

Administração dos Portos de Setúbal e Sesimbra, S.A.

AJUSTE DIRETO PARA A ADJUDICAÇÃO DA AQUISIÇÃO DA PRESTAÇÃO DE SERVIÇOS DO

**“ESTUDO DE HIDRODINÂMICA E
GEOLOGIA COSTEIRA NO ÂMBITO DO
PROJETO DE MELHORIA DOS ACESSOS
MARÍTIMOS AO PORTO DE SETÚBAL”**



Ficha de Documentação		
Classificação	Distribuição	
Confidencial	n/a	
Título		
Caracterização da hidromorfologia do delta do estuário do Sado. Estudos de modelação para caracterização e diagnóstico dos processos de hidrodinâmica e transporte		
Palavras Chave		
Dinâmica costeira, Correntes, MOHID, SWAN, batimetria		
Resumo		
O presente documento mostra a tendência evolutiva da zona costeira na subcélula costeira associada ao delta de vazante do Sado nos últimos 60 -70 anos e os resultados preliminares da modelação dos processos hidrodinâmicos e de transporte de sedimentos para a zona do Portinho da Arrábida-Figueirinha, Figueirinha-Praia da Saúde e ponta de Troia. É feita uma breve descrição da metodologia utilizada para a implementação dos modelos numéricos e estabelecido um modelo conceptual que explica a dinâmica local.		
Entidade que produziu o documento		
<p>HIDROMOD, Modelação em Engenharia, Lda Rua Rui Teles Palhinha, 4, 1º, 2740-278 Porto Salvo Tel: 218486013 Email: hidromod@hidromod.com URL: hidromod.com</p>		
Com a colaboração de:		
<p>NEMUS, Gestão e Requalificação Ambiental, Lda Estrada Paço do Lumiar, Campus do Lumiar, Edifício D 1649-038 Lisboa Tel. 217103160 Email: nemus@nemus.pt</p>		
<p>TRIFÓLIO – Estudos e Projectos Ambientais e Paisagísticos, Lda Avenida Doutor Mourão Ferreira, n.º 12B 1750-204 Lisboa Tel: 214744796 Email: geral@trifolio.pt</p>		
Autores		Título
Adélio Silva (HIDROMOD, Lda)		Eng. Civil, Doutor
Paulo Chambel (HIDROMOD, Lda)		Eng. Civil, Doutor
João Ribeiro (HIDROMOD, Lda)		Oceanógrafo
Carlos César Jesus (NEMUS, Lda.)		Geólogo, Doutor
Pedro Bettencourt (NEMUS, Lda)		Geólogo, Mestre
André Carrêlo (Trifólio, Lda)		Eng.º Ambiente
Tiago Miguel Fraga (Trifólio, Lda)		Arqueólogo, Mestre
Data de produção	Nº de páginas	Nº de Referência
25/01/2019	104	

ÍNDICE GERAL

Sumário	10
1 Caracterização geológica, geomorfológica e oceanográfica	12
1.1 Fisiografia geral e geomorfologia local	12
1.1.1 Troço costeiro entre o Portinho da Arrábida e a praia da Saúde	14
1.1.2 Península de Tróia	18
1.1.3 Delta de vazante do Sado	19
1.2 Características dos sedimentos	20
1.3 Características da agitação	22
1.4 Características gerais da circulação na célula sedimentar	23
2 Aspectos relacionados com o canal de navegação	29
2.1 História da evolução do canal de acesso ao porto de Setúbal	29
2.2 Esforço de manutenção do canal	30
2.3 Profundidade de equilíbrio do canal da barra	31
2.4 Impactes do aprofundamento do canal à escala do estuário	32
3 Metodologia	33
3.1 Introdução	33
3.2 Topo-Hidrografia	33
3.3 Estratégia de modelação	35
3.3.1 Geração e propagação das ondas	38
3.3.2 Hidrodinâmica	39
4 Análise da dinâmica do delta e praias associadas	40
4.1 Evolução morfosedimentar das praias emersas	40
4.1.1 Praias entre o Portinho da Arrábida e a praia de Albarquel	40
4.1.2 Praias entre a praia de Tróia (Mar) e a praia Atlântica	48
4.2 Evolução recente do delta exterior	50
4.3 Simulação da propagação da agitação marítima	53
4.3.1 Cenário com probabilidade frequente	53
4.3.2 Cenário com condições de tempestade de sudoeste	53
4.3.3 Cenário de tempestade intensa	54

4.4	Simulação da hidrodinâmica e transporte.....	61
4.4.1	Ação exclusiva da maré.....	61
4.4.2	Ação combinada da maré e ondas frequentes.....	61
4.4.3	Ação combinada da maré e tempestade de sudoeste	61
4.4.4	Ação combinada da maré e tempestade intensa.....	62
5	Modelo conceptual	74
5.1	Considerações prévias.....	74
5.2	Vertente patrimonial	74
5.3	Evolução da possança do delta ao longo dos últimos anos	82
5.4	Interpretação dos processos erosivos no trecho Creiro-Portinho	86
5.5	Papel do canal da barra neste processo	89
5.6	Aspetos patrimoniais	89
6	Cenários de intervenção	91
6.1	Aspetos relacionados com os processos de circulação e transporte	91
6.1.1	Aprofundamento do canal de navegação	91
6.1.2	Alimentação artificial do trecho Creiro-Portinho	94
6.1.3	Alimentação artificial do trecho Comenda-Albarquel.....	95
6.1.4	Alimentação artificial do trecho Albarquel-Praia da Saúde	97
6.2	Aspetos relacionados com o património	99
7	Conclusões	101
8	Bibliografia	102

Índice de Figuras

Figura 1: Baía que inclui o Portinho da Arrábida e a Praia do Creiro (fotografia de 2012). Fonte: DGT-SIARL (2018).	14
Figura 2: Praias dos Coelho, Galapinhos e Galapos (fotografia de 2012). Fonte: DGT-SIARL (2018).	15
Figura 3: Praia da Figueirinha (fotografia de 2012). Fonte: DGT-SIARL (2018).	16
Figura 4: Praia da Rasca (fotografia de 2011). Fonte: DGT-SIARL (2018).	17
Figura 5: Troço costeiro entre a praia da Rasca e a praia de Albarquel (fotografia de 2009). Fonte: DGT-SIARL (2018).	17
Figura 6: Porção norte da península de Tróia. Foto de Dez. 2012. Fonte: DGT-SIARL (2018).	18
Figura 7: Escarpa de erosão sobre a duna frontal na praia da UNOP7 (imediatamente a sul de Soltroia). Abril 2018.	19
Figura 8: Modelo digital de terreno da batimétrica em 1995/2002. Fonte: Brito (2009).	20
Figura 9: Amostras de sedimentos de fundo no estuário do Sado.	21
Figura 10: Amostras recolhidas no âmbito dos estudos realizados por Vale et al. (1997)	21
Figura 11: Localização das amostras de sedimentos superficiais recolhidas no âmbito da campanha IPMA (2015).	22
Figura 12: Balanço sedimentar na Célula Sedimentar entre Espichel e Sines na situação atual. Fonte: GTL (2014).	24
Figura 13: Modelo conceptual da circulação residual no Estuário do Sado	25
Figura 14: Esquema de movimentação de areias elaborado por LNEC através do Estudo da Barra do Sado. Fonte: LNEC, 1989.	26
Figura 15: Modelo conceptual da movimentação das areias no Estuário do Sado.	27
Figura 16: volumes dragados no canal da barra entre 2006 e 2012.	30
Figura 17: volumes dragados no canal norte (até ao RoRo) entre 2006 e 2012.	30
Figura 18: Perfil do fundo ao longo do eixo do canal para os levantamentos de 2000, 2001, 2002 e 2004.	31
Figura 19: Fontes batimétricas utilizadas para construção do mapa digital de terreno	34
Figura 20: malha original do modelo do estuário do Sado produzida por Neves (1985).	34
Figura 21: Levantamento do estuário efetuado pelo Instituto Hidrográfico em 1994	35
Figura 22: Nível 1 abrange toda a costa continental portuguesa com uma resolução de 6 Km	37
Figura 23: Nível 2 domínio de transição para a zona costeira com uma resolução de 1 Km	37
Figura 24: Nível 3 domínio de transição local com uma resolução de 180m	37
Figura 25: Nível 4 domínio de transição local com uma resolução de 60m	37
Figura 26: Nível 5 domínio de transição local com uma resolução de 20 m	37

Figura 27: Distribuição conjunta da altura significativa em função do período (esquerda) e da direção (direita). Registos da boia ondógrafo de Sines.....	38
Figura 28: Nível da maré à entrada do estuário do Sado. Janela de simulação assinalada a vermelho.....	39
Figura 29: Destruição na via que dá acesso à praia do Creiro através do Portinho da Arrábida devido à agitação marítima. Data: 01.03.2018	40
Figura 30: Praia dos Galapos após o pico da tempestade. Data: 03/03/2018.	41
Figura 31: Apoio de praia na praia dos Galapos durante a praia-mar, mas após o pico tempestivo. Data: 03/03/2018.....	41
Figura 32: Efeitos da erosão costeira sobre o caminho de terra batida que efetua a ligação rodoviária/pedonal entre o Creiro e o Portinho da Arrábida. Data: 20/01/2010.	41
Figura 33: Troço costeiro entre o Portinho da Arrábida e a praia dos Galapos em 1957, 1996 e 2012	42
Figura 34: Portinho da Arrábida ao longo do século XX: superior esquerda - anos 30; superior direita – anos 50; inferior esquerda – anos 60 (?); inferior direita - 1998.....	43
Figura 35: Praia de Galapos e Galapinhos na primeira metade do século XX e atualmente.....	44
Figura 36: Praia da Figueirinha em 1957, 1996 e 2012	45
Figura 37: Praia da Figueirinha na década de 60 do século XX	45
Figura 38: Troço costeiro entre a praia da Rasca e a praia de Albarquel em 1957 e 2012	46
Figura 39: Praia de Albarquel previamente à construção do esporão no seu limite Este	47
Figura 40: Foz da ribeira da Ajuda (ou do Outão ou da Comenda) na metade do século XX (em cima) e em 2018 (em baixo).....	47
Figura 41: Evolução da porção norte da península de Tróia entre meados do século XX e 2012	48
Figura 42: Praia Atlântica (observação para norte). Maio 2016.	50
Figura 43: Batimetria para o banco Figueirinha-Portinho. (a) Atual. (b) Antiga.....	51
Figura 44: Batimetria para o banco em frente à Península de Troia. (a) Atual. (b) Antiga	52
Figura 45: Banco Figueirinha-Portinho. Altura significativa e a direção para ondas com Hs: 2m, Tp: 12s, Dir: 315. Situações “atual” e “antiga”	55
Figura 46: Península de Troia. Altura significativa e a direção para ondas com Hs: 2m, Tp: 12s, Dir: 315. Situações “atual” e “antiga”	56
Figura 47: Banco Figueirinha-Portinho. Altura significativa e a direção para ondas com Hs: 4m, Tp: 14s, Dir: 247.5. Situações “atual” e “antiga”	57
Figura 48: Península de Tróia. Altura significativa e a direção para ondas com Hs: 4m, Tp: 14s, Dir: 247.5. Situações “atual” e “antiga”	58
Figura 49: Banco Figueirinha-Portinho. Altura significativa e a direção para ondas com Hs: 8m, Tp: 20s, Dir: 292.5. Situações “atual” e “antiga”	59
Figura 50: Península de Troia. Altura significativa e a direção para ondas com Hs: 8m, Tp: 20s, Dir: 292.5. Situações “atual” e “antiga”	60

Figura 51: Trecho Portinho-Figueirinha. Velocidade residual (velocidade média) para a situação só com maré. Situações “atual” e “antiga”.	63
Figura 52: Península de Troia. Velocidade residual (velocidade média) para a situação só com maré. Situações “atual” e “antiga”.	64
Figura 53: Trecho Portinho-Figueirinha. Velocidade residual considerando a ação combinada de maré e ondas com Hs: 2m, Tp: 12s, Dir: 315. Situações “atual” e “antiga”.	65
Figura 54: Península de Troia. Velocidade residual considerando a ação combinada de maré e ondas com Hs: 2m, Tp: 12s, Dir: 315. Situações “atual” e “antiga”.	66
Figura 55: Trecho Portinho-Figueirinha. Velocidade residual considerando a ação combinada de maré e ondas com Hs: 4m, Tp: 14s, Dir: 247.5. Situações “atual” e “antiga”.	67
Figura 56: Trecho Portinho-Figueirinha. Transporte residual considerando a ação combinada de maré e ondas com Hs: 4m, Tp: 14s, Dir: 247.5. Situações “atual” e “antiga” (azul menos intenso e vermelho mais intenso).	68
Figura 57: Península de Troia. Velocidade residual considerando a ação combinada de maré e ondas com Hs: 4m, Tp: 14s, Dir: 247.5. Situações “atual” e “antiga”.	69
Figura 58: Península de Troia. Transporte residual considerando a ação combinada de maré e ondas com Hs: 4m, Tp: 14s, Dir: 247.5. Situações “atual” e “antiga” (azul menos intenso e vermelho mais intenso).	70
Figura 59: Trecho Portinho-Figueirinha. Velocidade residual considerando a ação combinada de maré e ondas com Hs: 8m, Tp: 20s, Dir: 292.5. Situações “atual” e “antiga”.	71
Figura 60: Trecho Portinho-Figueirinha. Transporte residual considerando a ação combinada de maré e ondas com Hs: 8m, Tp: 20s, Dir: 292.5. Situações “atual” e “antiga”. (azul menos intenso e vermelho mais intenso)	72
Figura 61: Península de Troia. Velocidade residual considerando a ação combinada de maré e ondas com Hs: 8m, Tp: 20s, Dir: 292.5. Situações “atual” e “antiga”.	73
Figura 62: Estações arqueológica na zona de estudo	75
Figura 63: Evolução da NAO desde 1950 até ao presente (fonte: NOAA Climate Prediction Center)	83
Figura 64: Imagens Google Earth do trecho de costa Figueirinha-Portinho correspondentes respetivamente a 2004 (topo) e 2015 (baixo)	85
Figura 65: Delimitação da área levantada no banco norte com profundidades inferiores a 10 m (z.h.)	85
Figura 66: Levantamento multifeixe do canal de navegação realizado em 2016	86
Figura 67: Modelo conceptual de transporte para as situações “antiga” e “atual” em situação de tempestade.	88
Figura 68: Batimetrias correspondentes às situações atual e de projeto	92
Figura 69: Circulação e transporte residuais nas situações atual e de projeto considerando a ação combinada da maré e duma tempestade intensa	93

Figura 70: Proposta de área de intervenção no trecho Creiro-Portinho (a amarelo)	94
Figura 71: Possível zona de enchimento entre a praia de Albarquel e a Comenda	95
Figura 72: Domínios de cálculo considerados para a simulação detalhada do escoamento no trecho Comenda-Albarquel.	95
Figura 73: Pormenor da circulação residual no trecho costeiro ribeira da Ajuda-praia de Albarquel.	96
Figura 74: Pormenor do fluxo residual de transporte no trecho costeiro ribeira da Ajuda-praia de Albarquel.....	96
Figura 75: Velocidade máxima global.	97
Figura 76: Velocidade máxima em situação de vazante.....	98
Figura 77: Velocidade máxima em situação de enchente.	98
Figura 78: Estações arqueológicas referenciadas na zona Creiro-Portinho.....	99
Figura 79: Estações arqueológicas referenciadas na zona Albarquel – Praia da Saúde	100

Índice de Tabelas

Tabela 1: Volumes dragados entre 2006 e 2012.....	30
Tabela 2: Profundidade de equilíbrio prevista para o canal da barra.....	32
Tabela 3: Domínios implementados nos modelos numéricos SWAN e MOHID	37
Tabela 4: Cenários de agitação simulados.	38
Tabela 5: Estações arqueológicas referenciadas.....	76
Tabela 6: Ações de meteorização	81

SUMÁRIO

No âmbito do projeto de melhoria da acessibilidade marítima ao Porto de Setúbal está contemplado um conjunto de dragagens que permitirá oferecer, numa primeira fase um acesso permanente aos navios porta-contentores do tráfego *Short-Sea / Panamax* de tipo *Under-Panamax* de 3000 TEU até 12 m de calado e, numa segunda fase, um acesso permanente aos navios de tipo *Panamax* de 4000 TEU até 13 m de calado, em condições normais de acesso ao porto.

Em resultado do Estudo de Impacte Ambiental (EIA) realizado foi emitida pela Agência Portuguesa do Ambiente uma Declaração de Impacte Ambiental (DIA) que obriga à execução dum conjunto de trabalhos adicionais entre os quais se conta uma avaliação mais detalhada dos processos hidrodinâmicos e de transporte na zona do delta do estuário.

Neste particular é pedido que se promova *“um estudo de geologia costeira, mais abrangente que o proposto, nas praias que, do ponto de vista sedimentar, dependam do delta (Tróia estuarina, Tróia oceânica, Albarquel, Figueirinha, Galápos, Alpertuche, Galapinhos, Coelhos e Creiro/Portinho da Arrábida) e em que à luz do plano de monitorização proposto venham a revelar erosão, ou nas praias que evidenciem já atualmente sinais de erosão costeira, como é o caso do Portinho da Arrábida, que permita compreender os fenómenos responsáveis pela evolução da praia e predispor-se a minimizar os efeitos dessa erosão através da colocação de areia resultante das dragagens de manutenção nesses sectores costeiros, caso os estudos efetuados apontem para essa solução”*.

O presente estudo pretende dar resposta a este requisito procedendo a uma caracterização da dinâmica local na zona do delta e avançando com um modelo conceptual que fornece uma possível explicação para os problemas erosivos observados no trecho Creiro-Portinho da Arrábida. Da análise dos dados disponíveis sobre a evolução desta zona norte do delta e dos resultados das simulações de hidrodinâmica e transporte resulta a constatação que se tem vindo a observar ao longo dos últimos anos uma efetiva alteração da disposição das areias no banco. Estas alterações traduzem-se nomeadamente num claro aumento na dimensão do banco e areia que se estende a partir da Figueirinha. Esta estrutura sedimentar representa na prática uma **“barreira” que estará a limitar a alimentação da praia (situação que há 20-30 anos não se verificaria)**.

Uma possível **a resposta ao requisito de “minimizar os efeitos dessa erosão”** poderá passar por uma ação de alimentação artificial. Embora com base nos dados disponíveis não seja possível determinar inequivocamente o período de permanência deste enchimento, tendo em consideração que este processo

erosivo se faz, aparentemente, com intensidades relativamente baixas, um enchimento artificial poderia ter condições para se manter no local durante um período razoável sobretudo se for efetuado com recurso a areias de granulometria superior às que existem na zona (como será o caso de areias com origem no canal da barra).

Já o aprofundamento do canal, cujo projeto está na origem do pedido destes estudos adicionais, não parece ter um impacto significativo no que respeita a estes processos. As alterações que se podem observar são de muito baixa magnitude não parecendo ter capacidade de no curto-médio prazo virem a alterar as atuais tendências de transporte.

1 CARATERIZAÇÃO GEOLÓGICA, GEOMORFOLÓGICA E OCEANOGRÁFICA

Nas secções seguintes é efetuada uma caracterização geológica, geomorfológica e oceanográfica da subcélula costeira associada ao delta de vazante do Sado, que inclui os troços costeiros entre o Portinho da Arrábida e a praia da Saúde, a metade norte da península de Tróia e o canal de acesso ao porto.

Neste capítulo são também caracterizados os sedimentos de fundo do estuário do Sado (interior e exterior).

1.1 FISIOGRAFIA GERAL E GEOMORFOLOGIA LOCAL

O estuário do Sado situa-se a SE da Península de Setúbal, cobre uma área de cerca de 120 km² de superfície. No lado exterior da embocadura desenvolve-se uma vasta acumulação de areias que constitui o banco exterior (estuário exterior). Esta zona, cujas cotas estão em geral acima de 5 m (z.h.), ocupa uma área da ordem dos 45 km² e está limitada na face exterior por um talude muito íngreme cujos declives, nalgumas zonas, podem atingir ângulos da ordem dos 30 graus (LNEC, 1989). Sobre este banco encontra-se o canal de acesso ao porto, usualmente designado de canal da barra que é mantido artificialmente por **dragagens no trecho final junto ao “passe da barra”**.

A foz do estuário separa duas unidades fisiográficas independentes: o trecho compreendido entre o cabo Espichel e a zona do Outão e o trecho que se estende desde a Ponta do Adoxe ao cabo de Sines. No primeiro caso a constituição geológica da costa é caracterizada pela existência de formações rochosas que avançam até ao mar com configurações irregulares que abrigam, nalguns casos, pequenas praias encaixadas. No segundo caso observa-se uma costa arenosa e baixa que na, zona de interesse deste projeto, constitui a península de Troia.

As praias da margem direita do delta (nomeadamente Galápos, Galapinhos, Coelho, Creiro e Portinho) correspondem a praias de enseada ancoradas em afloramentos rochosos. Em virtude da respetiva localização estas praias encontram-se protegidas da ondulação dominante na costa portuguesa (proveniente do setor W-NW) tanto pelo efeito de proteção promovido pelo cabo Espichel como pelos baixos fundos do delta. Este segundo aspeto, relacionado com o papel do banco sedimentar do delta na hidrodinâmica local (ondas e correntes), é de especial relevância para se compreender a morfologia destas praias já que os sedimentos nesta zona podem apresentar grande mobilidade e, em consequência, podem introduzir modificações relevantes nos padrões de transporte com potencial impacto na estabilidade das próprias praias. Como se verá mais à frente, e de acordo com os dados dos levantamentos batimétricos mais recentes, observou-se ao longo dos últimos anos uma modificação sensível na distribuição das areias

ao longo do banco que se poderá traduzir em alterações significativas da hidrodinâmica local e, conseqüentemente, dos padrões de transporte e explicar alguns dos problemas erosivos que se têm vindo a verificar com alguma intensidade no trecho Creiro-Portinho.

De acordo com LNEC (1989), no fim dos anos oitenta as praias deste trecho costeiro mostravam de um modo geral características de estabilidade com exceção da praia da Figueirinha que entrou em fase de enchimento após a construção do esporão em 1971. Atualmente verifica-se que a situação não é exatamente a mesma e assiste-se a um processo erosivo nas praias do trecho Creiro-Portinho que conduziu a uma redução substancial da praia.

No que respeita ao trecho Troia - cabo de Sines, também se observava uma grande estabilidade, excetuando-se apenas a zona setentrional (Península de Troia) (LNEC, 1989). A caracterização da evolução geral da orla da Península de Troia e do banco do Cambalhão entre 1852 e 1979 teria permitido concluir que neste período se verificou um assoreamento muito acentuado tendo a área do Cambalhão aumentado cerca de 4 vezes, embora no período 1961-1979 se tenha assistido a algum decréscimo. Também a costa marítima da Península de Troia terá sofrido um processo de assoreamento, embora muito menos intenso e mesmo com tendência para a erosão no final do período.

Brito (2009), com base numa análise comparativa de mapas históricos dos últimos 70 anos, também propõe uma interpretação para as principais alterações morfológicas sofridas pela bacia estuarina do rio Sado e pelo respetivo delta de vazante. De acordo com esta interpretação na zona do delta ter-se-á verificado uma tendência geral de acumulação de areias para o período de 1968-1979, invertendo-se essa tendência para o período 1979-1995/2002, em que a erosão fundamentalmente localizada no lobo frontal do delta passou a ser dominante. Neste estudo defende-se a tese que de 1930 a 2002 o delta de vazante do estuário terá perdido cerca de $150 \times 10^6 \text{ m}^3$ de sedimentos, o que corresponderia a 14% do seu volume inicial. No entanto, e sem pôr em causa as conclusões desta análise por falta de dados para o efeito, julga-se que esta avaliação deverá ser olhada com algum cuidado já que a qualidade dos levantamentos disponíveis para a zona do delta, com exceção da zona próxima do canal de navegação, não tem a necessária precisão para este tipo de análise. Em qualquer dos casos, o número é interessante para pôr em perspetiva potenciais ordens de grandeza associadas a movimentos sedimentares no delta quando comparados com volumes extraídos artificialmente por ação de dragagens.

1.1.1 TROÇO COSTEIRO ENTRE O PORTINHO DA ARRÁBIDA E A PRAIA DA SAÚDE

O troço costeiro entre o Portinho da Arrábida e a praia da Saúde pode ser dividido em:

1. Portinho da Arrábida – praia da Figueirinha;
2. Praia da Figueirinha – praia da Saúde.

O troço costeiro Portinho da Arrábida - praia da Figueirinha caracteriza-se como um troço costeiro irregular e ladeado em grande parte por arribas, umas vezes ativas, outras vezes resguardadas da ação direta do mar.

O Portinho da Arrábida encontra-se embutido numa reentrância com uma extensa plataforma submarina que se espraia por uma extensão superior a 5 km e onde a batimetria não ultrapassa em norma os -5 m. Atualmente, no extremo Oeste da baía, onde o Portinho da Arrábida se encontra, não existe praia emersa durante grande parte do ciclo da maré, sendo que esta ocorre apenas a meio do arco da reentrância, onde se inicia a praia do Creiro. Nesta praia o areal apresenta uma extensão de pouco mais de 620 m e atinge uma largura superior a 60 m (*Figura 1*).



Figura 1: Baía que inclui o Portinho da Arrábida e a Praia do Creiro (fotografia de 2012). Fonte: DGT-SIARL (2018).

A praia do Creiro é separada daquelas que se desenvolvem para Leste por um promontório. A primeira praia, designada por praia dos Coelhoos, surge encaixada numa reentrância do referido promontório. Trata-se de uma pequena praia, com pouco mais de 60 m de extensão (*Figura 2*).

Para Leste desenvolvem-se depois as praias dos Galapinhos e Galapos, respetivamente. A primeira estende-se por cerca de 325 m, enquanto a segunda apresenta aproximadamente 215 m. Ambas as praias estão separadas uma da outra por blocos rochosos que compõem um depósito de vertente (*Figura 2*).



Figura 2: Praias dos Coelhoos, Galapinhos e Galapos (fotografia de 2012). Fonte: DGT-SIARL (2018).

Em direção a Leste, a partir destas praias, e até à praia da Figueirinha, desenvolve-se ao longo de 1,2 km um troço costeiro onde não ocorrem depósitos arenosos suficientes para formar praias emersas, sendo este troço maioritariamente composto por blocos rochosos resultantes da erosão sobre as arribas sobranceiras.

A praia da Figueirinha, praia contida por um esporão a nascente, desenvolve-se a partir de uma língua de areia que se estende em direção a *offshore* (*Figura 3*), bordejando do lado direito o canal principal do estuário do Sado. A praia apresenta pouco mais de 550 m de extensão e uma largura máxima de 120 m.



Figura 3: Praia da Figueirinha (fotografia de 2012). Fonte: DGT-SIARL (2018).

O troço costeiro praia da Figueirinha – praia da Saúde é limitado em direção a *offshore* pelo canal de vazante do estuário do Sado e, portanto, nesta direção as profundidades aumentam rapidamente. A porção terrestre da zona costeira entre a praia da Figueirinha (*Figura 3*) e a praia da Saúde caracteriza-se como um troço costeiro irregular, ladeado nuns troços por arribas ativas e noutros por troços artificializados (e.g. instalações da Cimpor). Deste modo, as praias existentes neste troço limitam-se essencialmente à praia da Rasca, à praia da Comenda, à praia de Albarquel e à praia da Saúde (*Figura 4 e Figura 5*).

A praia da Rasca é uma praia encaixada entre dois troços artificializados: é uma praia pequena com pouco mais de 100 m de extensão e 20 m de largura de areal emerso durante o nível médio da maré (*Figura 4*).

A praia da Comenda desenvolve-se a partir da foz da ribeira da Ajuda (ou Comenda, ou Outão) para NE, em direção ao interior do estuário do Sado. A praia emersa apresenta um comprimento de 660 m e uma largura variável, mas essencialmente presente durante a baixa-mar. No limite NE da praia ocorrem afloramentos rochosos que limitam o areal e separam esta praia da praia de Albarquel (*Figura 5*).

A praia de Albarquel estende-se por cerca de 430 m de comprimento e 60 m de largura. Esta largura corresponde à carga máxima admitida pelo esporão no limite Este da praia.

O troço costeiro que se estende desde esta última praia até à praia da Saúde corresponde a um troço composto por arribas com menos de 15 m de altura, associadas a uma praia apenas emersa durante a maré baixa (*Figura 5*).

A praia da Saúde ocorre associada ao parque urbano de Albarquel. Trata-se de uma praia com pouco mais de 380 m de extensão. Uma parte da praia apresenta areal apenas durante a maré baixa. O limite interior da praia é um enrocamento onde se inicia o dito parque.



Figura 4: Praia da Rasca (fotografia de 2011). Fonte: DGT-SIARL (2018).



Figura 5: Troço costeiro entre a praia da Rasca e a praia de Albarquel (fotografia de 2009). Fonte: DGT-SIARL (2018).

1.1.2 PENÍNSULA DE TRÓIA

A península de Tróia encontra-se dentro de um troço costeiro de praia contínua que se estende desde Sines (a sul) até ao extremo norte (Tróia). O arco litoral Tróia – Sines é quase na sua totalidade marginado do lado de terra por um campo dunar que apresenta diferentes morfologias, sendo interrompido na zona central do arco por arribas. Em Quevauviller (1987) e em Gama (2004) este troço costeiro é dividido em 4 setores distintos com base na morfologia dos diferentes sistemas dunares, sendo que a península de Tróia se encontra dentro do setor Tróia – Carvalhal (*Figura 6*). Este setor inclui uma sucessão de diferentes gerações de cordões dunares (4 a norte e 5 a sul), verificando-se que os cordões mais recentes são paralelos aos cordões mais antigos podendo estes últimos atingir cotas da ordem dos 25 a 30 m.

A metade norte da península, associada ao delta de vazante, e que se inicia sensivelmente na zona hoje ocupada pela urbanização turística Soltroia, apresenta características de transição entre um perfil sem lobos de praia e alta praia bem desenvolvida, do tipo lomba-canal, para um perfil de características morfodinâmicas idênticas às que se encontram no resto do arco, com lobos de praia bem desenvolvidos e por vezes com duna embrionária no topo da alta praia.

Atualmente na zona sul de Soltroia até à zona central da UNOP 8 (troço com cerca de 2 km) existe uma escarpa dunar que denuncia processos de erosão acentuada recente (*Figura 7*).

A largura máxima na metade norte da península é de 1500 m, sendo a cobertura dunar quase omnipresente, exceção feita às praias e à depressão da Caldeira, pequena laguna interior (*Figura 6*).

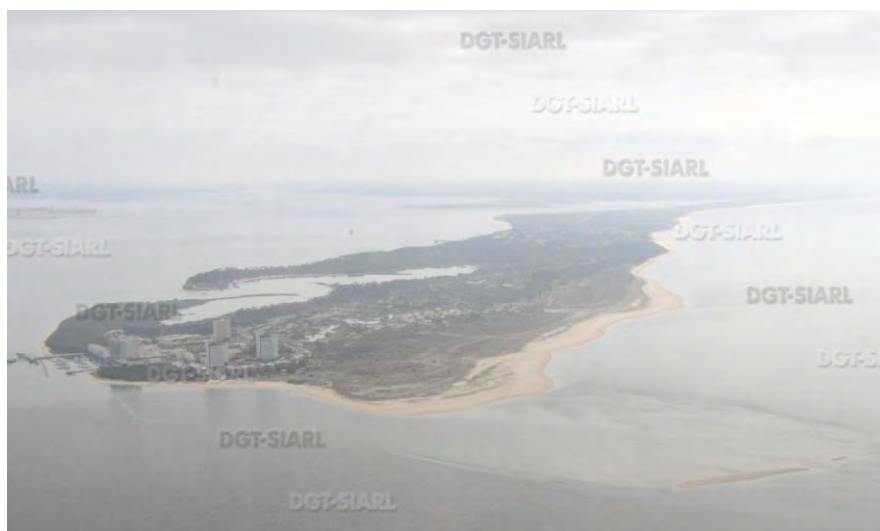


Figura 6: Porção norte da península de Tróia. Foto de Dez. 2012. Fonte: DGT-SIARL (2018).



Figura 7: Escarpa de erosão sobre a duna frontal na praia da UNOP7 (imediatamente a sul de Soltroia). Abril 2018.

1.1.3 DELTA DE VAZANTE DO SADO

O delta de vazante do Sado, também designado por banco exterior do estuário, apresenta uma forma grosseiramente triangular (*Figura 8*). Este banco estende-se mais de 5 km para o largo e ocupa uma área com cerca de 47 km². Enraíza-se a Leste junto à praia de Soltroia e a NW na Ponta dos Lagosteiros e é limitado a Sul por uma vertente com um declive de cerca de 2,5° e uma área de 10 km², que passa rapidamente da cota -5 m para -40 m (ZH). A superfície do delta corresponde a uma plataforma de espalho relativamente aplanada, sobre a qual se desenvolvem barras arenosas e cuja região apical corresponde ao banco do Cambalhão que pontualmente chega a emergir junto ao extremo Norte da península de Troia (*Figura 8*). O canal de acesso ao estuário interior (ou canal de vazante principal) entalha o banco exterior estendendo-se ao longo de cerca de 6 km para SW da embocadura (ou barra). A profundidade do canal diminui progressivamente em direção ao oceano. Para que a sua profundidade se mantenha em torno da cota -12 m (ZH), requerida para a navegação, é necessário dragar periodicamente o canal, particularmente na sua zona mais externa (zona do passe da barra).

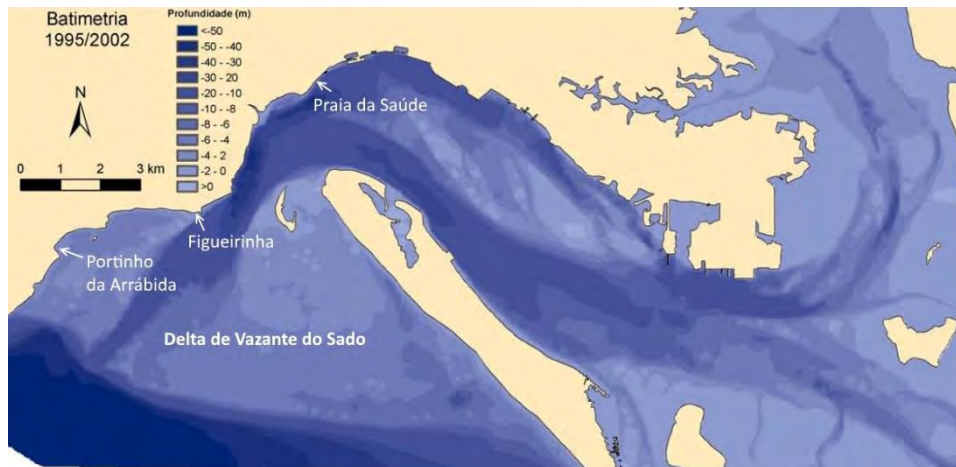


Figura 8: Modelo digital de terreno da batimetria em 1995/2002. Fonte: Brito (2009).

1.2 CARACTERÍSTICAS DOS SEDIMENTOS

Em LNEC (1989) é apresentada uma caracterização dos sedimentos no estuário do Sado que abrangeu zonas do interior e exterior incluindo a zona do delta (cf. Figura 9). Deste estudo concluiu-se que as areias do delta apresentavam em média um $d_{50} = 0.52$ mm e um $d_{90} = 0.96$ mm. No trecho final do estuário, junto à embocadura, o d_{50} decrescia ligeiramente para 0.44 mm enquanto o d_{90} crescia para 1.71 mm. As amostras colhidas no sopé do banco exterior, em profundidades de várias dezenas de metros, apresentavam, como seria de esperar, valores mais baixos de, respetivamente, 0.14 e 0.32 mm. Na orla compreendida entre o Cabo Espichel e o delta os valores correspondentes destes parâmetros eram 0.33 e 0.47 mm e no trecho entre a embocadura e Sines eram de 0.28 e 0.48 mm.

Em 1994 a empresa Tecnasol efetuou um conjunto de sondagens, tendo por objetivo caracterizar a consistência do leito em profundidade (Tecnasol, 1994). Neste estudo foram efetuadas 54 sondagens de furação mecânica à percussão até à cota -16 metros (z.h.). Da totalidade das sondagens, 21 foram efetuadas no canal Norte, 31 no canal da Barra e 2 à entrada da Doca Pesca. Excetuando estas duas últimas estações, que não fazem parte da área a dragar, apenas foram encontradas areias de granulometria média a grosseira (diâmetro de 0.2 a 2 mm) e também algum seixo fino (ou cascalho fino, diâmetro de 2 a 6 mm). Em algumas sondagens, por baixo destas areias, surgem outras de granulometria fina, siltosas ou silto-argilosas. É preciso ter em conta que estas sondagens tentam caracterizar o leito em profundidade, tendo em algumas sido perfurado mais de 10 metros de solo.

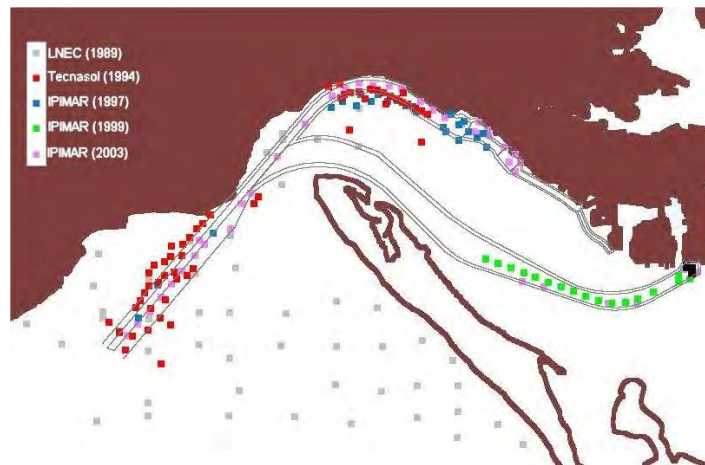


Figura 9: Amostras de sedimentos de fundo no estuário do Sado

Num outro estudo efetuado por Vale et al. (1997) visando a caracterização granulométrica e química dos sedimentos da zona do estuário do Sado foram colhidos sedimentos superficiais em 25 locais distribuídos entre o canal da barra, canal norte e bacia de rotação em frente ao cais da Ford/VW (cf. Figura 10). De um modo geral, os sedimentos colhidos por Vale et al. (1997) apresentam essencialmente uma natureza arenosa, existindo algumas amostras de carácter lodoso na bacia de rotação e de areia cascalhenta dispersas por toda a zona de amostragem. Posteriormente o IPIMAR viria a efetuar novas amostragens em 1999 e 2003 que vieram complementar estes dados.

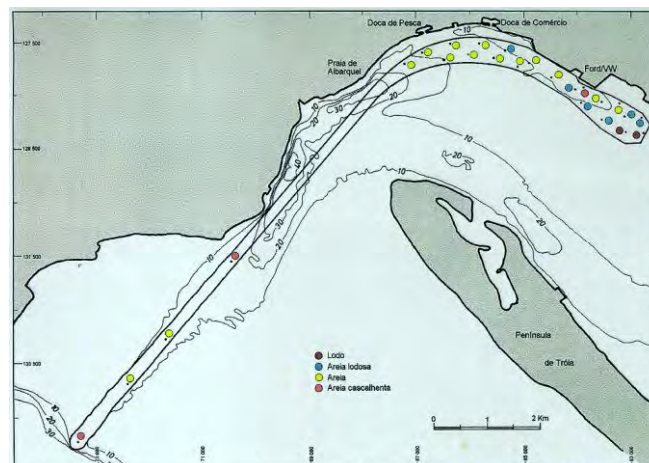


Figura 10: Amostras recolhidas no âmbito dos estudos realizados por Vale et al. (1997)

Mais recentemente, em 2015, âmbito do “Estudo de caracterização de sedimentos para o projeto de melhoria das acessibilidades ao porto de Setúbal” o IPMA procedeu à caracterização química e textural de sedimentos superficiais ao longo da zona próxima dos canais norte e da barra em 89 pontos identificados na Figura 11. Esta amostragem confirmou as conclusões dos estudos anteriores mostrando que no Canal da Barra as amostras são constituídas essencialmente por areias médias, grosseiras e cascalhos.

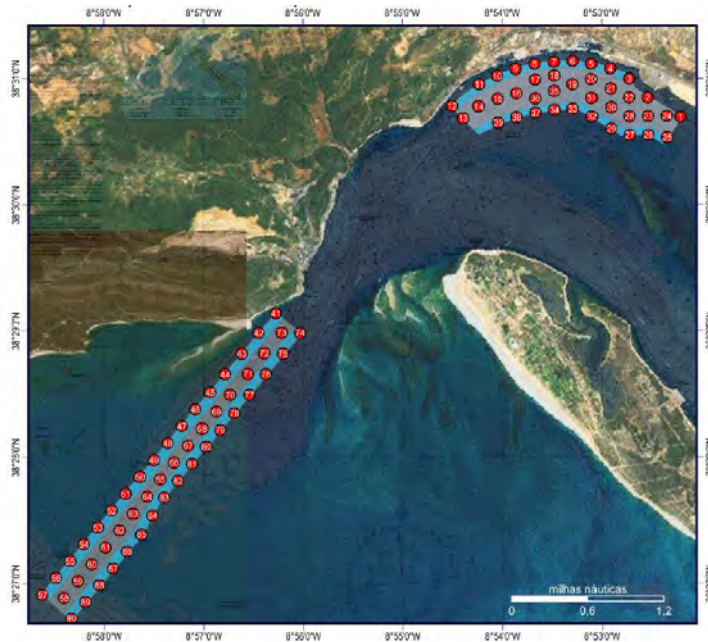


Figura 11: Localização das amostras de sedimentos superficiais recolhidas no âmbito da campanha IPMA (2015)

1.3 CARACTERÍSTICAS DA AGITAÇÃO

A caracterização da agitação local tem por base os registos das bóias-ondógrafo da Figueira da Foz e de Sines, a partir dos trabalhos de Costa et al. (2001) e Carvalho e Capitão (1995), respetivamente sobre a caracterização do clima de agitação na costa portuguesa e sobre a análise de valores extremos.

A análise do regime de agitação na costa oeste efetuada por Costa et al. (2001) teve em consideração amostras de dados das boias de Sines e Figueira da Foz, sendo os registos da boia da Figueira da Foz relativos ao período entre Julho de 1990 e Janeiro de 1996 num total de 11.193 registos e os de Sines relativos ao período entre Maio de 1988 e Dezembro de 2000 num total de 29.786 registos. As principais conclusões deste estudo são as seguintes:

- Os valores mais frequentes da altura significativa situam-se na classe de 1 a 2 m (40% na Figueira da Foz e 49% em Sines) sendo que os valores superiores a 3 m representam cerca de 22% na Figueira da Foz e 10% em Sines. Os valores inferiores a 1 m são mais frequentes em Sines (23%) do que na Figueira da Foz (10%). A média é de 2.2 m na Figueira da Foz e 1.7 metros em Sines (com um desvio padrão respetivamente de 1.1 m e 0.9 m).
- Os valores mais frequentes de período médio situam-se entre os 5 s e os 7 s (41% na Figueira da Foz e 44% em Sines). Valores superiores a 9 s não atingem 20%. A média é de 7.2 s na Figueira da Foz e de 6.6 s em Sines (com um desvio padrão de respetivamente 1.7 s e 1.8 s). Em termos de período de

pico verifica-se que cerca de 60% dos valores se situam, na classe entre 9 e 13 s. Valores superiores a 15 s não atingem 10%. A média é de 11.4 e 10.8 s e o desvio padrão é de 2.5 e 2.7 s s (Figueira da Foz e Sines).

Em relação à direção média associada ao período de pico verifica-se uma concentração no sector de NW. Na Figueira da Foz cerca de 90% das observações e em Sines cerca de 97% provêm dos sectores de NW e W.

Em termos da análise da distribuição conjunta Hs-Tp verifica-se que ambas as estações apresentam distribuições semelhantes com as observações mais frequentes a ocorrerem no sector NW e nas classes 1 a 3 m e 7 a 15 s (respetivamente 46% e 47% do total das observações válidas). O mesmo é válido para o sector W em que as correspondentes percentagens de ocorrência são de 12% e 11% respetivamente.

No que respeita à caracterização de situações de temporal, este estudo aponta para a ocorrência em média de 50 dias de temporal por ano (56 na Figueira da Foz e 47 em Sines) considerando que os períodos com temporal correspondem a situações com Hs > 4.5 m. Na Figueira da Foz o padrão dominante é de NW (que retém cerca de 58% dos temporais observados) com uma menor contribuição de W (13%). Os valores de Hmax associados encontram-se na classe entre 5 e 7 m (45%) não sendo raro que se ultrapassem os 7 m (16%). Em Sines o padrão dominante é de NW (que retém cerca de 42% dos temporais observados) com uma menor contribuição de W (26%). Os valores de Hmax associados são semelhantes à Figueira da Foz

A análise de valores extremos efetuada Carvalho & Capitão (1995), permitiu por outro lado concluir que uma onda com um período de retorno de 100 anos é caracterizada por uma altura significativa da ordem dos 15 m na Figueira da Foz e 17 metros em Sines. Infelizmente, em termos de períodos, a análise é efetuada somente para valores de período de zero ascendente não sendo efetuada uma análise para valores de período de pico.

1.4 CARACTERÍSTICAS GERAIS DA CIRCULAÇÃO NA CÉLULA SEDIMENTAR

Em função da complexidade do problema a analisar, a primeira tarefa será a de estabelecer um modelo conceptual da circulação e transporte de sedimentos da zona tendo em consideração a bibliografia disponível e a experiência anterior que resultou da aplicação de modelos numéricos a este sistema.

A área de estudo localiza-se dentro da célula costeira (uma unidade autónoma do ponto de vista sedimentar) que se estende desde o cabo Espichel a Sines. A célula costeira surge como unidade de gestão do território litoral que permite gerir de forma coerente o balanço sedimentar. Por outras palavras, a

evolução costeira de um determinado local dentro da célula sedimentar está dependente da gestão feita nesse mesmo local, mas poderá estar também dependente da gestão feita ao longo de toda a célula sedimentar.

Na realidade, a área de estudo constitui uma subcélula dentro desta célula, designada por subcélula “estuário exterior do rio Sado” (que inclui as praias que se estendem desde o Portinho da Arrábida até à praia da Figueirinha, o banco do cambalhão e as praias de Tróia) (GTL, 2014). Outra subcélula diretamente relacionada com a última é o restante troço costeiro Tróia – Sines que se estende imediatamente a sul (Figura 12).

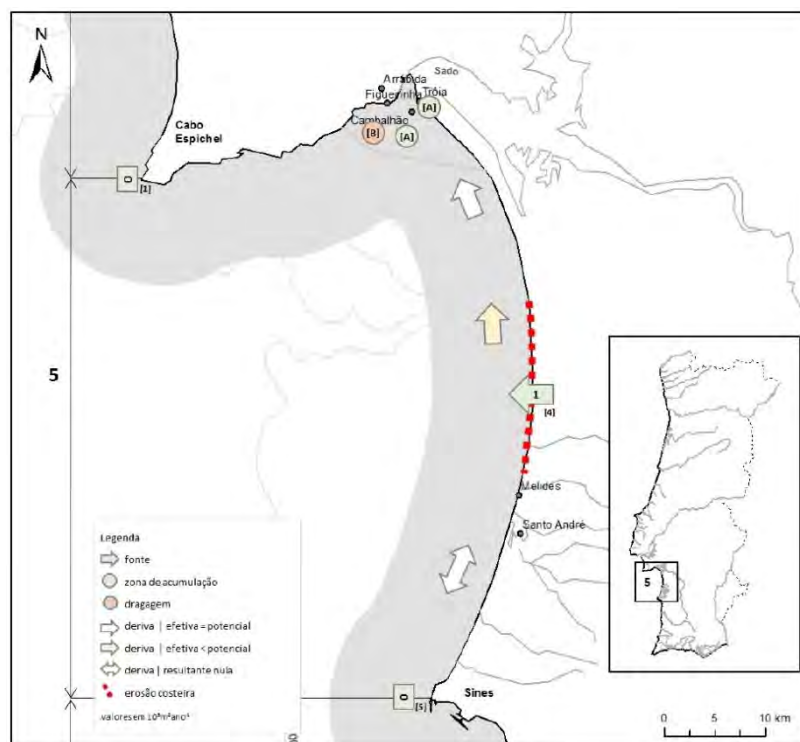


Figura 12: Balanço sedimentar na Célula Sedimentar entre Espichel e Sines na situação atual. Fonte: GTL (2014)

Considerando que a contribuição do rio Sado é pouco significativa (ver em baixo) e que a ocidente (Arrábida) o litoral é constituído essencialmente por arribas talhadas em rochas carbonatadas (Secção 1.1.1), o fornecimento sedimentar para a zona exterior do rio Sado deverá ser essencialmente sustentado pela erosão das arribas da costa da Galé (entre a praia do Carvalhal e a lagoa de Melides). Estes sedimentos são transportados por deriva, de sul para norte, ao longo do arco litoral, e suportam o comportamento transgressivo que se observa na extremidade norte da península e no delta de vazante associado (GTL, 2014).

Quando os sedimentos entram na subcélula “estuário exterior do rio Sado” vindos na deriva de sul para norte ao longo do arco litoral ficam sujeitos a uma circulação mais ou menos fechada. É sobre esta circulação que nos iremos debruçar de seguida.

A circulação residual no interior do estuário do Sado apresenta um vórtice bem definido e com rotação anticiclónica (ou horário) entre o Canal Norte e Canal Sul (cf. Figura 13). A presença deste vórtice gera condições para que parte dos sedimentos que são transportados no canal Sul na direção da embocadura durante a vazante entrem no canal Norte na enchente seguinte.

No exterior do estuário a circulação residual é caracterizada por dois vórtices adjacentes ao canal da Barra, um com rotação ciclónica posicionado a Este e outro com rotação anticiclónica posicionado a Oeste. O vórtice ciclónico localizado sobre a zona do Cambalhão é de maiores dimensões e mais intenso, com máximos da ordem de 0.1 m/s junto da Península de Troia. O vórtice anticiclónico localizado entre o Portinho da Arrábida e a Praia da Figueirinha ao longo dos bancos de areia intertidais é menos pronunciado e intenso (máximos da ordem de 0.05 m/s).

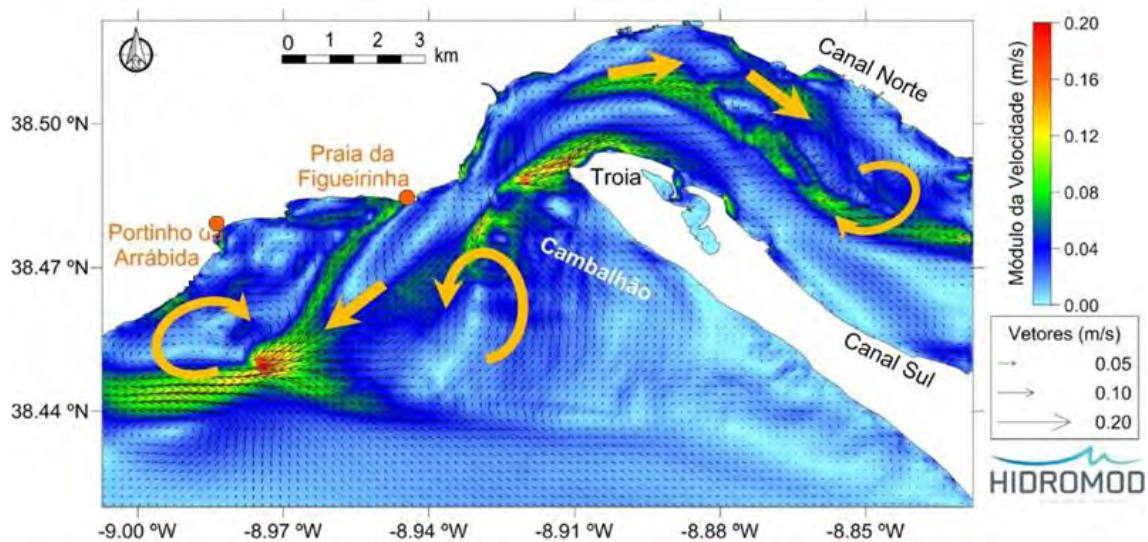


Figura 13: Modelo conceptual da circulação residual no Estuário do Sado

Estes dois vórtices têm um ponto de contacto na zona final do canal, onde existe uma intensificação da corrente residual (~20 cm/s). Esta zona tem sido aquela que tem apresentado maior variabilidade em termos de fundos e que tem exigido um maior esforço de dragagem. Estes resultados foram obtidos com o modelo MOHID e são concordantes com os descritos em Martins *et al.* (2001).

No que respeita à caracterização dos processos transporte, um dos primeiros documentos relevantes para perceber a dinâmica da zona da barra é o referente ao estudo realizado por LNEC (1989). Neste estudo é apresentado um modelo conceptual para o transporte sedimentar baseado em resultados da modelação e análise dum conjunto de levantamentos (cf. *Figura 14*). O modelo conceptual então proposto aponta para a existência dum processo de transporte ao longo do canal da Barra associado a recirculações adjacentes. Estes padrões de transporte estão de acordo com os padrões da velocidade residual e materializam-se pela existência duma recirculação de sedimentos a Este e a Oeste do canal sendo a primeira mais intensa associada a um forte transporte ao longo da península de Troia na direcção da embocadura. Os resultados obtidos no âmbito do estudo de avaliação dos impactes da dragagem do canal apontam no mesmo sentido, permitindo elaborar o modelo conceptual de transporte que se resume na *Figura 15*.

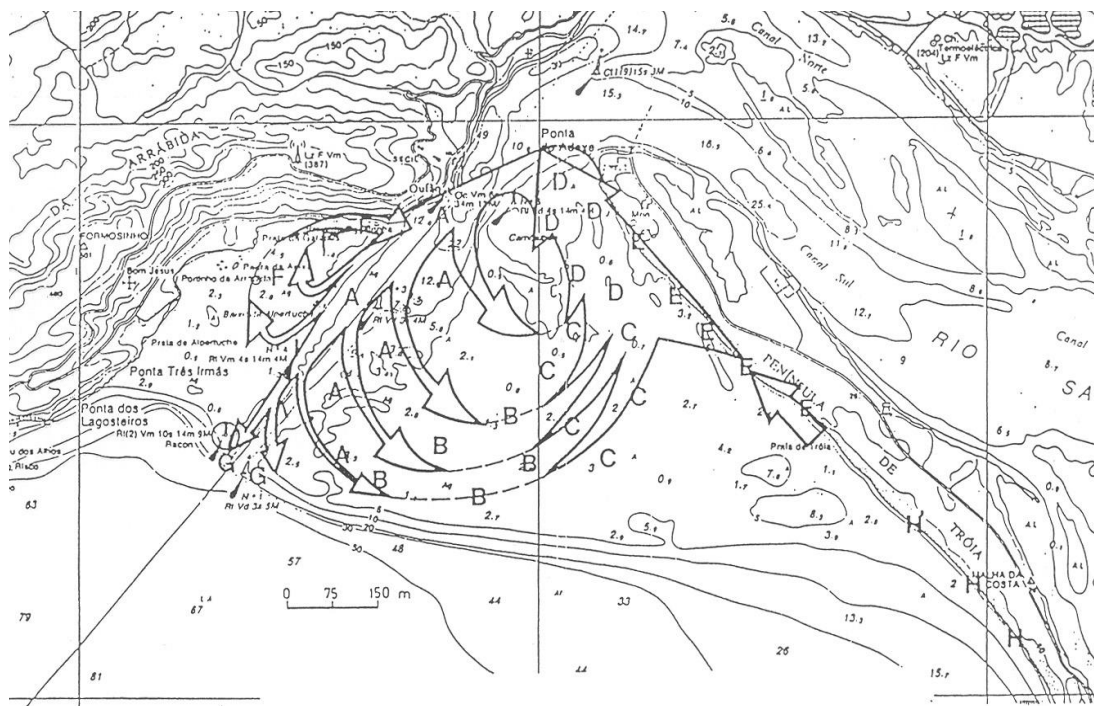


Figura A1.1 Esquema de movimentação das areias dos fundos.

Figura 14: Esquema de movimentação de areias elaborado por LNEC através do Estudo da Barra do Sado. Fonte: LNEC, 1989.

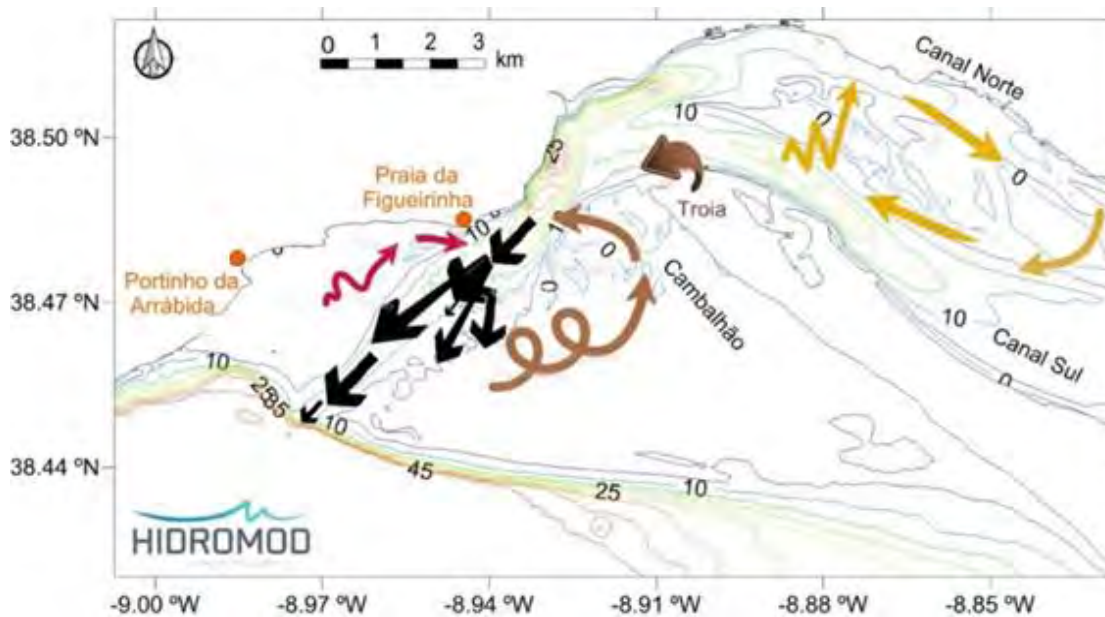


Figura 15: Modelo conceptual da movimentação das areias no Estuário do Sado.

Com base nos resultados do modelo estima-se que a capacidade de transporte (*offshore*) ao longo do canal da Barra seja na embocadura da ordem de 24 mil m³/ano e que se intensifique por alimentação lateral até um valor máximo da ordem de 150 mil m³/ano. Estes resultados sugerem que a capacidade de exportar areias a partir do interior do estuário é aproximadamente uma ordem de grandeza inferior à capacidade máxima de transporte de sedimentos que ocorre na zona da embocadura em condições médias de forçamento e que a dinâmica sedimentar que ocorre nesta zona apresenta características dum sistema “fechado” em que os sedimentos vão sofrendo um processo de recirculação.

Na zona final do canal da Barra junto ao talude a capacidade transporte diminui abruptamente gerando uma zona de assoreamento persistente. Com base nos resultados do modelo estima-se que só ocorre assoreamento na zona mais *offshore* do canal e que este é da ordem de 90 mil m³/ano para condições médias de maré e agitação (este valor não tem em conta o efeito de eventos extremos, como por exemplo tempestades rodadas a SW). Estes resultados são confirmados pelo volume médio anual dragado pelo Porto de Setúbal para manter a profundidade do canal que foi da ordem de 60 mil m³/ano entre 2006 e 2012.

Fora da zona próxima do canal domina a ação conjunta das ondas e da maré. Nesta zona os resultados do modelo mostram que a capacidade de transporte do sistema apresenta uma componente Este importante. ação de ondas e maré força um transporte de sedimentos intenso ao longo da península de Troia no sentido

da embocadura. Este transporte é acentuado na zona do Cambalhão devido à intensificação das correntes que têm uma forte componente residual na direção do canal da barra.

O trânsito sedimentar do lado Oeste do Canal da Barra (margem direita do delta), é menos intenso do que se regista no lado Este, porque as correntes tendem também a ser menos intensas. Do lado Oeste os resultados do modelo não permitem determinar um padrão de transporte bem definido com exceção da zona da Praia da Figueirinha onde se observa um transporte intenso junto à costa de oeste para Este.

No interior do estuário, o trânsito sedimentar nos Canais Norte e Sul está de alguma forma condicionada pela recirculação residual de rotação horária já antes referida. Ao longo do canal Norte o transporte de sedimentos tende a ser na direção de montante. Com base nos resultados do modelo estima-se que a capacidade transporte neste canal seja da ordem de 10 mil m³/ano ou seja aproximadamente 15 vezes inferior ao que se regista na zona mais dinâmica do canal da Barra o que pode explicar a estabilidade dos fundos que se observa no canal.

2 ASPETOS RELACIONADOS COM O CANAL DE NAVEGAÇÃO

2.1 HISTÓRIA DA EVOLUÇÃO DO CANAL DE ACESSO AO PORTO DE SETÚBAL

O primeiro projeto de obras no porto de Setúbal data de 1793. Tratava-se de uma doca destinada a dar abrigo a pequenas embarcações localizada entre os baluartes do Livramento e da Conceição. Em 1836, a Câmara Municipal de Setúbal atribuiu a um particular a concessão da construção da primeira doca, localizada junto à foz da Ribeira do Livramento, a designada Doca Delpeut. Esta doca constituiu durante um século o único abrigo que o porto dispunha para pequenas embarcações.

As primeiras grandes obras do porto de Setúbal decorrem de 1930 a 1934 tendo contemplado a regularização de margens, construção de taludes, docas e estacadas. Nas décadas seguintes, o porto foi alvo de outras obras e melhoramentos. A construção do Cais Comercial realizou-se em 1966 contemplando a construção de 175 metros de cais, com fundos de $-9,00\text{m}$ (ZH) tendo em 1970 sido prolongado para nascente com uma melhoria dos fundos para $-10,00\text{m}$ (ZH). Nas décadas de 60 e 70, assiste-se à construção de diversos cais particulares e à instalação de grandes indústrias em Setúbal.

Em 1985 assistiu-se à construção da 1ª fase do Terminal Roll-On/Roll-Off que consistiu na construção de 220 metros de cais acostável e rampa, com fundos de $-10,5\text{m}$ (ZH). Em 1992 procedeu-se à construção do Terminal de Contentores que acrescentou mais 320 metros de cais acostável. Em 1994, foram concluídas as obras de construção do Terminal Roll-On/Roll-Off, com 370 metros de frente de cais, uma rampa e fundos de -12m (ZH). Finalmente em 2002 procedeu-se à construção do Terminal Multiusos (ampliação do Terminal de Contentores). Neste processo algumas datas chave no que respeita aos acessos ao porto devem ser retidas:

- ✚ 1952 - Estabelecimento do Canal da Barra a $-6,0\text{ ZH}$;
- ✚ 1955/56 – Estabelecimento do Canal da Barra a $-8,0\text{ ZH}$;
- ✚ 1986 - Estabelecimento do Canal da Barra a $-11,0\text{ ZH}$ e manutenção do canal Norte
- ✚ 1994 - Estabelecimento do Canal da Barra a $-12,0\text{ ZH}$ e Canal Norte a $-11,0\text{ ZH}$

2.2 ESFORÇO DE MANUTENÇÃO DO CANAL

Nas Tabela 1, *Figura 16* e *Figura 17* é apresentado um resumo dos volumes dragados nos canais da barra e norte (até ao terminal *rol-on/rol-off*). Estes valores mostram que o canal da barra tem exigido um volume de dragagem mais ou menos contínuo que tem oscilado em torno de valores da ordem dos 50.000 m³/ano. O canal norte, para além de algumas intervenções pontuais de maior magnitude, tem mostrado uma tendência decrescente de necessidade de manutenção.

Tabela 1: Volumes dragados entre 2006 e 2012

	Ano						
	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
Canal Barra	31386	95168	43000	40000	35600	72649	58890
Canal Norte (até ao RoRo)	123761	46700	44300	5900	8400	59046	18807
Canal Sul	45255	3000	9900	1200	100	159	0
Bacias	55875	79400	60500	34850	8500	10888	7270
Total	258283	226275	159708	83959	54610	144753	86979

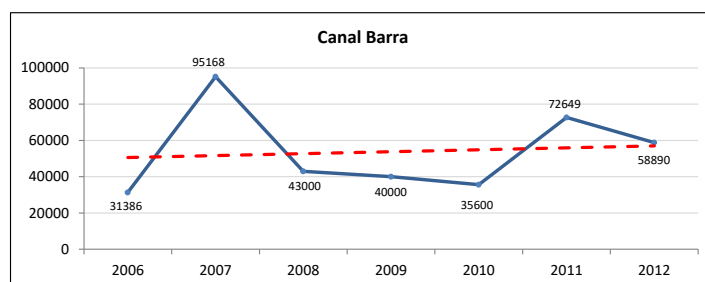


Figura 16: volumes dragados no canal da barra entre 2006 e 2012.

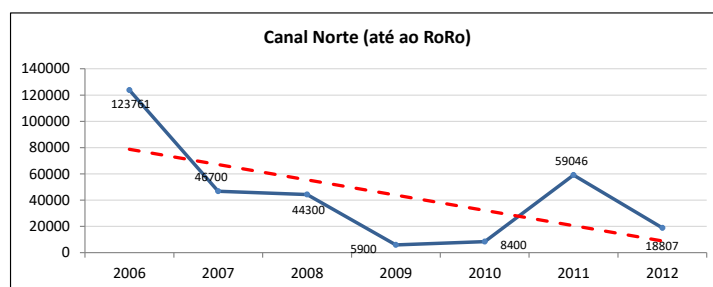


Figura 17: volumes dragados no canal norte (até ao RoRo) entre 2006 e 2012.

No entanto, para além desta análise dos volumes integrais de dragagem, será necessário também ter em consideração que o canal da barra apresenta uma característica relevante na sua zona terminal. Nesta zona ocorre a formação de dunas de grandes dimensões que condicionam os respetivos programas de manutenção.

Atualmente verifica-se que as cavas destas dunas se mantêm quase sempre abaixo da cota de projeto de -12m (zh) mas as cristas tendem a subir a valores entre os -10 m (zh) e os -11 m (zh). Por esta razão a frequência das dragagens deste canal acaba por ser condicionada pela necessidade de retirar as respetivas cristas. Este tipo de observação pode ser confirmado através da análise dos perfis apresentados na *Figura 18*.

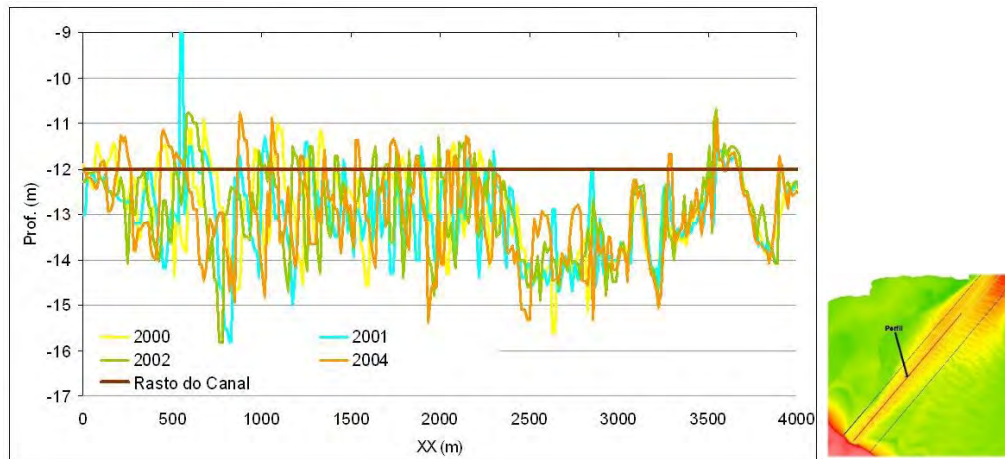


Figura 18: Perfil do fundo ao longo do eixo do canal para os levantamentos de 2000, 2001, 2002 e 2004.

2.3 PROFUNDIDADE DE EQUILÍBRIO DO CANAL DA BARRA

Um exercício possível para tentar fazer uma primeira avaliação qualitativa da eventual estabilidade do canal da barra é a determinação da respetiva profundidade de equilíbrio. Existem diferentes propostas de diferentes autores para a determinação deste valor tendo-se neste caso optado pela formulação de **O'Brien** (1969), que propôs uma relação entre a área da secção e o Prisma de maré do tipo:

$$Ac = \frac{\pi Pr}{T U_m}$$

Sendo:

Ac = secção mínima da barra em condições de equilíbrio

Pr = Prisma de maré

T = Período da onda de maré

U_m = Velocidade máxima na barra

Se bem que o canal da barra não tenha exatamente as características mais adequadas a este tipo de análise, que apresenta maior sucesso em canais mais confinados, considera-se ainda assim o resultado desta análise como um exercício interessante quando olhado em conjugação com os resultados da modelação. A profundidade de equilíbrio obtida com a aplicação da metodologia descrita previamente é

apresentada na Tabela 2. Os resultados obtidos mostram que, nas condições assumidas para o cálculo, a profundidade de equilíbrio prevista para o Canal da Barra oscila entre 16 e 17 metros.

Tabela 2: Profundidade de equilíbrio prevista para o canal da barra

Situação	Prisma de maré (m ³)	Área da Secção (m ²)	h (m)
Enchente	1.7E+08	9702	16
Vazante	1.8E+08	10023	17

2.4 IMPACTES DO APROFUNDAMENTO DO CANAL À ESCALA DO ESTUÁRIO

No âmbito do projeto e estudo de impacte ambiental do aprofundamento do canal foram feitos estudos de modelação para avaliação dos impactes na hidrodinâmica e processos de transporte decorrentes do aprofundamento do canal¹. Resumem-se aqui as principais conclusões então produzidas a fim de uma perspetiva global dos potenciais impactes a nível do estuário.

Assim, em relação à hidrodinâmica, conclui-se que com a implementação da Fase 1 se possam observar fora do canal da barra reduções máximas de velocidade da ordem de 0.02-0.04 m/s e aumentos no interior do canal da ordem de 0.02-0.04 m/s. Na Fase 2 os aumentos podem ascender no máximo até 0.12 m/s comparativamente com a situação de referência e as diminuições cerca de 0.08 m/s.

No que respeita ao canal norte os impactes são de menor magnitude estando de acordo com a estabilidade que este canal tem apresentado ao longo dos diferentes ciclos de aprofundamento. Neste caso os resultados da modelação apontam para que, em média, a intensidade da corrente diminua cerca de 0.02-0.04 m/s para a situação correspondente à Fase 1 na zona junto da bacia de rotação. Para a Fase 2, as diferenças são mais expressivas e a zona de impacto mais extensa, prevendo-se diminuições máximas da ordem de 0.04-0.06 m/s junto da bacia de rotação.

As simulações efetuadas permitiram igualmente verificar que o impacte do aprofundamento no prisma de maré é de muito baixa magnitude traduzindo-se em diferenças máximas inferiores a 1%.

No que respeita aos processos de transporte as simulações efetuadas apontam no sentido de, em termos gerais, o aprofundamento do canal não alterar significativamente as tendências atuais ou seja não se observam nos resultados dos modelos diferenças significativas nos padrões de transporte.

¹ Estudo de impacte ambiental para a melhoria da acessibilidade marítima ao Porto de Setúbal. Caracterização hidromorfológica e análise de sensibilidade face a alterações na batimetria

3 METODOLOGIA

3.1 INTRODUÇÃO

Nos parágrafos seguintes apresenta-se uma descrição da estratégia e procedimentos adotados para estabelecer um modelo de circulação e transporte para as áreas dos bancos exteriores do estuário do Sado. Com este trabalho procura-se responder a duas perguntas: i) de que forma alterações que se observaram na batimetria ao longo dos últimos anos explicam a atual dinâmica sedimentar (com especial ênfase nos problemas de erosão no trecho Creiro-Portinho da Arrábida) e ii) qual potencial contribuição da dragagem do canal para alterar a dinâmica atual (e vir eventualmente agravar alguns dos problemas existentes).

Para este fim foram consideradas três batimetrias, correspondentes a diferentes configurações dos fundos, observadas em distintos períodos: uma configuração, que será designada por **“antiga”**, **correspondente a** uma situação que teria sido observada na década de 70 (a que corresponderão os últimos levantamentos disponíveis para a zona do banco sedimentar da margem direita do canal); uma configuração que será **designada de “atual” e que** representará a atual configuração dos fundos e uma terceira configuração que **será designada de “projeto” e que corresponderá a uma situação com o canal dragado.**

Para cada uma destas configurações foram efetuadas simulações da hidrodinâmica (considerando a ação combinada de ondas e correntes) e das tendências iniciais de transporte, com base nestes resultados, construído um modelo concetual que permite avançar com hipóteses explicativas para a evolução da dinâmica local nestas áreas.

3.2 TOPO-HIDROGRAFIA

A informação topo-batimétrica utilizada no presente estudo tem como base os dados disponíveis no EMODNET (European Marine Observation and Data Network) para a região de Portugal Continental, levantamentos do Instituto Hidrográfico, diversos levantamentos multifeixe da responsabilidade da APSS, dados do LIDAR de 2011 e um levantamento detalhado do delta efetuado no terceiro trimestre de 2018 no âmbito do projeto de aprofundamento do canal de acesso ao Porto de Setúbal (*cf. Figura 19*). Os dados do EMODNET têm uma resolução aproximada de 200 metros e os restantes resoluções que podem variar entre 10 e 2 metros.

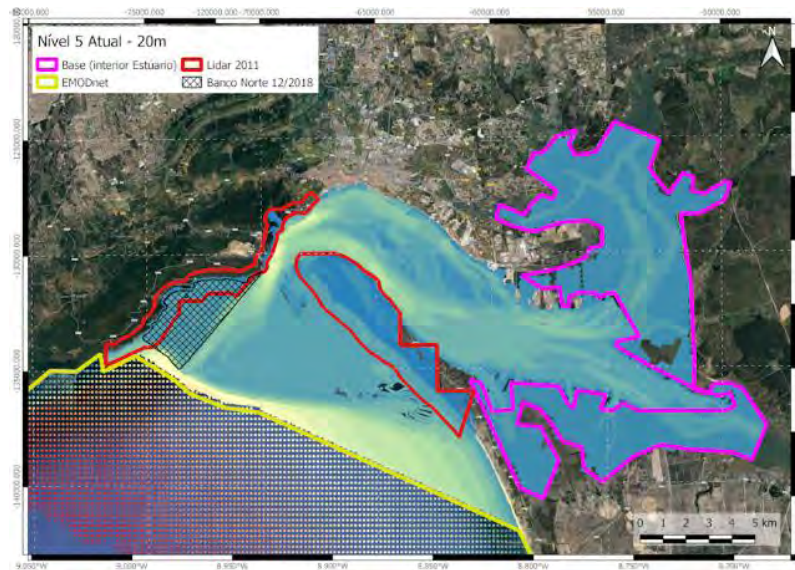


Figura 19: Fontes batimétricas utilizadas para construção do mapa digital de terreno

O levantamento base que cobre todo o estuário desde a zona da Marateca ao delta exterior corresponde a uma compilação de levantamentos efetuados pelo Instituto Hidrográfico em 1968 (Marateca e Carrasqueira) e 1977 (delta exterior e zona interior do estuário até à Setenave). As pranchetas correspondentes a estes levantamentos foram digitalizados por Neves (1985) e compilados numa malha com 100 metros de resolução (cf. Figura 20) que, no que respeita às zonas de montante do estuário, nomeadamente para a zona da Marateca, representa ainda a única informação que temos disponível!

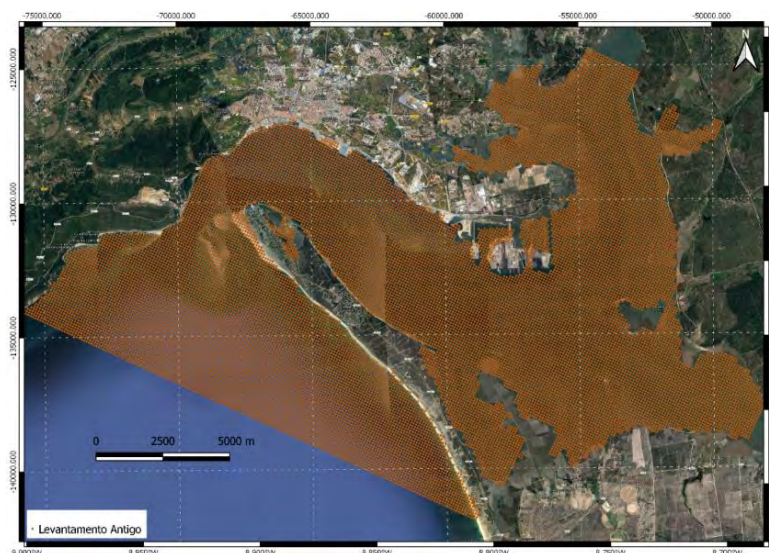


Figura 20: malha original do modelo do estuário do Sado produzida por Neves (1985)

Em 1994 o Instituto Hidrográfico procedeu a um novo levantamento do estuário que permitiu atualizar a batimetria nas zonas de maior interesse (cf. *Figura 21*) e posteriormente foram sendo efetuados por iniciativa da APSS muitos outros levantamentos, que foram permitindo atualizar alguns dos dados batimétricos, mas incidiram quase exclusivamente nas zonas correspondentes aos canais de navegação. Por esta razão a caracterização batimétrica das zonas de sapal de montante do estuário e das zonas do delta exterior apresentava até à data um nível relevante de incerteza decorrente da respetiva antiguidade e baixa densidade de amostragem.

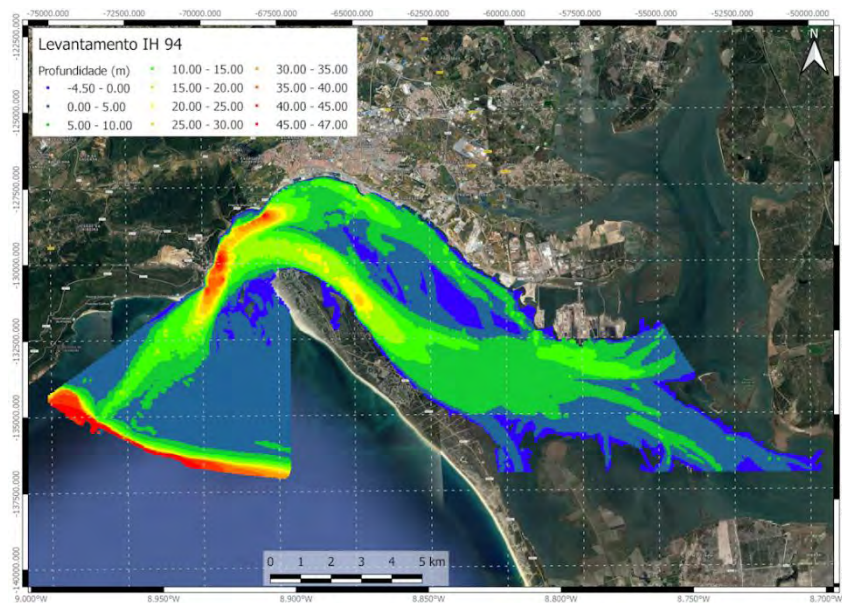


Figura 21: Levantamento do estuário efetuado pelo Instituto Hidrográfico em 1994

Tendo por objetivo corrigir esta lacuna foram (ou estão a ser) realizados novos levantamentos batimétricos na zona do delta exterior que permitirão ter uma descrição de grande qualidade da geometria dos fundos nesta zona. Para este estudo já foi possível ter acesso aos levantamentos da zona norte do delta (margem direita do canal de navegação) que cobrem a área identificada na *Figura 19*, estando nesta altura a proceder-se ao levantamento da zona sul do delta.

3.3 ESTRATÉGIA DE MODELAÇÃO

A modelação numérica das ondas e da hidrodinâmica e transporte de sedimentos foi efetuada com base respetivamente nos modelos SWAN e MOHID. A estratégia seguida para a implementação adotada para a modelação faz uso de um esquema de modelos encaixados de resolução crescente. Partindo de um modelo de grande escala, com uma baixa resolução espacial (malhas da ordem de 6Km), são feitos refinamentos sucessivos ao nível da área abrangida e da resolução espacial até chegar ao local de estudo pretendido

com uma resolução suficiente para estudar corretamente os processos físicos pretendidos. Esta estratégia permite levar a informação de larga escala, como a circulação oceânica de baixa frequência, a maré e as ondas até ao modelo locais de alta resolução.

Neste estudo foram implementados 5 níveis encaixados com as áreas e resoluções diferentes (cf. Tabela 3) que abrangem diferentes escalas de resolução:

- A escala regional (onde é gerada a circulação na Costa Portuguesa);
- A escala do Estuário do Sado (onde é gerada a circulação à escala do Estuário);
- A escala local (onde é gerada a hidrodinâmica e transporte de sedimentos à escala dos canais de interesse para a navegação).

Os dois primeiros níveis (cf. Figura 22 e Figura 23) correspondem à implementação de larga escala e servem para impor e transportar as condições de agitação e maré até ao nível 3.

O nível 3 (cf. Figura 24) é o primeiro nível que incide diretamente no local de estudo, recebe condições de fronteira dos modelos de larga escala e propaga essa informação tendo em consideração os efeitos da batimetria ao nível local.

O nível 4 (cf. Figura 25) corresponde a uma camada de transição para o modelo de muita alta resolução o nível 5 (cf. Figura 26). É assim possível fazer *downscaling* a partir duma solução de menor resolução e incluir nos modelos locais os processos de grande escala como a maré e agitação. (Martins *et al.*, 2001; Leitão *et al.*, 2005 e Malhadas *et al.*, 2009).

Esta metodologia de modelação foi utilizada tanto para a simulação dos processos hidrodinâmicos e de transporte tendo por base o modelo MOHID como para a simulação dos processos de propagação da agitação marítima tendo neste caso por base o modelo SWAN. Ambos os modelos estão amplamente validados para a costa portuguesa.

Nível	Domínio	Resolução espacial
1	PT Continental	6 Km
2	Lisboa e Setúbal	1 Km
3	Setúbal Estuário	180 m
4	Setúbal	60 m
5	Setúbal HR	20 m

Tabela 3: Domínios implementados nos modelos numéricos SWAN e MOHID

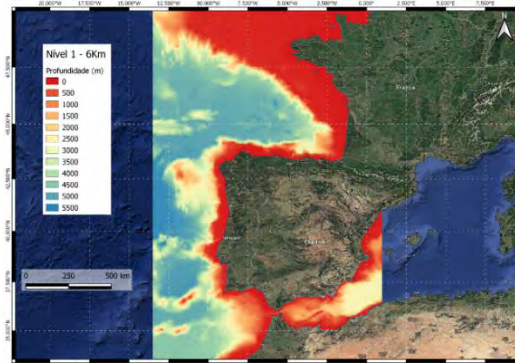


Figura 22: Nível 1 abrange toda a costa continental portuguesa com uma resolução de 6 Km

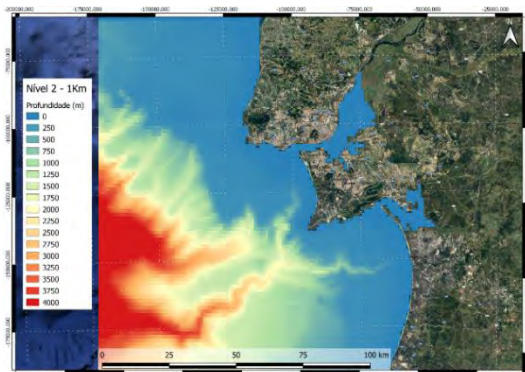


Figura 23: Nível 2 domínio de transição para a zona costeira com uma resolução de 1 Km

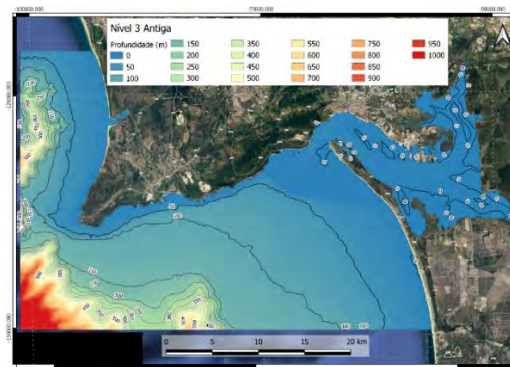


Figura 24: Nível 3 domínio de transição local com uma resolução de 180m



Figura 25: Nível 4 domínio de transição local com uma resolução de 60m

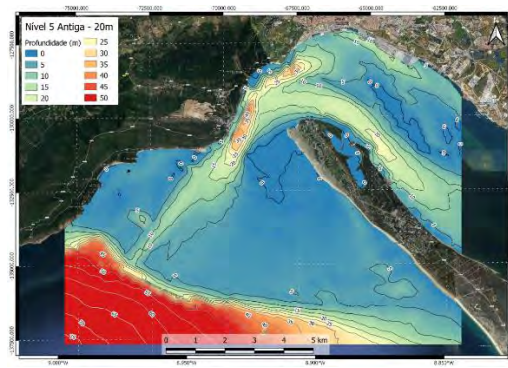


Figura 26: Nível 5 domínio de transição local com uma resolução de 20 m

3.3.1 GERAÇÃO E PROPAGAÇÃO DAS ONDAS

O SWAN é um modelo computacional de geração e propagação de ondas, concebido para zonas costeiras. O modelo é baseado na equação de equilíbrio espectral, tem incluído os efeitos, entre outros, de geração (por ação do vento), propagação espacial, refração, empolamento, dissipação por rebentação devido a efeitos de batimetria e interações não lineares onda-onda.

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \nabla \bar{x} \cdot [(\bar{c}_g + \bar{U})N] + \frac{\partial c_\omega N}{\partial \omega} + \frac{\partial c_\theta N}{\partial \theta} = \frac{S_{tot}}{\omega}$$

$$N(\bar{x}, t; \omega, \theta) = \frac{E(\omega, \theta)}{\omega}$$

O modelo pode ser forçado com condições de fronteira teóricas, com condições de fronteira geradas por simulações anteriores do SWAN ou ainda condições de fronteira fornecidas por modelos de agitação marítima de larga escala. Para além disso o modelo permite ainda incluir o forçamento atmosférico de alta resolução, o nível do mar e a interação com correntes.

No presente caso foram seleccionados para simulação 3 cenários característicos da costa portuguesa derivados dos registos da boia de Sines para o período entre Abril de 2015 e Janeiro de 2018 correspondentes respetivamente aa cenários de agitação frequente (normal), tempestade de SW e tempestade intensa (cf. Tabela 4 e Figura 27),

Tabela 4: Cenários de agitação simulados.

Cenário	Altura Significativa (m)	Período de pico (s)	Direção de pico (°)
Frequente	2	12	315.0
Tempestade SW	4	14	247.5
Tempestade intensa	8	20	292.5

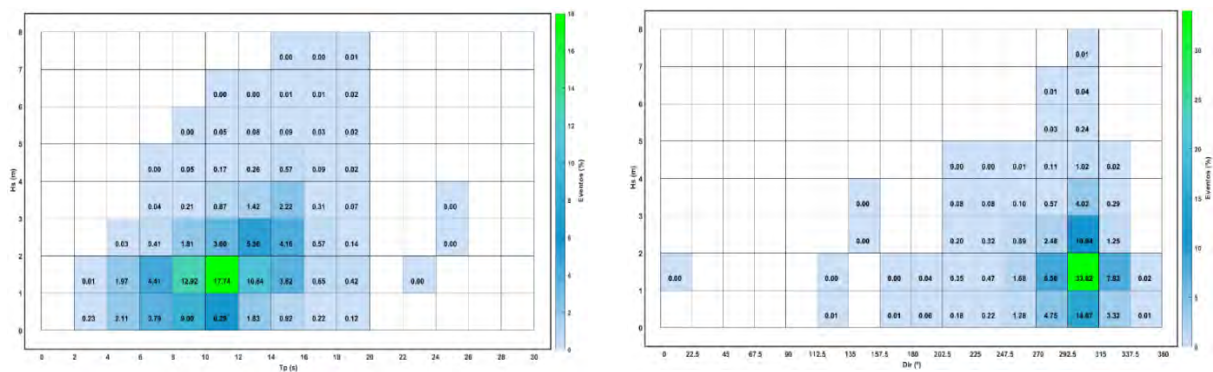


Figura 27: Distribuição conjunta da altura significativa em função do período (esquerda) e da direção (direita). Registos da boia ondógrafo de Sines.

3.3.2 HIDRODINÂMICA

Como referido as simulações de hidrodinâmica e transporte foram efetuadas com base no modelo MOHID (<http://www.mohid.com>). Este modelo tem sido aplicado em diversos estudos um pouco por todo o mundo (Leitão et al., 2004; Tironi et al., 2010; Navas et al., 2011; Ribeiro et al., 2011; Santoro et al., 2011). No caso do estuário do Sado este modelo tem sido utilizado em diversos projetos desde sua origem (Neves, 1985, Neves et al., 1987, 1991, Hidromod 1992, 1994a, 1994b, 1995, 1998, 2005, 2007 e 2009). Em 1998 a Hidromod implementou a primeira versão tridimensional baroclínica do modelo do estuário do Sado (Hidromod, 1998) com base no qual foram efetuadas simulações de hidrodinâmica, transporte de sedimentos e distribuição de salinidade.

Estes modelos têm vindo a ser utilizados em sucessivos estudos para o estuário podendo referir-se, pela **relevância para o presente projeto, a "Elaboração do Projeto e Estudo de Impacte Ambiental do Projeto de Melhoria da Acessibilidade Marítima ao Porto de Setúbal" relativa ao aprofundamento do canal de acesso atualmente em processo de concurso ou a "Utilização do modelo matemático do estuário do Sado para avaliação das condições hidrodinâmicas e de transporte"**.

Para este trabalho foram essencialmente utilizados os módulos de cálculo da hidrodinâmica e do transporte. As simulações foram efetuadas para um período de maré viva (*cf. Figura 28*) a fim de ter em consideração uma altura em que as correntes são mais intensas e como tal também os impactes terão potencial para serem mais significativos. Para esta situação de maré foram considerados cenários só com maré e com interação maré e ondas (os 3 cenários de ondas anteriormente referidos).

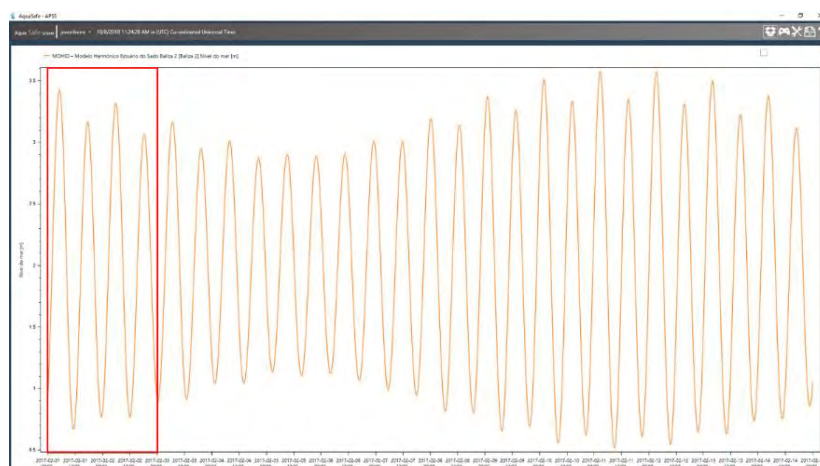


Figura 28: Nível da maré à entrada do estuário do Sado. Janela de simulação assinalada a vermelho.

4 ANÁLISE DA DINÂMICA DO DELTA E PRAIAS ASSOCIADAS

4.1 EVOLUÇÃO MORFOSEDIMENTAR DAS PRAIAS EMERSAS

4.1.1 PRAIAS ENTRE O PORTINHO DA ARRÁBIDA E A PRAIA DE ALBARQUEL

A localização e o enquadramento morfoestrutural das praias entre o Portinho da Arrábida e a praia de Albarquel conferem-lhe características particulares, nomeadamente, praias de enseada, voltadas a Sul e integralmente ancoradas em afloramentos rochosos. Devido a este enquadramento, as praias estão protegidas da ondulação de NW, que é a predominante. As praias são apenas afetadas pela ondulação que se aproxima de Sul que é ainda atenuada pelos baixos fundos do delta de vazante do Sado. Esta capacidade do delta de atenuar a ondulação que chega à praia pode mudar, de acordo com as alterações morfológicas que tipicamente os deltas de maré sofrem e que podem ter periodicidades muito variáveis.

Apesar do clima de agitação tendencialmente pouco energético, os troços costeiros entre o Portinho da Arrábida e o Creiro e entre os Galapinhos e os Galapos no inverno de 2018 voltaram a ser notícia pelos estragos causados pela ondulação durante um período tempestivo no final de fevereiro/ início de março. A reduzida largura (ou ausência) da praia emersa foi também um fator importante na afetação destas áreas (*Figura 29, Figura 30 e Figura 31*). No entanto, situações de erosão e ocorrência de estragos neste troço costeiro têm sido relativamente frequentes no decorrer dos últimos anos (*Figura 32*).



Figura 29: Destruição na via que dá acesso à praia do Creiro através do Portinho da Arrábida devido à agitação marítima. Data: 01.03.2018

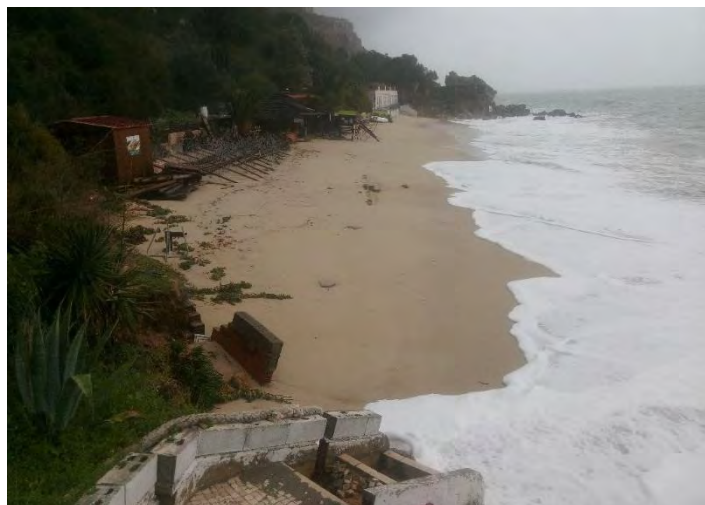


Figura 30: Praia dos Galapos após o pico da tempestade. Data: 03/03/2018.



Figura 31: Apoio de praia na praia dos Galapos durante a praia-mar, mas após o pico tempestivo. Data: 03/03/2018.



Figura 32: Efeitos da erosão costeira sobre o caminho de terra batida que efetua a ligação rodoviária/pedonal entre o Creiro e o Portinho da Arrábida. Data: 20/01/2010.

A Figura 33 mostra três levantamentos aerofotográficos do troço costeiro entre o Portinho da Arrábida e a praia do Creiro: 1957, 1996 e 2012. Os três levantamentos que atravessam um período de 55 anos revelam uma progressiva redução do areal emerso, sendo mais notório nos extremos da baía, onde os depósitos são, por força da geomorfologia da área, menos possantes.



Figura 33: Troço costeiro entre o Portinho da Arrábida e a praia dos Galapos em 1957, 1996 e 2012

A comparação entre fotografias no terreno revela ainda de forma mais evidente esta perda de sedimentos da praia emersa, a longo prazo, na zona do Portinho da Arrábida (*Figura 34*). No entanto, esta sequência revela ainda que, no decorrer do século XX, a redução de areal emerso no Portinho não foi contínua. Efetivamente, a fotografia interpretada como sendo da década de 60 revela uma maior acumulação de areia junto ao Portinho relativamente àquela evidente na fotografia da década de 50.



Figura 34: Portinho da Arrábida ao longo do século XX: superior esquerda - anos 30; superior direita – anos 50; inferior esquerda – anos 60 (?); inferior direita - 1998

Em Brito & Rebelo (2013) salienta-se que a explicação para o saldo de perda de areia nas últimas décadas poderá estar ligada:

3. 1) à subida do nível médio do mar;
4. 2) à perda de sedimento da praia para além da zona de transferência normal (abaixo da profundidade de fecho) durante tempestades;
5. 3) à influência da dinâmica sedimentar do delta de vazante: 3.1) pela diminuição na transferência de sedimento do delta para a praia ou 3.2) pela alteração dos fluxos sedimentares como consequência direta das variações morfológicas auto-cíclicas do delta de vazante.

Não sendo de descurar a relevância associada ao fator 1, efetivamente, a resposta deverá ser essencialmente uma combinação entre os fatores 2 e 3. As alterações naturais e artificiais que ocorrem no delta levam a alteração da dinâmica das praias a norte, conforme explicado em cima a propósito do conceito de sub-célula sedimentar “estuário exterior do rio Sado”. O fator 2 indicado em cima por si só não pode explicar esta alteração, uma vez que as tempestades também existiam num passado recente quando a praia se apresentava mais robusta (Figura 34). Ou seja, associados aos efeitos de uma tempestade tem que existir também uma redução no fornecimento sedimentar que explique o porquê destas praias, antes conseguirem recuperar a sua largura, e hoje em dia não.

Segundo Teixeira (1990), a granulometria das areias do Portinho da Arrábida (colhidas em campanhas decorridas entre maio de 1988 e fevereiro 1990) apresenta calibre idêntico ao encontrado na zona mais energética da Costa da Caparica. O valor médio anual de todas as amostras de praia indica diâmetro médio de 0.77 mm (0.38ϕ). Note-se que este valor é mesmo superior ao valor médio reportado em LNEC (1989) para as areias do delta – 0.52 mm (Secção 1.2). O autor conclui que, perante o acentuado abrigo desta enseada e a ausência de linhas de água importantes, só a extensa praia submarina, de declive muito suave, é capaz de lhe fornecer sedimentos. A discussão sobre a erosão que afeta esta praia será retomada num capítulo posterior, após a obtenção dos resultados da modelação numérica.

Já no caso do troço Galapinhos – Galapos, a redução da largura da praia não parece evidente através da comparação dos levantamentos aerofotográficos (*cf. Figura 33*). Em adição, a comparação de duas fotografias no terreno, uma tirada algures durante a primeira metade do século XX e a outra tirada em 2018, revela uma praia semelhante em termos de área de praia emersa (*Figura 35*). Para este efeito, observem-se determinados blocos rochosos visíveis em ambas as fotos. Ou seja, as alterações que terão ocorrido na praia durante este período não implicaram uma alteração da volumetria da praia que seja óbvia através da observação de fotografias.



Figura 35: Praia de Galapos e Galapinhos na primeira metade do século XX e atualmente

No caso da praia da Figueirinha a comparação de levantamentos aerofotográficos permite observar o aumento da praia emersa devido à construção do esporão que retém as areias. Inclusivamente entre 1996 e 2012, já com o esporão construído, o enchimento da praia continuou (cf. Figura 36).

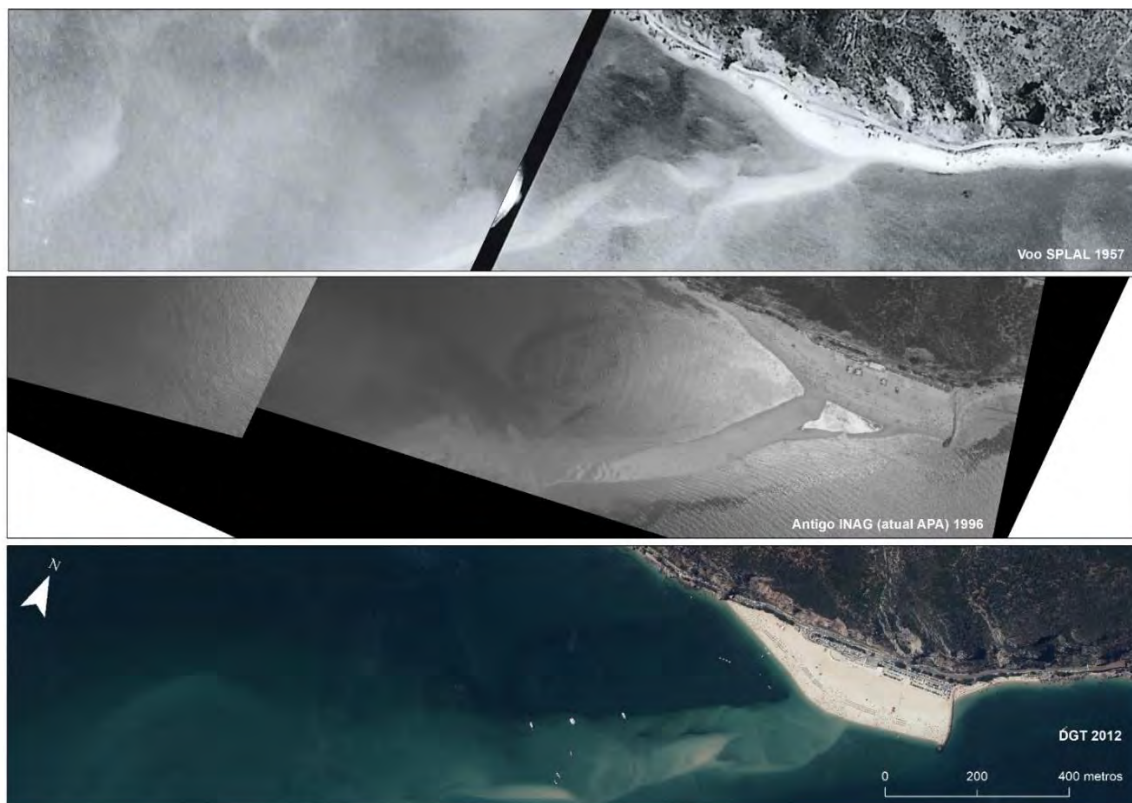


Figura 36: Praia da Figueirinha em 1957, 1996 e 2012

Na Figura 37 são ilustradas fotografias tiradas na década de 60 do século XX que revelam a praia antes da construção do esporão, com uma configuração semelhante àquela visível no levantamento aerofotográfico de 1957 (cf. Figura 36). Nestas fotos é também visível o banco que se estende a partir da praia para offshore.



Figura 37: Praia da Figueirinha na década de 60 do século XX

No levantamento aerofotográfico, o troço costeiro entre a praia da Rasca e a praia do Albarquel revela várias alterações na zona costeira. De SO para NE observa-se a construção de aterros entre a estrada e o mar, que se estende para NE até à praia da Rasca, e o aumento da área ocupada pela praia emersa de Albarquel (cf. *Figura 38*).

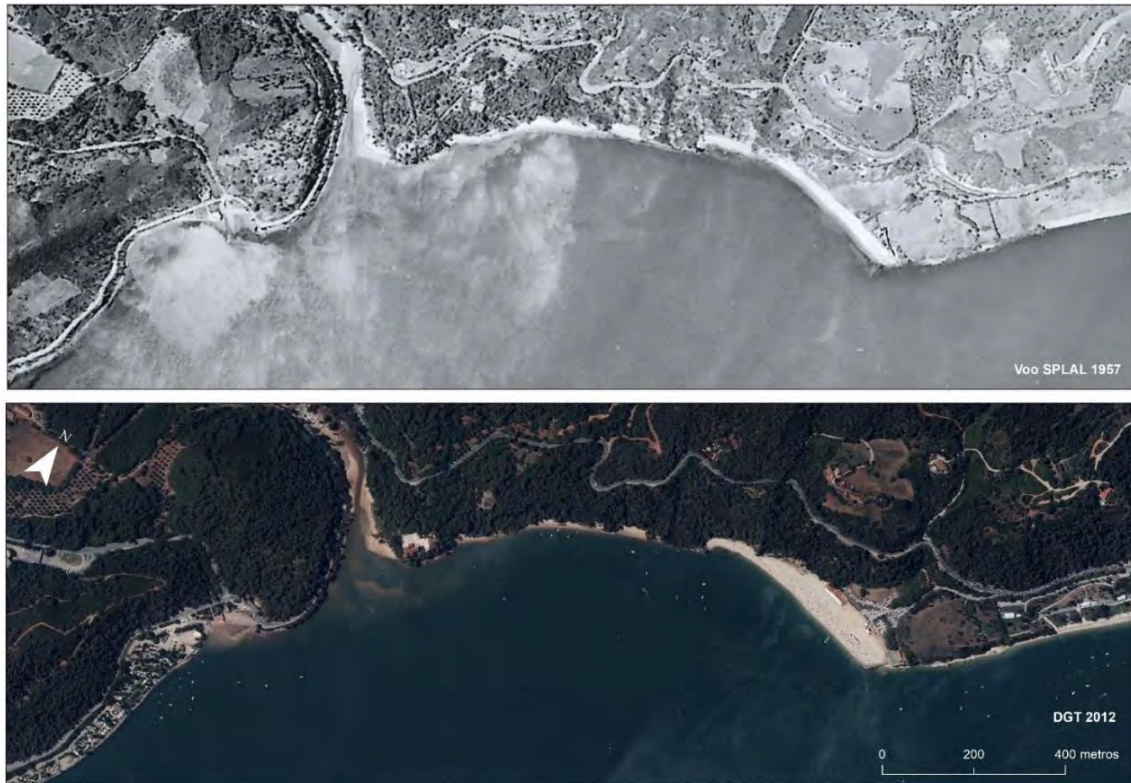


Figura 38: Troço costeiro entre a praia da Rasca e a praia de Albarquel em 1957 e 2012

A praia de Albarquel é um local onde a areia se acumula naturalmente pelo posicionamento dos afloramentos rochosos relativamente ao estuário e à ondulação incidente (*Figura 39*). No entanto, o aumento do areal verificado na comparação dos levantamentos aerofotográficos terá ocorrido pela construção de um esporão no seu extremo Este, e pela realimentação da mesma em 2004 com 250 000 m³, decorrente da dragagem do canal da barra e frente de cais do RoRo – rio Sado (Pinto et al., 2018).

Outro aspeto que a comparação dos levantamentos aerofotográficos parece evidenciar é a menor área ocupada pelos bancos de areia submersos à saída da ribeira da Ajuda (do Outão ou da Comenda). No que diz respeito à zona costeira entre a embocadura desta ribeira e a praia de Albarquel, a praia emersa em maré-cheia ocorre apenas em reentrâncias pontuais. Esta situação é também patente na comparação entre as fotografias de terreno, ilustradas na *Figura 40*.



Figura 39: Praia de Albarquel previamente à construção do esporão no seu limite Este



Figura 40: Foz da ribeira da Ajuda (ou do Outão ou da Comenda) na metade do século XX (em cima) e em 2018 (em baixo)

Em suma, no troço costeiro entre o Portinho da Arrábida e a praia de Albarquel, a praia onde os efeitos da erosão se têm feito sentir de forma mais notória, durante o desde meados do século XX, corresponde à enseada onde se localizam o Portinho da Arrábida e a praia do Creiro. Por este motivo, nos próximos capítulos as causas que têm levado à redução da praia emersa serão aprofundadas.

4.1.2 PRAIAS ENTRE A PRAIA DE TRÓIA (MAR) E A PRAIA ATLÂNTICA

Considerando as últimas 6 décadas, o litoral arenoso da metade norte da Península de Tróia pode ser dividido em 2 subsetores com tendências evolutivas diferenciadas:

1. Praia de Troia (Mar) – praia da Duna Cinzenta;
2. Praia da Duna Cinzenta – praia Atlântica.

As taxas de recuo e de avanço foram calculadas com base no voo SPLAL e no voo de 2012. A informação obtida das fotografias aéreas de 1996 do INAG serviu apenas para confirmar a tendência verificada quando comparados os dois primeiros levantamentos.

O troço costeiro entre o limite norte da Península (praia de Troia – Mar) e a praia da Duna Cinzenta apresenta uma extensão de 3,5 km. Entre o voo SPLAL (1937-1952) e 2012 este troço costeiro apresentou um avanço médio próximo dos 300 m, com avanço máximo a rondar os 550 m. O valor médio de avanço para este troço é de +4,5 m/ano, no entanto, em determinadas zonas atingiu um valor máximo de +8,2 m/ano (cf. Figura 41).

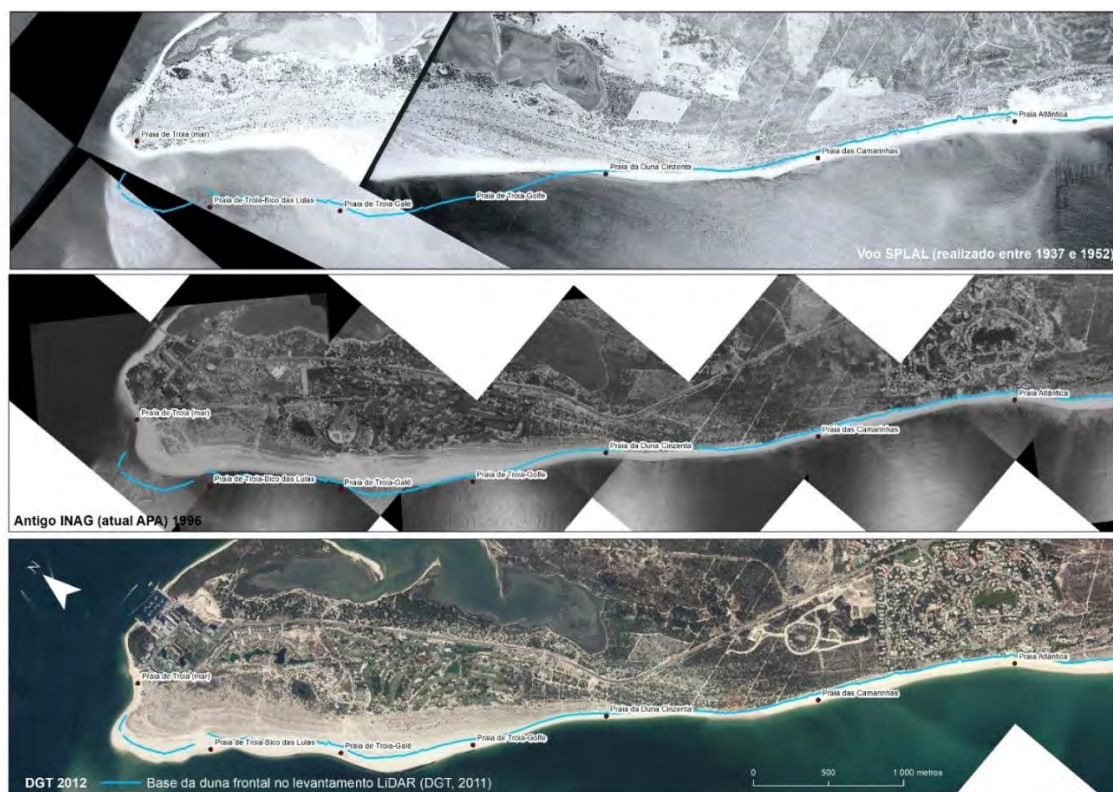


Figura 41: Evolução da porção norte da península de Tróia entre meados do século XX e 2012

Para este troço costeiro, Marques (1999) determinou taxas de acreção que variam entre +14 m/ano e +1 m/ano. É de salientar contudo que estas taxas foram obtidas para um intervalo de tempo mais curto, entre 1947 e 1987/88. Vários autores (e.g. Gama, 2004; GTL, 2014) atribuem este crescimento à deriva litoral proveniente de Sul que é alimentada pela erosão das arribas terrosas localizadas na zona central do arco litoral Tróia-Sines. Em adição, o extremo norte da península de Tróia, nomeadamente, as praias de Tróia, Tróia-Mar, Tróia-Rio e as ruínas romanas tiveram um enchimento de 286 000 m³ em 2007 decorrentes das dragagens necessárias para a construção da Marina de Tróia (Silveira et al., 2013; Pinto et al., 2018).

A porção costeira entre praia da Duna Cinzenta e a praia Atlântica tem uma extensão aproximada de 2,7 km. Durante o período considerado este troço sofreu erosão, em oposição ao verificado no troço imediatamente a norte. O recuo médio neste troço foi de 25 m, com um recuo máximo de 47 m (*cf. Figura 41*). O valor médio de recuo foi de -0,4 m/ano, atingindo um valor máximo de -0,7 m/ano.

Em Marques (1999) são também reportadas taxas de recuo para este troço entre -1,3 m/ano e -1,8 m/ano, entre 1947 e 1987/88. Este mesmo autor refere taxas de recuo mais baixas para o período entre 1988 e 1999 que variam entre - 0 m/ano e 1,25 m/ano. Efetivamente, a modelação da agitação marítima com **probabilidade frequente a incidir sobre a península, considerando a batimetria “antiga”, revela a existência** de pontos de concentração de agitação na zona da urbanização de Soltroia (*Figura 46*).

No troço costeiro a sul da praia Atlântica (até à praia Malha da Costa – inclui a UNOP 7 e 8) entre o voo SPLAL (1937-1952) e o voo 2012 este troço, com aproximadamente 4,1 km de extensão, sofreu acreção, refletida pelo avanço do campo dunar. Esta acreção foi também verificada por Marques (1999). No entanto, observações de campo realizadas ao local desde 2014 revelam que a erosão parece entretanto não se fazer sentir na zona da urbanização de Soltroia (observar perfil de praia robusto com alta praia e duna embrionária na *Figura 42*), mas imediatamente a sul desta praia, na zona da UNOP 7 (*Figura 7*) chegando até à UNOP 8. Contudo, não se sabe se esta erosão localizada foi um processo isolado, ou se irá continuar no tempo. É provável que esta erosão esteja associada às modificações na morfologia dos fundos do delta de vazante, ocorridas na última década, que agora já não promove a intensificação da agitação incidente na urbanização de Soltroia, mas um pouco mais a sul.



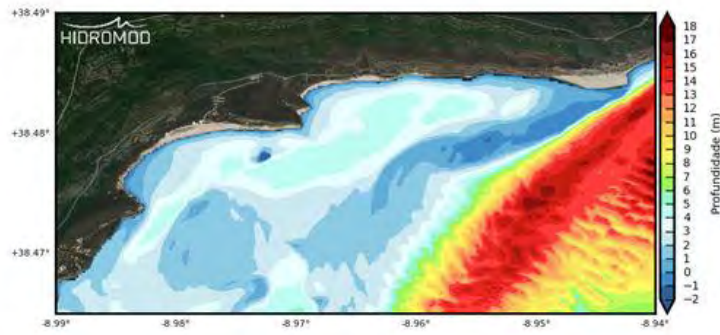
Figura 42: Praia Atlântica (observação para norte). Maio 2016.

4.2 EVOLUÇÃO RECENTE DO DELTA EXTERIOR

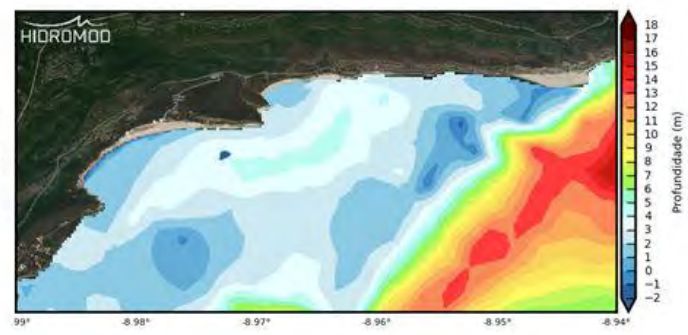
Como referido anteriormente, para efeitos de estabelecimento dum modelo conceptual que permita explicar a evolução recente da dinâmica observada no delta, com especial ênfase nos bancos Figueirinha-Portinho e na zona da ponta de Troia, foram consideradas duas situações, correspondentes a duas geometrias de fundo representativas de duas épocas: uma geometria “atual” que incorpora o levantamento de 2018 da zona da margem norte do delta e considera o canal com a geometria atual e uma geometria “antiga” que corresponde essencialmente aos dados disponíveis anteriormente (que para a zona do banco da margem direita do canal corresponderá a levantamentos ainda da década de 70).

No que respeita à zona do banco Figueirinha-Portinho a diferença entre estas duas geometrias mostra como que uma “compressão” do banco em direção à costa como pode ser observado na Figura 43. Do ponto de vista dos processos hidromorfológicos dois aspetos são de especial relevância:

1. O crescimento da língua de areia na área que se prolonga a partir da praia da Figueirinha;
2. O aumento em área de um banco de areia localizado em frente ao Portinho a cotas de aproximadamente 1 m.

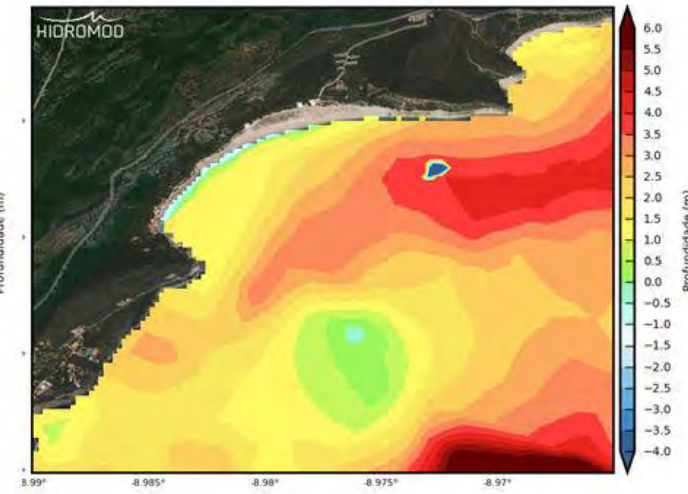
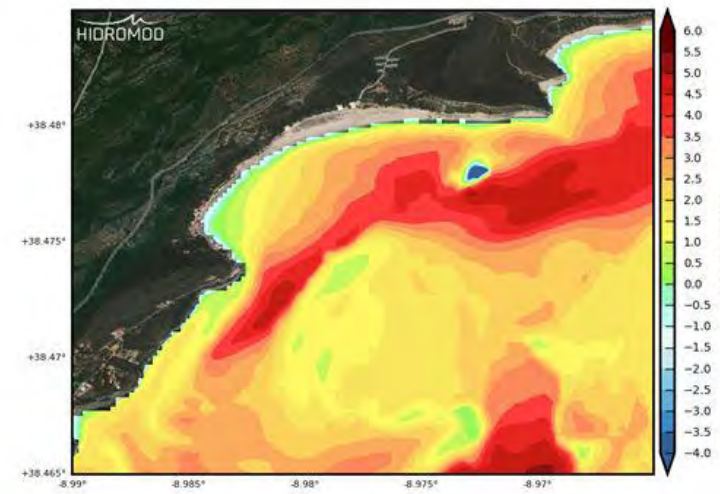


(a)



(b)

Figura 43: Batimetria para o banco Figueirinha-Portinho. (a) Atual. (b) Antiga



No que respeita ao banco em frente a Troia (cf. Figura 44) as diferenças entre as duas situações são igualmente significativas. Note-se a diferença em termos de profundidade, forma e dimensão do banco sedimentar em frente à **ponta de Troia**. A estrutura presente na situação “atual” apresenta diversos canais e formas que contribuem para alterações significativas do escoamento naquela área.

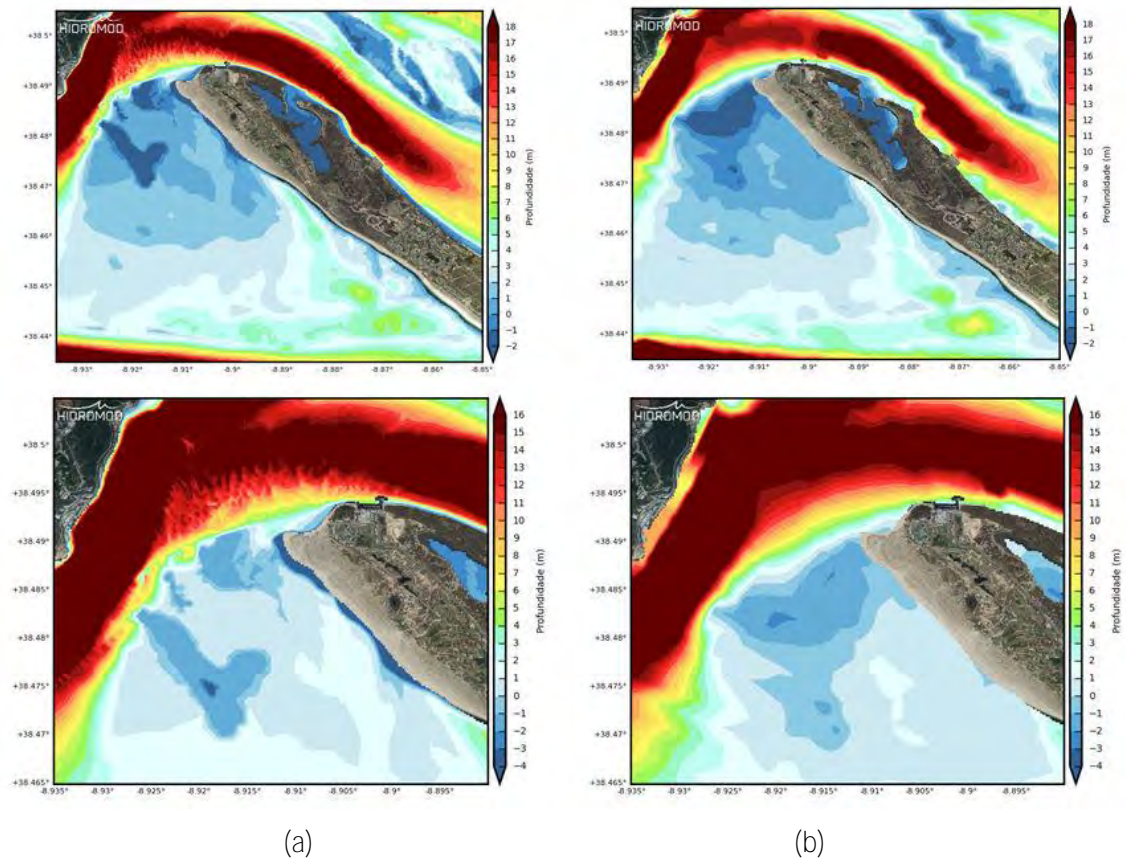


Figura 44: Batimetria para o banco em frente à Península de Troia. (a) Atual. (b) Antiga

4.3 SIMULAÇÃO DA PROPAGAÇÃO DA AGITAÇÃO MARÍTIMA

A agitação marítima é um dos principais fatores com potencial para originar alterações na circulação costeira e tem um papel preponderante na mobilização de sedimentos. Para efeitos de avaliação das potenciais alterações nos padrões de propagação introduzidos pelas mudanças na batimetria observadas ao longo dos últimos anos foram considerados os 3 cenários de agitação anteriormente referidos.

4.3.1 CENÁRIO COM PROBABILIDADE FREQUENTE

O cenário correspondente condições de agitação frequentes na costa Portuguesa foi caracterizado por ondas provenientes de NW, com $H_s=2$ m e $T_p = 12$ s. Este cenário corresponde também a um dos rumos a que o cabo Espichel confere mais abrigo.

As ondas que chegam ao Portinho da Arrábida originadas por condições ao largo com estas características são de muito baixa intensidade não ultrapassando em regra alturas da ordem de 0.5m (cf. Figura 45). Um dos aspetos interessantes que resulta **da comparação entre as situações “antiga” e “atual” é a diferença nos respetivos padrões de propagação. Na situação “antiga” a agitação atinge** algumas zonas da praia com aproximadamente 0.3 m de altura significativa **enquanto na situação “atual” não passa dos 0.2 m.** Segundo o modelo, o aumento do banco de areia em frente ao portinho estará a causar uma maior dissipação impedindo que as ondas cheguem à praia com a mesma intensidade.

Na zona de Troia (cf. Figura 46) o efeito de abrigo do cabo Espichel não é tão intenso e verifica-se a ocorrência de alturas significativas superiores às observadas no Portinho da Arrábida. No entanto, o efeito de abrigo que o banco sedimentar proporciona em ambas as situações, faz com que se observe uma redução da altura significativa que atinge a praia naquele local. Na zona da urbanização Soltroia é de salientar a existência de dois pontos de concentração de agitação **presentes na situação “antiga”**.

4.3.2 CENÁRIO COM CONDIÇÕES DE TEMPESTADE DE SUDOESTE

Este cenário corresponde a uma situação característica de tempestade de sudoeste ($H_s: 4$ m, $T_p: 14$ s, Dir: 247.5) e pode ser considerada uma situação típica capaz de atingir a região do delta com bastante intensidade. Neste cenário o cabo Espichel não tem qualquer interferência na propagação da agitação fazendo com que as áreas em estudo estejam mais expostas a eventos provenientes destes rumos.

Os resultados para a zona do Portinho da Arrábida mostram que a ondulação que consegue atingir a zona de praia é bastante superior ao cenário de ondas descrito anteriormente anterior (cerca de 1m altura significativa). **Tal como no cenário anterior na situação “antiga” a ondulação consegue propagar-se com**

maior altura significativa até perto da praia (aproximadamente 0.9 m). Neste cenário o efeito dissipativo do **banco de areia na situação “atual” é ainda mais** notório (cf. *Figura 47*) registando a praia ondas de cerca 0.7 m.

Em Troia a agitação que atinge a zona costeira também é muito superior ao cenário anterior (cerca 1.5 m). **Ao longo da península não se verificam diferenças significativas entre as situações “atual” e “antiga”.** O banco sedimentar da ponta de Troia é zona que apresenta diferenças mais significativas (cf. *Figura 48*).

4.3.3 CENÁRIO DE TEMPESTADE INTENSA

O este cenário consiste na simulação de uma situação de tempestade intensa com ondas provenientes de WNW com 8 metros de altura significativa e períodos de pico de 20 s.

Os resultados obtidos para o Portinho da Arrábida são muito semelhantes aos do cenário anterior, sendo **visível o efeito de proteção que o banco em frente ao portinho tem na batimetria “atual” e a diferença mais relevante é junto a língua de areia da praia da Figueirinha** (cf. *Figura 49*).

Também para Troia os resultados são muito semelhantes ao cenário anterior (cf. *Figura 50*). Apesar de ter uma altura significativa superior ao cenário anterior a dissipação de energia por efeito de batimetria (rebentação, atrito no fundo) faz com que se obtenham resultados semelhantes.

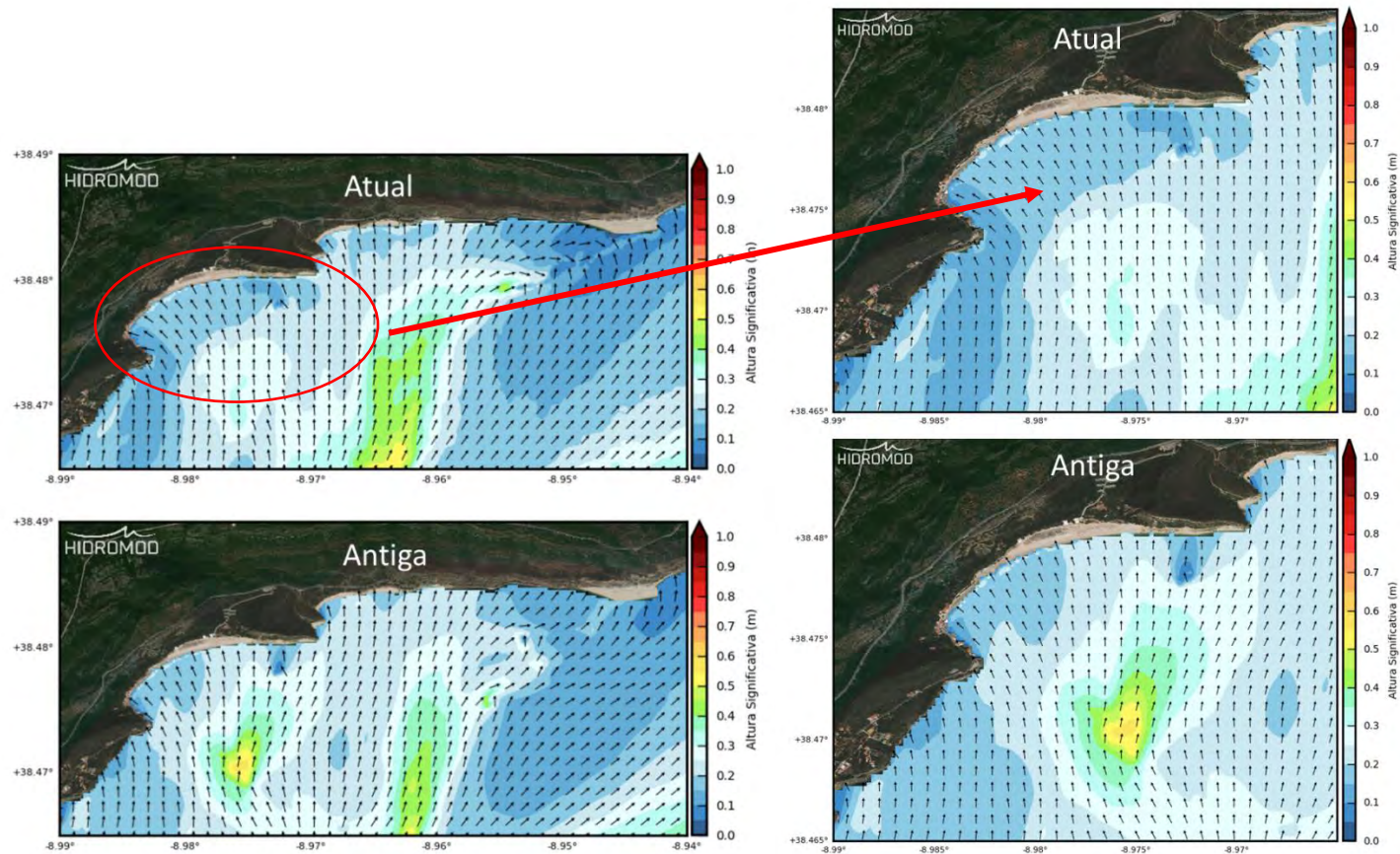


Figura 45: Banco Figueirinha-Portinho. Altura significativa e a direção para ondas com H_s : 2m, T_p : 12s, Dir: 315. Situações “atual” e “antiga”

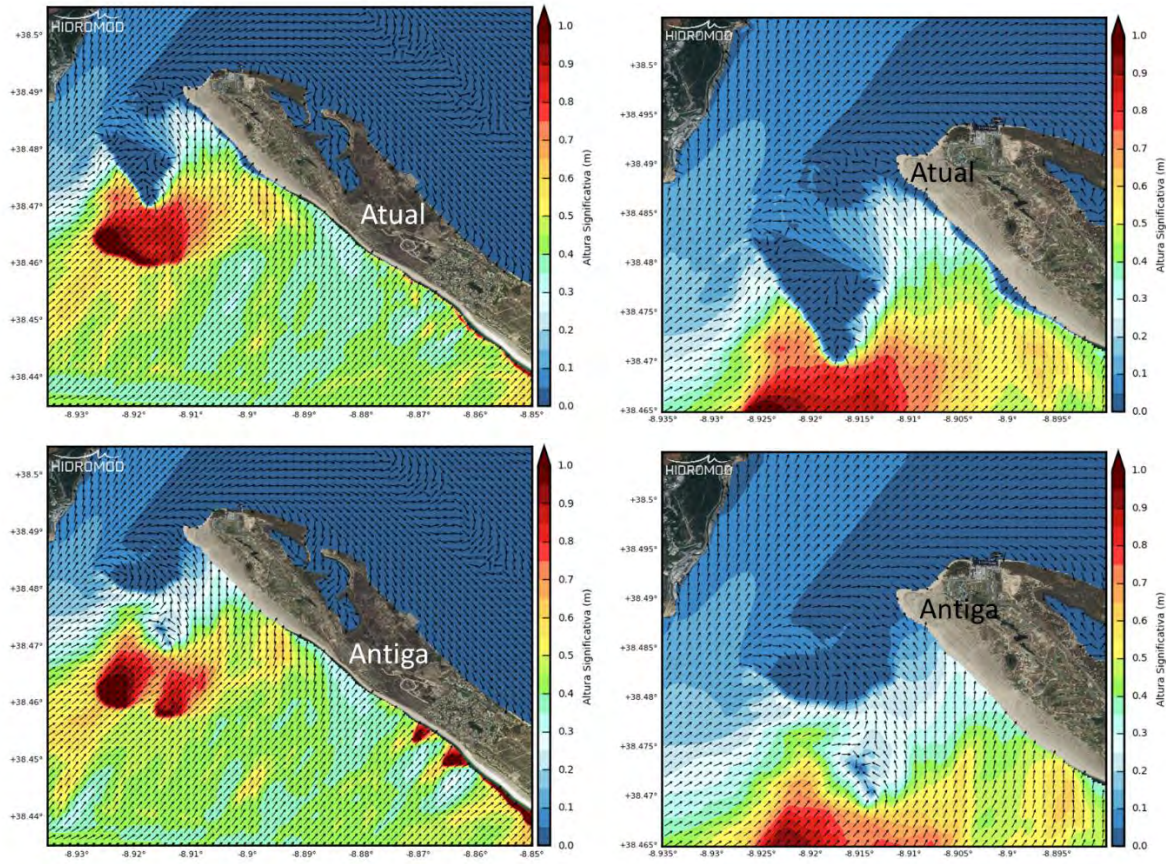


Figura 46: Península de Troia. Altura significativa e a direção para ondas com H_s : 2m, T_p : 12s, Dir: 315. Situações “atual” e “antiga”

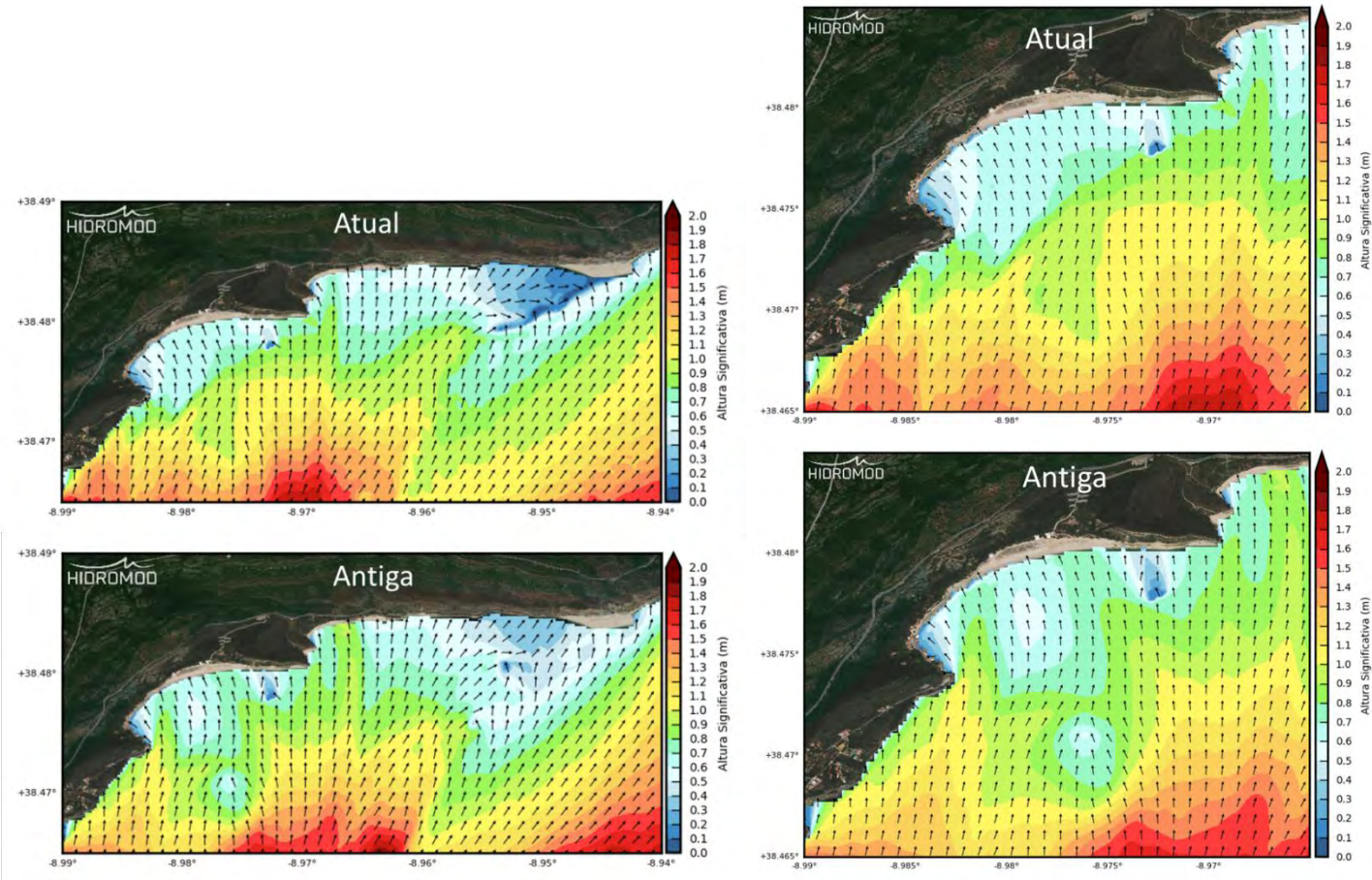


Figura 47: Banco Figueirinha-Portinho. Altura significativa e a direção para ondas com H_s : 4m, T_p : 14s, Dir : 247.5. Situações “atual” e “antiga”

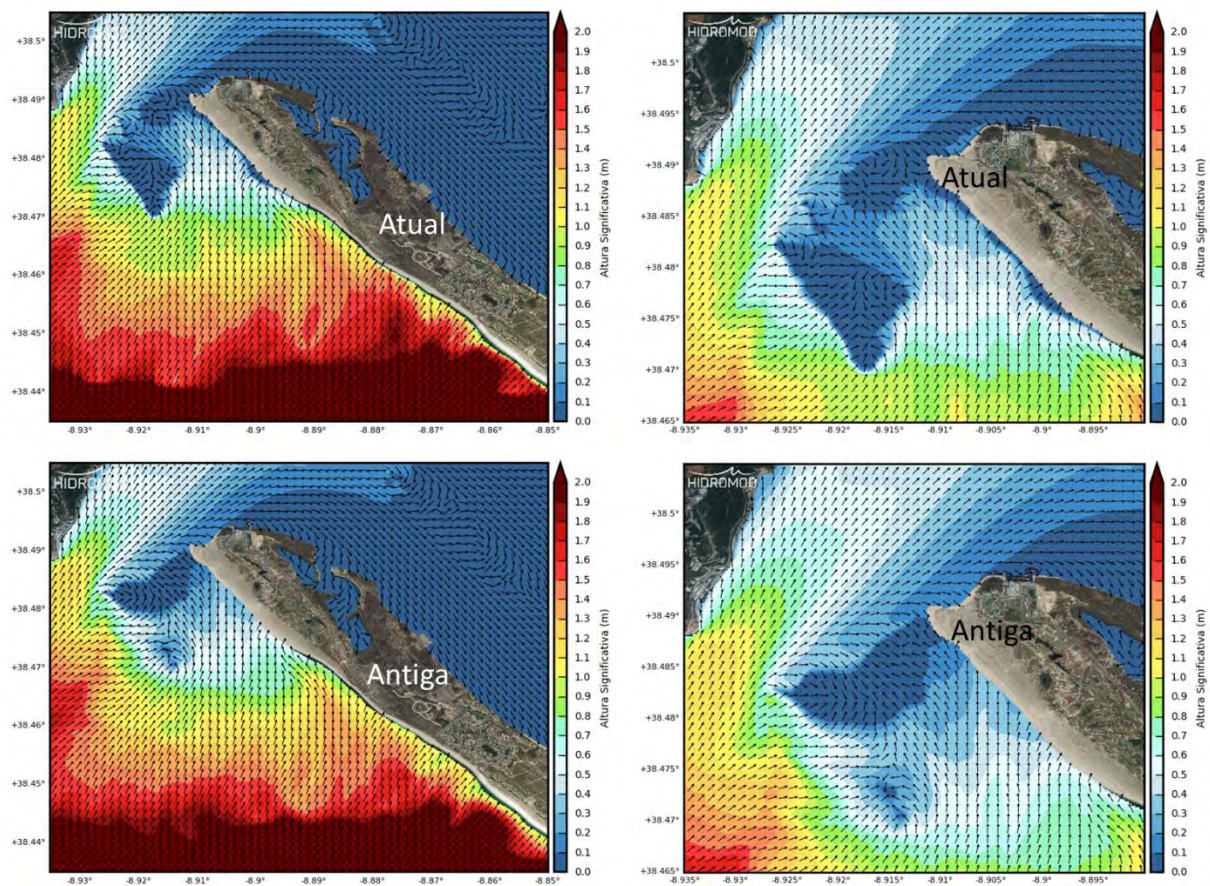


Figura 48: Península de Tróia. Altura significativa e a direção para ondas com H_s : 4m, T_p : 14s, Dir : 247.5. Situações “atual” e “antiga”

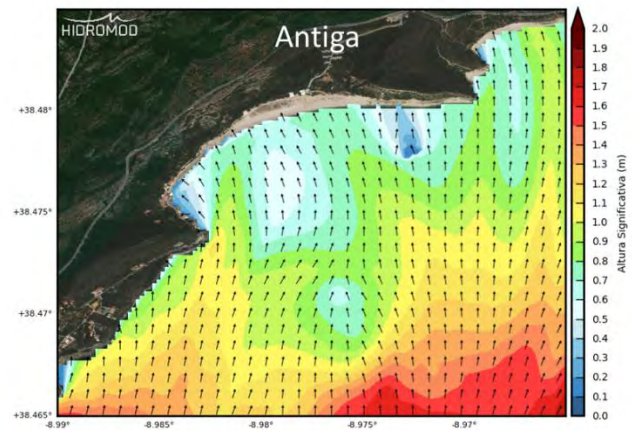
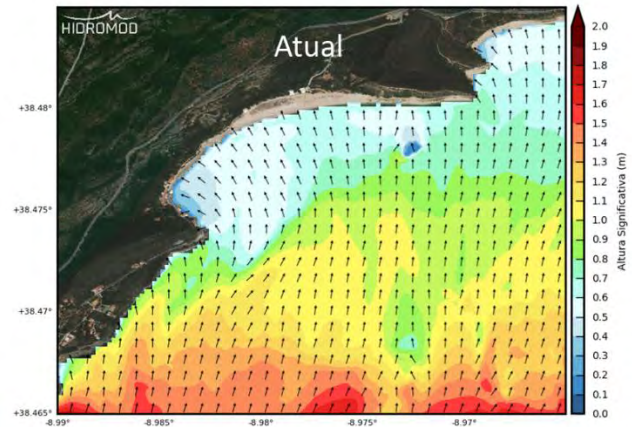
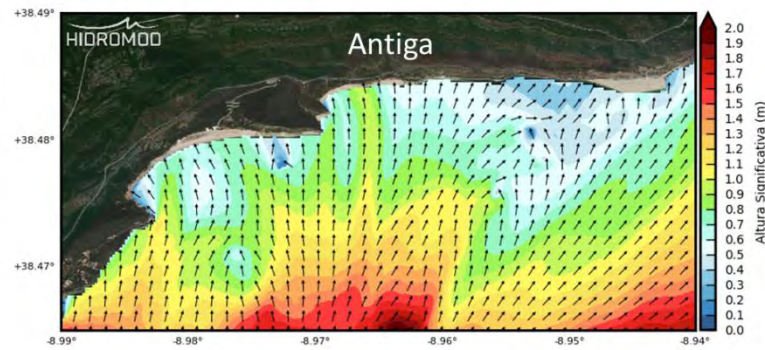
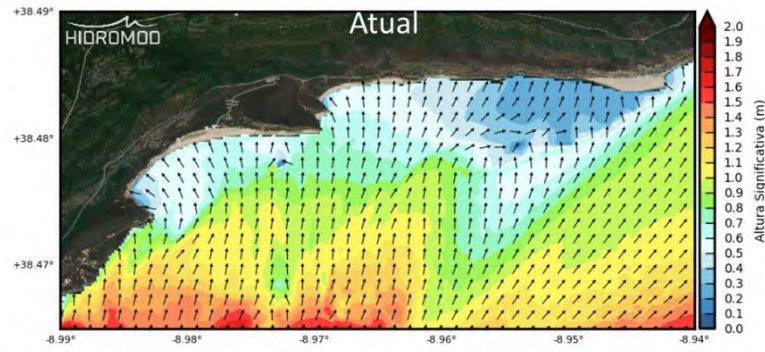


Figura 49: Banco Figueirinha-Portinho. Altura significativa e a direção para ondas com H_s : 8m, T_p : 20s, Dir: 292.5. Situações “atual” e “antiga”

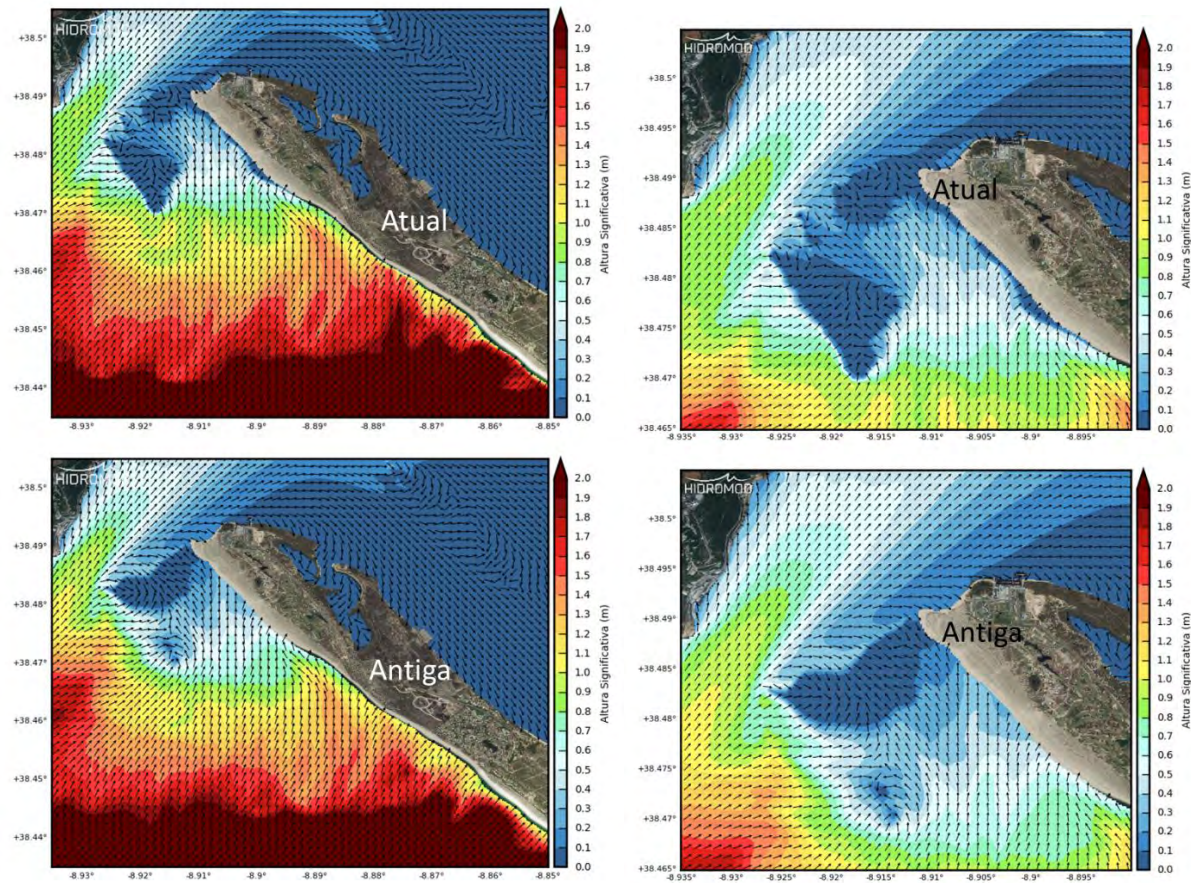


Figura 50: Península de Troia. Altura significativa e a direção para ondas com H_s : 8m, T_p : 20s, Dir : 292.5. Situações “atual” e “antiga”

4.4 SIMULAÇÃO DA HIDRODINÂMICA E TRANSPORTE

4.4.1 AÇÃO EXCLUSIVA DA MARÉ

Considerando a ação exclusiva da maré já são visíveis as alterações na circulação no trecho Portinho da Arrábida-Figueirinha (cf. *Figura 51*). Na situação “antiga” é possível ver uma intensificação da circulação residual junto à praia da Figueirinha mesmo junto a praia e que se propaga para o interior do estuário enquanto na situação “atual” o escoamento é mais alinhado com o canal de navegação. No Portinho é ainda de notar a “compressão” da estrutura de recirculação para junto da costa na situação “atual”.

Também na península de Troia se podem observar alterações relevantes. Na zona do Cambalhão são visíveis padrões de circulação e zonas de intensificação distintos da situação “atual” para a situação “antiga” (cf. *Figura 52*). De notar existe aumento da velocidade do escoamento junto a praia na situação “atual”. Já a zona da urbanização Soltroia as alterações são menos perceptíveis sendo, no entanto, possível identificar algumas diferenças ligeiras.

4.4.2 AÇÃO COMBINADA DA MARÉ E ONDAS FREQUENTES

Os resultados obtidos neste cenário são praticamente idênticos aos resultados obtidos na situação só com maré. Neste cenário a agitação (Hs: 2m, Tp: 12s, Dir: 315) chega com reduzida intensidade e não tem impacto muito significativo na circulação costeira. As diferenças entre a situação “atual” e “antiga” são semelhantes às já descritas anteriormente (cf. *Figura 53 e Figura 54*).

4.4.3 AÇÃO COMBINADA DA MARÉ E TEMPESTADE DE SUDOESTE

Com o aumento da intensidade da agitação marítima (Hs: 4m, Tp: 14s, Dir: 247.5) já se podem observar efeitos mais significativos decorrentes das alterações batimétricas entre as situações “antiga” e “atual”. Um dos aspetos relevantes no caso do trecho Figueirinha-Portinho é a existência duma corrente em direção a praia e uma intensificação ao longo da praia situação “antiga” que não se verifica na situação “atual” (cf. *Figura 55*). Na situação “atual” em vez desta corrente dirigida para a praia existe uma corrente para sul que se vai intensificando.

Um aspeto muito relevante para a compreensão dos problemas erosivos no trecho Creiro-Portinho pode ser observado nos padrões de transporte representados na *Figura 56*. Na figura pode observar-se como o padrão de transporte neste trecho de costa é diferente considerando a situação “antiga” ou a “atual”. Enquanto na situação “antiga” existe um efetivo transporte da zona do banco para a praia aquando da

ocorrência de agitação capaz de interagir com as areias, na situação atual esse padrão está completamente invertido, situando-se as potenciais fontes de sedimentos em áreas que não terão grande capacidade para alimentar o processo de transporte de areias para este trecho de praia. Note-se que o transporte residual se faz essencialmente da praia do Creiro para o Portinho.

No caso da ponta de Troia também se pode observar um incremento da capacidade de transporte (*cf. Figura 57 e Figura 58*). **Na situação “atual” é possível ver vários canais por onde se faz o escoamento enquanto na situação “antiga” o escoamento é concentrado em redor do banco de areia.** Ainda na ponta de Troia é possível ver a ocorrência de uma corrente junto á praia que, apesar de já estar presente no cenário anterior, apresenta aqui uma maior intensidade.

4.4.4 AÇÃO COMBINADA DA MARÉ E TEMPESTADE INTENSA

Os resultados obtidos neste cenário (Hs: 8m, Tp: 20s, Dir: 292.5) são muitos semelhantes aos anteriores. Novamente **na situação “antiga” é possível ver a corrente em direção a praia e uma intensificação ao longo da mesma que na situação “atual” não se verifica** (*cf. Figura 59*).

Na península de Troia observa-se igualmente o mesmo tipo de comportamento que no cenário anterior. **Ocorrem células de recirculação junto ao empreendimento Soltroia na situação “antiga” e que são muito intensificadas com este cenário de agitação marítima.** (*cf. Figura 61*).

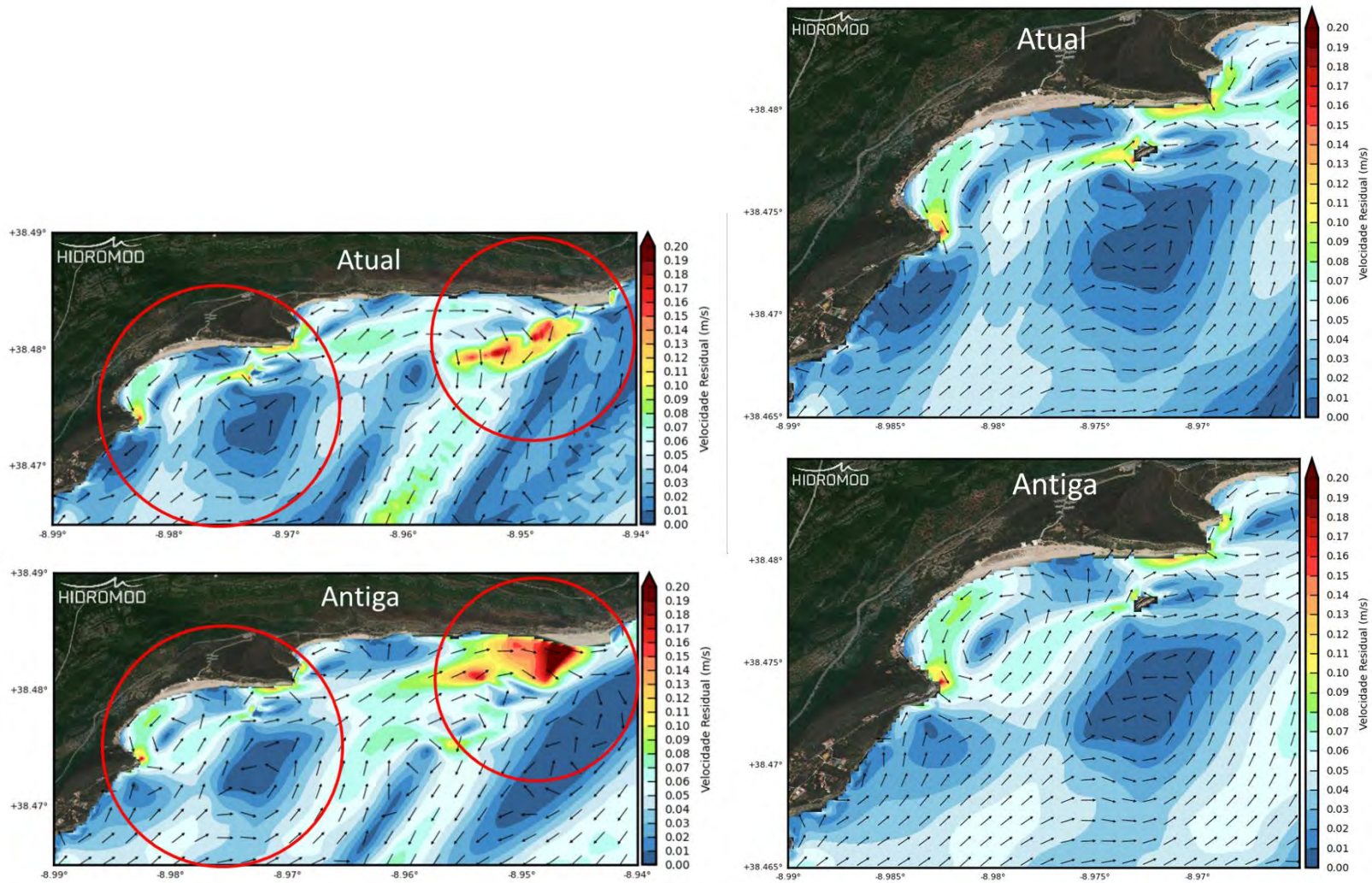


Figura 51: Trecho Portinho-Figueirinha. Velocidade residual (velocidade média) para a situação só com maré. Situações “atual” e “antiga”.

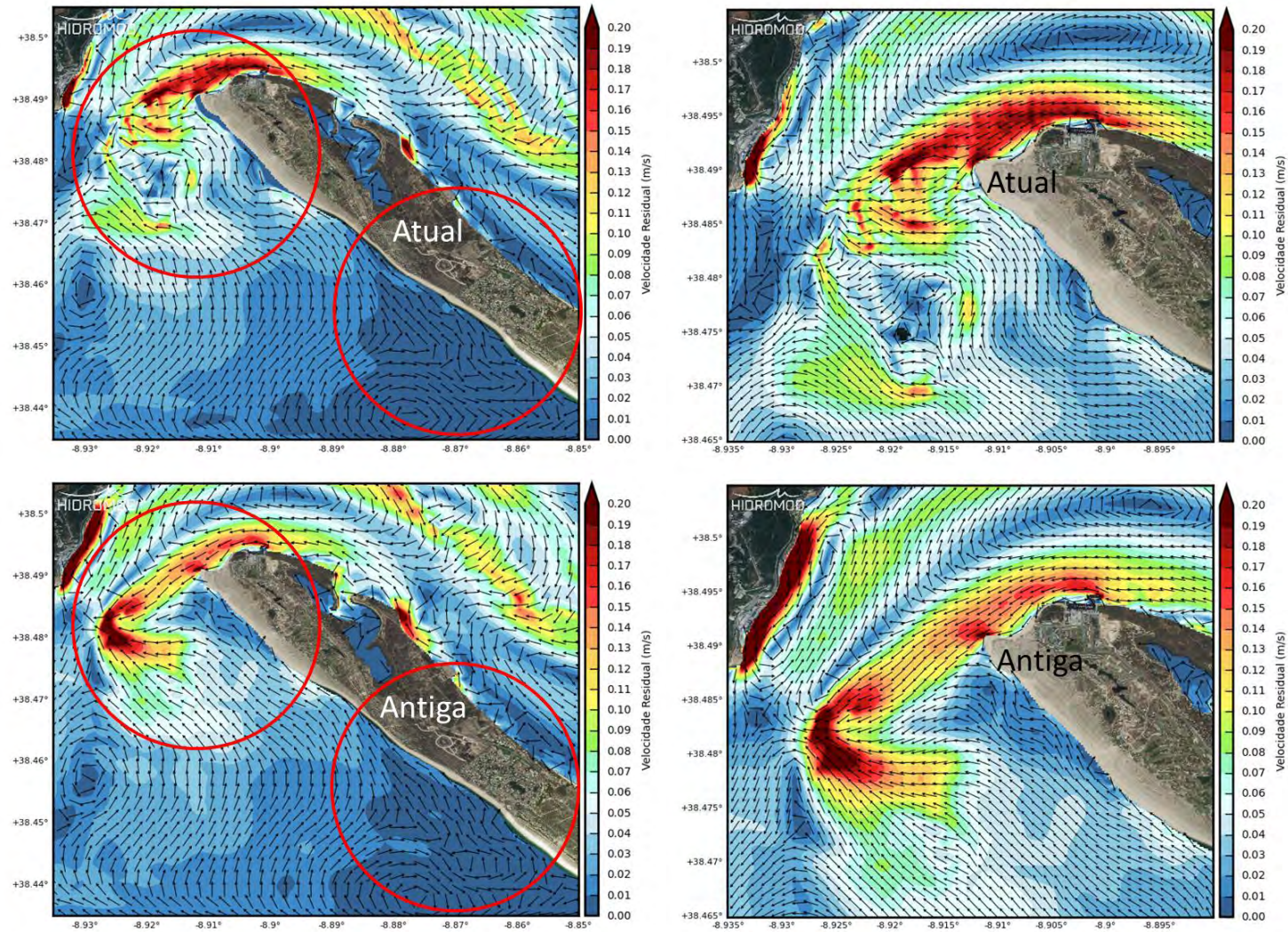


Figura 52: Península de Troia. Velocidade residual (velocidade média) para a situação só com maré. Situações “atual” e “antiga”.

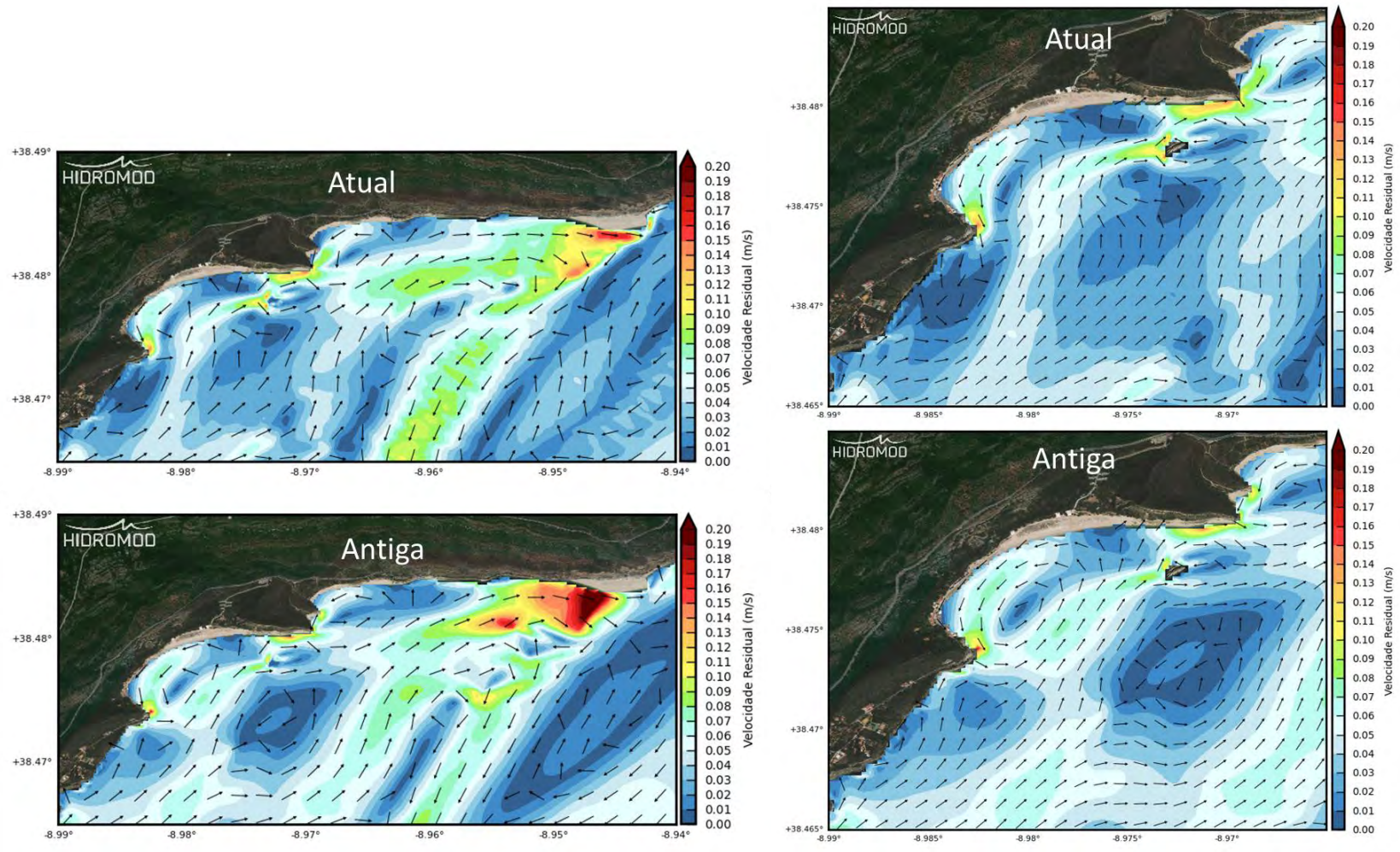


Figura 53: Trecho Portinho-Figueirinha. Velocidade residual considerando a ação combinada de maré e ondas com H_s : 2m, T_p : 12s, Dir : 315. Situações “atual” e “antiga”.

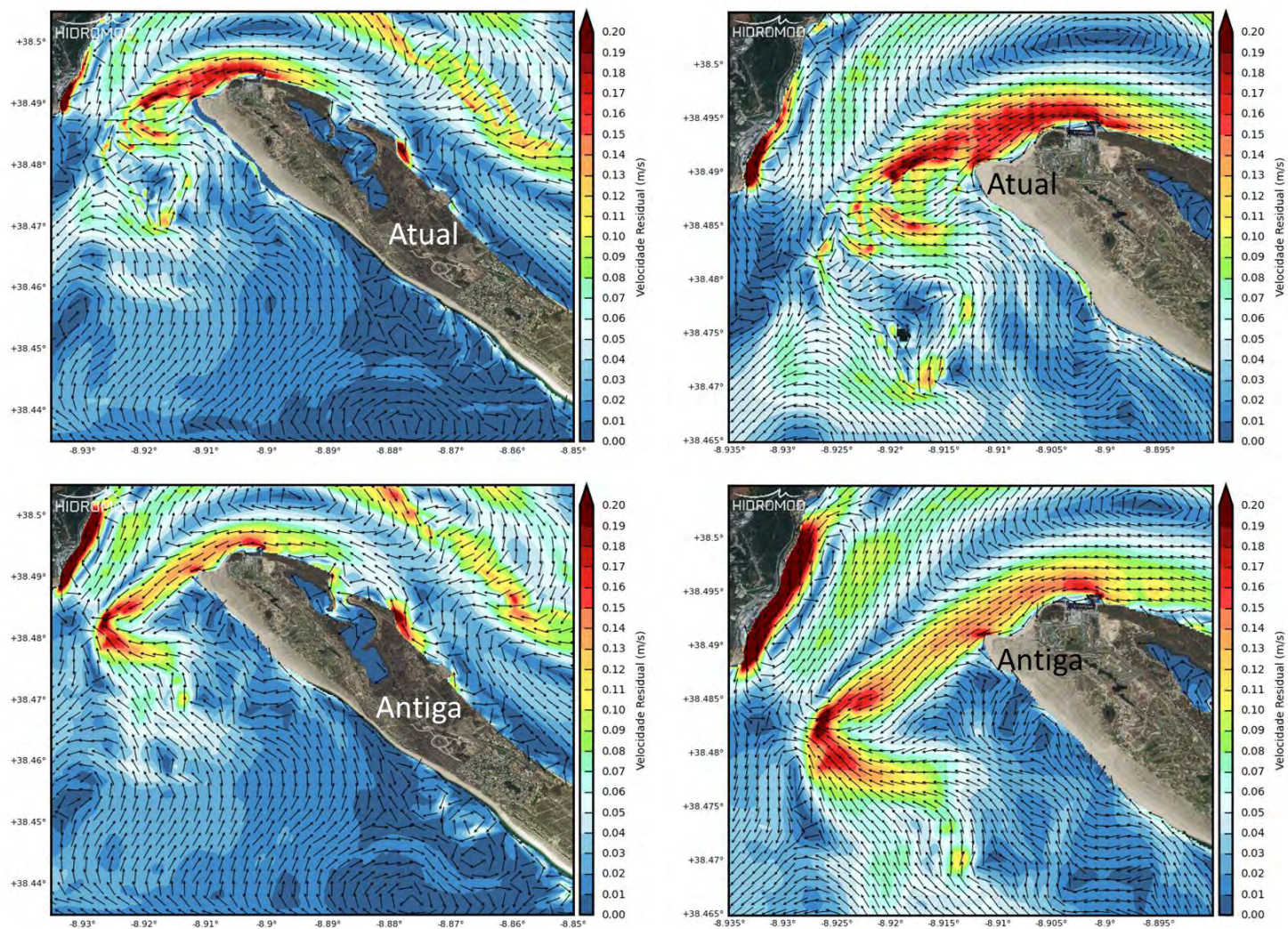


Figura 54: Península de Troia. Velocidade residual considerando a ação combinada de maré e ondas com H_s : 2m, T_p : 12s, Dir: 315. Situações “atual” e “antiga”.

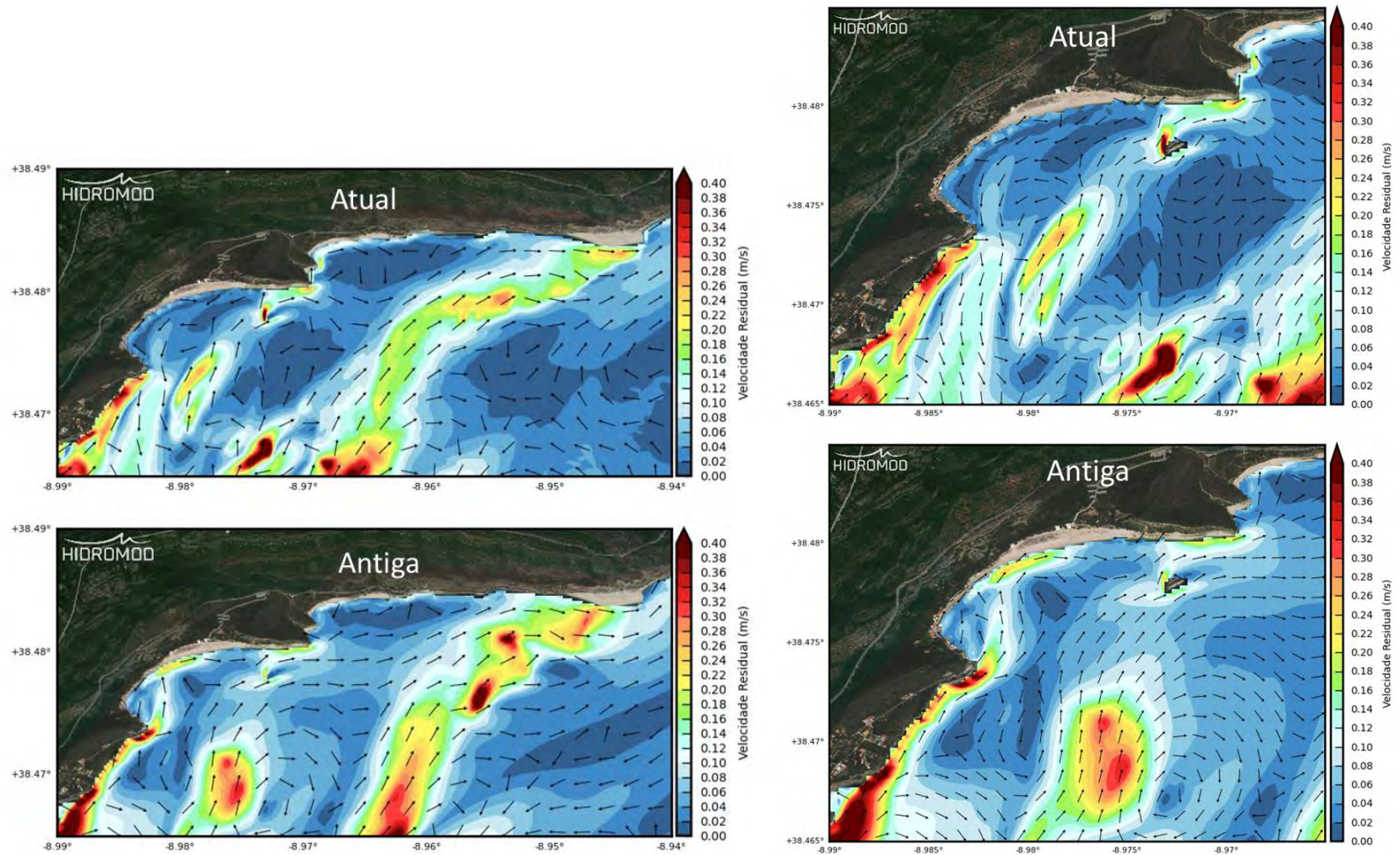


Figura 55: Trecho Portinho-Figueirinha. Velocidade residual considerando a ação combinada de maré e ondas com H_s : 4m, T_p : 14s, Dir : 247.5. Situações "atual" e "antiga".

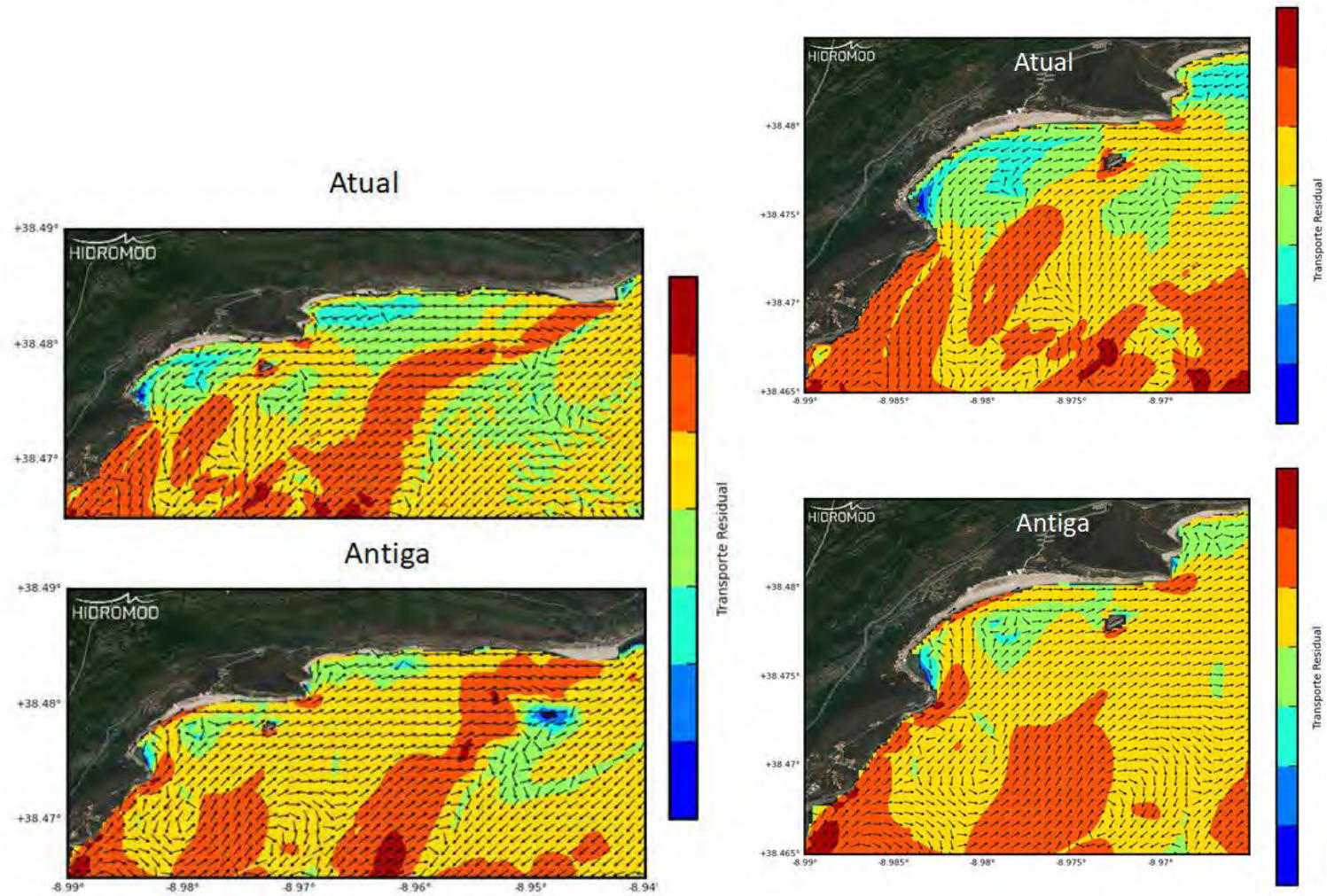


Figura 56: Trecho Portinho-Figueirinha. Transporte residual considerando a ação combinada de maré e ondas com H_s : 4m, T_p : 14s, Dir : 247.5. Situações “atual” e “antiga” (azul menos intenso e vermelho mais intenso).

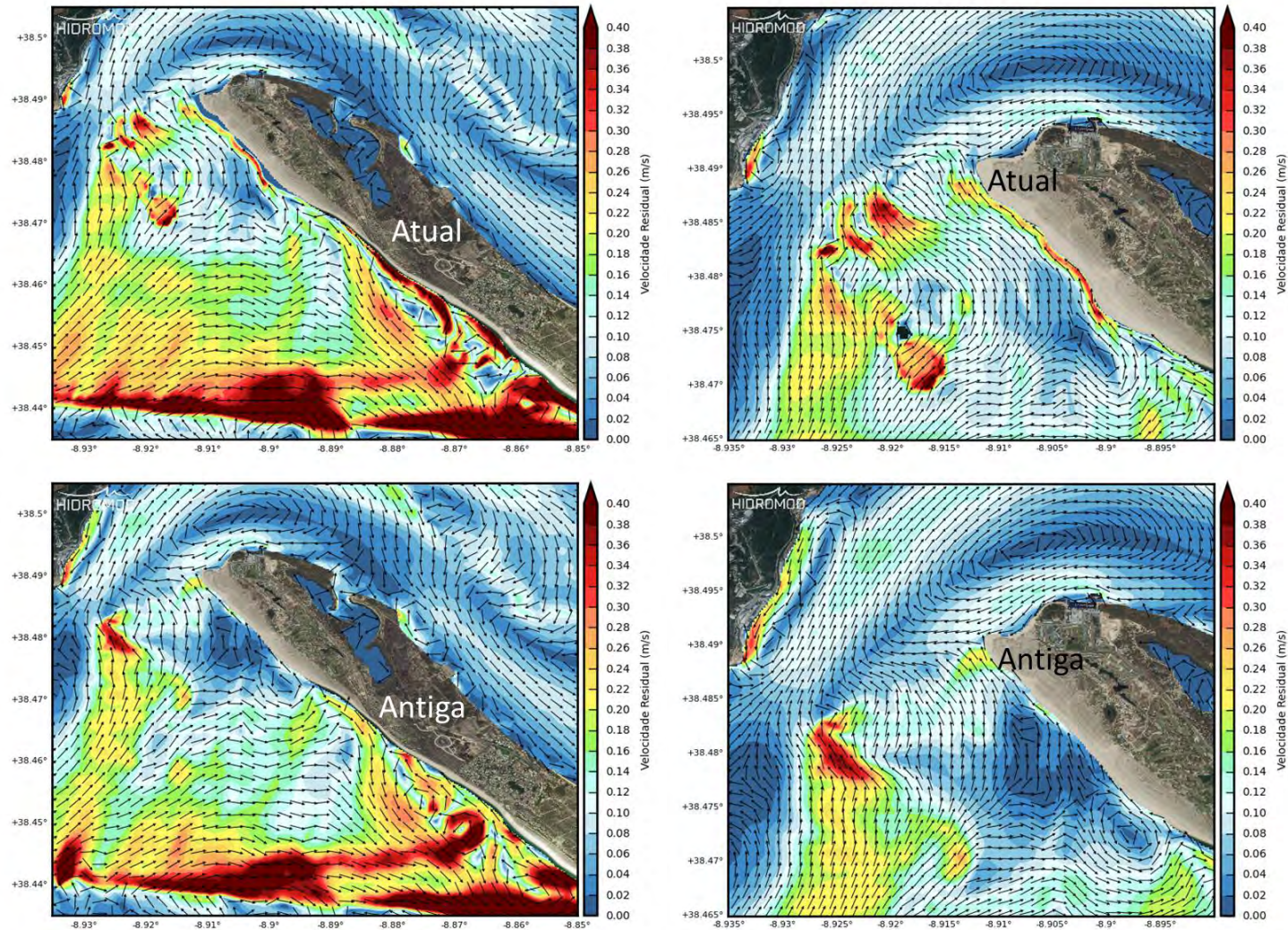


Figura 57: Península de Troia. Velocidade residual considerando a ação combinada de maré e ondas com $H_s: 4m$, $T_p: 14s$, $Dir: 247.5$. Situações “atual” e “antiga”.

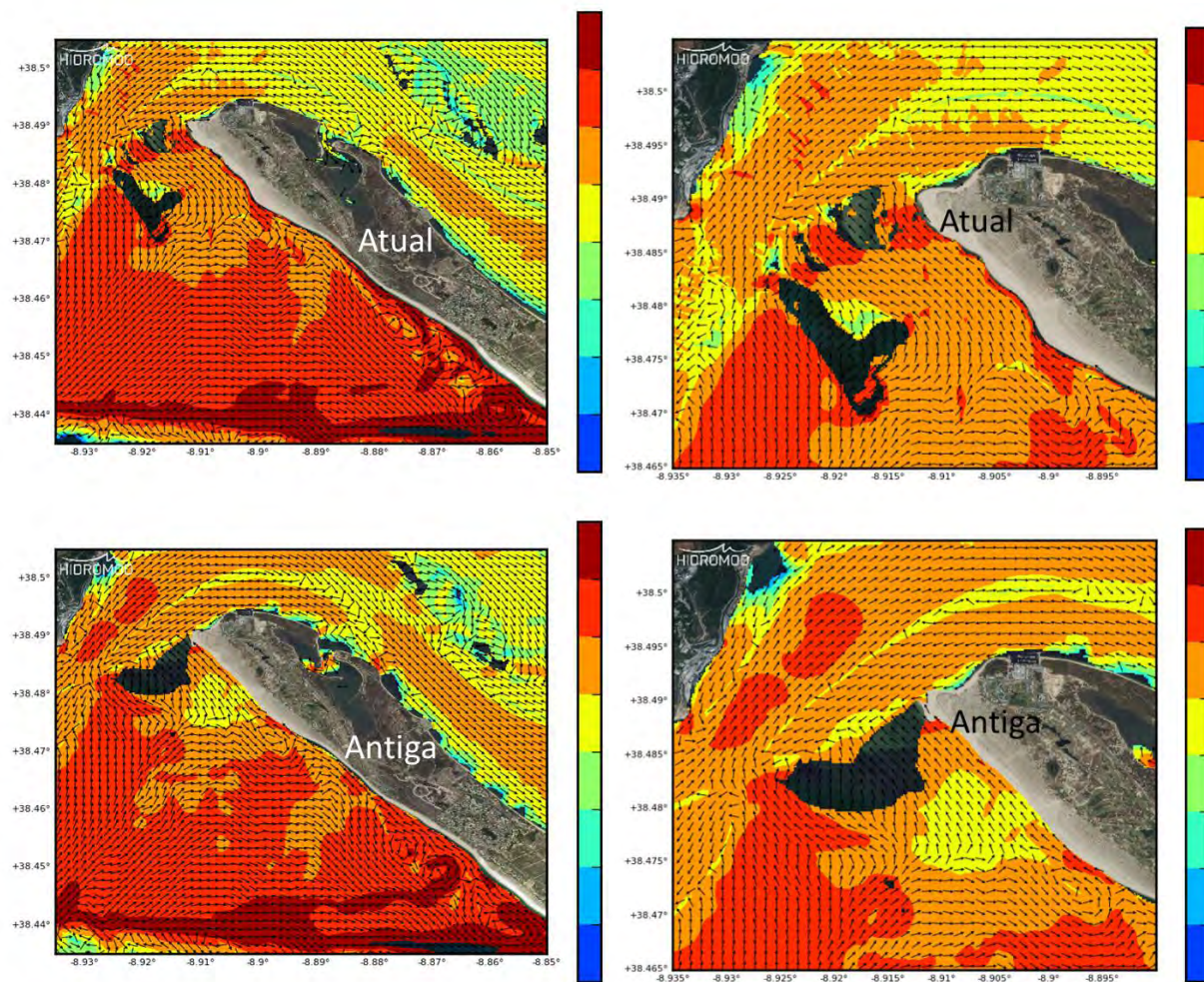


Figura 58: Península de Troia. Transporte residual considerando a ação combinada de maré e ondas com H_s : 4m, T_p : 14s, Dir : 247.5. Situações “atual” e “antiga” (azul menos intenso e vermelho mais intenso).

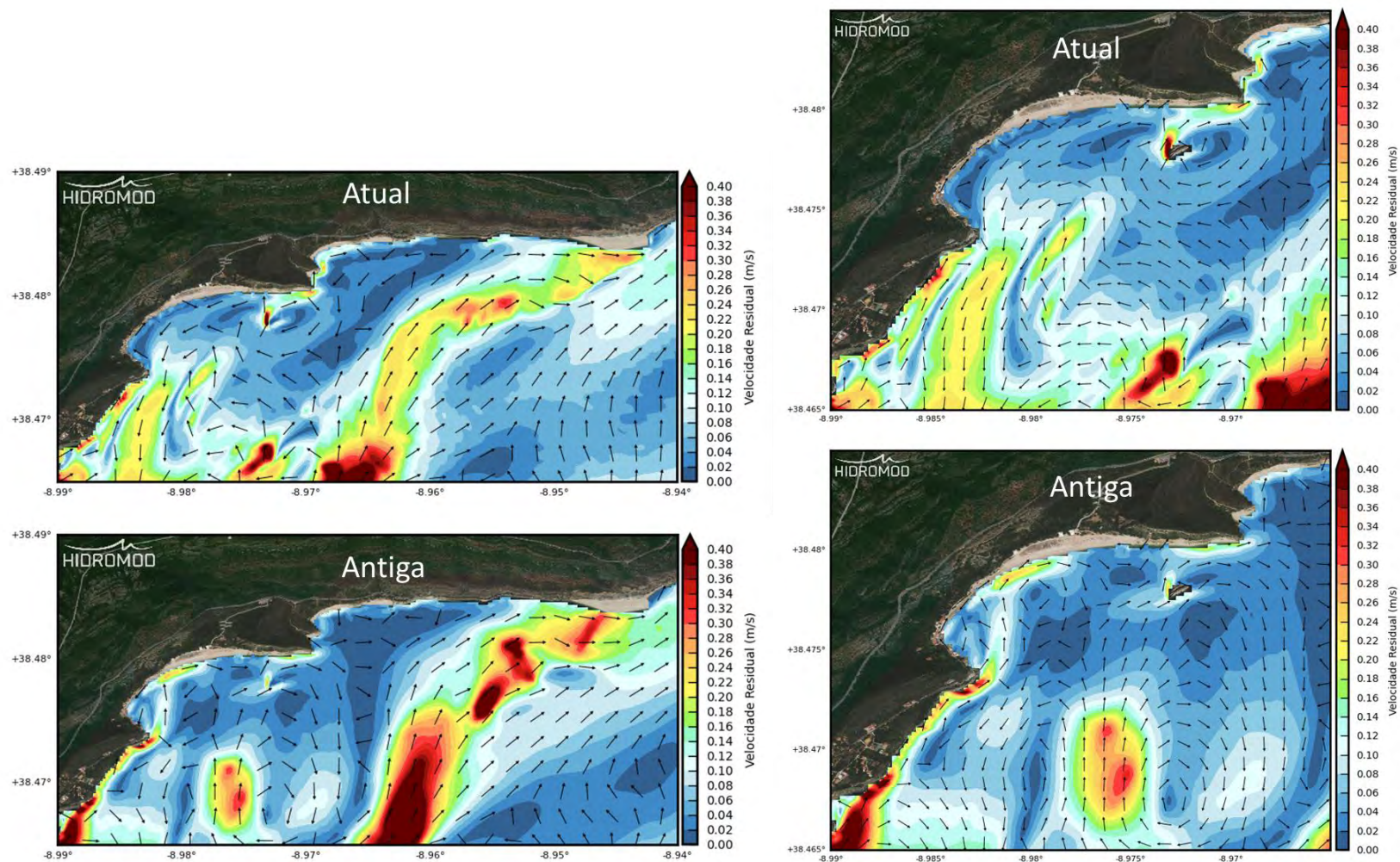


Figura 59: Trecho Portinho-Figueirinha. Velocidade residual considerando a ação combinada de maré e ondas com H_s : 8m, T_p : 20s, Dir : 292.5. Situações “atual” e “antiga”.

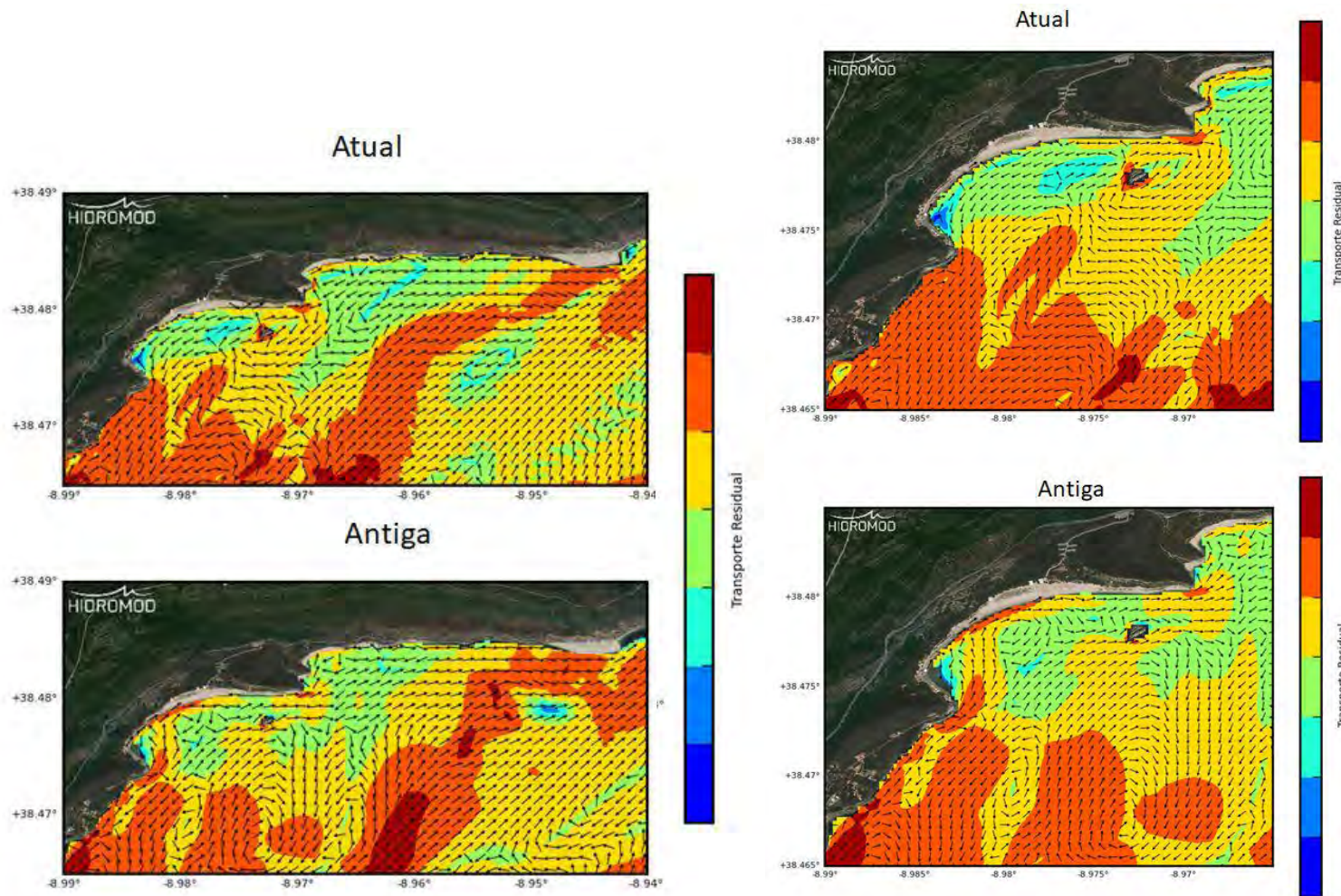


Figura 60: Trecho Portinho-Figueirinha. Transporte residual considerando a ação combinada de maré e ondas com H_s : 8m, T_p : 20s, Dir : 292.5. Situações “atual” e “antiga”. (azul menos intenso e vermelho mais intenso)

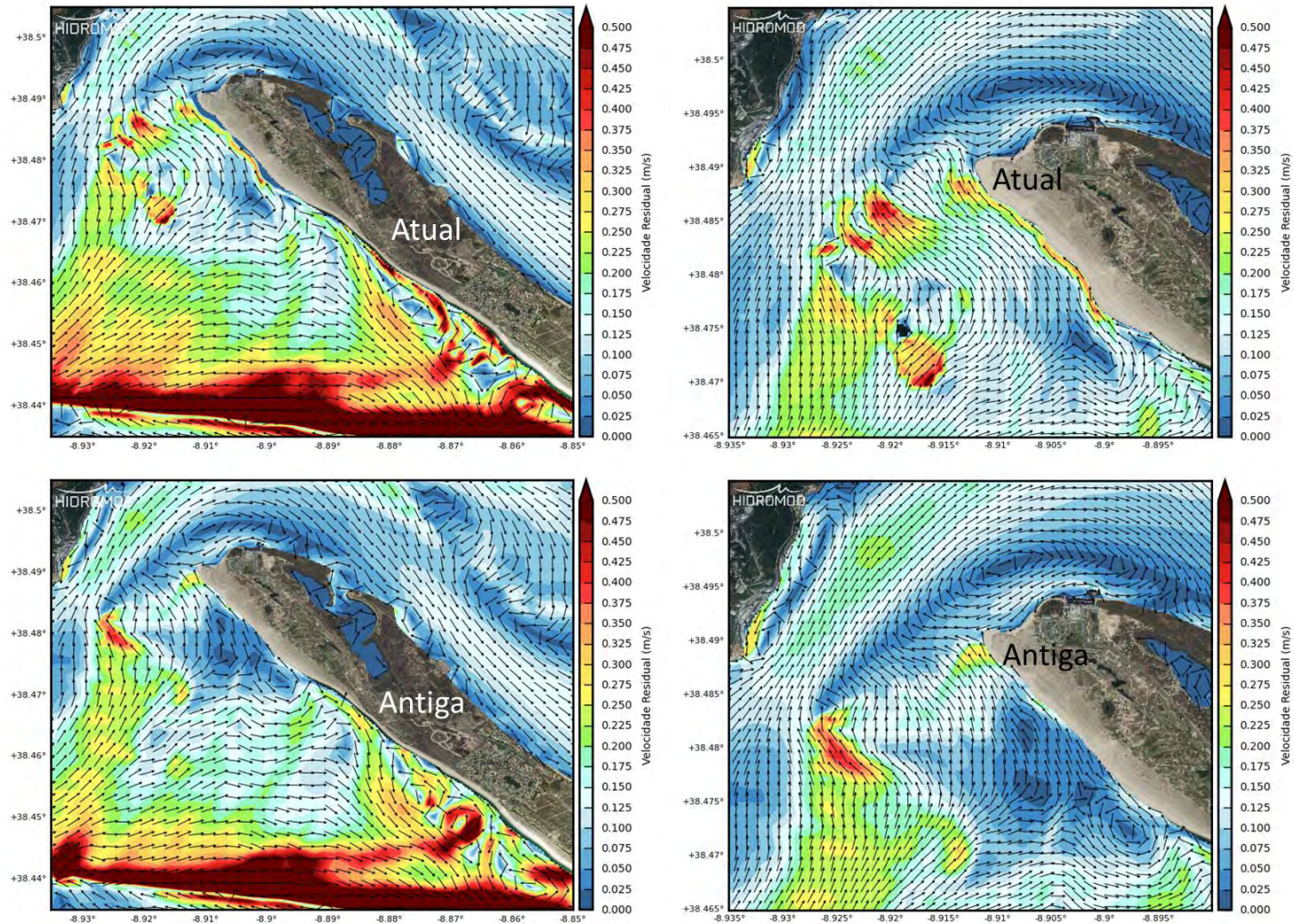


Figura 61: Península de Troia. Velocidade residual considerando a ação combinada de maré e ondas com H_s : 8m, T_p : 20s, Dir : 292.5. Situações “atual” e “antiga”.

5 MODELO CONCEPTUAL

5.1 CONSIDERAÇÕES PRÉVIAS

Da análise dos resultados dos modelos anteriormente apresentados e doutros conjuntos de informação relevantes tais como fotografias, imagens de satélite, bibliografia e experiência dos utilizadores, é possível estabelecer um modelo conceptual que explique alguns dos fenómenos que têm vindo a ser observados na área de interesse deste estudo (erosão costeira por exemplo).

Este modelo para além de permitir estabelecer uma hipótese para explicação da dinâmica local, permite igualmente fornecer pistas sobre eventuais impactes de medidas mitigadoras potenciais ou de projetos de intervenção que estejam a ser equacionados. Nesta análise alguns pressupostos têm de estar presentes desde o início:

- ✚ A existência dum porto em Setúbal servido por um canal que sofre dragagens periódicas de manutenção é um facto e, como tal, qualquer análise que se pretenda fazer em relação a obras futuras, sejam elas a dragagem do canal ou o enchimento artificial de praias terá de partir da situação atual e não a duma situação hipotética em que não existissem quaisquer pressões ou problemas sobre a área em questão;
- ✚ Na situação atual observa-se um processo erosivo no trecho Creiro-Portinho da Arrábida, sobre o qual é fundamental perceber as razões que estão na sua origem mas que, por já existir, não poderá ser confundido com eventuais impactes cumulativos que possam vir a decorrer de intervenções futuras.

5.2 VERTENTE PATRIMONIAL

A fixação Humana nas margens do estuário do Sado foi moldada por três classes de fatores: recursos faunísticos marino-estuarinos, produção salineira e boas condições de navegabilidade e portuárias. (Andrade, Cabeçadas, Soares, Lopes, & Freitas, 2008).

Os mais antigos vestígios da presença do Homem remontam ao povoado neolítico do Faralhão e provavelmente em Santo António, no lugar da antiga ermida de Santa Catarina (Ventura, Ramalho, & Sousa, 2017). Desde o neolítico até ao presente que o estuário do rio foi palco de intensa actividade. (Ventura et al., 2016). No período romano a zona do estuário do Sado e até à zona de Sesimbra foram hospedeiras de uma série de actividades marítimas, das quais destaca-se o complexo Industrial Romano

de Tróia, mas também Caetobrix ou Cetóbriga (Perestrello, 1934). Em Setúbal e Tróia, a especialização económica na antiguidade é bem reveladora da exploração exaustiva de todo o potencial natural do meio aquático. A defesa deste importante complexo marítimo-portuário ocorre com a fortificação da costa, parte da política da dinastia de Avis, que, após as guerras da sucessão, manda construir a fortaleza de Outão. Seguem-se as fortificações e renovações do período filipino e da Restauração (Perestrello, 1934).

É no período contemporâneo que se desenvolvem as infraestruturas marítimo-portuárias, com grandes alterações no século XX que levam ao atual porto de Setúbal. Em franco declínio após Tróia e com as suas funções portuárias gradualmente transferidas para jusante, em direção a Alcácer do Sal, surge uma verdadeira revitalização da atividade marítimo-turística com o investimento das últimas décadas do século XX.

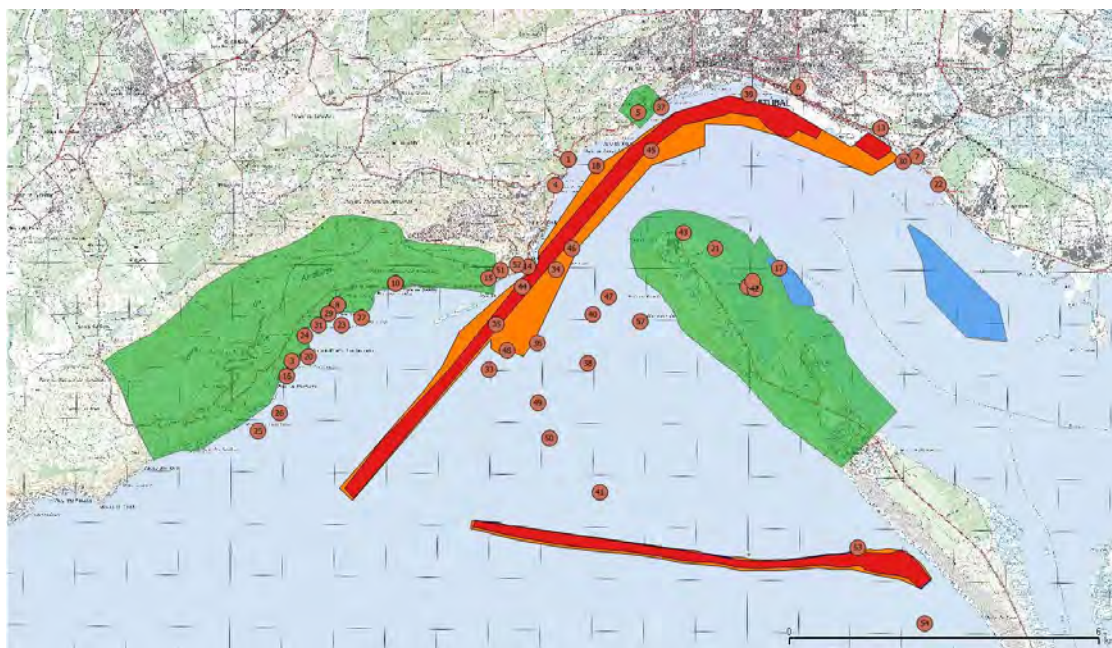


Figura 62: Estações arqueológicas na zona de estudo

Testemunhos desta história são os mais de 80 achados fortuitos e estações arqueológicas conhecidas ou referenciadas na zona (cf. Tabela 5). Se consideramos as associadas ao curso fluvial estes testemunhos ultrapassam uma centena.

Tabela 5: Estações arqueológicas referenciadas

Data de Afundamento/Período	Nome (Tipologia) / Tipo de sítio	Causa / Tipo de sítio	Local	Código/Número
1551	"La Piedad" (Nau Espanhola)	Naufrágio	Costa de Setúbal	CNS: 29292
1742	"Maréchal de Coigny" (Navio Francês de 250 toneladas)	Naufrágio	Barra do Sado	CNS: 29291
1609/1610	"Nuestra Señora de Gracia" (Caravela Espanhola)	Naufrágio	Setúbal (Arrábida)	CNS: 29293
1696	"Nuestra Señora de los Reyes" (Gabarra Espanhola)	Naufrágio	Barra do Sado	CNS: 29289
Contemporâneo	Baía da Armação (Âncora)	Achado	Setúbal	CNS: 23858 / Processo: 2003/094
Moderno	Creiro (Fragmento de porcelana chinesa)	Achado Isolado	Setúbal/São Lourenço e São Simão	CNS: 26666
1610	Navio Espanhol (Nome desconhecido)	Naufrágio	Perto do porto de Setúbal	CNS: 29296
1698	Patacho estrangeiro (Nacionalidade e Nome desconhecidos)	Naufrágio (Encalhe)	Bancos de areia da barra do Sado	CNS: 32286
Indeterminado	Palença 1 (Nacionalidade e Nome desconhecidos)	Naufrágio	Setúbal (Posicionado)	CNS: 26671
1697	Patacho Espanhol (Nome desconhecido)	Naufrágio	Setúbal / Sado	CNS: 29297
1788	Polaca Espanhola (Nome desconhecido)	Naufrágio	Costa de Setúbal	CNS: 29295
Moderno	Canhão em Bronze (Achado)	Achado	Praia dos Pilotos (Setúbal)	CNS: 23642
Romano e Alta Idade Média	Troia (Centro fabril de salga de peixe de época Romana)	Complexo Industrial	Margem Esquerda do rio Sado, frente a Setúbal	CNS: 2 / Processos: S - 00002, 7.12.2.1 e 99/1(161)-B
Romano	Comenda (Villa e estabelecimento de produção de salga de peixe)	Villa	Margem Esquerda e perto da Foz da Ribeira da Ajuda	CNS: 3452 / CNANS: 5283 / Processo: S - 03452

Romano	Rasca (Cetária)	Cetária	Setúbal	CNS: 4931
Paleolítico	Toca do Pai Lopes (Estatueta Paleolítica)	Achado Isolado	Gruta subterrânea (Ver acesso em "Notas")	CNS: 5265 / S - 05265 e 2001/1(606)
Romano	Pedra Furada (Cetária)	Cetária	A Este da cidade de Setúbal / Margem direita do Estuário do Sado	CNS: 5545
Romano	Senhora da Graça (Cetária)	Cetária	Setúbal	CNS: 5546
Romano	Quinta da Alegria (Cachofarra) (Cetária) (Destruído)	Cetária	Margem direita do Estuário do Sado	CNS: 5554 / CNANS: 5284
Neolítico e Calcolítico	Setúbal - Outão (Vestígios Diversos)	Vestígios Diversos	Setúbal (Ver acesso em "Notas")	CNS: 5555
Calcolítico (Final)	Lapa dos Morcegos (Outão) (Gruta)	Gruta	Setúbal (Outão)	CNS: 8152 / Processo: 2005/1(688)
Romano e Moderno (Cronologia Variada)	Fundão de Troia (Fundeadouro)	Fundeadouro	Setúbal (Troia)	CNS: 22660 / Processos: 1985/009, 1995/002, 1997/013, 2002/083 e N-0739
Romano	Comenda (Lusitana 2) (Ânfora)	Achado Isolado	Fundão (25m profundidade) Setúbal/Sesimbra	CNS: 23178
Romano	Troia - porto lusitano - romano (porto)	Porto	Fundão de Troia	CNS: 23287
Indeterminado	Moinho de Troia (Setúbal)	Moinho de Maré	Troia	CNS: 23744
Romano, Império	Praia da Sapec (Ânforas)	Achado Isolado	Praia de Sapec (Península de Mitrena)	CNS: 23817 / Processo: 2005/1(188)
Romano	Figueirinha (Vestígios Diversos)	Vestígios Diversos	Setúbal/Santiago do Cacém/São Francisco da Serra	CNS: 33088
Contemporâneo	Troia 1 (Embarcação de Madeira)	Naufrágio	Setúbal/Grândola/Carvalhal	CNS: 33497 / Processo: 2011/032 e 2012/1(070)
Contemporâneo	Troia 2 (Barca)	Naufrágio	Praia Leste junto às ruínas romanas de Tróia	CNS: 33731 / Processo: 2012/031
Romano	Tróia - Marina (Achados Isolados)	Achados isolados	Zona próxima ao Cais de	CNS: 36296 / Processo: 1998/149 e

			acostagem de Trola	99/1(161)-B
1829	"Feliz Pensamento" (late Português)	Naufração	Setúbal/Sesimbra	CNS: 29428
1602	"São Valentim" (Tipologia desconhecida)	Naufração	Setúbal/Sesimbra	CNS: 29738
1803	"William" (Brigue Norte-Americano)	Naufração	Sesimbra (Lagoa de Albufeira)	CNS: 29294
Romano	Arcanzil 1 (Sesimbra) - Cepo Arqueonáutica	Achado Isolado	Sesimbra (Santiago)	CNS: 24016 / Processo: 1994/004
Indeterminado	Arcanzil 2 (Sesimbra)	Achado Isolado	Sesimbra	CNS: 24109
Moderno	Arrábida 2	Achado Isolado	Sesimbra	CNS: 24264
Moderno	Arrábida 3	Achado Isolado	Sesimbra	CNS: 24273
Moderno	Arrábida 4	Achado Isolado	Sesimbra	CNS: 24328
Moderno	Baleeira 1 - Sesimbra	Achado Isolado	Sesimbra	CNS: 28647
Indeterminado	Baleeira 2 - Sesimbra	Achado Isolado	Sesimbra	CNS: 30489 / Processo: 2008/016
1642	Batel Português pertencente ao navio "Bom Jesus de Santa Teresa"	Naufração	Praia da Albufeira (Sesimbra)	CNS: 29286
Romano	Cabo Espichel - Fundeadouro (Conjunto de cepos de âncora)	Fundeadouro	Zona Oceânica do mar de ancão	CNS: 22734 / Processo: 1968/001
Romano, Alto Império	Espichel 2 - Ânforas	Achado Isolado	Sesimbra	CNS: 24038
Alta Idade Média	Espichel - Moedas	Achado Isolado	Ao largo do Cabo Espichel	CNS: 23639
Indeterminado	Espichel - Bronze Indeterminado	Achado Isolado	Sesimbra	CNS: 21904
Romano	Espichel 1 - Ânforas	Achado Isolado	Sesimbra	CNS: 23003
Contemporâneo	Espichel 3	Naufração	Sesimbra (Ao largo do Cabo Espichel)	CNS: 25858
Moderno	Espichel 4	Achado Isolado	Sesimbra	CNS: 26017
Romano	Espichel 5	Achado Isolado	Sesimbra	CNS: 28541 / Processo: 1994/013

Romano	Lagoa de Albufeira (Sesimbra) (Cepo)	Achado Isolado	Lagoa de Albufeira (Sesimbra)	CNS: 23845
1739	Navio Frânces (Tipologia Desconhecida)	Naufração	Ao largo do Cabo Espichel	CNS: 29288
Romano	Portinho da Arrábida - Pesos de Rede	Achado Isolado	Portinho da Arrábida	CNS: 24063 / Processo: 1996/002
Contemporâneo	Portinho da Arrábida - Âncora	Achado Isolado	Portinho da Arrábida	CNS: 24036
Romano	Portinho da Arrábida - Ânforas	Achado Isolado	Portinho da Arrábida	CNS: 28604
Moderno	Praia das Lagosteiras / Lagosteiros	Naufração	Praia das Lagosteiras (Sesimbra)	CNS: 21852 / Processos: 1970/001 e JN9/1(073)
Moderno	Sesimbra - Barco das Telhas	Naufração	Sesimbra	CNS: 27951 / Processo: 2005/053
Romano	Sesimbra - Cepo 1	Achado Isolado	Sesimbra	CNS: 22925
Romano	Sesimbra - Cepo 2	Achado Isolado	Sesimbra	CNS: 23995 / Processos: 1994/013
Romano	Sesimbra - Cepo 3	Achado Isolado	Sesimbra	CNS: 24083
Indeterminado	Sesimbra - Cepo 4	Achado Isolado	Sesimbra	CNS: 26474
Romano	Sesimbra - Estatueta	Achado Isolado	Sesimbra (Santiago)	CNS: 23972 / Processos: 1993/006
Indeterminado	Sesimbra - Moeda	Achado Isolado	Sesimbra	CNS: 24325
Moderno	Sesimbra - Sino	Achado Isolado	Sesimbra	CNS: 24304
Romano	Sesimbra - Âncora Romana	Achado Isolado	Sesimbra	CNS: 22924
1864	"Bloomer/Blower" (Escuna/Patacho Inglês)	Naufração	Costa da Galé (Grândola/Melides)	CNS: 36429
1802	"Fortruende ou Confiança" (Navio Sueco)	Naufração	Grândola/Melides	CNS: 29299
1859	"Margarita" (Brigue Espanhol)	Naufração	Grândola/Carvalhal	CNS: 36428
Indeterminado	Monte Novo do Sul - Cais palafita	Cais	Monte Novo do Sul (Setúbal)	CNS: 25851
Contemporâneo	Atalante I	Naufração		UKHO
Contemporâneo	Santa Luzia	Naufração		UKHO

Contemporâneo	Furão	Naufração		UKHO
Moderno	Espiritu Sanctu	Naufração	Carta Arqueológica	PDM Grândola
Moderno	Santa Catarina (Nau)	Naufração	Carta Arqueológica	PDM Grândola
Contemporâneo	Troia 1	Naufração	Carta Arqueológica	PDM Grândola
Moderno	San Antonio (Nau)	Naufração	Carta Arqueológica	PDM Grândola
Moderno	Galeão Espanhol	Naufração	Carta Arqueológica	PDM Grândola
Moderno	Nuestra Señora del Rosario (Nau)	Naufração	Carta Arqueológica	PDM Grândola
Contemporâneo	Bergantim Santo António	Naufração	Carta Arqueológica	PDM Grândola
Contemporâneo	Pândega (Canoa)	Naufração	Carta Arqueológica	PDM Grândola
Contemporâneo	Caíque Rápido	Naufração	Carta Arqueológica	PDM Grândola
Medieval/Islâmico	Praia dos Pilotos	Achado isolado	Setúbal/Arrábida	
Indeterminado	Praia da Saúde	Estruturas Portuárias	Setúbal	
Indeterminado	Sítio dos Cantoneiros	Estrutura	Setúbal	

De especial interesse são os testemunhos arqueológicos dentro da área de estudo. É preciso denotar que existem uma série de ações a que as estações arqueológicas podem ser sujeitas que determinam a sua sobrevivência a longo termo (cf. Tabela 6). Dependente da sua composição as estruturas arqueológicas são mais ou menos suscetíveis a essas ações.

Tabela 6: Ações de meteorização

Grupo	Tipo
Mecânicas	Peso
	Ação humana
	Movimentos térmicos
	Assentamentos / deslizamentos
Físicas	Descompressão
	Termoclastia
	Crioclastia
	Haloclastia
Químicas	Oxidação
	Hidrólise
	Carbonatação
Biológicas	Desagregação
	Transporte

De facto, considera-se um ponto comum, não obstante a diversidade de elementos pró-ativos ou destrutivos, a sobrevivência das estações arqueológicas depende de uma situação de equilíbrio. Conforme Garcia *et al* (2003) demonstram, as estações arqueológicas subaquáticas são especialmente vulneráveis a alterações do foro químico e biológico. Estas alterações ocorrem com ciclos de transporte sedimentar, e em reação à agitação marítima.

Encontra-se ainda por determinar, não obstante diversos estudos de longo curso, se o grau de **sobrevivência das estações é diretamente relacionado com a “altura” da barreira sedimentar**. Estudos mais recentes demonstram que o início da estabilização dos processos ocorre aquando existe dois metros de potência estratigráfica entre a superfície de uma estação arqueológica e o fundo marinho, dependendo sempre da composição dos sedimentos.

5.3 EVOLUÇÃO DA POSSANÇA DO DELTA AO LONGO DOS ÚLTIMOS ANOS

A questão da evolução do delta ao longo dos últimos anos é um tema bastante relevante podendo constituir um elemento importante para a análise e compreensão da dinâmica local. O problema neste caso é da escassez de dados que permitam fazer uma avaliação rigorosa dos volumes de areia que compõem este delta.

No parágrafo 1.1 é referida a defesa da tese por parte de Brito (2009) e de LNEC (1989) que nos últimos anos se terá vindo a observar um processo de perda de areia do delta com especial ênfase no período a partir do início dos anos 80. Também ambos os autores parecem concordar na tese que entre 1930 e o final dos anos 70 se teria observado um processo oposto de assoreamento.

Como também já se referiu anteriormente, sem pôr em causa estas conclusões por falta de elementos sólidos para o efeito, julga-se que para sustentar melhor estas conclusões seria necessário providenciar algum tipo de explicação física para a origem das fontes de sedimentos que teriam sido responsáveis pelo processo de assoreamento e para as zonas para onde esses sedimentos se passaram depois a perder ao longo das últimas décadas quando se iniciou o processo erosivo.

Tendo em consideração a morfologia da zona costeira que limita o delta não parece ser imediata a identificação das fontes sedimentares na costa que pudessem estar a alimentar um processo de assoreamento generalizado numa zona tão extensa como o delta. Poder-se-ia considerar então a hipótese destes sedimentos estarem a ser exportados a partir do estuário ou ter origem na deriva litoral para norte ao longo do arco Tróia – Sines alimentada pela erosão das arribas terrosas localizadas no centro do arco. No entanto Brito (2009) conclui que no mesmo período se terá observado igualmente um processo de assoreamento do próprio estuário que teria inclusivamente tido reflexos numa redução do respetivo prisma de maré: *“de acordo com as estimativas feitas para os períodos entre 1968 e 1995/2002, tanto o volume do prisma de maré como o do espaço de acomodação decresceram consistentemente, tendo os seus volumes sido reduzidos em cerca de 7% e 8%, respetivamente. Esta tendência decrescente do prisma de maré ter-se-á iniciado pelo menos a partir de 1930, estimando-se que a área da secção da barra do estuário terá sofrido uma redução em cerca de 11%, desde essa data até 2002.”*

A consideração dum processo tão extenso de assoreamento, envolvendo não só a zona interior do estuário como o delta de vazante, implicaria necessariamente a disponibilidade de muitos milhões de metros cúbicos de sedimentos para os quais as potenciais origens acima referenciadas poderão não ser suficientes para o explicar...

Por outro lado, a possível explicação dum eventual processo erosivo será mais fácil já que a zona para onde os sedimentos se poderiam perder, caso houvesse condições físicas para isso, poderá ser bastante extensa (em última análise toda a extensão do bordo do delta). Neste aspeto, da análise das figuras mostrando a comparação de batimetrias em Brito (2009), até se poderá pôr a hipótese de (pelo menos) uma parte dos sedimentos erodidos do bordo do delta estarem a ser transportados para cima do próprio delta...

Em qualquer caso seria importante perceber o que mudou tão radicalmente a partir no início da década de 80 para inverter este processo. Uma potencial explicação poderia ser a alteração das condições meteo-oceográficas. Efetivamente olhando para a evolução da NAO (North Atlantic Oscillation) desde a década de 80 parece haver uma tendência para uma maior dominância de períodos de NAO positiva, embora essas condições já pareçam existir ao longo da própria década de 70 (cf. Figura 63).

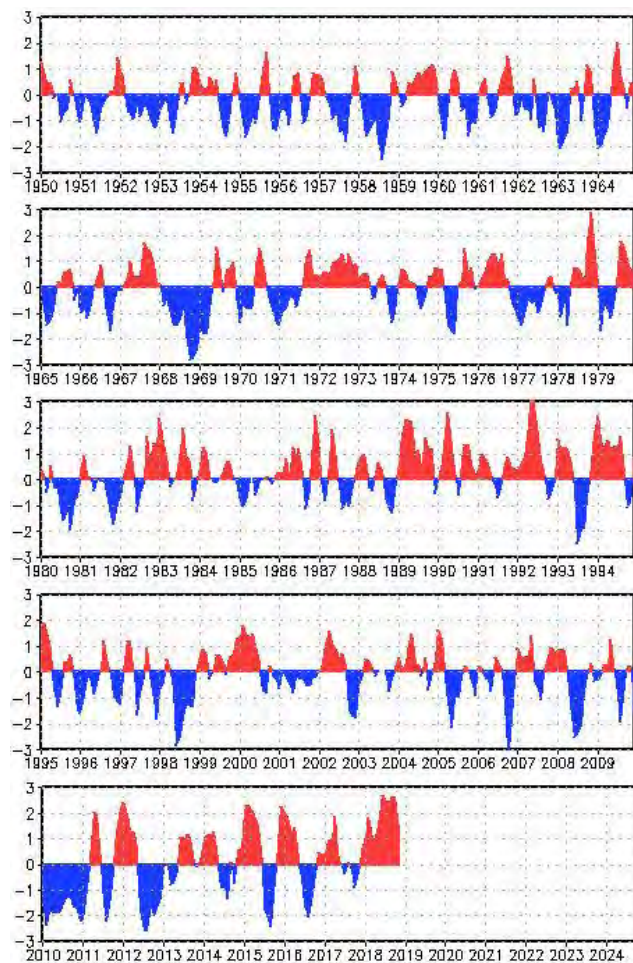


Figura 63: Evolução da NAO desde 1950 até ao presente (fonte: NOAA Climate Prediction Center)

Não se deverá no entanto excluir, na nossa opinião, a incerteza na avaliação das taxas de assoreamento/erosão associada à precisão dos elementos batimétricos utilizados na avaliação. Embora as metodologias utilizadas por Brito (2009) sejam corretas, elas baseiam-se em dados que, sobretudo no caso dos levantamentos mais antigos, não merecerão necessariamente a mesma confiança. Note-se que uma simples diferença nuns poucos centímetros na referência do *datum* vertical (só para dar um exemplo) resultaria numa diferença de muitos milhões de metros cúbicos na avaliação da evolução entre dois **levantamentos consecutivos...**

Independentemente desta discussão uma coisa é certa: tem-se verificado ao longo do tempo uma dinâmica relevante dos processos de transporte que tem conduzido a alterações relevantes da geometria dos fundos do delta. Se nos focarmos por exemplo na zona do banco sedimentar da margem direita do canal da barra, que se estende desde a Figueirinha até à zona do Portinho, será um facto indiscutível que a distribuição de areia ao longo do banco se alterou significativamente. Por exemplo olhando para duas imagens do Google Earth (*cf. Figura 64*) separadas de apenas 10 anos (2004-2015) **podem “adivinhar-se” alterações da** distribuição dos bancos de areia com um aumento substancial da língua de areia que se estende a partir da Figueirinha e um aumento do banco de areia em frente à baía do Portinho.

Sendo mais objetivos, foi efetuada uma comparação entre os dados do levantamento de 2018 do banco norte do delta **com os dados correspondentes à situação que designamos por “Antiga” tendo pro objetivo** avaliar se nesta área se terá assistido nas últimas décadas a um processo de perda ou ganho de areias. Para retirar desta equação os volumes correspondentes à dragagem do canal (que não se encontrava às **cotas atuais na situação “Antiga” limitou-se** esta análise à zona limitada por profundidades inferiores a 10 m (*cf. Figura 65*).

Os resultados desta análise apontam no sentido do balanço ser positivo e se ter observado um acréscimo de sedimentos da ordem de 1 milhão de metros cúbicos contrariando desta forma a tese da erosão generalizada nesta zona do delta. Atente-se no entanto que, como também se referiu anteriormente, **os levantamentos que estão na base da situação “Antiga”, ao contrário do levantamento de** 2018, incluem um número limitado de sondas, que (no mínimo) limitam a geração dum mapa digital de terreno com o detalhe do levantamento de 2018 e, como tal, também este tipo de análise tem de ser olhado com a devida cautela.



Figura 64: Imagens Google Earth do trecho de costa Figueirinha-Portinho correspondentes respetivamente a 2004 (topo) e 2015 (baixo)

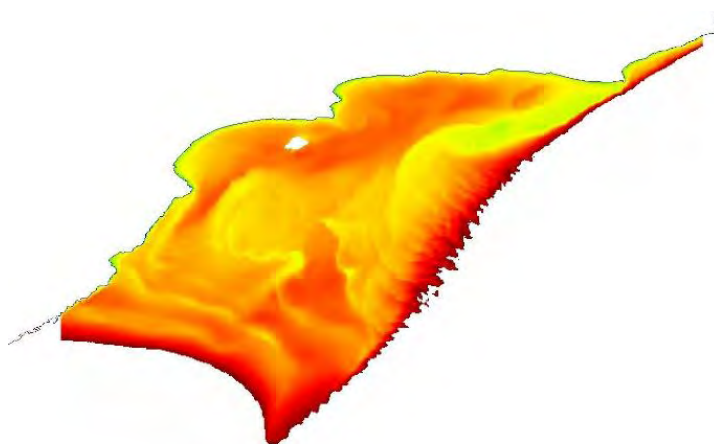


Figura 65: Delimitação da área levantada no banco norte com profundidades inferiores a 10 m (z.h.)

Outra hipótese que tem sido levantada é a do canal estar a promover um efeito de sumidouro. No entanto, a verificar-se efetivamente a existência deste sumidouro de sedimentos, deveria ser possível observar onde esses sedimentos se acabam por depositar. Ao fim de tantos anos, e com um jato de vazante a promover a exportação de sedimentos, deveria ser possível observar um delta de sedimentos na extremidade do canal. No entanto, olhando para os levantamentos multifeixe disponíveis, como por exemplo o relativo ao apresentado na *Figura 66* não se veem vestígios significativos da existência de tal delta.



Figura 66: Levantamento multifeixe do canal de navegação realizado em 2016

Não querendo assumir este argumento como prova da inexistência do sumidouro, uma vez que estes dados podem ser vistos como um indício mas não como prova indiscutível e que até se poderia pôr a hipótese dos sedimentos exportados estarem na realidade a distribuir-se por uma área suficientemente vasta que impeça a identificação de tal delta, julga-se que a fundamentação duma ou outra coisa terá de ser necessariamente suportada em dados mais sólidos. Neste particular o plano de monitorização proposto no âmbito do projeto de aprofundamento do canal deverá vir a providenciar dados de grande relevância para esta análise.

5.4 INTERPRETAÇÃO DOS PROCESSOS EROSIVOS NO TRECHO CREIRO-PORTINHO

Tendo por base a análise dos resultados das simulações efetuadas é possível comparar os padrões hidrodinâmicos e de transporte tendo por base os dados correspondentes a uma situação de configuração **de fundos que poderá ter existido no passado (designada de situação “antiga” nos capítulos anteriores)** com os padrões correspondentes a uma batimetria **designada por situação “atual”** que incorpora os dados do levantamento da margem norte do delta efetuado no terceiro trimestre de 2018 e como tal representará uma situação representativa da realidade atual para esta zona.

A primeira constatação que é possível retirar deste exercício, a que se podem juntar indícios decorrentes da análise das imagens do Google Earth, é que se observou ao longo dos últimos anos uma efetiva alteração da disposição das areias no banco que se mostrou anteriormente na *Figura 43*. Na comparação dos dois levantamentos (Antigo e Atual) observa-se um claro aumento na dimensão do banco e areia que se estende a partir da Figueirinha que, **no caso da batimetria “atual”, acaba por traduzir numa “barreira”** sedimentar. Estas alterações, como se verá de seguida, resultam em consequências relevantes para os padrões de transporte.

Da análise dos padrões de circulação residual apresentados anteriormente fica em evidência a **“compressão” da célula de circulação em frente ao trecho Creiro-Figueirinha** com um aumento (ainda que ligeiro) das correntes junto à costa e uma diminuição da componente do escoamento perpendicular à costa (*cf. Figura 51*).

A ação combinada da maré e de ondas ao largo mostra ainda que enquanto na situação “antiga” existe um transporte relevante do banco para a costa, com potencial para chegar à praia, já na situação **“atual” essa** capacidade está bastante reduzida, para além de se observar um incremento significativo na capacidade de transporte para jusante na zona a jusante do Portinho.

Resulta desta análise uma conclusão que, a comprovar-se pelos levantamentos em curso, permitirá avançar com uma possível explicação dos problemas de erosão observados neste trecho costeiro: o incremento da possança do banco que se prolonga desde a Figueirinha alterou a circulação residual na área e terá reduzido a alimentação natural da praia. As alterações progressivas dos fundos que terão contribuído para a alteração dos processos de circulação e contribuído para uma prevalência do transporte para *offshore* a partir da praia, pelo menos durante períodos tempestivos. Nas zonas submersas próximas do Portinho onde há alguma acumulação de sedimentos, a ondulação modal não conseguirá transportá-la de volta para terra, uma vez que a granulometria dos sedimentos tem um calibre elevado. Note-se que, de acordo com Teixeira (1990), as areias que compunham a praia no período 1988-1990 tinham um calibre tão elevado que a ondulação não era capaz de alterar a morfologia do perfil de praia durante o ano, mesmo em condições hidrodinâmicas extremas anuais. Na *Figura 67* estão representadas as tendências de transporte de areia que ilustram estas conclusões.

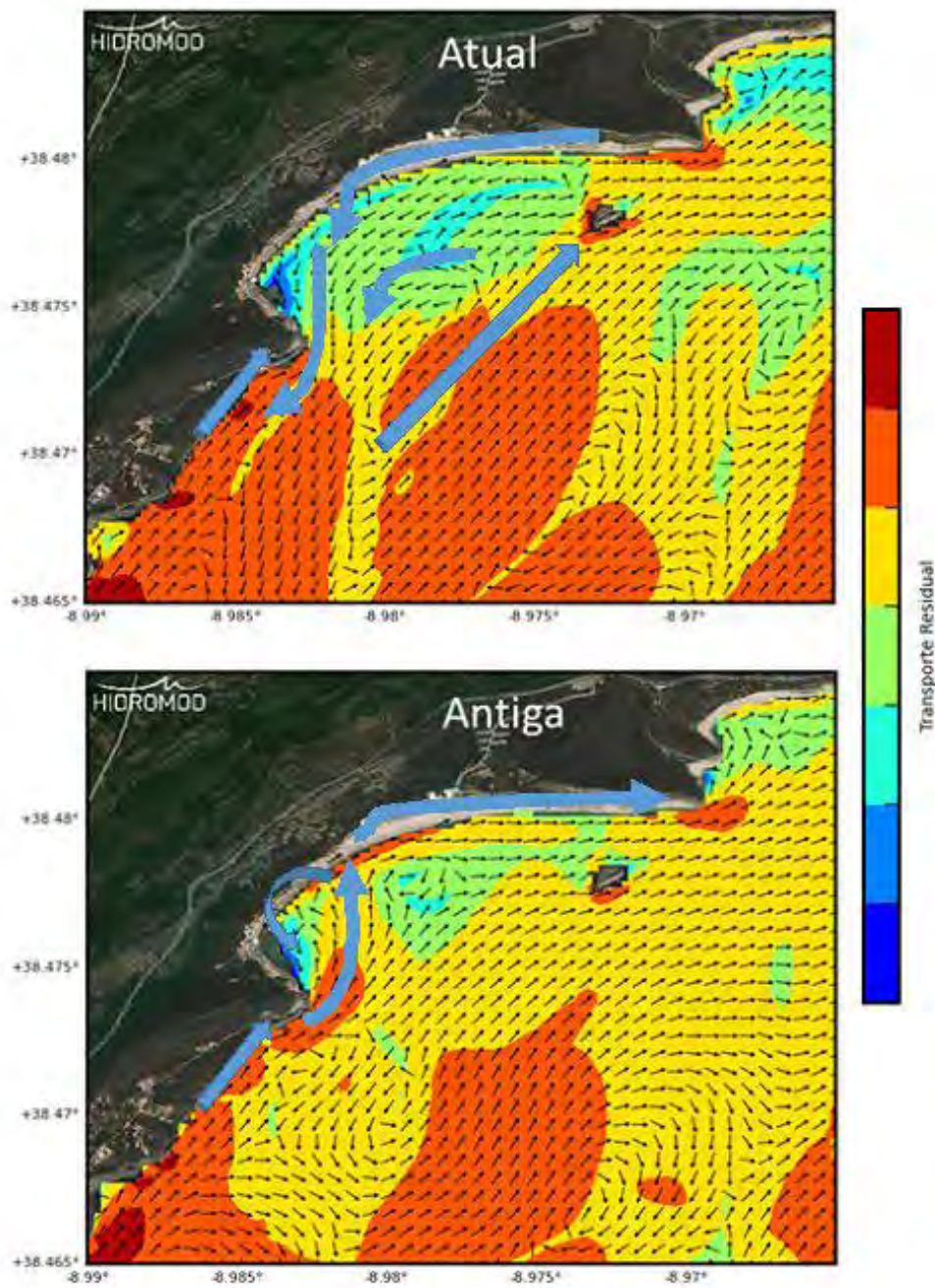


Figura 67: Modelo conceptual de transporte para as situações “antiga” e “atual” em situação de tempestade.

5.5 PAPEL DO CANAL DA BARRA NESTE PROCESSO

Não será fácil atribuir um peso à contribuição do canal da barra para a evolução da batimetria que terá levado à situação atual. Em qualquer caso parece de bom senso admitir que o canal terá tido um papel relevante (se não determinante) para a atual morfologia dos fundos. Utilizando o mesmo bom senso terá de se considerar igualmente que, se o canal não existisse, provavelmente a situação seria outra, mas não necessariamente mais favorável.

5.6 ASPETOS PATRIMONIAIS

Embora o modelo conceptual da movimentação das areias do Sado proposto na Figura 15 não seja passível de ser utilizado para explicar outros contextos correspondentes a épocas mais remotas, onde a geometria dos fundos poderia/deveria ser bastante diferente da atual, permite perceber uma dinâmica intensa dos fundos que condiciona e condicionou a atividade humana nesta área por via do condicionamento do tráfego marítimo.

Numa perspetiva metodológica, os ciclos de migração de sedimentos devem muito provavelmente causar uma estratigrafia bastante complexa. A cronologia de elementos arqueológicos não deverá seguir uma estratigrafia linear, sendo aparente que elementos da antiguidade possam residir em camadas superiores à de elementos contemporâneos. Tendo em consideração um conjunto de fatores em que se inclui a cota de sedimento aquando da atividade humana no local (variável em ciclos) e o efeito de transporte sedimentar, poderá colocar-se a hipótese de ocorrer a migração dos elementos para cotas superiores ou inferiores.

Por exemplo, presentemente ocorre a exposição de unidades estratigráficas com estruturas do período clássico nas zonas do Creiro, Comenda e Praia dos Cantoneiros (Fraga & Albuquerque, 2018) sendo que esses marcos cronológicos, indiciam que os níveis de sedimentos atuais poderão estar aproximados aos do período clássico.

Se se considerar que o incremento da possança do banco, que se prolonga desde a Figueirinha, possa **efetivamente agir como uma “barreira” à alimentação da praia e formada em recentes anos, esta interrupção** no ciclo de realimentação das praias, pode explicar a multitude de descoberta de materiais do Período Romano nas nossas águas.

Atualmente o Mar de Ancão, Cabo Espichel conta com 47 achados de cepos romanos, sendo considerado, pela arqueologia um local com mais achados a título nacional, ultrapassando as Berlengas em mais de um

terço de achados (Cardoso, 2014). Seria interessante confrontar as datas dos achados com a evolução dessa barreira.

Sob essa hipótese, sem dúvida que a exposição de mais elementos e estações arqueológicas nos próximos será uma realidade, esperando-se um aumento substancial nas descobertas arqueológicas na região. Infelizmente a interrupção deste ciclo deverá acelerar a destruição destas estruturas inclusive de despojos náuticos, já que são muito sensíveis a exposição aos elementos naturais.

6 CENÁRIOS DE INTERVENÇÃO

6.1 ASPETOS RELACIONADOS COM OS PROCESSOS DE CIRCULAÇÃO E TRANSPORTE

6.1.1 APROFUNDAMENTO DO CANAL DE NAVEGAÇÃO

Tal como já referido anteriormente, do ponto de vista global, não foram identificados impactes significativos ao nível dos processos de hidrodinâmica e transporte decorrentes do aprofundamento do canal. Em qualquer caso, como no estudo de impacte ambiental a avaliação destes impactes teve por objetivo identificar eventuais impactes de forma mais genérica, incluiu-se neste estudo uma avaliação mais detalhada para identificar de forma mais pormenorizada eventuais impactes nestes descritores no trecho Figueirinha-Portinho.

Os resultados obtidos confirmam as conclusões do EIA e mostram que os impactes da dragagem sobre a dinâmica do banco são de muito baixa magnitude (*cf. Figura 69*). Não significa isto que a longo prazo não se possam vir a observar impactes, mas eles, a verificarem-se, resultarão de muito pequenas variações que não é possível extrapolar com base no conhecimento atual.

Mais relevante que isto será efetivamente entender-se que já se produziram alterações significativas na geometria dos fundos (que provavelmente também resultaram de muito pequenas variações ao longo do tempo) que estão a potenciar e vão continuar a potenciar os processos erosivos no trecho Creiro-Portinho independentemente de se proceder ou não ao aprofundamento do canal.

Este é um aspeto muito relevante porque, da discussão pública que se tem verificado à volta do aprofundamento, poderá resultar a perceção errada de que se não se fizer o aprofundamento desaparecem os problemas de erosão neste trecho costeiro.

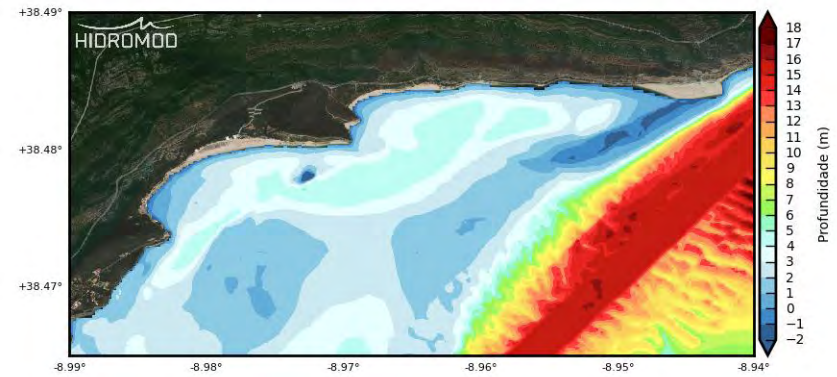
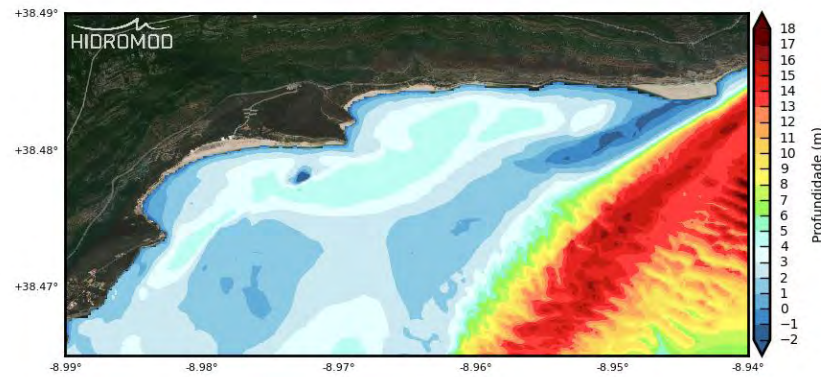
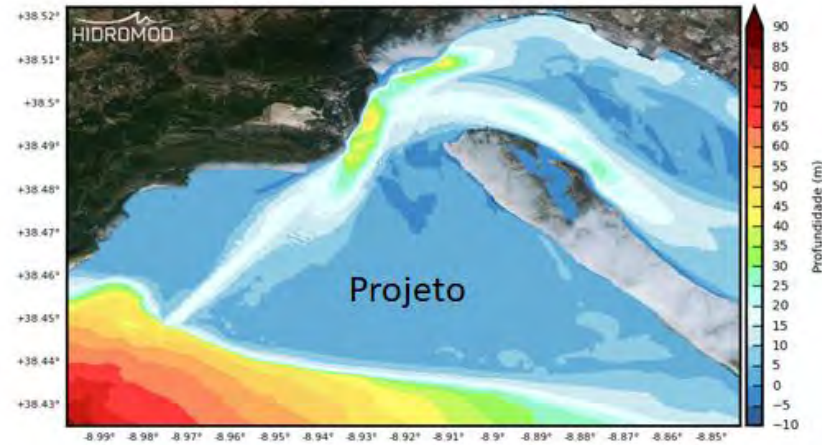
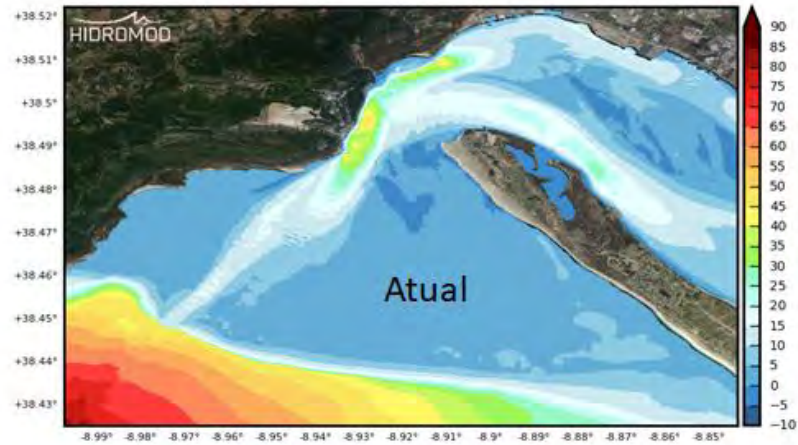


Figura 68: Batimetrias correspondentes às situações atual e de projeto

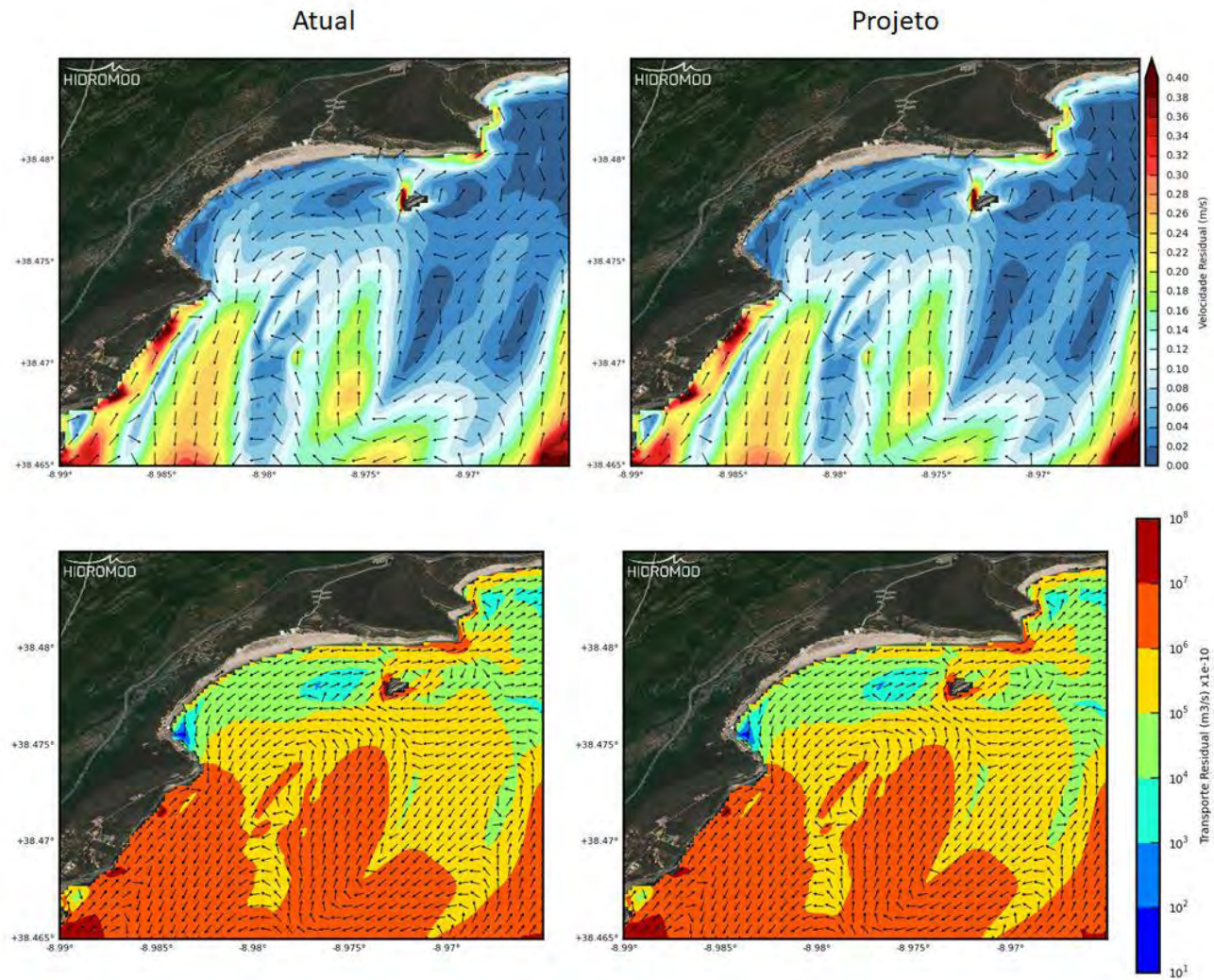


Figura 69: Circulação e transporte residuais nas situações atual e de projeto considerando a ação combinada da maré e duma tempestade intensa

6.1.2 ALIMENTAÇÃO ARTIFICIAL DO TRECHO CREIRO-PORTINHO

A alimentação artificial do trecho Creiro-Portinho constituiria uma medida de mitigação do processo erosivo em curso.

Embora com base nos dados disponíveis não seja possível determinar inequivocamente o período de permanência deste enchimento, tendo em consideração que este processo erosivo se faz aparentemente com intensidades relativamente baixas, um enchimento artificial poderia ter condições para se manter no local durante um período razoável sobretudo se for efetuado com recurso a areias de granulometria superior às que existem na zona (como será o caso de areias com origem no canal da barra).

Como se pode observar na *Figura 69* (acima) o transporte residual neste trecho tende a fazer-se do Creiro para o Portinho pelo que é razoável supor que, com o tempo, a areia depositada nas zonas mais a montante tenda a deslocar-se para o Portinho.

Sugere-se que a alimentação, a realizar-se, se faça numa largura limitada de forma a minorar alguns dos problemas atuais sem vir a introduzir outros desequilíbrios no sistema. Uma proposta com a identificação duma possível solução é apresentada na *Figura 70*.



Figura 70: Proposta de área de intervenção no trecho Creiro-Portinho (a amarelo)

6.1.3 ALIMENTAÇÃO ARTIFICIAL DO TRECHO COMENDA-ALBARQUEL

No caso do trecho Comenda-Albarquel foi colocada a hipótese de se estabelecer uma zona de deposição de areias na zona costeira entre a ribeira da Ajuda e atual praia de Albarquel. Uma das questões que se colocou foi a de estimar a estabilidade que a areia que viesse a ser depositada nesta zona poderia apresentar (cf. *Figura 71*).



Figura 71: Possível zona de enchimento entre a praia de Albarquel e a Comenda

Existe uma experiência bem-sucedida em Albarquel, onde no passado foi efetuada uma ação semelhante que revelou um elevado nível de estabilidade e que resultou numa praia muito frequentada pelas populações locais, e que importa perceber se se pode repetir com o mesmo nível e sucesso na zona agora colocadas como hipótese. Para este fim foi implementado um sistema de modelos de alta resolução para esta zona de acordo com o esquema resumido na *Figura 72*. A primeira malha de *downscaling* tem uma resolução de 20 metros e a mais interior uma malha de 5 metros.

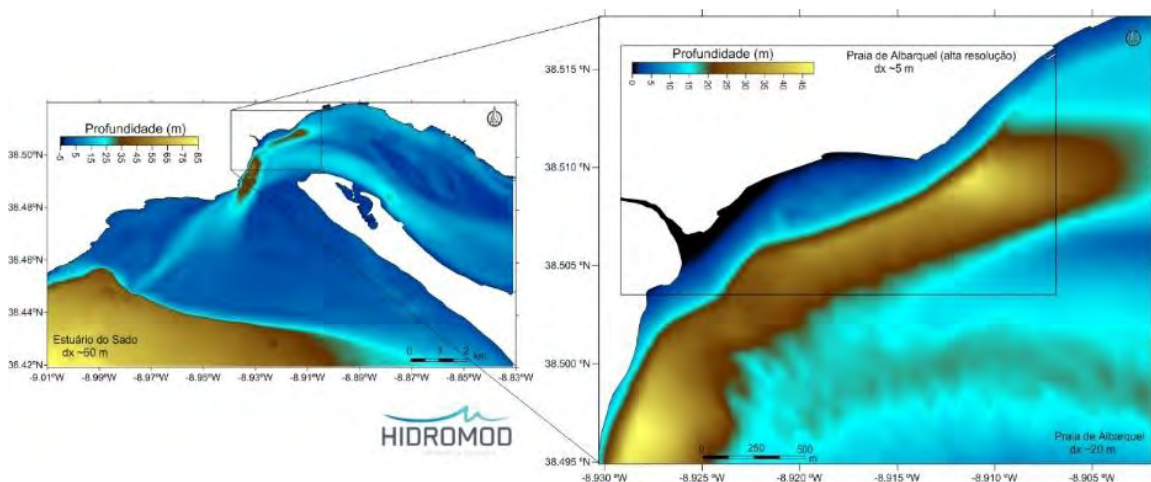


Figura 72: Domínios de cálculo considerados para a simulação detalhada do escoamento no trecho Comenda-Albarquel.

Os resultados permitem concluir que embora a circulação residual apresente padrões complexos, com uma inversão da direção numa secção entre a praia de Albarquel e a ribeira da Ajuda e convergência na zona

do esporão da praia (cf. Figura 73). O transporte entre a ribeira e a praia de Albarquel é de muito pequena intensidade (cf. Figura 74) o que pode efetivamente indicar boas condições de estabilidade para as areias que venham a ser depositadas no local. Em função destes resultados, ainda com a incerteza sempre associada a este tipo de análises, poderá considerar-se que a zona entre a ribeira da Ajuda e o parque da cidade apresenta boas condições para funcionar como possível local de deposição de areias para criação de condições balneares.

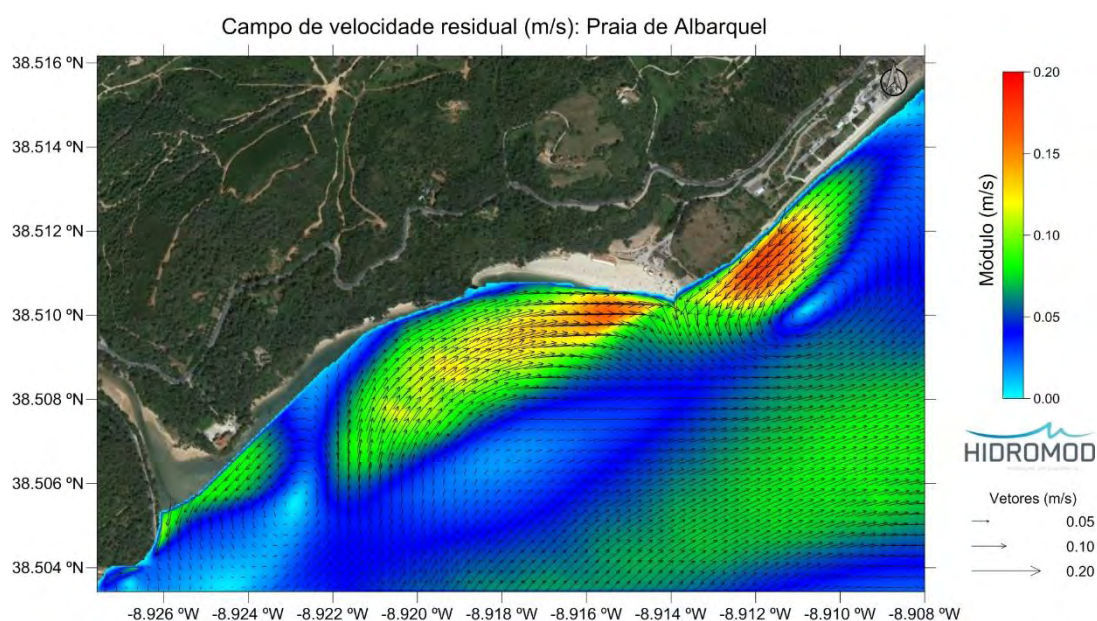


Figura 73: Pormenor da circulação residual no trecho costeiro ribeira da Ajuda-praia de Albarquel.

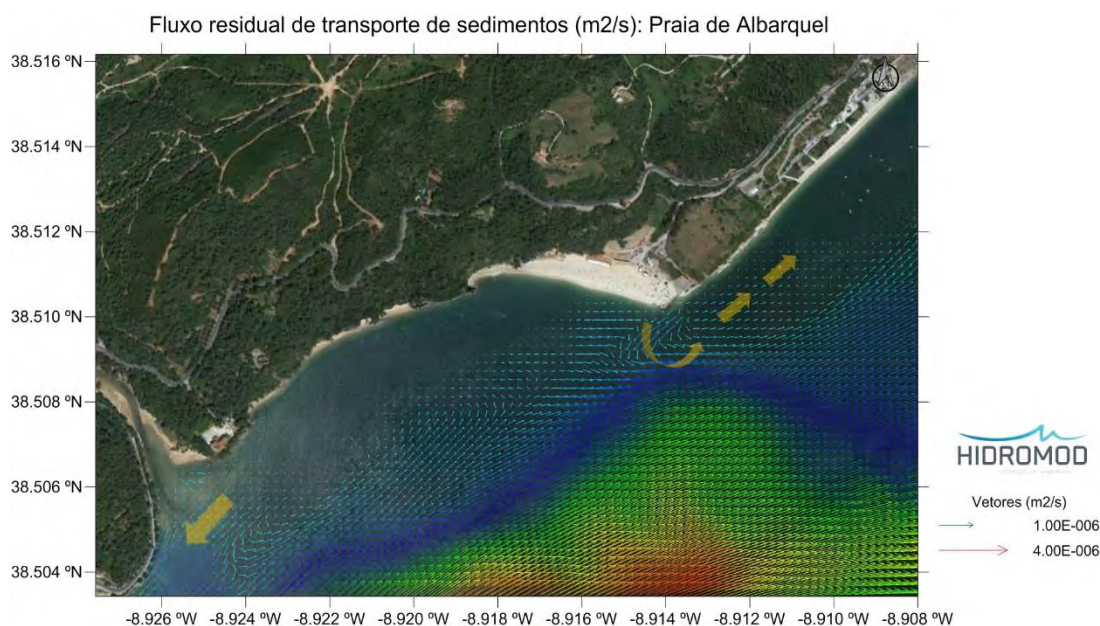


Figura 74: Pormenor do fluxo residual de transporte no trecho costeiro ribeira da Ajuda-praia de Albarquel.

6.1.4 ALIMENTAÇÃO ARTIFICIAL DO TRECHO ALBARQUEL-PRAIA DA SAÚDE

Para o trecho Albarquel-praia da Saúde não está prevista à partida nenhuma ação de enchimento artificial. No entanto, esta zona tem-se vindo a tornar muito popular entre a população local o que poderá tender a criar pressões para que se criem melhores condições para a prática balnear. Nesta perspetiva foi efetuada uma caracterização das velocidades máximas tendo por objetivo avaliar o risco em termos de prática balnear.

Uma análise das velocidades máximas globais mostra que na interface entre a praia de Albarquel e o parque da cidade podem ocorrer velocidades máximas que podem atingir valores da ordem de 0.7 m/s. Estas velocidades vão diminuindo à medida que se caminha na direção da praia da Saúde apresentando ali valores máximos da ordem de 0.2 m/s (*Figura 75*). Como é natural estes máximos são atingidos preferencialmente em situação de vazante (*cf. Figura 76*).

Em situação de enchente a praia de Albarquel gera uma deflexão da corrente para o interior do estuário e origina uma zona de sombra a montante. Nestas condições as velocidades em enchente ainda podem atingir valores da ordem de 0.5 m/s junto ao esporão de Albarquel mas na zona de sombra podem cair até valores de 0.1 m/s. Na praia da Saúde mantêm-se os valores da ordem de 0.2 m/s (*cf. Figura 77*).

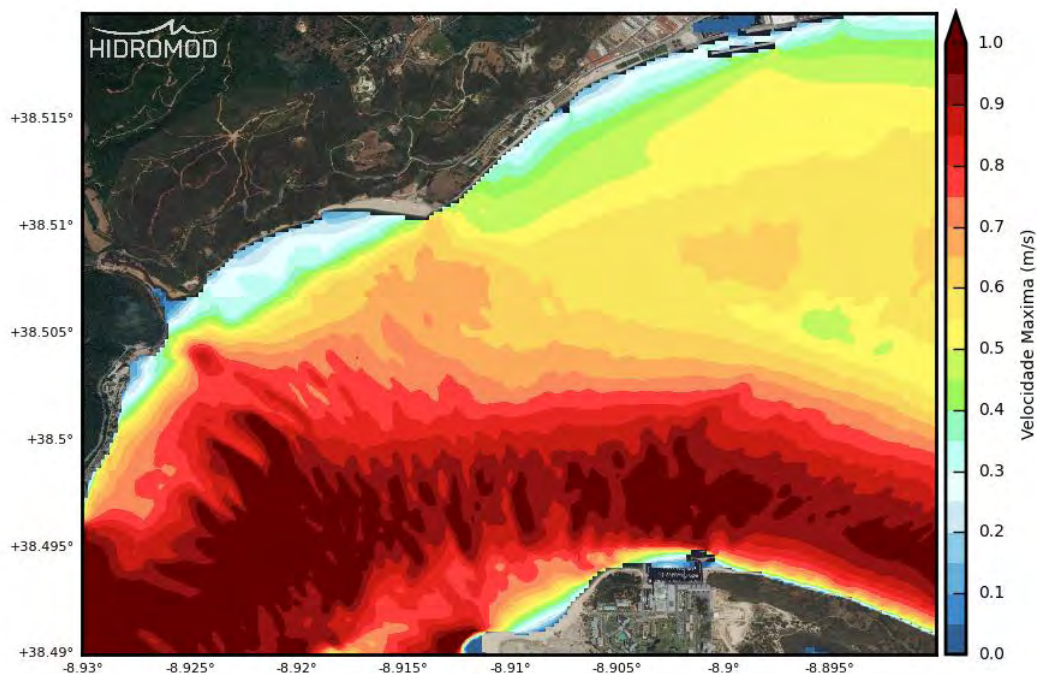


Figura 75: Velocidade máxima global.

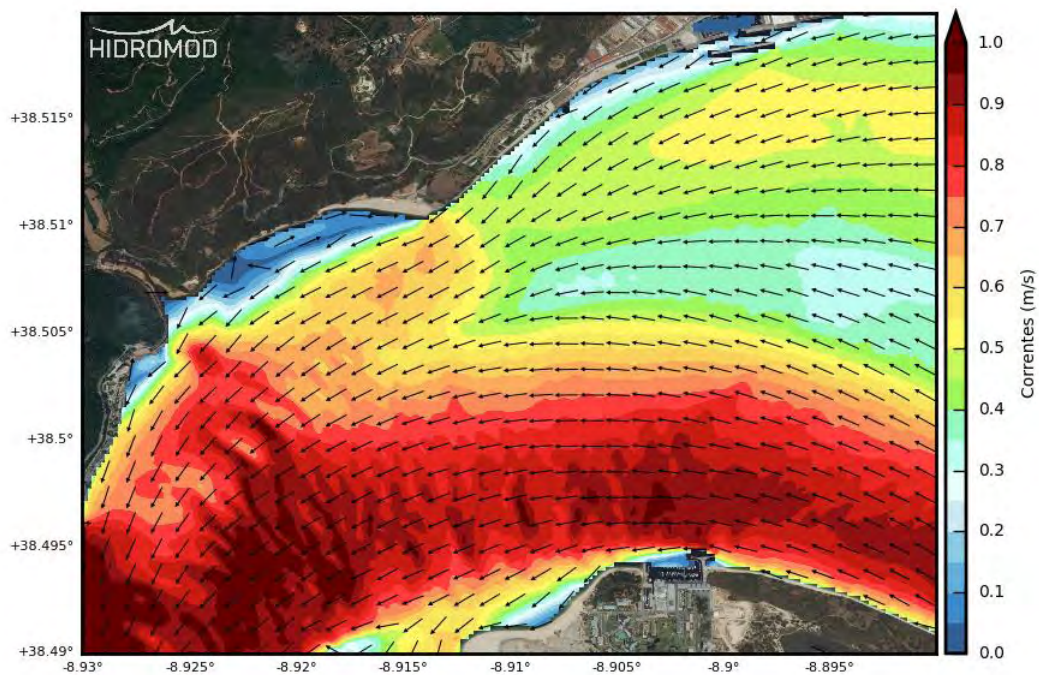


Figura 76: Velocidade máxima em situação de vazante.

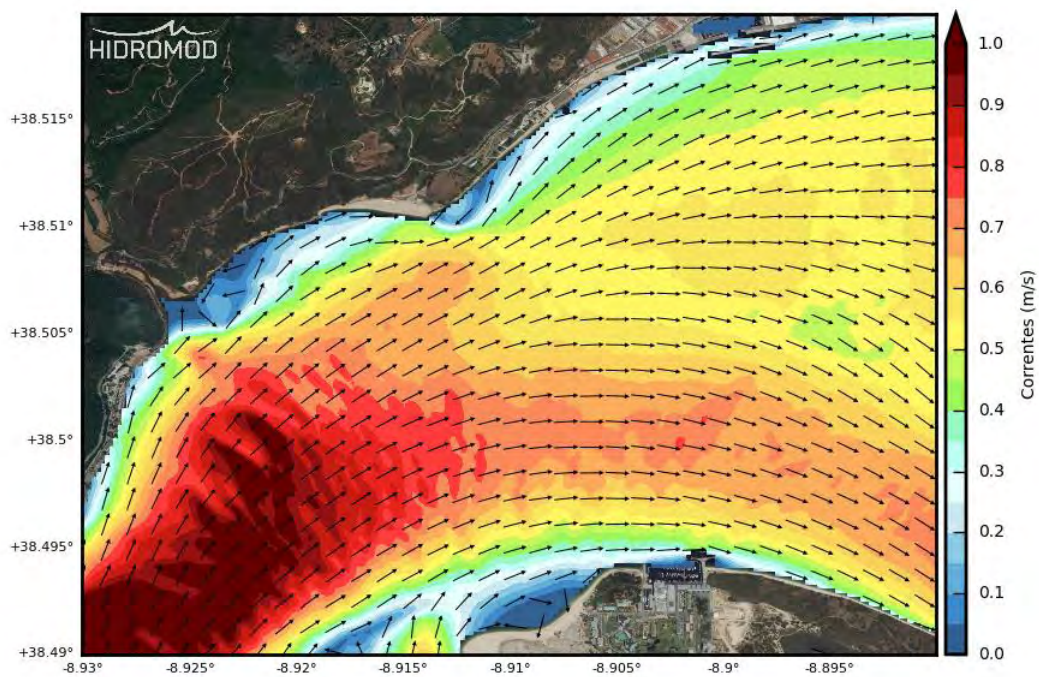


Figura 77: Velocidade máxima em situação de enchente.

6.2 ASPETOS RELACIONADOS COM O PATRIMÓNIO

Verificando-se que os impactos sobre a dinâmica do banco são de muita baixa magnitude deverão esperar-se igualmente efeitos diminutos nas estações arqueológicas localizadas em zona de incidência indireta.

A alimentação artificial do trecho Creiro-Portinho poderá resultar em impactes positivos em termos patrimoniais considerando que repõe as camadas de sedimento de proteção nas estações arqueológicas existentes, principalmente as em confrontação com zonas interditas.

Será porém necessário acautelar a informação científica que, devido a atual ausência de sedimentos, apresenta uma oportunidade de descoberta patrimonial que não se deverá repetir num futuro próximo. A riqueza patrimonial exposta na figura seguinte demonstra claramente que cenários de alimentações artificiais devem ser precedidos de estudos de prospeção focados em ambas esferas, terrestre e marítima.

Na Figura 78 referencia-se por exemplo a estação arqueológica do Creiro que inclui uma Villa com complexo industrial e possível porto de época romana, além de diversos achados subaquáticos isolados, com cronologias que vão desde o Período Romano até à Idade Contemporânea.

Deve-se assim ter especial cuidado na zona do perfil 3 onde se apresentam estruturas expostas na Praia da Anixa associadas à Estação Arqueológica do Creiro de Período Romano e na zona do avistamento de um núcleo de peças de artilharia pirobalística a norte da Pedra da Anixa.

Outra das situações a acautelar é que a ação de enchimento artificial não seja per si destrutiva de elementos patrimoniais. Os enchimentos de areia deverão ter em atenção não causar efeitos erosivos a curto prazo nem a causar outros efeitos nocivos, como desequilíbrio químico ou compressão de estruturas.



Figura 78: Estações arqueológicas referenciadas na zona Creiro-Portinho

Será igualmente considerada benéfica a alimentação artificial do trecho Praia da Saúde – Albarquel-Comenda, onde se reportam a estação arqueológica da Vila romana da Comenda e o cais da praia da Saúde (cf. Figura 79).



Figura 79: Estações arqueológicas referenciadas na zona Albarquel – Praia da Saúde

Esta ação de enchimento artificial poderá ser considerada especialmente benéfica na zona da Vila Romana da Comenda, onde as barreiras artificiais encontram-se bastante deterioradas. O reforço da areia permitiria reduzir a erosão das estruturas referenciadas no relatório de progresso (Fraga e Albuquerque 2018). Porém o enchimento na zona da Praia da Saúde deverá ter em conta a sensibilidade arqueológica do cais presentemente exposto, património arqueológico industrial conforme apresentado no relatório de progresso (Fraga e Albuquerque, 2018). Acrescenta-se ainda que atualmente na praia da Comenda arroja diversos elementos arqueológicos de época romana, a que se deverá tentar determinar a origem antes que a mesma fique colmatada por sedimentos.

Em qualquer dos cenários deve-se acautelar a necessidade de acompanhamento por equipas de arqueologia de forma a evitar impacto negativo nas estruturas a beneficiar.

7 CONCLUSÕES

No âmbito do presente estudo foi efetuada uma caracterização da dinâmica local na zona do delta de vazante do estuário do Sado, tendo-se concluído que a praia associada ao delta onde a erosão tem sido mais expressiva e persistente no tempo corresponde ao troço Portinho da Arrábida-Creiro.

Foi proposto um modelo conceptual que fornece uma possível explicação para os problemas erosivos observados neste trecho costeiro e são analisadas possíveis intervenções tanto no que respeita a possíveis impactes (caso do aprofundamento do canal) como a medidas mitigadoras (caso da alimentação artificial das praias).

No que respeita aos processos erosivos em curso, a análise dos dados disponíveis (nomeadamente a análise de fotografias históricas) e dos resultados das simulações de hidrodinâmica e transporte revelam uma área mais dinâmica sob o ponto de vista sedimentar do que à partida se pensava. Os resultados mostram que se tem vindo a observar ao longo dos últimos anos uma alteração da disposição das areias no banco norte do delta (entre a Figueirinha e o Portinho da Arrábida). Estas alterações traduzem-se nomeadamente num aumento na dimensão do banco de areia que se estende a partir da Figueirinha que estará a ter como consequência a alteração da circulação residual na área, limitando a alimentação da praia (situação que há 20-30 anos não se verificaria).

Uma possível **resposta ao requisito de “minimizar os efeitos dessa erosão”** neste trecho de praia poderá passar por uma ação de alimentação artificial. Embora com base nos dados disponíveis não seja possível determinar inequivocamente o período de permanência deste enchimento, tendo em consideração que este processo erosivo se faz aparentemente com intensidades relativamente baixas, um enchimento artificial poderia ter condições para se manter no local durante um período razoável sobretudo se for efetuado com recurso a areias de granulometria superior às que existem na zona (como será o caso de areias com origem no canal da barra).

Já o aprofundamento do canal não parece ter grande impacte no que respeita a estes processos. As alterações que se podem observar são de muito baixa magnitude não parecendo ter capacidade de no curto-médio prazo virem a alterar as atuais tendências de transporte.

8 BIBLIOGRAFIA

Andrade, C., Cabeçadas, H., Soares, J., Lopes, L., & Freitas, M. C., 2008, *Embarcações tradicionais. Contexto físico-cultural do Estuário do Sado*. Setúbal, Museu de Arqueologia e Etnográfica do Distrito de Setúbal.

Brito, P., 2009, *Impactos da elevação do nível médio do mar em ambientes costeiros: o caso do estuário do Sado*. Tese de doutoramento. Universidade de Lisboa, Faculdade de Ciências.

Brito, P.; Rebêlo, L. 2013, *Geologia do Portinho da Arrábida*. In: *Desassoreamento da Arrábida: Causas e Soluções*: Atas do Colóquio, Casa da Baía, Setúbal, 16 de novembro de 2011. - Lisboa: Estrutura de Missão para os Assuntos do Mar, 2013, p. 49-6.

Cardoso, J., 2014, *Vestígios de âncoras de madeira de tradição clássica mediterrânea em águas portuguesas*. Cascais: ND.

Carvalho M. & Capitão R., 1995, *Extreme Wave Height off the Western Coast of Portugal*. International Conference OMAE'95, Copenhagen, Denmark, June 1995.

Costa M., Silva R. & Vitorino J., 2001, *Contribuição para o estudo do clima de agitação marítima na costa portuguesa*. 2ª Jornadas de Engenharia Costeira e Portuária, Sines, 2001.

Fraga, T., & Albuquerque, A., 2018, *Relatório de Progresso - Projecto de Execução - Porto de Setúbal*. Faro: TMF.

Gama, C., 2004. *Dinâmica de Sistemas Sedimentares do Litoral Ocidental Português a Sul do Cabo Espichel*. Tese de Doutoramento. Universidade de Évora. 360 pp.

García-Castrillo Riesgo, G., Lanuza Alonso, P., & López García, P., 2003, *El Entorno Marino de los restos arqueológicos*. Em R. P. Ramos, *La conservación del material arqueológico subacuático* (p. 501). Santona: Casa de Cultura de Santona.

GTL – Grupo e Trabalho do Litoral (2014). *Gestão da Zona Costeira – O Desafio da Mudança*. 242 pp.

Hidromod, 1993, *Terminal da Ford/VW no porto de Setúbal. Análise dos Impactes no Estuário do Sado provocados pelas Dragagens de Empréstimo. Estudos de Modelação Matemática*. Relatório de contribuição para o Estudo de Impacte Ambiental elaborado pela Impacte, Lda.

Hidromod, 1994a, *Implementação de um Modelo Hidromorfológico para o Estuário do Rio Sado*, Relatório de ontribuição para o Estudo de Avaliação da Viabilidade Técnico Económica do Novo Terminal de Contentores elaborado pela BCEOM, Lda.

Hidromod, 1994b, *Projecto de Dragagem do Canal da Barra, do Canal Norte e Bacia de Rotação (1ª Fase)*, Relatório, HIDROMOD, Lda.

Hidromod, 1995, *Projecto do Terminal de Contentores/Plataforma Multimodal no Porto de Setúbal. Estudos de Modelação Matemática*, Relatório, HIDROMOD, Lda

Hidromod, 1998, *Estudo da Hidrodinâmica das Áreas de Intervenção no Âmbito do Projecto “Terminal de Contentores/Plataforma Multimodal, Canal da Barra, Canal Norte e Bacia de Rotação e das Áreas para Depósito de Dragados, no Porto de Setúbal” com base no Modelo Tridimensional*, Relatório, 2 Volumes, HIDROMOD, Lda

Hidromod, 2005. *Avaliação das condições hidrodinâmicas e de transporte no estuário do Sado*, Relatório, HIDROMOD, Lda

Hidromod, 2009, *Execução de estudo de avaliação de transporte de sedimentos no estuário do sado, no porto de setúbal*, Relatório, HIDROMOD, Lda

Hidromod, 2007. *Execução de estudo de avaliação de transporte de sedimentos no Estuário do Sado, no Porto de Setúbal*. Dezembro 2007.

Leitão P., Leitão J., Neves R., Berzin G., Silva A., 2004. *Hydrodynamics And Transport In The Coastal Zone Of São Paulo – Brazil*. Proceedings 29th International Conference of Coastal Engineering 3: 3316-3328.

Leitão, P., Coelho; H., Santos, A., Neves, R., 2005. *Modelling the main features of the Algarve coastal circulation during July 2004: A downscaling approach*. Journal of Atmospheric and Ocean Science, 10 (4), pp. 1-42.

LNEC, 1989, *Estudo da barra do Sado. Projeto de modelo físico*. Relatório 186/89, NET, LNEC

Malhadas, M.S., Leitão, P.C., Silva, A., Neves, R., 2009. *Effect of coastal waves on sea level in Óbidos Lagoon*. Continental Shelf Research 29 (9), pp. 1240-1250.

Marques, F., 1999. *Evolução das arribas e da linha de costa no arco litoral Tróia-Sines (Portugal)*. A Zona Costeira do Alentejo: Associação Eurocoast - Portugal (Sines, Portugal), pp. 69-80.

Martins, F., Leitão, P.C., Silva, A., Neves, R., 2001. *3D modelling in the Sado estuary using a new generic vertical discretization approach*. Oceanologica Acta, 24 (1), pp. 551-562.

Navas J.M., Telfera T.C., Rossa L.G., 2011. *Application of 3D hydrodynamic and particle tracking models for better environmental management of finfish culture*. Continental Shelf Research; 31(6): 675-684.

Neves, R.J.J., 1985, *Étude Experimentale et Modélisation Mathématique des Circulations Transitoire et Residuelle dans l’Estuaire du Sado*, Tese de Doutoramento, Univ. Liège (Bélgica).

Neves, R.J.J., Ferreira, J.N.R., 1987, *Modelo Matemático do Estuário do Sado. Extensão à Plataforma Costeira Adjacente*, Ed. do Serviço Nacional de Parques e Reservas e da Conservação da Natureza, Lisboa, 144 pp.

Neves, R.J.J., Silva, A.J.R e Leitao, J.C., 1991, *Estudo da Influência do Novo Terminal RO/RO da Ford/VW na Hidrodinâmica do Estuário do Sado*, Relatório.

Pinto, C.; Silveira, T.; Teixeira, S., 2018. Alimentação artificial de praias na faixa costeira de Portugal Continental: Enquadramento e retrospectiva das intervenções realizadas (1950 – 2017). Relatório Técnico, Departamento do Litoral e Proteção Costeira, Agência Portuguesa do Ambiente, 61 pp.

Quevauviller, P., 1987. Etude geomorphologique, sedimentologique et geochimique du litoral de Galé et l'Estuaire du sado (Portugal). **These Docteur en Oceanologie. Université de Bordeaux I, 256 pp.**

Perestrelo, A., 1934, *O Porto de Setubal*, Junta Autonoma das Obras do Porto e Barra de Setubal e Rio Sado.

Ribeiro J., Silva A., Leitão P., 2011. *High resolution tsunami modelling for the evaluation of potential risk areas in Setúbal (Portugal)*. Natural Hazards and Earth System Science; 11(8): 2371-2380.

Ribeiro, J., Silva, A.J.R. & Leitão, J.C., 2009, *Modelos Operacionais de previsão da agitação para suporte à navegação e gestão de riscos*, 6as Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária, PIANC Portugal, Funchal, Outubro de 2009

Santoro P., Fernández M., Fossati M., Cazes, G., Terra, R. Piedra-Cueva, I., 2011. *Pre-operational forecasting of sea level height for the Río de la Plata*. Applied Mathematical Modelling; 35(5): 2462-2478.

Silveira, T.; Santos, C.; Andrade, F., 2013. Beneficial use of dredged sand for beach nourishment and coastal landform enhancement – the case study of Tróia, Portugal. J. Coastal Conserv. DOI 10.1007/s11852-013-0283-y.

TECNASOL, 1994. *Porto de Setúbal - Dragagens. Relatório do Reconhecimento Geológico*, Relatório, Tecnasol, Lisboa.

Teixeira, S., 1990. Dinâmica das praias da Península de Setúbal (Portugal). Tese de Mestrado. Universidade de Lisboa. 189 pp.

Tironi A., Marin V.H., Campuzano F.J., 2010. *A management tool for assessing aquaculture environmental impacts in Chilean Patagonian Fjords: integrating hydrodynamic and pellets dispersion models*. Environmental management; 45(5): 953-962.

Vale, C., Castro, O. G., Belchior, F., Madureira, M. J., Drago, T., Quintans, M., Santos, I. e Fonseca, N., 1997. *Caracterização granulométrica e química dos sedimentos do estuário do Sado com à sua eventual dragagem*. Instituto de Investigação das pescas e do mar (Relatório).

Ventura, P., Ramalho, L., & Sousa, F., 2017, *Estudo de Impacte Ambiental do Projeto de Melhoria da Acessibilidade Marítima ao Portod e Setúbal - Património Cultural*. Lisboa: Proman.