



LABORATÓRIO NACIONAL  
DE ENGENHARIA CIVIL

# EVOLUÇÃO COSTEIRA DO DOURO AO CABO MONDEGO

## Proposta de uma metodologia de estudo

Estudo integrado no projeto *Gestão Ambiental de Sistemas Aquáticos e Costeiros* da Estratégia de Investigação e Inovação do LNEC – 2013-2020

Lisboa • dezembro de 2015

**I&D** HIDRÁULICA E AMBIENTE

RELATÓRIO 380/2015 – **DHA/NEC**

## **Título**

### **EVOLUÇÃO COSTEIRA DO DOURO AO CABO MONDEGO**

Proposta de uma metodologia de estudo

## **Autoria**

DEPARTAMENTO DE HIDRÁULICA E AMBIENTE

### **Claudino Martins Vicente**

Investigador-Coordenador do LNEC (aposentado)

### **Manuel Clímaco**

Investigador Principal do LNEC (aposentado)

## **Colaboração**

### **Vítor Pisco**

Técnico Superior, Núcleo de Estuários e Zonas Costeiras

Copyright © LABORATÓRIO NACIONAL DE ENGENHARIA CIVIL, I. P.

AV DO BRASIL 101 • 1700-066 LISBOA

e-mail: [lnec@lnec.pt](mailto:lnec@lnec.pt)

[www.lnec.pt](http://www.lnec.pt)

Relatório 380/2015

Proc. 0604/112/20285

## EVOLUÇÃO COSTEIRA DO DOURO AO CABO MONDEGO

Proposta de uma metodologia de estudo

### Resumo

---

Apresenta-se uma metodologia de estudo de desequilíbrios morfológicos costeiros de grande envergadura. Esta metodologia, baseada na modelação numérica, foi utilizada para: analisar as evoluções sofridas pela linha de costa em toda a extensão espacial e temporal, do Douro ao Cabo Mondego, desde 1950 até ao presente; e antever a evolução nas próximas décadas face a intervenções alternativas de mitigação e controlo do processo erosivo. Usaram-se os dados disponíveis, que, embora apresentando algumas falhas, permitiram confirmar a viabilidade e potencial da metodologia. Em síntese, a metodologia que se propõe baseia-se numa interpretação global dos fenómenos em curso, quantificada através de balanços sedimentares e da aplicação de um modelo numérico de evolução de linha de costa. Recomenda-se a análise de possíveis intervenções considerando um comprimento de costa e um período de tempo adequados aos processos de evolução morfológica em curso.

Palavras-chave: Douro - Cabo Mondego / Evolução morfológica / Erosão / Proteção costeira

## COASTAL EVOLUTION BETWEEN DOURO AND CAPE MONDEGO

Proposal of a methodology for assessment

### Abstract

---

A methodology to study large scale coastal morphological imbalances is presented. This methodology, based on numerical modelling, was used to examine the coastline evolution between the Douro River and Cape Mondego from 1950 to the present, and to predict the evolution in the next decades considering alternative interventions to mitigate and control the erosive process. The simulations used the available data, which, although showing some flaws, confirmed the feasibility and potential of the methodology. The proposed methodology is based on a global interpretation of the phenomena, quantified through sedimentary budgets and the application of a coastline evolution model. It is recommended that the analysis of possible interventions be performed for a length of coastline and a period of time appropriate to the morphological evolution processes taking place.

Keywords: Douro - Cape Mondego / Morphological evolution / Erosion / Coastal protection



## Sumário executivo

---

O trecho compreendido entre a foz do Douro e o cabo Mondego é o que apresenta a mais intensa evolução morfológica em toda a costa portuguesa, com erosões a sul de Espinho e um processo de acumulação e erosão que se desenvolve a norte e a sul da embocadura da Ria de Aveiro.

O processo erosivo a sul de Espinho tem como causa principal o défice de entrada de sedimentos pela fronteira norte, por enfraquecimento da alimentação de areias proveniente da bacia do Douro. O processo de acumulação e erosão na costa marítima de Aveiro foi desencadeado pela construção, na década de 1950, dos molhes de regularização da embocadura da Ria de Aveiro.

As erosões que afectaram as frentes marítimas a sul de Espinho e a sul da embocadura de Aveiro obrigaram à construção de diversos esporões e defesas frontais. Como os processos erosivos continuam activos e a progredir para sul, obrigarão a novas intervenções de protecção, caso se opte por defender as povoações ameaçadas. As intervenções a realizar deverão ser apoiadas num estudo que permita interpretar os fenómenos costeiros em curso e orientar as acções de protecção a desenvolver.

Propõe-se e testa-se uma metodologia para esse estudo apoiada numa base científica que aproveite os conhecimentos e instrumentos de cálculo disponíveis no âmbito da engenharia costeira. É feita uma interpretação global dos fenómenos em curso, quantificada através da aplicação de um modelo numérico de evolução de linha de costa. Procura-se: caracterizar e interpretar as evoluções sofridas pela linha de costa em toda sua extensão espacial e temporal, do Douro ao Cabo Mondego e desde 1950 até ao presente; antever o seu progresso nas próximas décadas; e estudar linhas alternativas de intervenção para controlo das erosões

Apesar de os dados disponíveis apresentarem algumas falhas considerou-se útil usá-los como elementos de análise e de modelação, pois permitem testar e verificar a viabilidade e potencial da metodologia proposta. Uma maior disponibilidade de meios, justificada pelos valores económicos e sociais envolvidos, permitirá num futuro estudo, mais aprofundado, melhorar as estimativas e interpretações efectuadas.



## Índice

1	Introdução .....	1
2	Linhas gerais da metodologia .....	2
3	Modelação numérica .....	5
4	Simulação e interpretação do processo erosivo .....	8
4.1	Considerações gerais .....	8
4.2	Trecho do Douro à Torreira .....	9
4.2.1	Simulação da situação primitiva .....	9
4.2.2	Simulação da evolução entre 1880 e 1948 .....	10
4.2.3	Simulação da evolução entre 1948 e 2005 .....	11
4.2.4	Resultados da simulação .....	12
4.2.5	Interpretação do processo erosivo .....	16
4.3	Trecho da Torreira ao Cabo Mondego .....	17
4.3.1	Simulação da situação primitiva .....	17
4.3.2	Simulação da evolução entre 1948 e 2005 .....	19
4.3.3	Resultados da simulação .....	21
4.3.4	Interpretação do processo erosivo .....	29
5	Simulação da evolução futura .....	32
5.1	Considerações gerais .....	32
5.2	Abandono da defesa da costa .....	32
5.3	Manutenção das obras costeiras existentes .....	37
5.4	Alimentação artificial .....	41
5.5	Obras fixas e alimentação artificial .....	45
6	Considerações finais .....	50
	Bibliografia .....	54

## Índice de figuras

Figura 1.1 – Trecho de costa do Douro ao cabo Mondego.....	1
Figura 2.1 – Esquema dos balanços sedimentares dos trechos .....	3
Figura 3.1 – Esquema de estabelecimento do modelo Litmod, com localização dos regimes de agitação marítima, no trecho Douro – Torreira.....	6
Figura 3.2 – Esquema de estabelecimento do modelo Litmod, com localização dos regimes de agitação marítima, no trecho Torreira – Cabo Mondego.....	7
Figura 4.1 – Calibração da estabilidade da linha de água na situação de equilíbrio anterior a 1880. Simulação de 59 anos de incidência da agitação marítima .....	9
Figura 4.2 – Simulação da evolução entre 1880 e 1948.....	10
Figura 4.3 – Comparação da evolução entre 1948 e 2005 no trecho Douro - Torreira. Subtrecho A1 .....	13
Figura 4.4 – Comparação da evolução entre 1948 e 2005 no trecho Douro - Torreira. Subtrechos A2 e A3 .....	14
Figura 4.5 – Comparação da evolução entre 1948 e 2005 no trecho Douro - Torreira. Subtrechos A4 e A5 .....	15
Figura 4.6 – Evolução das perdas de areia no trecho Douro - Torreira, entre 1948 e 2005 .....	16
Figura 4.7 – Simulação da estabilidade da linha de água na situação de equilíbrio anterior a 1948 .....	18
Figura 4.8 – Comparação da evolução de 1948 a 2005, entre a Torreira e a embocadura.....	22
Figura 4.9 – Comparação da evolução de 1948 a 2005, entre a Torreira e a embocadura.....	23
Figura 4.10 – Comparação da evolução de 1948 a 2005, entre a embocadura e sul de Mira.....	24
Figura 4.11 – Comparação da evolução de 1948 a 2005, entre a embocadura e sul de Mira.....	25
Figura 4.12 – Comparação da evolução de 1948 a 2005, entre a embocadura e sul de Mira.....	26
Figura 4.13 – Comparação da evolução de 1948 a 2005, entre a embocadura e sul de Mira.....	27
Figura 4.14 – Evolução de balanços de areia entre 1948 e 2005 .....	28
Figura 5.1 – Simulação da alternativa de abandono da defesa da costa do Douro à Torreira .....	34
Figura 5.2 – Simulação da alternativa de abandono da defesa da costa da Torreira ao Cabo Mondego .....	36
Figura 5.3 – Simulação da alternativa de manutenção das obras costeiras existentes no trecho do Douro à Torreira.....	38
Figura 5.4 – Simulação da alternativa de manutenção das obras existentes no trecho da Torreira ao Cabo Mondego.....	40
Figura 5.5 – Simulação da alternativa de alimentação artificial do trecho do Douro à Torreira .....	42
Figura 5.6 – Simulação da alternativa de alimentação artificial da Torreira ao Cabo Mondego .....	44
Figura 5.7 – Simulação da alternativa de obras fixas e alimentação artificial da costa do Douro à Torreira.....	46
Figura 5.8 – Alternativa de obras fixas e alimentação artificial. Volumes acumulados em diferentes zonas da costa entre o Douro e a Torreira .....	47
Figura 5.9 – Simulação da alternativa de obras fixas e alimentação artificial da Torreira ao Cabo Mondego .....	48
Figura 5.10 – Alternativa de obras fixas e alimentação artificial. Volumes acumulados em diferentes zonas da costa entre a Torreira e o Cabo Mondego .....	49

## 1 | Introdução

O trecho compreendido entre a foz do Douro e o cabo Mondego é o que apresenta a mais intensa evolução morfológica na costa portuguesa, com erosões a sul de Espinho e um processo de acumulação e erosão que se desenvolve a norte e a sul da embocadura da Ria de Aveiro (Fig. 1.1).

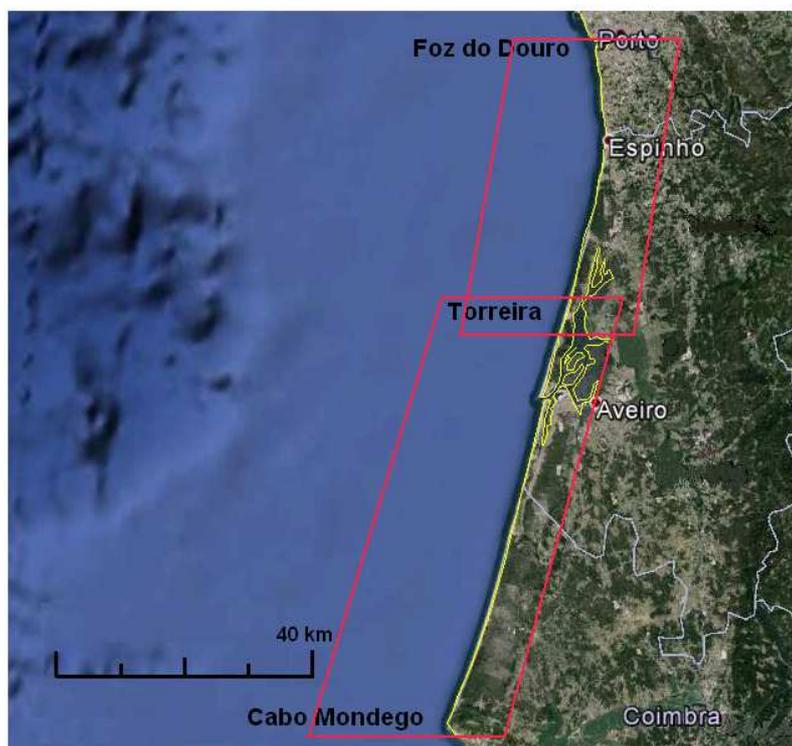


Figura 1.1 – Trecho de costa do Douro ao cabo Mondego

Foi efectuada anteriormente a caracterização e interpretação geral destes processos de evolução morfológica tendo-se quantificado, a partir de estimativas de balanço aluvionar, as áreas e volumes ganhos e perdidos pelo trecho de costa (Vicente e Clímaco, 2012). Estes dados foram já utilizados para simular com modelação numérica: o processo erosivo das praias a sul de Espinho (Vicente e Clímaco, 2014); e a evolução do trecho da Torreira ao Cabo Mondego (Vicente e Clímaco, 2015, não publicado). Corresponde o presente estudo a uma síntese dessas aplicações.

O objectivo de base deste trabalho é a apresentação de uma metodologia de estudo da evolução sofrida por este longo trecho da costa portuguesa. Procura-se: caracterizar e interpretar de forma quantificada a evolução sofrida, desde 1950 até ao presente; antever o seu progresso nas próximas décadas; e estudar linhas alternativas de intervenção para controlo das erosões.

## 2 | Linhas gerais da metodologia

A análise dos processos de acumulação e erosão de grande amplitude e o seu controlo devem ser apoiadas numa base científica que aproveite adequadamente os conhecimentos e instrumentos de cálculo disponíveis no âmbito da engenharia costeira. Considera-se ainda indispensável que as acções de defesa contra a erosão se integrem numa interpretação global dos fenómenos em curso, abrangendo uma extensão de costa e um horizonte temporal adequados. As intervenções devem pois ser apoiadas num estudo de investigação aplicada que proceda a uma análise aprofundada dos fenómenos em curso, quantificados através da aplicação de modelação numérica da evolução de linha de costa.

Considerado um determinado intervalo de tempo, as alterações da morfologia de um trecho arenoso dependem dos fluxos e balanços sedimentares que nele ocorrem sob a acção do transporte de areias pela agitação marítima. Na presente análise consideram-se dois trechos distintos: de Espinho à Torreira; e da Torreira ao cabo Mondego.

O transporte sólido litoral promove os fluxos de entrada e saída pelas fronteiras norte e sul e a movimentação de areias ao longo dos trechos. As perdas no seu interior podem dever-se: a causas naturais, como transportes irreversíveis de areia para maiores profundidades do perfil de praia, perdas eólicas para terra com alimentação dunar e desgaste por atrito da massa de areia; e a causas artificiais, como extracções de areia para consumo da construção e dragagens de manutenção e aprofundamento de canais de navegação de acesso a instalações portuárias. Os ganhos de volumes de areia podem dever-se: a causas naturais, por alimentação a partir de cursos de água, estuários, lagunas e dunas; e a alimentações artificiais de praias.

A evolução de um trecho entre duas datas depende do valor do balanço que figura na equação da continuidade dos volumes de areia: se esse balanço é nulo não ocorre evolução, mantendo-se uma situação de estabilidade; se é positivo, a correspondente acumulação de areia traduz-se num avanço da linha de água e alargamento da praia; e se é negativo a diminuição do volume de areia contido no trecho origina um recuo da linha de água e emagrecimento da praia (Fig. 2.1).

A análise da evolução de um trecho em desequilíbrio e a caracterização e diagnóstico dos processos erosivos e de acumulação com base no cálculo dos balanços era, há umas décadas atrás, bastante esquemática, sendo apenas viável para trechos não muito longos e períodos de tempo curtos.

O desenvolvimento de modelos numéricos de evolução de linhas de costa, ferramenta de cálculo que se utiliza na presente metodologia, introduziu um notável avanço no estudo destes processos. Permite articular os balanços de numerosas células contíguas, de forma a abranger um trecho longo, com dezenas de quilómetros, e acumular pequenos intervalos de tempo sucessivos para cobrir um intervalo de tempo global de dezenas de anos.

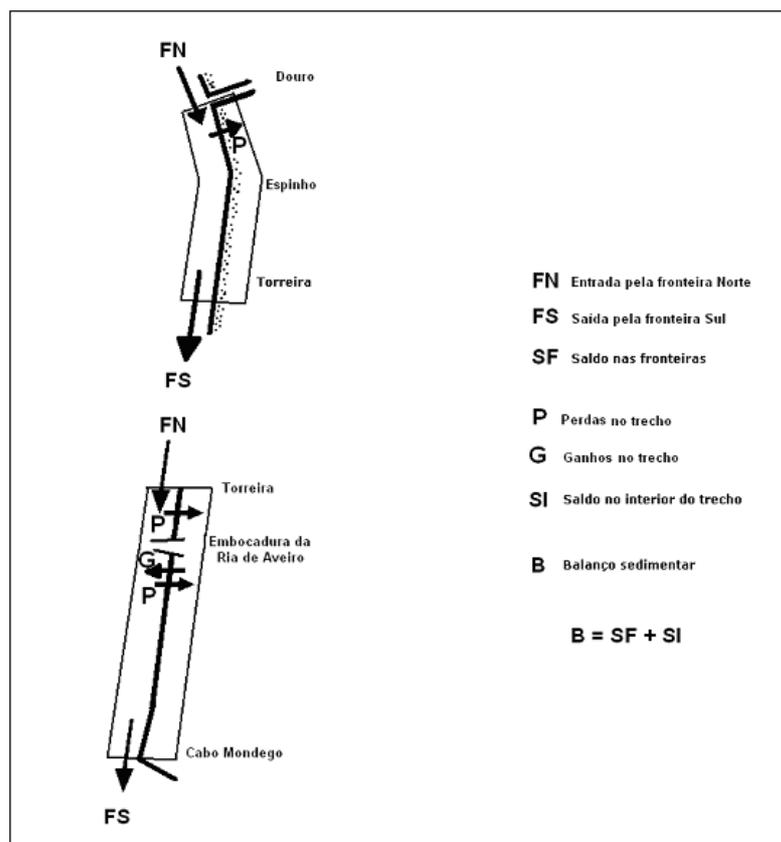


Figura 2.1 – Esquema dos balanços sedimentares dos trechos

Propõe-se na presente metodologia a elaboração das seguintes simulações numéricas em cada um dos trechos:

- Situação de estabilidade anterior à ocorrência do desequilíbrio aluvionar, para compreender a forma como na situação primitiva o transporte sólido litoral introduzia os sedimentos por uma das fronteiras, percorria o trecho e saía pela outra fronteira, após eventuais ganhos e perdas no seu percurso.
- Evolução já ocorrida, para: caracterizar e quantificar com pormenor, no espaço e no tempo, as alterações dos volumes de areia do trecho e os recuos e avanços da linha de água; e aprofundar a compreensão das causas da evolução e a sua importância relativa.
- Evolução da linha de água e dos balanços de areia nas próximas décadas, resultantes de diferentes alternativas de intervenção de controlo e correcção das erosões, visando a avaliação comparativa da sua eficácia.

Apesar de os dados disponíveis apresentarem algumas falhas considerou-se útil usá-los como dados de modelação pois permitem testar e verificar a viabilidade e potencial da metodologia proposta. Uma maior disponibilidade de meios, justificada pelos valores económicos e sociais envolvidos, permitirá num futuro estudo, mais aprofundado, melhorar as estimativas e interpretações efectuadas.

Optou-se por não considerar nesta análise a subida do nível médio do mar, por se ter verificado que o seu efeito estaria contido na margem de erro decorrente das limitações de rigor dos dados disponíveis e dos cálculos efectuados (Bruun, 1988).

### 3 | Modelação numérica

Na simulação do processo erosivo utilizou-se um modelo de evolução de linhas de costa, desenvolvido no LNEC e anteriormente aplicado a um apreciável número de estudos (Vicente e Clímaco, 2003, 2007, 2009). Foram efectuadas em separado aplicações aos trechos (Figs. 3.1 e 3.2): da Foz do Douro à Torreira; e da Torreira ao Cabo Mondego (Vicente e Clímaco, 2014, 2015).

Os dados de modelação da agitação marítima consistiram na série cronológica dos parâmetros das ondas do período de 59 anos de 1952 a 2010, obtida por cálculos de reconstituição da agitação marítima (Dodet *et al.* 2010). Para caracterização da morfologia e sua evolução dispunha-se de linhas de água de diferentes datas, levantamento de alguns perfis de praia, dados de granulometria das areias e das dimensões, localização e datas de construção das obras de defesa. Foram consideradas nas simulações os esporões e defesas frontais construídas para travar o avanço do mar. As perdas e ganhos ocorridos nas fronteiras norte e sul e no interior dos trechos a norte e sul da embocadura resultaram dos dados de campo e das estimativas efectuadas no estudo de balanços aluvionares que se referiu.

A calibração do modelo foi efectuada na simulação da situação primitiva de equilíbrio, através de ligeiras correcções dos parâmetros da agitação marítima e do coeficiente da fórmula de cálculo do transporte sólido litoral. A validade da aplicação do modelo ao caso presente foi comprovada pela satisfatória reprodução da evolução ocorrida nos dois trechos, no período de 1948 a 2005.

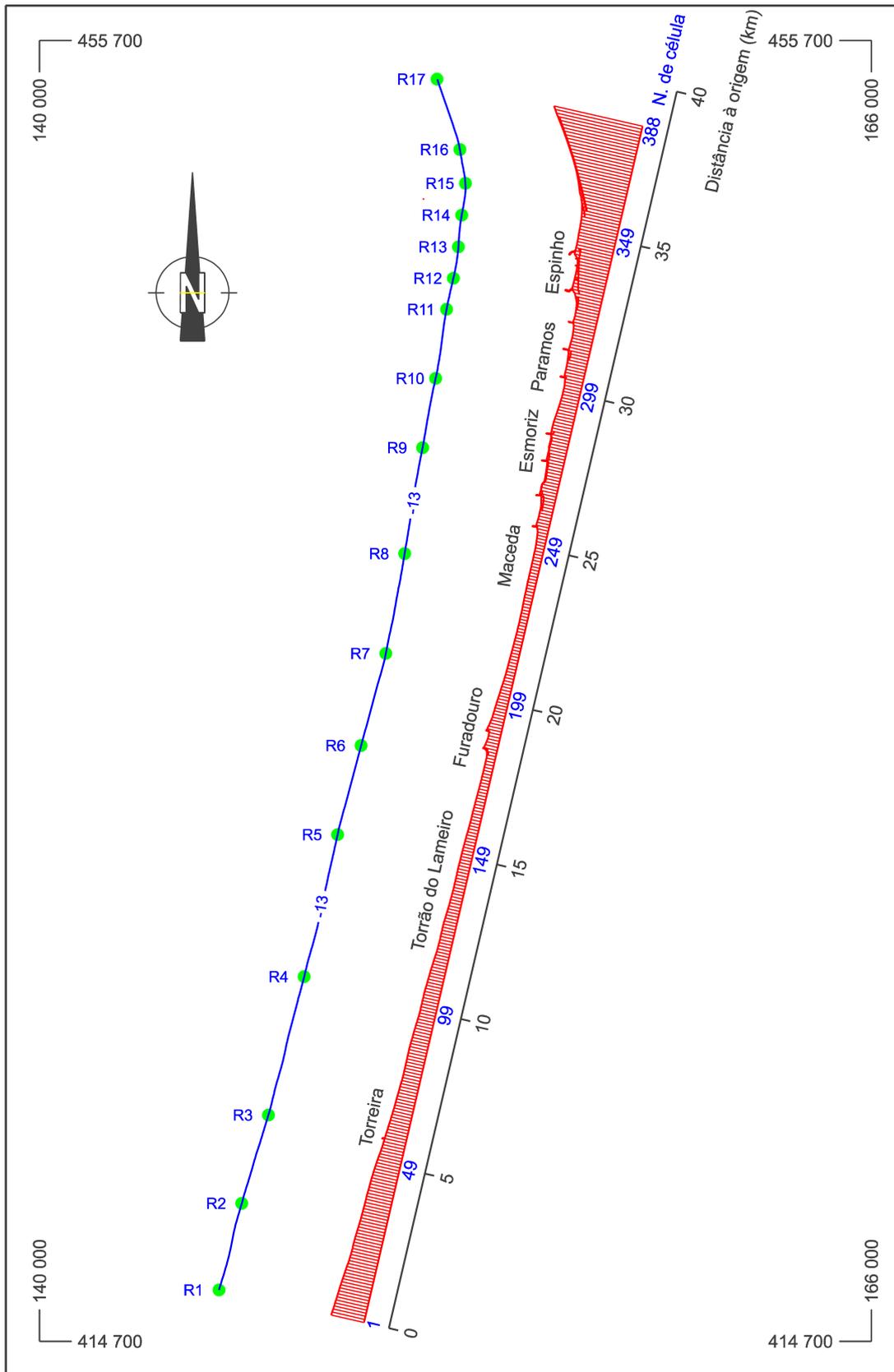


Figura 3.1 – Esquema de estabelecimento do modelo Litmod, com localização dos regimes de agitação marítima, no trecho Douro – Torreira

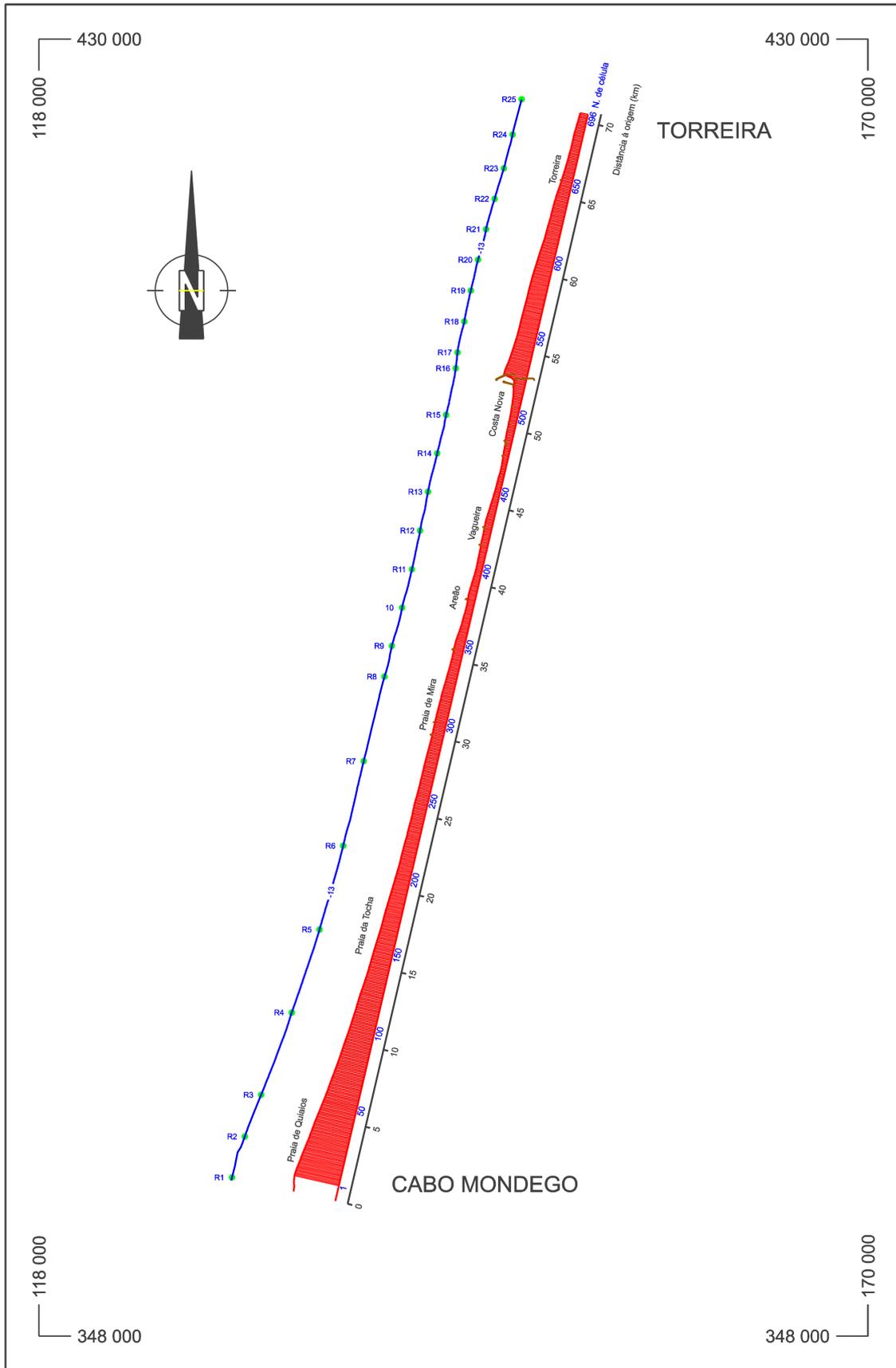


Figura 3.2 – Esquema de estabelecimento do modelo Litmod, com localização dos regimes de agitação marítima, no trecho Torreira – Cabo Mondego

## 4 | Simulação e interpretação do processo erosivo

### 4.1 Considerações gerais

Embora as evoluções e erosões a sul de Espinho e na frente marítima de Aveiro se desenvolvam no mesmo trecho da costa Oeste e apresentem ambas elevada magnitude, deve ter-se em atenção que a sua génese é basicamente diferente. Enquanto a erosão a sul de Espinho foi desencadeada pelo enfraquecimento da alimentação sedimentar proveniente da bacia do Douro e da costa a norte, a evolução na zona de Aveiro corresponde a uma redistribuição de sedimentos originada pela construção dos molhes exteriores da embocadura de Aveiro.

Esta diferente génese condiciona a evolução já ocorrida e a previsível no futuro. A permanência do défice sedimentar a sul de Espinho explica a manutenção da intensidade das erosões. No caso da costa de Aveiro parece verificar-se uma gradual atenuação do ritmo das acumulações e erosões, à medida que o efeito de retenção dos molhes vai diminuindo devido ao enchimento da praia de S. Jacinto.

A interpretação que a seguir se elabora tem por base as avaliações de transporte sólido litoral e de perdas, ganhos e balanços aluvionares efectuadas em estudos anteriores. Existem lacunas nesses dados que foi necessário preencher de forma expedita com procedimentos de interpolação e extrapolação. Essa actuação foi, no entanto, apoiada no princípio da continuidade dos volumes de areia no trecho, procurando que, em cada um dos períodos analisados, apresentasse um valor próximo de zero o balanço das três parcelas: diferença de volumes nas fronteiras norte e sul; volumes erodidos, quantificados a partir do recuo da linha de água; e perdas por extracção e ganhos aluvionares (Vicente e Clímaco, 2012).

Com base neste procedimento foi possível efectuar uma interpretação geral e quantificada das evoluções. Num futuro estudo, com maior disponibilidade de meios, justificada pelos valores económicos e sociais envolvidos, será possível melhorar as estimativas apresentadas.

Como se poderá apreciar mais à frente, encontraram-se algumas diferenças entre os resultados da simulação e a evolução realmente ocorrida na natureza, que são compreensíveis pelas seguintes razões:

- Limitações e reduzida escala da informação morfológica.
- Alguma incerteza na estimativa dos fluxos aluvionares do Douro e da costa a norte deste rio, dos débitos sedimentares da laguna de Aveiro e dos volumes de captação e libertação de areia pelo seu banco exterior.
- Falta de rigor e incompleto registo das extracções de areias para a construção efectuadas a sul do Douro e na praia de S. Jacinto, e das dragagens de manutenção e aprofundamento do canal exterior de acesso da navegação ao porto de Aveiro.

- Simplificações inerentes à formulação dos fenómenos físicos: na definição da agitação marítima por *hindcast*; na propagação das ondas do largo até à costa; e no cálculo do transporte sólido litoral a partir dos parâmetros das ondas na rebentação.
- Esquematização dos processos de transporte de areia, característica dos modelos de evolução de linhas de costa.

Apesar dessas diferenças considera-se que a simulação é aceitável, pois permite uma reprodução geral dos processos evolutivos em ordem de grandeza e configuração temporal e espacial. É ainda satisfatoriamente reproduzido o comportamento das defesas frontais e esporões e evidenciada a necessidade de defesa de povoações que obrigou à construção dessas obras.

## 4.2 Trecho do Douro à Torreira

### 4.2.1 Simulação da situação primitiva

A parte norte do trecho de costa, compreendida entre a foz do Douro e Espinho, apresenta uma situação de estabilidade permanente por beneficiar da protecção natural de afloramentos rochosos ao longo de toda a sua extensão. O trecho a sul de Espinho deveria encontrar-se, anteriormente a 1880, numa situação de equilíbrio e estabilidade morfológica de longo prazo.

Estimou-se um débito total de alimentação pela fronteira norte de 1 320 000 m<sup>3</sup>/ano constituído pela soma das duas parcelas: 220 000 m<sup>3</sup>/ano, proveniente da costa a norte; e 1 100 000 m<sup>3</sup>/ano de caudal sólido do Douro. Dada a referida estabilidade do trecho, sairiam pela fronteira sul os mesmos 1 320 000 m<sup>3</sup>/ano. Como não se verificavam erosões ocorreria um fluxo uniforme de transporte ao longo do trecho em estudo, com esse mesmo valor.

Estabelecido o modelo com as características indicadas, introduziu-se a linha de água de 1880 e simularam-se 59 anos de incidência da agitação marítima com os dados da série cronológica referida. A simulação confirmou a estabilidade a longo prazo da linha de água e constituiu a calibração de base do modelo (Fig. 4.1).

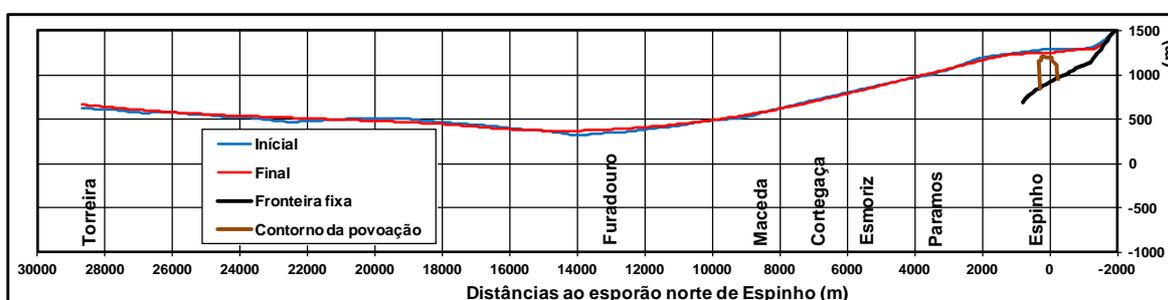


Figura 4.1 – Calibração da estabilidade da linha de água na situação de equilíbrio anterior a 1880. Simulação de 59 anos de incidência da agitação marítima

#### 4.2.2 Simulação da evolução entre 1880 e 1948

A construção dos molhes do Porto de Leixões, terminada em 1884, terá constituído o primeiro factor antrópico de alteração do equilíbrio da costa arenosa a sul de Espinho.

Na simulação numérica deste período de 68 anos, consideraram-se:

- Um débito aluvionar da bacia hidrográfica do Douro de 1 100 000 m<sup>3</sup>/ano, atendendo a que até 1948 não eram ainda significativos os efeitos de regularização de caudais e de retenção de areias por barragens.
- Uma parcela de alimentação proveniente da costa a norte do Douro de 220 000 m<sup>3</sup>/ano, entre 1880 e 1884, que desaparece a partir desta última data, devido à interceptação total do transporte sólido litoral pelos molhes do porto de Leixões.
- Extracções de 50 000 m<sup>3</sup>/ano de areia, no cabedelo do Douro e na costa adjacente a sul.
- Um caudal de 1 320 000 m<sup>3</sup>/ano na fronteira sul do trecho, dado que o progressivo recuo da linha de água não tinha ainda ultrapassado a zona da Cortegaça.
- A construção em Espinho, para travar o avanço do mar, de uma defesa frontal de enrocamento e de três esporões, entre 1911 e 1918, acrescentados em data posterior de mais um esporão a sul.
- Os dados de agitação marítima da mencionada série cronológica de 59 anos, acrescidos da repetição dos seus primeiros 9 anos.

Apresentam-se, na Fig. 4.2, os resultados da simulação verificando-se a reprodução global da intensa erosão ocorrida a norte da Cortegaça. O modelo quantificou para essa erosão um volume de cerca de 18 milhões de metros cúbicos, muito próximo do calculado a partir do recuo das linhas de água das Cartas Militares.

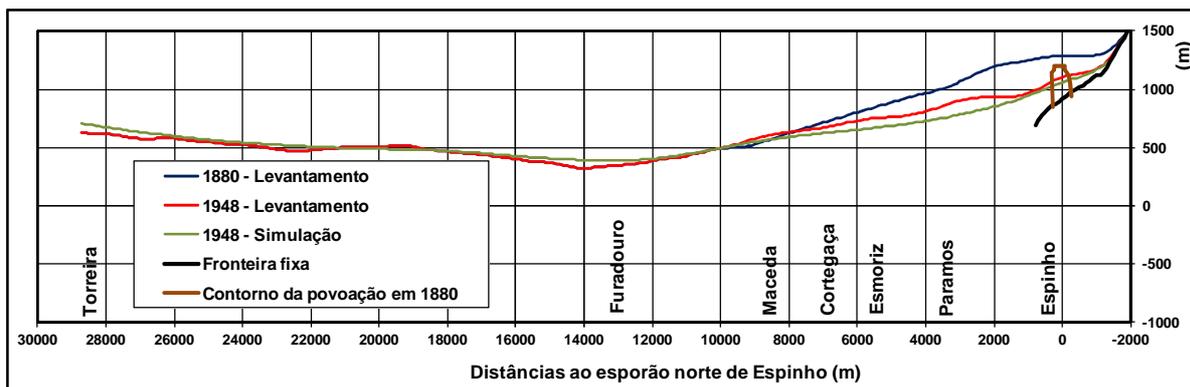


Figura 4.2 – Simulação da evolução entre 1880 e 1948

### 4.2.3 Simulação da evolução entre 1948 e 2005

A simulação do período de 1948 a 2005 foi assim efectuada com base nos referidos dados de agitação marítima, evolução morfológica e balanços aluvionares, tendo-se considerado as condições que a seguir se indicam:

#### **Fluxo de areia entrado pela fronteira norte**

- 1 100 000 m<sup>3</sup>/ano, entre 1948 e 1973, provenientes unicamente do débito aluvionar da bacia hidrográfica do Douro, dado que a partir de 1884 a construção do porto de Leixões terá anulado a alimentação proveniente da costa a norte.
- 750 000 m<sup>3</sup>/ano entre 1973 e 1984, devido ao ritmo crescente de extracção de areias no trecho de jusante do rio Douro.
- 200 000 m<sup>3</sup>/ano a partir de 1985, com a entrada em funcionamento da barragem de Crestuma.

#### **Fluxo de areia saído pela fronteira sul**

- 1 320 000 m<sup>3</sup>/ano, correspondente ao transporte sólido litoral a sul da Torreira, zona que durante este período não foi atingida por erosões que alterassem a orientação da sua linha de água e, em consequência, a capacidade média de transporte.

#### **Perdas por extracção de areia para a construção**

- 90 000 m<sup>3</sup>/ano de extracções no cabedelo do Douro e na costa marítima adjacente, no período de 1948 a 1973.
- 265 000 m<sup>3</sup>/ano entre 1973 e 1979.
- 80 000 m<sup>3</sup>/ano entre 1979 e 1997.
- ausência de extracções a partir de 1998.

#### **Obras de defesa**

- A situação inicial de simulação de 1948 apresentava na zona de Espinho uma defesa frontal de enrocamento, com três esporões construídos entre 1911 e 1918, e ainda um quarto esporão mais a sul.
- Após 1948 incluíram-se mais dois esporões no modelo, na zona de Espinho, a sul dos existentes.
- Em 1973 introduziram-se no Furadouro as obras de defesa locais constituídas por dois esporões e uma defesa frontal de enrocamento.
- Em 1974 acrescentou-se na Torreira uma defesa frontal, e em 1981 introduziu-se um esporão.
- Na década de 1980 incluiu-se o plano de obras de defesa de Espinho, constituído por cinco esporões de apreciável comprimento.
- Finalmente, entre 1985 e 1989, introduziram-se na frente litoral Esmoriz-Cortegaça quatro esporões conjugados com uma extensa defesa frontal.

### **Agitação marítima**

Utilizaram-se os dados da série cronológica de 1952 a 2005, antecidos dos correspondentes ao período de 2003 a 2006 (4 anos), para colmatar a falha dos anos de 1948 a 1951 que não constavam da série. O período de 2003 a 2006 foi seleccionado por apresentar uma capacidade de transporte próxima da média geral da série cronológica, ou seja cerca de 1 320 000 m<sup>3</sup>/ano.

#### **4.2.4 Resultados da simulação**

Apresentam-se nas Figs. 4.3 a 4.5 os resultados da evolução morfológica de 1948 a 2005, com as linhas de água intermédias de 1973 e 1997. Para melhor avaliação do grau de reprodução conseguido, mostram-se em paralelo as linhas de água dos levantamentos (L), e as obtidas por simulação no modelo (S).

Verifica-se que o modelo reproduz o processo geral de erosão ocorrido entre 1948 e 2005, embora com algumas diferenças na sua distribuição espacial e nas datas intermédias. A modelação chega a resultados volumétricos de erosão próximos dos calculados a partir das linhas de água dos levantamentos (Fig. 4.6).

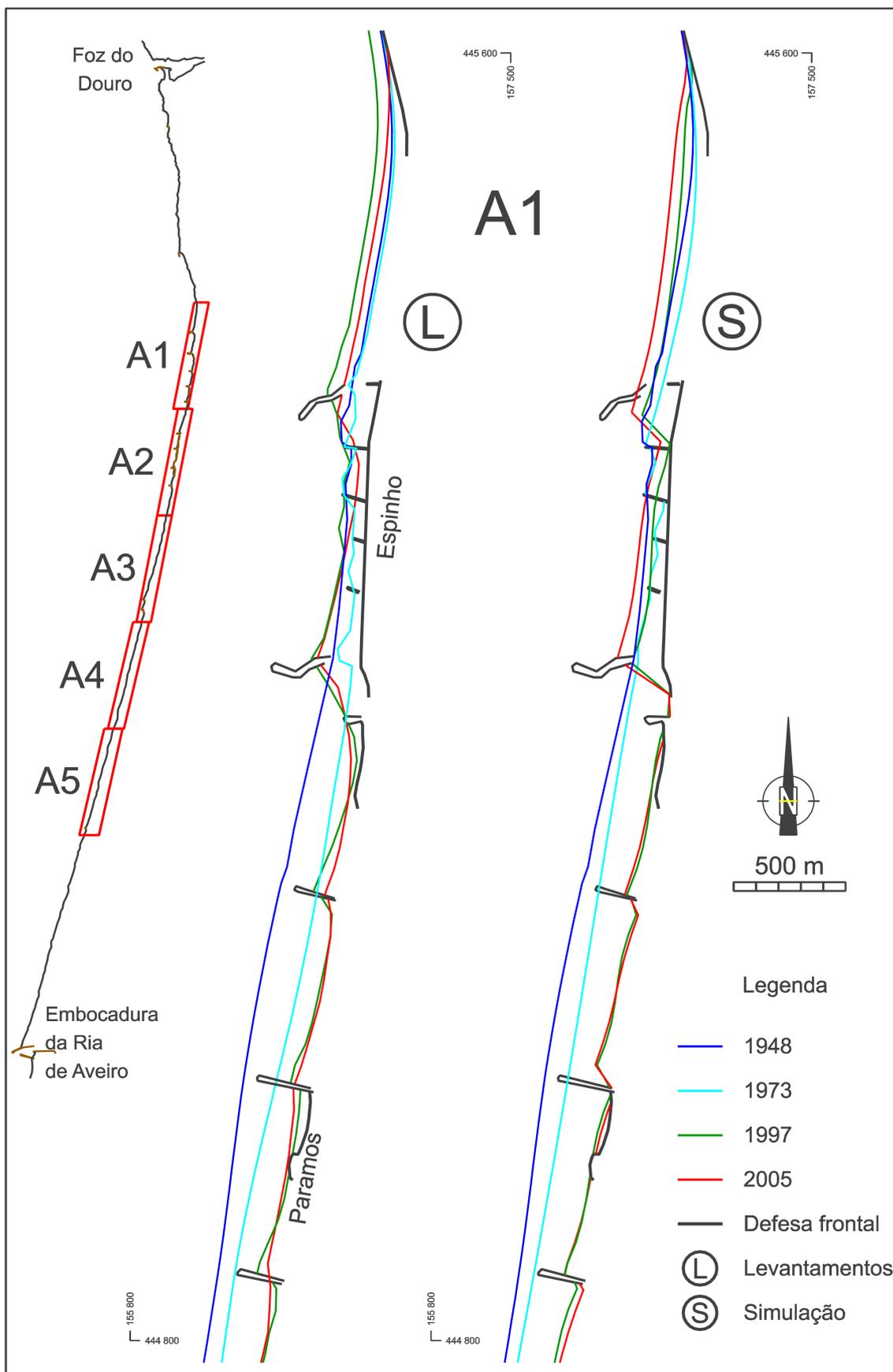


Figura 4.3 – Comparação da evolução entre 1948 e 2005 no trecho Douro - Torreira. Subtrecho A1

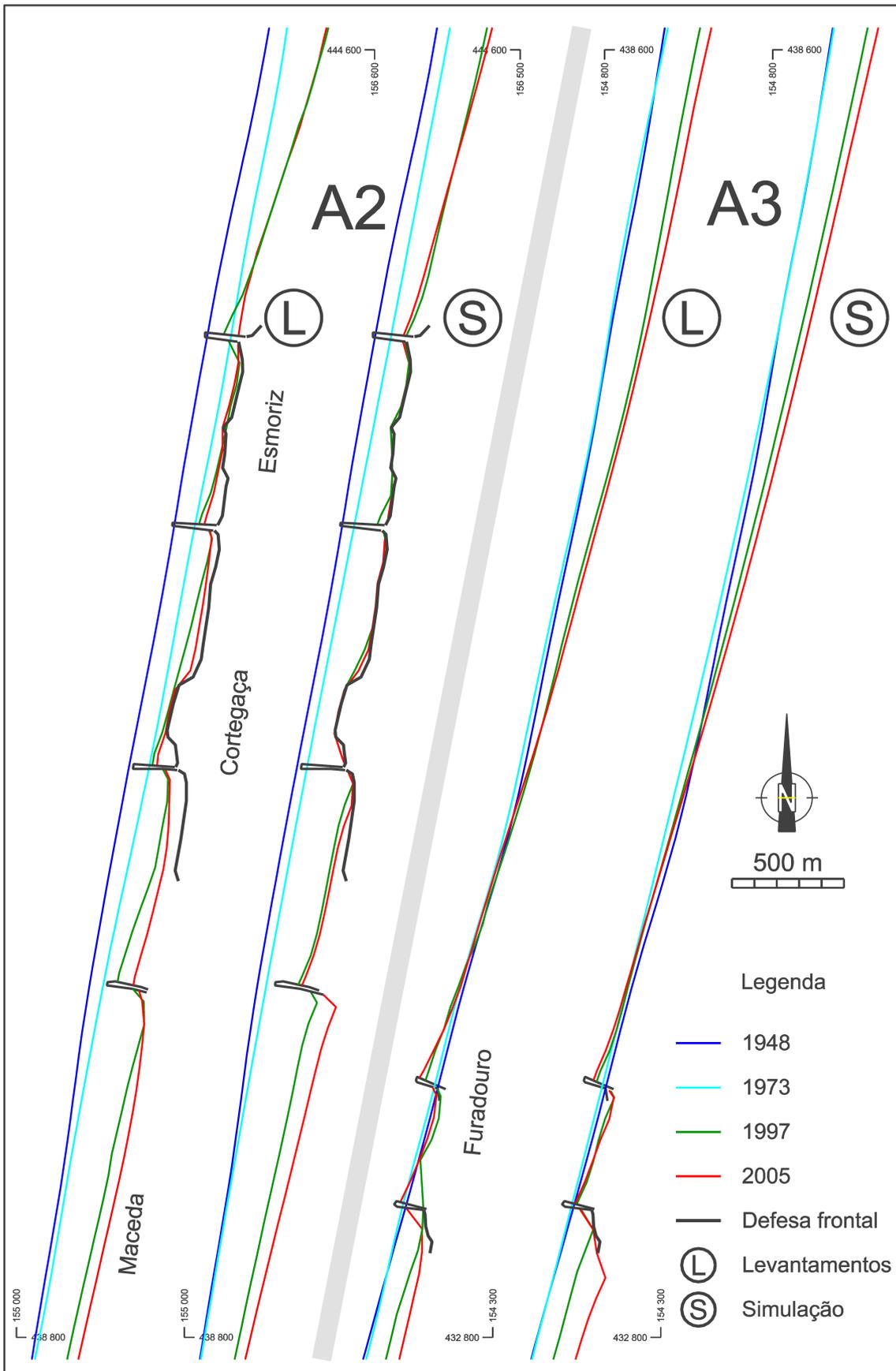


Figura 4.4 – Comparação da evolução entre 1948 e 2005 no trecho Douro - Torreira. Subtrechos A2 e A3

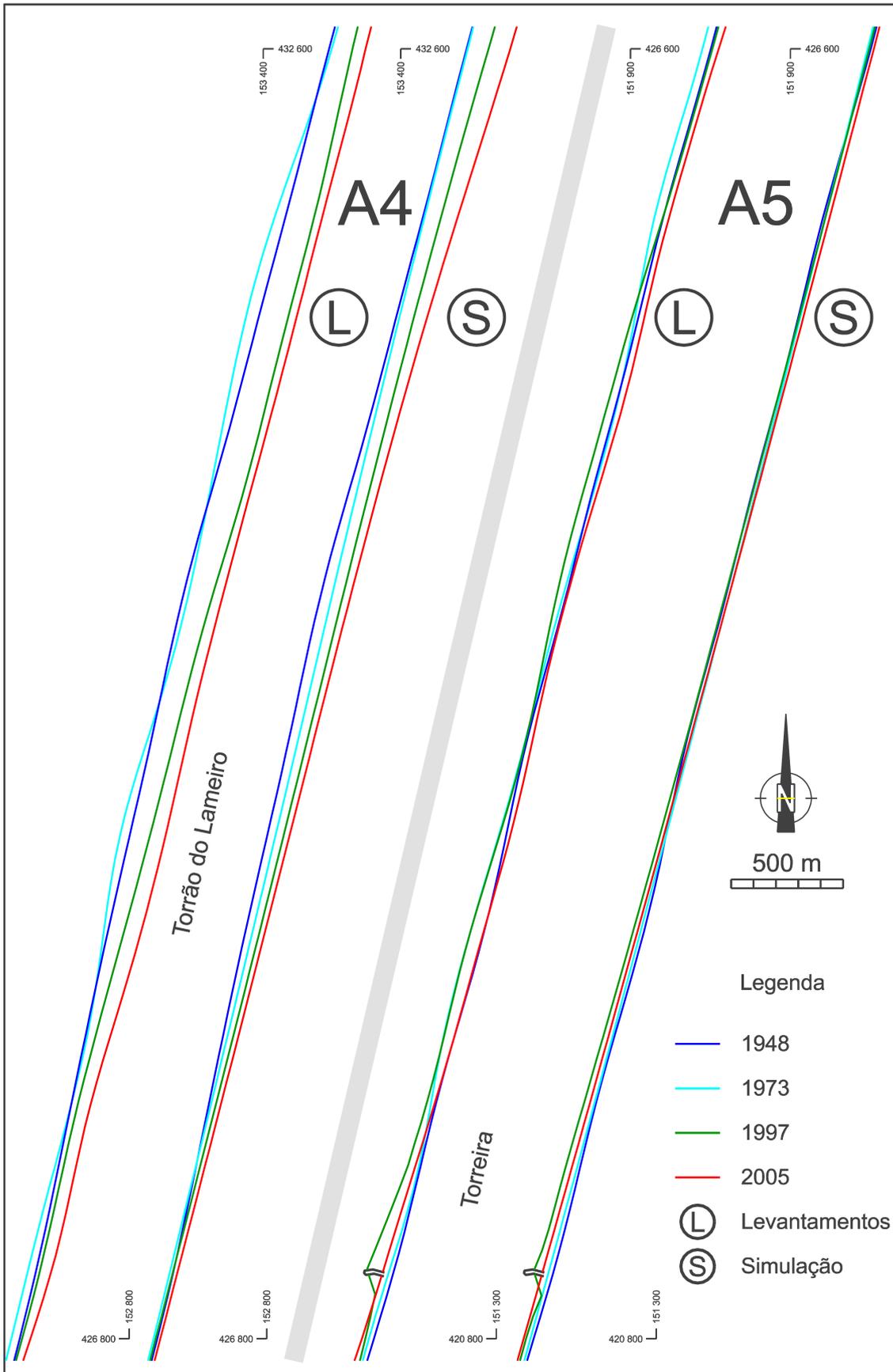


Figura 4.5 – Comparação da evolução entre 1948 e 2005 no trecho Douro - Torreira. Subtrechos A4 e A5

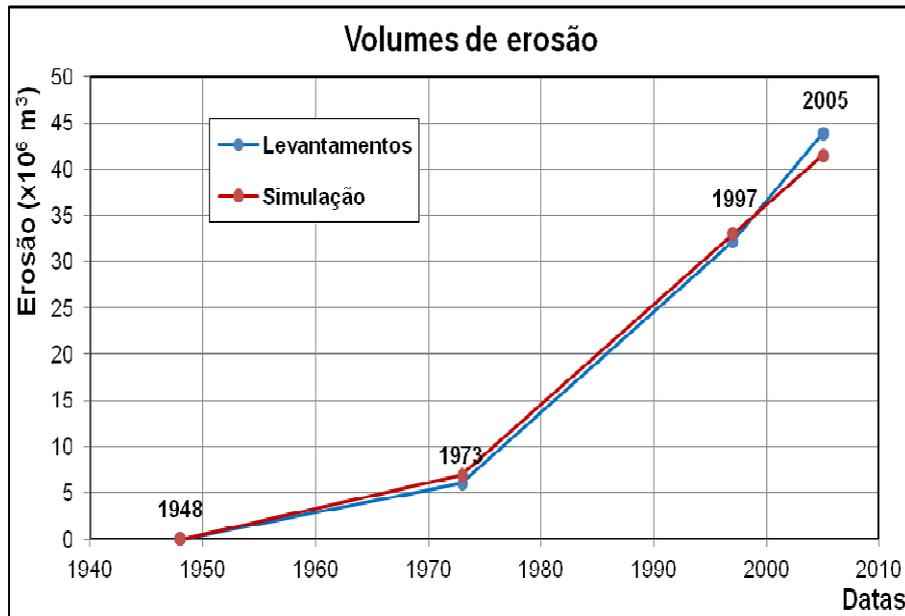


Figura 4.6 – Evolução das perdas de areia no trecho Douro - Torreira, entre 1948 e 2005

#### 4.2.5 Interpretação do processo erosivo

Os resultados dos balanços aluvionares e das simulações efectuadas permitem efectuar a interpretação global e quantificação aproximada do processo evolutivo que se desenvolve entre Espinho e a Torreira.

As erosões iniciaram-se a sul de Espinho na década de 1880 e continuam ainda activas. Durante o seu desenvolvimento foram construídos numerosos esporões e defesas frontais de enrocamento, com vista a controlar o recuo da linha de água em zonas em que este apresentava maiores inconvenientes. O sector norte compreendido entre a foz do Douro e Espinho, foi sempre poupado à erosão, devido à existência de afloramentos rochosos que o protegem em toda a sua extensão.

O trecho deveria encontrar-se até 1880 numa situação global de estabilidade morfológica e equilíbrio natural, traduzida em linhas gerais por um fluxo aproximadamente uniforme do saldo do transporte sólido litoral, dirigido de norte para sul. Estimou-se que entraria um caudal de areia de 1 320 000 m<sup>3</sup>/ano na fronteira norte e sairia esse mesmo caudal pela fronteira sul, localizada a sul da Torreira. Considerou-se o caudal de areia entrado pela fronteira norte como a soma de 1 100 000 m<sup>3</sup>/ano debitados pelo Douro com 220 000 m<sup>3</sup>/ano provenientes da costa a norte deste rio.

Nestas circunstâncias primitivas era nulo o balanço sedimentar do trecho, tendo o equilíbrio natural sido posteriormente rompido por intervenção humana, de que resultaram as perturbações que a seguir se indicam como estimativa:

- Diminuição, até 2005, de cerca de 49 milhões de metros cúbicos do fluxo de areias entrado pela fronteira norte, FN. Corresponde esta diminuição à soma das seguintes parcelas: 27 milhões por intercepção total do transporte sólido litoral de 220 000 m<sup>3</sup>/ano, proveniente da

costa a norte, a partir de 1884, devido à construção do porto de Leixões; e 22 milhões por diminuição do débito aluvionar do Douro ocorrida a partir de 1973, como resultado da extracção de areias no estuário e da construção, em 1985, da barragem de Crestuma.

- Verificação de um saldo negativo de ganhos e perdas de 9 milhões de metros cúbicos no interior do trecho, decorrente da extracção de areia no cabedelo da foz do Douro e nas praias a norte de Espinho.

As análises efectuadas para o período de 1880 a 2005, referentes à evolução da linha de água e dos balanços aluvionares, permitem a interpretação e quantificação dos principais aspectos do processo erosivo em curso.

A erosão iniciou-se na década de 1880, continuando até ao presente. Começou na zona de Espinho e progrediu para sul: em 1948 as erosões ultrapassavam a Cortegaça; em 1973 a praia da Maceda; e em 2005 apoximavam-se da Torreira, afectando um comprimento total de costa de 27 km.

Perderam-se cerca de 460 ha de área costeira, no período total de 125 anos e 58 milhões de metros cúbicos de areia, como resultado da acumulação de balanços sedimentares negativos. Verificou-se um recuo máximo de 500 m da linha de água, localizado entre Espinho e Paramos.

O processo erosivo afectou diversas povoações da frente marítima, o que obrigou, para sua protecção, a construir numerosos esporões e defesas frontais para controlar o avanço do mar.

## 4.3 Trecho da Torreira ao Cabo Mondego

### 4.3.1 Simulação da situação primitiva

Anteriormente a 1948, a costa de Aveiro deveria encontrar-se numa situação de estabilidade e equilíbrio natural, traduzida em linhas gerais por um fluxo aproximadamente uniforme do saldo do transporte sólido litoral de sentido norte-sul, com entrada pela fronteira norte (Torreira) de um caudal de areia estimado em 1 320 000 m<sup>3</sup>/ano e saída desse mesmo caudal pela fronteira sul (cabo Mondego).

Estabelecido o modelo com as características e condições indicadas, introduziu-se a linha de água de 1948 e simularam-se 59 anos de incidência da agitação marítima com os dados da série cronológica referida. Efectuados alguns ajustes na modelação, a simulação confirmou a estabilidade a longo prazo da linha de água (Fig. 4.7). Esses ajustes corresponderam à anteriormente referida acção de calibração e consistiram: na redução do coeficiente da fórmula de Kamphuis para diminuir o valor do transporte sólido litoral; e em pequenas rotações dos regimes locais de agitação marítima de forma a corrigir a implantação da linha de água.

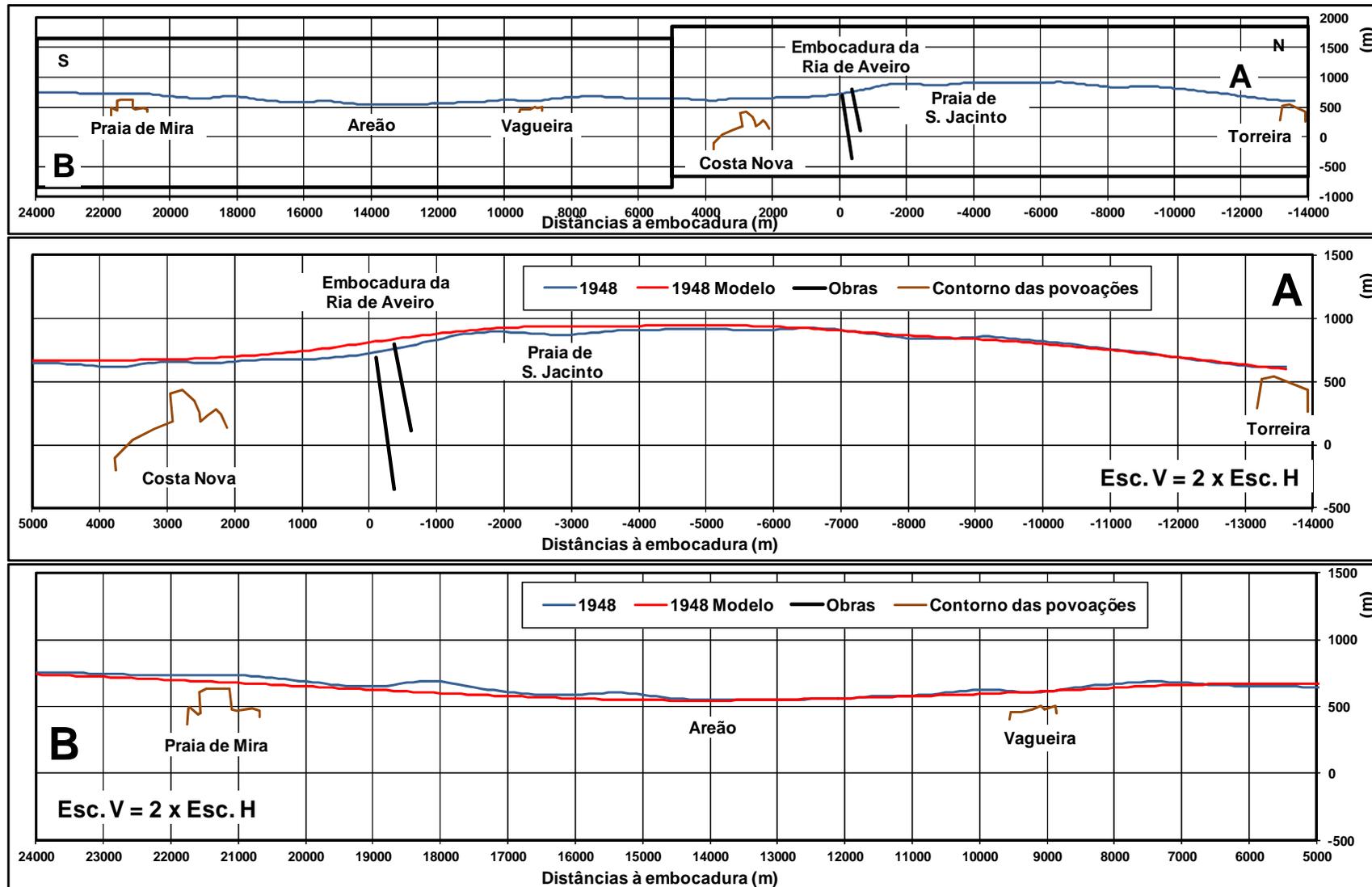


Figura 4.7 – Simulação da estabilidade da linha de água na situação de equilíbrio anterior a 1948

## 4.3.2 Simulação da evolução entre 1948 e 2005

### 4.3.2.1 *Condições gerais*

Embora com as limitações que se referiram dispunha-se, para este período, da elaboração dos dados de evolução e estimativas de balanços sedimentares (Vicente e Clímaco, 2012). Interessava verificar se o modelo conseguia simular os processos de acumulação e erosão nas suas linhas gerais e as ordens de grandeza dos volumes de areia envolvidos. Não se visava uma reprodução rigorosa, dadas as limitações ainda existentes na quantificação dos fenómenos costeiros.

A simulação do período de 1948 a 2005 foi efectuada com base nos dados da série cronológica de 1952 a 2005, antecedida do período de 2003 a 2006 (4 anos), para colmatar a falha dos anos de 1948 a 1951 que não constavam da série. Este período de 2003 a 2006 foi seleccionado por apresentar uma capacidade de transporte próxima da média geral da série cronológica, ou seja cerca de 1 320 000 m<sup>3</sup>/ano.

Calibraram-se valores médios anuais do transporte sólido litoral de 1 320 000 m<sup>3</sup>/ano quer na entrada pela Torreira quer na saída pelo Cabo Mondego. Este valor justifica-se pelo facto de até ao presente estas zonas não terem ainda sido atingidas por alterações morfológicas significativas. Dispondo-se das linhas de água de 1948, 1973, 1997 e 2005, simularam-se sucessivamente os três períodos compreendidos entre estas datas.

### 4.3.2.2 *Trecho a norte da embocadura da ria de Aveiro*

Consideraram-se, para o trecho a norte da embocadura, as condições de fluxos, balanços aluvionares e intervenções que a seguir se indicam (Vicente e Clímaco, 2012; APA, 2006):

#### **Fluxo de areia entrado pela fronteira norte (Torreira)**

- Período global (1948 a 2005): 75 240 000 m<sup>3</sup>
- Períodos de simulação
  - 1948 a 1973: 33 000 000 m<sup>3</sup>
  - 1973 a 1997: 31 680 000 m<sup>3</sup>
  - 1997 a 2005: 10 560 000 m<sup>3</sup>

#### **Fluxo de areia saído pela fronteira sul (transposição do molhe norte)**

- Período global: 21 980 000 m<sup>3</sup>
- Períodos de simulação
  - 1948 a 1973: 12 500 000 m<sup>3</sup>
  - 1973 a 1997: 9 480 000 m<sup>3</sup>
  - 1997 a 2005: 0 m<sup>3</sup>

### **Perdas por extracção de areia para a construção civil na praia de S. Jacinto**

- Período global: 19 200 000 m<sup>3</sup>
- Períodos de simulação
  - 1948 a 1973: ausência de extracções
  - 1973 a 1997: 19 200 000 m<sup>3</sup> (800 000 m<sup>3</sup>/ano)
  - 1997 a 2005: 3 200 000 m<sup>3</sup> (640 000 m<sup>3</sup>/ano até 2002 e ausência de extracções a partir desta data)

### **Obras**

- 1948 a 1973: obras dos molhes da embocadura com início em 1948 e crescimento linear até 1958
- 1973 a 1997: prolongamento de 530 m do molhe norte, com inflexão a SW, entre 1983 e 1987
- 1997 a 2005: ausência de novas obras

#### **4.3.2.3 Trecho a sul da embocadura da ria de Aveiro**

Consideraram-se, para o trecho a sul da embocadura, as condições de fluxos, balanços aluvionares e intervenções que a seguir se indicam:

#### **Fluxo de areia entrado pela fronteira norte (transposição do molhe norte)**

- Período global (1948 a 2005): 21 980 000 m<sup>3</sup>
- Períodos de simulação
  - 1948 a 1973: 12 500 000 m<sup>3</sup>
  - 1973 a 1997: 9 480 000 m<sup>3</sup>
  - 1997 a 2005: 0 m<sup>3</sup>

#### **Fluxo de areia saído pela fronteira sul (a sul de Mira)**

- Período global (1948 a 2005): 75 240 000 m<sup>3</sup>
- Períodos de simulação
  - 1948 a 1973: 33 000 000 m<sup>3</sup>
  - 1973 a 1997: 31 680 000 m<sup>3</sup>
  - 1997 a 2005: 10 560 000 m<sup>3</sup>

#### **Perdas de areia**

- 1948 a 1973: 900 000 m<sup>3</sup> de dragagens do canal exterior de navegação, entre 1967 e 1973 (150 000 m<sup>3</sup>/ano)  
1 000 000 m<sup>3</sup> devidas ao crescimento do banco exterior

- 1973 a 1997: 6 080 000 m<sup>3</sup> de dragagens do canal exterior de navegação, entre 1973 e 1992 (320 000 m<sup>3</sup>/ano)
- 1997 a 2005: ausência de perdas

#### **Ganhos de areia**

- 1948 a 1973: 5 460 000 m<sup>3</sup> de débito da embocadura, entre 1952 e 1973 (260 000 m<sup>3</sup>/ano)
- 1973 a 1997: 1 400 000 m<sup>3</sup> de débito da embocadura, entre 1987 e 1997 (140 000 m<sup>3</sup>/ano)  
4 000 000 m<sup>3</sup> por libertação de areias devido ao abaixamento das cotas do banco, entre 1987 e 1997 (400 000 m<sup>3</sup>/ano)  
500 000 m<sup>3</sup> de alimentação artificial do campo de esporões da Costa Nova, em 1990
- 1997 a 2005: 840 000 m<sup>3</sup> de débito da embocadura entre 1997 e 2003 (140 000 m<sup>3</sup>/ano)  
2 400 000 m<sup>3</sup> de libertação de areias devido ao abaixamento das cotas do banco, entre 1997 e 2003 (400 000 m<sup>3</sup>/ano)

#### **Obras**

- 1948 a 1973: ausência de obras de protecção
- 1973 a 1997: introdução em 1973 do campo de esporões da Costa Nova, complementado com uma defesa frontal de 2 400 m de comprimento e, em 1990, com uma alimentação artificial de cerca de 500 000 m<sup>3</sup>, para enchimento do campo de esporões  
introdução em 1978 de uma defesa frontal de enrocamento na Vagueira e implantação de dois esporões, um no limite sul da malha urbana e o outro 1 200 m mais a sul  
introdução em 1985 de um pequeno esporão na praia do Areão e de dois esporões na praia de Mira
- 1997 a 2005: ausência de novas obras

#### **4.3.3 Resultados da simulação**

Apresentam-se nas Figs. 4.8 a 4.13 os resultados da evolução morfológica de 1948 a 2005, com as linhas de água intermédias de 1973 e 1997 e na Fig. 4.14 a variação de volumes nos trechos.

Para melhor avaliação do grau de reprodução conseguido, mostram-se em paralelo as linhas de água dos levantamentos (L), e as obtidas por simulação no modelo (S). Verifica-se que o modelo reproduz de forma satisfatória a evolução morfológica e volumétrica do processo geral de acumulação-erosão ocorrido entre 1948 e 2005, embora com algumas diferenças na sua distribuição espacial e nas datas intermédias.

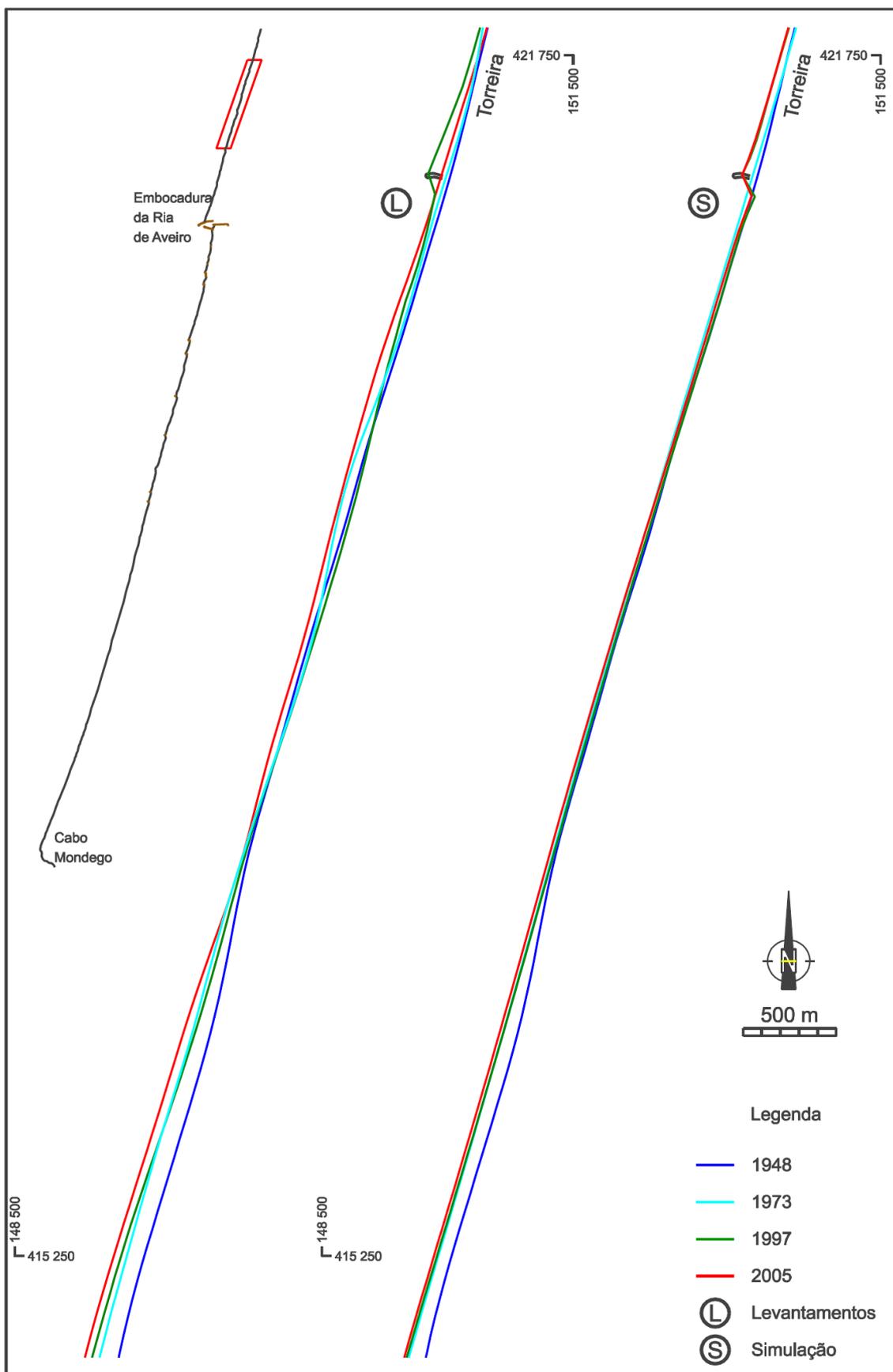


Figura 4.8 – Comparação da evolução de 1948 a 2005, entre a Torreira e a embocadura

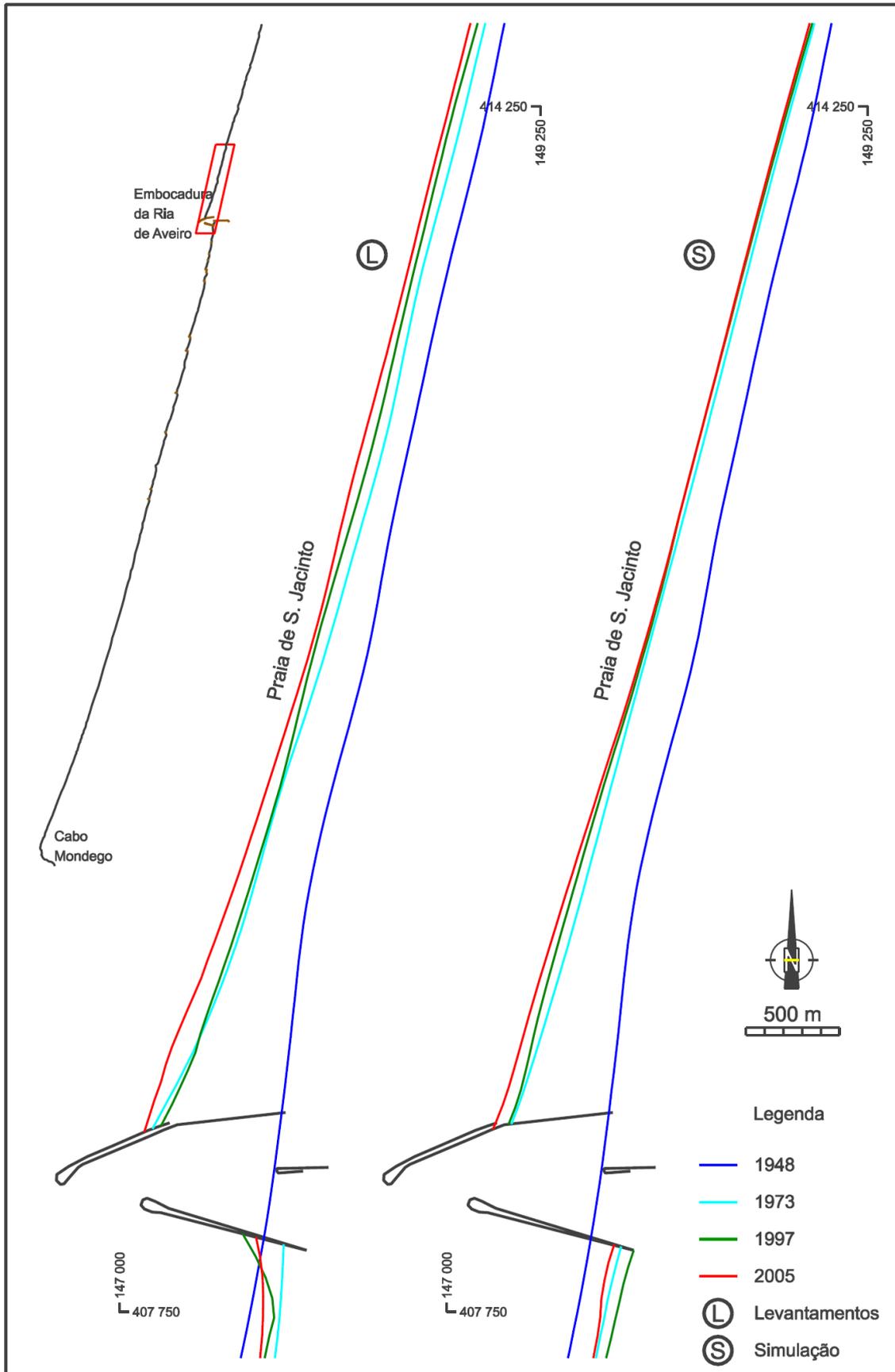


Figura 4.9 – Comparação da evolução de 1948 a 2005, entre a Torreira e a embocadura

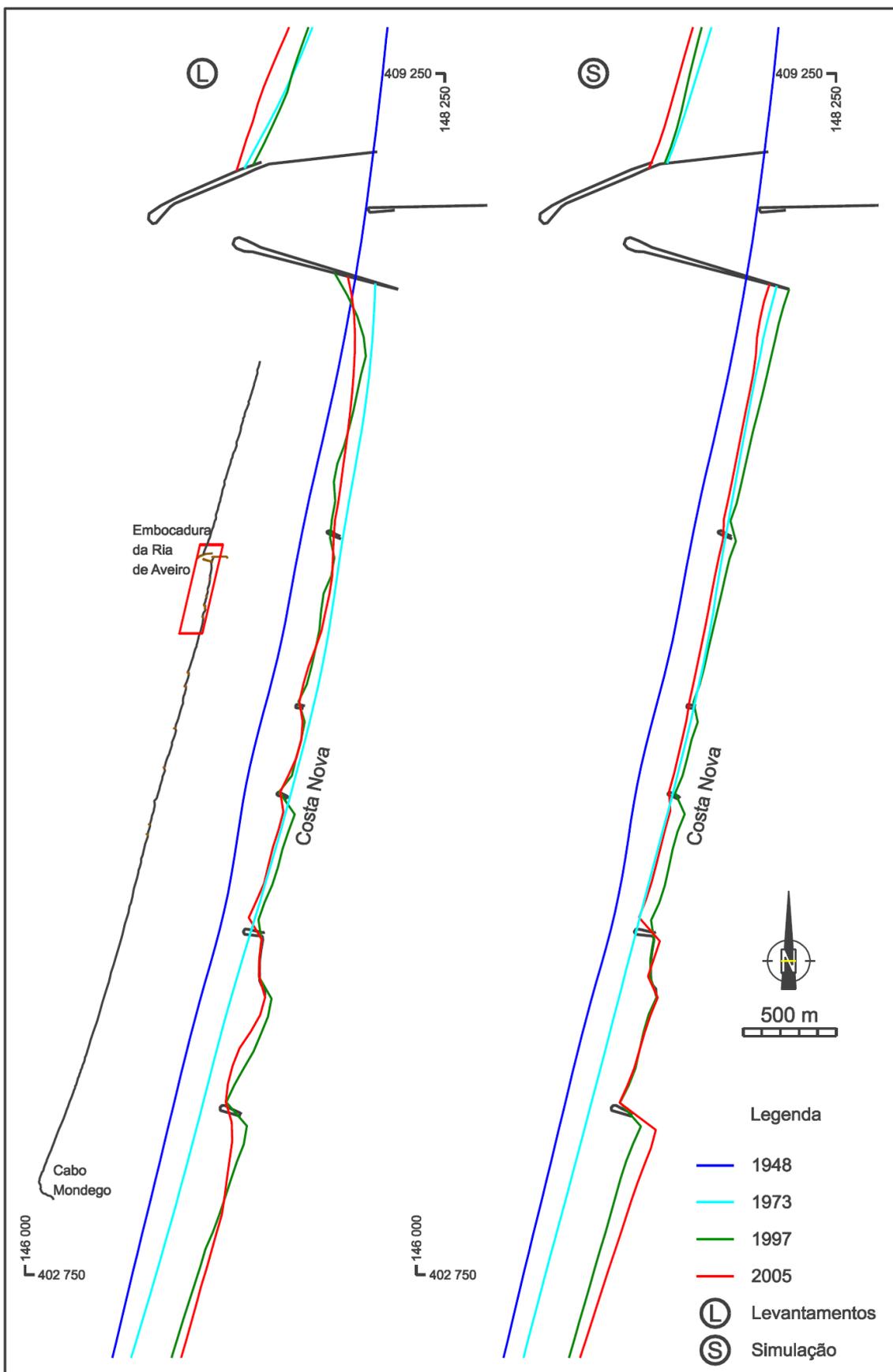


Figura 4.10 – Comparação da evolução de 1948 a 2005, entre a embocadura e sul de Mira

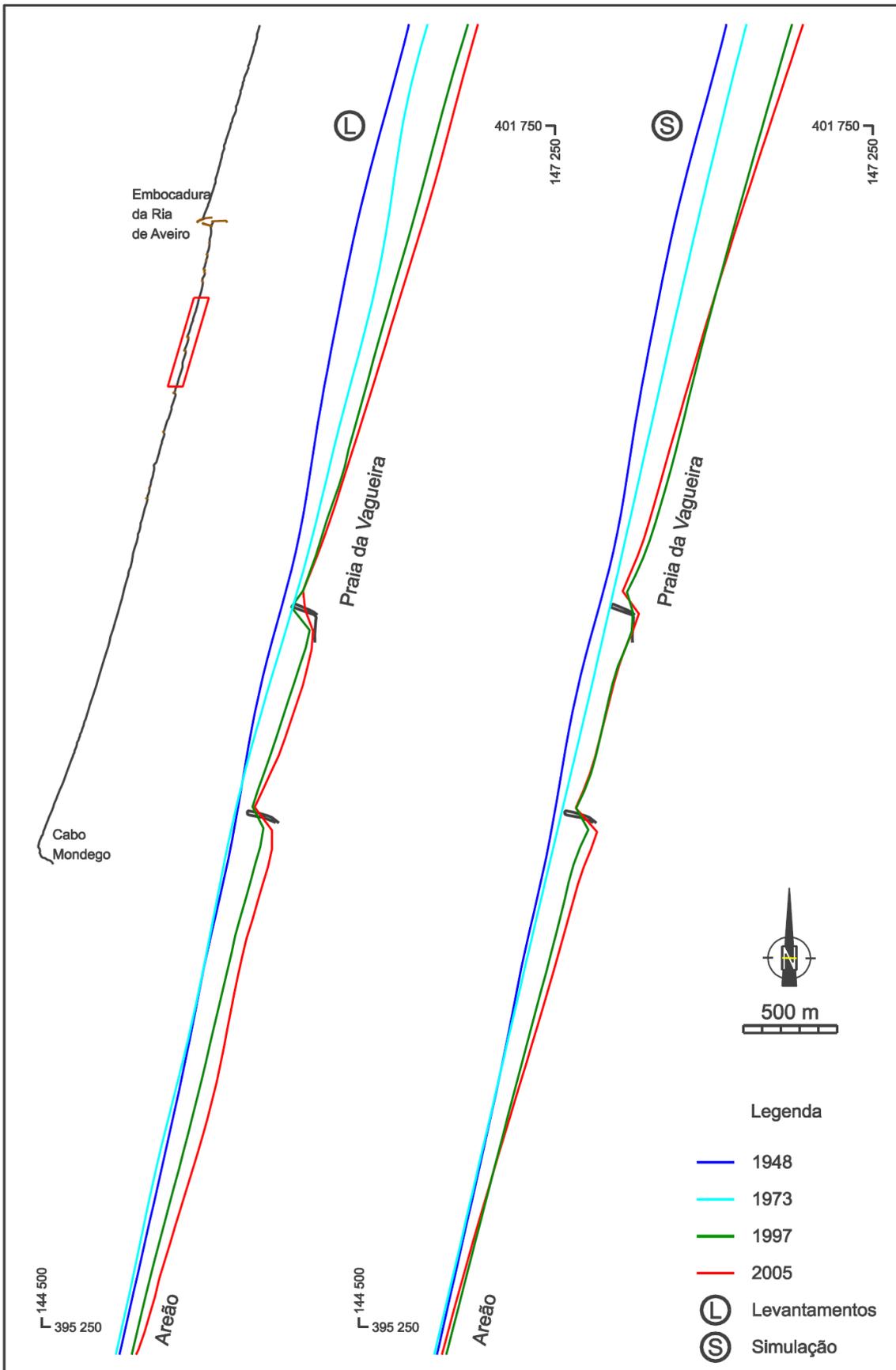


Figura 4.11 – Comparação da evolução de 1948 a 2005, entre a embocadura e sul de Mira

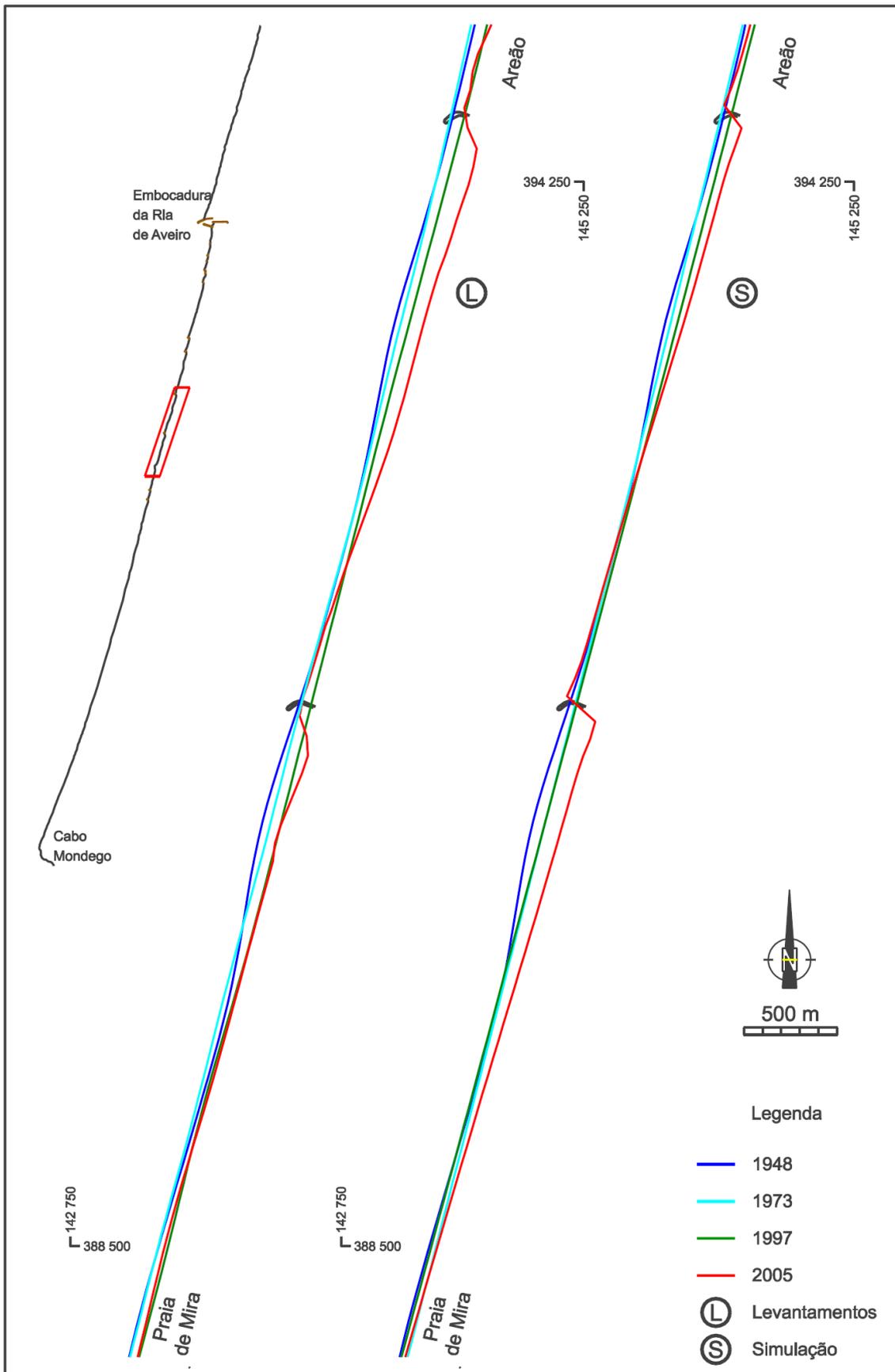


Figura 4.12 – Comparação da evolução de 1948 a 2005, entre a embocadura e sul de Mira

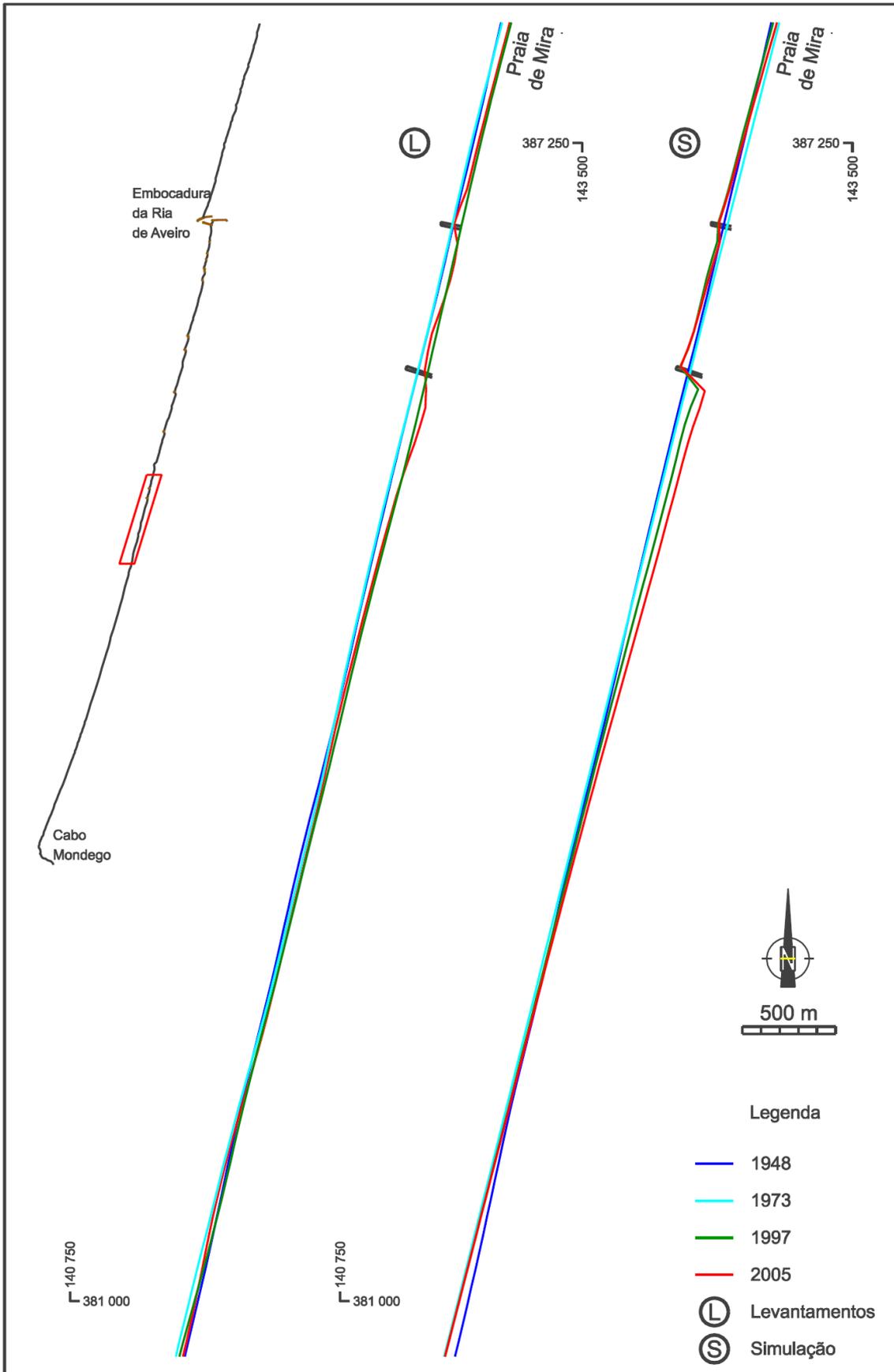


Figura 4.13 – Comparação da evolução de 1948 a 2005, entre a embocadura e sul de Mira

### Enchimento a norte da embocadura

O modelo reproduz nas suas linhas gerais o avanço da linha de água e os volumes de areia acumulados no molhe norte, fornecendo para o período total: um enchimento da praia até uma distância de cerca de 15 km do molhe, a que corresponde um volume de ganhos de cerca de 27 milhões a norte da embocadura contra os 32 milhões da avaliação baseada no avanço das linhas de água.

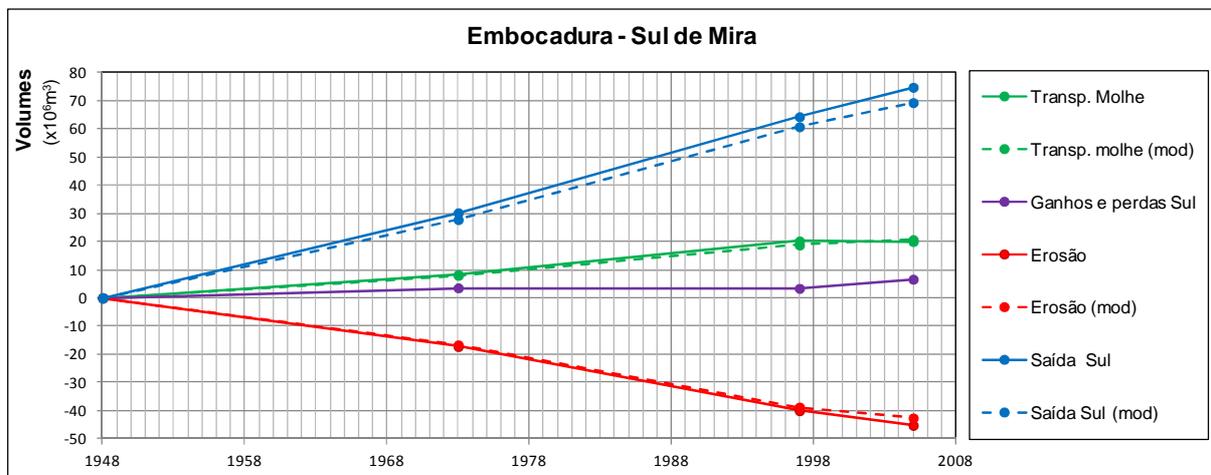
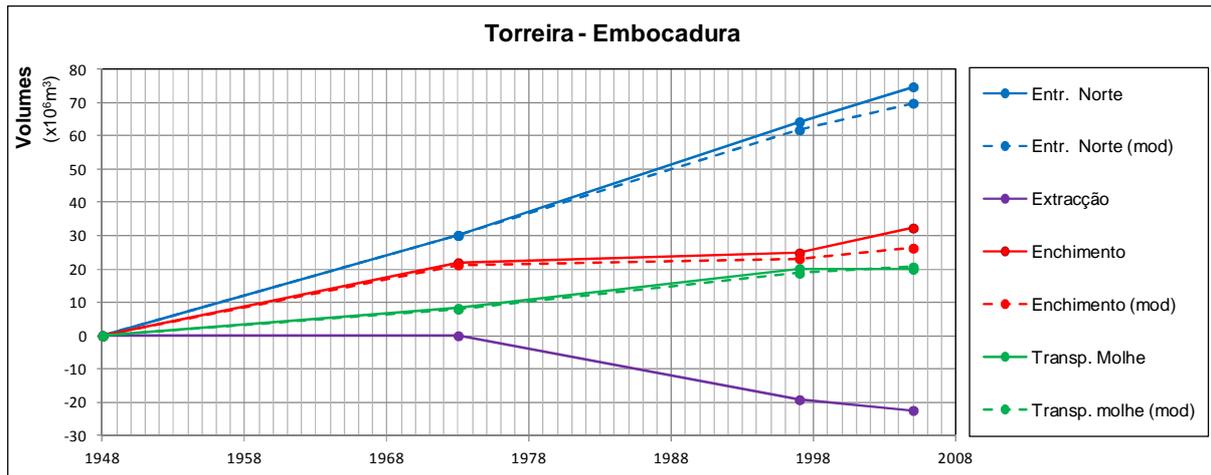


Figura 4.14 – Evolução de balanços de areia entre 1948 e 2005

### Erosões a sul da embocadura

O modelo simula satisfatoriamente a erosão ocorrida, fornecendo para o período total: um volume de perdas de cerca de 42 milhões, contra os 45 milhões da avaliação baseada no recuo sofrido pelas linhas de água. Reproduz ainda o comportamento das defesas frontais e esporões construídos a sul da embocadura e evidencia a necessidade de defesa de povoações que obrigou à sua construção.

#### 4.3.4 Interpretação do processo erosivo

Não existindo notícias sobre a ocorrência de evoluções da costa até ao fim da década de 1940, este trecho deveria encontrar-se então numa situação de equilíbrio de longo prazo. A intervenção humana de relevo, anterior a esta década, foi a fixação da embocadura da Ria de Aveiro em 1808, segundo o projecto de Oudinot e Gomes de Carvalho (Direcção-Geral dos Serviços Hidráulicos, 1951). As alterações induzidas por esta intervenção tiveram um efeito muito limitado na morfologia da costa, dado que a principal obra de fixação, hoje designada por Molhe Central, não era saliente relativamente à linha de água.

Essa situação de estabilidade e equilíbrio natural seria traduzida em linhas gerais por um fluxo aproximadamente uniforme do saldo do transporte sólido litoral de sentido norte-sul, com entrada de um caudal de areia que se estimou em 1 320 000 m<sup>3</sup>/ano na fronteira norte e a saída desse mesmo caudal pela fronteira sul, no cabo Mondego.

Entre 1948 e 1958 foram construídos os extensos molhes exteriores da embocadura da Ria de Aveiro. Estes molhes, dada a sua saliência de cerca de 700 m relativamente à linha de água original, passaram a constituir um importante obstáculo ao transporte sólido litoral, desencadeando um intenso processo evolutivo, caracterizado por acumulação de areia no molhe norte, acompanhada de recuo da costa a sul da embocadura.

Há ainda a considerar o prolongamento de 530 m do molhe norte, efectuado entre 1983 e 1987, visando o melhoramento das condições de acesso da navegação à Ria de Aveiro. Este último prolongamento teve efeitos de retenção pouco acentuados, dado que foi projectado de forma a melhorar as condições de transposição do transporte sólido litoral.

Face à retenção a norte originada pelos molhes da embocadura que actuam como um esporão longo, a evolução morfológica deveria conduzir a volumes de erosão a sul da mesma magnitude, ou seja de cerca de 32 milhões de metros cúbicos. Na realidade a erosão ascendeu a cerca de 45 milhões de metros cúbicos, justificando-se a diferença pelo balanço negativo de perdas e ganhos de 13 milhões de metros cúbicos, no interior do trecho, devido especialmente às volumosas extracções na praia de S. Jacinto.

#### **Sector a norte da embocadura**

Neste trecho a evolução, determinada pelo rompimento do equilíbrio primitivo, traduziu-se no aumento de 30,9 milhões de metros cúbicos do balanço aluvionar, decorrente das seguintes alterações:

- Diminuição de cerca de 53,3 milhões de metros cúbicos do fluxo de areia através da embocadura, devido ao acentuado efeito de retenção do molhe norte. O fluxo na Torreira, FN, terá mantido o seu valor primitivo, pois essa zona não chegou a ser atingida por alterações significativas da posição e orientação da linha de água.

- Ocorrência estimada de perdas de 22,4 milhões de metros cúbicos no interior do trecho a norte da embocadura, devido às intensas e prolongadas extracções de areia na praia de S. Jacinto.

As análises efectuadas para caracterização do processo de acumulação, da evolução da linha de água e dos balanços aluvionares, permitiram destacar os principais aspectos da evolução. A acumulação iniciou-se em 1948 e continua até ao presente. Começou junto do molhe norte, com gradual progressão até cerca de 15 km para norte. Foi extraído um volume estimado em 22,4 milhões de metros cúbicos, na praia de S. Jacinto. Verificou-se um avanço máximo da linha de água de 730 m, localizado junto ao molhe norte e um ganho de 250 ha de área costeira e de 30,9 milhões de metros cúbicos de areia, como resultado da acumulação na totalidade do período de 57 anos.

O ritmo de acumulação tem vindo a diminuir gradualmente, à medida que diminui a capacidade de retenção do molhe.

### **Sector a sul da embocadura**

Este trecho deveria encontrar-se também numa situação de estabilidade morfológica em 1948, traduzida em linhas gerais por um fluxo aproximadamente uniforme do saldo do transporte sólido litoral de sentido norte-sul, com transposição da embocadura da Ria de Aveiro por um caudal de areia de 1 320 000 m<sup>3</sup>/ano, e saída desse mesmo caudal pela fronteira sul. A contribuição da embocadura da laguna como fonte aluvionar não seria significativa, dado que as areias provenientes dos cursos de água a ela afluentes se depositam no seu interior. Nestas circunstâncias era nulo o balanço sedimentar do trecho.

Este equilíbrio e correspondente morfologia foram profundamente alterados devido à referida retenção de areias pelo molhe norte. São também relevantes as perdas e ganhos que passaram a ocorrer no interior do trecho, devidos ao grande conjunto de obras e intervenções realizadas na embocadura e interior lagunar, com vista a satisfazer as crescentes necessidades da navegação portuária. Referem-se: a expulsão de areias pela embocadura de Aveiro devida ao aprofundamento dos canais interiores, na sequência da construção de diques de regularização; as frequentes dragagens de manutenção de profundidades na barra de Aveiro; os efeitos de retenção e libertação de areias por evolução morfológica do banco exterior; e, ainda, uma acção de alimentação artificial de enchimento do campo de esporões da Costa Nova.

O rompimento do anterior equilíbrio, traduziu-se num balanço aluvionar negativo de 46,6 milhões de metros cúbicos, determinado pelas seguintes alterações:

- Diminuição de cerca de 53,3 milhões de metros cúbicos do fluxo de areia entrado pela fronteira norte, FN, devido ao acentuado efeito de retenção do molhe norte, que coincide com essa fronteira. O fluxo na fronteira sul, FS, não terá sofrido alterações, atendendo a que se manteve inalterada a morfologia do trecho de costa a sul de Mira.
- Ocorrência de um ganho de 6,6 milhões de metros cúbicos no interior do trecho, SI, devido ao saldo das contribuições de perdas e ganhos acima referidas.

As análises da evolução da linha de água e dos balanços aluvionares permitiram caracterizar as linhas gerais do processo erosivo.

A erosão iniciou-se em 1948 e continuou até ao presente. Começou a sul da embocadura; em 1973 a erosão atingia a zona da Vagueira e em 2005 o trecho a sul da praia de Mira, afectando um comprimento total de costa de 27 km. Ocorreu um recuo máximo local da linha de água de 400 m, localizado entre a Costa Nova e a Vagueira, e perderam-se cerca de 380 ha de área costeira a que correspondem 46,6 milhões de metros cúbicos, no período total de 57 anos. O processo erosivo foi afectando as povoações da frente marítima o que obrigou à realização de diversos esporões e defesas frontais.

O processo erosivo tem vindo a sofrer alguma atenuação devido ao progressivo aumento do transbordo de areias no molhe norte.

## 5 | Simulação da evolução futura

### 5.1 Considerações gerais

A evolução futura dos trechos de costa dependerá do tipo de gestão do processo erosivo que se adoptar, podendo considerar-se as seguintes opções genéricas:

- **Abandono**  
Não realizar novas intervenções de defesa nem manter as obras de protecção existentes, procedendo à retirada de infra-estruturas e actividades à medida que vão sendo atingidas pela erosão.
- **Manutenção**  
Não realizar novas intervenções de defesa mas efectuar a manutenção das obras de protecção existentes.
- **Reabilitação com alimentação artificial**  
Proteger e reabilitar as zonas afectadas pela erosão usando exclusivamente alimentação artificial.
- **Reabilitação com obras fixas**  
Proteger e reabilitar com obras de defesa costeira, complementadas com alimentação artificial.

Utilizou-se o modelo numérico para simular estas quatro alternativas, até ao horizonte de 2050. Como se referiu, o modelo encontrava-se já calibrado e verificada a capacidade para reproduzir as erosões ocorridas entre 1948 e 2005.

Tomou-se como ponto de partida a linha de água do levantamento de 2005, consideraram-se as obras que nele constam e simularam-se os 45 anos de evolução até 2050. A simulação das alternativas permitiu obter resultados de evolução das linhas de água, dos caudais anuais de transposição de esporões e dos balanços acumulados nalgumas zonas da costa.

### 5.2 Abandono da defesa da costa

Nesta alternativa simulou-se a evolução sem novas intervenções de defesa e sem manutenção das obras de protecção existentes, admitindo-se a sua progressiva degradação desde 2020 até à total perda de funcionalidade em 2040. Esta degradação das defesas frontais e esporões foi simulada para todas as obras com excepção dos dois grandes esporões de Espinho. Para estes, dada a sua robustez, admitiu-se que sofreriam uma redução gradual de comprimento de 3 metros por ano, entre 2020 e 2050.

### **Trecho do Douro à Torreira**

Verifica-se um significativo alisamento e recuo da linha de água à medida que se degradam as obras existentes, resultando a progressiva destruição pela acção do mar das povoações Paramos, Esmoriz, Cortegaça e Furadouro (Fig. 5.1).

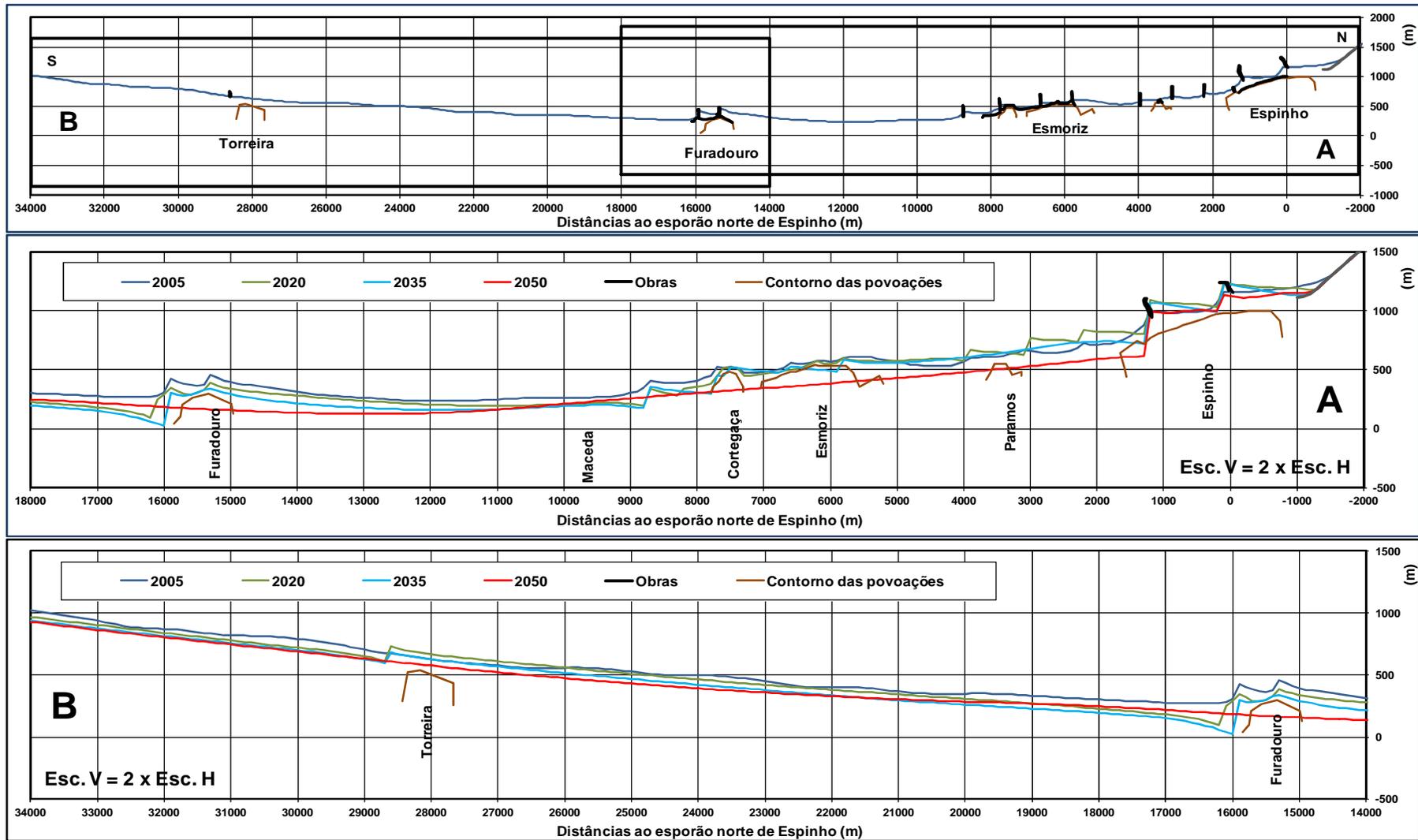


Figura 5.1 – Simulação da alternativa de abandono da defesa da costa do Douro à Torreira

### **Trecho da Torreira ao Cabo Mondego**

O sector a norte da embocadura não é afectado pelo abandono por não dispôr de obras de defesa e beneficiar da acumulação de areias no molhe norte.

A sul da embocadura é significativo o alisamento e recuo da linha de água que acompanha a destruição das obras existentes, resultando que as povoações da Costa Nova, Vagueira, Areão e Mira seriam progressivamente atingidas e parcialmente destruídas pela acção do mar (Fig. 5.2).

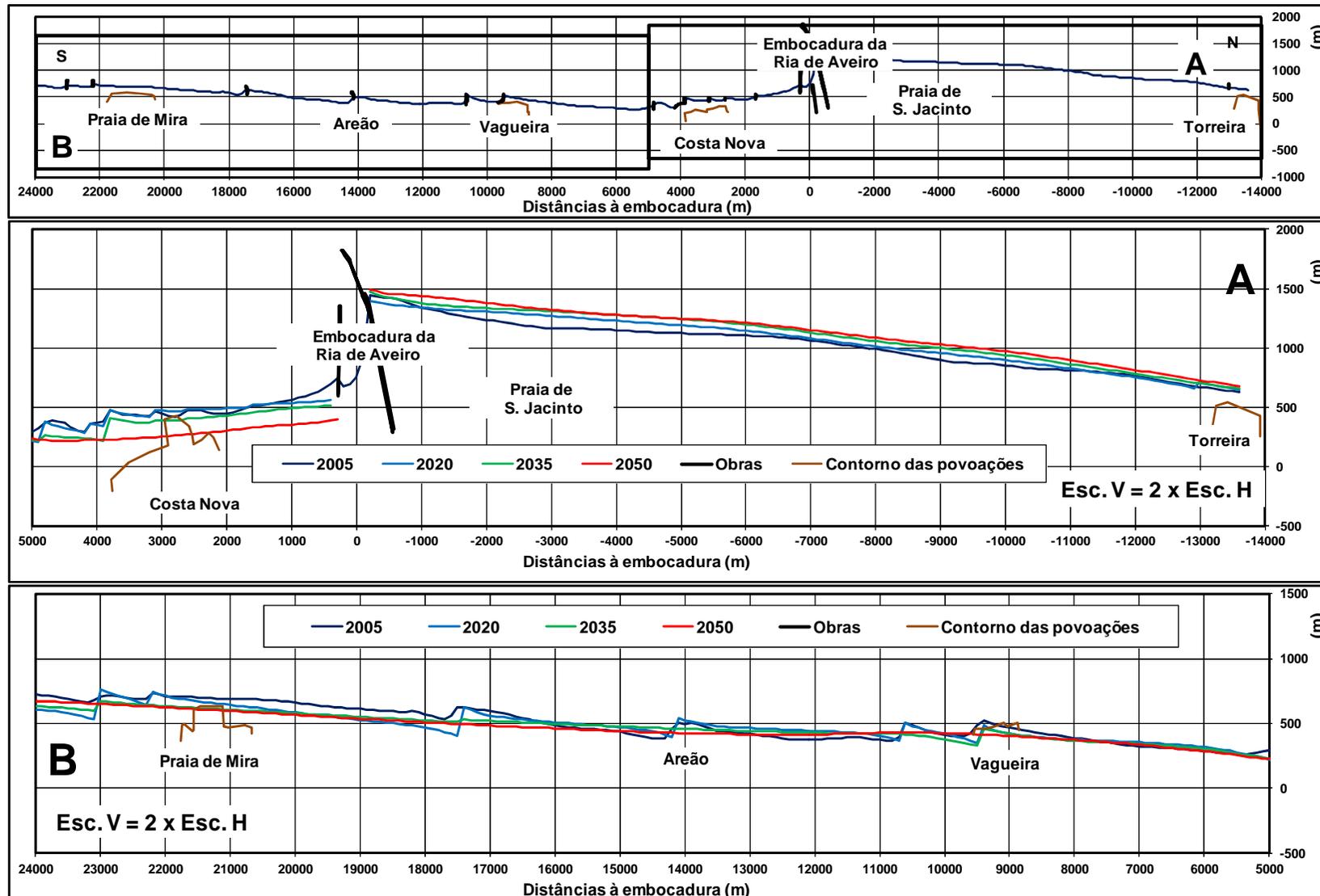


Figura 5.2 – Simulação da alternativa de abandono da defesa da costa da Torreira ao Cabo Mondego

### **5.3 Manutenção das obras costeiras existentes**

Esta alternativa consiste na manutenção das obras de protecção existentes, sem construção de novas obras fixas ou recurso a alimentação artificial.

#### **Trecho do Douro à Torreira**

Os resultados da simulação para o período de 2005 a 2050, permitem avaliar a evolução da costa correspondente a esta alternativa (Fig. 5.3). O sector a norte da Cortegaça é poupado ao progresso da erosão devido às obras de protecção existentes, constituídas por numerosos esporões e extensas defesas frontais que impedem o recuo da linha de água. Não são, no entanto, melhoradas as condições balneares nem se evitam ocasionais inundações das povoações por galgamento das defesas em condições de agitação marítima e maregráficas mais desfavoráveis.

As erosões progidem a sul, sem atenuação da sua intensidade global, o que decorre da permanência dos valores do défice aluvionar. A simulação indica uma perda acumulada de 48 milhões de metros cúbicos na totalidade do trecho, verificando-se as seguintes perdas: 27 milhões de metros cúbicos entre o Furadouro e a Torreira e 10 milhões entre a Maceda e o Furadouro, acompanhadas da reorientação da praia; 11 milhões a sul da Torreira, decorrentes da gradual extensão do processo erosivo para sul.

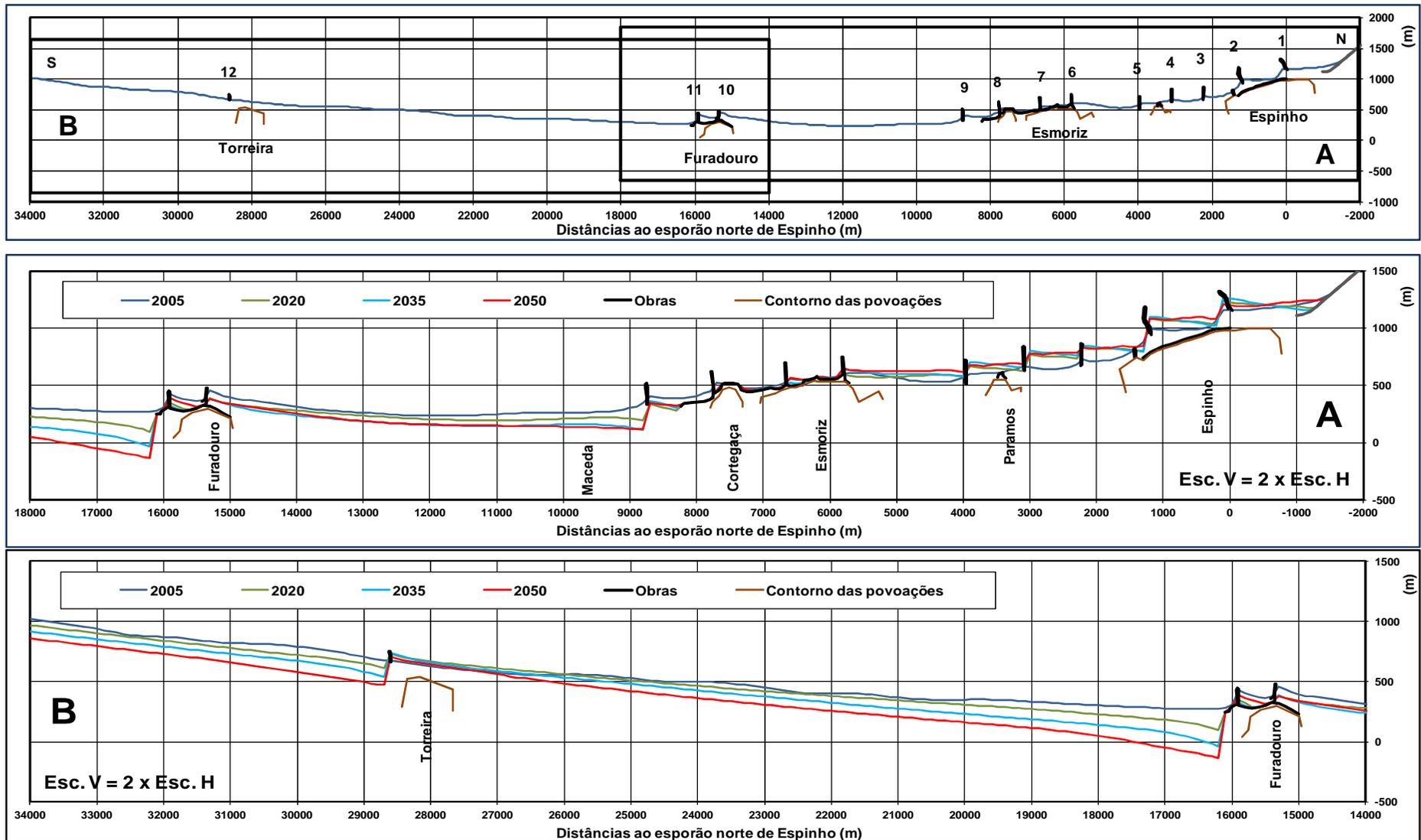


Figura 5.3 – Simulação da alternativa de manutenção das obras costeiras existentes no trecho do Douro à Torreira

### **Trecho da Torreira ao Cabo Mondego**

Os resultados da simulação da evolução da linha de água, entre 2020 e 2050, mostram um ligeiro enchimento a norte da embocadura, a estabilidade em toda a zona protegida por esporões e o progresso da erosão a sul dos esporões de Mira (Fig. 5.4).

Verifica-se que esta alternativa impede o recuo da linha de água nas frentes das povoações, desde que as obras sejam monitorizadas e recarregadas sempre que necessário, para manter a sua funcionalidade. Não promove, no entanto, o melhoramento das condições balneares nem evita ocasionais inundações por galgamento das defesas.

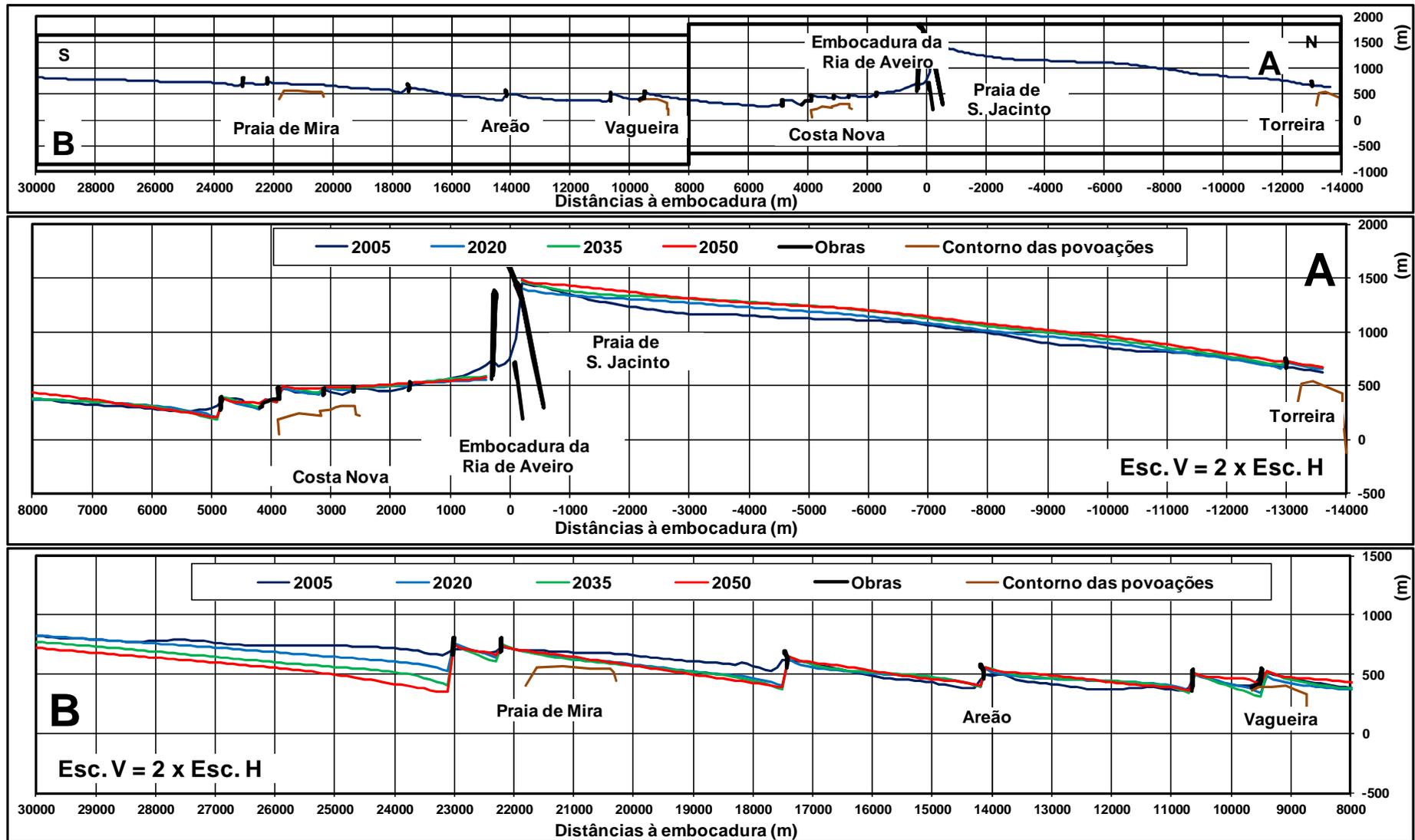


Figura 5.4 – Simulação da alternativa de manutenção das obras existentes no trecho da Torreira ao Cabo Mondego

## 5.4 Alimentação artificial

### Trecho do Douro à Torreira

Simularam-se 6 acções periódicas de alimentação artificial num trecho com 10 km de comprimento, compreendido entre Espinho e Maceda. Cada uma das acções envolvia um volume total de  $10 \times 10^6 \text{ m}^3$ , e uma duração de 60 dias. As 6 acções de alimentação artificial eram introduzidas no modelo, nos períodos de verão entre 2020 e 2045, com intervalos de 5 anos. Corresponde a estas intervenções um volume total de alimentação artificial de  $60 \times 10^6 \text{ m}^3$ , para o período de 30 anos de 2020 a 2050. Admite-se que as areias necessárias possam ter origem em manchas de empréstimo localizadas na plataforma continental adjacente.

Os resultados da simulação mostram que o fornecimento médio de  $2 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{ano}$  nessas três décadas trava o processo erosivo e promove uma completa recuperação da linha de água entre Espinho e Furadouro (Fig. 5.5).

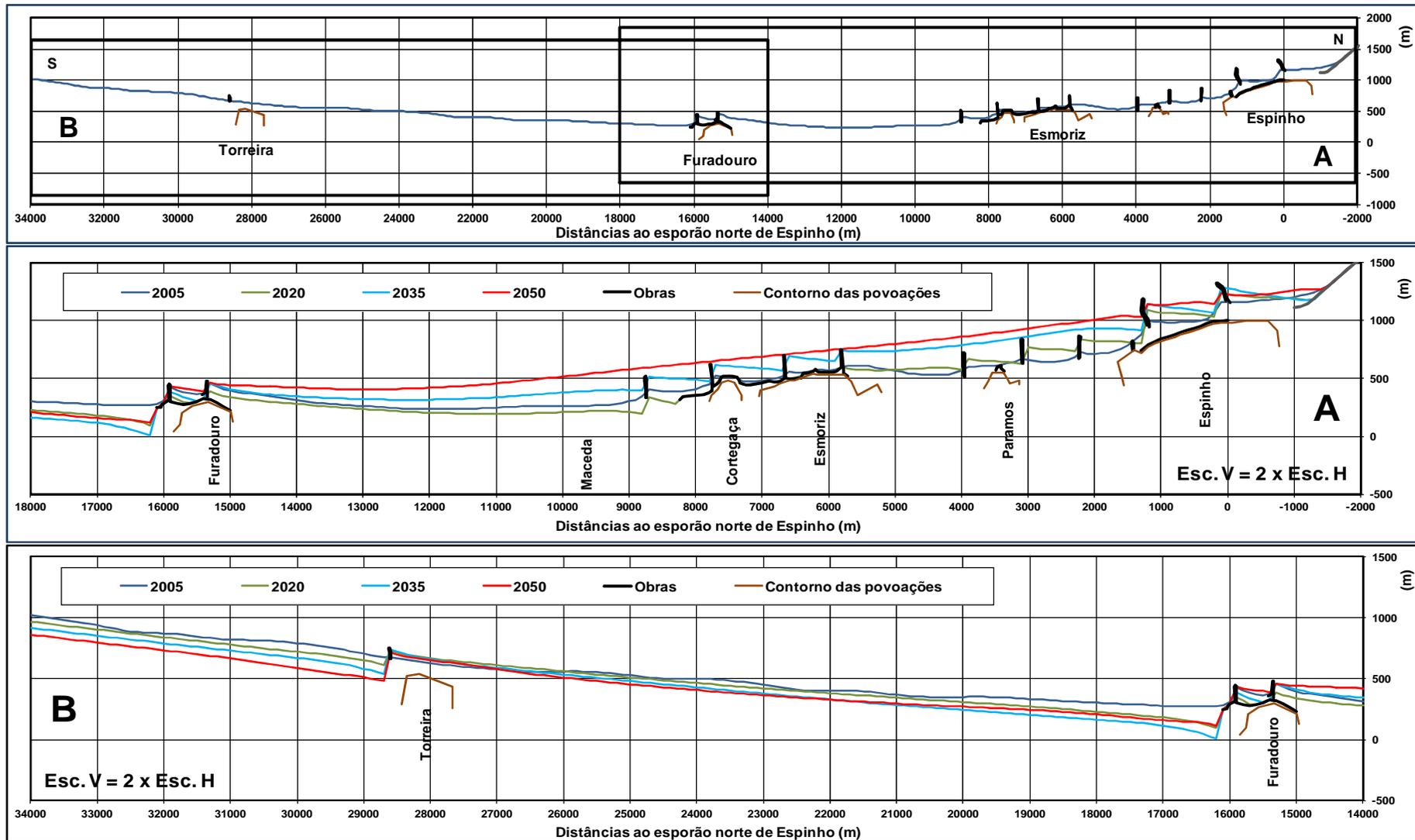


Figura 5.5 – Simulação da alternativa de alimentação artificial do trecho do Douro à Torreira

### **Trecho da Torreira ao Cabo Mondego**

Simularam-se 6 acções periódicas de alimentação artificial de duas zonas: num trecho com 5 km de comprimento, com início a sul da embocadura, para protecção e melhoramento da frente marítima das povoações da Costa Nova e da Vagueira; e num trecho de 2 km em frente da praia de Mira.

Cada uma das acções envolvia um volume total de  $10 \times 10^6 \text{ m}^3$ , e uma duração de 60 dias, sendo depositados  $7,5 \times 10^6 \text{ m}^3$  na primeira dessas zonas, e  $2,5 \times 10^6 \text{ m}^3$  na segunda. As areias eram extraídas dos primeiros 5 km da praia de S. Jacinto, adjacentes ao molhe norte, e as 6 acções de alimentação artificial eram introduzidas no modelo, nos períodos de verão entre 2020 e 2045, com intervalos de 5 anos. Corresponde a estas intervenções um volume total de alimentação artificial de  $60 \times 10^6 \text{ m}^3$ , para o período de 30 anos de 2020 a 2050.

Os resultados da simulação, que se apresentam na Fig. 5.6, mostram que o fornecimento médio de  $2 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{ano}$  nessas três décadas trava o processo erosivo e promove uma recuperação significativa da linha de água nas zonas mais afectadas. Verifica-se, devido às extracções de empréstimo na praia de S. Jacinto, um acentuado recuo da linha de água a norte da embocadura.

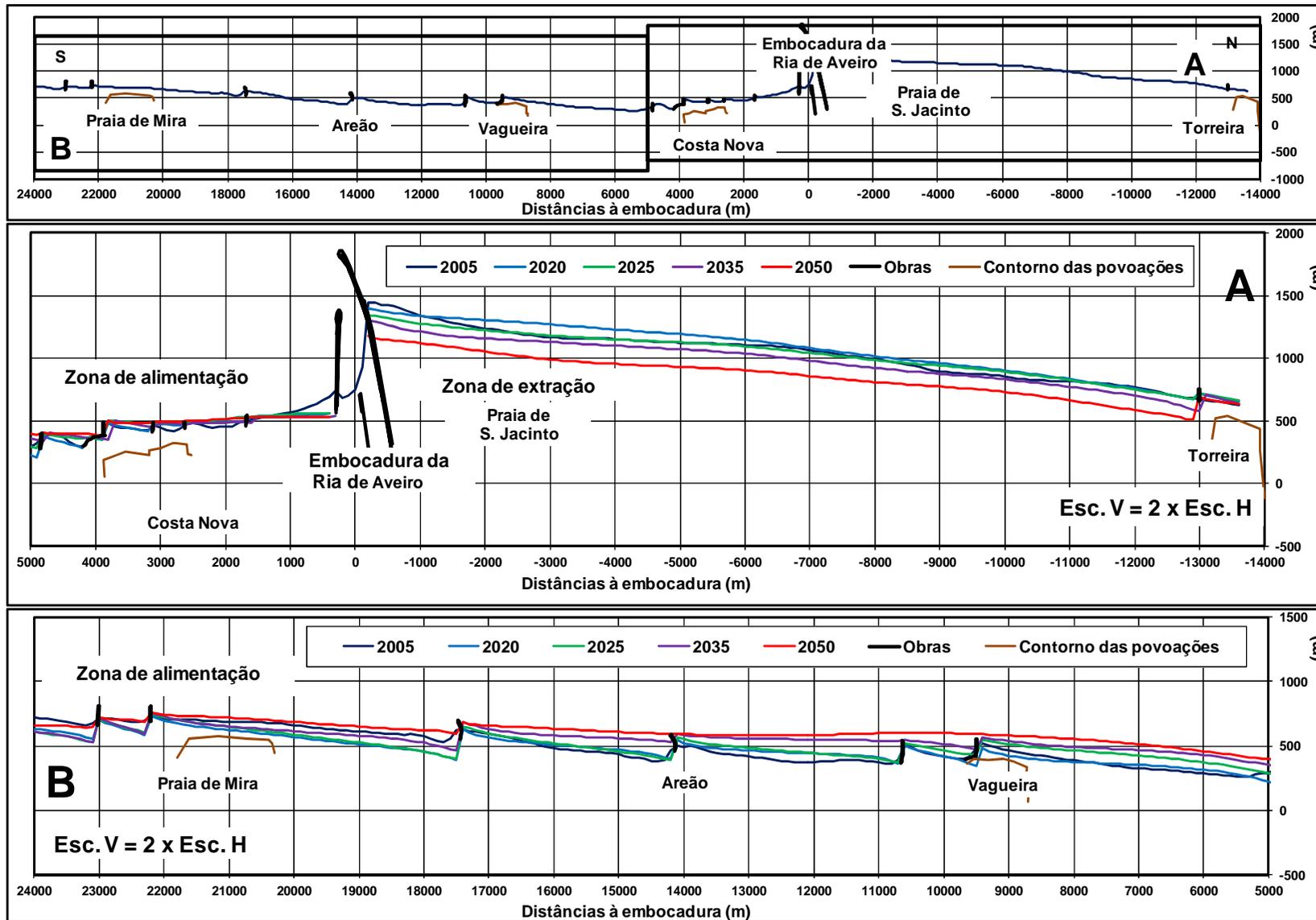


Figura 5.6 – Simulação da alternativa de alimentação artificial da Torreira ao Cabo Mondego

## 5.5 Obras fixas e alimentação artificial

Nesta alternativa procurou-se melhorar a situação existente através da construção ou prolongamento de alguns esporões complementados com acções limitadas de alimentação artificial.

### Trecho do Douro à Torreira

Após algumas simulações preliminares das intervenções, verificou-se ser vantajoso agrupá-las em duas fases, que incluíam o prolongamento de quatro esporões, o encurtamento de dois esporões e acções de alimentação artificial, segundo o que a seguir se caracteriza (Figs. 5.7 e 5.8).

Em 2015 simulou-se o melhoramento: da frente marítima do Furadouro com o prolongamento de 300 m do esporão sul (esporão 11) e o encurtamento de 100 m do esporão norte (esporão 10); e da frente marítima de Cortegaça a Esmoriz. Este último melhoramento compreendeu: o prolongamento de 300 m do esporão 8; o prolongamento de 100 m do esporão 9; o encurtamento de 150 m do esporão 6; e as alimentações artificiais, a realizar num período de seis meses, de 1 000 000 m<sup>3</sup> entre os esporões 9 e 8, de 2 000 000 m<sup>3</sup> entre os esporões 8 e 7 e de 2 000 000 m<sup>3</sup> entre os esporões 7 e 6.

Em 2025 simulou-se o melhoramento da frente marítima de Paramos à zona sul de Espinho, compreendendo: o prolongamento de 200 m do esporão 5 e alimentação artificial de 2 000 000 m<sup>3</sup> entre os esporões 5 e 2.

Verifica-se o prosseguimento do processo erosivo a sul, sem atenuação da sua intensidade global, o que decorre da permanência dos valores do défice aluvionar. A simulação indica uma perda acumulada de 48 milhões de metros cúbicos, na totalidade do trecho. A zona mais atingida localiza-se entre o Furadouro e a Torreira (Zona 11 a 12), com uma perda de 35 milhões de metros cúbicos, e estende-se ainda para sul desta última povoação, embora de forma mais atenuada (Zona 12 a S).

O prolongamento de 200 m do esporão do Furadouro (esporão 11) melhora a segurança da povoação, ao promover um avanço médio da linha de água da ordem de 100 m na célula definida pelos esporões 11 e 10, onde actualmente não existe praia.

A frente marítima de Cortegaça a Esmoriz que se encontra actualmente desprovida de praias e totalmente revestida por defesas frontais passa a dispor, devido às intervenções, de uma faixa de praia estável com larguras médias superiores a 100 m. Ocorre um melhoramento idêntico entre Paramos e sul de Espinho com substanciais aumentos das larguras de praia, o que melhora muito a protecção da povoação de Paramos e do bairro de pescadores localizado a sul de Espinho.

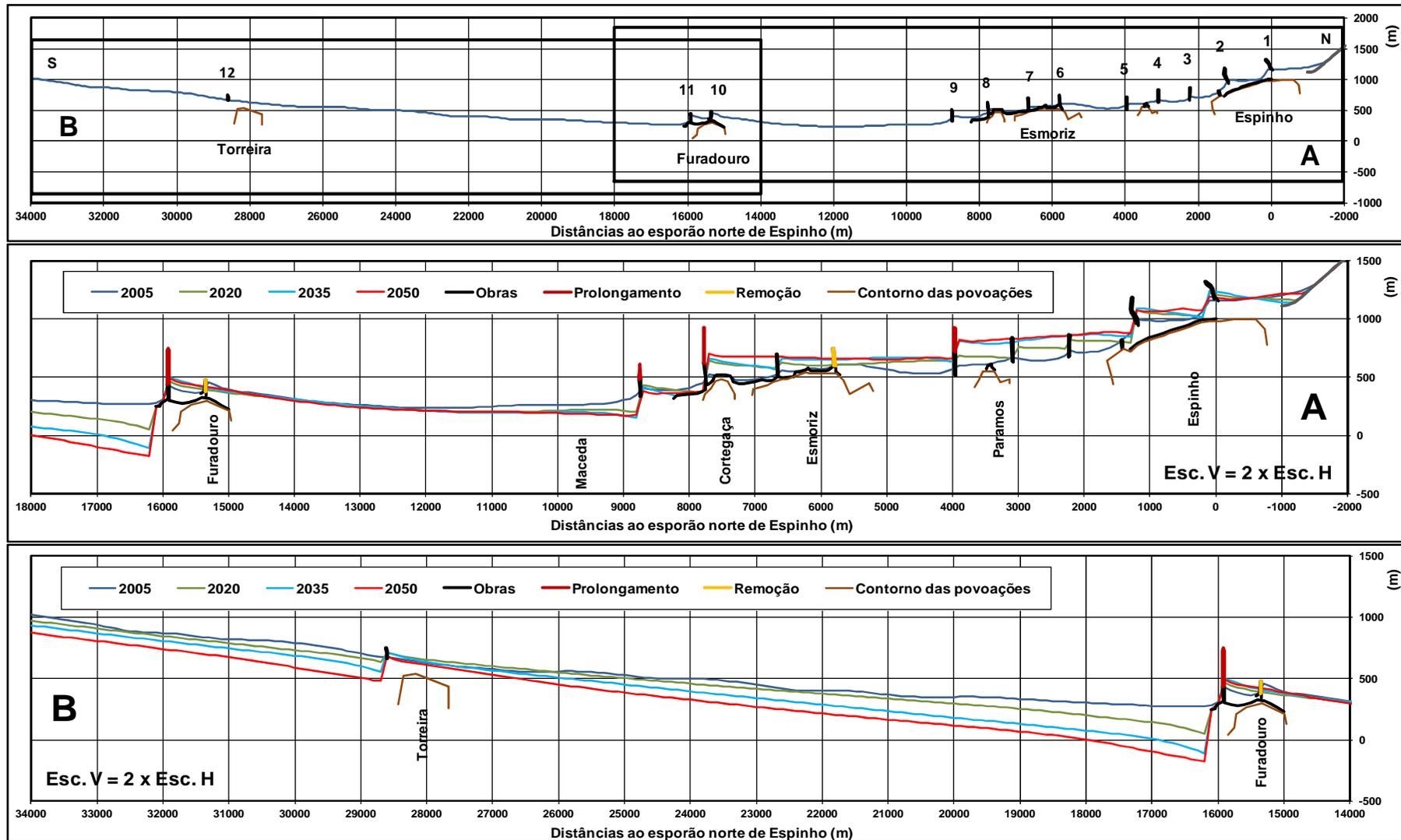


Figura 5.7 – Simulação da alternativa de obras fixas e alimentação artificial da costa do Douro à Torreira

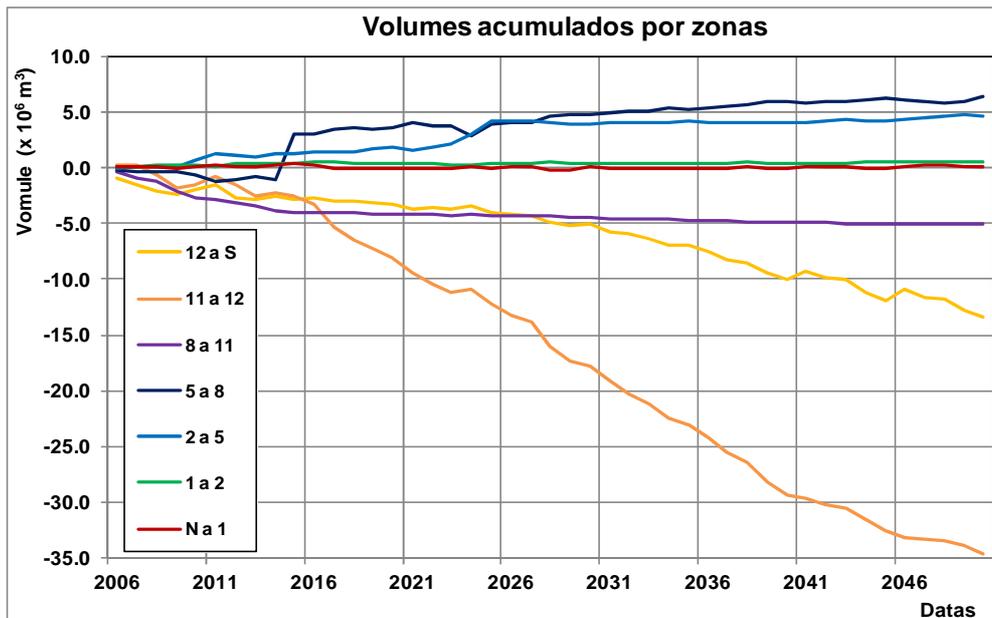


Figura 5.8 – Alternativa de obras fixas e alimentação artificial. Volumos acumulados em diferentes zonas da costa entre o Douro e a Torreira

### Trecho da Torreira ao Cabo Mondego

O critério de utilização de obras fixas consistiu em procurar obter acumulação de areia na frente marítima da Costa Nova, Vagueira e Mira, transferindo as perdas para a zona a sul de Mira, onde existem longos trechos sem ocupação humana. Verificou-se ser vantajoso prolongar três dos esporões existentes e construir dois novos esporões, complementando estas obras com acções de alimentação artificial.

Em 2020 efectuou-se um prolongamento de 250 m, dos três esporões localizados a sul da Costa Nova, da Vagueira e da praia de Mira. Foram introduzidos dois novos esporões, com comprimentos de 400 e 450 m, cerca de 5 km a norte e a sul do que fora prolongado a sul da praia de Mira. Considerou-se que o esporão a sul seria construído em 2015 e o esporão a norte em 2020.

As acções de alimentação artificial seriam realizadas em 2020, com  $8 \times 10^6 \text{ m}^3$  de areias extraídas da praia de S. Jacinto, com deposição de  $2 \times 10^6 \text{ m}^3$  na Costa Nova,  $2 \times 10^6 \text{ m}^3$  na Vagueira e  $4 \times 10^6 \text{ m}^3$  na zona do Areão.

Apresentam-se nas Figs. 5.9 e 5.10 os resultados da simulação desta alternativa para o período de 2005 a 2050, referentes à evolução da linha de água e dos volumes acumulados em diferentes trechos da costa. Verifica-se que este tipo de intervenção promove acumulação de areias e avanços da linha de água nas frentes marítimas das povoações, garantindo a sua segurança e a melhoria das suas condições balneares.

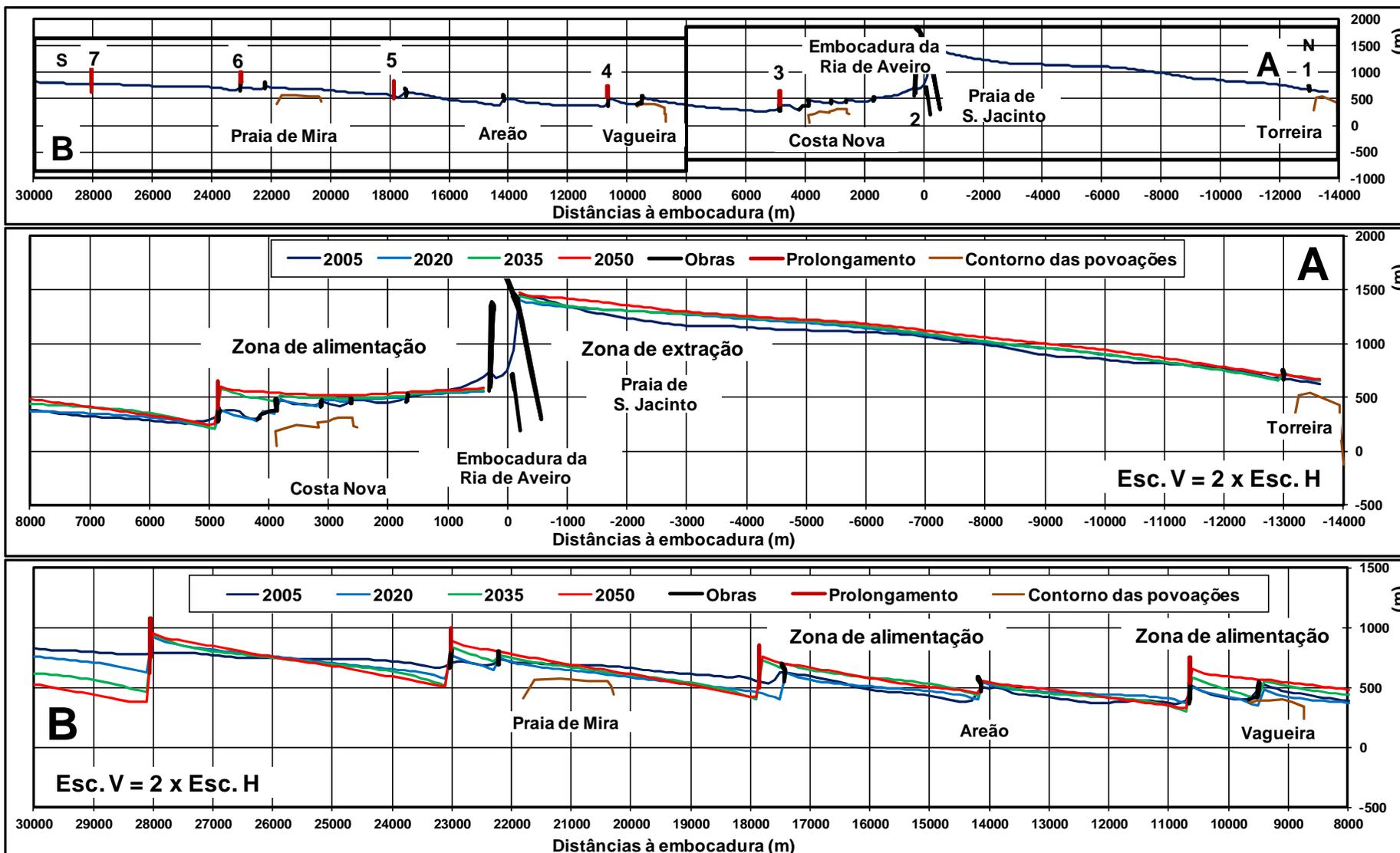


Figura 5.9 – Simulação da alternativa de obras fixas e alimentação artificial da Torreira ao Cabo Mondego

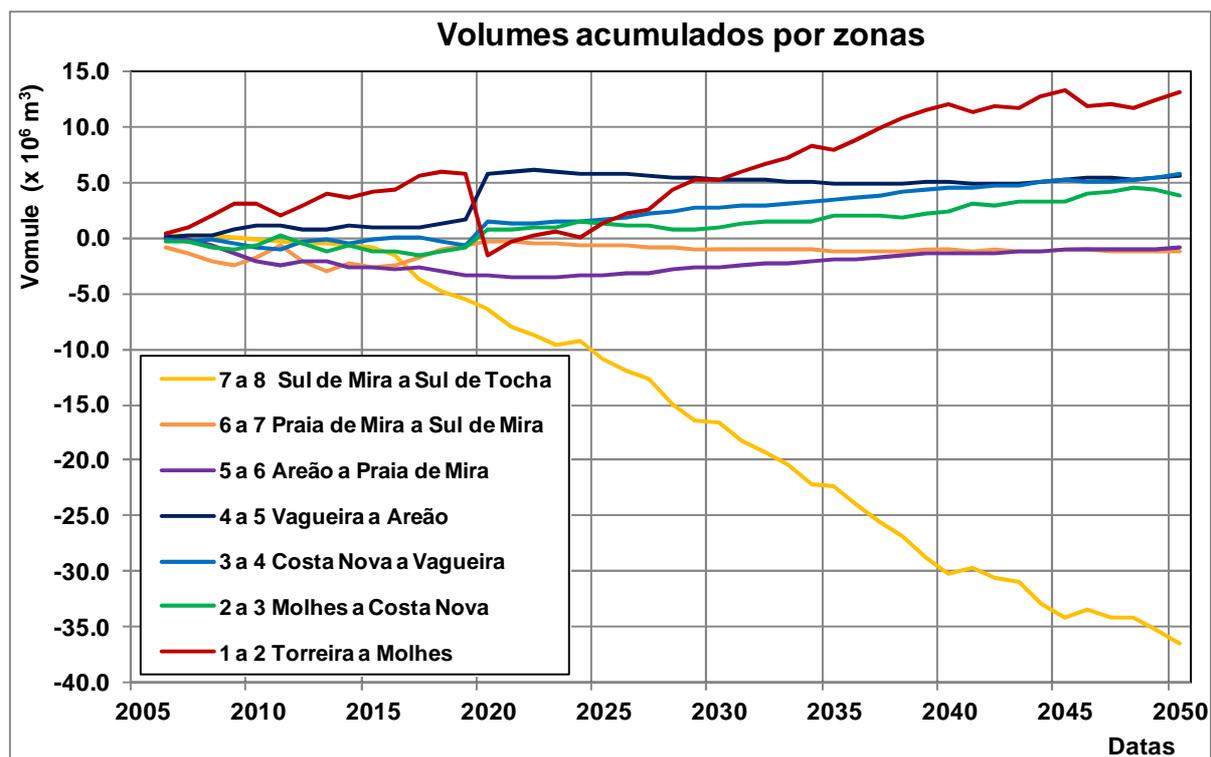


Figura 5.10 – Alternativa de obras fixas e alimentação artificial. Volumes acumulados em diferentes zonas da costa entre a Torreira e o Cabo Mondego

## 6 | Considerações finais

Apresenta-se uma metodologia de estudo de desequilíbrios morfológicos costeiros de grande envergadura. Para comprovar a sua viabilidade, efectuaram-se aplicações aos processos: de erosão progressiva a sul de Espinho; e de acumulação e erosão da costa marítima de Aveiro.

Recorreu-se à simulação numérica para: analisar as evoluções sofridas pela linha de água em toda sua extensão espacial e temporal, do Douro ao Cabo Mondego e desde 1950 até ao presente; e antever a evolução nas próximas décadas face a intervenções alternativas de controlo do processo erosivo. Na modelação matemática usaram-se os dados disponíveis, que embora apresentando algumas falhas permitiram confirmar a viabilidade e potencial da metodologia.

Foi possível efectuar uma análise quantificada dos processos de reequilíbrio morfológico e das alternativas de intervenção para o seu controlo, tendo-se obtido resultados detalhados e coerentes. Não obstante, dados os importantes valores económicos e sociais envolvidos, a aplicação desta metodologia a futuros projectos de defesa destes trechos justifica o prévio aprofundamento de diversos dados e componentes do estudo: hindcast da agitação marítima; propagação das ondas entre o largo e a costa; morfologia das praias e granulometria das areias; perdas de areias por extracção, para a construção civil e para a manutenção e aprofundamento do canal de acesso da navegação ao porto de Aveiro; enfraquecimento dos débitos de areia do Douro; ganhos sedimentares; efeito da subida do nível médio do mar; e alternativas de intervenção.

### **Processo evolutivo do trecho do Douro à Torreira**

O trecho deveria encontrar-se até 1880 numa situação de estabilidade morfológica e equilíbrio natural, traduzida em linhas gerais por um fluxo aproximadamente uniforme do saldo do transporte sólido litoral de sentido norte-sul. Estima-se que entraria um caudal de areia de 1 320 000 m<sup>3</sup>/ano na fronteira norte e sairia esse mesmo caudal pela fronteira sul, localizada a sul da Torreira.

Este equilíbrio natural foi rompido por diversas intervenções humanas: intercepção total do transporte sólido litoral proveniente da costa a norte, a partir de 1884, com a construção do porto de Leixões (220 000 m<sup>3</sup>/ano); diminuição do débito aluvionar do Douro em resultado da extracção de areias no estuário e da construção da barragem de Crestuma (do valor original de 1 100 000 para 200 000 m<sup>3</sup>/ano, em 1985); extracção de areias, até ao final da década de 1990, no cabedelo da foz do Douro e nas praias a norte de Espinho (8 700 000 m<sup>3</sup>).

As erosões iniciaram-se na zona de Espinho e progrediram para sul: em 1948 ultrapassavam a Cortegaça; em 1973 a praia da Maceda; e em 2005 atingiam a zona da Torreira, afectando um comprimento total de 27 km de costa. Perderam-se, no período total de 125 anos, cerca de 460 ha de área costeira e 58 milhões de metros cúbicos de areia, como resultado da acumulação de balanços sedimentares negativos. Verificou-se um recuo máximo de 500 m da linha de água, localizado entre Espinho e Paramos.

O processo erosivo afectou diversas povoações da frente marítima, o que obrigou, para sua protecção, a executar numerosas obras fixas de defesa, constituídas por esporões e defesas frontais, visando o controlo do avanço do mar.

A permanência do défice sedimentar do rio Douro faz antever que as perdas de área de costa no trecho prossigam no futuro com a mesma intensidade.

### **Processo evolutivo do trecho da Torreira ao Cabo Mondego**

A evolução morfológica que se desenvolve entre a Torreira e o cabo Mondego tem causas diferentes das referidas para o trecho a norte. Na zona da costa de Aveiro decorre um processo de acumulação e erosão desencadeado pela construção dos extensos molhes exteriores da embocadura que, devido à saliência de cerca de 700 m relativamente à linha de água original, passaram a constituir um importante obstáculo ao transporte sólido litoral.

Face à retenção a norte originada pelo molhe norte, ao actuar como um esporão longo, a evolução morfológica deveria conduzir a volumes de erosão a sul da mesma magnitude, ou seja, de cerca de 32 milhões de metros cúbicos. Na realidade a erosão ascendeu a cerca de 45 milhões de metros cúbicos, justificando-se a diferença pelo balanço negativo de perdas e ganhos no interior do trecho, de 13 milhões de metros cúbicos, devido especialmente às volumosas extracções na praia de S. Jacinto. As erosões obrigaram a executar várias obras fixas de defesa visando controlo do avanço do mar, constituídas por esporões e defesas frontais.

Num processo de acumulação e erosão deste tipo, a evolução é máxima no período inicial decaindo gradualmente o seu ritmo ao longo do tempo. As erosões a sul da embocadura, que tiveram a sua fase aguda até à década de 1970, apresentam hoje um ritmo mais moderado, devendo no entanto continuar a estender-se gradualmente para sul. A atenuação deve-se ao progressivo aumento do transbordo de areias no molhe norte.

### **Alternativas de intervenção**

Foram consideradas e simuladas no modelo até ao horizonte de 2050, nos dois trechos referidos, quatro alternativas de intervenção decorrentes dos seguintes princípios orientadores:

- Alternativa 1 - Não realização de novas intervenções de defesa nem manutenção das obras de protecção existentes, procedendo-se à retirada de infra-estruturas e actividades à medida que vão sendo atingidas pela erosão.
- Alternativa 2 - Manutenção das obras de protecção existentes sem recurso a novas obras de defesa.
- Alternativa 3 - Protecção da costa com acções de alimentação artificial, utilizando areias provenientes da praia de S. Jacinto.
- Alternativa 4 - Protecção da costa com obras fixas e alimentação artificial.

A Alternativa 1 que admitiu a progressiva degradação dos esporões e defesas frontais a partir de 2020, até à total perda de funcionalidade em 2040, conduziria a que o bairro dos Pescadores a sul de

Espinho e as povoações de Paramos, Esmoriz, Cortegaça, Furadouro, Costa Nova, Vagueira, Areão e Mira fossem progressivamente atingidas pela acção destrutiva do mar (Figs. 5.1 e 5.2).

A Alternativa 2, em que se mantêm operacionais as obras existentes, sem novas intervenções, garante a estabilidade em toda a zona protegida por esporões continuando o progresso da erosão a sul das zonas protegidas (Figs. 5.3 e 5.4). Não são, no entanto, melhoradas as condições balneares nem se evitam ocasionais inundações das povoações por galgamento das defesas, em condições de agitação marítima e maregráficas mais desfavoráveis.

Na Alternativa 3 alimenta-se cada um dos trechos com um volume de  $60 \times 10^6 \text{ m}^3$ , no período de 30 anos de 2020 a 2050, sendo a areia de enchimento do trecho a sul da embocadura da Ria de Aveiro proveniente da praia de S. Jacinto. A deposição é efectuada nas frentes marítimas das povoações de Paramos, Esmoriz e Cortegaça, no trecho norte, e Costa Nova, Vagueira e Mira, no trecho sul. Verifica-se que um fornecimento médio de  $2 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{ano}$ , em cada um dos trechos nessas três décadas, trava o processo erosivo e promove uma recuperação significativa da linha de água nas zonas mais afectadas (Figs. 5.5 e 5.6).

Na Alternativa 4 procurou-se melhorar a situação existente através da construção e prolongamento de esporões, complementados com  $8 \times 10^6 \text{ m}^3$  de alimentação artificial. Verifica-se que este tipo de intervenção promove acumulações de areia e avanços da linha de água nas frentes marítimas das povoações, melhorando a sua segurança e beneficiando as condições balneares (Figs. 5.7 e 5.9).

Em conclusão, a metodologia que se propõe e testa, considera que as acções a desenvolver devem ser apoiadas numa base científica que aproveite adequadamente os conhecimentos e instrumentos de cálculo disponíveis no âmbito da engenharia costeira. Baseia-se numa interpretação global dos fenómenos em curso, quantificada através de balanços sedimentares e da aplicação de um modelo numérico de evolução de linha de costa. Recomenda a extensão da análise a um comprimento de costa e a um período de tempo adequados aos processos de evolução morfológica em curso.

Lisboa, LNEC, dezembro de 2015

VISTOS

O Chefe do Núcleo de Estuários e Zonas  
Costeiras



Luís Ivens Portela

AUTORIA



Claudino Martins Vicente  
Investigador-Coordenador

A Diretora do Departamento de Hidráulica e  
Ambiente



Rafaela de Saldanha Matos



Manuel Clímaco  
Investigador Principal

## Bibliografia

- APA; 2006 – **Estudo das Condições de Acesso Marítimo ao Porto de Aveiro**. Administração do Porto de Aveiro.
- BRUUN, P.; 1988 – The Bruun Rule of Erosion by sea-level rise: a discussion on large scale two and three-dimensional usages. **Journal of Coastal Research** 4(4), 627-648.
- CEHIDRO; 1998 – **Carta de Risco do Litoral. Trecho 2: Foz do Douro–Nazaré**. Instituto Superior Técnico (IST), Instituto da Água (INAG).
- COELHO, C.D.; PEREIRA, C.; 2013 – **Previsão de Recuo de Linha de Costa. Risco de Cheia e Estratégias de Adaptação para a Zona Costeira e Lagunar da Ria de Aveiro**. Projecto Adaptaria, FCT/EU.
- CONSULMAR; 1988 – **Estudo dos Problemas Litorais na Costa de Portugal Continental. Cabo Mondego – Rio Mondego**. Direcção-Geral de Portos, Lisboa.
- DEAN, R.G.; 1987 – Coastal sediment processes: toward engineering solutions. **Proceedings of Coastal Sediments '87**, ASCE, pp. 1-24.
- DIAS, J.A.; TABORDA, R.M.; 1988 – Evolução recente do nível médio do mar em Portugal. **Anais do Instituto Hidrográfico** 9, 83-97.
- DIRECÇÃO-GERAL DOS SERVIÇOS HIDRÁULICOS; 1951 – **O Regime das Embocaduras Lagunares e o Problema do Melhoramento da Barra de Aveiro**. Lisboa: Ministério das Obras Públicas, Direcção-Geral dos Serviços Hidráulicos.
- DODET, G.; BERTIN, X.; TABORDA, R.; 2010 – Wave climate variability in the North-East Atlantic Ocean over the last six decades. **Ocean Modelling** 31(3), 120-131.
- HIDROTÉCNICA PORTUGUESA; 1980-81 – **Leixões-Cabo Mondego. Problemas Litorais**. Volumes 1 a 4. Lisboa: Direcção-Geral de Portos.
- KAMPHUIS, J.W.; 1991 – Alongshore sediment transport rate. **Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering** ASCE 117(6), 624-640.
- MOTA-OLIVEIRA, I.B.; VALLE, A.S.; MIRANDA, F.C.; 1982 – Littoral problems in the Portuguese West Coast. **Proceedings of the 18th Conference on Coastal Engineering**, ASCE, pp. 1950-1969.
- PORTELA, L.I.; 2008 – Sediment transport and morphodynamics of the Douro River estuary. **Geo-Marine Letters** 28(2), 77-86.
- TOLMAN, H.L.; 2009 – **User Manual and System Documentation of WaveWatch III, version 3.14**. NOAA/NWS/NCEP, Technical Note, 194 pp.
- VELOSO-GOMES, F.; NEVES, L.P.; 2011 – **Caso de Estudo Esmoriz Cortegaça (Portugal)**. ANCORIM – Atlantic Network for Coastal Risks Management. Porto: Instituto de Hidráulica e Recursos Hídricos, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- VICENTE, C.M.; CLÍMACO, M.; 2003 – **Evolução de Linhas de Costa. Desenvolvimento e Aplicação de um Modelo Numérico**. ICT-ITH 42, LNEC.
- VICENTE, C.M.; CLÍMACO, M.; 2007 – Dimensionamento hidráulico e funcionamento de esporões. Comunicação apresentada no **IV Congresso sobre Planeamento e Gestão das Zonas Costeiras dos Países de Língua Oficial Portuguesa**. APRH, Out., Funchal.
- VICENTE, C.M.; CLÍMACO, M.; 2009 – Metodologia de aplicação de um modelo numérico de evolução de linhas de costa a estudos de praias. Comunicação apresentada às **6<sup>as</sup> Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária**. PIANC, Out., Funchal.

VICENTE, C.M.; CLÍMACO, M.; 2012 – **Trecho de Costa do Douro ao Cabo Mondego. Caracterização Geral do Processo Erosivo.** Rel. 253/2012 – DHA/NET, LNEC.

VICENTE, C.M.; CLÍMACO, M.; BERTIN, X.; 2013 – **Agitação Marítima e Transporte Sólido Litoral na Costa de Aveiro.** Rel. 164/2013 – DHA/NET, LNEC.

VICENTE, C.M.; CLÍMACO, M.; 2014 – **Trecho de Costa a Sul de Espinho. Simulação Numérica do Processo Erosivo e de Alternativas de Intervenção.** Rel. 101/2014 – DHA/NET, LNEC.

VICENTE, C.M.; CLÍMACO, M.; 2015 – **Evolução Morfológica da Costa de Aveiro. Proposta de uma Metodologia para Controlo do Processo Erosivo.** Não publicado, DHA/NET, LNEC.

