perfis transversais de praia. Para tal, propõem-se um método que tem por objetivo incorporar automaticamente na evolução dos perfis transversais os efeitos relacionados com a subida do nível médio da água do mar e de alimentações artificiais de sedimentos, bem como os efeitos dos processos longitudinais devidos aos gradientes de transporte sólido longitudinal de sedimentos.

O método proposto utiliza o esquema de perfil transversal de praia representado pelo CS-Model (Larson *et al.*, 2016) e incorpora automaticamente na simulação da evolução do perfil de praia os efeitos indicados anteriormente, constituindo uma primeira tentativa para incorporar os efeitos associados aos processos físicos transversais e longitudinais no mesmo modelo de evolução da morfologia dos perfis transversais de praia.

### **7.1. Descrição do método proposto**

Sendo um modelo numérico simplificado, o CS-Model apresenta limitações na simulação de alguns processos físicos que influenciam a evolução dos perfis transversais de praia numa perspetiva de médio-longo termo. Assim, o método desenvolvido no presente trabalho tenta incorporar automaticamente nos resultados produzidos pelo modelo, efeitos de comportamento em planta associados à subida do nível médio da água do mar, alimentações artificiais de sedimentos e gradientes de transporte sólido longitudinal.

Baseado no pressuposto de que o perfil transversal de praia é esquematizado através de um conjunto de parâmetros que definem a morfologia do perfil (ver Figura 13), o método proposto funciona através da manipulação de diferentes parâmetros que definem o perfil transversal de praia, em função dos processos físicos a simular.

Para processar automaticamente o método, neste trabalho, foi desenvolvido um código em linguagem de programação VisualBasic.NET (Microsoft, 2020) que introduz os efeitos anteriormente mencionados. O código desenvolvido utiliza o CS-Model na sua estrutura e funciona na base de uma estrutura cíclica que é repetida um número de vezes definido pelo utilizador. A estrutura cíclica é composta por 5 passos principais, nomeadamente: i) leitura do ficheiro Input.txt; ii) execução do CS-Model para ser obtida a morfologia do perfil transversal ao fim de determinado tempo (definido pelo utilizador e designado como NDT); iii) leitura do ficheiro Output.txt, gerado pelo CS-Model; iv) variação dos parâmetros chave que caracterizam a morfologia do perfil, de forma a simular-se o efeito de diferentes processos físicos (subida do nível médio da água do mar, gradientes de transporte

sólido longitudinal e alimentações artificiais); v) utilização dos parâmetros atualizados, para reescrever o ficheiro Input.txt.

Na Figura 33 apresenta-se um esquema do código desenvolvido, que pode ser executado através de uma interface gráfica desenvolvida no âmbito do presente projeto. O desenvolvimento da interface teve como objetivo tornar a utilização do método proposto mais intuitiva, permitindo uma rápida introdução dos dados e a visualização automática dos resultados produzidos pelo modelo.

A interface gráfica é composta por duas janelas principais. Na primeira permite que o utilizador defina a morfologia inicial do perfil transversal de praia, introduzindo os parâmetros do perfil e permitindo a respetiva visualização (Figura 34). Na segunda janela, o utilizador executa o método que integra os processos transversais e longitudinais (Figura 35). Para executar o método, na parte superior desta janela o utilizador define os parâmetros relativos ao período total de simulação e os parâmetros referentes à definição da taxa de subida do nível médio da água do mar, caracterização das alimentações artificiais (volume, extensão longitudinal e localização da alimentação artificial no perfil transversal) ou parâmetros relativos à definição das taxas de variação da posição da linha de costa devidas aos gradientes de transporte sólido longitudinal. Na parte inferior da janela de execução do método, os resultados da evolução dos diversos parâmetros que definem a morfologia do perfil transversal de praia são apresentados através de gráficos (Figura 35).

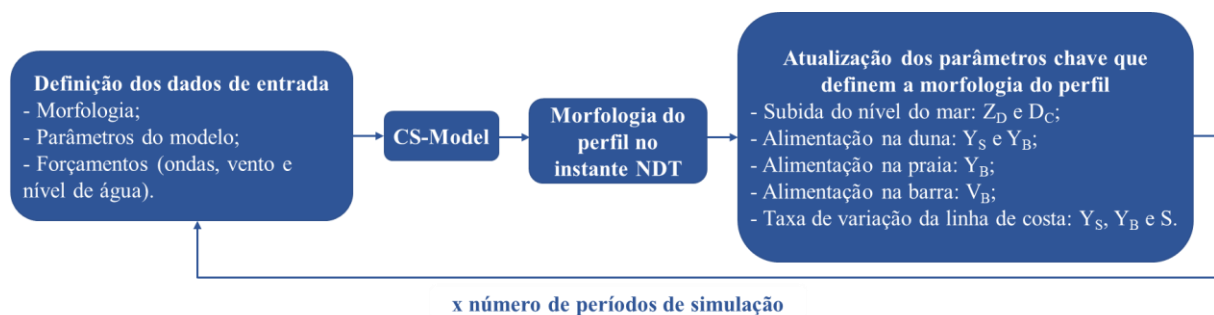


Figura 33. Estrutura principal do código

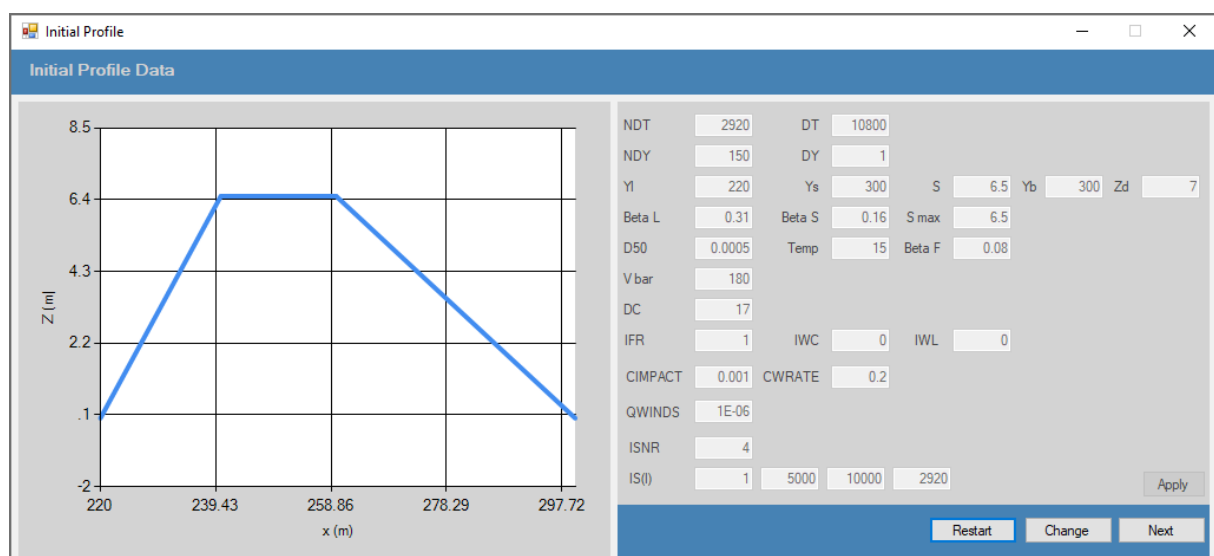


Figura 34. Primeira janela da interface gráfica, desenvolvida para definição da morfologia inicial do perfil transversal de praia

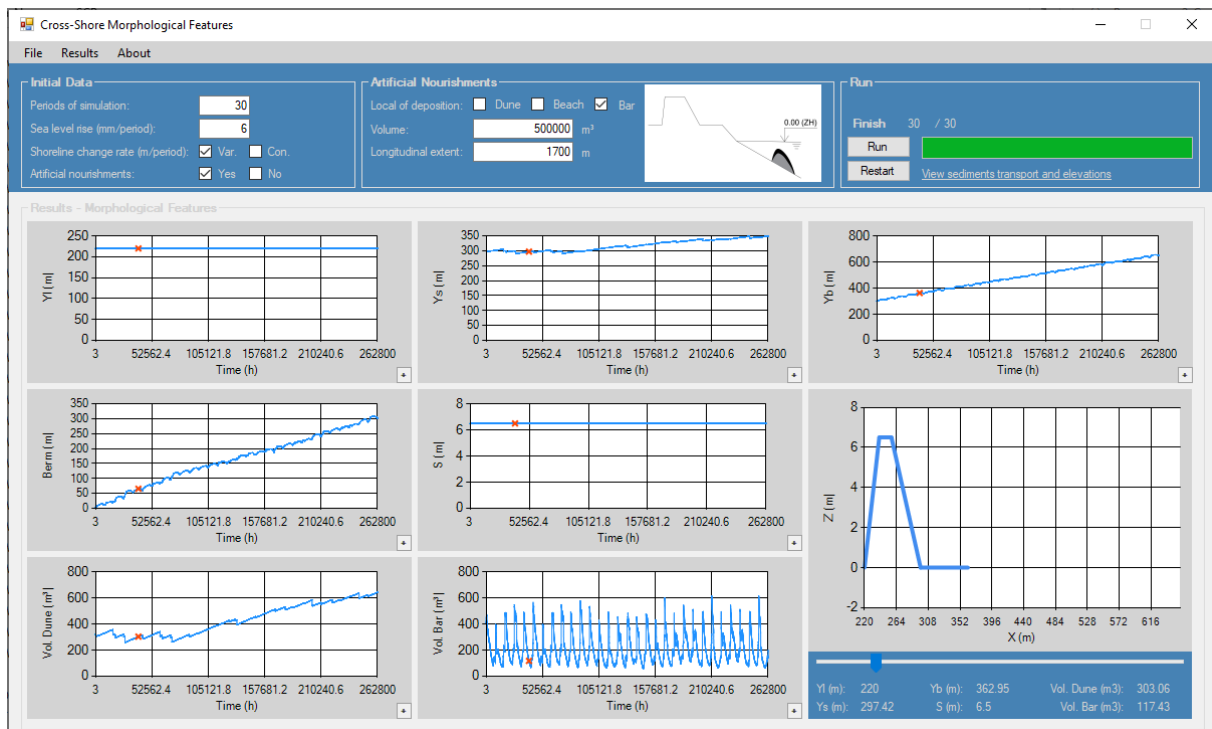


Figura 35. Segunda janela da interface gráfica, desenvolvida para executar o método de integração dos processos transversais e longitudinais

Para simular os processos longitudinais no comportamento do perfil transversal, como referido, procede-se à variação de parâmetros chave que definem a morfologia do perfil. Os efeitos da subida do nível médio da água do mar são simulados pela diminuição da altura da berma ( $D_B$ ) e aumento da profundidade de fecho ( $D_C$ ). Para a modelação numérica dos efeitos das alimentações artificiais de sedimentos, o utilizador tem de definir na interface gráfica o volume total de alimentação em cada período de simulação (NDT), a extensão longitudinal da deposição e o local para depositar os sedimentos (barra, berma ou duna). Com estes dados, o código automaticamente calcula o volume de alimentação na secção transversal, resultando da divisão do volume total pela extensão da zona de deposição. Posteriormente, seguindo a abordagem utilizada por Marinho (2018), para simular os efeitos das alimentações artificiais, o modelo automaticamente seleciona e atualiza os parâmetros que controlam a morfologia do perfil transversal. As taxas de variação da posição da linha de costa devidas aos gradientes de transporte sólido longitudinal (SCR), são simuladas através da variação da posição da berma ( $Y_B$ ). Em cenário de acreção, a berma avança em direção ao mar e em situação de erosão, a berma recua em direção a terra. Adicionalmente, se o recuo da berma atingir a posição do pé da duna do lado de mar, é também atualizado o parâmetro posição do pé da duna do lado de mar ( $Y_S$ ). Na interface desenvolvida, o utilizador pode definir a taxa de variação da posição da linha de costa como constante, indicando um valor numérico a considerar na simulação, ou pode definir o parâmetro como variável, permitindo por exemplo utilizar as taxas de variação da posição da linha de costa obtidas através de um modelo de evolução da posição da linha de costa. Para a segunda situação, o utilizador tem de definir um ficheiro *input* com extensão *.txt* com a evolução das taxas de variação da posição da linha de costa no final de cada período de simulação (por exemplo, anualmente).

## 7.2. Aplicação do método proposto

No presente capítulo são apresentados os resultados da aplicação do método proposto, para modelação da evolução dos perfis transversais por integração dos efeitos longitudinais, aos perfis transversais da praia da Costa Nova e da praia da Vagueira. Para tal, foram replicadas as simulações descritas na secção 4.2 do presente relatório, integrando-se no *setup* de modelação as taxas de variação da posição da linha de costa (SCR), permitindo os resultados das simulações tecer considerações sobre o efeito dos processos de transporte longitudinais na evolução dos perfis transversais e no desempenho das alimentações artificiais de sedimentos.

A evolução da SCR em cada perfil transversal foi obtida através do modelo numérico LTC. Assim, através da interface gráfica foi definido que o parâmetro SCR seria variável e utilizaram-se os resultados produzidos pelo modelo LTC para definir o ficheiro *input*, correspondente às taxas de variação da posição da linha de costa devidas aos gradientes de transporte sólido longitudinal.

A análise dos resultados é realizada através da comparação da evolução dos parâmetros que caracterizam a posição do pé da duna do lado de mar ( $Y_S$ ), posição da berma ( $Y_B$ ) e largura da berma, para as situações em que apenas se consideraram os efeitos transversais (CS), com a evolução que os parâmetros apresentam quando os processos transversais foram combinados com os processos de transporte sólido longitudinal, por introdução da SCR no modelo numérico (CS + SCR).

A introdução dos efeitos da SCR tem impactos distintos na evolução morfológica dos dois perfis transversais de praia analisados. Considerando a evolução dos perfis na situação de referência, para o perfil da praia da Costa Nova observa-se que os parâmetros  $Y_S$  e  $Y_B$  apresentam evoluções similares, quer se considere ou não o efeito da SCR no modelo numérico (Figura 36a). No perfil transversal da praia da Vagueira a inclusão da SCR tem um impacto significativo na evolução do perfil transversal, sendo observado que, se forem considerados os efeitos devidos à SCR, a duna é destruída no quarto ano de simulação (Figura 36b). Esta diferença na evolução morfológica dos dois perfis transversais pode ser atribuída à magnitude das SCR, uma vez, as taxas de variação da posição da linha de costa no perfil transversal da Costa Nova são significativamente inferiores às taxas de variação da posição da linha de costa que ocorrem no perfil da Vagueira (no perfil da Costa Nova a posição da linha de costa apresenta um recuo médio de 0.1 m/ano e no perfil da Vagueira o recuo médio é de 0.9 m/ano). A diferença na magnitude do parâmetro referido entre os dois perfis é devida à existência de uma obra longitudinal aderente na praia da Costa Nova que fixa a posição da linha de costa e inibe o seu recuo. Esta obra não foi representada no esquema de evolução do perfil transversal, assumindo-se que o recobrimento de areia existente acaba por funcionar como um perfil natural. A validade deste pressuposto deve ser explorada e avaliada em futuros desenvolvimentos do trabalho.

A destruição da duna observada no perfil da Vagueira, que passa a ocorrer devido à introdução dos efeitos dos processos de transporte longitudinais no modelo numérico, está de acordo com resultados de monitorização reportados por Baptista *et al.* (2006), que indicam que na região costeira de Aveiro, significativas extensões da frente dunar foram destruídas pela ação das ondas.

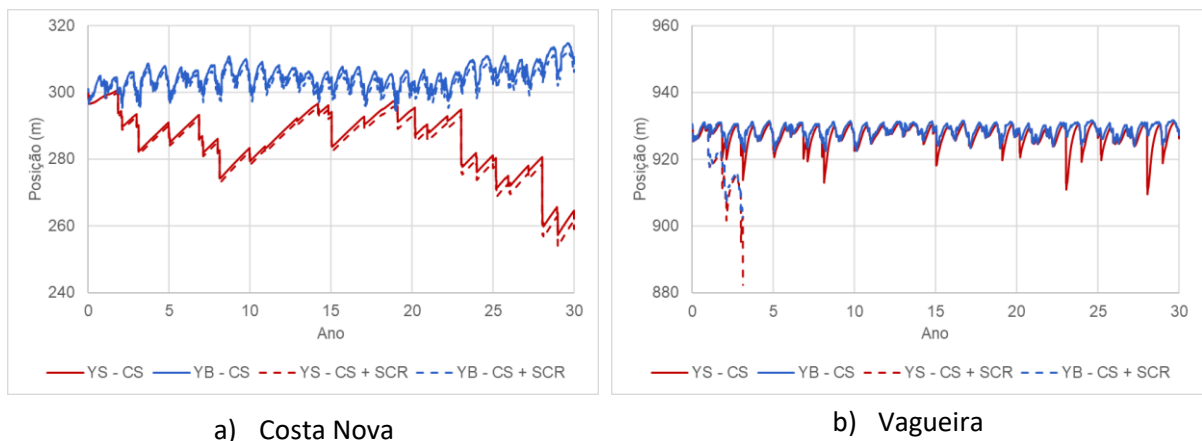


Figura 36. Evolução morfológica dos parâmetros  $Y_S$  e  $Y_B$  em função de ser ou não considerado o efeito da SCR (CS - situação em que apenas foram considerados os processos transversais; CS + SCR - situação em que os processos transversais foram combinados com os efeitos longitudinais).

O desempenho das alimentações artificiais de sedimentos é influenciado pelos efeitos da SCR, nomeadamente no perfil da praia da Vagueira, uma vez que, no perfil da Costa Nova a obra longitudinal aderente fixa a posição da linha de costa.

No perfil da Costa Nova, definindo-se um esquema de intervenção de alimentação artificial, a evolução dos parâmetros  $Y_S$  e  $Y_B$ , para as simulações em que se combina os efeitos longitudinais e transversais é similar à evolução que os parâmetros apresentam quando apenas são considerados os processos transversais. Na Figura 37 e Figura 38 comparam-se, para os diferentes esquemas de alimentação no perfil transversal da praia da Costa Nova, os resultados da evolução dos parâmetros  $Y_S$  e  $Y_B$ , para o caso de apenas serem considerados os processos transversais (linhas sólidas), com a situação dos processos transversais serem combinados com os efeitos longitudinais (linhas a tracejado).

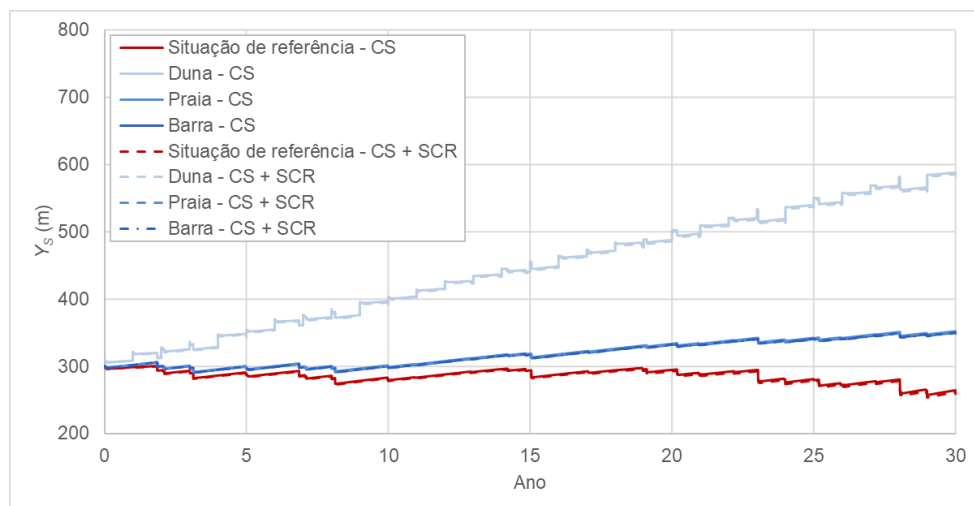


Figura 37. Evolução morfológica dos parâmetros  $Y_S$  do perfil da Costa Nova, em função de ser considerado ou não o efeito da SCR.

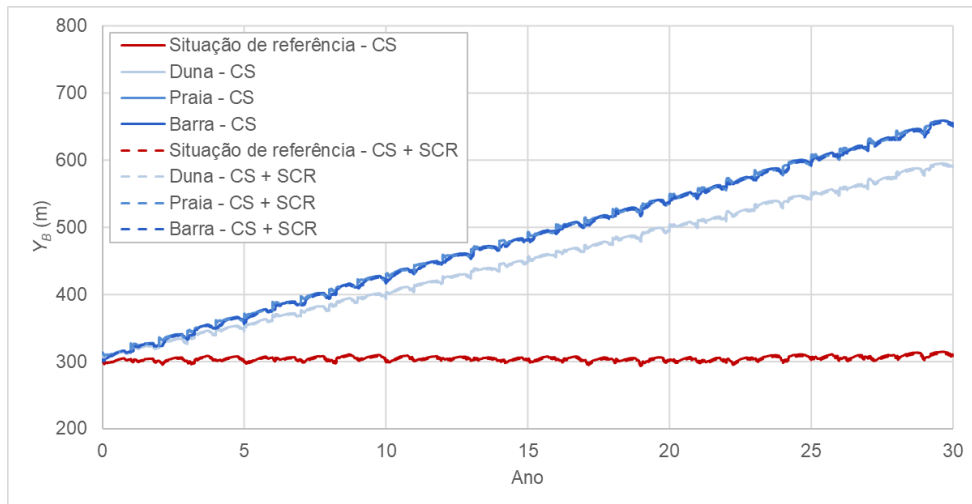


Figura 38. Evolução morfológica dos parâmetros  $Y_B$  do perfil da Costa Nova, em função de ser considerado ou não o efeito da SCR.

No perfil da Vagueira, a evolução dos parâmetros  $Y_S$  e  $Y_B$ , quando são combinados os processos transversais e longitudinais, é quantitativamente idêntica à evolução que os parâmetros apresentam quando apenas são considerados os efeitos transversais, mas o avanço dos parâmetros em direção ao mar é significativamente inferior quando os efeitos longitudinais são introduzidos no modelo (comparação das linhas superiores azuis contínuas com as linhas inferiores azuis a tracejado) (Figura 39 e Figura 40).

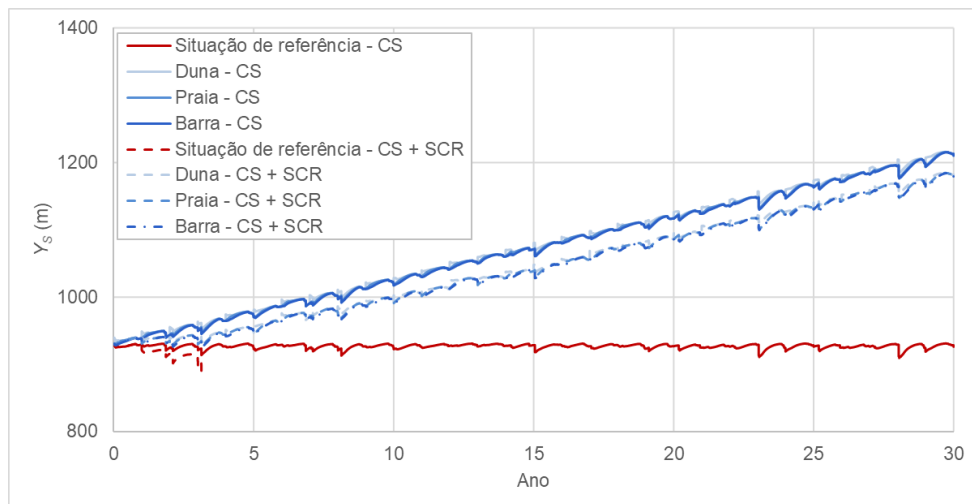


Figura 39. Evolução morfológica dos parâmetros  $Y_S$  do perfil da Vagueira, em função de ser considerado ou não o efeito da SCR.

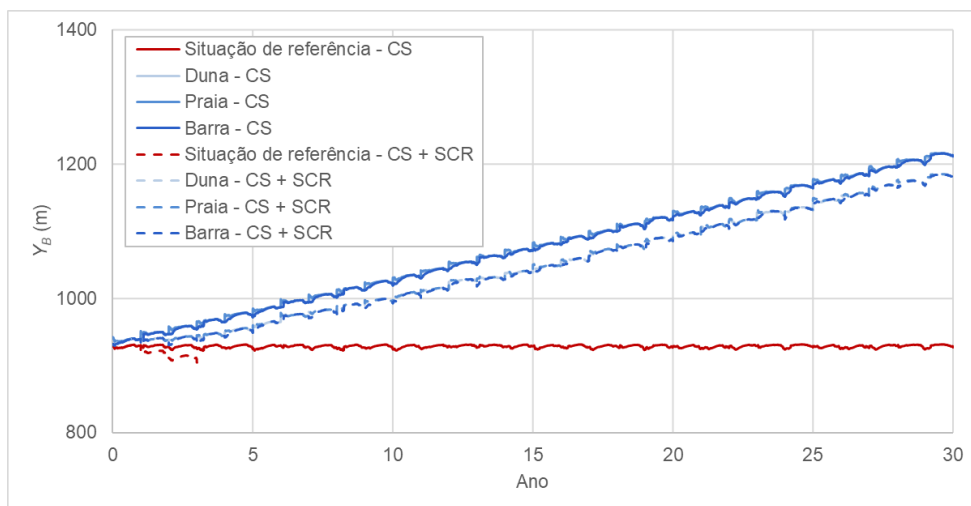
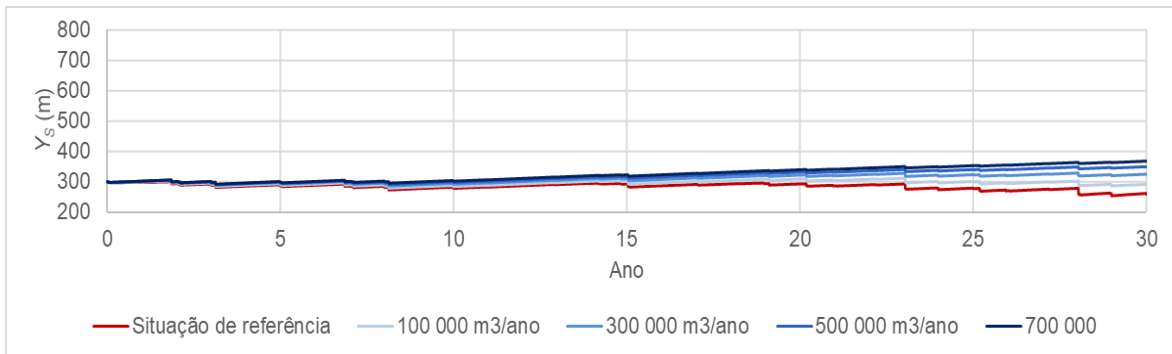
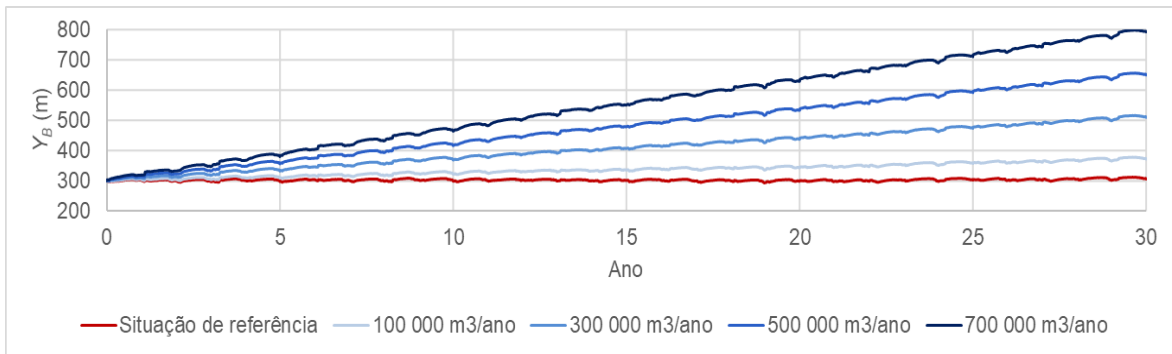


Figura 40. Evolução morfológica dos parâmetros  $Y_B$  do perfil da Vagueira, em função de ser considerado ou não o efeito da SCR.

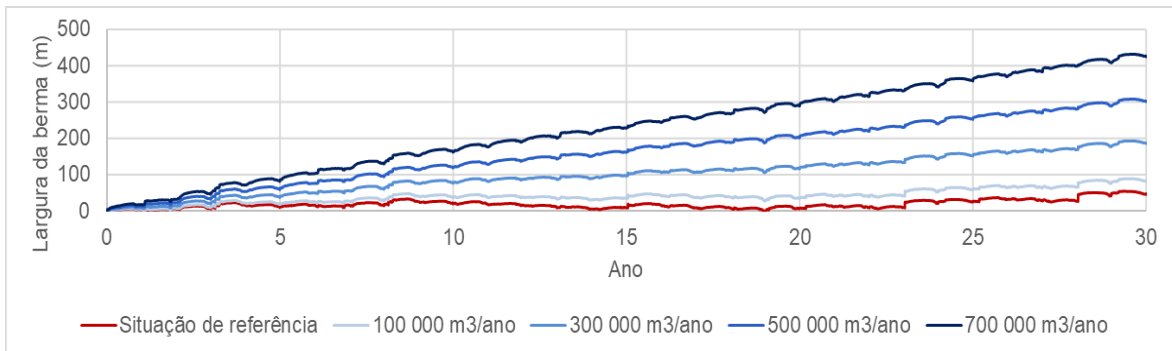
Os resultados obtidos indicam que as intervenções de alimentação artificial de sedimentos contribuem para mitigar os problemas de erosão costeira, observando-se que mesmo para os cenários em que se combinou os processos transversais com os processos longitudinais, a duna na praia da Vagueira não é destruída em nenhum cenário em que se considere a realização de intervenções de alimentação artificial de sedimentos (Figura 41 e Figura 42). Esta conclusão está de acordo com os resultados de monitorização desenvolvido por Fernadéz-Fernandéz *et al.* (2019), que indicam que as alimentações artificiais de sedimentos realizadas nas praias localizadas a Sul do Porto de Aveiro nos últimos anos (2013 - 2018) têm inibido os impactos negativos da erosão costeira que se observavam acontecer no passado.



a) Posição do pé da duna do lado de mar ( $Y_S$ )

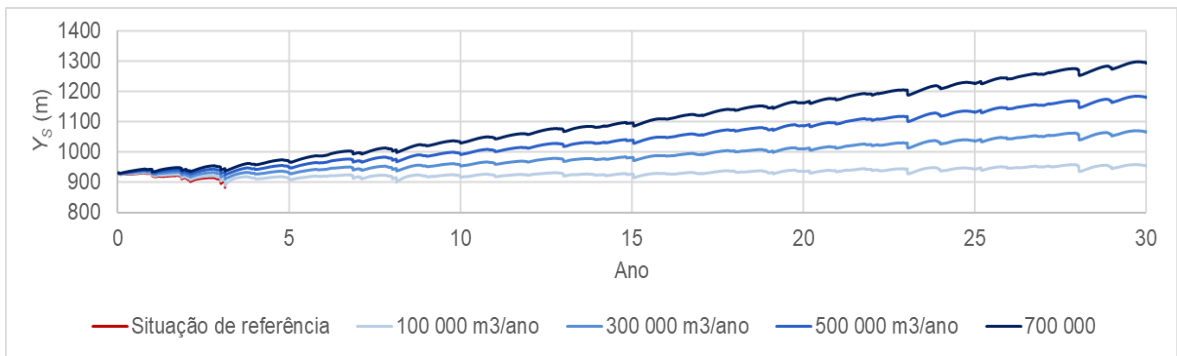


b) Posição da berma ( $Y_B$ )

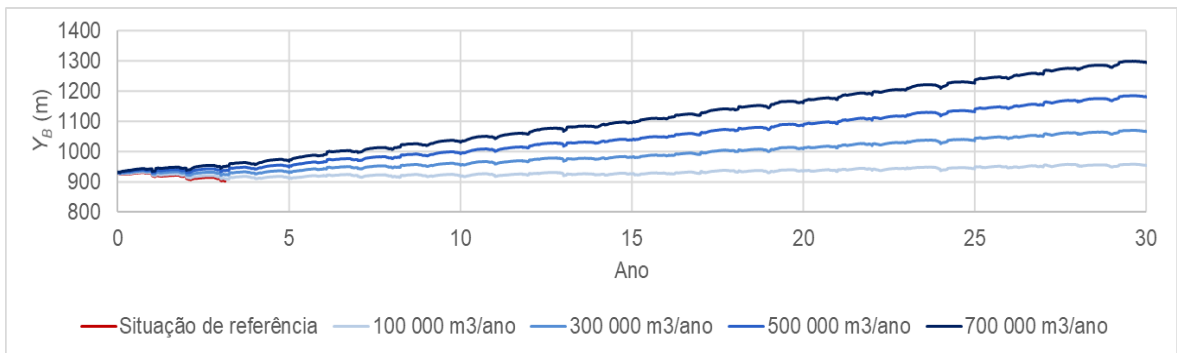


c) Largura da berma

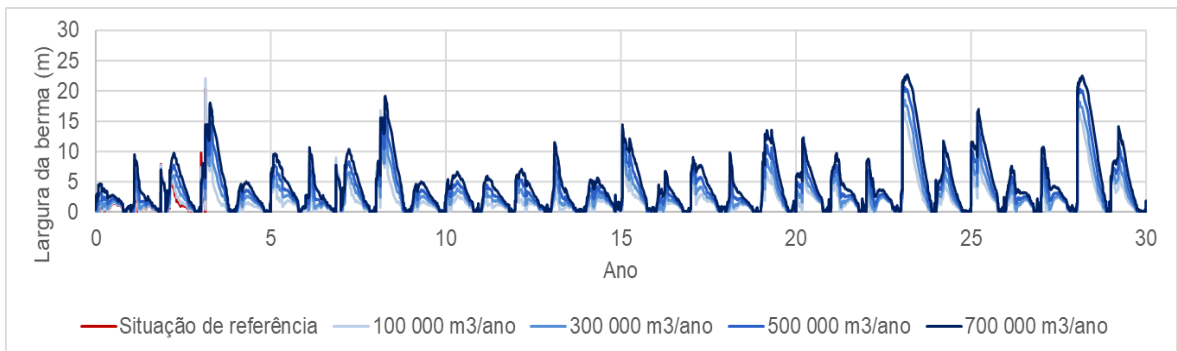
Figura 41. Evolução dos parâmetros morfológicos do perfil transversal da praia da Costa Nova, considerando no modelo numérico os efeitos transversais combinados com os efeitos longitudinais, para os diferentes cenários de volume de sedimentos depositados



a) Posição do pé da duna do lado de mar ( $Y_s$ )



b) Posição da berma ( $Y_b$ )



c) Largura da berma

Figura 42. Evolução dos parâmetros morfológicos do perfil transversal da praia da Vagueira, considerando no modelo numérico os efeitos transversais combinados com os efeitos longitudinais, para os diferentes cenários de volume de sedimentos depositados

## 8. Conclusões

O estudo desenvolvido para avaliar o desempenho e longevidade de intervenções de alimentação artificial de sedimentos, com o objetivo de mitigar os problemas de erosão que se fazem sentir a sul do Porto de Aveiro, avaliou um total de 10 cenários de alimentação artificial de sedimentos, permitindo tecer considerações sobre os volumes adotados em cada intervenção de deposição, a frequência das operações e o local de depósito dos sedimentos. Além desta análise, desenvolvida com base nos impactos da evolução da posição de linha de costa ao longo de 30 anos de simulação, foi realizada uma

avaliação do comportamento do perfil transversal de praia, por avaliação dos volumes e locais de deposição no perfil transversal (barra, praia/berma ou duna) e foi proposto um método com o objetivo de apresentar contributos para aumentar a capacidade de simulação da evolução dos perfis transversais de praia, conjugando os efeitos dos comportamentos em planta.

As soluções correspondentes aos maiores volumes de sedimentos depositados, correspondem às soluções com melhor desempenho na perspectiva de mitigar os problemas de erosão a sotamar do Porto de Aveiro. Em contrapartida, a localização dos sedimentos a depositar apresenta uma tendência pouco definida e com impacto limitado (em termos globais, pequenas diferenças entre os diversos cenários). Em geral, o volume de sedimentos que se acumula na zona de deposição é elevado, condicionando o desempenho do modelo, que mostra uma capacidade reduzida de distribuir os sedimentos ao longo da extensão da linha de costa. Desta forma, os comportamentos locais são distintos, quando se comparam os diversos cenários de localização de deposição dos sedimentos. Relativamente à frequência das operações, os resultados apontam para que seja mais eficaz realizar menos operações com volumes maiores.

Genericamente, entre os cenários avaliados, nenhum cenário elimina na totalidade as áreas erodidas no trecho, sendo a solução mais eficaz a deposição de 700 000 m<sup>3</sup>/ano de sedimentos.

A análise do comportamento do perfil transversal, confirmou que os maiores volumes de sedimentos depositados representam melhores comportamentos ao longo do tempo, induzindo um maior avanço da posição da berma do perfil. Para os dois perfis transversais de praia estudados neste trabalho observa-se que a realização de intervenções de alimentação artificial de sedimentos conduz a evoluções distintas da morfologia dos perfis de praia. Estas diferenças podem dever-se às considerações de calibração de ambos os perfis, relacionadas com as inclinações das faces da duna e da praia, bem como profundidade de fecho, volume inicial da barra e parâmetro de transporte eólico de sedimentos. Para o perfil transversal da praia da Costa Nova conclui-se que as intervenções de alimentação servem diferentes propósitos, constatando-se que a deposição dos sedimentos na barra submersa e na praia são as soluções mais eficientes para aumentar a largura da berma. A deposição dos sedimentos na duna reflete-se num aumento do volume da duna, aumentando a sua robustez. No perfil da Vagueira a deposição de sedimentos reflete-se sobretudo num aumento do volume da duna, independentemente do local do perfil transversal selecionado para depositar os sedimentos.

Os resultados da aplicação do método proposto, com o objetivo de incorporar os processos longitudinais na evolução do perfil transversal, mostra que as taxas de variação da posição da linha de costa devidas aos gradientes de transporte sólido longitudinal têm um impacto significativo na evolução dos perfis transversais e condicionam o desempenho das alimentações artificiais de sedimentos, sendo importante considerar os seus efeitos na evolução morfológica dos perfis transversais de praia. Os principais resultados produzidos pelo método proposto estão de acordo com resultados de monitorização realizados na área de estudo em que os perfis de praia analisados se localizam, o que permite ter confiança nos resultados produzidos pelo método proposto.

## 9. Referências

- Baptista, P., Bastos, L., Bernardes, C., Taborda, R. (2006).** Large Scale Morphodynamics Characterisation of Exposed Sandy Beaches by DGPS; *Journal of Coastal Research*. ISSN 0749-0208.
- Baptista, P., Coelho, C., Pereira, C., Bernardes, C., Veloso-Gomes, F. (2014).** Beach Morphology and Shoreline Evolution: Monitoring and Modeling Medium-Term Responses (Portuguese NW Coast Study Site); *Coastal Engineering Journal*, Elsevier, 84: 23-37.
- CERC (1984).** Shore Protection Manual, Vol. 1. DC: U.S. Army Corps of Engineers. Coastal Engineering and Research Center. U.S. Government Printing Office.
- Coelho, C. (2005).** Riscos de Exposição de Frentes Urbanas para Diferentes Intervenções de Defesa Costeira. Tese de Doutoramento. Universidade de Aveiro, 404 p.
- COSMO (2018).** Modelo Digital de Elevação (DEM) da praia imersa e emersa entre a Praia de São Jacinto à Praia da Gafanha da Boa Hora. Código: 8cd53865-0706-ebf6-5734-7b5cab3becc6. Geoglobal, Sistemas de Informação Geográfica, Lda. Programa de Monitorização da Faixa Costeira de Portugal Continental – COSMO, APA - Agência Portuguesa do Ambiente.
- COSMO (2020).** Dados de Monitorização. Programa de Monitorização da Faixa Costeira de Portugal Continental - COSMO, APA - Agência Portuguesa do Ambiente. <https://cosmo.apambiente.pt/data> (visitado em maio de 2020).
- EEA (2019).** European Environment Agency. Projected Rise in Global Mean Sea Level <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/daviz/projected-global-mean-sea-level#tab-dashboard-01> (visitado em julho de 2020)
- El Masri, B., Shu, S., Jain, A. (2015).** Implementation of a Dynamic Rooting Depth and Phenology Into a Land Surface Model: Evaluation of Carbon, Water, and Energy Fluxes in the High Latitude Ecosystems. *Agricultural and Forest Meteorology Journal*. 211, 85-99.
- Fernandéz-Fernandéz, S., Baptista, P., Bernardes, C., Silva, P., Fontán-Bouzas, Á., López-Olmedilla, L., Ferreira, C. (2019).** Variação da Linha de Costa em Praias Arenosas: Aveiro (Portugal). IX Congresso sobre Planeamento e Gestão das Zonas Costeiras dos Países de Expressão Portuguesa, Lisboa, Portugal.
- IPCC (2014).** Climate Change 2014: Synthesis Report. Intergovernmental Panel on Climate Change, 155 p.
- Larson, M., Palalane, J., Fredriksson, C., Hanson, H. (2016).** Simulating cross-shore material exchange at decadal scale. Theory and model component validation. *Coast. Eng. J.*, 116, 57-66 pp.
- Lira, C., Silva, A., Taborda, R., Andrade, C. (2016).** Coastline Evolution of Portuguese Low-Lying Sandy Coast in the Last 50 years: an integrated approach. *Earth System Science Data Discussions* 8 (1), 265-278. doi:10.5194/essd-2016-5.
- Marinho, B. (2018).** Artificial Nourishments as a Coastal Defense Solution: Monitoring and Modelling Approaches. Tese de doutoramento, Universidade de Aveiro Aveiro, Aveiro, Portugal.

**MarRisk (2017).** Adaptação Costeira às Alterações Climáticas: conhecer os riscos e aumentar a resiliência. Projeto de investigação financiado através do programa EP-INTERREG V A Espanha-Portugal (POCTEP).

**Microsoft (2020).** Visual Basic Documentation.

<https://docs.microsoft.com/pt-pt/dotnet/visual-basic/> (visitado em janeiro de 2021)

**Oliveira, E. (2016).** Métodos para a Análise de Concordância: Estudo de Simulação e Aplicação a Dados de Evapotranspiração. Tese de Doutoramento. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Quieroz”, 177 p.

**Palalane, J., Fredriksson, C., Marinho, B., Larson, M., Hanson, H., Coelho, C. (2016).** Simulating Cross-shore Material Exchange at Decadal Scale. Model Application. Coastal Engineering, Elsevier, 116, 29-41 pp.

**Pinto, C., Silveira, T., Teixeira, S. (2018).** Alimentação Artificial de Praias na Faixa Costeira de Portugal Continental: Enquadramento e Retrospectivas das Intervenções Realizadas (1950-2017). Relatório Técnico. Agência Portuguesa do Ambiente.

**Polis (2015).** Obra Polis Litoral Ria de Aveiro 2009 a 2015. ISBN: 978-989-20-6110-8. Gráfica Maiadouro.

**Santos, F., Lopes, A., Moniz, G., Ramos, L., Taborda, R. (2014).** Gestão da Zona Costeira - O Desafio da Mudança. Relatório do Grupo de Trabalho do Litoral, 237 p.

**Silva, R. (2010).** Avaliação Experimental e Numérica de Parâmetros Associados a Modelos de Evolução da Linha de Costa. Tese de Doutoramento. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 488 p.

**Universidade de Aveiro, 2015.** Estudo da Dinâmica Sedimentar na Embocadura da Barra do Porto da Figueira da Foz. Relatório de Progresso. 99 p.

**Veloso-Gomes, F., Taveira Pinto, F., Das Neves, L., Pais Barbosa, J. (2006).** Pilot site of River Douro – Cape Mondego, and case studies of Estela, Aveiro, Caparica, Vale de Lobo and Azores. EUrosion. IHRH, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. ISBN: 972-752-074-x.

**Willmott, C., Robeson, S., Matsuura, K. (2012).** A Refined Index of Model Performance. International Journal of Climatology. 32, 2088-2094.

**WMO (1988).** Guide to Wave Analysis and Forecasting. 2<sup>nd</sup> Edition. World Meteorological Organization, Genebra, Suíça, 168 p.