

Luana Matos Castilho

Caraterização da evolução volumétrica do delta vazante
do estuário do Guadiana para a otimização das
estratégias de dragagem



Faculdade de Ciências e Tecnologia

2016

Luana Matos Castilho

Caraterização da evolução volumétrica do delta vazante
do estuário do Guadiana para a otimização das
estratégias de dragagem

Mestrado em Sistemas Marinhos e Costeiros

Trabalho efetuado sobre a orientação de: Erwan Garel



Faculdade de Ciências e Tecnologia

2016

Declaração de autoria do trabalho

Caraterização da evolução volumétrica do delta vazante do estuário do Guadiana para a otimização das estratégias de dragagem.

Faro, 29 de setembro 2016

Luana Matos Castilho

(Luana Matos Castilho)

Declaro ser a autora deste trabalho, que é original e inédito. Autores e trabalhos consultados estão devidamente citados no texto e constam da listagem de referências incluída.

Copyright de Luana Matos Castilho

A Universidade do Algarve reserva para si o direito, em conformidade com o disposto no Código do Direito de Autor e dos Direitos Conexos, de arquivar, reproduzir e publicar a obra, independentemente do meio utilizado, bem como de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição para fins meramente educacionais ou de investigação e não comerciais, conquanto seja dado o devido crédito ao autor e editor respetivos.

Agradecimentos

Ao meu orientador Erwan Garel pela orientação, disponibilidade, opiniões e capacidade de resolver problemas e qualquer dúvida que foi surgindo ao longo deste trabalho.

Ao Prof. J. A. Morales pelo apoio na campanha de recolha de batimetria realizada e pelos documentos associados à dragagem de 2015.

A todos os docentes, que direta ou indiretamente me ajudaram a cumprir os meus objetivos e a realizar mais esta etapa da minha formação académica.

À minha família, em especial à minha mãe e à minha irmã, um enorme obrigada por tudo. Por todo o apoio incondicional.

Aos meus amigos, que sempre possuíram palavras de apoio, momentos de distração, gargalhadas e companhia na biblioteca.

E aos meus colegas de mestrado, às cobaias que sem os quais não teria conseguido sobreviver todos os desafios colocados.

Resumo

Este estudo pretende a aplicação do modelo analítico, desenvolvido por Kraus (2000), que, por sua vez, permite criar e explorar vários cenários de dragagem e deposição de areia, possibilitando a previsão e planeamento de melhores estratégias de intervenção antropogénica, no delta de vazante do Guadiana. Para tal, foi necessário quantificar, a longo prazo (plurianual), a dinâmica sedimentar do sistema em causa, ou seja, foi necessário realizar uma caracterização volumétrica da evolução morfológica deste sistema durante as últimas décadas.

Visando este objetivo foram utilizados mapas de batimetria entre 1969 e 2016, sendo que esta escala temporal engloba períodos antecedentes à construção de molhes e períodos posteriores à construção de molhes. A escala temporal utilizada permitiu a caracterização da evolução volumétrica dos vários elementos morfológicos que formam o delta, que, posteriormente, foi utilizada na aplicação do modelo analítico de evolução morfológica do delta de vazante do Guadiana, anteriormente referido.

Este estudo permitiu constatar que, atualmente, apesar de se verificar uma variação anual forte, o delta de vazante do Guadiana encontra-se numa fase de estabilização. Adicionalmente, em relação ao modelo projetado, foi possível constatar que o modelo com maior compatibilidade com a realidade corresponde ao modelo que engloba a influência da deriva longilitoral, da exportação fluvial e do banco de O'Bril. Apesar de a compatibilidade não ser perfeita, este modelo permite uma previsão da evolução do delta na sua generalidade possibilitando uma análise de vários cenários de dragagem.

Por fim, constatou-se que, atualmente, a frequência de dragagem necessária às dragagens realizadas não foi cumprida, o que em combinação à rápida recuperação do sistema, associada à existência de uma fonte sedimentar local (banco de O'Bril), provoca a limitação da navegabilidade na região, revelando a necessidade de as dragagens nesta região se tornarem mais regulares.

Palavras-chave: Guadiana; Delta de maré de energia mista; Transporte sedimentar; Dragagem; Evolução temporal.

Abstract

This study entails the development and application of an analytic model that allowed the creation and exploration of multiple scenarios of dredging and deposition of sand. Furthermore, this model allowed to foresee the best strategies of dredging in the ebb-delta of Guadiana estuary. To this end, it was necessary to quantify, in the long term, the sedimentary dynamics of this system. This was done through the realization of a volumetric characterization of the morphologic evolution of this system during the last decades.

With this objective in mind, several bathymetric maps between 1969 and 2016 were used. This temporal series allowed the characterization of the volumetric evolution of several morphologic elements that form the delta, which was used in the application of the analytic model of morphologic evolution of the ebb-delta of the Guadiana estuary mentioned above.

This study allowed to comprehend that, nowadays, although it looks as if there is a strong annual growth, the ebb delta of the Guadiana is in a stabilization phase. Additionally, regarding the implementation model, it was found that the model with greater compatibility with reality corresponds to the model that includes the influence of the longshore transport, the fluvial exportation and the O'Bril bank. Although compatibility is not perfect, this model allows in general a prediction of the evolution of the delta, enabling an analysis of several dredging scenarios.

Finally, it was found that, currently, the frequency required for the dredging was not met, which in combination with the rapid system recovery and the existence of a local sedimentary source (O'Bril bank), causes the limitation of navigability in the region, revealing the need for dredging in this region to become more regular.

Key words: Guadiana; Mixed-energy tidal inlet; Sediment bypassing; Dredging; Time evolution.

Índice

Resumo	i
Abstract.....	ii
Índice de Figuras	iii
Índice de Tabelas	ix
Índice de Equações	ix
Capítulo 1: Introdução	1
Capítulo 2: Ambientes de deltas	2
2.1. Definição e classificação de deltas associados a barras de maré	2
2.2. Intervenção Antropogénica	3
2.3. Principais características e estruturas dos deltas de vazante	4
Capítulo 3: Enquadramento da área de estudo	7
Capítulo 4: Material e Métodos	11
4.1. Tarefa I: Batimetria 2016.....	12
4.2. Tarefa II: Evolução do delta (total) e das diferentes estruturas morfológicas .	14
4.3. Tarefa III: Cálculo do volume do banco de O’Bril (fonte sedimentar local)...	17
4.4. Tarefa IV: Dragagem 2015	19
4.5. Tarefa V: Modelo matemático	20
4.6. Tarefa VI: Cenários de dragagem	23
Capítulo 5: Resultados.....	25
5.1. Tarefa I: Batimetria 2016.....	25
5.2. Tarefa II: Evolução do delta (total) e das diferentes estruturas morfológicas .	26
5.2.1.Evolução do delta (total)	26
5.2.2.Evolução da barra frontal	34
5.2.3.Evolução da barra lateral a barlamar	40
5.3. Tarefa III: Cálculo do volume do banco de O’Bril (fonte sedimentar local)...	46
5.4. Tarefa IV: Dragagem 2015	48
5.5. Tarefa V: Modelo matemático	53
5.6. Tarefa VI: Cenários de dragagem	64
Capítulo 6: Discussão de resultados	71

Capítulo 7: Conclusão	74
Referências	75
Anexos.....	79
Anexo 1.....	80
Anexo 2.....	81

Índice de Figuras

Figura 2.1 - Representação da geomorfologia geral dos sistemas associados a barras de maré. Esquema vagamente baseado em Reinson, 1992.	2
Figura 2.2 - Representação geral da morfologia de um delta de vazante associado a barras de maré. As estruturas a tracejado representam as estruturas morfológicas a barlar que cuja formação nem sempre se verifica, devido a uma deriva longitudinal dominante. Esquema baseado num esquema idealizado por Kraus, 2000.	4
Figura 2.3 - Esquema do transporte de sedimento associado a uma barra de maré estabilizada através de molhes (FitzGerald, 2000).	6
Figura 3.1 - Localização geográfica da área de estudo. Representação das estruturas morfológicas presentes no delta de vazante do estuário do Guadiana (canal, barra frontal, barra lateral a barlar, barra ligada à costa e complexo a sotamar, contudo o complexo a sotamar não se encontra bem definido).	7
Figura 3.2 - Modelo conceitual da evolução do banco de O’Bril, adaptado do modelo de rutura do delta de vazante por FitzGerald <i>et al.</i> , 2000. Imagem retirada de Garel <i>et al.</i> , 2014.	9
Figura 4.1 - Mapas batimétricos da área de estudo entre 1969 e 2016. Escala de cores: o vermelho corresponde a zonas menos profundas e o azul escuro corresponde a zonas com maior profundidade. A linha de contorno mais espessa corresponde à batimetria de 0 m. A referência é o zero hidrográfico (ZH, 2 m abaixo do nível do mar). O molhe a oeste e o molhe a este também se encontram representados.	11
Figura 4.2 – Material usado na batimetria realizada em 2016. (a) Apoio do sistema GPS em terra. (b) GPS a bordo do barco. (c) sonda para medição da profundidade. (d) computador a bordo para monitorizar os dados recolhidos.	12
Figura 4.3 - Editor de dados. Perfil da profundidade ao longo do tempo. Atribuição de um <i>spike limit</i> igual a 0.5. Exemplo de um erro associado à recolha dos dados (rodeado a branco) que, posteriormente, foi eliminado.	13
Figura 4.4 - Representação dos perfis recolhidos referentes à batimetria de 2016, após o tratamento de dados.	13
Figura 4.5 - Mapa batimétrico de 2015 com a representação do polígono Total 1.2 (a), do polígono Total 2.2 (b), do polígono Total 3.2 (c) e do polígono 4.2 (d). Os polígonos encontram-se representados em linha branca tracejada.	15
Figura 4.6 - Mapa batimétrico de 2015 com a representação do polígono barra frontal 1 (a), do polígono barra frontal 2 (b) e do polígono barra frontal 3 (c). Os polígonos encontram-se representados em linha branca tracejada.	16
Figura 4.7 - Mapa batimétrico de 2015 com a representação do polígono barra lateral a barlar 1 (a), do polígono barra lateral a barlar 2 (b) e do polígono barra lateral a barlar 3 (c). Os polígonos encontram-se representados em linha branca tracejada.	16
Figura 4.8 - Possível configuração batimétrica na ausência do delta. Linhas batimétricas desenhadas paralelamente à linha de costa, sobre o mapa batimétrico referente a 2014.	18
Figura 4.9 - Representação do modelo reservatório morfológico de barras de maré (Kraus, 2000). Q_{in} representa a taxa de entrada sedimentar, $(Q_B)_{in}$ é a taxa transporte de sedimento para a barra lateral, $(Q_A)_{in}$ é a taxa transporte de sedimento para a barra ligada à costa, $(Q_E)_{out}$ é a taxa de transporte de sedimento que sai da barra frontal, $(Q_B)_{out}$ corresponde à taxa de transporte de sedimento que sai da barra lateral, $(Q_A)_{out}$ é a taxa de transporte de sedimento que sai da barra ligada à costa, $(Q_{beach})_{in}$ é a taxa de transporte de sedimento para a praia $((Q_{beach})_{in} = (Q_A)_{out})$, VE é o volume da barra frontal, VB é o volume da barra lateral, VA é o volume da	

barra ligada à costa, V_E é o volume de equilíbrio da barra frontal, V_B volume de equilíbrio da barra lateral e V_A volume de equilíbrio da barra ligada à costa. 21

Figura 5.1 – Mapa batimétrico referente a 2016. As linhas pretas mais espessas representam os molhes existentes. 25

Figura 5.2 - Gráfico das diferenças dos volumes (m³) calculados pelos polígonos Total 1.2 (azul), Total 2.2 (cinzento), Total 3.2 (laranja) e Total 4.2 (roxo) em função dos anos (1969, 1973, 1977, 1982, 1986, 1988, 1992, 1995, 2005, 2010, 2012, 2014, 2015 e 2016). O valor base considerado para os polígonos Total 1.2, Total 2.2 e Total 3.2 foi o volume calculado em 1969 e o valor base considerado para o polígono Total 4.2 foi o volume calculado em 1977. A reta verde e tracejada é usada para identificar os anos nos quais foram realizadas intervenções sobre a forma de dragagens, nomeadamente, 1986 e 2015. 26

Figura 5.3 - Representação do mapa batimétrico de 1969 com a representação do polígono Total 1.2 (a), do polígono Total 2.2 (b) e do polígono Total 3.2 (c). Os polígonos encontram-se representados em linha branca tracejada. 27

Figura 5.4 – Representação do mapa batimétrico de 1973 com a representação do polígono Total 2.2 (a) e do polígono Total 3.2 (b) e do mapa batimétrico de 1977 com a representação do polígono Total 2.2 (c) e do polígono Total 3.2 (d). Os polígonos encontram-se representados em linha branca tracejada. 28

Figura 5.5 - Representação do mapa batimétrico de 1982 com a representação do polígono Total 1.2 (a) e do polígono Total 2.2 (b) e do mapa batimétrico de 1986 com a representação do polígono Total 1.2 (c) e do polígono Total 2.2 (d). Os polígonos encontram-se representados em linha branca tracejada. 29

Figura 5.6 - Representação do mapa batimétrico de 1995 com a representação do polígono Total 1.2 (a), do polígono Total 2.2 (b), do polígono Total 3.2 (c) e do polígono 4.2 (d). Os polígonos encontram-se representados em linha branca tracejada. 30

Figura 5.7 - Representação do mapa batimétrico de 2005 com a representação do polígono Total 1.2 (a) e do polígono Total 2.2 (b). Os polígonos encontram-se representados em linha branca tracejada. 30

Figura 5.8 - Representação do mapa batimétrico de 2010 com a representação do polígono Total 1.2 (a) e do polígono Total 2.2 (b). Os polígonos encontram-se representados em linha branca tracejada. 31

Figura 5.9 - Representação do mapa batimétrico de 2014 com a representação do polígono Total 1.2 (a), do polígono Total 2.2 (b), do polígono Total 3.2 (c) e do polígono 4.2 (d). Os polígonos encontram-se representados em linha branca tracejada. 32

Figura 5.10 - Representação do mapa batimétrico de 2015 com a representação do polígono Total 1.2 (a), do polígono Total 2.2 (b), do polígono Total 3.2 (c) e do polígono 4.2 (d). Os polígonos encontram-se representados em linha branca tracejada. 33

Figura 5.11 - Representação do mapa batimétrico de 2016 com a representação do polígono Total 1.2 (a), do polígono Total 2.2 (b), do polígono Total 3.2 (c) e do polígono 4.2 (d). Os polígonos encontram-se representados em linha branca tracejada. 34

Figura 5.12 - Gráfico das diferenças dos volumes calculados pelos polígonos barra frontal 1 (azul), barra frontal 2 (cinzento) e barra frontal 3 (laranja) em função dos anos (1969, 1973, 1977, 1982, 1986, 1988, 1992, 1995, 2005, 2010, 2012, 2014, 2015 e 2016). O valor base considerado para os polígonos foi o volume calculado em 1969. A reta verde e tracejada é usada para identificar os anos nos quais foram realizadas intervenções sobre a forma de dragagens, nomeadamente, 1986 e 2015. 35

Figura 5.13 - Representação do mapa batimétrico de 1992 com a representação do polígono barra frontal 1 (a) e do polígono barra frontal 2 (b) e do mapa batimétrico de 1995 com a

representação do polígono barra frontal 1 (c), do polígono barra frontal 2 (d) e do polígono barra frontal 3 (e). Os polígonos encontram-se representados em linha branca tracejada.	37
Figura 5.14 - Representação do mapa batimétrico de 2005 com a representação do polígono barra frontal 1 (a), do barra frontal 2 (b) e do polígono barra frontal 3 (c). Os polígonos encontram-se representados em linha branca tracejada.	38
Figura 5.15 - Representação do mapa batimétrico de 2012 com a representação do polígono barra frontal 1 (a) e do barra frontal 2 (b). Os polígonos encontram-se representados em linha branca tracejada.	38
Figura 5.16 - Representação do mapa batimétrico de 2015 com a representação do polígono barra frontal 1 (a), do barra frontal 2 (b) e do polígono barra frontal 3 (c). Os polígonos encontram-se representados em linha branca tracejada.	39
Figura 5.17 - Representação do mapa batimétrico de 2016 com a representação do polígono barra frontal 1 (a), do barra frontal 2 (b) e do polígono barra frontal 3 (c). Os polígonos encontram-se representados em linha branca tracejada.	39
Figura 5.18 - Gráfico das diferenças dos volumes calculados pelos polígonos barra lateral a barlar 1 (azul), barra lateral a barlar frontal 2 (cinzento) e barra lateral a barlar 3 (laranja) em função dos anos (1969, 1973, 1977, 1982, 1986, 1988, 1992, 1995, 2005, 2010, 2012, 2014, 2015 e 2016). O valor base considerado para os polígonos foi o volume calculado em 1969. A reta verde e tracejada é usada para identificar os anos nos quais foram realizadas intervenções sobre a forma de dragagens, nomeadamente, em 1986 e em 2015.	40
Figura 5.19 - Representação do mapa batimétrico de 1982 com a representação do polígono barra lateral barlar 1 (a), do barra lateral barlar 2 (b) e do polígono barra lateral barlar 3 (c) e do mapa batimétrico de 1986 com a representação do polígono barra lateral barlar 1 (d), do barra lateral barlar 2 (e) e do polígono barra lateral barlar 3 (f). Os polígonos encontram-se representados em linha branca tracejada.	42
Figura 5.20 - Representação do mapa batimétrico de 1988 com a representação do polígono barra lateral barlar 1 (a), do barra lateral barlar 2 (b) e do polígono barra lateral barlar 3 (c) e do mapa batimétrico de 1992 com a representação do polígono barra lateral barlar 1 (d), do barra lateral barlar 2 (e) e do polígono barra lateral barlar 3 (f). Os polígonos encontram-se representados em linha branca tracejada.	43
Figura 5.21 - Representação do mapa batimétrico de 1995 com a representação do polígono barra lateral a barlar 1 (a), do barra lateral a barlar 2 (b) e do polígono barra lateral a barlar 3 (c). Os polígonos encontram-se representados em linha branca tracejada.	44
Figura 5.22 - Representação do mapa batimétrico de 2005 com a representação do polígono barra lateral a barlar 1 (a), do barra lateral a barlar 2 (b) e do polígono barra lateral a barlar 3 (c). Os polígonos encontram-se representados em linha branca tracejada.	44
Figura 5.23 - Representação do mapa batimétrico de 2010 com a representação do polígono barra lateral a barlar 1 (a), do barra lateral a barlar 2 (b) e do polígono barra lateral a barlar 3 (c). Os polígonos encontram-se representados em linha branca tracejada.	45
Figura 5.24 - Representação do mapa batimétrico de 2015 com a representação do polígono barra lateral a barlar 1 (a), do barra lateral a barlar 2 (b) e do polígono barra lateral a barlar 3 (c) e representação do mapa batimétrico de 2016 com a representação do polígono barra lateral a barlar 1 (d), do barra lateral a barlar 2 (e) e do polígono barra lateral a barlar 3 (f). Os polígonos encontram-se representados em linha branca tracejada.	46
Figura 5.25 - Mapa de contornos de batimetria de 1969. A laranja encontram-se representadas as linhas de batimetria que foram desenhadas paralelamente em relação à costa.	47
Figura 5.26 - Mapa de contornos de batimetria de 1969. A laranja encontram-se representadas as linhas de batimetria que foram desenhadas paralelamente em relação à costa, corrigidas para a linha de costa de 1969.	47

Figura 5.27 - Cenário 1, a zona dragada encontra-se representada a cor-de-rosa. a) Representação do mapa batimétrico referente a 2014. b) Representação do mapa batimétrico referente a 2015.	48
Figura 5.28 - Cenário 2, a zona dragada alargada encontra-se representada a cor-de-rosa. a) Representação do mapa batimétrico referente a 2014. b) Representação do mapa batimétrico referente a 2015.	49
Figura 5.29 - Representação sobre o mapa batimétrico referente a 2015 da localização geográfica dos 10 pontos escolhidos para a comparação de profundidades.	49
Figura 5.30 - O gráfico superior representa o número dos pontos em função da profundidade, tanto para as profundidades obtidas pelos documentos referentes à dragagem (cinzento) como para as profundidades retiradas a partir do mapa batimétrico referente ao ano de 2015 (azul). No gráfico inferior encontra-se representada a diferença das profundidades (Junho-Abril) em função do número dos pontos (preto).....	51
Figura 5.31 - Mapa batimétrico referente ao ano 2015. A cinzento encontra-se representada a profundidade alvo (entre -3.5 m e -4m), assim como as profundidades superiores a -3.5 metros a amarelo e as profundidades inferiores a -4 metros a lilás. A zona onde foi realizada a dragagem encontra-se representada a cor-de-rosa.	52
Figura 5.32 – Representação nos mapas batimétricos de 2014 (a) e de 2015 (b) do perfil retirado da zona de dragagem. O ponto A corresponde ao início do perfil (distância= 0 m), o ponto B corresponde ao início da zona onde foi realizada a dragagem (distância = 660.356 m), o ponto C corresponde ao final da zona dragada (distância = 1906.155 m) e o ponto D corresponde ao final do perfil e o seu limite a offshore (distância = 2109.126 m).....	52
Figura 5.33 - Perfil da zona dragada. Gráfico da distância em função da profundidade, a cinzento encontra-se representado o perfil retirado do mapa batimétrico de 2014 e a azul o perfil retirado do mapa batimétrico referente a 2015. O ponto A corresponde ao início do perfil (distância= 0 m), o ponto B corresponde ao início da zona onde foi realizada a dragagem (distância = 660.356 m), o ponto C corresponde ao final da zona dragada (distância = 1906.155 m) e o ponto D corresponde ao final do perfil e o seu limite a offshore (distância = 2109.126 m).	53
Figura 5.34 - Modelo com taxa de entrada de sedimento proveniente da deriva longilitoral. Representação do volume da barra frontal (a) e da barra lateral a barlar (b) em função do tempo (anos). DLmin: Deriva longilitoral mínima (representada a azul claro na barra frontal (a) e a amarelo na barra lateral a barlar (b)), DL: Deriva longilitoral média (representada a cinzento na barra frontal (a) e a cor-de-rosa na barra lateral a barlar (b)) e DLmax: Deriva longilitoral máxima (representada a azul escuro na barra frontal (a) e a cor-de-laranja na barra lateral a barlar (b)). A linha a tracejado azul claro representa o tc associado à DLmin, a linha tracejada a cinzento representa o tc associado à DL e a linha a tracejado a azul escuro corresponde ao tc associado à DLmax.	54
Figura 5.35 - Modelo com taxa de entrada de sedimento proveniente da exportação fluvial. Representação do volume da barra frontal (a) e da barra lateral a barlar (b) em função do tempo (anos). A linha a tracejado azul claro representa o tc associado à exportação fluvial.....	55
Figura 5.36 - Modelo com taxa de entrada de sedimento proveniente da deriva longilitoral e da exportação fluvial. Representação do volume da barra frontal (a) e da barra lateral a barlar (b) em função do tempo (anos). DLmin + EF: Deriva longilitoral mínima e exportação fluvial (representada a azul claro na barra frontal (a) e a amarelo na barra lateral a barlar (b)), DL+ EF: Deriva longilitoral média e exportação fluvial (representada a cinzento na barra frontal (a) e a cor-de-rosa na barra lateral a barlar (b)) e DLmax+ EF: Deriva longilitoral máxima e exportação fluvial (representada a azul escuro na barra frontal (a) e a cor-de-laranja na barra lateral a barlar (b)). A linha a tracejado azul claro representa o tc associado à DLmin+ EF, a linha tracejada a cinzento representa o tc associado à DL+ EF e a linha a tracejado a azul escuro corresponde ao tc associado à DLmax + EF.	56

Figura 5.37 - Modelo com taxa de entrada de sedimento proveniente da deriva longilitoral, da exportação fluvial e da fonte local de sedimento (banco de O'Bril). Representação do volume da barra frontal (a) e da barra lateral a barlamar (b) em função do tempo (anos). DLmin + EF + BO: Deriva longilitoral mínima, exportação fluvial e banco de O'Bril (representada a azul claro na barra frontal (a) e a amarelo na barra lateral a barlamar (b)), DL+ EF + BO: Deriva longilitoral média, exportação fluvial e banco de O'Bril (representada a cinzento na barra frontal (a) e a cor-de-rosa na barra lateral a barlamar (b)) e DLmax + EF + BO: Deriva longilitoral máxima, exportação fluvial e banco de O'Bril (representada a azul escuro na barra frontal (a) e a cor-de-laranja na barra lateral a barlamar (b)). A linha a tracejado azul claro representa o tc associado à DLmin+ EF + BO, a linha tracejada a cinzento representa o tc associado à DL+ EF + BO e a linha a tracejado a azul escuro corresponde ao tc associado à DLmax + EF + BO. 57

Figura 5.38 - Modelo com taxa de entrada de sedimento proveniente da deriva longilitoral, da exportação fluvial e da fonte local de sedimento (banco de O'Bril), assim como a incorporação das dragagens em 1986 e 2015. Representação do volume da barra frontal (a) e da barra lateral a barlamar (b) em função do tempo (anos). DLmin + EF + BO: Deriva longilitoral mínima, exportação fluvial e banco de O'Bril (representada a azul claro na barra frontal (a) e a amarelo na barra lateral a barlamar (b)), DL+ EF + BO: Deriva longilitoral média, exportação fluvial e banco de O'Bril (representada a cinzento na barra frontal (a) e a cor-de-rosa na barra lateral a barlamar (b)) e DLmax + EF + BO: Deriva longilitoral máxima, exportação fluvial e banco de O'Bril (representada a azul escuro na barra frontal (a) e a cor-de-laranja na barra lateral a barlamar (b)). A linha a tracejado azul claro representa o tc associado à DLmin+ EF + BO, a linha tracejada a cinzento representa o tc associado à DL+ EF + BO e a linha a tracejado a azul escuro corresponde ao tc associado à DLmax + EF + BO. 58

Figura 5.39 - Gráfico dos volumes calculados pelos polígonos barra frontal 1 (azul), barra frontal 2 (lilás) e barra frontal 3 (laranja) e dos volumes associados à barra frontal obtidos pelo modelo cuja taxa de entrada de sedimento é proveniente da deriva longilitoral máxima (cinzento escuro), da deriva longilitoral (cinzento) e da deriva longilitoral mínima (cinzento claro) em função dos anos (1977, 1982, 1986, 1988, 1992, 1995, 2005, 2010, 2012, 2014, 2015 e 2016). 59

Figura 5.40 - Gráfico dos volumes calculados pelos polígonos barra lateral a barlamar 1 (azul), barra lateral a barlamar 2 (lilás) e barra lateral a barlamar 3 (laranja) e dos volumes associados à barra lateral a barlamar obtidos pelo modelo cuja taxa de entrada de sedimento é proveniente da deriva longilitoral máxima (cinzento escuro), da deriva longilitoral (cinzento) e da deriva longilitoral mínima (cinzento claro) em função dos anos (1977, 1982, 1986, 1988, 1992, 1995, 2005, 2010, 2012, 2014, 2015 e 2016). 59

Figura 5.41 - Gráfico dos volumes calculados pelos polígonos barra frontal 1 (azul), barra frontal 2 (lilás) e barra frontal 3 (laranja) e dos volumes associados à barra frontal obtidos pelo modelo cuja taxa de entrada de sedimento é proveniente da exportação fluvial (cinzento), em função dos anos (1977, 1982, 1986, 1988, 1992, 1995, 2005, 2010, 2012, 2014, 2015 e 2016). 60

Figura 5.42 - Gráfico dos volumes calculados pelos polígonos barra lateral a barlamar 1 (azul), barra lateral a barlamar 2 (lilás) e barra lateral a barlamar 3 (laranja) e dos volumes associados à barra lateral a barlamar obtidos pelo modelo cuja taxa de entrada de sedimento é proveniente da exportação fluvial (cinzento), em função dos anos (1977, 1982, 1986, 1988, 1992, 1995, 2005, 2010, 2012, 2014, 2015 e 2016). 61

Figura 5.43 - Gráfico dos volumes calculados pelos polígonos barra frontal 1 (azul), barra frontal 2 (lilás) e barra frontal 3 (laranja) e dos volumes associados à barra frontal obtidos pelo modelo cuja taxa de entrada de sedimento é proveniente da deriva longilitoral máxima e exportação fluvial (cinzento escuro), da deriva longilitoral e exportação fluvial (cinzento) e da deriva longilitoral mínima e exportação fluvial (cinzento claro) em função dos anos (1977, 1982, 1986, 1988, 1992, 1995, 2005, 2010, 2012, 2014, 2015 e 2016). 61

Figura 5.44 - Gráfico dos volumes calculados pelos polígonos barra lateral a barlamar 1 (azul), barra lateral a barlamar 2 (lilás) e barra lateral a barlamar 3 (laranja) e dos volumes associados à barra lateral a barlamar obtidos pelo modelo cuja taxa de entrada de sedimento é proveniente da

deriva longilitoral máxima e exportação fluvial (cinzento escuro), da deriva longilitoral e exportação fluvial (cinzento) e da deriva longilitoral mínima e exportação fluvial (cinzento claro) em função dos anos (1977, 1982, 1986, 1988, 1992, 1995, 2005, 2010, 2012, 2014, 2015 e 2016).
..... 62

Figura 5.45 - Gráfico dos volumes calculados pelos polígonos barra frontal 1 (azul), barra frontal 2 (lilás) e barra frontal 3 (laranja) e dos volumes associados à barra frontal obtidos pelo modelo cuja taxa de entrada de sedimento é proveniente da deriva longilitoral máxima, exportação fluvial e banco de O’Bril (cinzento escuro), da deriva longilitoral, exportação fluvial e banco de O’Bril (cinzento) e da deriva longilitoral mínima, exportação fluvial e banco de O’Bril (cinzento claro) em função dos anos (1977, 1982, 1986, 1988, 1992, 1995, 2005, 2010, 2012, 2014, 2015 e 2016).
..... 63

Figura 5.46 - Gráfico dos volumes calculados pelos polígonos barra lateral a barlar 1 (azul), barra lateral a barlar 2 (lilás) e barra lateral a barlar 3 (laranja) e dos volumes associados à barra lateral a barlar obtidos pelo modelo cuja taxa de entrada de sedimento é proveniente da deriva longilitoral máxima, exportação fluvial e banco de O’Bril (cinzento escuro), da deriva longilitoral, exportação fluvial e banco de O’Bril (cinzento) e da deriva longilitoral mínima, exportação fluvial e banco de O’Bril (cinzento claro) em função dos anos (1977, 1982, 1986, 1988, 1992, 1995, 2005, 2010, 2012, 2014, 2015 e 2016).
..... 63

Figura 5.47 - Gráfico dos volumes calculados pelos polígonos barra frontal 1 (azul), barra frontal 2 (lilás) e barra frontal 3 (laranja) e dos volumes associados à barra frontal obtidos pelo modelo cuja taxa de entrada de sedimento é proveniente da deriva longilitoral máxima, exportação fluvial e banco de O’Bril (cinzento escuro), da deriva longilitoral, exportação fluvial e banco de O’Bril (cinzento) e da deriva longilitoral mínima, exportação fluvial e banco de O’Bril (cinzento claro) em função dos anos (1977, 1982, 1986, 1988, 1992, 1995, 2005, 2010, 2012, 2014, 2015 e 2016). Inclusão das dragagens em 1986 e 2015 no modelo. 64

Figura 5.48 - Cenário 1. Gráfico da evolução da barra frontal sem dragagem (azul) e da evolução da barra frontal com integração da dragagem em 1986 (cinzento) em função dos anos (entre 1977 e 2157) (a) e representação da diferença das duas evoluções distintas (b). 65

Figura 5.49 - Cenário 2. Gráfico da evolução da barra frontal sem dragagem (azul) e da evolução da barra frontal com integração da dragagem em 1986 (cinzento) em função dos anos (entre 1977 e 2157) (a) e representação da diferença das duas evoluções distintas (b). 66

Figura 5.50 - Cenário 3. Gráfico da evolução da barra frontal sem dragagem (azul) e da evolução da barra frontal com integração da dragagem em 1986 (cinzento) em função dos anos (entre 1977 e 2157) (a) e representação da diferença das duas evoluções distintas (b). 67

Figura 5.51 - Cenário 4. Gráfico da evolução da barra frontal sem dragagem (azul) e da evolução da barra frontal com integração da dragagem em 1986 (cinzento) em função dos anos (entre 1977 e 2157) (a) e representação da diferença das duas evoluções distintas (b). 68

Figura 5.52 - Cenário 5. Gráfico da evolução da barra frontal sem dragagem (azul) e da evolução da barra frontal com integração da dragagem em 1986 (cinzento) em função dos anos (entre 1977 e 2157) (a) e representação da diferença das duas evoluções distintas (b). 69

Figura 5.53 - Cenário 6. Gráfico da evolução da barra frontal sem dragagem (azul) e da evolução da barra frontal com integração das dragagens em 1986, 2015 e 2029 (cinzento) em função dos anos (entre 1977 e 2157) (a) e representação da diferença das duas evoluções distintas (b). 70

Figura 5.54 - Cenário 7. Gráfico da evolução da barra frontal sem dragagem (azul) e da evolução da barra frontal com integração das dragagens em 1986, 2015 e 2029 (cinzento) em função dos anos (entre 1977 e 2157) (a) e representação da diferença das duas evoluções distintas (b). 70

Índice de Tabelas

Tabela 4.1 - Tabela parcial retirada do software Hypack® referente à linha 1. Discriminação do ponto, hora, nome da linha, elevação do GPS, coordenada X, coordenada Y, profundidade (*raw*), correção da maré e profundidade corrigida. 14

Tabela 5.1 – Tabela com informação referente aos 10 pontos escolhidos. Número do ponto, Longitude, Latitude, Profundidade referente ao mapa batimétrico de junho de 2015 (em metros), Profundidade referente aos documentos referentes à dragagem em abril de 2015 (em metros) e por fim a diferença da profundidade (em metros) da profundidade obtida através do mapa batimétrico e da profundidade obtida através dos documentos anteriormente referidos. 50

Tabela 6.1 - Discriminação dos resultados obtidos através do cenário 1, do cenário 2 e dos dados obtidos através do perfil criado, na tentativa de calcular o volume e a profundidade associada à dragagem realizada em 2015. Esta tabela mostra o comprimento e a largura (m) considerada para cada cenário, assim como a profundidade obtida através da Equação 4.2 (m) e a profundidade (m) e volume (Mm³) obtidos através da utilização do *software* Surfer® 72

Índice de Equações

Equação 4.1 - Cálculo da profundidade corrigida. 14

Equação 4.2 – Fórmula do volume de um paralelepípedo. 19

Equação 4.3 - Equação usada para o cálculo do alfa (α). Sendo VEe o volume de equilíbrio da barra frontal e Q_{in} a taxa de entrada sedimentar. 22

Equação 4.4 - Equação que permite o cálculo do ano no qual o volume de sedimento que sai da estrutura morfológica é igual ao volume que é retido. 22

Equação 4.5 - Equação usada para o cálculo do volume da barra frontal. Sendo VEe o volume de equilíbrio da barra frontal e t o tempo. 22

Equação 4.6 - Equação usada para o cálculo do beta (β). Sendo VBe o volume de equilíbrio da barra lateral a barlar e Q_{in} a taxa de entrada sedimentar. 22

Equação 4.7 - Equação usada para o cálculo do tempo efetivo da evolução da barra lateral. ... 23

Equação 4.8 - Equação usada para o cálculo do volume da barra lateral a barlar. Sendo VBe o volume de equilíbrio da barra lateral a barlar. 23

Capítulo 1: Introdução

Este trabalho integra-se no âmbito do Mestrado de Sistemas Marinhos e Costeiros e visa otimizar as estratégias de dragagem no delta de vazante do estuário do Guadiana.

Devido ao desenvolvimento do delta de vazante do Guadiana existem problemas de navegação associados a este local. Assim, é fundamental prever a necessidade da intervenção humana, nomeadamente sob a forma de dragagens, uma vez que este tipo de intervenção apresenta uma necessidade de repetição, devido à tendência do desenvolvimento do sistema para uma situação de assoreamento. Para tal é necessário um conhecimento da evolução volumétrica do sistema e dos fatores que provocam a sua alteração. Estudos recentes, Garel *et al.*, 2015, mostram a importância de fontes locais de sedimento (banco de O'Bril) na evolução volumétrica deste sistema após a construção dos molhes para estabilização do canal de navegação. A influência das fontes locais de sedimento altera o desenvolvimento do delta e conseqüentemente a evolução morfológica não se encontra de acordo com os casos típicos associados aos deltas. Este fator pode dificultar, ainda mais, a planificação da gestão do sistema a uma escala temporal de décadas. Dito isto, e tendo em conta o aspeto económico associado, é extremamente importante uma compreensão do sistema de modo a que seja possível uma previsão da intervenção, visando uma melhor gestão dos recursos.

O principal objetivo deste trabalho é otimizar estratégias de dragagem no delta de vazante do estuário do Guadiana, com base na caracterização volumétrica da evolução morfológica deste sistema durante as últimas décadas, nomeadamente entre 1969 e 2016. Para alcançar este objetivo foi necessário, em primeiro lugar, escolher a metodologia indicada para computar o volume da fonte local de sedimento (banco de O'Bril). Posteriormente, foi fundamental conhecer a evolução volumétrica dos principais elementos morfológicos do novo delta (após a construção dos molhes), obtida através da comparação dos mapas batimétricos ente 1969 e 2016. E por fim, o volume do banco de areia de O'Bril em combinação com a evolução volumétrica dos diferentes elementos morfológicos serviu para a implementação de um modelo analítico, baseado num sistema de reservatório, que permitiu alcançar os objetivos definidos, ou seja, prever a intervenção necessária para este sistema. O estudo da dragagem realizada em 2015 também permitiu obter uma maior informação da evolução do sistema em causa.

Capítulo 2: Ambientes de deltas

2.1. Definição e classificação de deltas associados a barras de maré

As barras de maré são entradas estreitas que possibilitam a conexão entre uma baía, estuário ou corpo de água semelhante e o mar aberto, onde o principal agente forçador do movimento da água é a maré (FitzGerald, 2005). As correntes de maré existentes nestes sistemas são responsáveis pela remoção contínua de sedimento existente no canal, transportado pela ação das ondas. Algumas barras de maré podem coincidir com a foz dos rios (estuários), onde a dimensão da barra e o transporte de sedimentos é condicionado pelo prisma de maré e pelas correntes de maré reversas, respetivamente. Outras barras de maré podem encontrar-se associadas a sistemas de ilhas barreira.

A geomorfologia destes sistemas encontra-se dividida em canal (parte mais estreita e profunda da barra de maré), delta de vazante e delta de enchente (Figura 2.1). A designação destes deltas como de enchente ou de vazante, depende da direção em que estes se formam, por outras palavras, os deltas de enchente formam-se para dentro do canal através de marés de enchente, enquanto que os deltas de vazante formam-se na direção do mar aberto através de marés de vazante. Estes deltas são posteriormente modificados pela ação das ondas.

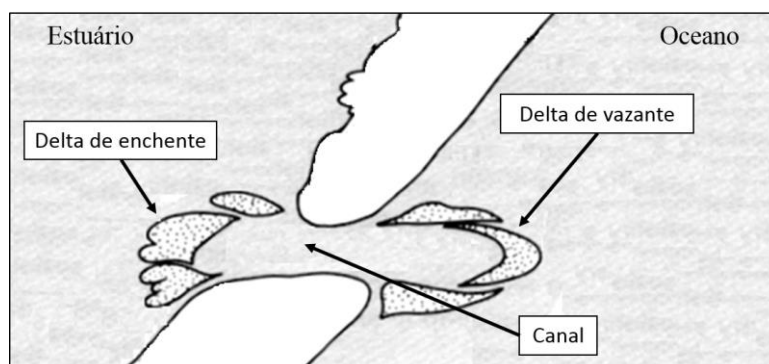


Figura 2.1 - Representação da geomorfologia geral dos sistemas associados a barras de maré. Esquema vagamente baseado em Reinson, 1992.

Os deltas de vazante constituem estruturas morfológicas importantes uma vez que representam grandes reservatórios de areia, os bancos de areia associados reduzem a energia das ondas que chegam às praias adjacentes e estes afetam o processo de transporte sedimentar para zonas costeiras a sotamar (parte da costa na direção da deriva longilitoral, relativamente à barra de maré, por oposição a barlar) (Fontolan *et al.*, 2007). O transporte sedimentar nas barras de maré é definido como o processo no qual existe a

movimentação de sedimentos, resultante da deriva longilitoral, de barlar para sotamar (FitzGerald *et al.*, 2000). O transporte sedimentar nestes ambientes é bastante complexo, fazendo com que seja difícil de quantificar. Os movimentos de areia resultam da ação combinada das ondas e correntes sobreposta à variação da batimetria e às constantes alterações do nível do mar. Para a caracterização do transporte sedimentar é necessário ter em consideração uma larga escala temporal e espacial (FitzGerald *et al.*, 2000).

O delta de vazante do estuário do Guadiana encontra-se associado a uma barra de maré e constitui um caso de delta submerso dominado pela mistura da influência da maré e das ondas, sendo, portanto, considerado um delta de energia mista.

2.2. Intervenção Antropogénica

As estruturas de intervenção nas barras de maré têm, por norma, o objetivo de melhorar a navegação e envolvem tipicamente a combinação de molhes com a manutenção do canal através de dragagens (FitzGerald *et al.*, 2000). Este controlo antropogénico afeta o equilíbrio hidro-morfodinâmico que a barra possuiria nas condições predominantes (Kraus, 2009; Komar, 1996; Oost *et al.*, 2012), ou seja, as intervenções antropogénicas apresentam uma influência significativa nos padrões de erosão e deposição nas praias adjacentes (Hayes e FitzGerald, 2013).

Os molhes são estruturas físicas de proteção costeira, que geralmente se estendem da linha de costa até à massa de água e têm como função a estabilização de uma barra de maré e a proteção desta de correntes ou ondas, por outras palavras, estas estruturas afetam as ondas, as correntes e o transporte sedimentar de modo a provocar a estabilização da zona em que estes são construídos. O confinamento da corrente de vazante num canal estabilizado, e a consequente aceleração da mesma, resulta numa migração em direção a mar aberto da acumulação de areia, levando a que os depósitos de areia em águas mais profundas sejam retrabalhados durante condições de elevada energia de onda (Castelle *et al.*, 2007; Buonaiuto e Bokuniewicz, 2008).

As barras de maré respondem, tipicamente, à construção dos molhes com o colapso do delta de vazante existente, devido ao abandono das correntes de maré, e com a formação de um novo delta de vazante (Hansen e Knowles, 1988; Pope, 1991; Buijsman *et al.*, 2003; Kraus, 2006). Estruturas de intervenção, como os molhes, quando existe uma deriva longilitoral dominante provocam, tipicamente, erosão (acrecção) ao longo das zonas a sotamar (barlar) (Kraus, 2009; Galgano, 2007; Hapke *et al.*, 2013). O conhecimento

de formação de bancos de areias e da tendência da migração do canal nas barras pode ajudar no planeamento e modificação dos molhes (FitzGerald *et al.*, 2000).

Por sua vez, intervenções sob a forma de dragagens podem ser definidas como uma atividade de desassoreamento de material do fundo de rios, canais, entre outros. O principal objetivo desta intervenção é realizar a manutenção ou aumentar a profundidade de uma determinada área, de modo a facilitar a navegação. Uma vez que as barras constituem caminhos de navegação as dragagens são planeadas periodicamente para manter a acessibilidade da passagem (Fontolan *et al.*, 2007).

2.3. Principais características e estruturas dos deltas de vazante

Os deltas de vazante são estruturas dinâmicas com morfologia altamente variável devido à interação complexa entre ondas, marés, fornecimento sedimentar e descarga fluvial (Hayes, 1980; Boothroyd, 1985; FitzGerald, 1996; Chang, 1997; FitzGerald *et al.*, 2002; de Swart e Zimmerman, 2009).

Os deltas de vazante de energia mista e com a presença de molhes, como é o caso do delta do estuário do Guadiana, podem ser subdivididos em barras frontais, barras laterais e em barras laterais com ligação à costa (Kraus, 2000) (Figura 2.2).

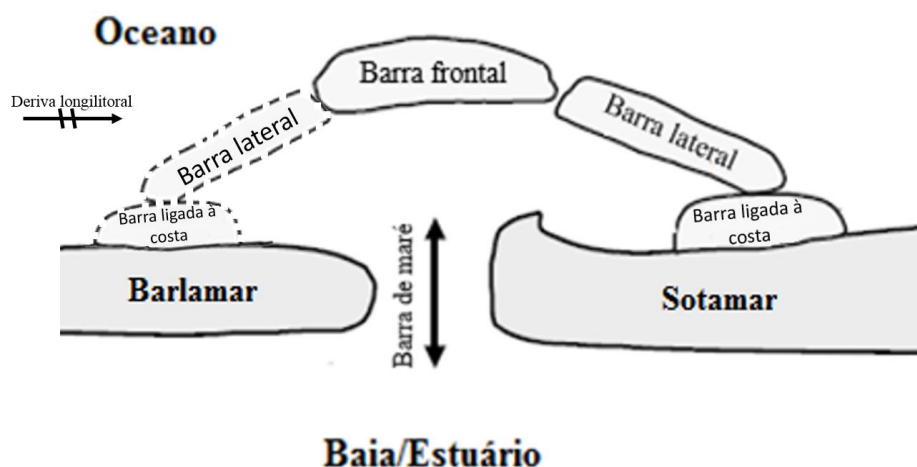


Figura 2.2 - Representação geral da morfologia de um delta de vazante associado a barras de maré. As estruturas a tracejado representam as estruturas morfológicas a barlamar cuja formação nem sempre se verifica, devido a uma deriva longitudinal dominante. Esquema baseado num esquema idealizado por Kraus, 2000.

Em relação aos elementos morfológicos dos deltas de vazante, nomeadamente as barras, geralmente a primeira a desenvolver-se é a barra frontal, só depois se dá a

formação das barras laterais e por fim a formação de barras com ligação a terra, por outras palavras, só se desenvolvem as morfologias laterais após a barra frontal alcançar uma morfologia relativamente estável (Kraus, 2000). Quando a barra frontal se encontra estabilizada a areia é transportada para sotamar ou barlamar não ficando acumulada, ou seja, se a barra frontal se encontra em equilíbrio, toda a areia que chega é transportada através da deriva longilitoral para a barra lateral a barlamar ou a sotamar (Kraus, 2000). A formação das barras laterais a barlamar encontra-se dependente do grau de assimetria do delta, do tamanho do delta e da deriva longilitoral. Por norma, quando a deriva longilitoral apresenta uma direção muito dominante só se verifica a formação destas barras a sotamar, no entanto se a direção da deriva longilitoral for apenas parcialmente dominante pode haver o desenvolvimento de estruturas morfológicas a barlamar.

No caso de uma barra de maré estabilizada por molhes, o transporte de sedimentos e a formação de elementos morfológicos é condicionado pela existência dos mesmos, ou seja, a quantidade de areia que é transportada para a barra de maré depende do comprimento do molhe, do tamanho da barra de maré, da profundidade do canal, da força da corrente da maré e da morfologia do delta de vazante (FitzGerald *et al.*, 2000). Inicialmente, o sedimento transportado pela deriva longilitoral fica acumulado nos molhes e só o material transportado pelo rio é acumulado na barra frontal (transportado por correntes de vazante), impondo a forma típica da barra em arco (Figura 2.3). Seguidamente, os sedimentos transportados pela deriva longilitoral ultrapassam o molhe, transportando sedimento para dentro do canal. Por sua vez, as correntes de vazante transportam este material para a barra frontal, continuando o desenvolvimento da barra frontal como consequência da deposição e da ação das ondas (*reworking*). Quando a barra frontal se encontra em equilíbrio, não se verifica acumulação do sedimento (resultante da deriva longilitoral e do fluxo fluvial), uma vez que a barra atinge uma altura limite na qual não é possível deposição devido à ação das ondas. Neste caso, o sedimento que chega à barra frontal é transportado para barras laterais a sotamar, devido à direção dominante das ondas. Na realidade, a barra lateral pode começar a desenvolver-se mesmo quando a barra frontal ainda não se encontra em equilíbrio, no entanto a velocidade de formação da barra lateral vai ser muito mais rápida se a barra frontal estiver em equilíbrio.

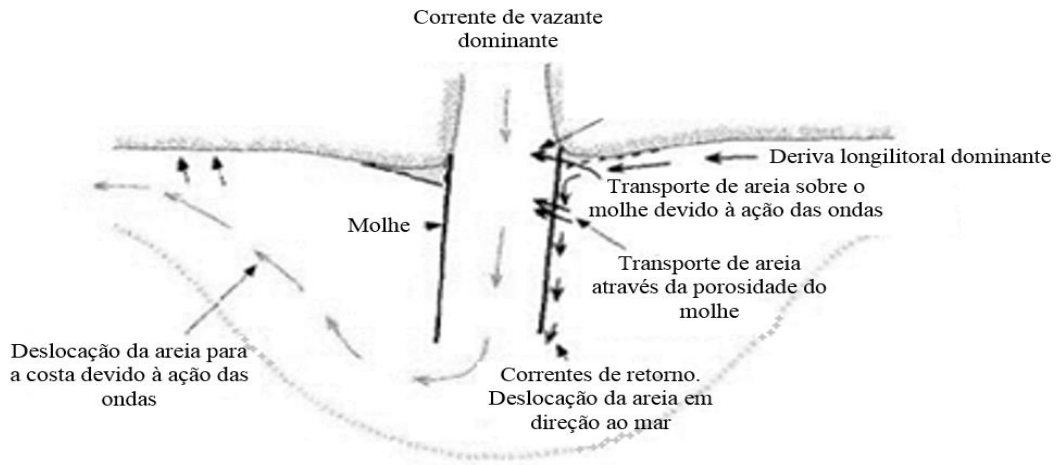


Figura 2.3 - Esquema do transporte de sedimento associado a uma barra de maré estabilizada através de molhes (FitzGerald, 2000).

Quando os elementos morfodinâmicos se encontram todos em equilíbrio, o delta cessa de crescer e de interromper a deriva longilitoral, promovendo um transporte sedimentar contínuo e ao longo das barras, ou seja, ao longo da parte externa do delta. O problema de navegação é originado devido ao desenvolvimento da barra frontal, durante o crescimento do delta. Sem intervenções como as dragagens o acesso ao estuário torna-se perigoso, contudo estas promovem um déficit de sedimento nas praias a sotamar, podendo resultar em erosão costeira.

Capítulo 3: Enquadramento da área de estudo

O estuário do rio Guadiana encontra-se localizado na fronteira mais a sul entre Portugal e Espanha (Figura 3.1). Este estuário inclui um delta de vazante arenoso com dimensões aproximadas de 20 Km por 10 Km (Garel *et al.*, 2014), não apresentando um delta de enchente uma vez que a morfologia estreita do canal do rio Guadiana não permite a sua formação.

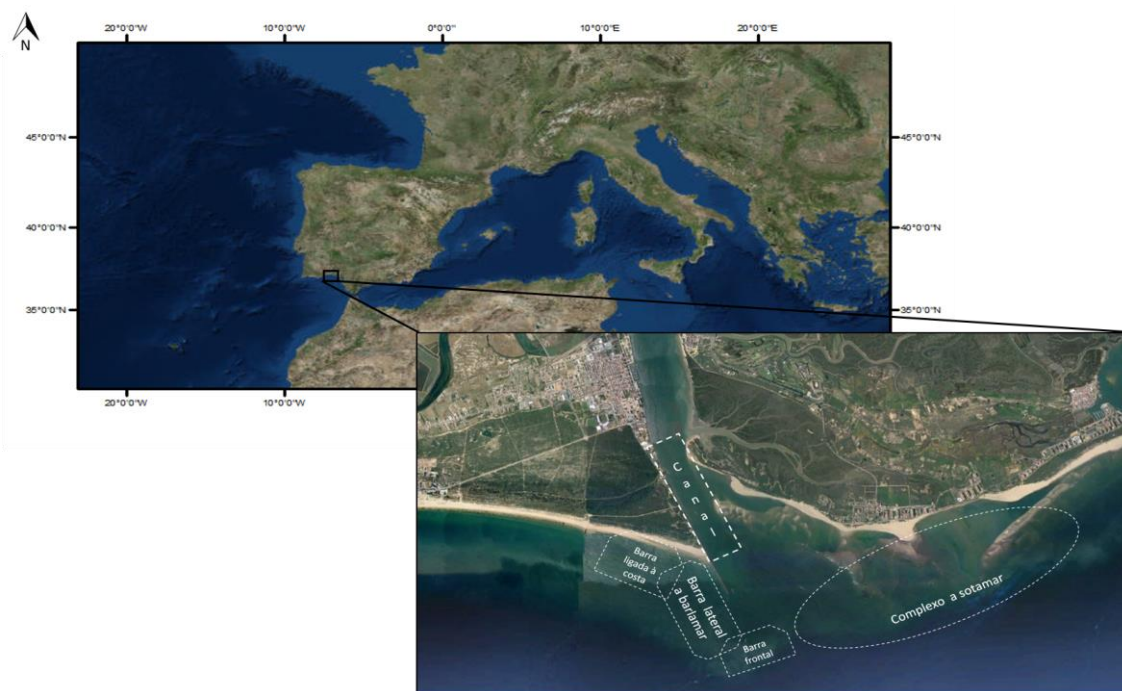


Figura 3.1 - Localização geográfica da área de estudo. Representação das estruturas morfológicas presentes no delta de vazante do estuário do Guadiana (canal, barra frontal, barra lateral a barlamar, barra ligada à costa e complexo a sotamar, contudo o complexo a sotamar não se encontra bem definido).

Esta área apresenta uma maré semidiurna com uma amplitude média de 2 m. A direção dominante das ondas é de W-SW (Oeste-Sudoeste) com 71% de ocorrências e de SE (Sudeste) com 23% de ocorrência, de energia moderada, apresentando uma altura de onda significativa média anual de 1m e um período máximo de 8.2 s (Costa *et al.*, 2001). De acordo com estes parâmetros de hidrologia e com referência à terminologia de Hayes (1979) o Guadiana é uma barra dominada pela maré e de energia mista. As condições de onda nesta área produzem uma deriva longilitoral dominante em direção a Este (Garel *et al.*, 2015).

O fornecimento sedimentar para o delta de vazante, por deriva longilitoral, tem um valor estimado de $1.8 \times 10^5 \text{ m}^3 \text{ ano}^{-1}$, este valor é baseado no volume de areia

acumulado no molhe do Guadiana, existindo, porém, outras estimativas regionais cujos valores se encontram compreendidos entre $1.0 \times 10^5 \text{ m}^3 \text{ ano}^{-1}$ e $3.0 \times 10^5 \text{ m}^3 \text{ ano}^{-1}$ (Gonzales *et al.*, 2001). Em adição, no passado o rio Guadiana também exportava um grande volume de sedimento ($43.96 \times 10^4 \text{ m}^3 \text{ ano}^{-1}$; Morales, 1995), especialmente em períodos de grande caudal (Garel *et al.*, 2009), no entanto, atualmente, o volume de sedimento exportado pelo rio Guadiana é mais pequeno (com uma estimativa de $5400 \text{ m}^3 \text{ ano}^{-1}$), devido à construção da barragem do Alqueva em 2002 (Garel e Ferreira, 2011).

Antes da intervenção antropogénica na barra de maré, a deriva longilitoral e a exportação fluvial eram incorporadas num sistema de banco de areia, banco de O'Bril, acumulado na margem oeste do estuário. Ao longo dos anos o banco foi crescendo na direção da margem este (Gonzales *et al.*, 2001). A rutura natural do banco de O'Bril foi documentada em cartas náuticas de 1838 e 1886 (Morales, 1995). Estas ruturas naturais originaram um transporte descontínuo de volume de areia (Garel *et al.*, 2014).

O delta de vazante do Guadiana, antes da intervenção antropogénica, corresponde ao modelo dois, proposto por FitzGerald *et al.* (2000), cuja adaptação se encontra representada na Figura 3.2. Estes deltas são caracterizados por barras de maré com posições estáveis, no entanto o canal de vazante migra ciclicamente para sotamar, ou seja, a direção dominante do transporte longilitoral nesta área produz uma acumulação preferencial do sedimento no lado barlamar do delta de vazante. A acumulação de sedimento, que resulta na génese do banco de areia de O'Bril, provoca uma deflexão para sotamar do canal de vazante principal, provocando a assimetria do mesmo. O canal abandonado, por sua vez, enche-se gradualmente de sedimento, depositado através das ondas e das correntes. O transporte sedimentar das praias de barlamar para sotamar (*sediment bypassing*, processo no qual a areia é transportada em frente da barra de maré de barlamar para sotamar) é descontínuo e depende da frequência das ruturas naturais associadas ao banco de O'Bril (Garel *et al.*, 2014), que podem ocorrer gradualmente ou pontualmente devido a fenómenos como tempestades. As ruturas naturais promovem o transporte de bancos de areia de barlamar para sotamar (Figura 3.2, Etapa 3), verificando-se a migração destes bancos para a costa, promovendo a acreção nas praias a sotamar, ou seja, a alimentação das praias a sotamar está relacionada à frequência das ruturas (FitzGerald *et al.*, 2000).

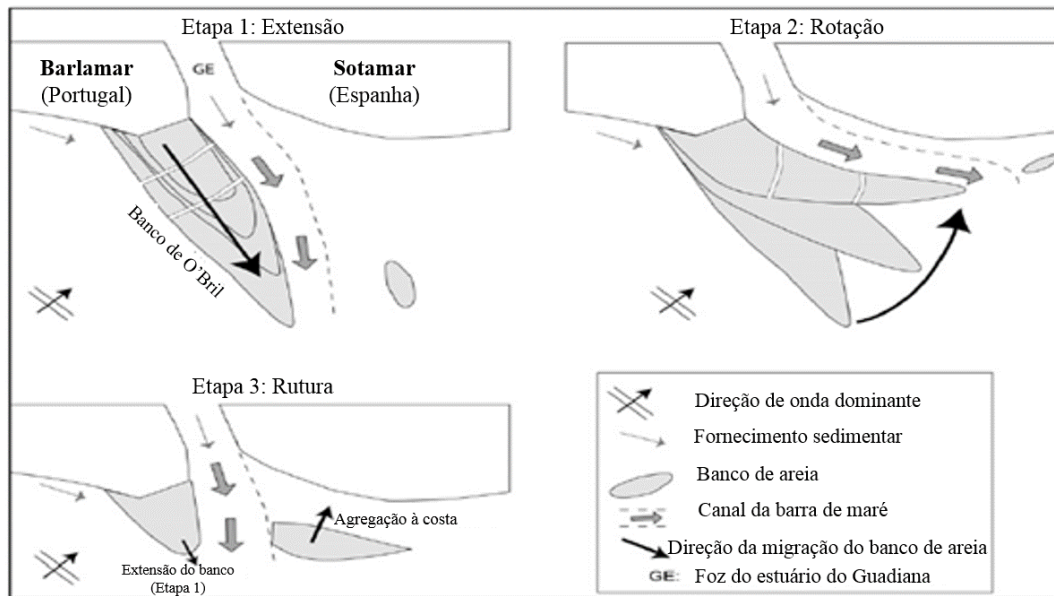


Figura 3.2 - Modelo conceitual da evolução do banco de O'Bril, adaptado do modelo de rutura do delta de vazante por FitzGerald *et al.*, 2000. Imagem retirada de Garel *et al.*, 2014.

A última rutura do banco de O'Bril foi conseguida artificialmente através da construção de dois molhes paralelos (1972 – 1974), sendo que estes dois molhes tiveram como objetivo estabilizar a barra do rio Guadiana (Garel *et al.*, 2014). O desenvolvimento do delta influencia a navegação na barra, constituindo uma ameaça para esta atividade, especialmente em maré baixa. Com o objetivo de melhorar as condições de navegação foram realizadas dragagens em 1986 e no início de 2015, na barra frontal (Garel *et al.*, 2015). A dragagem realizada em 1986 aumentou a profundidade e a extensão do canal da barra de maré, criando uma redução da profundidade da barra frontal do delta de vazante, contudo, em 1992 a barra frontal já se encontrava reconstruída. Garel *et al.* (2015) mostra que este desenvolvimento rápido resulta da presença de uma grande frente local de sedimento (banco de O'Bril), que permite o desenvolvimento duma barra lateral a barlamar e a reinicialização da deriva litoral em meados dos anos 90. Em consequência da presença de grande fonte local de sedimento, a barra frontal desenvolveu-se rapidamente depois da dragagem. Este crescimento caracteriza-se pelo desenvolvimento de barras sub-paralelas. A partir do ano 2000 verificou-se novamente a necessidade da intervenção sob a forma de dragagens neste sistema, tendo esta sido realizada, muito mais tarde, em 2015. Este atraso encontra-se relacionado com o facto de as dragagens serem intervenções com elevados custos associados.

No caso do delta de vazante do estuário do Guadiana, a barra lateral a barlamar é anormal, pois a deriva longilitoral apresenta claramente uma direção dominante para Este.

Garel *et al.* (2015) mostra que a barra lateral a barlamar do delta de vazante do estuário do Guadiana é resultante da fonte local de sedimento (banco de areia de O'Bril), existindo evidências que as áreas a sotamar e a barlamar ainda são grandemente controladas por resíduos do banco de O'Bril, ou seja, estas áreas ainda são controladas por processos de formação de bancos arenosos, que posteriormente migram para a costa e alimentam as praias adjacentes (Garel *et al.*, 2014), e não apenas pelo transporte de sedimento resultante da deriva longilitoral. Estas evidências fazem com que a taxa de deriva longilitoral possa ser mais baixa que a taxa calculada por Gonzales *et al.* (2001), que por sua vez se encontra baseada no volume de areia acumulado no molhe oeste do Guadiana.

Em relação ao complexo a sotamar, apesar de o seu estudo não ser aprofundado neste trabalho, segundo o estudo realizado por Garel *et al.* (2014) é possível verificar que não existe acumulação nestas estruturas (verifica-se erosão), fazendo com que o complexo a sotamar não influencie a transferência de sedimento, ou seja, pode-se considerar em equilíbrio uma vez que permite a transferência de areia da barra frontal para a praia a sotamar.

Capítulo 4: Material e Métodos

A evolução do delta do Guadiana foi analisada através de 14 mapas batimétricos, nomeadamente nos anos 1969, 1973, 1977, 1982, 1986, 1988, 1992, 1995, 2005, 2010, 2012, 2014, 2015 e 2016 (Figura 4.1). Estes mapas apresentam uma grelha com um espaçamento entre células de 25m e encontram-se referenciados segundo o zero hidrográfico português (ZH, 2m abaixo do nível do mar) (Garel *et al.*, 2015). Para este trabalho todos os mapas, com exceção do mapa batimétrico referente a 2016, já se encontravam processados, sendo o sistema de coordenadas usado ED 50 UTM 30 N.

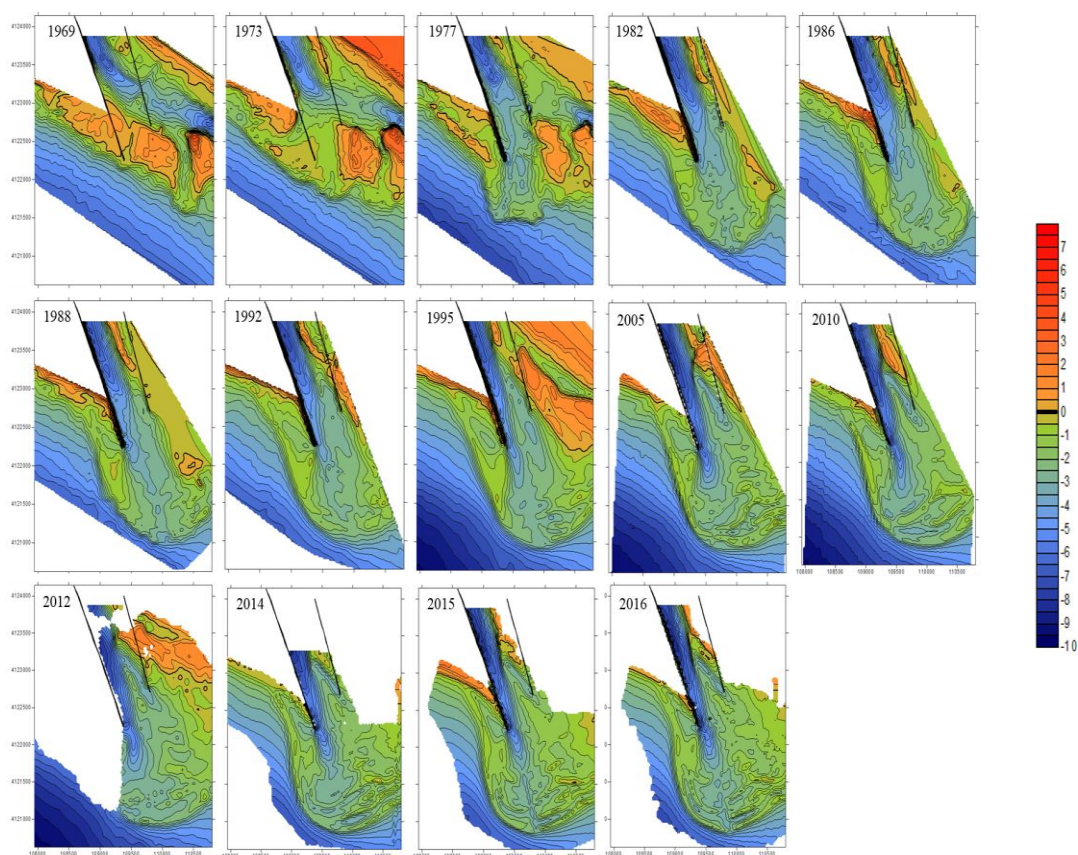


Figura 4.1 - Mapas batimétricos da área de estudo entre 1969 e 2016. Escala de cores: o vermelho corresponde a zonas menos profundas e o azul escuro corresponde a zonas com maior profundidade. A linha de contorno mais espessa corresponde à batimetria de 0 m. A referência é o zero hidrográfico (ZH, 2 m abaixo do nível do mar). O molhe a oeste e o molhe a este também se encontram representados.

Para a realização deste trabalho foram usados diversos *softwares*, nomeadamente, o *software* Surfer[®], Didger[®], Matlab[®], Hypack[®] e ArcGis[®] e a escolha da metodologia indicada para este trabalho exigiu a experimentação de vários métodos e a definição de várias tarefas.

4.1. Tarefa I: Batimetria 2016

Devido ao facto de ser importante realizar a recolha de batimetria regularmente, para ser possível observar a evolução do delta de vazante do estuário do Guadiana, foi realizada uma recolha de batimetria entre 30 e 31 de maio de 2016.

Esta tarefa exigiu a preparação de material tanto em terra como a bordo do barco. Em terra foi montado, no molhe Oeste, um GPS base a funcionar em modo RTK que permite a correção da influência das ondas e da maré (Figura 4.2 a)), ou seja, este GPS permite a obtenção automática da batimetria de fundo sem ser necessário corrigir posteriormente estas influências. A bordo do barco encontrava-se outro GPS (Figura 4.2 b)) que, por sua vez, permite seguir a deslocação do barco, assim como fornecer uma referência temporal, e também uma sonda, que permite a medição da profundidade (Figura 4.2 c)). Estas medições foram realizadas de acordo com perfis previamente escolhidos (criados no software HyPack[®]) e foram monitorizadas através de um computador a bordo (Figura 4.2 d)).

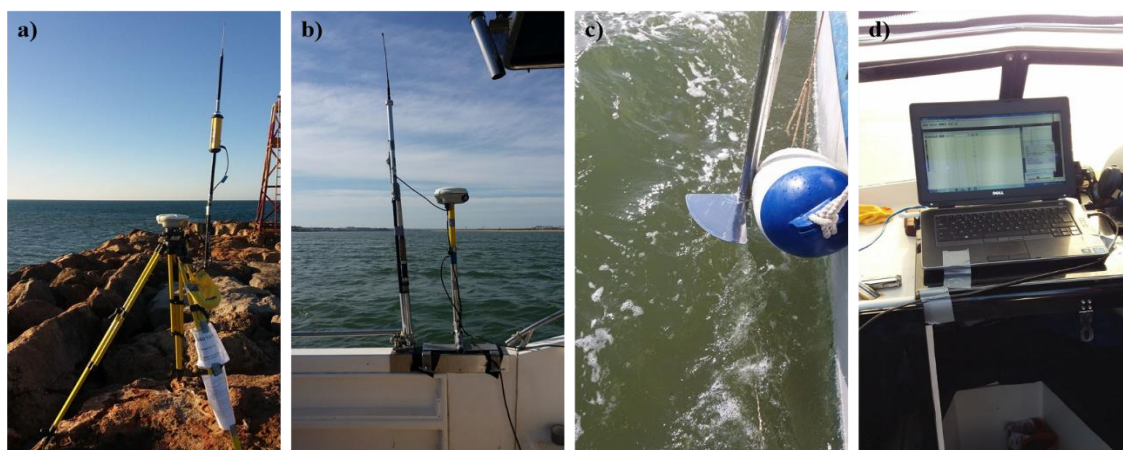


Figura 4.2 – Material usado na batimetria realizada em 2016. (a) Apoio do sistema GPS em terra. (b) GPS a bordo do barco. (c) sonda para medição da profundidade. (d) computador a bordo para monitorizar os dados recolhidos.

Para a realização desta tarefa, foram previamente programados 70 perfis na parte frontal do delta, desde um pouco para além da fronteira espanhola até ao lado de Portugal e 40 perfis na parte interior dos molhes, na boca do canal. Estes perfis apresentam um espaçamento de 50 m.

Ao contrário do que estava planeado, não foi realizado o levantamento de batimetria entre a linha 76 e a 71, localizadas na parte mais interior de entre os molhes,

uma vez que havia uma restrição temporal e estas linhas foram consideradas menos importantes.

Seguidamente, foi necessário realizar um tratamento de dados onde, através da utilização do *software* HyPack®, foi possível excluir erros associados à recolha dos mesmos, nomeadamente, erros associados à oscilação do barco e à consequentemente saída da sonda de dentro de água. A partir do editor de dados (Figura 4.3) foi possível observar os vários perfis e eliminar os dados com erros associados, como por exemplo, pontos com profundidades iguais ou superiores a zero como é o caso do ponto rodeado a branco na Figura 4.3.

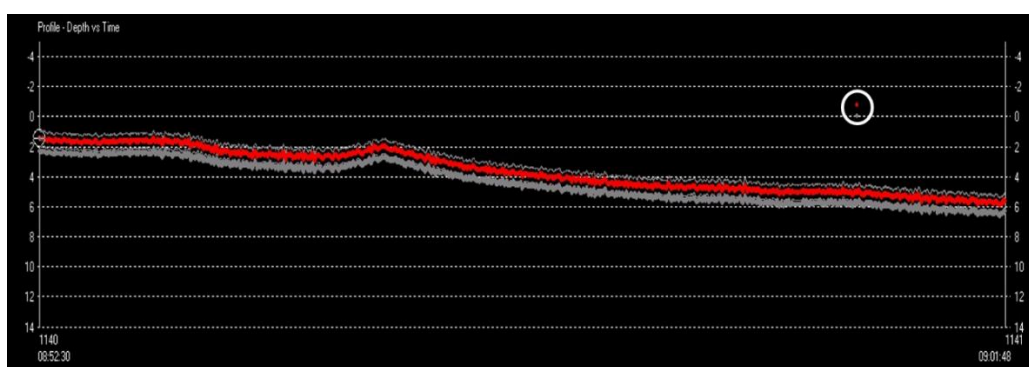


Figura 4.3 - Editor de dados. Perfil da profundidade ao longo do tempo. Atribuição de um *spike limit* igual a 0.5. Exemplo de um erro associado à recolha dos dados (rodeado a branco) que, posteriormente, foi eliminado.

Após a realização do tratamento de dados, foi possível obter um mapa com os dados editados, representado na Figura 4.4.

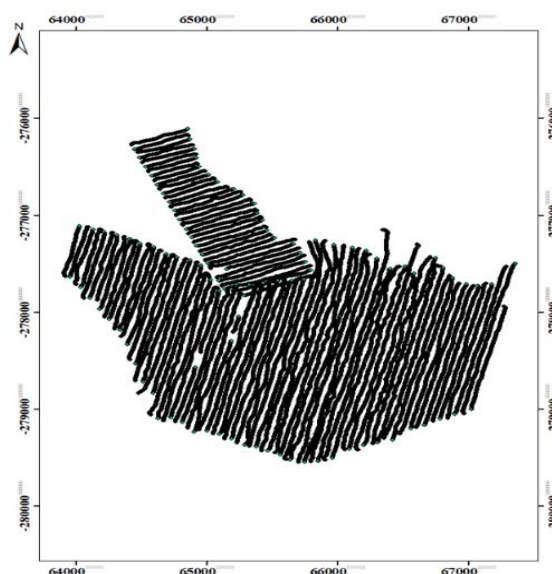


Figura 4.4 - Representação dos perfis recolhidos referentes à batimetria de 2016, após o tratamento de dados.

Como já foi referido anteriormente, as correções da maré foram realizadas automaticamente, no entanto, de modo a verificar os resultados obtidos foi retirado uma tabela referente à linha 1, cuja versão parcial se encontra representada na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Tabela parcial retirada do software Hypack[®] referente à linha 1. Discriminação do ponto, hora, nome da linha, elevação do GPS, coordenada X, coordenada Y, profundidade (*raw*), correção da maré e profundidade corrigida.

Ponto	Hora	Nº da Linha	Elevação GPS	X	Y	Profundidade (<i>raw</i>)	Correção da Maré	Profundidade Corrigida
1	08:52:31	1	54.99	67269.56	-277933.80	2.33	-1.24	1.46
2	08:52:31	1	54.99	67269.58	-277933.85	2.31	-1.24	1.44
3	08:52:31	1	54.99	67269.59	-277933.90	2.31	-1.24	1.44

Tendo em conta o ponto 1, sabendo que a profundidade da sonda é igual a 0.37 m e com base nos dados da Tabela 4.1, ao aplicar a Equação 4.1, foi obtida uma profundidade corrigida igual a 1.46 m, que, por sua vez, se pode verificar na Tabela 4.1.

Equação 4.1 - Cálculo da profundidade corrigida.

profundidade corrigida = profundidade (raw) + correção da maré + profundidade da sonda

Contudo, uma vez que os restantes mapas batimétricos se encontravam no sistema de coordenadas ED50 UTM 30N foi necessário realizar a conversão do sistema de coordenadas, dado que este mapa se encontra de acordo com o sistema de coordenadas ETRS89 Portugal TM06. Esta conversão foi realizada através de uma ferramenta existente no *software* ArcGis[®].

Após a conversão das coordenadas através do *software* ArcGis[®], a *shapefile* resultante foi convertida numa grelha através do *software* Surfer[®]. Através do Surfer[®] também foi possível efetuar a correção do zero hidrográfico de modo a que este ficasse concordante com os restantes mapas batimétricos.

4.2. Tarefa II: Evolução do delta (total) e das diferentes estruturas morfológicas

Com o objetivo de calcular a evolução do volume total do delta e do volume associado às estruturas morfológicas representadas, foi necessário desenhar um polígono para o delta total, um polígono para a barra frontal e outro para a barra lateral a barlar, através do *software* Surfer[®], para os vários mapas batimétricos. Contudo, uma vez que

nem sempre é possível selecionar a totalidade da zona de interesse, devido à variabilidade de cobertura espacial dos diferentes mapas, foi necessário criar mais que um polígono, sendo que estes se distinguem pela sua área, ou seja, a seleção dos polígonos encontra-se dependente da área das estruturas morfológicas representada nos mapas batimétricos. O facto de terem sido escolhidos polígonos com várias áreas também permitiu visualizar o efeito da seleção dos mesmos.

No caso dos polígonos criados para o delta de vazante no seu todo, o polígono Total 1.2 (Figura 4.5 a)) exibe uma área menor (especialmente restrito) mas apresenta uma maior cobertura temporal, ou seja, apesar de ter uma menor área com este polígono é possível calcular o volume do delta num maior número de mapas, sendo que cada mapa representa um ano diferente. Os polígonos Total 2.2 (Figura 4.5 b)) e Total 3.2 (Figura 4.5 c)) representam os polígonos intermédios entre o polígono Total 1.2 e o polígono Total 4.2, sendo que o polígono Total 2.2 apresenta uma menor extensão espacial que o polígono Total 3.2. Por sua vez, o polígono Total 4.2 (Figura 4.5 d)) representa o polígono com maior área, no entanto é um polígono temporalmente restrito, sendo apenas possível o cálculo do volume do delta total em cinco dos mapas batimétricos, devido à restrição da extensão espacial de alguns mapas.

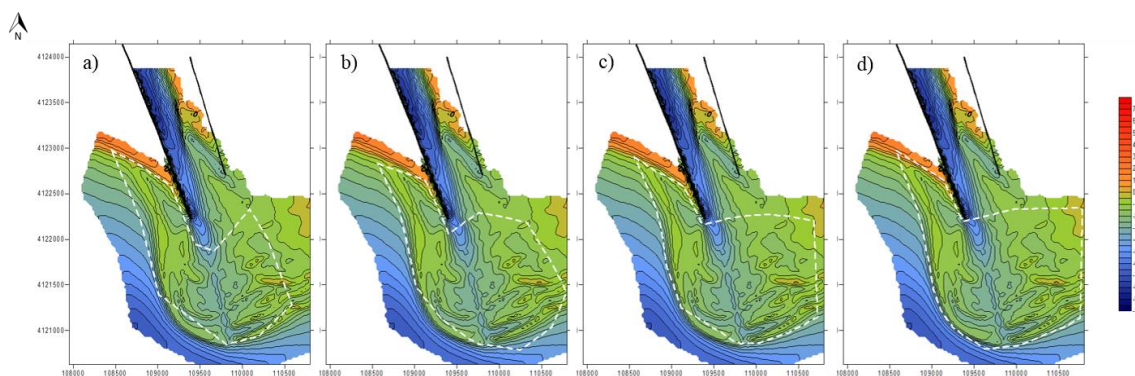


Figura 4.5 - Mapa batimétrico de 2015 com a representação do polígono Total 1.2 (a), do polígono Total 2.2 (b), do polígono Total 3.2 (c) e do polígono 4.2 (d). Os polígonos encontram-se representados em linha branca tracejada.

Em relação aos polígonos desenhados para a barra frontal, o polígono barra frontal 1 (Figura 4.6 a)) apresenta uma área menor (especialmente restrito) mas exibe uma maior cobertura temporal. O polígono barra frontal 3 (Figura 4.6 c)) representa o polígono com maior área, no entanto constitui um polígono temporalmente restrito. E, por sua vez, o polígono barra frontal 2 (Figura 4.6 b)) representa o polígono intermédio entre os polígonos barra frontal 1 e o barra frontal 3.

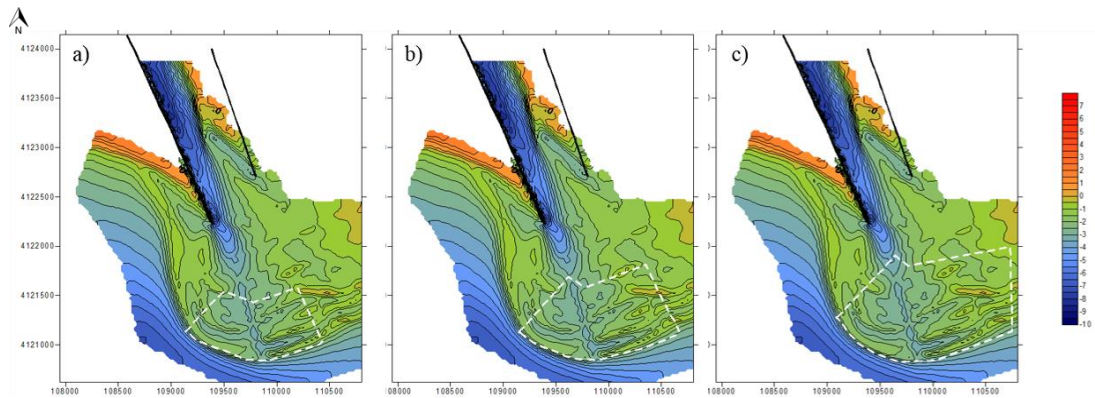


Figura 4.6 - Mapa batimétrico de 2015 com a representação do polígono barra frontal 1 (a), do polígono barra frontal 2 (b) e do polígono barra frontal 3 (c). Os polígonos encontram-se representados em linha branca tracejada.

Em relação aos polígonos desenhados para a barra lateral a barlar, o polígono barra lateral a barlar 1 (Figura 4.7 a)) apresenta uma área menor enquanto que o polígono barra lateral a barlar 3 (Figura 4.7 c)) representa o polígono com maior área, tendo sido apenas possível o cálculo do volume da barra lateral a barlar em doze dos mapas batimétricos. Por sua vez, o polígono barra lateral a barlar 2 (Figura 4.7 b)) representa o intermédio entre os polígonos barra lateral a barlar 1 e barra lateral a barlar 3.

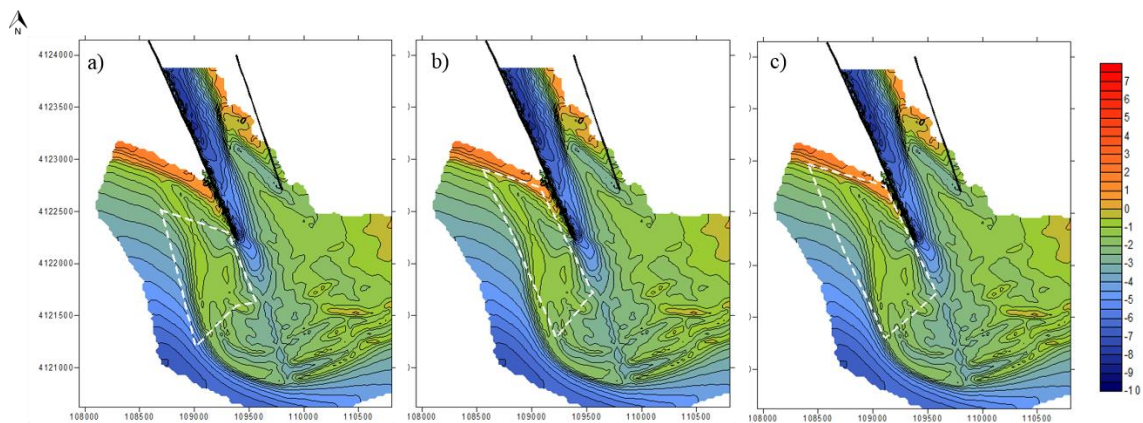


Figura 4.7 - Mapa batimétrico de 2015 com a representação do polígono barra lateral a barlar 1 (a), do polígono barra lateral a barlar 2 (b) e do polígono barra lateral a barlar 3 (c). Os polígonos encontram-se representados em linha branca tracejada.

A localização dos polígonos criados foi alterada de mapa batimétrico para mapa batimétrico de modo a que fossem seleccionadas as zonas de interesse, no entanto, devido ao facto de a barra frontal e a barra lateral a barlar só se formarem a partir do ano 1977, os polígonos associados às estruturas morfológicas aplicados nos mapas batimétricos de 1969 e 1973 apresentam a mesma localização dos polígonos criados para o mapa

batimétrico de 1977. O volume associado a cada polígono criado foi calculado através de uma ferramenta existente no *software* Surfer[®].

Posteriormente, foram realizadas as diferenças dos volumes calculados em relação a um valor base. Para todos os polígonos criados foi considerado o volume calculado a partir do mapa batimétrico de 1969 como o valor base, com exceção do polígono Total 4.2. Uma vez que não foi possível obter dados referentes a 1969 o polígono Total 4.2 não apresenta o mesmo valor de base que os outros polígonos, sendo o volume calculado a partir do mapa batimétrico referente a 1977 o valor de base considerado.

Através da representação da diferença dos volumes em função do tempo, realizada através do *software* Matlab[®], ou seja, através da evolução temporal é possível perceber se a barra se encontra em equilíbrio ou não, uma vez que uma barra estabilizada não apresenta taxa de crescimento. A evolução volumétrica dos elementos morfológicos a sotamar não foi realizada, uma vez que os mapas disponíveis não apresentam cobertura espacial suficiente.

Variações inferiores a 0.10 m foram consideradas pouco significativas, uma vez que este valor representa alterações bastante reduzidas no sistema, não sendo representativas da evolução do delta, estando associadas apenas a uma variabilidade reduzida natural do mesmo.

4.3. Tarefa III: Cálculo do volume do banco de O'Bril (fonte sedimentar local)

Para o cálculo do volume do banco de areia O'Bril foi necessário através do mapa batimétrico de 2014, desenhar e digitalizar novas batimétricas paralelas à linha de costa, representativas de uma configuração batimétrica na ausência do delta (Figura 4.8). O mapa batimétrico de 2014 foi utilizado uma vez que neste é possível observar e distinguir as diferentes linhas batimétricas longe do delta, assim como distinguir a linha de costa, facilitando a tarefa em causa. Este passo foi realizado através da utilização do *software* Didger[®], onde foram desenhadas várias linhas, com uma batimetria entre 0 m e -14 m com um intervalo de -1m. A digitalização destas linhas foi realizada através de uma ferramenta de calibração de imagem, existente no *software* Didger[®], onde foram inseridos os limites das coordenadas cartesianas do mapa batimétrico de 2014.

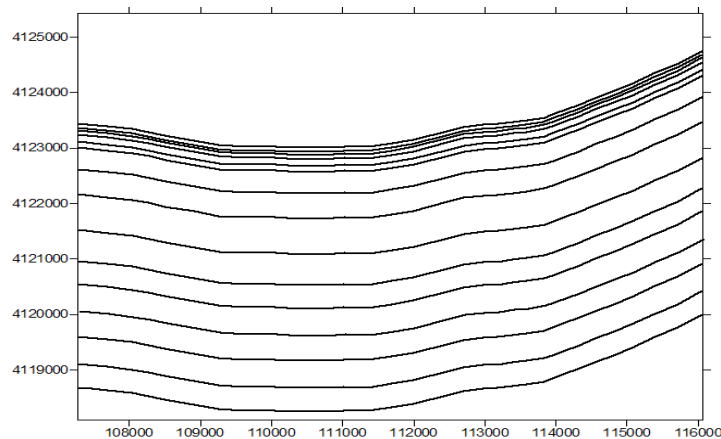


Figura 4.8 - Possível configuração batimétrica na ausência do delta. Linhas batimétricas desenhadas paralelamente à linha de costa, sobre o mapa batimétrico referente a 2014.

Após o desenvolvimento desta imagem foi possível, através do *software* Surfer[®], a criação de uma nova malha onde foi alterado os limites das coordenadas cartesianas de modo a que estas ficassem concordantes com os limites de coordenadas cartesianas do mapa batimétrico de 1969. Posteriormente realizou-se a sobreposição da malha criada com o mapa batimétrico referente ao ano 1969, onde ainda se encontra representado o banco O’Bril, uma vez que este mapa é anterior à construção dos molhes. Realizou-se, então, um *blanking*, onde foi escolhido o polígono da zona onde exista interseção dos dados. Após este processo e através de ferramentas existentes no *software* Surfer[®] calculou-se o volume do banco de areia, onde, basicamente, foi realizada a subtração das duas malhas selecionadas de modo a obter a altura em cada ponto.

No entanto, verificou-se necessidade de correção da linha de costa, uma vez que as paralelas digitalizadas se encontravam de acordo com o ano de 2014 e não com a linha de costa existente em 1969. Esta correção foi realizada através do *software* Matlab[®], onde foi calculada a diferença entre a linha de costa de 2014 e a linha de costa de 1969. Sabendo a posição da linha de costa nos dois anos (dados retirados de Garel *et al.*, 2015) foi possível ajustar a latitude, para que a correção necessária fosse realizada. Foram, então, repetidos os passos referidos anteriormente para criar uma nova grelha com a linha de costa corrigida.

Para a inclusão do volume do banco de O’Bril no modelo teórico foi necessário aplicar os polígonos, anteriormente criados, associados à barra frontal e à barra lateral a barlar, ao mapa batimétrico de 1969, especificamente localizados onde se verifica a existência do banco de O’Bril. O volume associado a cada polígono criado foi calculado através de uma ferramenta existente no *software* Surfer[®].

4.4. Tarefa IV: Dragagem 2015

Com o objetivo de obter mais informação sobre a dragagem realizada em 2015 e de incorporar esta intervenção no modelo teórico, foram pesquisados os valores da dimensão da dragagem assim como do custo associado de modo a discutir qual a melhor estratégia de dragagem. Foram também realizadas tentativas de cálculo do volume de dragagem através da Equação 4.2 e através do *software* Surfer[®] e da utilização dos mapas batimétricos referentes a 2014 e 2015, de modo a ser possível comparar uma situação antes da dragagem (2014) com uma situação após a dragagem (2015).

Equação 4.2 – Fórmula do volume de um paralelepípedo.

volume = comprimento × largura × profundidade

Adicionalmente foram analisados documentos de batimetria existentes referentes à dragagem realizada em 28 de abril de 2015, fornecidos pelo Prof. J. A. Morales, (Anexo 1 e 2), que por sua vez apresentam uma profundidade alvo entre 3.5 e 4 m no canal de navegação (após dragagem). Esta análise foi realizada com o objetivo de efetuar uma comparação entre os resultados obtidos logo após a intervenção e os dados representados no mapa batimétrico referente a 2015, retirados a 11 e 12 de junho. De modo a averiguar a alteração do sistema e se a intervenção realizada foi realmente eficiente ou não, foram selecionados dez pontos, com um espaçamento semelhante entre si, onde foram extraídas as respetivas profundidades, tanto nos documentos referidos no Anexo 1 e 2 como para o mapa batimétrico de 2015. Para esta comparação foi necessário converter as coordenadas dos documentos no Anexo 1 e 2 (ETRS 89 UTM 29 N) para as coordenadas do mapa batimétrico de 2015 (ED 50 UTM 30 N), cuja ação foi realizada através do *Online coordinate converter* (<http://tool-online.com/es/conversion-coordenadas.php>, acedido: 6/7/2016).

Por fim, para perceber melhor a variação de profundidade antes e depois da intervenção sob a forma de dragagem, nos mapas batimétricos de 2014 e 2015, foi criado um perfil através do *software* Surfer[®] de modo a facilitar a visualização das diferenças de profundidade, cujos resultados foram representados através do *software* Matlab[®], afim de averiguar a eficácia da dragagem realizada em 2015.

4.5. Tarefa V: Modelo matemático

Através do *software* Matlab[®] foi implementado um modelo matemático, que utilizou o volume associado ao banco de O’Bril e os volumes calculados através dos mapas batimétricos para computar a evolução temporal das estruturas morfológicas em causa. Esta abordagem pretende permitir a compreensão da resposta morfológica do sistema a alterações induzidas pelo Homem (Dabees e Kraus, 2008) e assim ajudar na planificação da intervenção necessária para este sistema em termos espaciais e volumétricos.

Este modelo encontra-se baseado no modelo definido por Kraus (2000), representado na Figura 4.9, que consiste em equações simples de transferência de areia de um reservatório (barra) para outro. Este modelo encontra-se, então, fundamentado por uma analogia com um sistema de reservatório, necessitando, portanto, para além da taxa de entrada sedimentar, os respetivos volumes de equilíbrio para cada estrutura morfológica. Em termos gerais, quando o reservatório atinge o volume de equilíbrio o modelo considera que a areia é transportada para sotamar ou barlar e não fica acumulada, ou seja, se a barra frontal se encontra em equilíbrio, toda a areia que chega é transportada através da deriva longilitoral para a barra lateral a barlar ou a sotamar, dependendo do quão dominante a deriva longilitoral é. Neste modelo é assumido que a quantidade de sedimento transportado a partir de uma determinada estrutura morfológica varia de forma diretamente proporcional ao volume da estrutura em causa, ou seja, quanto mais perto do ponto de equilíbrio e quanto maior a estrutura morfológica mais sedimento é transportado a partir desta para o reservatório seguinte. Para a solução analítica deste modelo é assumido um transporte sedimentar linear (Kraus, 2000).

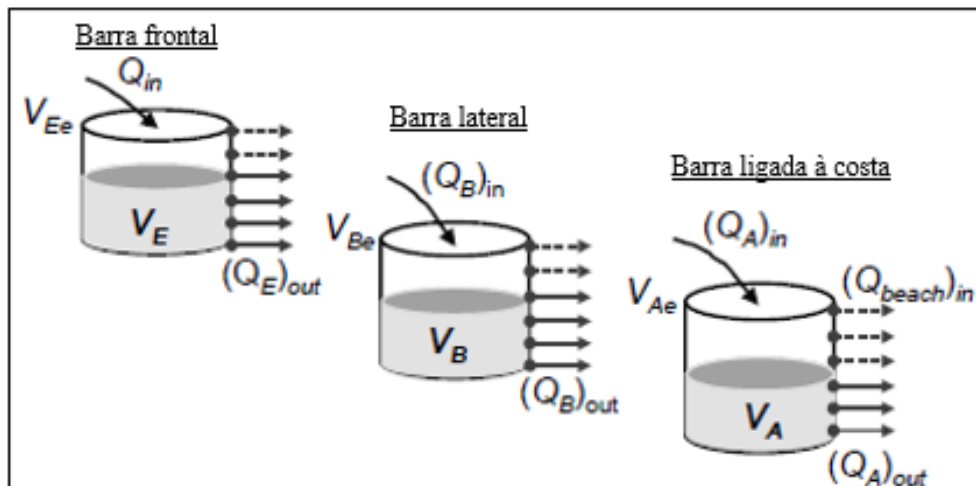


Figura 4.9 - Representação do modelo reservatório morfológico de barras de maré (Kraus, 2000). Q_{in} representa a taxa de entrada sedimentar, $(Q_B)_{in}$ é a taxa transporte de sedimento para a barra lateral, $(Q_A)_{in}$ é a taxa transporte de sedimento para a barra ligada à costa, $(Q_E)_{out}$ é a taxa de transporte de sedimento que sai da barra frontal, $(Q_B)_{out}$ corresponde à taxa de transporte de sedimento que sai da barra lateral, $(Q_A)_{out}$ é a taxa de transporte de sedimento que sai da barra ligada à costa, $(Q_{beach})_{in}$ é a taxa de transporte de sedimento para a praia ($(Q_{beach})_{in} = (Q_A)_{out}$), V_E é o volume da barra frontal, V_B é o volume da barra lateral, V_A é o volume da barra ligada à costa, V_{Ee} é o volume de equilíbrio da barra frontal, V_{Be} volume de equilíbrio da barra lateral e V_{Ae} volume de equilíbrio da barra ligada à costa.

Condições simplificadas são consideradas de modo a obter uma solução que revela os parâmetros que controlam as diferentes estruturas morfológicas presentes no sistema (Kraus, 2000). O modelo implementado apenas considera a formação da barra frontal e da barra lateral a barlar, uma vez que o complexo a sotamar não se encontra representado nos mapas não permitindo uma comparação entre o modelo e os mapas batimétricos, sendo, no entanto, considerado em equilíbrio. Além disso, o volume de sedimento transportado para a barra ligada à costa e o volume de sedimento transportado para a praia adjacente não são considerados no modelo implementado para este caso em particular.

O parâmetro α é obtido a partir do volume de equilíbrio da barra frontal (V_{Ee}) (retirado da análise da evolução volumétrica das barras) e da taxa de entrada sedimentar (Q_{in}) (Equação 4.3). Este parâmetro define uma escala temporal característica para a barra frontal e permite calcular o ano no qual o volume de sedimento que sai da estrutura morfológica é igual ao volume que é retido (t_c) (Equação 4.4). O parâmetro α em combinação com o volume de equilíbrio associado à barra frontal (V_{Ee}) permite calcular o volume da barra frontal ao longo do tempo (V_E) (Equação 4.5).

O parâmetro β define uma escala temporal característica para a barra lateral a barlar e é obtida através da taxa de entrada sedimentar (Q_{in}) e do volume de equilíbrio da barra lateral a barlar (V_{Be}) (Equação 4.6). O parâmetro β implementado no modelo apresenta uma modificação da equação proposta por Kraus (2000), uma vez que foi tido em consideração o facto de a barra lateral em causa se encontrar a barlar, onde a deriva longitudinal apresenta apenas uma ocorrência de 23% nesta direcção (Costa *et al.*, 2001). Após a criação da barra frontal um certo período de tempo (t_1) é necessário para a barra lateral a barlar receber uma quantidade significativa de areia, que por sua vez é calculado através da Equação 4.7. O parâmetro t_1 é calculado a partir do volume da barra frontal (VE), da taxa de entrada sedimentar (Q_{in}) e do tempo assumido para a formação da barra frontal (t). Por sua vez, a partir da Equação 4.8 é possível computar a evolução temporal da barra lateral a barlar (VB), a partir do volume de equilíbrio da barra lateral a barlar (V_{Be}), do parâmetro β e do parâmetro t_1 .

Em relação às unidades associadas a estes parâmetros, o volume de equilíbrio da barra frontal (VEe), o volume de equilíbrio da barra lateral a barlar (V_{Be}), o volume da barra frontal (VE) e o volume da barra lateral a barlar (VB) encontram-se expressos em m^3 , o parâmetro α , o parâmetro β , o tempo (t), o parâmetro t_1 e o t_c expressam-se em anos e, por fim, a taxa de entrada sedimentar (Q_{in}) é expressa em m^3/ano .

Equação 4.3 - Equação usada para o cálculo do alfa (α). Sendo VEe o volume de equilíbrio da barra frontal e Q_{in} a taxa de entrada sedimentar.

$$\alpha = \frac{Q_{in}}{VEe}$$

Equação 4.4 - Equação que permite o cálculo do ano no qual o volume de sedimento que sai da estrutura morfológica é igual ao volume que é retido.

$$t_c = \frac{1.59}{\alpha}$$

Equação 4.5 - Equação usada para o cálculo do volume da barra frontal. Sendo VEe o volume de equilíbrio da barra frontal e t o tempo.

$$VE = VEe \times (1 - e^{-\alpha \times t})$$

Equação 4.6 - Equação usada para o cálculo do beta (β). Sendo V_{Be} o volume de equilíbrio da barra lateral a barlar e Q_{in} a taxa de entrada sedimentar.

$$\beta = \frac{(Q_{in} \times 0.23)}{V_{Be}}$$

Equação 4.7 - Equação usada para o cálculo do tempo efetivo da evolução da barra lateral.

$$t1 = t - \left(\frac{VE}{Qin}\right)$$

Equação 4.8 - Equação usada para o cálculo do volume da barra lateral a barlar. Sendo VBe o volume de equilíbrio da barra lateral a barlar.

$$VB = VBe \times (1 - e^{-\beta \times t1})$$

Para a construção do modelo foi, então, necessário definir várias variáveis nomeadamente o tempo (t), onde foi considerado um período de 180 anos. O ano inicial foi considerado 1977 uma vez que só a partir deste ano se observa a barra frontal. O volume de equilíbrio da barra frontal e da barra lateral a barlar foi considerado como sendo o resultado do polígono barra frontal 2 e do polígono barra lateral a barlar 2 no ano de 1982 (ano onde foi possível considerar a estrutura em equilíbrio), uma vez que estes são os polígonos intermédios e os mais representativos dos dados, na sua generalidade. Foram, também, consideradas taxas de entrada de sedimento provenientes de várias fontes, nomeadamente, a deriva longilitoral mínima, a deriva longilitoral média, a deriva longilitoral máxima, a exportação fluvial, a combinação da exportação fluvial com a deriva longilitoral, com o objetivo de observar a diferença na evolução das estruturas morfológicas em causa, de modo a que se conseguisse justificar a presente evolução do sistema. A inclusão do banco de O'Bril foi realizada de modo a aproximar o modelo da realidade e foram utilizados os volumes obtidos através dos polígonos barra frontal 2 e barra lateral a barlar 2 no mapa batimétrico de 1969, cuja localização dos mesmos se encontrava sobreposta ao banco de O'Bril existente.

4.6. Tarefa VI: Cenários de dragagem

Para o estudo das dragagens foram aplicados, ao modelo teórico, vários cenários de dragagem com o objetivo de determinar a estratégia mais indicada. Esta tarefa foi realizada através da utilização do *software* Matlab®.

Foi considerado o modelo cuja taxa de entrada sedimentar resulta da deriva longilitoral intermédia (0.18 Mm³/ano) em combinação com a exportação fluvial. O modelo considerado, também, apresenta a inclusão da influência do volume associado ao banco de O'Bril, uma vez que este se trata do cenário mais realista. Apenas o comportamento da barra frontal foi avaliado, uma vez que esta é a estrutura diretamente

afetada pelas dragagens, ou seja, à evolução da barra frontal obtida através do modelo implementado, foi subtraído vários volumes de dragagem, num determinado ano.

Considerando a mesma área (75000 m^3), e o mesmo custo por m^3 da dragagem de 2015 (13.40 €/m^3), foram estimadas a frequência necessária associada e o custo de cada cenário de dragagem aplicado, de modo a que fosse possível constatar qual a melhor estratégia de intervenção.

Capítulo 5: Resultados

5.1. Tarefa I: Batimetria 2016

O resultado final do tratamento de dados de batimetria aplicado é o mapa de contornos representado na Figura 5.1. O mapa batimétrico resultante permite uma visualização da situação atual do delta de vazante do Guadiana. A partir deste mapa observa-se o atual estado da barra frontal e da barra lateral a barlar, assim como o desenvolvimento do local onde foi efetuada a dragagem. O sistema apresenta dois molhes, representados a preto na Figura 5.1, nestes observa-se a acumulação de areia na parte oeste do molhe mais a barlar, assim como um aumento de profundidade na parte terminal dos molhes, indicando erosão. O canal apresenta a maior profundidade representada no mapa, constatando-se uma profundidade maior junto do molhe oeste do que no molhe este. A barra frontal encontra-se posicionada em frente do canal, apresentando uma forma semelhante a um trapézio. Esta estrutura morfológica é composta por várias dunas de menor profundidade, estando a profundidade desta estrutura morfológica compreendida entre -4 m e -0.5 m. Nesta estrutura ainda são observadas evidências da dragagem realizada em 2015, uma vez que as dunas não se encontram conectadas, constatando-se uma maior profundidade na zona do canal de navegação. A barra lateral a barlar apresenta uma forma mais retangular e mais alongada, encontrando-se à esquerda da barra frontal, e apresenta um intervalo de profundidades entre 0 m e -3 m.

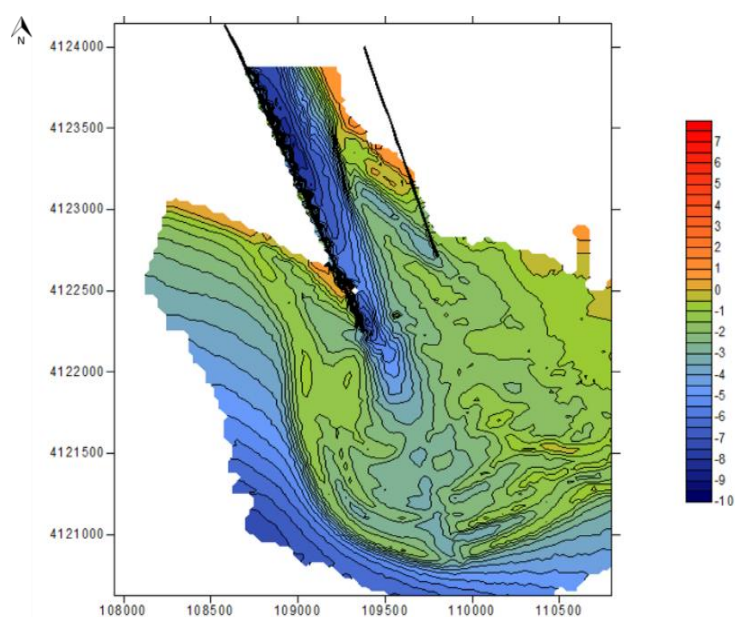


Figura 5.1 – Mapa batimétrico referente a 2016. As linhas pretas mais espessas representam os molhes existentes.

5.2. Tarefa II: Evolução do delta (total) e das diferentes estruturas morfológicas

5.2.1. Evolução do delta (total)

Ao calcular a diferença dos volumes entre o valor considerado valor base e o volume calculado nos anos 1969, 1973, 1977, 1982, 1986, 1988, 1992, 1995, 2005, 2010, 2014, 2015 e 2016 foi possível obter o gráfico representado na Figura 5.2. O ano 2012 foi excluído uma vez que a extensão espacial do mapa batimétrico referente a este ano é reduzida e os polígonos criados ocupam áreas onde não existem dados.

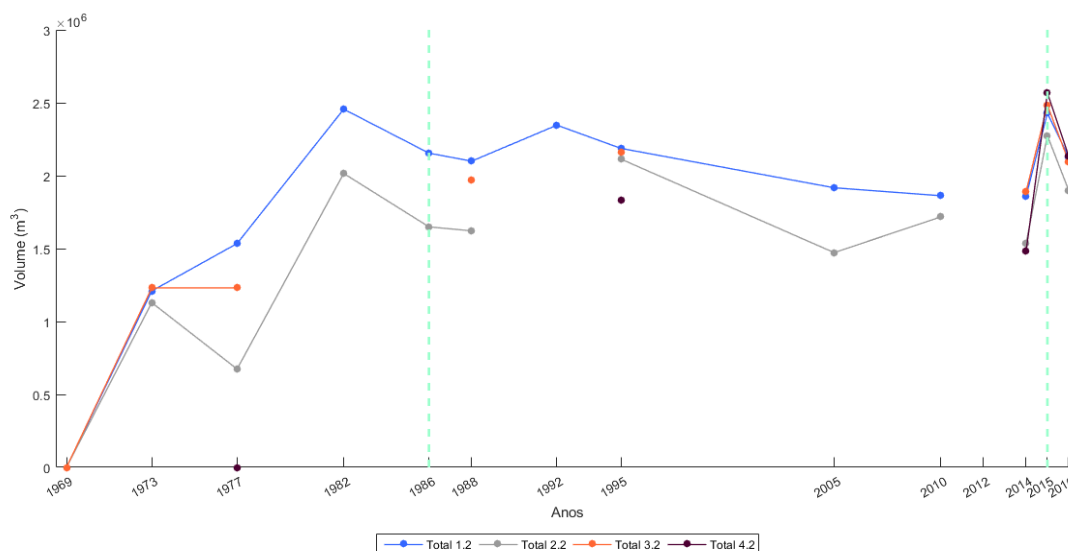


Figura 5.2 - Gráfico das diferenças dos volumes (m^3) calculados pelos polígonos Total 1.2 (azul), Total 2.2 (cinzento), Total 3.2 (laranja) e Total 4.2 (roxo) em função dos anos (1969, 1973, 1977, 1982, 1986, 1988, 1992, 1995, 2005, 2010, 2012, 2014, 2015 e 2016). O valor base considerado para os polígonos Total 1.2, Total 2.2 e Total 3.2 foi o volume calculado em 1969 e o valor base considerado para o polígono Total 4.2 foi o volume calculado em 1977. A reta verde e tracejada é usada para identificar os anos nos quais foram realizadas intervenções sobre a forma de dragagens, nomeadamente, 1986 e 2015.

Os dados acima representados não se encontram normalizados, cada polígono apresenta áreas diferentes, sendo o polígono 4.2 maior que o polígono 1.2. Este facto não permite uma comparação direta entre a diferença dos volumes calculados pelos diferentes polígonos, no entanto, é possível observar um comportamento semelhante. Variações inferiores a 0.10 m foram consideradas pouco significativas, o que se reflete numa variação de volume de $\pm 0.18 Mm^3$ para o polígono Total 1.2, $\pm 0.22 Mm^3$ para o polígono Total 2.2, $\pm 0.23 Mm^3$ para o polígono Total 2.3 e $\pm 0.26 Mm^3$ para o polígono 4.2.

Através do gráfico podemos observar, em termos gerais, duas tendências distintas. Entre 1969 e 1982, podemos constatar, através dos polígonos Total 1.2 e Total 2.2, um aumento do volume do delta, sendo que a diferença do volume calculado neste período

do tempo igual a 2.5 Mm^3 para o polígono Total 1.2 e igual a 2.0 Mm^3 para o polígono Total 2.2. Por fim, entre 1982 e 2016, é possível observar uma certa estabilização do crescimento do delta, uma vez que apesar de se ter verificado uma diminuição do volume do delta, tanto através do polígono Total 1.2 (-0.3 Mm^3) como através do polígono Total 2.2 (-0.1 Mm^3), esta diminuição corresponde a uma taxa igual a $-0.01 \text{ Mm}^3/\text{ano}$ e a $-0.003 \text{ Mm}^3/\text{ano}$, respetivamente, sendo, portanto, considerada pouco significativa.

O aumento de volume entre 1969 e 1982 pode ser justificado pela construção dos molhes (1972-1974) que provocaram uma redistribuição da areia anteriormente presente no banco de O'Bril. A construção dos molhes provocou a rutura e desmantelamento do banco de O'Bril, visível no mapa batimétrico de 1969 (Figura 5.3), e a areia que formava esta estrutura foi obrigada a redistribuir-se, existindo então o seu transporte para mar aberto, levando à formação do novo delta.

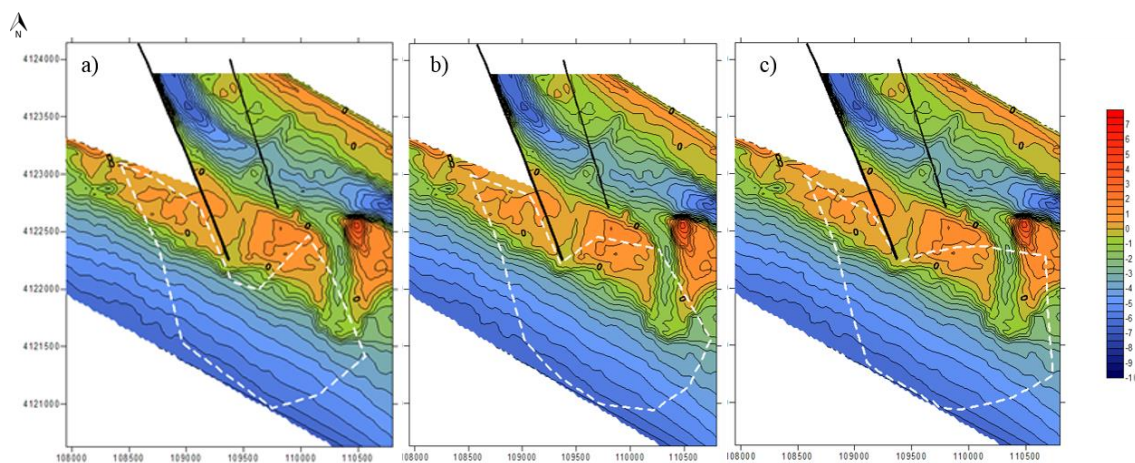


Figura 5.3 - Representação do mapa batimétrico de 1969 com a representação do polígono Total 1.2 (a), do polígono Total 2.2 (b) e do polígono Total 3.2 (c). Os polígonos encontram-se representados em linha branca tracejada.

No entanto, observa-se que, entre 1973 e 1977, no polígono Total 2.2 existe uma diminuição do volume do delta (-0.5 Mm^3) e que no polígono Total 3.2 se verifica uma conservação do volume do delta. Esta diferença entre polígonos resulta do facto de polígonos diferentes englobarem zonas diferentes, no caso do polígono Total 2.2 (Figura 5.4 a) e c)) o polígono abrange parte do interior do canal fazendo com que se verifique uma diminuição do volume em comparação com o polígono Total 3.2 (Figura 5.4 b) e d)). No entanto, a grande diferença entre os mapas batimétricos de 1973 e 1977, é que no ano de 1973 (Figura 5.4 a) e b)), ainda se verifica a presença parcial do banco de O'Bril que foi transportado para mar aberto, enquanto que em 1977 (Figura 5.4 c) e d)) já se

verifica a formação da barra frontal assim como a nova posição do canal, refletindo num aumento de volume.

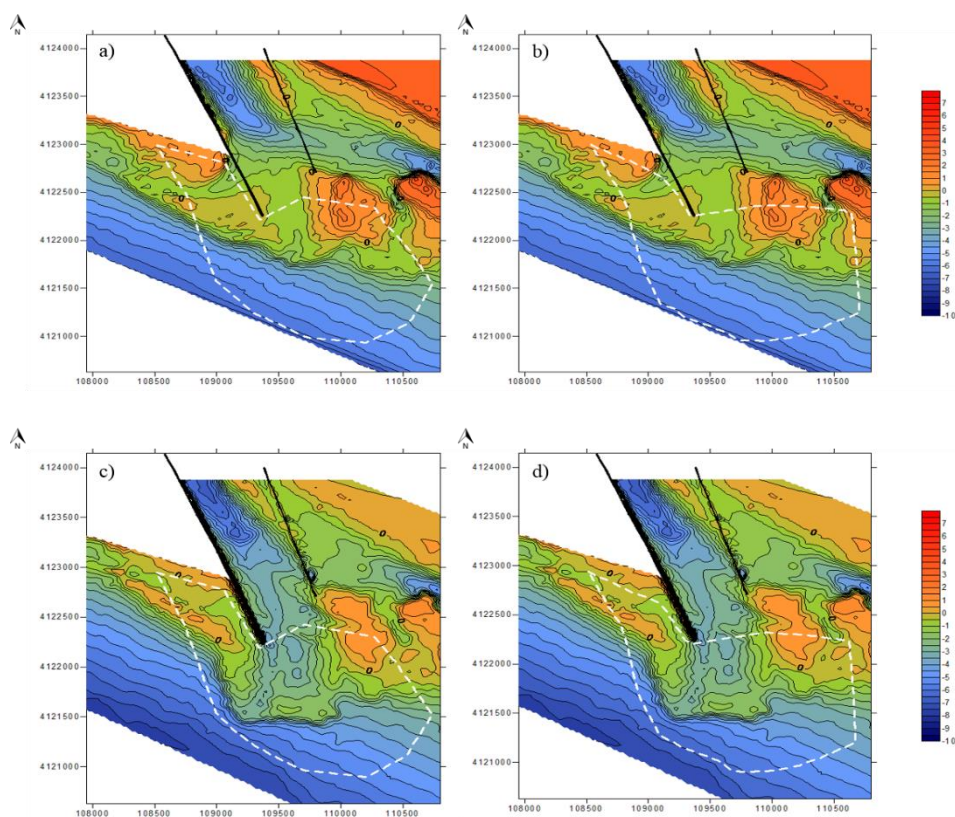


Figura 5.4 – Representação do mapa batimétrico de 1973 com a representação do polígono Total 2.2 (a) e do polígono Total 3.2 (b) e do mapa batimétrico de 1977 com a representação do polígono Total 2.2 (c) e do polígono Total 3.2 (d). Os polígonos encontram-se representados em linha branca tracejada.

Apesar de considerar que entre 1982 e 2016 há estabilização do volume do delta, existem, no entanto, pequenas oscilações do mesmo. Em 1986 realizou-se a primeira intervenção sob a forma de dragagens verificando-se uma diminuição do volume igual a -0.3 Mm^3 para o polígono Total 1.2 e igual a -0.4 Mm^3 para o polígono Total 2.2, em comparação com 1982. Os resultados desta intervenção são observados nos mapas batimétricos, no entanto, uma vez que esta intervenção foi reduzida concentrando-se mais no canal de navegação, é possível observar uma maior alteração na zona da barra frontal (Figura 5.5).

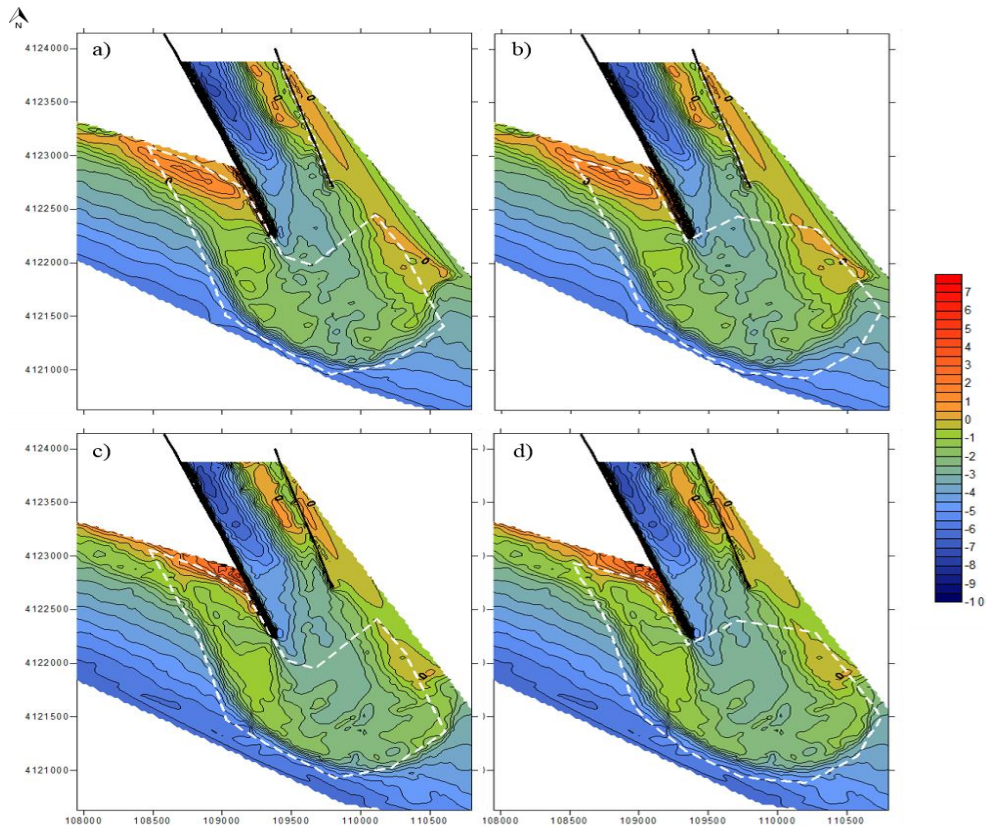


Figura 5.5 - Representação do mapa batimétrico de 1982 com a representação do polígono Total 1.2 (a) e do polígono Total 2.2 (b) e do mapa batimétrico de 1986 com a representação do polígono Total 1.2 (c) e do polígono Total 2.2 (d). Os polígonos encontram-se representados em linha branca tracejada.

Entre 1986 e 1988 continuou a verificar-se uma diminuição pouco significativa do volume total do delta, tanto através do polígono Total 1.2 (-0.05 Mm^3) como através do polígono Total 2.2 (-0.03 Mm^3). Seguidamente, entre 1988 e 1992, através do polígono Total 1.2 verifica-se um aumento do volume do delta total (0.3 Mm^3), este aumento é justificado pela necessidade de o sistema tender a procurar uma situação de equilíbrio, voltando a existir acumulação de areia onde anteriormente se tinha verificado uma diminuição do volume do delta. Posteriormente, entre 1992 e 1995 verifica-se uma diminuição do volume do delta através do polígono Total 1.2 (-0.2 Mm^3), sendo possível observar uma maior erosão na zona mais próxima do canal no ano de 1995 (Figura 5.6).

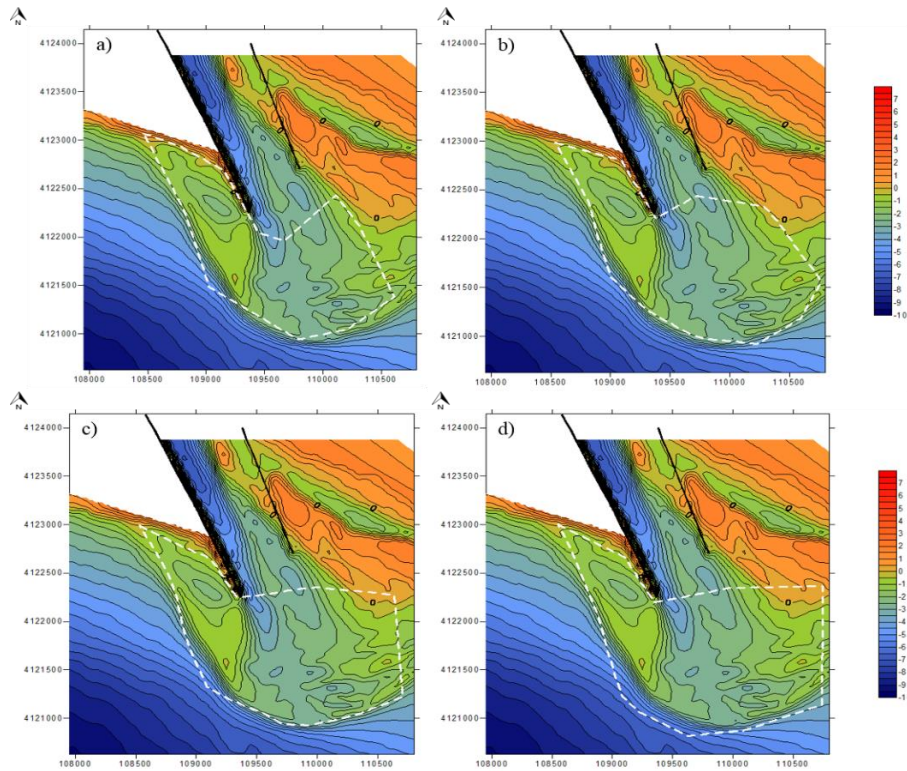


Figura 5.6 - Representação do mapa batimétrico de 1995 com a representação do polígono Total 1.2 (a), do polígono Total 2.2 (b), do polígono Total 3.2 (c) e do polígono 4.2 (d). Os polígonos encontram-se representados em linha branca tracejada.

Entre 1995 e 2005 é continuada a diminuição do volume do delta, no entanto, esta diminuição é mais acentuada no polígono Total 2.2 (-0.6 Mm^3) que no polígono Total 1.2 (-0.3 Mm^3). Apesar de se verificar um aumento de dunas na zona da barra frontal é possível observar que existe uma diminuição do volume na zona da barra lateral a barlar (Figura 5.7).

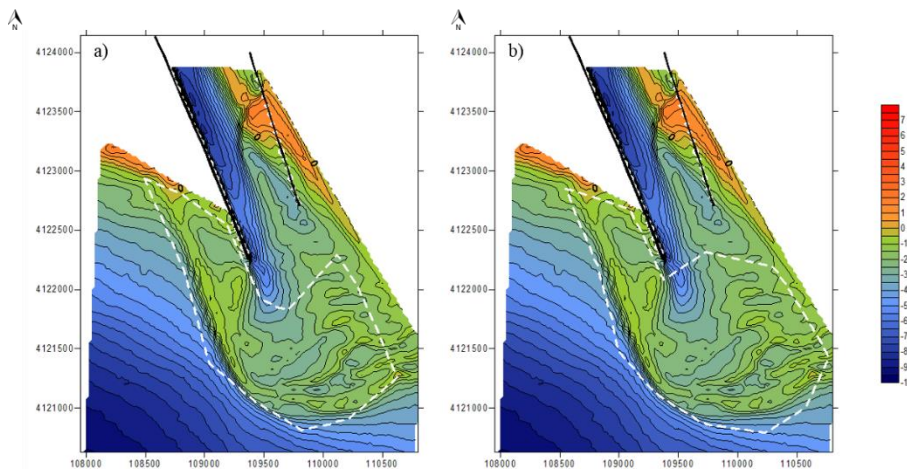


Figura 5.7 - Representação do mapa batimétrico de 2005 com a representação do polígono Total 1.2 (a) e do polígono Total 2.2 (b). Os polígonos encontram-se representados em linha branca tracejada.

Entre 2005 e 2010 é possível observar o aumento do volume do delta através do polígono Total 2.2 (0.3 Mm^3) porém verifica-se uma diminuição pouco significativa do volume do delta através do polígono Total 1.2 (-0.05 Mm^3). Através da análise dos mapas batimétricos constata-se que, neste período de tempo, o polígono Total 1.2 se encontra mais de acordo com aquilo que é possível observar no mapa (Figura 5.7 e Figura 5.8).

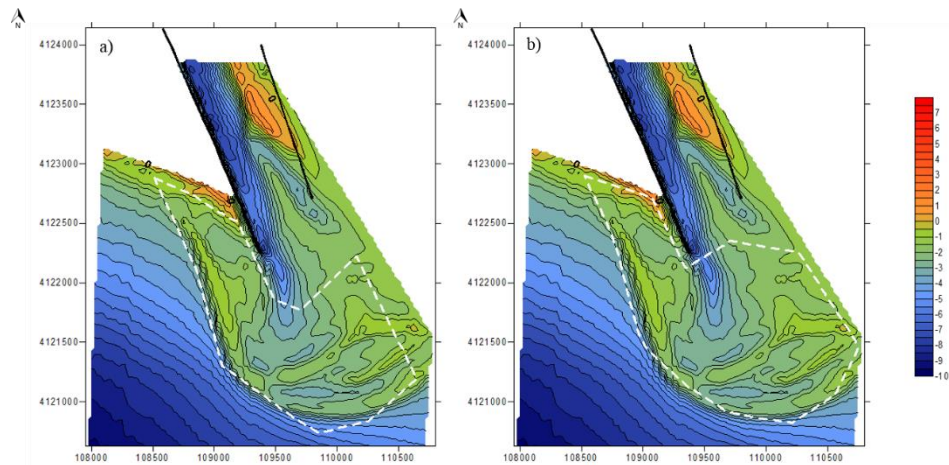


Figura 5.8 - Representação do mapa batimétrico de 2010 com a representação do polígono Total 1.2 (a) e do polígono Total 2.2 (b). Os polígonos encontram-se representados em linha branca tracejada.

Por sua vez entre 2010 e 2014 observa-se, com base nos volumes calculados através dos polígonos desenhados, uma diminuição do volume do delta para os polígonos Total 1.2 (-0.002 Mm^3) e Total 2.2 (-0.2 Mm^3). Esta diferença é pouco significativa e, como tal, podemos considerar o mesmo volume do delta em 2010 (Figura 5.8) e em 2014 (Figura 5.9).

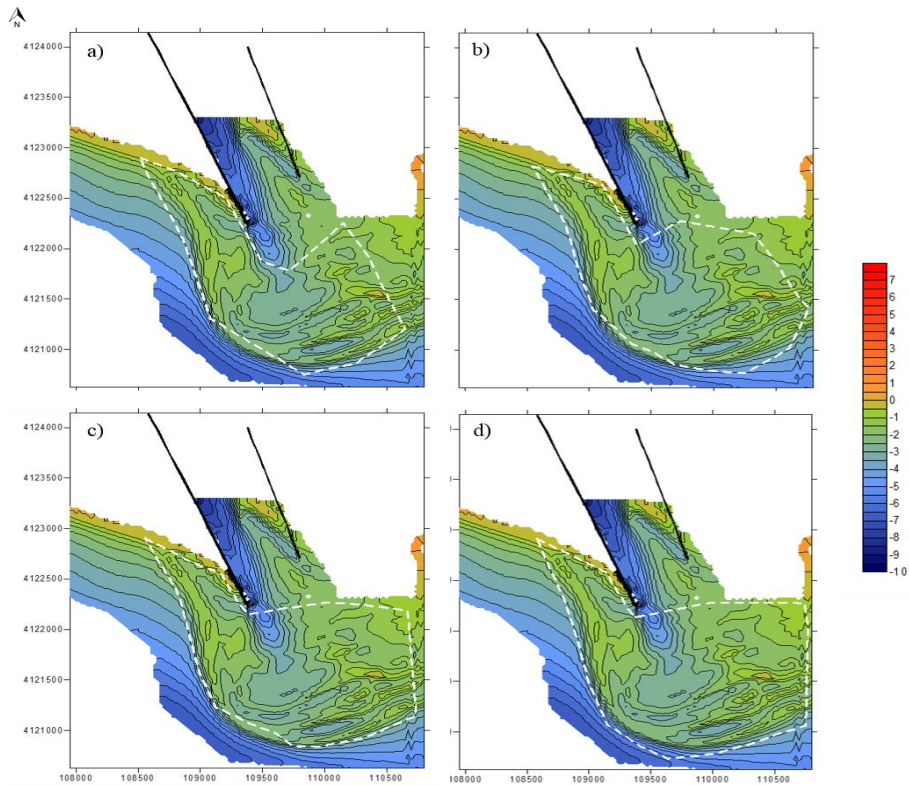


Figura 5.9 - Representação do mapa batimétrico de 2014 com a representação do polígono Total 1.2 (a), do polígono Total 2.2 (b), do polígono Total 3.2 (c) e do polígono 4.2 (d). Os polígonos encontram-se representados em linha branca tracejada.

Em 2015 realizou-se a segunda intervenção sob a forma de dragagens, contudo através do gráfico é possível observar um aumento do volume do delta total entre 2014 e 2015, sendo que no polígono Total 1.2 e no polígono Total 3.2 a diferença de volume entre estes dois anos é igual a 0.6 Mm^3 , no polígono Total 2.2 é igual a 0.7 Mm^3 e no polígono Total 4.2 é igual a 1.1 Mm^3 . Este aumento de volume é oposto à tendência de estabilização observada nos anos anteriores e indica que sem a dragagem o aumento de volume seria maior. Nos mapas batimétricos é possível observar o crescimento do delta, tanto na zona da barra lateral barlar como na zona da barra frontal, mesmo tendo em conta ao facto de ter sido realizada uma dragagem, que é possível observar na continuação do canal (Figura 5.10). Contudo, podemos constatar que o volume calculado em 1982 e o volume calculado em 2015 são semelhantes, apresentando uma diferença pouco significativa, igual a -0.02 Mm^3 para o polígono Total 1.1 e igual a 0.2 Mm^3 para o polígono Total 2.2.

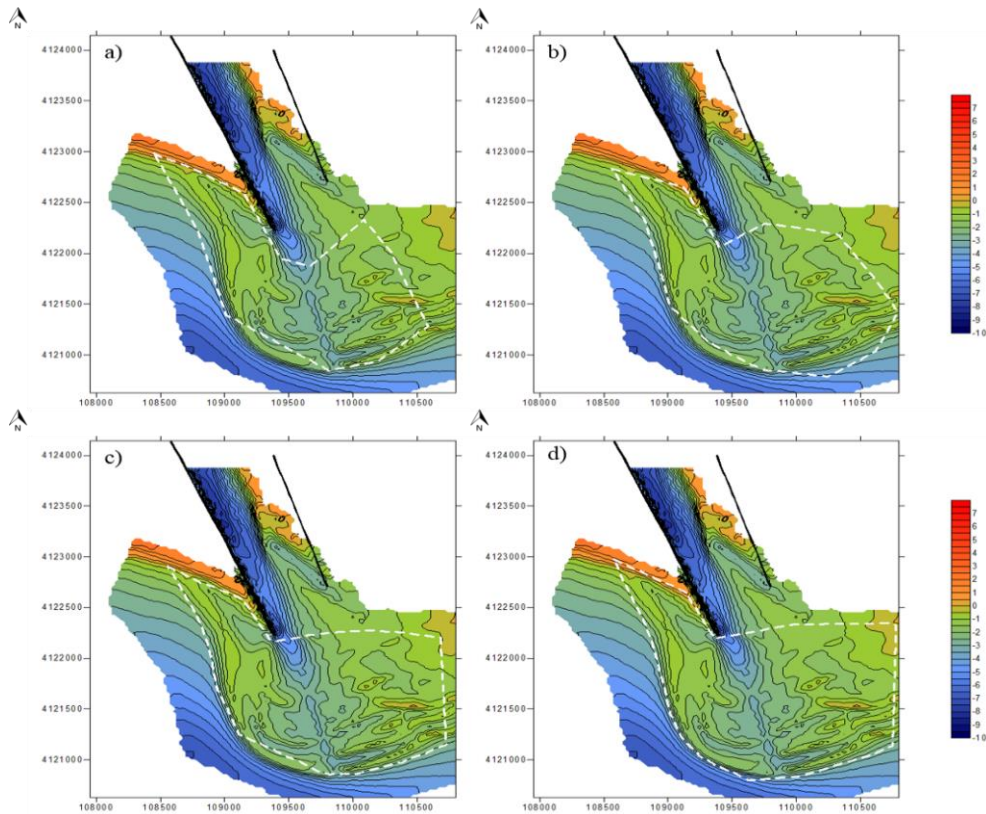


Figura 5.10 - Representação do mapa batimétrico de 2015 com a representação do polígono Total 1.2 (a), do polígono Total 2.2 (b), do polígono Total 3.2 (c) e do polígono 4.2 (d). Os polígonos encontram-se representados em linha branca tracejada.

Por fim, entre 2015 e 2016 constata-se uma diminuição não significativa do volume total do delta, nomeadamente -0.03 Mm^3 para o polígono Total 1.1 e igual a -0.04 Mm^3 para os restantes polígonos.

Os mapas batimétricos referentes a 2014 (Figura 5.9), 2015 (Figura 5.10) e 2016 (Figura 5.11) mostram a variabilidade do volume do delta total a curto prazo, ou seja, as diferenças encontradas são maioritariamente justificadas por uma variabilidade anual dependente de várias variáveis, maioritariamente tempestades, e cujo ênfase se dá pelo facto de serem os únicos mapas de anos consecutivos. A análise dos mapas batimétricos mostra claramente que esta variabilidade é natural e incluída numa fase de estabilidade.

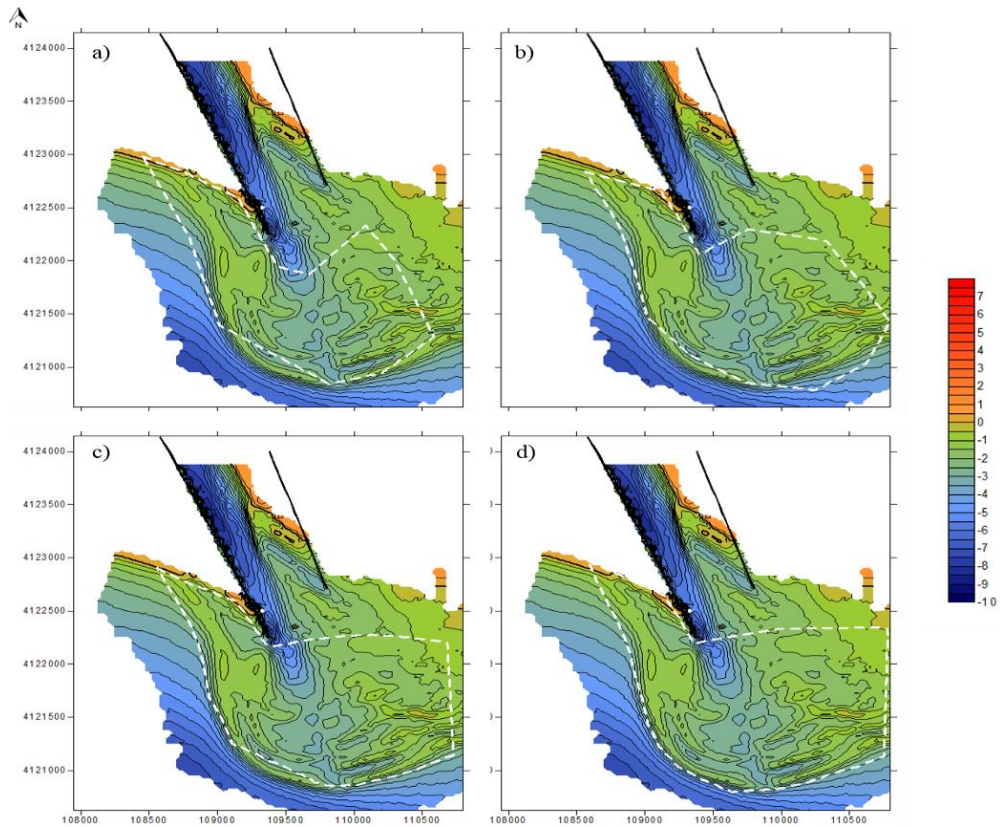


Figura 5.11 - Representação do mapa batimétrico de 2016 com a representação do polígono Total 1.2 (a), do polígono Total 2.2 (b), do polígono Total 3.2 (c) e do polígono 4.2 (d). Os polígonos encontram-se representados em linha branca tracejada.

5.2.2. Evolução da barra frontal

No caso da barra frontal, ao calcular a diferença dos volumes entre o volume calculado em 1969 (valor considerado valor base) e o volume calculado nos anos 1969, 1973, 1977, 1982, 1986, 1988, 1992, 1995, 2005, 2010, 2012, 2014, 2015 e 2016 foi possível obter o gráfico representado na Figura 5.12.

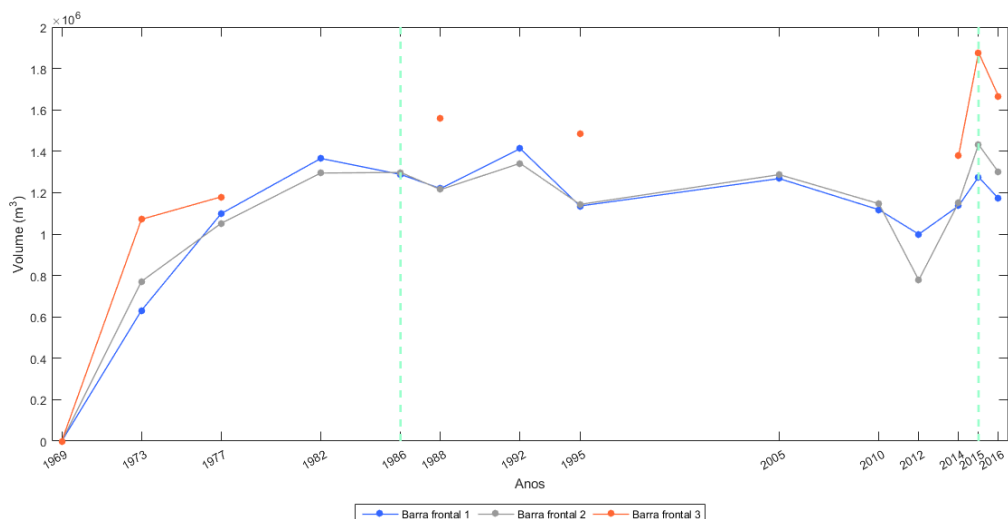


Figura 5.12 - Gráfico das diferenças dos volumes calculados pelos polígonos barra frontal 1 (azul), barra frontal 2 (cinza) e barra frontal 3 (laranja) em função dos anos (1969, 1973, 1977, 1982, 1986, 1988, 1992, 1995, 2005, 2010, 2012, 2014, 2015 e 2016). O valor base considerado para os polígonos foi o volume calculado em 1969. A reta verde e tracejada é usada para identificar os anos nos quais foram realizadas intervenções sobre a forma de dragagens, nomeadamente, 1986 e 2015.

Os dados acima representados não se encontram normalizados, no entanto observa-se um comportamento semelhante dos resultados obtidos com os diferentes polígonos. Variações inferiores a 0.10 m foram consideradas pouco significativas, o que se reflete numa variação de volume de $\pm 0.06 \text{ Mm}^3$ para o polígono barra frontal 1, $\pm 0.09 \text{ Mm}^3$ para o polígono barra frontal 2 e $\pm 0.13 \text{ Mm}^3$ para o polígono barra frontal 3.

Com base no gráfico podemos observar, em termos gerais, duas tendências distintas. Entre 1969 e 1982, podemos constatar através dos polígonos barra frontal 1 e barra frontal 2 um aumento do volume do delta, sendo que a diferença do volume calculado neste período do tempo igual a 1.4 Mm^3 para o polígono barra frontal 1 e igual a 1.3 Mm^3 para o polígono barra frontal 2. Por fim, entre 1982 e 2016, é possível observar uma certa estabilização do crescimento do delta, uma vez que apesar de se ter verificado uma diminuição do volume da barra frontal através do polígono barra frontal 1 (-0.2 Mm^3) e um aumento do volume da barra frontal através do polígono barra frontal 2 (0.004 Mm^3), estas variações correspondem aproximadamente a uma taxa de $-0.005 \text{ Mm}^3/\text{ano}$ e $0.0001 \text{ Mm}^3/\text{ano}$, respetivamente e, portanto, consideradas pouco significativas.

O aumento de volume entre 1969 e 1982 pode ser justificado pela construção dos molhes (1972-1974) que provocaram uma redistribuição da areia anteriormente presente no banco de O’Bril. A construção dos molhes provocou a rutura e o desmantelamento do

banco de O'Bril e a areia que formava esta estrutura foi obrigada a redistribuir-se, existindo então uma parte da areia anteriormente pertencente ao banco de O'Bril que sofreu uma deslocação e que posteriormente deu origem à barra frontal e a outras estruturas morfológicas.

Entre 1982 e 1986 verificou-se uma diminuição do volume da barra frontal para o polígono barra frontal 1 (-0.08 Mm^3) contudo para o polígono barra frontal 2 verifica-se um aumento não significativo do volume da estrutura morfológica em causa (0.003 Mm^3). Esta diferença encontra-se relacionada com o facto de os polígonos apresentarem áreas distintas, no entanto, com base na observação dos mapas podemos concluir que neste período de tempo se verificou uma diminuição do volume do delta, que pode ser explicada pela intervenção sob a forma de dragagem realizada em 1986. Entre 1986 e 1988 é possível observar uma diminuição do volume da barra frontal. A diferença de volume entre estes anos é igual a -0.07 Mm^3 no polígono barra frontal 1 e, igual a -0.08 Mm^3 no polígono barra frontal 2. Devido ao facto desta intervenção ter sido concentrada no canal de navegação, o seu impacto é notado na estrutura morfológica em causa.

Entre 1988 e 1992 observa-se um aumento do volume da barra frontal, sendo a diferença calculada, neste período de tempo, através do polígono barra frontal 1 igual a 0.2 Mm^3 e, a diferença calculada pelo polígono barra frontal 2 igual a 0.1 Mm^3 . Este aumento é justificado pela necessidade de o sistema encontrar uma situação de equilíbrio, verificando-se a recuperação de parte do volume que foi retirado anteriormente.

Entre 1992 e 1995 verifica-se uma diminuição do volume da barra frontal, sendo a diferença calculada através do polígono barra frontal 1 igual a -0.3 m^3 e a diferença calculada pelo polígono barra frontal 2 igual a -0.2 Mm^3 . A diminuição do volume da barra frontal neste intervalo de tempo aparenta estar associada ao aumento da extensão do canal, uma vez que nos mapas batimétricos é possível observar uma maior erosão na parte adjacente ao canal em 1995 (Figura 5.13).

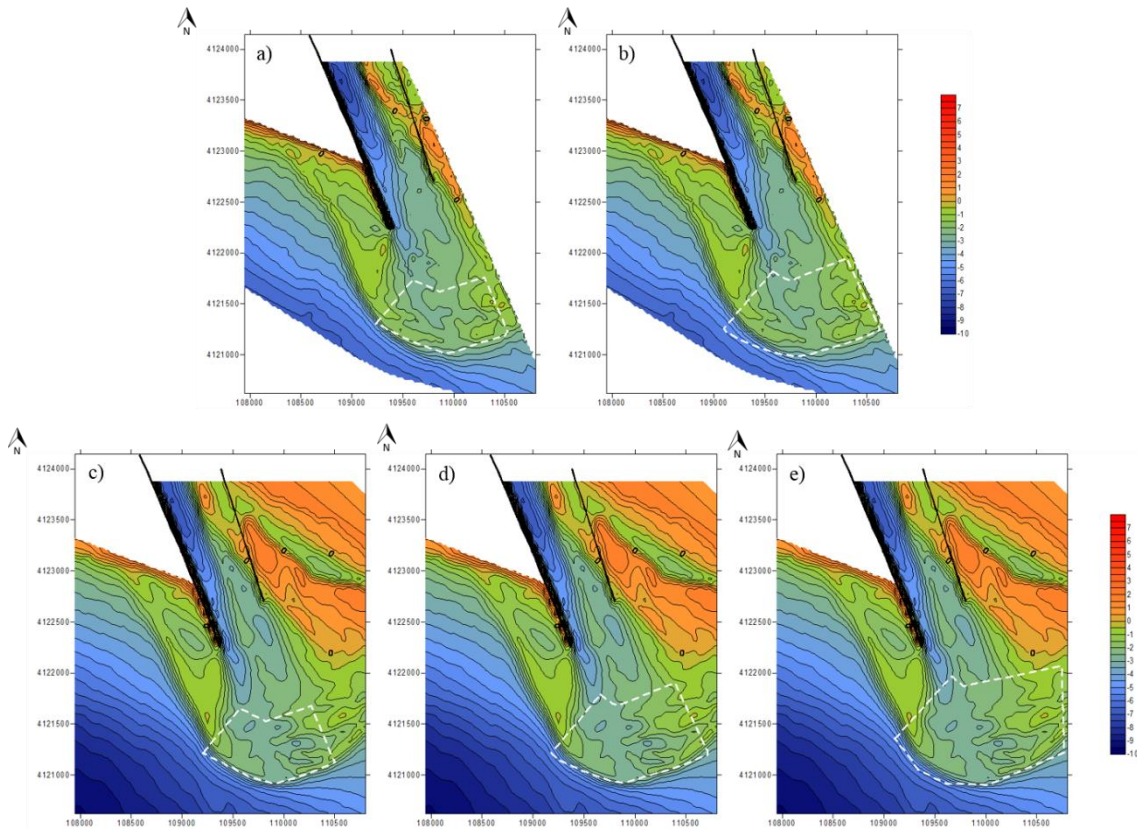


Figura 5.13 - Representação do mapa batimétrico de 1992 com a representação do polígono barra frontal 1 (a) e do polígono barra frontal 2 (b) e do mapa batimétrico de 1995 com a representação do polígono barra frontal 1 (c), do polígono barra frontal 2 (d) e do polígono barra frontal 3 (e). Os polígonos encontram-se representados em linha branca tracejada.

Entre 1995 e 2005 verifica-se um aumento do volume da barra frontal. Neste período de tempo, a diferença calculada através do polígono barra frontal 1 e pelo polígono barra frontal 2 é igual a 0.1 Mm^3 . No mapa barimétrico referente ao ano 2005 (Figura 5.14) observa-se um aumento do número dunas na zona da barra frontal.

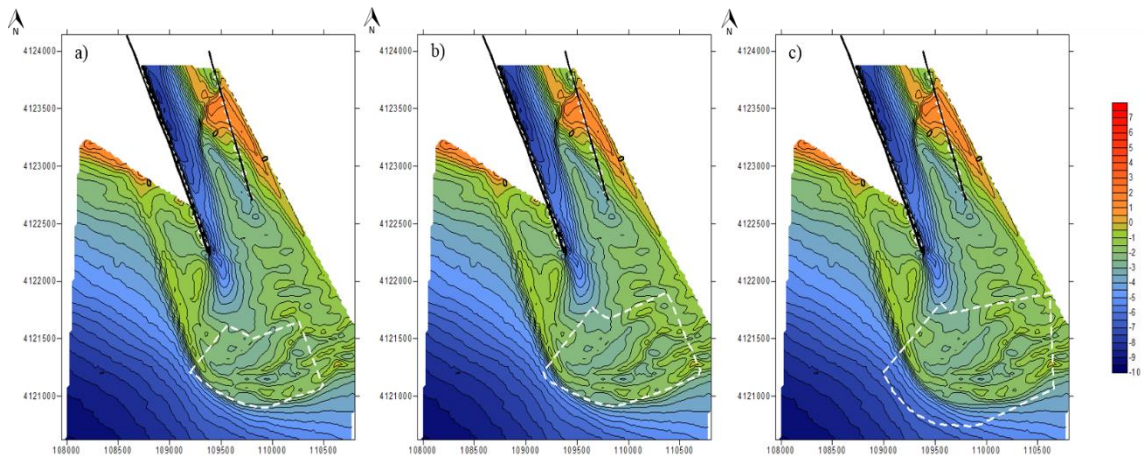


Figura 5.14 - Representação do mapa batimétrico de 2005 com a representação do polígono barra frontal 1 (a), do barra frontal 2 (b) e do polígono barra frontal 3 (c). Os polígonos encontram-se representados em linha branca tracejada.

Posteriormente, entre 2005 e 2012 verificou-se uma diminuição do volume da barra frontal, uma vez que a diferença de volume entre estes anos segundo o polígono barra frontal 1 é igual a -0.3 Mm^3 e segundo o polígono barra frontal 2 é igual a -0.5 Mm^3 . Esta diminuição de volume da barra frontal aparenta estar associada a uma maior depleção de areia na parte contígua ao canal, e a uma diminuição do número de dunas (Figura 5.15).

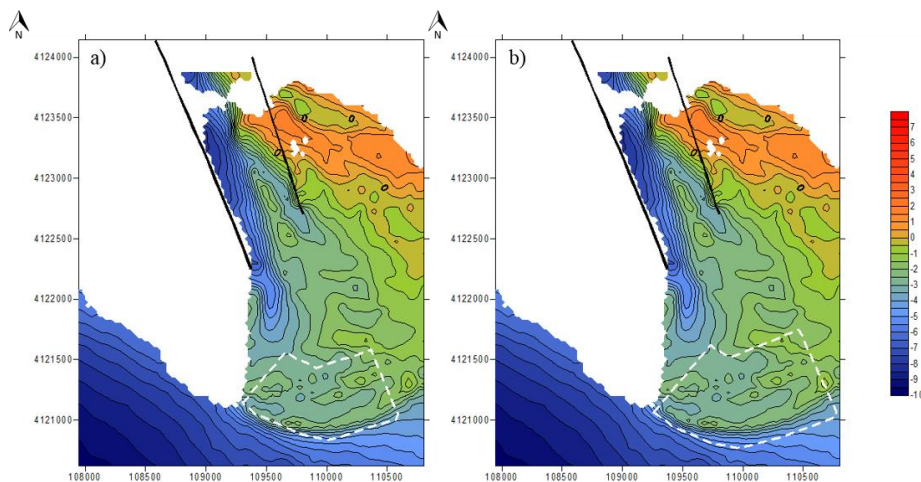


Figura 5.15 - Representação do mapa batimétrico de 2012 com a representação do polígono barra frontal 1 (a) e do barra frontal 2 (b). Os polígonos encontram-se representados em linha branca tracejada.

Entre 2012 e 2015 observa-se um aumento do volume da barra frontal, sendo que no polígono barra frontal 1 a diferença de volume, entre estes dois anos, é igual a 0.3 Mm^3 e, no polígono barra frontal 2 é igual a 0.7 Mm^3 . Apesar de ter sido realizada outra dragagem em 2015, ainda é possível observar um aumento do volume da barra frontal, uma vez que existe o aumento da altura das dunas na zona da barra frontal ao longo do

tempo (Figura 5.16). Tendo em conta que os resultados da dragagem são observáveis na Figura 5.16, especialmente na zona adjacente ao canal, o facto de o volume da barra frontal aumentar indica que, se não tivesse sido realizada a dragagem, o aumento do volume desta estrutura morfológica teria sido maior, além disso o volume dragado é muito pequeno quando em comparação com o volume da barra indicando que este não apresenta grande influência no desenvolvimento da estrutura morfológica.

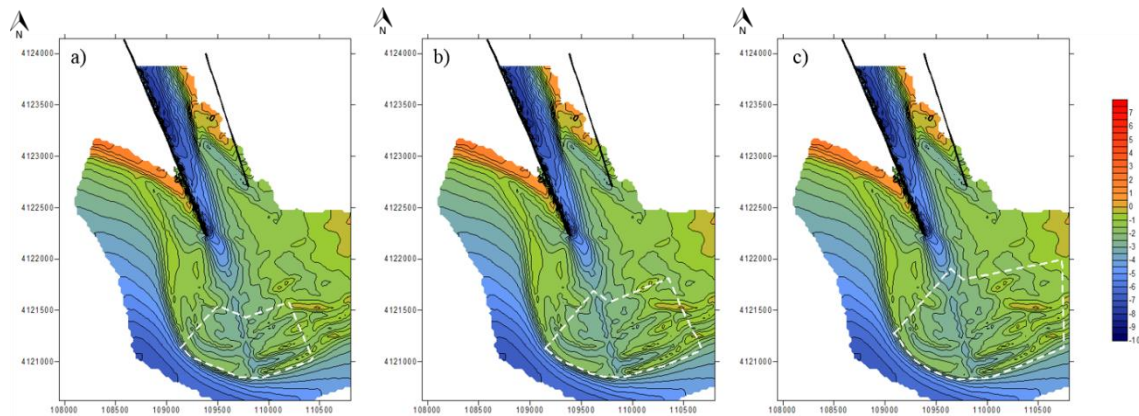


Figura 5.16 - Representação do mapa batimétrico de 2015 com a representação do polígono barra frontal 1 (a), do barra frontal 2 (b) e do polígono barra frontal 3 (c). Os polígonos encontram-se representados em linha branca tracejada.

Por fim, entre 2015 (Figura 5.16) e 2016 (Figura 5.17) constata-se uma diminuição do volume em todos os polígonos, nomeadamente -0.1 Mm^3 para o polígono barra frontal 1 e 2 e -0.2 Mm^3 para o polígono barra frontal 3.

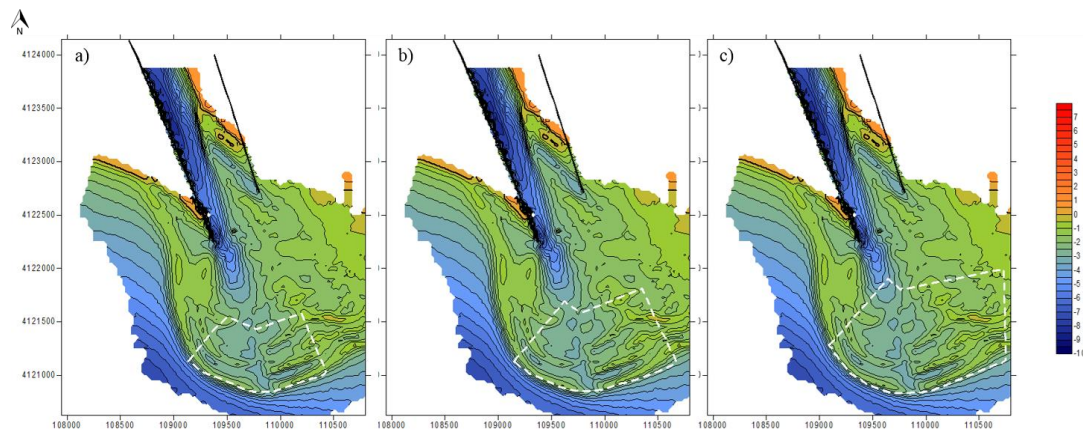


Figura 5.17 - Representação do mapa batimétrico de 2016 com a representação do polígono barra frontal 1 (a), do barra frontal 2 (b) e do polígono barra frontal 3 (c). Os polígonos encontram-se representados em linha branca tracejada.

5.2.3. Evolução da barra lateral a barlamar

Para a barra lateral a barlamar, ao calcular a diferença dos volumes entre o volume calculado em 1969 (valor considerado valor base) e o volume calculado nos anos 1969, 1973, 1977, 1982, 1986, 1988, 1992, 1995, 2005, 2010, 2012, 2014, 2015 e 2016 foi possível obter um gráfico representado na Figura 5.18. O ano 2012 foi excluído uma vez que a extensão espacial do mapa batimétrico referente a este ano é reduzida e os polígonos criados ocupam áreas onde não existem dados.

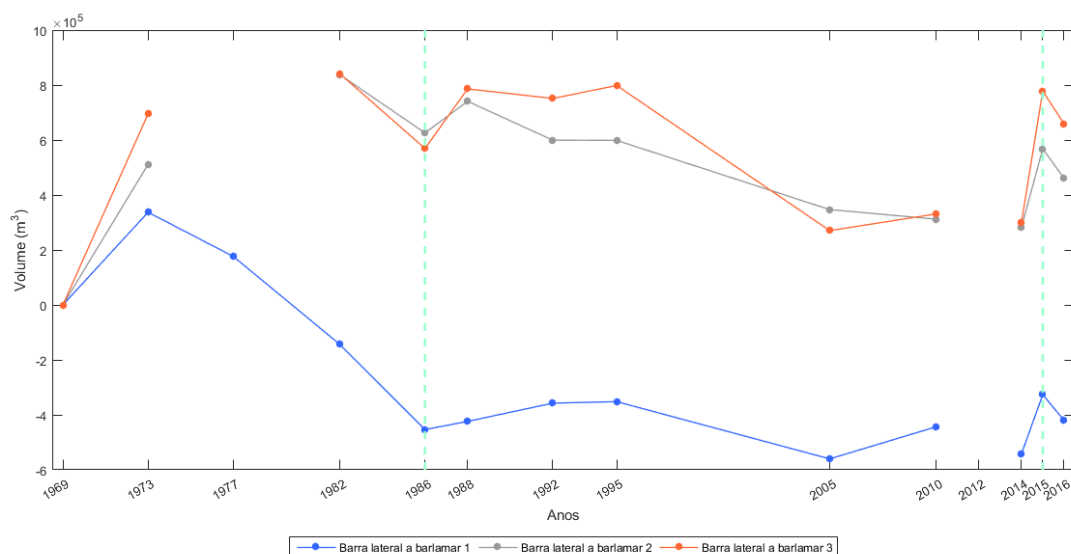


Figura 5.18 - Gráfico das diferenças dos volumes calculados pelos polígonos barra lateral a barlamar 1 (azul), barra lateral a barlamar frontal 2 (cinzento) e barra lateral a barlamar 3 (laranja) em função dos anos (1969, 1973, 1977, 1982, 1986, 1988, 1992, 1995, 2005, 2010, 2012, 2014, 2015 e 2016). O valor base considerado para os polígonos foi o volume calculado em 1969. A reta verde e tracejada é usada para identificar os anos nos quais foram realizadas intervenções sobre a forma de dragagens, nomeadamente, em 1986 e em 2015.

Os dados acima representados não se encontram normalizados, o que não permite a comparação direta entre a diferença dos volumes calculados pelos diferentes polígonos. Apesar de não ser possível uma comparação direta é possível observar um comportamento semelhante. As variações inferiores a 0.10 m foram consideradas pouco significativas, o que se reflete numa variação de volume de 0.05 Mm³ para o polígono barra lateral a barlamar 1, 0.06 Mm³ para o polígono barra lateral a barlamar 2 e 0.08 Mm³ para o polígono barra lateral a barlamar 3. Além disso, é necessário notar que a razão pela qual os volumes calculados pelo polígono barra lateral a barlamar 1 serem significativamente inferiores aos restantes é, que a área deste polígono é bastante pequena, tendo sido criada para incluir o mapa batimétrico referente a 1977, sendo a sua dimensão nos restantes mapas batimétricos imperfeita para a representação desta estrutura

morfológica na sua totalidade, apesar de a sua posição ter sido alterada para se acomodar aos diferentes mapas batimétricos.

Com base no gráfico podemos considerar, em termos gerais, duas tendências distintas. Entre 1969 e 1982, podemos constatar através dos polígonos barra lateral a barlar 2 e barra lateral a barlar 3 um aumento do volume da barra lateral, sendo que a diferença do volume calculado neste período do tempo igual a 0.8 Mm^3 para ambos polígonos, contudo, verificou-se uma diminuição não significativa no polígono barra lateral a barlar 1 com uma diferença de volume igual a 0.1 Mm^3 . Por fim, entre 1982 e 2016, é possível observar uma certa estabilização do crescimento do delta, uma vez que apesar de se ter verificado uma diminuição do volume tanto para o polígono barra lateral a barlar 1 (-0.3 Mm^3), como para o polígono barra lateral a barlar 2 (-0.4 Mm^3) e como para o polígono barra lateral a barlar 3 (-0.2 Mm^3), é considerada pouco significativa pois esta diminuição corresponde a uma taxa igual a $-0.008 \text{ Mm}^3/\text{ano}$, $-0.01 \text{ Mm}^3/\text{ano}$ e $-0.005 \text{ Mm}^3/\text{ano}$, respetivamente.

O aumento de volume entre 1969 e 1973 pode ser justificado pela construção dos molhes (1972-1974) que provocaram uma redistribuição da areia anteriormente presente no banco de O'Bril, como já foi referido anteriormente. Podemos constatar também que esta tendência continua até 1982, como se observa através do polígono barra lateral a barlar 2 (0.3 Mm^3) e barra lateral a barlar 3 (0.2 Mm^3), com a exceção do polígono barra lateral a barlar 1, onde entre 1973 e 1977 se observa uma diminuição do volume do delta (-0.2 Mm^3), encontrando-se esta associada à influência dos molhes e ao reajuste do sistema.

Entre 1982 e 1986 verifica-se uma diminuição não significativa do volume da barra lateral a barlar em todos os polígonos desenhados, nomeadamente polígono barra lateral a barlar 1 (-0.3 Mm^3), polígono barra lateral a barlar 2 (-0.2 Mm^3) e polígono barra lateral a barlar 3 (-0.3 m^3). Esta diminuição do volume encontra-se associada à redistribuição do antigo banco de O'Bril, após o início da formação da barra lateral a barlar existe a acreção da areia em direção à praia, resultante do transporte perpendicular à costa (Figura 5.19). Posteriormente, entre 1986 e 1988, verifica-se uma recuperação da estrutura morfológica em causa, observando-se um aumento do volume tanto para o polígono barra lateral a barlar 1 (0.03 Mm^3), como para o polígono barra lateral a barlar 2 (0.1 Mm^3) e como para o polígono barra lateral a barlar 3 (0.2 Mm^3).

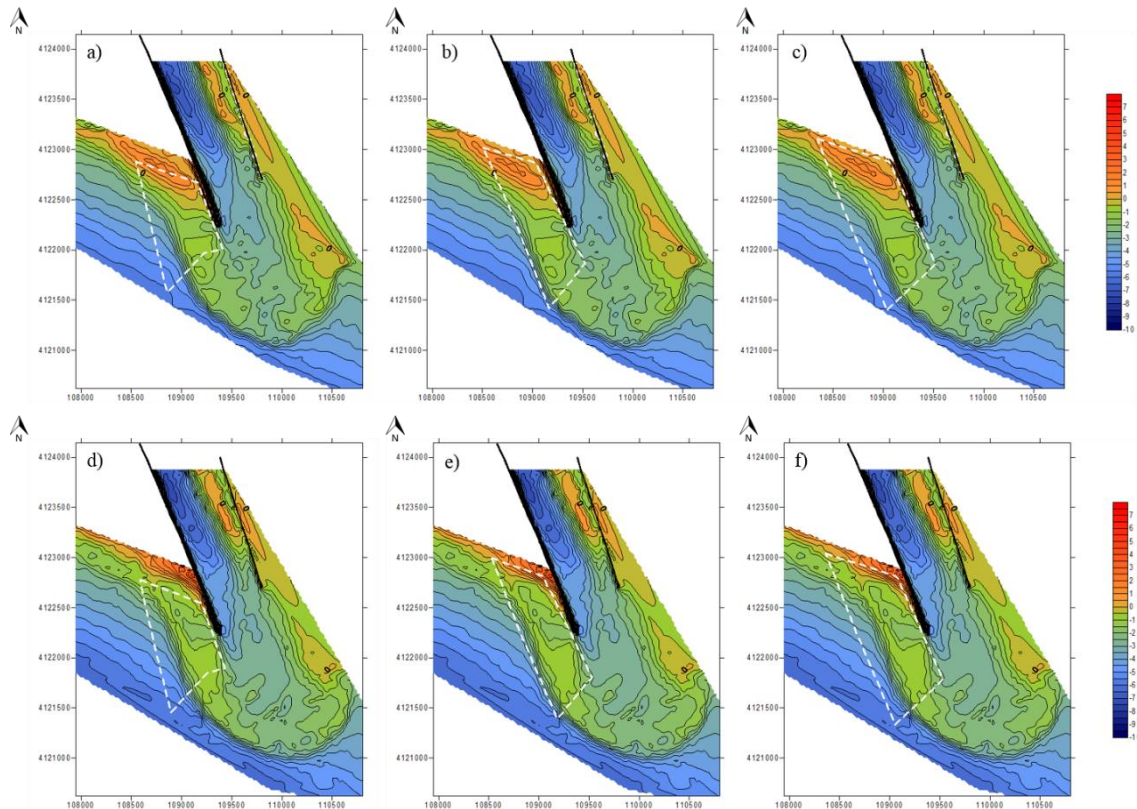


Figura 5.19 - Representação do mapa batimétrico de 1982 com a representação do polígono barra lateral barlar 1 (a), do barra lateral barlar 2 (b) e do polígono barra lateral barlar 3 (c) e do mapa batimétrico de 1986 com a representação do polígono barra lateral barlar 1 (d), do barra lateral barlar 2 (e) e do polígono barra lateral barlar 3 (f). Os polígonos encontram-se representados em linha branca tracejada.

Entre 1988 e 1992 verifica-se uma diminuição do volume nos polígonos barra lateral a barlar 2 (-0.1 Mm^3) e barra lateral a barlar 3 (-0.4 Mm^3), no entanto, no polígono barra lateral a barlar 1 é possível observar um aumento do volume (0.07 Mm^3). Através dos mapas batimétricos (Figura 5.20) podemos constatar que existe uma diminuição do volume, uma vez que o monte de areia observado em 1988 na zona da barra lateral a barlar já não é observado no mapa batimétrico referente a 1992, havendo também neste mapa uma maior erosão na faixa junto ao molhe oeste.

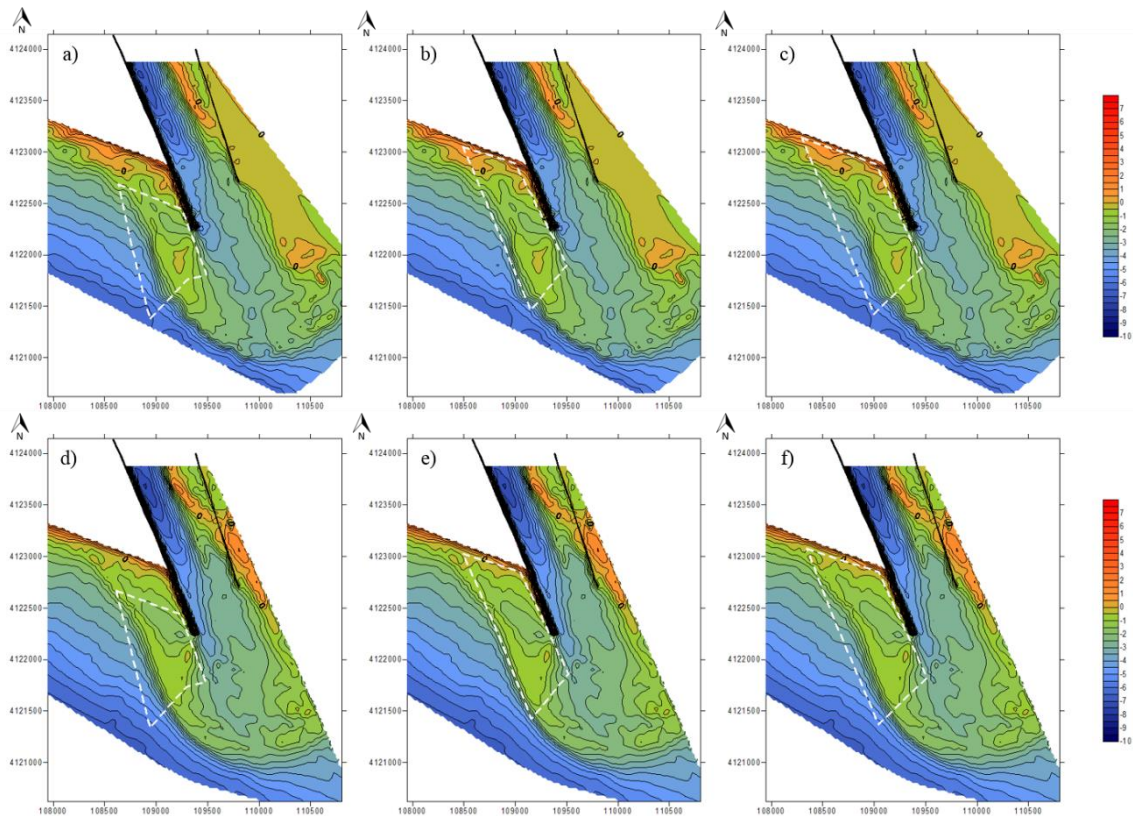


Figura 5.20 - Representação do mapa batimétrico de 1988 com a representação do polígono barra lateral barlar 1 (a), do barra lateral barlar 2 (b) e do polígono barra lateral barlar 3 (c) e do mapa batimétrico de 1992 com a representação do polígono barra lateral barlar 1 (d), do barra lateral barlar 2 (e) e do polígono barra lateral barlar 3 (f). Os polígonos encontram-se representados em linha branca tracejada.

Entre 1992 e 1995 é possível observar um aumento não significativo do volume nos polígonos barra lateral a barlar 1 (0.003 Mm^3) e barra lateral a barlar 3 (0.05 Mm^3), no entanto, no polígono barra lateral a barlar 2 verifica-se uma diminuição não significativa do volume (-0.0009 Mm^3) da estrutura morfológica em causa. Através da análise dos mapas batimétricos (Figura 5.21) constata-se que houve um aumento do volume da estrutura morfológica em causa, existindo um aumento da extensão de uma zona de acreção de areia.

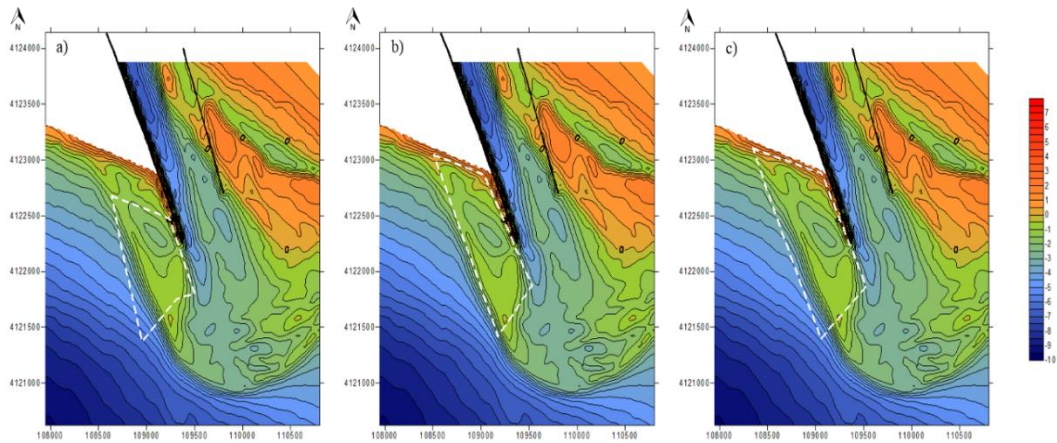


Figura 5.21 - Representação do mapa batimétrico de 1995 com a representação do polígono barra lateral a barlar 1 (a), do barra lateral a barlar 2 (b) e do polígono barra lateral a barlar 3 (c). Os polígonos encontram-se representados em linha branca tracejada.

Entre 1995 e 2005 observa-se uma diminuição do volume da estrutura morfológica tanto para o polígono barra lateral a barlar 1 (-0.2 Mm^3), como para o polígono barra lateral a barlar 2 (-0.3 Mm^3) e como para o polígono barra lateral a barlar 3 (-0.5 Mm^3). Neste período de tempo, nos mapas batimétricos (Figura 5.22), observa-se uma redução geral do volume desta estrutura assim como uma maior erosão na região justo à parte terminal do molhe oeste.

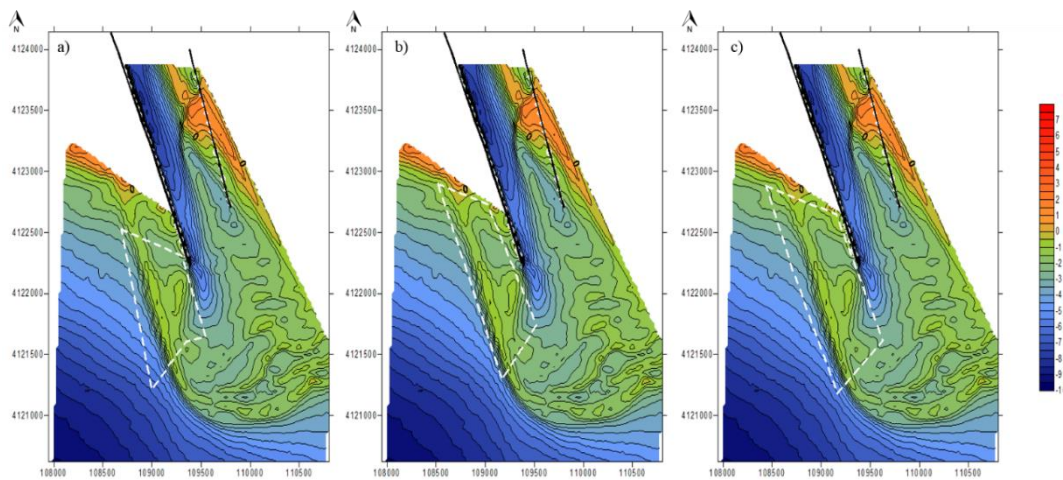


Figura 5.22 - Representação do mapa batimétrico de 2005 com a representação do polígono barra lateral a barlar 1 (a), do barra lateral a barlar 2 (b) e do polígono barra lateral a barlar 3 (c). Os polígonos encontram-se representados em linha branca tracejada.

Entre 2005 e 2010 verifica-se um aumento do volume nos polígonos barra lateral a barlar 1 (0.1 Mm^3) e barra lateral a barlar 3 (0.06 Mm^3), no entanto, no polígono barra lateral a barlar 2, é possível observar uma diminuição não significativa do volume (-0.003 Mm^3) da estrutura morfológica em causa. Com base nos mapas

batimétricos (Figura 5.23) constata-se que existe um aumento do volume da barra lateral a barlar 1 no intervalo de tempo em causa. Este aumento aparenta estar associado à deriva longitudinal uma vez que se verifica o crescimento de um monte na parte oeste desta estrutura morfológica.

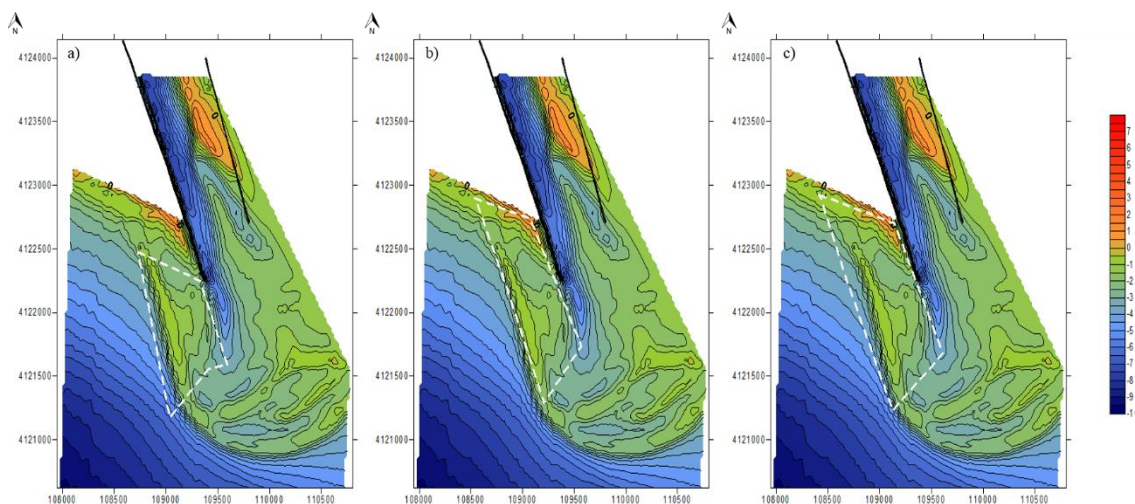


Figura 5.23 - Representação do mapa batimétrico de 2010 com a representação do polígono barra lateral a barlar 1 (a), do barra lateral a barlar 2 (b) e do polígono barra lateral a barlar 3 (c). Os polígonos encontram-se representados em linha branca tracejada.

Posteriormente, entre 2010 e 2014, ocorre uma diminuição do volume da estrutura morfológica tanto para o polígono barra lateral a barlar 1 (-0.1 Mm^3), como para o polígono barra lateral a barlar 2 e para o polígono barra lateral a barlar 3 (-0.03 Mm^3). Esta diminuição aparenta estar associada à erosão de um monte de areia que se havia formado na parte oeste da barra lateral a barlar e que é observado no mapa batimétrico referente a 2010 (Figura 5.23).

Entre 2014 e 2015, verifica-se um aumento de volume em todos os polígonos desenhados, sendo que no polígono barra lateral a barlar 1 a diferença de volume entre estes dois anos é igual a 0.2 Mm^3 , no polígono barra lateral a barlar 2 é igual a 0.3 Mm^3 e no polígono barra lateral a barlar 3 é igual a 0.5 Mm^3 .

Por fim, entre 2015 e 2016 (Figura 5.24) é possível constatar uma diminuição do volume em todos os polígonos, nomeadamente -0.09 Mm^3 para o polígono barra lateral a barlar 1 e -0.1 Mm^3 para o polígono barra lateral a barlar 2 e 3.

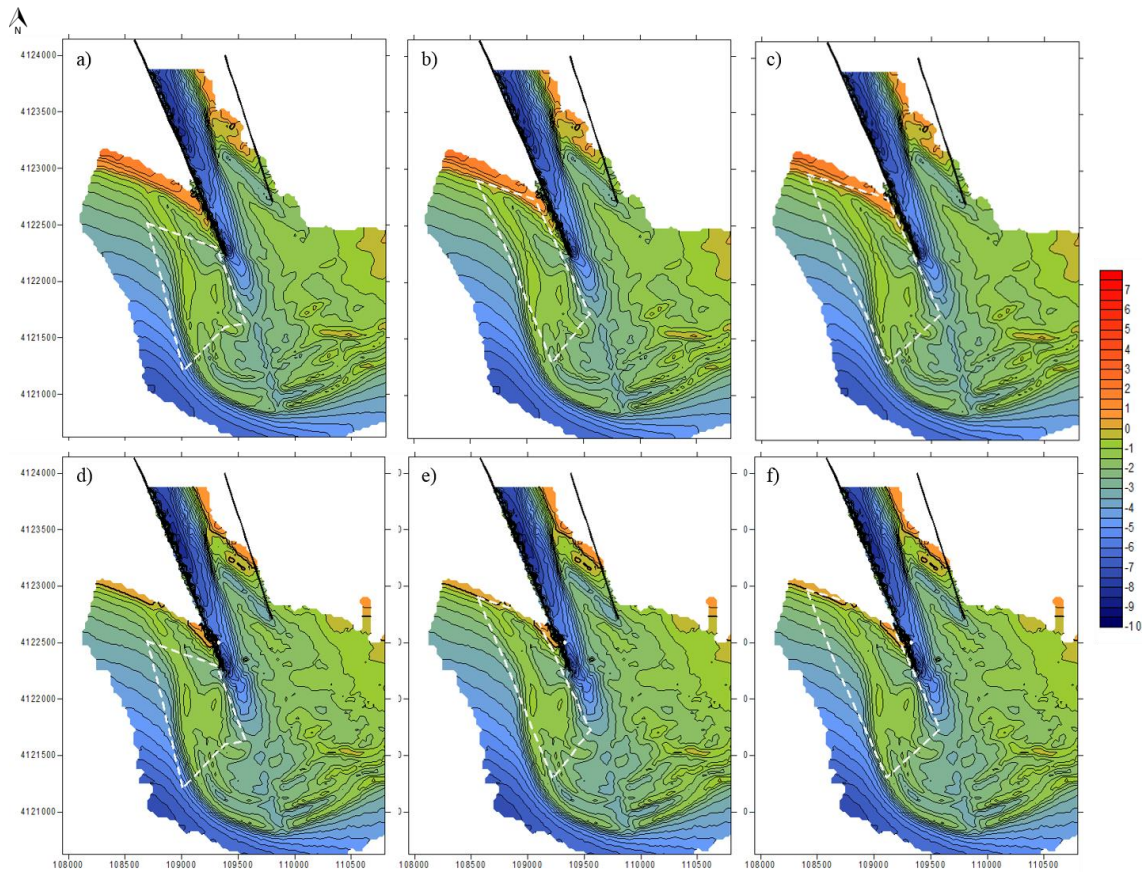


Figura 5.24 - Representação do mapa batimétrico de 2015 com a representação do polígono barra lateral a barlar 1 (a), do barra lateral a barlar 2 (b) e do polígono barra lateral a barlar 3 (c) e representação do mapa batimétrico de 2016 com a representação do polígono barra lateral a barlar 1 (d), do barra lateral a barlar 2 (e) e do polígono barra lateral a barlar 3 (f). Os polígonos encontram-se representados em linha branca tracejada.

A análise dos mapas batimétricos, a partir de 1982, mostra nitidamente que a variabilidade apresentada é natural e incluída numa fase de estabilidade.

5.3. Tarefa III: Cálculo do volume do banco de O'Bril (fonte sedimentar local)

Com a criação da malha de batimétricas paralelas à linha de costa e da sua sobreposição com o mapa batimétrico de 1969 (Figura 5.25) foi possível obter um volume total de, aproximadamente, 43 Mm³.

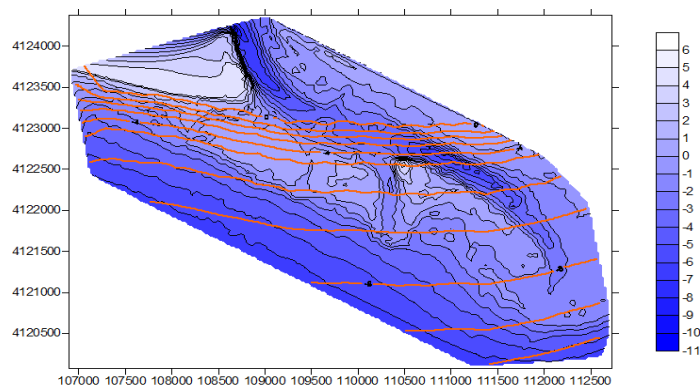


Figura 5.25 - Mapa de contornos de batimetria de 1969. A laranja encontram-se representadas as linhas de batimetria que foram desenhadas paralelamente em relação à costa.

Após a realização da correção da linha de costa, e com a sobreposição da malha de batimétricas paralelas à linha de costa corrigida com o mapa batimétrico de 1969, representado na Figura 5.26, o valor do volume total obtido foi igual a, aproximadamente, 39 Mm³.

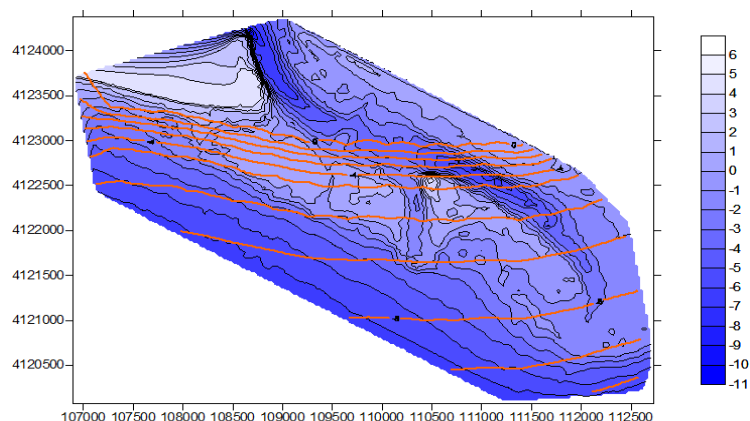


Figura 5.26 - Mapa de contornos de batimetria de 1969. A laranja encontram-se representadas as linhas de batimetria que foram desenhadas paralelamente em relação à costa, corrigidas para a linha de costa de 1969.

Através destes resultados podemos constatar que a correção da linha de costa influencia os valores obtidos em termos de volume total do delta para o transporte para sotamar.

Posteriormente, foi possível calcular o volume associado ao polígono barra frontal 1 (1.18 Mm³), ao polígono barra frontal 2 (2.26 Mm³), ao polígono barra frontal 3 (4.49 Mm³), ao polígono barra lateral a barlamar 1 (1.90 Mm³), ao polígono barra lateral a barlamar 2 (3.31 Mm³) e, por fim, associado ao polígono barra lateral a barlamar 3 (4.75 Mm³).

5.4. Tarefa IV: Dragagem 2015

Foram considerados dois cenários distintos, um cenário normal (cenário 1) e outro cenário mais alargado (cenário 2).

O cenário 1, representado na Figura 5.27, apresenta as dimensões da dragagem consoante a informação obtida pela pesquisa, ou seja, um volume dragado igual a 0.063 Mm^3 , um comprimento igual a 1250 m e uma largura igual a 60 m (Sul Informação, 2015). Através da aplicação da Equação 4.2 foi possível obter a profundidade da dragagem, sendo esta igual a -0.84 m. Contudo, o mesmo não se verifica ao calcular a profundidade média e o volume através do *software* Surfer®, uma vez que a profundidade obtida, através da diferença entre o mapa batimétrico de 2014 e 2015, é igual a -0.18 m e o volume dragado igual a -0.007 Mm^3 .

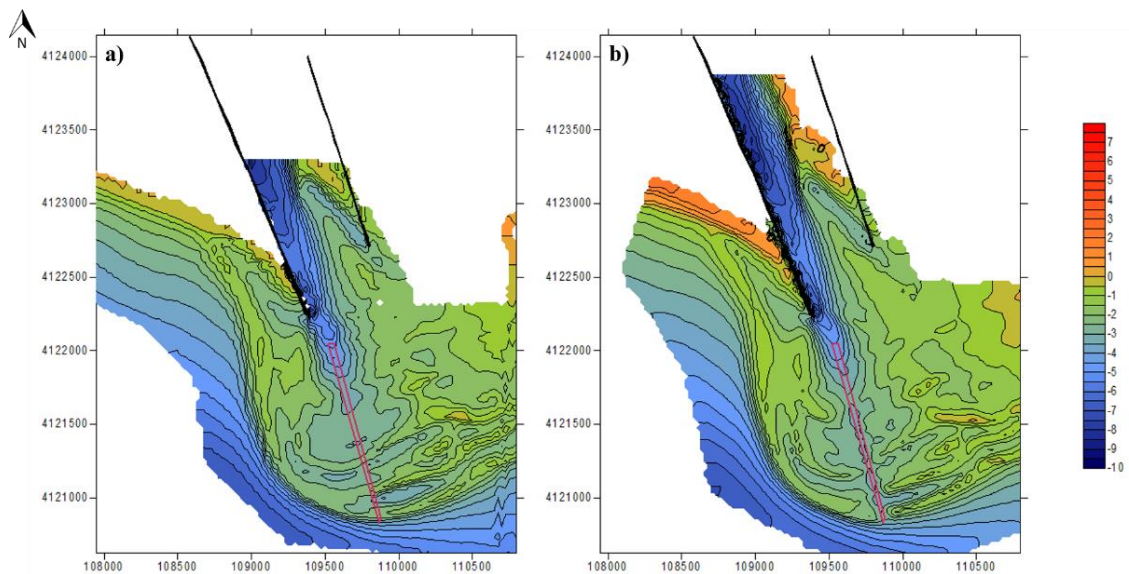


Figura 5.27 - Cenário 1, a zona dragada encontra-se representada a cor-de-rosa. a) Representação do mapa batimétrico referente a 2014. b) Representação do mapa batimétrico referente a 2015.

O cenário 2 (Figura 5.28) considera uma largura maior, no entanto apresenta o mesmo comprimento e o mesmo volume. Esta largura acrescida corresponde à extensão, no mapa batimétrico de 2015, onde se verifica a interrupção da barra frontal, sendo que esta corresponde a 128 m. Deste modo, este cenário considera o colapso das paredes da área dragada por atuação das forças de gravidade. Através da Equação 4.2 foi possível obter a profundidade da dragagem alargada, sendo esta igual a -0.39 m. Novamente, estes valores não se verificam ao realizar o desenho do polígono com as mesmas dimensões da dragagem alargada uma vez que a profundidade obtida, resultante da diferença entre os mapas batimétricos em causa, é igual a -0.03 m e o volume dragado igual a -0.005 Mm^3 .

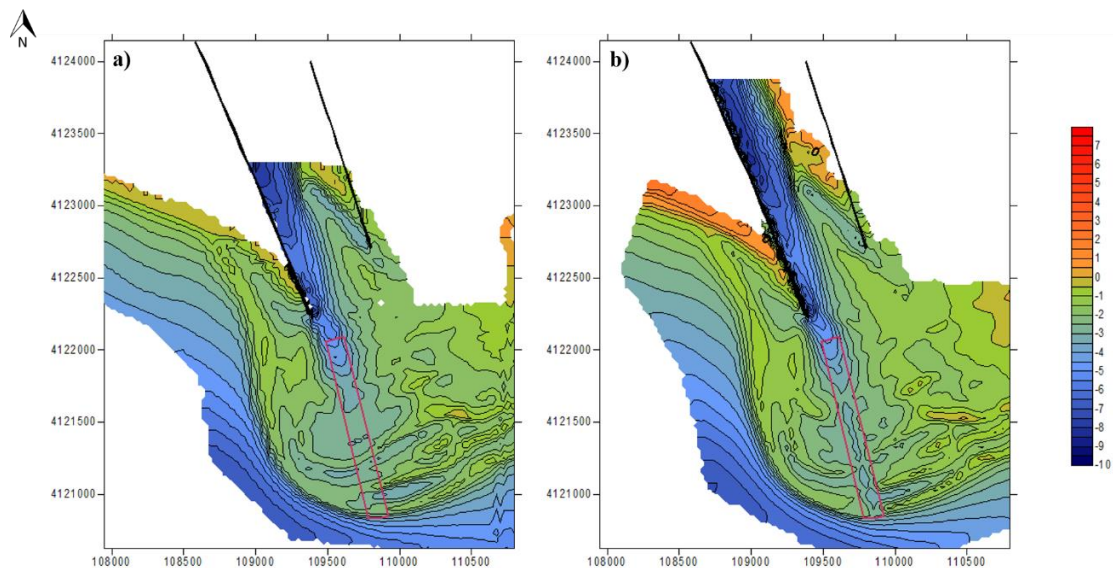


Figura 5.28 - Cenário 2, a zona dragada alargada encontra-se representada a cor-de-rosa. a) Representação do mapa batimétrico referente a 2014. b) Representação do mapa batimétrico referente a 2015.

Em relação ao custo total da dragagem de 2015, foi possível verificar que esta intervenção teve um custo de 850000 € (Sul Informação, 2015), ou seja, 13.40 €/m³.

Após a análise dos documentos existentes referentes à dragagem realizada em 28 de Abril de 2015 (Anexo 1 e 2) e do mapa batimétrico de 2015, cujos dados foram retirados a 11 e 12 de Junho, foi possível obter as respetivas profundidades dos pontos escolhidos que, por sua vez, se encontram representados na Figura 5.29 e na Tabela 5.1.

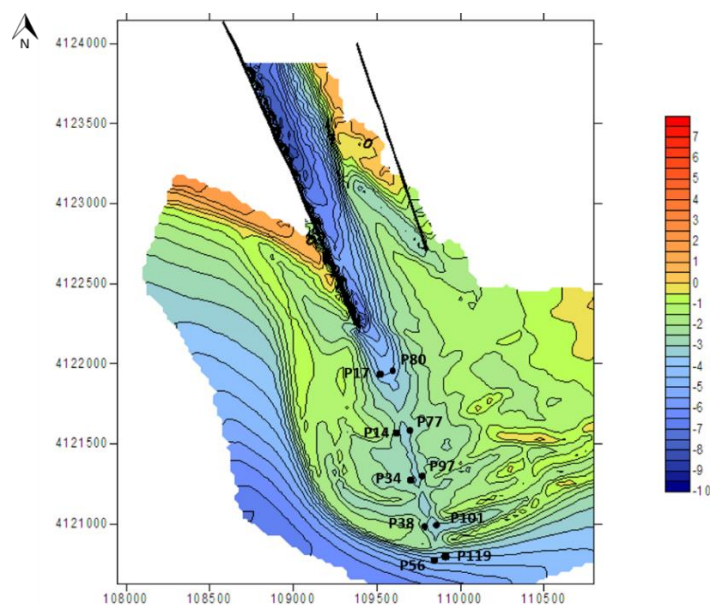


Figura 5.29 - Representação sobre o mapa batimétrico referente a 2015 da localização geográfica dos 10 pontos escolhidos para a comparação de profundidades.

Tabela 5.1 – Tabela com informação referente aos 10 pontos escolhidos. Número do ponto, Longitude, Latitude, Profundidade referente ao mapa batimétrico de junho de 2015 (em metros), Profundidade referente aos documentos referentes à dragagem em abril de 2015 (em metros) e por fim a diferença da profundidade (em metros) da profundidade obtida através do mapa batimétrico e da profundidade obtida através dos documentos anteriormente referidos.

Nº Ponto	Longitude (x)	Latitude (y)	Profundidade (junho de 2015) (m)	Profundidade (abril de 2015) (m)	Δ Prof (junho-abril) (m)
P14	109620.19	4121564.4	-2.8	-3.05	0.25
P17	109517.81	4121931	-3.872	-4	0.128
P34	109701.02	4121275	-2.788	-2.8	0.012
P38	109787.24	4120966.3	-2.758	-3	0.242
P56	109841.12	4120773.3	-4.24	-4	-0.24
P77	109691.57	4121587.8	-3.044	-3.8	0.756
P80	109589.19	4121954.4	-4.018	-4.8	0.782
P97	109772.4	4121298.4	-2.809	-3.7	0.891
P101	109858.62	4120989.7	-3.184	-3.7	0.516
P119	109912.5	4120796.7	-3.838	-4.1	0.262

Com o objetivo de melhor visualizar os dados recolhidos foi criado o gráfico representado na Figura 5.30, onde podemos constatar que entre abril e junho de 2015 houve uma tendência geral de aumento da profundidade, exceto para o ponto P56. Além disso, é possível observar que a maior diferença entre as profundidades referidas anteriormente, se encontra entre o ponto P77 e o ponto P119, ou seja, os pontos mais a Este. As diferenças observadas devem-se fundamentalmente à rápida recuperação do sistema, uma vez que os dois mapas apresentam a mesma referência.

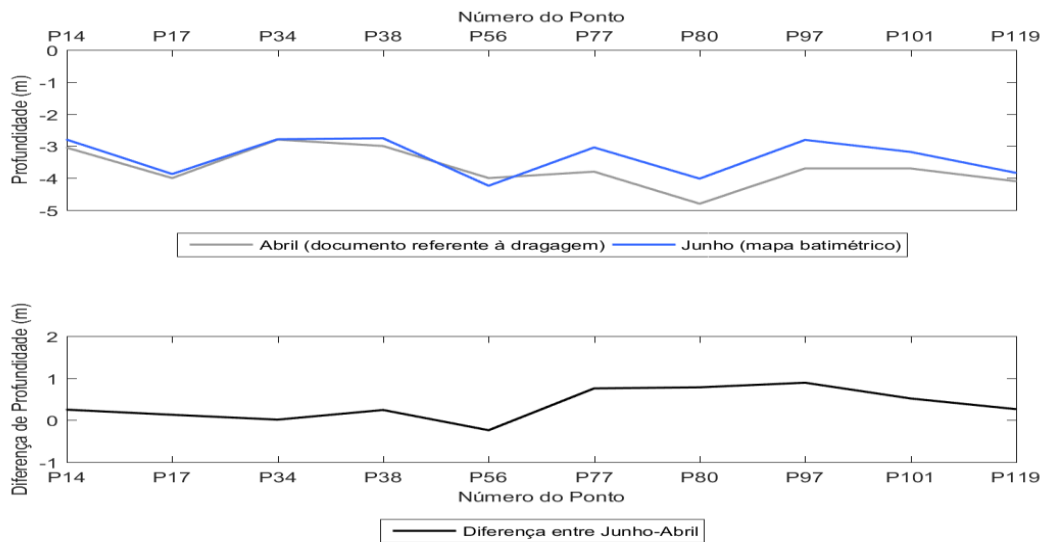


Figura 5.30 - O gráfico superior representa o número dos pontos em função da profundidade, tanto para as profundidades obtidas pelos documentos referentes à dragagem (cinzento) como para as profundidades retiradas a partir do mapa batimétrico referente ao ano de 2015 (azul). No gráfico inferior encontra-se representada a diferença das profundidades (Junho-Abril) em função do número dos pontos (preto).

De modo a visualizar, de forma geral, as diferentes profundidades foi aplicada uma escala de cores diferente ao mapa batimétrico referente a 2015 (Figura 5.31), onde se encontra evidenciada a profundidade alvo considerada pelos Anexos 1 e 2, entre -3.5 m e -4 m, a cinzento. As profundidades superiores a -3.5 m encontram-se representadas a amarelo, as profundidades inferiores a -4 m a lilás e, por sua vez, a zona onde foi realizada a dragagem encontra-se representada a cor-de-rosa. Através da observação da Figura 5.31, é possível constatar que apenas uma pequena parte da zona onde foi realizada a dragagem se encontra abaixo ou na profundidade alvo. Cálculos adicionais, através do *software* Surfer[®], permitiram mostrar que a profundidade média na zona de dragagem no mapa batimétrico de 2015 é de -3.293 m, ou seja, apresenta uma profundidade média acima da profundidade alvo.

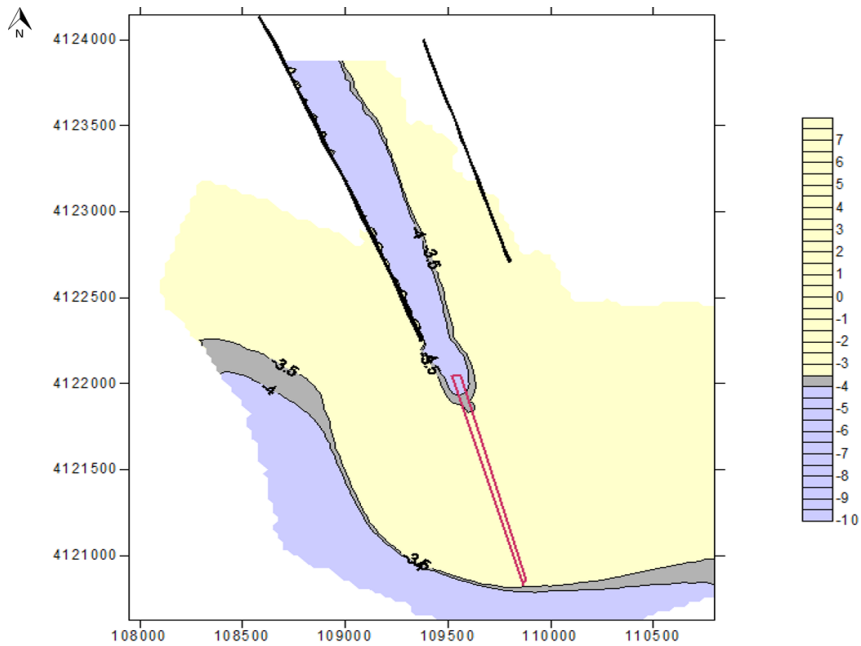


Figura 5.31 - Mapa batimétrico referente ao ano 2015. A cinzento encontra-se representada a profundidade alvo (entre -3.5 m e -4m), assim como as profundidades superiores a -3.5 metros a amarelo e as profundidades inferiores a -4 metros a lilás. A zona onde foi realizada a dragagem encontra-se representada a cor-de-rosa.

Para perceber a variação de profundidade antes e depois da intervenção sob a forma de dragagem, nos mapas batimétricos de 2014 e 2015, foi criado um perfil (Figura 5.32), localizado na zona dragada, no entanto a sua extensão (do ponto A ao ponto D, Figura 5.32) é maior que a área dragada.

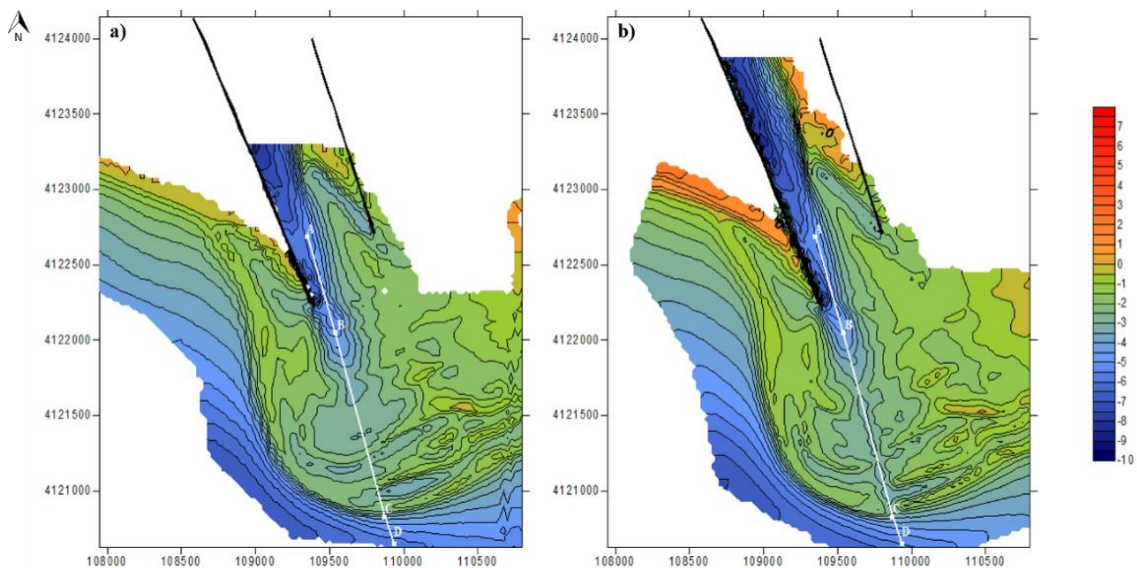


Figura 5.32 – Representação nos mapas batimétricos de 2014 (a) e de 2015 (b) do perfil retirado da zona de dragagem. O ponto A corresponde ao início do perfil (distância= 0 m), o ponto B corresponde ao início da zona onde foi realizada a dragagem (distância = 660.356 m), o ponto C corresponde ao final da zona dragada (distância = 1906.155 m) e o ponto D corresponde ao final do perfil e o seu limite a offshore (distância = 2109.126 m).

A partir do perfil criado foi possível obter o gráfico representado na Figura 5.33, que mostra a variação da profundidade desde o ponto A até ao ponto D, sendo este mais a offshore. Apesar do comportamento da profundidade, neste perfil, nos dois mapas batimétricos (2014 e 2015) ser semelhante, é possível observar que na zona dragada considerada (entre o ponto B e o ponto C) existe um nivelamento da profundidade no ano de 2015 que não se verifica em 2014. Pode, então, concluir-se que o nivelamento representado resulta da dragagem realizada em 2015.

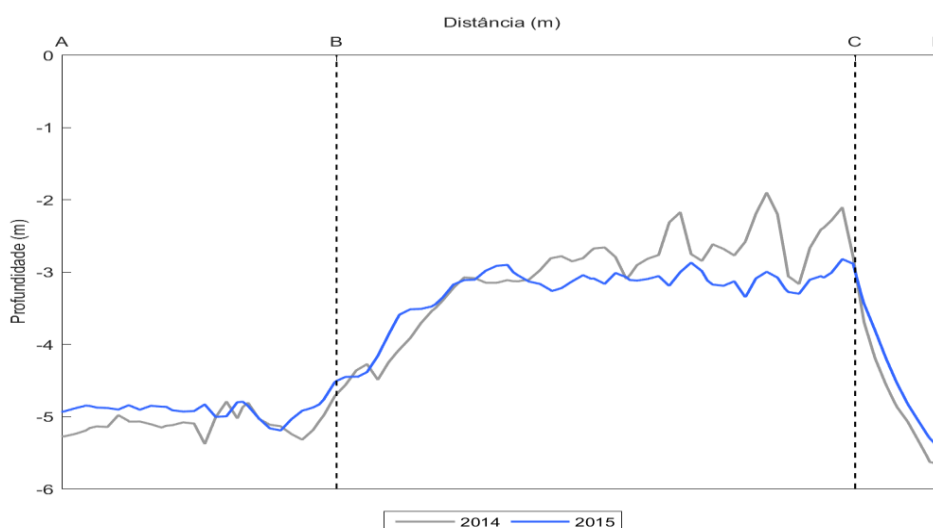


Figura 5.33 - Perfil da zona dragada. Gráfico da distância em função da profundidade, a cinzento encontra-se representado o perfil retirado do mapa batimétrico de 2014 e a azul o perfil retirado do mapa batimétrico referente a 2015. O ponto A corresponde ao início do perfil (distância= 0 m), o ponto B corresponde ao início da zona onde foi realizada a dragagem (distância = 660.356 m), o ponto C corresponde ao final da zona dragada (distância = 1906.155 m) e o ponto D corresponde ao final do perfil e o seu limite a offshore (distância = 2109.126 m).

A partir do gráfico representado na Figura 5.33 foi possível fazer uma estimativa do volume dragado. Para isso foi necessário calcular as diferenças de profundidades, entre o mapa batimétrico referente a 2014 e o mapa batimétrico referente a 2015, apenas na zona dragada (entre o ponto B e C), e de seguida calcular a média destas mesmas diferenças, sendo esta igual a -0.228 m. Posteriormente, através da Equação 4.2 foi possível obter uma estimativa do volume dragado, sendo este igual a - 0.017 Mm³.

5.5. Tarefa V: Modelo matemático

O volume de equilíbrio da barra frontal, obtido a partir do polígono barra frontal 2 no ano 1982, é igual a 4.25 Mm³ e o volume de equilíbrio da barra lateral a barlar, é igual a 0.017 Mm³.

considerado como o resultado do polígono barra lateral a barlar 2 criado para a barra lateral a barlar no ano de 1982, é igual a 2.46 Mm^3 .

Ao considerar a taxa de entrada de sedimento proveniente somente da deriva longilitoral na barra frontal foi possível obter o gráfico representado na Figura 5.34 que mostra a variação do volume da barra frontal em função do tempo (Figura 5.34 a)) e a variação do volume da barra lateral a barlar (Figura 5.34 b)) assim como o tempo no qual o volume de sedimento que é exportado da barra frontal é igual ao volume que é retido (tc). Para a taxa de entrada sedimentar foi considerada a deriva longilitoral máxima igual a $0.3 \text{ Mm}^3/\text{ano}$, deriva litoral mínima igual a $0.1 \text{ Mm}^3/\text{ano}$ e a deriva longilitoral intermédia igual a $0.18 \text{ Mm}^3/\text{ano}$ (Gonzales *et al.*, 2001).

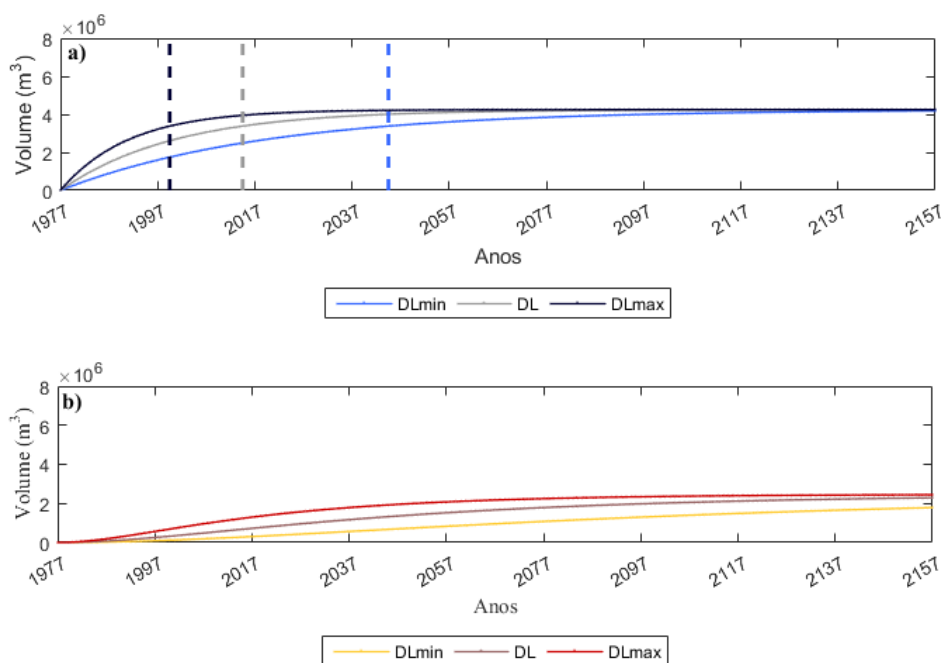


Figura 5.34 - Modelo com taxa de entrada de sedimento proveniente da deriva longilitoral. Representação do volume da barra frontal (a) e da barra lateral a barlar (b) em função do tempo (anos). DLmin: Deriva longilitoral mínima (representada a azul claro na barra frontal (a) e a amarelo na barra lateral a barlar (b)), DL: Deriva longilitoral média (representada a cinzento na barra frontal (a) e a cor-de-rosa na barra lateral a barlar (b)) e DLmax: Deriva longilitoral máxima (representada a azul escuro na barra frontal (a) e a cor-de-laranja na barra lateral a barlar (b)). A linha a tracejado azul claro representa o tc associado à DLmin, a linha tracejada a cinzento representa o tc associado à DL e a linha a tracejado a azul escuro corresponde ao tc associado à DLmax.

A partir da Figura 5.34 foi possível constatar que quanto menor for a taxa de entrada de sedimento mais tarde será o tc, por outras palavras, ao considerar a deriva litoral mínima o tc associado é igual a 2044, enquanto que para a deriva litoral média o tc é igual a 2014 e para a deriva litoral máxima o tc correspondente é igual a 1999.

Posteriormente, foi considerado a taxa de entrada de sedimento proveniente da exportação fluvial na barra frontal, onde foi possível obter o gráfico representado na Figura 5.35, que mostra a variação do volume da barra frontal em função do tempo (Figura 5.35 a)) e a variação do volume da barra lateral a barlar (Figura 5.35 b)) assim como o tc associado. Devido ao facto de a exportação fluvial ter sofrido alterações ao longo do tempo, devido à construção da barragem do Alqueva, foi encontrado um meio termo entre a exportação fluvial pré Alqueva ($0.44 \text{ Mm}^3/\text{ano}$) e a exportação fluvial pós-Alqueva ($0.005 \text{ Mm}^3/\text{ano}$), ou seja, tendo em conta a escala temporal definida (180 anos) foi considerado que a exportação fluvial pós-Alqueva representa 86% da exportação ao longo do tempo e que a exportação fluvial pré-Alqueva representa apenas 14%, fazendo com que a exportação fluvial considerada para o modelo fosse igual a $0.066 \text{ Mm}^3/\text{ano}$.

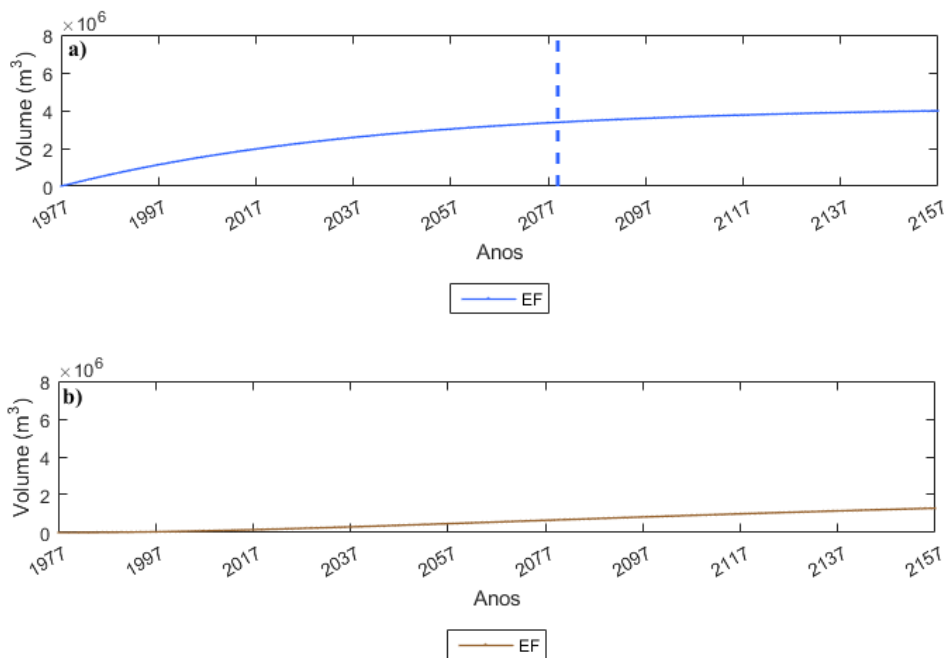


Figura 5.35 - Modelo com taxa de entrada de sedimento proveniente da exportação fluvial. Representação do volume da barra frontal (a) e da barra lateral a barlar (b) em função do tempo (anos). A linha a tracejado azul claro representa o tc associado à exportação fluvial.

A partir da Figura 5.35 é possível observar que a evolução da barra frontal e da barra lateral a barlar, apenas considerando taxa de entrada de sedimento proveniente da exportação fluvial, é mais lenta e o tc ocorre em 2078.

De seguida, foi considerado a taxa de entrada de sedimento proveniente da exportação fluvial e da deriva longilitoral, onde foi definida uma taxa de entrada sedimentar mínima ($0.17 \text{ Mm}^3/\text{ano}$), uma taxa de entrada sedimentar intermédia ($0.25 \text{ Mm}^3/\text{ano}$) e uma taxa de entrada sedimentar máxima ($0.37 \text{ Mm}^3/\text{ano}$), provenientes do

somatório das duas taxas de entrada sedimentar, anteriormente referidas. Assim, foi possível obter o gráfico representado na Figura 5.36 que mostra a variação do volume da barra frontal em função do tempo (Figura 5.36 a)) e a variação do volume da barra lateral a barlar (Figura 5.36 b)) assim como o tc.

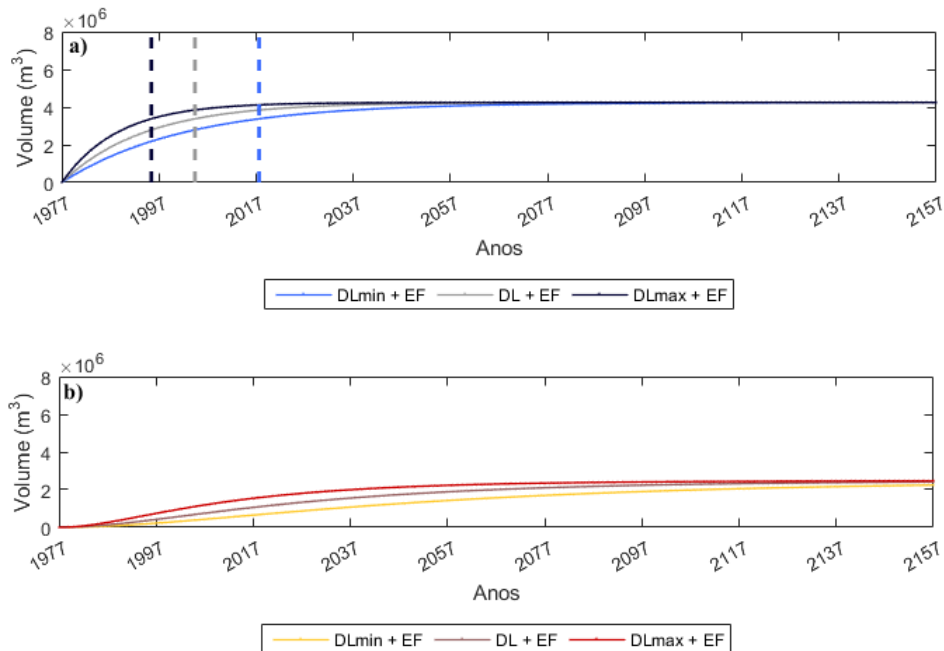


Figura 5.36 - Modelo com taxa de entrada de sedimento proveniente da deriva longilitoral e da exportação fluvial. Representação do volume da barra frontal (a) e da barra lateral a barlar (b) em função do tempo (anos). DLmin + EF: Deriva longilitoral mínima e exportação fluvial (representada a azul claro na barra frontal (a) e a amarelo na barra lateral a barlar (b)), DL+ EF: Deriva longilitoral média e exportação fluvial (representada a cinzento na barra frontal (a) e a cor-de-rosa na barra lateral a barlar (b)) e DLmax+ EF: Deriva longilitoral máxima e exportação fluvial (representada a azul escuro na barra frontal (a) e a cor-de-laranja na barra lateral a barlar (b)). A linha a tracejado azul claro representa o tc associado à DLmin+ EF, a linha tracejada a cinzento representa o tc associado à DL+ EF e a linha a tracejado a azul escuro corresponde ao tc associado à DLmax + EF.

Com a combinação da exportação fluvial e da deriva longilitoral, foi possível determinar um tc máximo igual a 2017, tc intermédio igual a 2004 e um tc mínimo igual a 1995, como é possível observar na Figura 5.36.

Posteriormente, procedeu-se à incorporação do volume calculado para o banco de O’Bril associado à barra frontal (2.26 Mm^3) e associado à barra lateral a barlar (3.31 Mm^3) (Figura 5.37), resultante dos polígonos barra frontal 2 e barra lateral a barlar 2 aplicados ao mapa batimétrico de 1969. Esta fonte não foi considerada como taxa de entrada sedimentar, mas sim como valores iniciais para a evolução de cada uma das estruturas morfológica.

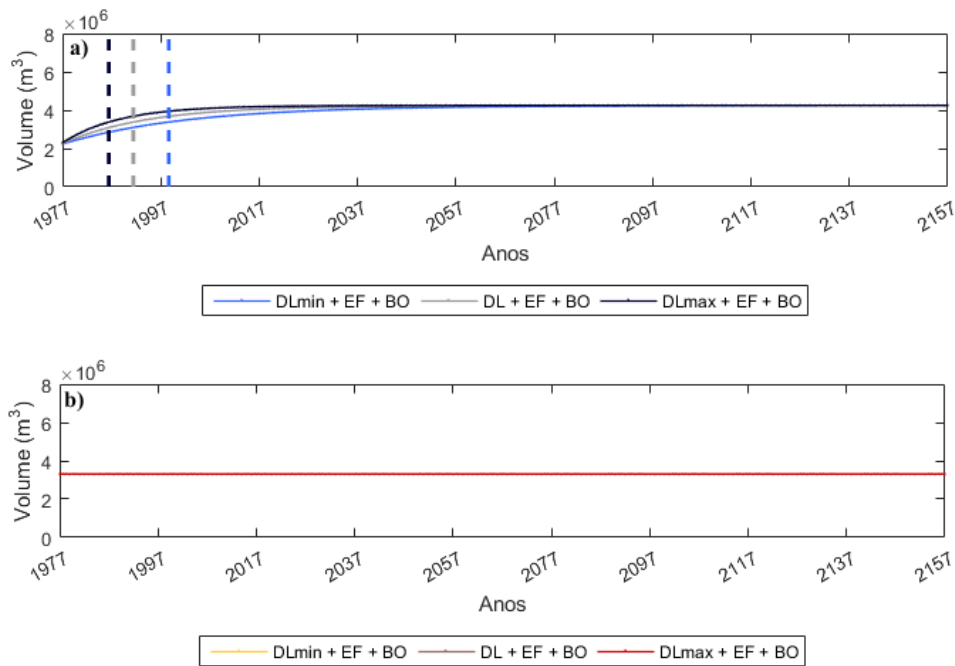


Figura 5.37 - Modelo com taxa de entrada de sedimento proveniente da deriva longilitoral, da exportação fluvial e da fonte local de sedimento (banco de O’Bril). Representação do volume da barra frontal (a) e da barra lateral a barlamar (b) em função do tempo (anos). DLmin + EF + BO: Deriva longilitoral mínima, exportação fluvial e banco de O’Bril (representada a azul claro na barra frontal (a) e a amarelo na barra lateral a barlamar (b)), DL+ EF + BO: Deriva longilitoral média, exportação fluvial e banco de O’Bril (representada a cinzento na barra frontal (a) e a cor-de-rosa na barra lateral a barlamar (b)) e DLmax + EF + BO: Deriva longilitoral máxima, exportação fluvial e banco de O’Bril (representada a azul escuro na barra frontal (a) e a cor-de-laranja na barra lateral a barlamar (b)). A linha a tracejado azul claro representa o tc associado à DLmin+ EF + BO, a linha tracejada a cinzento representa o tc associado à DL+ EF + BO e a linha a tracejado a azul escuro corresponde ao tc associado à DLmax + EF + BO.

Com a incorporação da influencia do banco de O’Bril na taxa de entrada sedimentar é possível constatar um tc máximo igual a 1998, tc intermédio igual a 1991 e um tc mínimo igual a 1986 (Figura 5.37). De acordo com o modelo, ao incluir o volume do banco de O’Bril na barra lateral a barlamar obteve-se automaticamente o volume de equilíbrio da estrutura morfológica em causa, cujo resultado é uma linha reta (Figura 5.37, b)).

A Figura 5.38 é semelhante à Figura 5.37, no entanto apresenta a inclusão das dragagens, em 1986 e 2015. O mesmo volume foi considerado para as duas dragagens, uma vez que só foi possível encontrar o volume da dragagem associado a 2015.

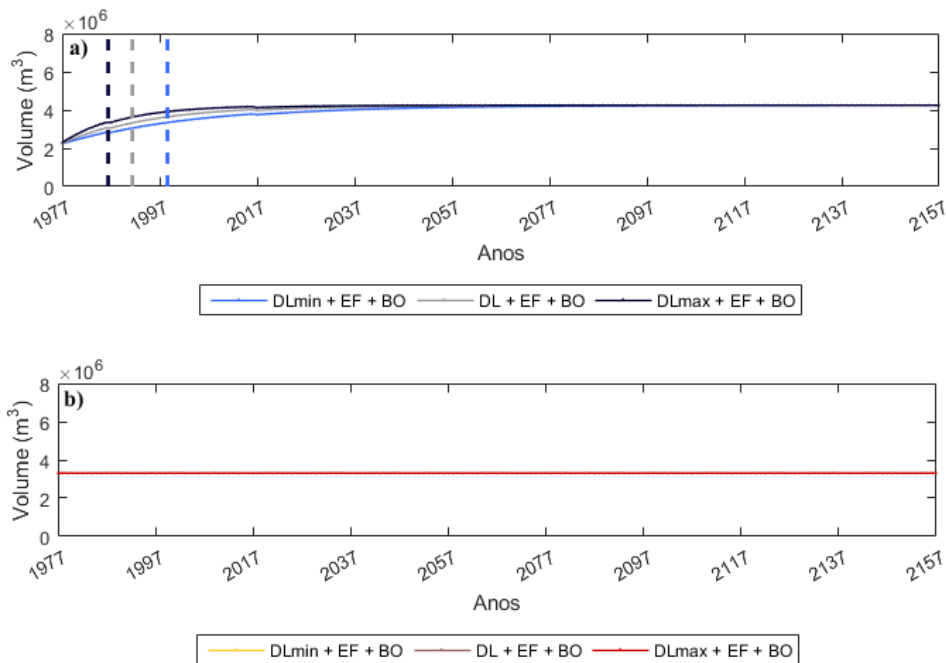


Figura 5.38 - Modelo com taxa de entrada de sedimento proveniente da deriva longilitoral, da exportação fluvial e da fonte local de sedimento (banco de O’Bril), assim como a incorporação das dragagens em 1986 e 2015. Representação do volume da barra frontal (a) e da barra lateral a barlar (b) em função do tempo (anos). DLmin + EF + BO: Deriva longilitoral mínima, exportação fluvial e banco de O’Bril (representada a azul claro na barra frontal (a) e a amarelo na barra lateral a barlar (b)), DL+ EF + BO: Deriva longilitoral média, exportação fluvial e banco de O’Bril (representada a cinzento na barra frontal (a) e a cor-de-rosa na barra lateral a barlar (b)) e DLmax + EF + BO: Deriva longilitoral máxima, exportação fluvial e banco de O’Bril (representada a azul escuro na barra frontal (a) e a cor-de-laranja na barra lateral a barlar (b)). A linha a tracejado azul claro representa o tc associado à DLmin+ EF + BO, a linha tracejada a cinzento representa o tc associado à DL+ EF + BO e a linha a tracejado a azul escuro corresponde ao tc associado à DLmax + EF + BO.

Através da Figura 5.38 a) é possível constatar que as dragagens realizadas apresentam um impacto bastante reduzido na evolução da estrutura morfológica em causa.

Uma vez realizados os vários cenários do modelo, foi essencial comparar os resultados obtidos com os volumes obtidos a partir dos polígonos anteriormente criados. Ao comparar o volume dos três polígonos da barra frontal com o modelo cuja taxa de entrada de sedimento é, unicamente, proveniente da deriva longilitoral, foi possível obter a Figura 5.39. Através da Figura 5.39 constata-se que não se observa uma compatibilidade perfeita entre os resultados modelados e os resultados obtidos através dos mapas batimétricos, indicando que apesar de a deriva longilitoral ser um importante componente da taxa de entrada sedimentar, este não é o único fator que deve ser considerado.

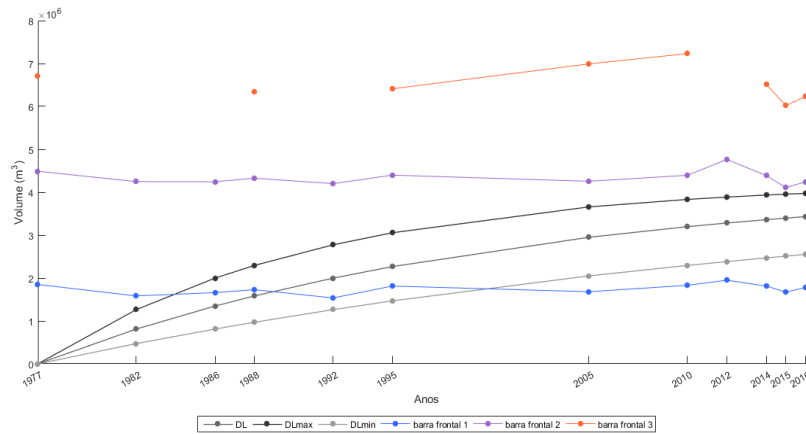


Figura 5.39 - Gráfico dos volumes calculados pelos polígonos barra frontal 1 (azul), barra frontal 2 (lilás) e barra frontal 3 (laranja) e dos volumes associados à barra frontal obtidos pelo modelo cuja taxa de entrada de sedimento é proveniente da deriva longilitoral máxima (cinzento escuro), da deriva longilitoral (cinzento) e da deriva longilitoral mínima (cinzento claro) em função dos anos (1977, 1982, 1986, 1988, 1992, 1995, 2005, 2010, 2012, 2014, 2015 e 2016).

Posteriormente, ao comparar o volume dos três polígonos da barra lateral a barlamar com o modelo cuja taxa de entrada de sedimento é, unicamente, proveniente da deriva longilitoral, foi possível obter a Figura 5.40. À semelhança do que ocorre na barra frontal, a compatibilidade também não é ideal para a barra lateral a barlamar, uma vez que é possível observar que os volumes calculados através do modelo são inferiores aos volumes calculados através dos mapas batimétricos.

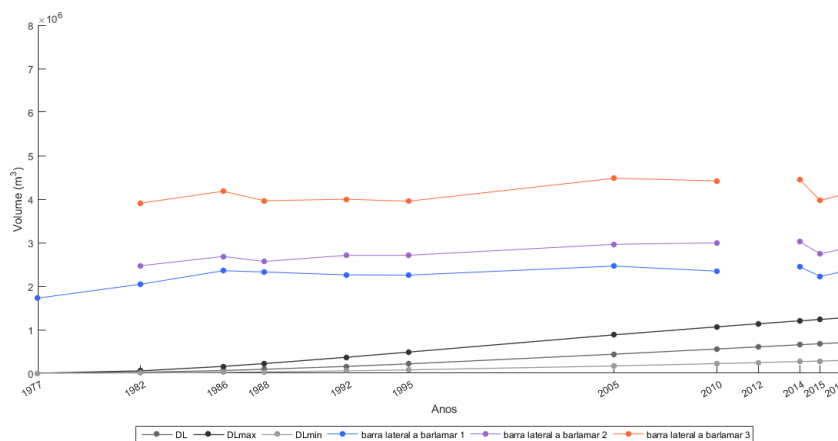


Figura 5.40 - Gráfico dos volumes calculados pelos polígonos barra lateral a barlamar 1 (azul), barra lateral a barlamar 2 (lilás) e barra lateral a barlamar 3 (laranja) e dos volumes associados à barra lateral a barlamar obtidos pelo modelo cuja taxa de entrada de sedimento é proveniente da deriva longilitoral máxima (cinzento escuro), da deriva longilitoral (cinzento) e da deriva longilitoral mínima (cinzento claro) em função dos anos (1977, 1982, 1986, 1988, 1992, 1995, 2005, 2010, 2012, 2014, 2015 e 2016).

A partir da Figura 5.41 é possível observar a comparação entre o volume dos três polígonos da barra frontal e os volumes obtidos através do modelo, cuja taxa de entrada de sedimento é somente proveniente da exportação fluvial. A exportação fluvial não é suficiente para justificar a atual evolução da barra frontal sendo necessário ter outros fatores em consideração.

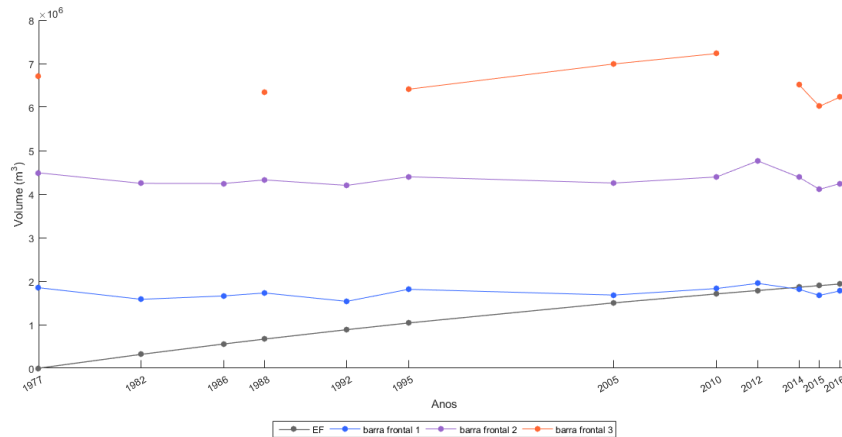


Figura 5.41 - Gráfico dos volumes calculados pelos polígonos barra frontal 1 (azul), barra frontal 2 (lilás) e barra frontal 3 (laranja) e dos volumes associados à barra frontal obtidos pelo modelo cuja taxa de entrada de sedimento é proveniente da exportação fluvial (cinza), em função dos anos (1977, 1982, 1986, 1988, 1992, 1995, 2005, 2010, 2012, 2014, 2015 e 2016).

Na Figura 5.42 é possível observar a comparação do volume dos três polígonos da barra lateral a barlar com o modelo cuja taxa de entrada de sedimento é exclusivamente proveniente da exportação fluvial. A necessidade de ter outros fatores em conta para justificar a atual evolução da barra lateral a barlar é evidente ao observar a Figura 5.42.

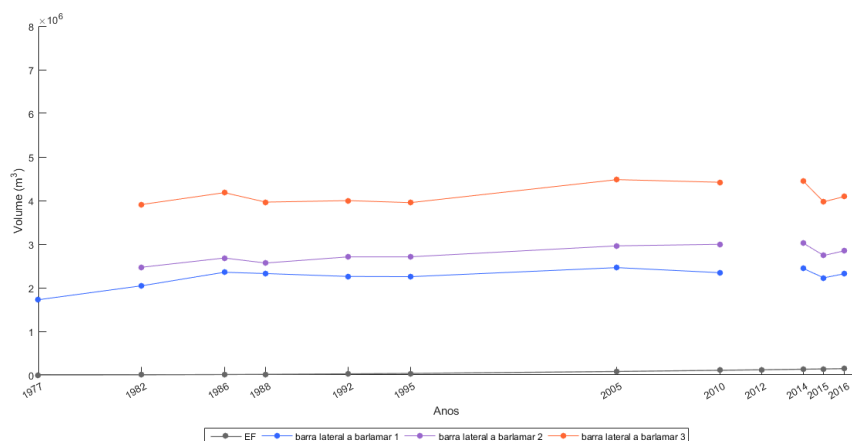


Figura 5.42 - Gráfico dos volumes calculados pelos polígonos barra lateral a barlamar 1 (azul), barra lateral a barlamar 2 (lilás) e barra lateral a barlamar 3 (laranja) e dos volumes associados à barra lateral a barlamar obtidos pelo modelo cuja taxa de entrada de sedimento é proveniente da exportação fluvial (cinzento), em função dos anos (1977, 1982, 1986, 1988, 1992, 1995, 2005, 2010, 2012, 2014, 2015 e 2016).

A comparação do volume dos três polígonos da barra frontal com o modelo cuja taxa de entrada de sedimento é proveniente da deriva longilitoral assim como da exportação fluvial é possível observar na Figura 5.43. Apesar de esta alternativa se aproximar mais do desejado, ainda é possível observar alguma disparidade entre os volumes obtidos através do modelo e os volumes obtidos através dos mapas batimétricos, particularmente entre 1977 e 1986.

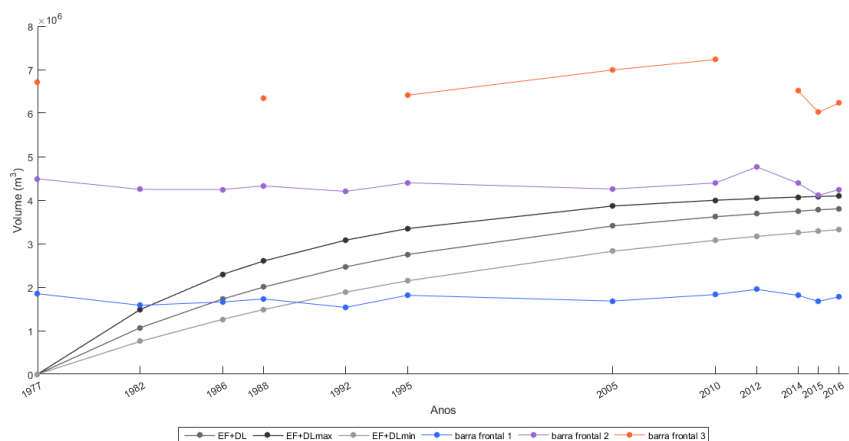


Figura 5.43 - Gráfico dos volumes calculados pelos polígonos barra frontal 1 (azul), barra frontal 2 (lilás) e barra frontal 3 (laranja) e dos volumes associados à barra frontal obtidos pelo modelo cuja taxa de entrada de sedimento é proveniente da deriva longilitoral máxima e exportação fluvial (cinzento escuro), da deriva longilitoral e exportação fluvial (cinzento) e da deriva longilitoral mínima e exportação fluvial (cinzento claro) em função dos anos (1977, 1982, 1986, 1988, 1992, 1995, 2005, 2010, 2012, 2014, 2015 e 2016).

Na Figura 5.44 encontra-se representada a comparação entre os volumes dos três polígonos da barra lateral a barlar com o modelo cuja taxa de entrada de sedimento é proveniente deriva longilitoral assim como da exportação fluvial. No entanto, a evolução obtida pelo modelo fica aquém do que seria necessário para esta apresentar compatibilidade com os volumes calculados através dos mapas batimétricos.

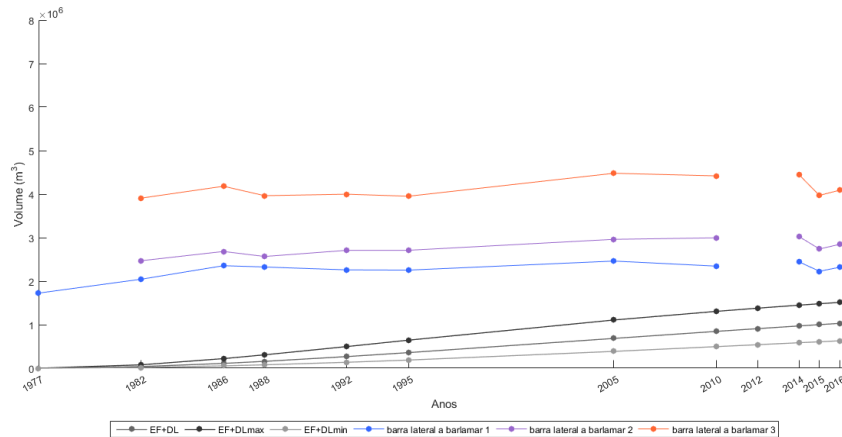


Figura 5.44 - Gráfico dos volumes calculados pelos polígonos barra lateral a barlar 1 (azul), barra lateral a barlar 2 (lilás) e barra lateral a barlar 3 (laranja) e dos volumes associados à barra lateral a barlar obtidos pelo modelo cuja taxa de entrada de sedimento é proveniente da deriva longilitoral máxima e exportação fluvial (cinza escuro), da deriva longilitoral e exportação fluvial (cinza) e da deriva longilitoral mínima e exportação fluvial (cinza claro) em função dos anos (1977, 1982, 1986, 1988, 1992, 1995, 2005, 2010, 2012, 2014, 2015 e 2016).

A comparação dos volumes obtidos pelos três polígonos da barra frontal com o modelo cuja taxa de entrada de sedimento é proveniente da deriva longilitoral, da exportação fluvial e com a incorporação do volume associado ao banco de O’Bril, encontra-se representada na Figura 5.45. Este modelo apresenta uma maior compatibilidade com os volumes obtidos através dos mapas batimétricos, nomeadamente, o modelo computado mostra uma maior semelhança com os dados calculados através do polígono barra frontal 2.

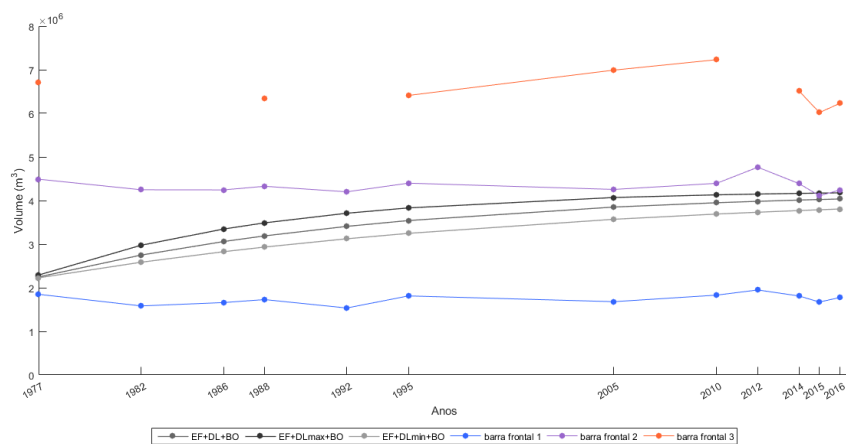


Figura 5.45 - Gráfico dos volumes calculados pelos polígonos barra frontal 1 (azul), barra frontal 2 (lilás) e barra frontal 3 (laranja) e dos volumes associados à barra frontal obtidos pelo modelo cuja taxa de entrada de sedimento é proveniente da deriva longilitoral máxima, exportação fluvial e banco de O’Bril (cinzento escuro), da deriva longilitoral, exportação fluvial e banco de O’Bril (cinzento) e da deriva longilitoral mínima, exportação fluvial e banco de O’Bril (cinzento claro) em função dos anos (1977, 1982, 1986, 1988, 1992, 1995, 2005, 2010, 2012, 2014, 2015 e 2016).

Posteriormente, através da Figura 5.46 observa-se a comparação dos volumes obtidos através dos três polígonos da barra lateral a barlar com o modelo cuja taxa de entrada de sedimento é proveniente da deriva longilitoral assim como da exportação fluvial e com a incorporação do banco de O’Bril. Este modelo computado apresenta uma maior compatibilidade com os dados obtidos através dos mapas batimétricos.

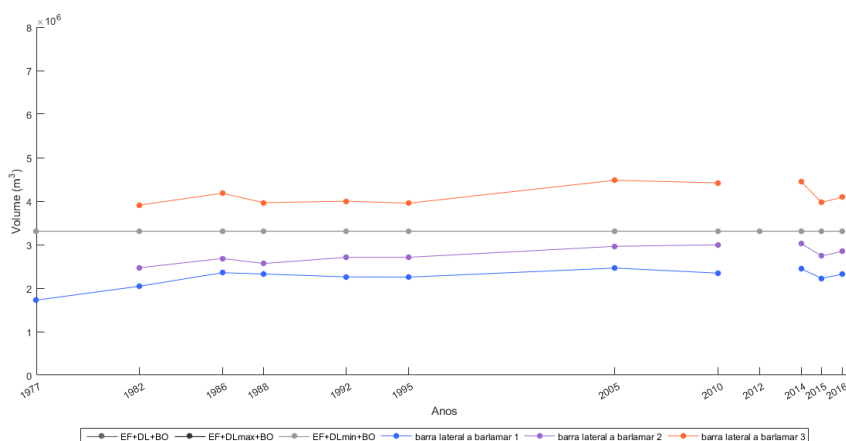


Figura 5.46 - Gráfico dos volumes calculados pelos polígonos barra lateral a barlar 1 (azul), barra lateral a barlar 2 (lilás) e barra lateral a barlar 3 (laranja) e dos volumes associados à barra lateral a barlar obtidos pelo modelo cuja taxa de entrada de sedimento é proveniente da deriva longilitoral máxima, exportação fluvial e banco de O’Bril (cinzento escuro), da deriva longilitoral, exportação fluvial e banco de O’Bril (cinzento) e da deriva longilitoral mínima, exportação fluvial e banco de O’Bril (cinzento claro) em função dos anos (1977, 1982, 1986, 1988, 1992, 1995, 2005, 2010, 2012, 2014, 2015 e 2016).

A Figura 5.47 representa a comparação dos volumes obtidos através dos três polígonos da barra frontal com o modelo cuja taxa de entrada de sedimento é proveniente da deriva longilitoral assim como da exportação fluvial e com a inclusão da fonte sedimentar local, ou seja, com a incorporação do banco de O'Bril. Extremamente semelhante à Figura 5.45 no entanto esta inclui as dragagens realizadas em 1986 e 2015.

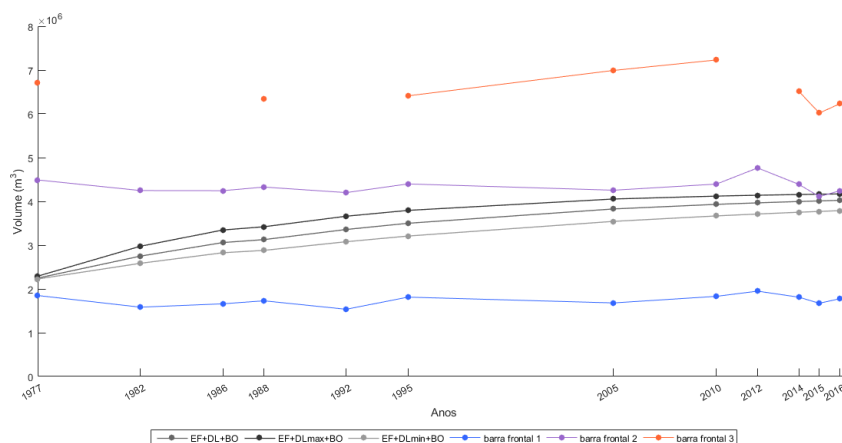


Figura 5.47 - Gráfico dos volumes calculados pelos polígonos barra frontal 1 (azul), barra frontal 2 (lilás) e barra frontal 3 (laranja) e dos volumes associados à barra frontal obtidos pelo modelo cuja taxa de entrada de sedimento é proveniente da deriva longilitoral máxima, exportação fluvial e banco de O'Bril (cinzento escuro), da deriva longilitoral, exportação fluvial e banco de O'Bril (cinzento) e da deriva longilitoral mínima, exportação fluvial e banco de O'Bril (cinzento claro) em função dos anos (1977, 1982, 1986, 1988, 1992, 1995, 2005, 2010, 2012, 2014, 2015 e 2016). Inclusão das dragagens em 1986 e 2015 no modelo.

Por fim, como as dragagens não afetam a barra lateral a barlar não foi necessário representar novamente os resultados obtidos uma vez que estes são iguais aos resultados representados na Figura 5.46.

5.6. Tarefa VI: Cenários de dragagem

O cenário 1 (Figura 5.48) corresponde à evolução da barra frontal com apenas a realização de uma dragagem em 1986, cujo volume dragado é igual a 0.063 Mm³. Este volume foi considerado uma vez que foi considerado o volume necessário para atingir a profundidade alvo considerada pelos Anexos 1 e 2. Esta intervenção apresenta um custo associado de 850 000 €. Em relação à dragagem demonstrada na Figura 5.48, sabe-se que a reconstrução da barra frontal se verifica a partir de 1992, apenas 6 anos após a realização da dragagem, e que em 2000 já se verificava novamente a necessidade de uma nova dragagem, ou seja, a frequência de dragagem necessária para este cenário é de 14 anos

em 14 anos. A partir da Figura 5.48 b) constatou-se que no ano 2000 a barra frontal já tinha recuperado 50% do volume dragado, que por sua vez representa num aumento de 0.42 m, obtido através da utilização da Equação 4.2.

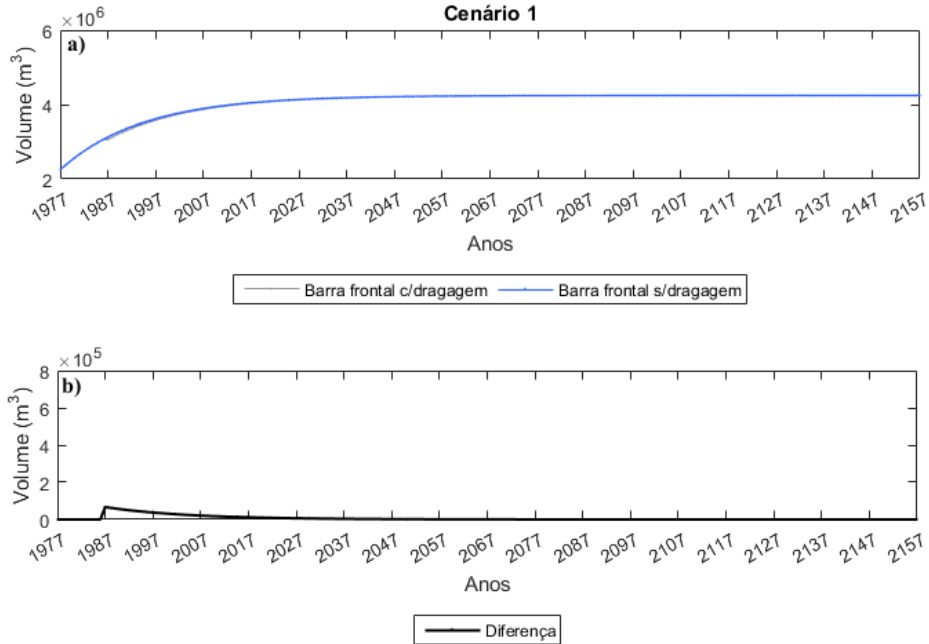


Figura 5.48 - Cenário 1. Gráfico da evolução da barra frontal sem dragagem (azul) e da evolução da barra frontal com integração da dragagem em 1986 (cinzento) em função dos anos (entre 1977 e 2157) (a) e representação da diferença das duas evoluções distintas (b).

Seguidamente, foi considerado o cenário 2 (Figura 5.49), que por sua vez integra uma dragagem em 1986 com um volume dragado de 0.1 Mm^3 e um custo associado de 1 340 000€. Considerando que um aumento de aproximadamente 0.42 m indica a necessidade da realização de uma nova dragagem, foi calculado uma frequência necessária para esta dragagem de 14 anos em 14 anos, ou seja, uma frequência de dragagem igual à calculada através do cenário 1.

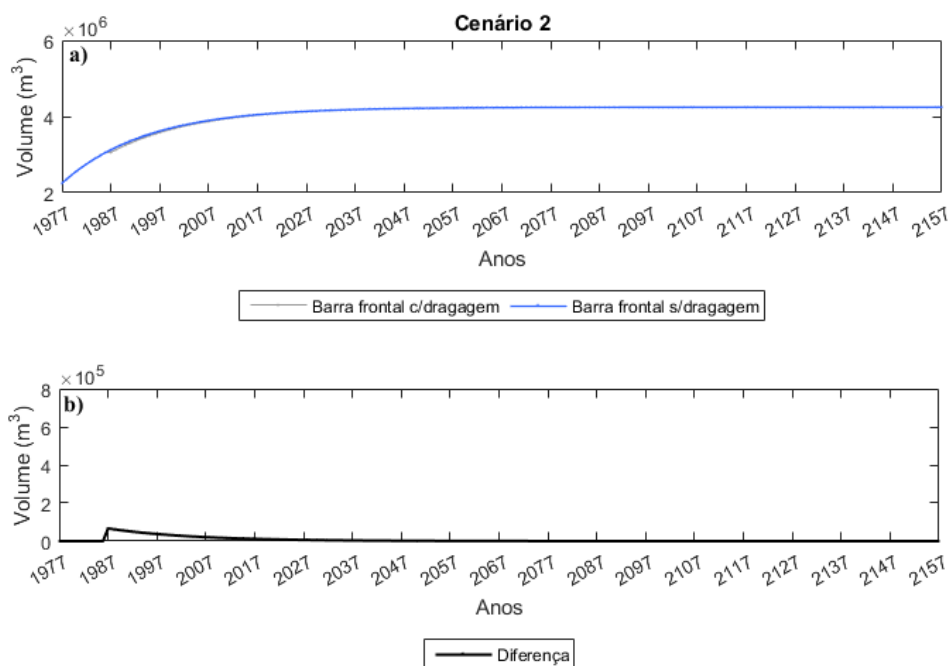


Figura 5.49 - Cenário 2. Gráfico da evolução da barra frontal sem dragagem (azul) e da evolução da barra frontal com integração da dragagem em 1986 (cinzento) em função dos anos (entre 1977 e 2157) (a) e representação da diferença das duas evoluções distintas (b).

O cenário 3 (Figura 5.50) corresponde à evolução da barra frontal com apenas a realização de uma dragagem em 1986, cujo volume dragado é igual a 0.3 Mm³. Esta intervenção apresenta um custo associado de 4 020 000 €. O cenário 3 apresenta uma frequência de dragagem de 40 anos em 40 anos, uma vez que segundo a Figura 5.50 b) a barra frontal apresenta novamente uma necessidade de dragagem em 2026, ano no qual a barra frontal profundidade aumenta, aproximadamente, 0.42 m

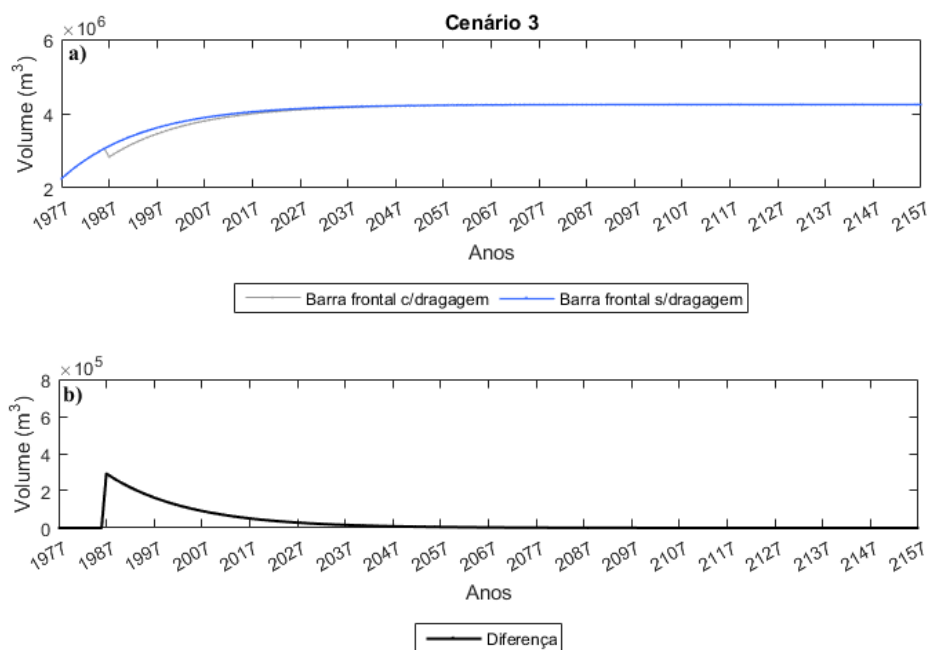


Figura 5.50 - Cenário 3. Gráfico da evolução da barra frontal sem dragagem (azul) e da evolução da barra frontal com integração da dragagem em 1986 (cinzento) em função dos anos (entre 1977 e 2157) (a) e representação da diferença das duas evoluções distintas (b).

Posteriormente, foi definido o cenário 4 (Figura 5.51) corresponde à evolução da barra frontal com apenas a realização de uma dragagem em 1986, cujo volume dragado é igual a 0.5 Mm^3 . Esta intervenção apresenta um custo associado de 6 700 000 €. A frequência associada a esta intervenção é de 47 anos em 47 anos, sendo o ano em que se verifica a necessidade de realizar novamente a dragagem em 2033.

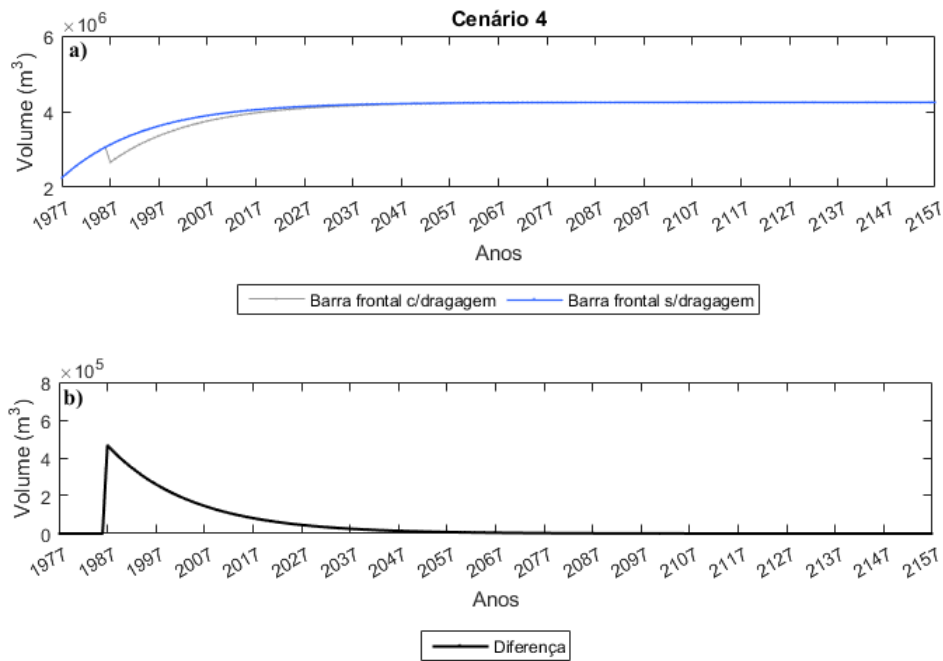


Figura 5.51 - Cenário 4. Gráfico da evolução da barra frontal sem dragagem (azul) e da evolução da barra frontal com integração da dragagem em 1986 (cinzento) em função dos anos (entre 1977 e 2157) (a) e representação da diferença das duas evoluções distintas (b).

O cenário 5 (Figura 5.52) corresponde à evolução da barra frontal com apenas a realização de uma dragagem em 1986, cujo volume dragado é igual a 0.8 Mm^3 . Esta intervenção apresenta um custo associado de 10 720 000 €. A frequência associada a esta intervenção é de 56 anos em 56 anos, sendo o ano em que se verifica a necessidade de realizar novamente a dragagem em 2046.

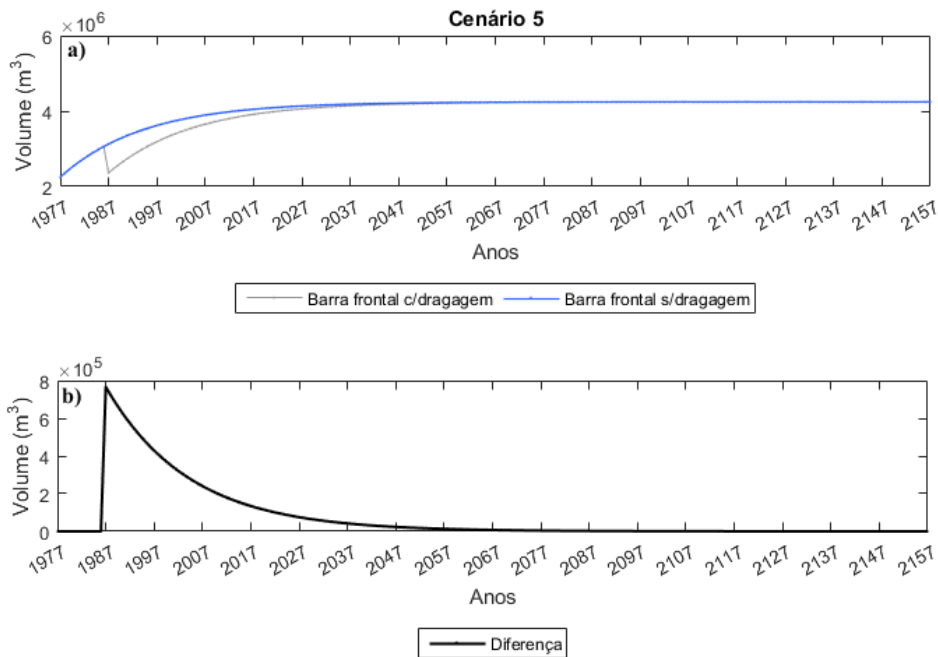


Figura 5.52 - Cenário 5. Gráfico da evolução da barra frontal sem dragagem (azul) e da evolução da barra frontal com integração da dragagem em 1986 (cinzento) em função dos anos (entre 1977 e 2157) (a) e representação da diferença das duas evoluções distintas (b).

Por fim, tendo em conta que o cenário 1 é a estratégia menos dispendiosa, no cenário 6 (Figura 5.53) foi aplicada uma nova dragagem com um volume igual a 0.063 Mm^3 , após a realização das duas dragagens previamente efetuadas (1986 e 2015). Esta perspetiva mostra um cenário futuro da resposta do delta, uma vez que o estado do desenvolvimento da estrutura é diferente. Para isso foi aplicada uma dragagem, com o mesmo volume dos anteriores, 14 anos após a dragagem efetuada em 2015, ou seja, foi aplicada uma nova dragagem em 2029. Por sua vez a dragagem realizada em 2029 apresenta uma frequência de dragagem de 36 em 36 anos, a diferença em relação ao cenário 1 deve-se ao facto de o desenvolvimento do delta em 2029 ser diferente do desenvolvimento do delta em 1986 e do facto de ainda ser possível observar o impacto da dragagem realizada em 2015.

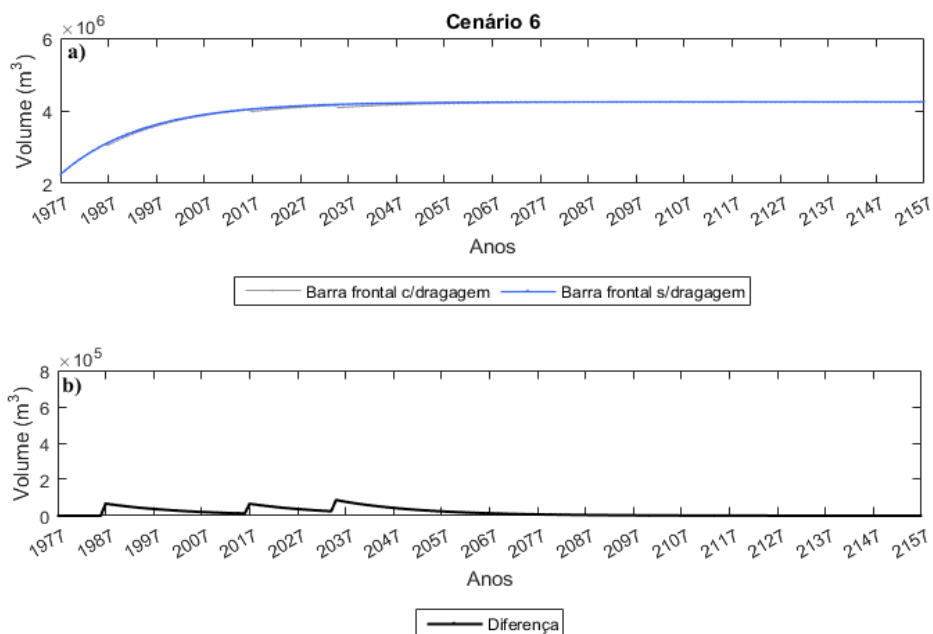


Figura 5.53 - Cenário 6. Gráfico da evolução da barra frontal sem dragagem (azul) e da evolução da barra frontal com integração das dragagens em 1986, 2015 e 2029 (cinzento) em função dos anos (entre 1977 e 2157) (a) e representação da diferença das duas evoluções distintas (b).

No cenário 7 (Figura 5.54) foi aplicada uma nova dragagem com um volume igual a 0.3 Mm^3 , após a realização das duas dragagens previamente efetuadas (1986 e 2015), cada uma com um volume dragado igual a 0.063 Mm^3 . Após a terceira dragagem com um volume igual a 0.3 Mm^3 , a frequência associada a esta intervenção é de 59 em 59 anos.

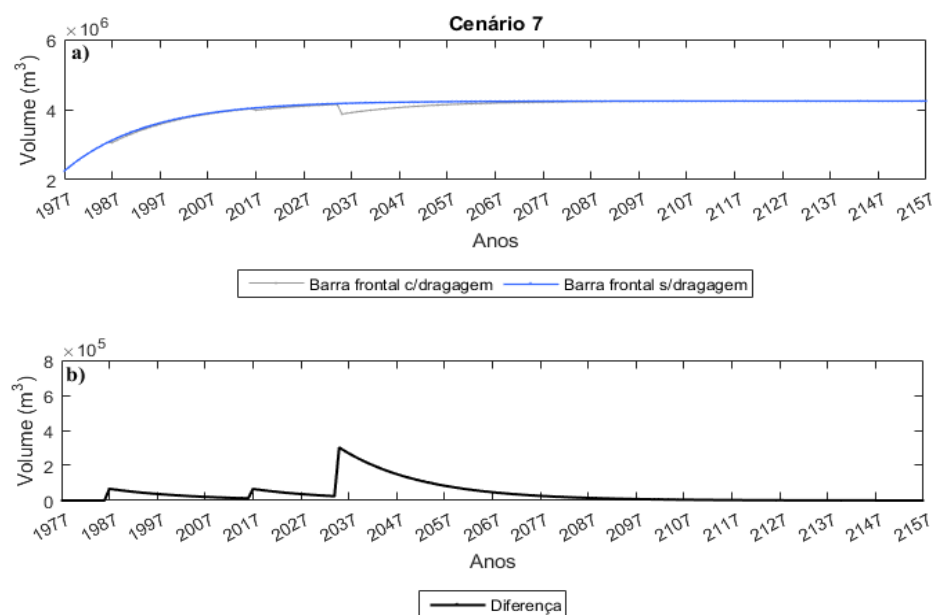


Figura 5.54 - Cenário 7. Gráfico da evolução da barra frontal sem dragagem (azul) e da evolução da barra frontal com integração das dragagens em 1986, 2015 e 2029 (cinzento) em função dos anos (entre 1977 e 2157) (a) e representação da diferença das duas evoluções distintas (b).

Capítulo 6: Discussão de resultados

A partir evolução morfológica, obtida através dos polígonos associados às diferentes estruturas morfológicas, é importante constatar que entre 1969 e 1982 se verifica um crescimento de volume e que após 1982 se verifica uma estabilização do sistema. Apesar de existirem pequenas oscilações do volume, a partir de 1982, quer na barra lateral a barlar quer na barra frontal, já não existe acumulação de areia em qualquer das estruturas morfológicas, ou seja, a areia segue da barra lateral a barlar para a barra frontal e posteriormente para o complexo a sotamar, sem haver acreção ou erosão, ou se existe esta acaba por se anular. Por outras palavras, mesmo tendo em conta que os mapas batimétricos referentes a 2014, 2015 e 2016, que mostram a variabilidade do volume do delta total a curto prazo, ou seja, uma variação anual forte, a análise dos mapas batimétricos mostra claramente que esta variabilidade é natural e incluída numa fase de estabilidade.

Em termos dos resultados obtidos no cálculo do volume do banco de O'Bril, estruturas como os bancos de areia já foram descritas em configurações semelhantes, como é o caso do delta de vazante de Shinnecock (Buonaiuto e Bokuniewicz, 2008), no entanto a sua grande dimensão aparenta ser particular para o delta de vazante do Guadiana (Garel *et al.*, 2015).

Em relação à dragagem de 2015, as diferenças associadas aos resultados obtidos através do software Surfer[®] e dos resultados obtidos através da Equação 4.2 podem ser justificadas pela recuperação do sistema ou do colapso da parede da zona dragada. Adicionalmente, embora tenham sido realizadas várias tentativas e utilizando métodos distintos (Tabela 6.1), não foi possível igualar o volume dragado encontrado na pesquisa (0.063 Mm³). A rápida recuperação do sistema também é responsável pelo facto da profundidade média na zona de dragagem no mapa batimétrico de 2015 ser superior à profundidade alvo definida pelos dos documentos existentes referentes à dragagem realizada em 28 de abril de 2015 (Anexo 1 e 2), ou seja, apesar de se observarem os resultados da intervenção realizada, estes não são duradouros uma vez que se constata que, apenas 45 dias após a dragagem, o canal de navegação já não apresentava a profundidade desejada. Adicionalmente, constata-se que os pontos mais a Oeste recuperam mais rapidamente o volume dragado.

Tabela 6.1 - Discriminação dos resultados obtidos através do cenário 1, do cenário 2 e dos dados obtidos através do perfil criado, na tentativa de calcular o volume e a profundidade associada à dragagem realizada em 2015. Esta tabela mostra o comprimento e a largura (m) considerada para cada cenário, assim como a profundidade obtida através da Equação 4.2 (m) e a profundidade (m) e volume (Mm³) obtidos através da utilização do *software* Surfer[®].

	Cenário 1	Cenário 2	Perfil
Comprimento (m)	1250	1250	-
Largura (m)	60	128	-
Profundidade (Equação) (m)	-0.84	-0.39	-
Profundidade (Surfer) (m)	-0.18	-0.03	-0.0228
Volume (Surfer) (Mm³)	-0.007	-0.005	-0.017

O modelo concebido não recria na perfeição o sistema em causa, uma vez que existem limitações relacionadas com o modelo criado. No entanto, é importante realçar que o modelo permite uma previsão da evolução do delta na sua generalidade possibilitando uma análise das dragagens realizadas. O modelo assume que a barra frontal se forma antes da barra lateral a barlar, no entanto, a partir dos mapas batimétricos é possível constatar que estas estruturas se formam relativamente ao mesmo tempo. Além disso, ao comparar o volume total da barra frontal com o volume dragado, mesmo considerando o volume referido na pesquisa, é possível verificar que o volume dragado é muito pequeno e muito localizado, não se verificando uma grande alteração no sistema em geral. Ao comparar os vários modelos, criados com taxas de entrada sedimentar diferentes, o que apresenta uma evolução mais próxima da evolução obtida através dos mapas batimétricos é o modelo que inclui como taxa de entrada sedimentar a deriva longitudinal, a exportação fluvial e a fonte local sedimentar (banco de O'Bril), tanto para evolução da barra frontal como para a evolução da barra lateral a barlar. A partir dos resultados obtidos é possível constatar que a barra lateral a barlar resulta da acumulação de areia proveniente da fonte sedimentar local (banco de O'Bril) que foi redistribuída, havendo uma tendência de manutenção do volume ao longo do tempo. Além disso, a integração das dragagens permite uma maior aproximação da evolução da barra frontal.

Como já foi referido anteriormente, o sistema apresenta uma rápida recuperação, indicando que as dragagens efetuadas tiveram sucesso reduzido, uma vez que apesar de se verificar os seus resultados estes são rapidamente anulados pela necessidade do sistema de encontrar novamente uma situação de equilíbrio. A estratégia de dragagem aplicada atualmente é errada, uma vez que através da dragagem realizada em 1986 sabe-se que a frequência de dragagem necessária para este cenário é de 14 anos em 14 anos. Esta frequência de dragagem não é cumprida uma vez que a segunda dragagem foi realizada apenas em 2015, devido a limitações financeiras.

Em relação aos cenários de dragagem computados, constatou-se que quanto maior a dragagem mais dispendiosa esta se torna, no entanto quanto maior o volume dragado maior será o intervalo necessário entre dragagens. Contudo, o aumento do tempo de recuperação não é suficiente para compensar o custo associado a uma intervenção de maior escala. Por exemplo, o cenário 2 apesar de apresentar um maior volume associado à dragagem apresenta o mesmo tempo de recuperação que o cenário 1, embora tenha um maior custo associado. Assim, através dos cenários computados constatou-se que do ponto de vista económico, o cenário de dragagem menos dispendioso é o cenário 1, que por sua vez corresponde a dragagens com um volume igual a 0.063 Mm^3 (igual ao volume dragado em 2015) com uma frequência de dragagem de 14 anos em 14 anos, de modo a manter o canal de navegação funcional. Porém, tendo em conta que já foram realizadas duas dragagens na área de estudo, foi computado uma nova dragagem considerando as dragagens previamente realizadas que, por sua vez, indica que a melhor estratégia é aplicar uma dragagem com o mesmo volume das anteriores (0.063 Mm^3) em 2029. Neste cenário, tendo em conta que o desenvolvimento do delta em 2029 é diferente do desenvolvimento do delta em 1986, o tempo de recuperação do sistema aumenta, sendo apenas verificada a necessidade de realização de uma nova dragagem 36 anos depois, o que indica que quanto mais desenvolvida se encontra a estrutura morfológica, ou seja, quanto mais estabilizada esta se encontra, maior é o tempo entre dragagens associado.

Capítulo 7: Conclusão

Atualmente o delta de vazante do Guadiana encontra-se estabilizado, no entanto existem problemas de navegabilidade relacionados ao local, associados à grande acumulação de areia como consequência da construção dos molhes. A navegabilidade reduzida introduz uma necessidade da realização de intervenções sobre a forma de dragagens no local, no entanto o sistema apresenta uma rápida recuperação e, como tal, existe uma necessidade de repetição deste tipo de intervenção.

O modelo criado apresenta limitações, não existindo uma compatibilidade perfeita com a realidade obtida através dos mapas batimétricos. Contudo, o modelo que se aproxima mais à evolução das estruturas morfológicas, retirada dos mapas batimétricos, é o modelo que incorpora a deriva longilitoral, a exportação fluvial e a fonte local sedimentar (banco de O'Bril).

De um modo geral, foi possível constatar que de um ponto de vista económico o cenário de dragagem mais indicado é o cenário 6, onde foi aplicada uma dragagem de 0.063 Mm³ em 2029, sendo esta adicional às dragagens previamente realizadas. Devido à rápida recuperação do sistema existe uma necessidade de que as dragagens se tornem mais regulares e menos espaçadas temporalmente, de modo a permitir uma melhor navegabilidade nesta região.

Em suma, é importante a realização de uma monitorização mais regular do sistema, uma vez que esta permite uma melhor averiguação da recuperação do sistema, assim como a verificação do sucesso associado às intervenções em causa.

Referências

- Bhattacharya, J. P., e Giosan, L., 2003. Wave-influenced deltas: geomorphological implications for facies reconstruction. *Sedimentology* 50, 187-210.
- Bhattacharya, J.P. e Walker, R.G., 1992. Deltas. In: *Facies Models: Response to Sea-Level Change* (Eds R.G. Walker e N.P. James), 157–177. Geological Association of Canada, St Johns.
- Boothroyd, J.C., 1985. Tidal inlets and tidal deltas. In: Davis Jr., R.A. (Ed.), *Coastal Sedimentary Environments*. Springer-Verlag, New York, 445-532.
- Buijsman, M.C., Kaminsky, G.M., Gelfenbaum, G., 2003. Shoreline change associated with jetty construction, deterioration and rehabilitation at Grays Harbor, Washington. *Shore Beach* 71, 15-22.
- Buonaiuto, F.S. e Bokuniewicz, H.J., 2008. Hydrodynamic partitioning of a mixed energy tidal inlet. *J. Coast. Res.* 24 (5), 1339–1348.
- Castelle, B., Bourget, J., Molnar, N., Strauss, D., Deschamps, S., Tomlinson, R., 2007. Dynamics of a wave-dominated tidal inlet and influence on adjacent beaches, Currumbin Creek, Gold Coast, Australia. *Coast. Eng.* 54 (1), 77–90.
- Chang, H., 1997. Modeling fluvial processes in tidal inlet. *J. Hydraul. Eng.* 123, 1161-1165.
- Coleman, J. M., Roberts, H. H., Huh, O. K.. Deltaic landforms, Chapter 5: Introduction. Disponível online em:
http://disc.sci.gsfc.nasa.gov/geomorphology/GEO_5/GEO_CHAPTER_5.shtml
- Collela, A. e Prior, D.B., 1990. Coarse-grained deltas. *Int. Assoc. Sedimentol. Spec. Publ.* 10, 357.
- Costa, M., Silva, R., Vitorino, J., 2001. Contribuição para o estudo do clima de agitação marítima na costa portuguesa. *Proceedings of 2ª Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária*. International Navigation Association PIANC, Sines, Portugal.
- Dabees, M.A. e Kraus N.C., 2008. Cumulative effects of channel and ebb shoal dredging on inlet evolution in southwest Florida, USA. In: *Proc. 31st International Conference on Coastal Engineering*, WS, 2310-2315.
- de Swart, H.E., Zimmerman, J.T.F., 2009. Morphodynamics of tidal inlet systems. *Annu. Rev. Fluid Mech.* 41, 203-229.
- FitzGerald, D.M., 1996. Geomorphic variability and morphologic and sedimentologic controls on tidal inlets. *J. Coast. Res.*, 47-71.
- FitzGerald, D.M., 2005. Tidal inlets. In: *Encyclopedia of coastal science*, Schwartz, M.L., ed. pringer, 958-964.

- FitzGerald, D.M., Buynevich, I.V., Davis Jr., R.A., Fenster, M.S., 2002. New England tidal inlets with special reference to riverine-associated inlet systems. *Geomorphology* 48, 179-208.
- FitzGerald, D.M., Kraus, N.C., Hands, E.B., 2000. Natural Mechanisms of Sediment Bypassing at Tidal Inlets. US Army Corps of Engineers.
- Fontolan, G., Pillon, S., Delli Quadri, F., Bezzi, A., 2007. Sediment storage at tidal inlets in northern Adriatic laggons: Ebb-tidal delta morphodynamics conservation and sand use strategies. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 75, 261-277.
- Galgano, F.A., 2007. Types and causes of beach erosion anomaly areas in the U.S. east coast barrier island system: stabilized tidal inlets. *Middle States Geogr.*, 158-170.
- Galloway, W.E. and Hobday, D.K., 1996. Terrigenous Clastic Depositional Systems. Springer-Verlag, Heidelberg, 489.
- Galloway, W.E., 1975. Process framework for describing the morphologic and stratigraphic evolution of deltaic depositional systems. In: *Deltas, Models for Exploration* (Ed. M.L. Broussard), 87–98. Houston Geological Society, Houston, TX.
- Garel, E. e Ferreira, Ó., 2011. Effects of the Alqueva Dam on Sediment Fluxes at the Mouth of the Guadiana Estuary. *Journal of Coastal Research*, SI 64, 1505-1509.
- Garel, E., Morales, J.A., Sousa, C., Ferreira, Ó., 2015. Influence of the pre-jetty ebb-delta morphology on sand bypassing and coastal evolution after inlet stabilization. In: *3ª Conferencia sobre Morfodinâmica Estuarina e Costeira*, Universidade do Algarve.
- Garel, E., Pinto, L., Santos, A., Ferreira, Ó., 2009. Tidal and river discharge forcing upon water and sediment circulation at a rock-bound estuary (Guadiana estuary, Portugal). *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 84 (2), 269–281.
- Garel, E., Sousa, C., Ferreira, Ó., 2015. Sand bypass and updrift beach evolution after jetty construction at an ebb-tidal delta. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 1-10.
- Garel, E., Sousa, C., Ferreira, Ó., Morales, J.A., 2014. Decadal morphological response of an ebb-tidal delta and down-drift beach to artificial breaching and inlet stabilisation. *Geomorphology* 216, 13-25.
- Gonzalez, R., Dias, J.M.A., Ferreira, Ó., 2001. Recent rapid evolution of the Guadiana Estuary mouth (southwestern Iberian Peninsula). *J. Coast. Res.* 2000, 516–527 (Proceedings of International Coastal Symposium).
- Hansen, M., Knowles, S., 1988. Ebb-tidal delta response to jetty construction at three South Carolina inlets. In: *Aubrey, D., Weishar, L. (Eds.), Hydrodynamics and Sediment Dynamics of Tidal Inlets, Lecture Notes on Coastal and Estuarine Studies*. Springer, New York, 364-381.

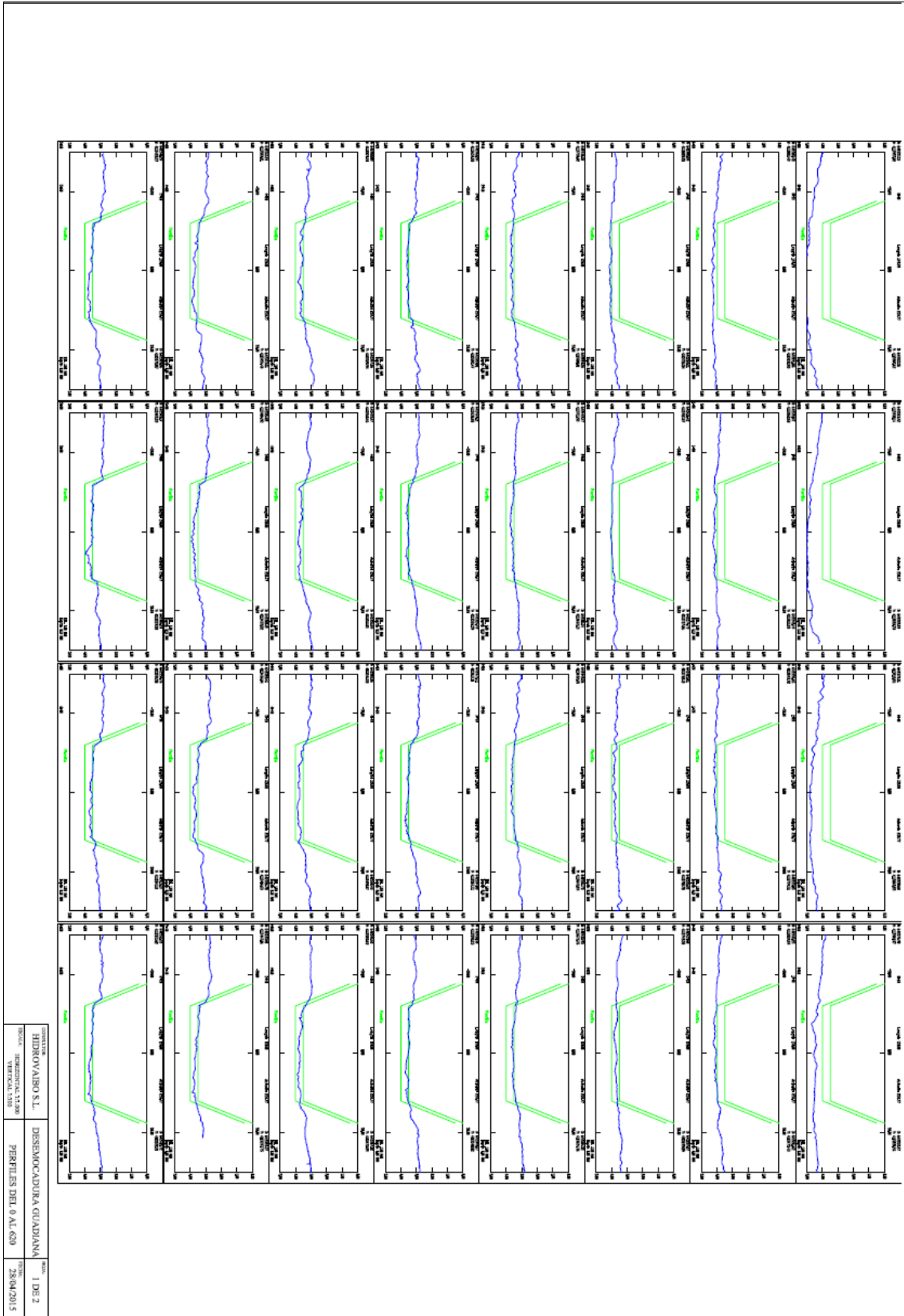
- Hapke, C.J., Kratzmann, M.G., Himmelstoss, E.A., 2013. Geomorphic and human influence on large-scale coastal change. *Geomorphology* 199, 160-170.
- Hayes, M. O. And FitzGerald, D. M., 2013. Origin, Evolution, and Classification of Tidal Inlets. *Journal of Coastal Research* 69, 14-33.
- Hayes, M.O., 1979. Barrier island morphology as a function of tidal and wave regime. In: Leatherman, S.P. (Ed.), *Barrier Islands Form the Gulf of St. Lawrence to the Gulf of Mexico*. Academic Press, NY, 1–27.
- Hayes, M.O., 1980. General morphology and sediment patterns in tidal inlets. *Sediment. Geol.* 26, 139-156.
- Komar, P.D., 1996. Tidal inlet processes and morphology related to the transport of sediments. *J. Coast. Res.* 23, 23-44.
- Kraus, N.C., 2000. Reservoir model of ebb-tidal delta evolution and sand bypassing. *J. Waterway Port Coast. Ocean Eng.* 126, 305-313.
- Kraus, N.C., 2006. Coastal inlet functional design: anticipating morphological response. In: ASCE (Ed.), *Proceedings Coastal Dynamics 05*, Barcelona, p. 13
- Kraus, N.C., 2009. Engineering of tidal inlets and morphologic consequences. In: Kim, Y.C. (Ed.), *Handbook of Coastal and Ocean Engineering*. World Scientific, Singapore, pp. 867-901.
- Morales, J.A., 1995. *Sedimentología del Estuario del Guadiana (S.W. España-Portugal)* Tesis doctoral, University of Sevilla, Sevilla, Spain, 274 pp.
- Oost, A.P., Hoekstra, P., Wiersma, A., Flemming, B., Lammerts, E.J., Pejrup, M., Hofstede, J., van der Valk, B., Kiden, P., Bartholdy, J., van der Berg, M.W., Vos, P.C., de Vries, S., Wang, Z.B., 2012. Barrier island management: lessons from the past and directions for the future. *Ocean Coastal Manag.* 68, 18-38.
- Orton, G.J. e Reading, H.G., 1993. Variability of deltaic processes in terms of sediment supply, with particular emphasis on grain size. *Sedimentology*, 40, 475-512.
- Pope, J., 1991. Ebb delta and shoreline response to inlet stabilization, examples from the southeast Atlantic coast. In: *Proceedings, 1991 Coastal Zone*. National Oceanic and Atmospheric Administration, 643-654.
- Reading, H.G. e Collinson, J.D., 1996. *Clastic Coasts*. In: *Sedimentary Environments: Processes, Facies and Stratigraphy* (Ed. H.G. Reading), 3rd edn, 154-231. Blackwell Science, Oxford.
- Reinson, G.E., 1992. Transgressive barrier island and estuarine systems. In: *Facies Models: Response to Sea Level Change* (Ed. R.G. Walker). Geological Association of Canada, 179-194.
- Sul Informação, 2015. Dragagens da foz do Guadiana já acabaram ampliando potencial turístico.

- Suter, J.R., 1994. Deltaic coasts. In: Coastal Evolution; Late Quaternary Shoreline Morphodynamics (Eds R.W.G. Carter and C.D. Woodroffe), 87-120. Cambridge University Press, Cambridge.
- Wright, L.D. e Coleman, J.M., 1973. Variations in morphology of major river deltas as functions of ocean wave and river discharge regimes. AAPG Bull., 57, 370-398.
- Wright, L.D., 1985. River deltas. In: Davis Jr., R.A. (Ed.). Coastal Sedimentary Environments. Springer-Verlag, New York, 1-76.

Anexos

Anexo 1

Perfis 0 a 620 da zona dragada do delta do Guadiana, retirados a 28 de abril de 2015
(parte 1/2)



Anexo 2

Perfis 640 a 1240 da zona dragada do delta do Guadiana, retirados a 28 de abril de 2015

(parte 2/2)

