



UNIVERSIDADE TÉCNICA DE LISBOA

Instituto Superior Técnico

**MODELAÇÃO DO IMPACTE DE EMISSÁRIOS
SUBMARINOS EM ZONAS COSTEIRAS
– CASO DA FOZ DO ARELHO –**

Maria Madalena dos Santos Malhadas
(Licenciada)

Dissertação para obtenção do grau de Mestre em
Ecologia, Gestão e Modelação dos Recursos Marinhos

Presidente: Doutor Ramiro de Jesus Neves
Vogais: Doutor Aires José Pinto dos Santos
Doutor José Simão Antunes do Carmo

Abril de 2008

RESUMO

A presente tese constitui um contributo para a modelação da dispersão de efluentes através de emissários submarinos. É apresentado um sistema integrado de modelação para a Lagoa de Óbidos e zona costeira adjacente, sendo efectuada uma sintética revisão dos principais processos associados a descargas de emissários submarinos (campo próximo e afastado) bem como os principais modelos utilizados para simular esses processos. Caracterizam-se áreas de aplicação do sistema, principalmente o tipo de circulação e características físicas e ecológicas. É explicada a arquitectura de implementação do sistema e o modelo utilizado nas simulações da dispersão da pluma do emissário submarino da Foz do Arelho (MOHID). Os resultados da modelação em cada domínio implementado foram comparados dados oceanográficos de nível de maré, correntes e perfis verticais de salinidade e temperatura. A integração conjunta de resultados previstos pelo modelo e medidas, é determinante para avaliar o impacte da pluma microbiológica do emissário submarino na praia da Foz do Arelho. Finalmente, descreve-se ainda a forma de acesso e publicação de alguns dos resultados obtidos ao longo deste trabalho.

Palavras-chave: Lagoa de Óbidos, MOHID, emissário submarino da Foz do Arelho, dispersão da pluma, monitorização, modelação.

Title: "MODELLING THE IMPACT OF SUBMARINE OUTFALLS PLUME IN A COASTAL AREAS – FOZ DO ARELHO CASE STUDY"

ABSTRACT

The present thesis is a contribution for modeling the effluent dispersion through submarine outfalls. An integrated model system of Óbidos Lagoon and coastal area were implemented. A brief review of main processes (near-field and far-field) that occurred through submarine outfall discharges is made, as also the most important models used for their simulation. We characterize the system application area, mainly circulation patterns and also hydroecologic processes. Model system framework is explained, as well the model applied to study Foz do Arelho submarine outfall discharge (MOHID). We make comparisons between model predictions and measurements for tidal levels, currents and salinity and temperature. Hence, we use all these sources of information in an integrated way for predicting the impact of submarine outfall at coastal area and Foz do Arelho beach. Finally, we discuss the published information gathered along these work.

Palavras-chave: Óbidos Lagoon, MOHID, Foz do Arelho submarine outfall, plume dispersion, monitoring, modeling.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi possível com a ajuda de várias pessoas às quais quero agradecer, porque de alguma forma contribuíram e ajudaram na sua realização.

Ao Professor Doutor Ramiro Neves, pela co-orientação da minha tese e por toda a ajuda e meios prestados.

Ao Paulo Chambel e Luís, pela ajuda nos momentos mais cruciais da implementação do modelo.

À Carla Garcia pela sua constante motivação e críticas construtivas no desenvolvimento do trabalho.

À Susana Nunes e Rodrigo Fernandes pela generosidade prestada e constante incentivo para alcançar esta meta.

À Rosa, pela amizade mostrada.

A cada um dos amigos e colegas de trabalho do MARETEC que contribuíram com algo especial.

À minha mãe, por todo o amor e apoio incondicional que permitiu alcançar mais esta meta.

Ao meu pai e a vocês, Carla e Rui, meus irmãos. À minha linda sobrinha que com o seu encanto e alegria me transmitiu força.

A cada um obrigada,

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Problemas a resolver	1
1.2. Emissário submarino da Foz do Arelho	3
1.3. Contexto da tese	5
1.4. Objectivos	5
1.5. Estrutura do documento	6
2. DESCRIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	9
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
3.1. Definições e conceitos básicos de jactos e plumas	15
3.1.1. Classificação de jactos e plumas	17
3.2. Dispersão no campo próximo e campo afastado	18
3.3. Modelos matemáticos para estudo da dispersão de efluentes	20
4. O MODELO MOHID	23
4.1. Descrição geral do sistema	23
4.1.1. MOHID water	25
4.1.1.1. Módulo hidrodinâmico	26
4.1.1.1.1. Equações resolvidas	26
4.1.1.1.2. Principais aproximações	27
4.1.1.1.3. Módulo de turbulência	29
4.1.1.1.4. Módulo de transporte Euleriano/propriedades da água	30
4.1.1.1.5. Módulo de transporte lagrangeano	31
4.1.1.1.5.1. Deslocamento de traçadores	32
4.1.1.1.5.2. Inactivação bacteriológica	33
4.1.1.1.5.3. Emissão	34
4.1.1.1.6. Módulo Geometry (geometria/discretização vertical)	34
4.1.1.1.7. Módulo MOHIDJET	36
4.1.1.1.8. Condições fronteira	37
4.1.1.1.8.1. Fronteiras Abertas	37
4.1.1.1.8.2. Fronteiras Fechadas	38
4.1.1.1.9. Módulo Waves	39
4.1.1.1.10. Módulo Sand	39
5. SISTEMA IMPLEMENTADO	41
5.1. Modelos encaixados	41
5.2. Implementação do Sistema	45
5.2.1. Dados	45
5.2.1.1. Batimetrias	45
5.2.1.2. Níveis e correntes	46
5.2.1.3. Parâmetros físico-químicos, indicadores microbiológicos, nutrientes e Clorofila- <i>a</i>	47

5.2.2.	Condições de fronteira _____	49
5.2.2.1.	Maré _____	49
5.2.2.2.	Forçamento atmosférico _____	49
5.2.2.3.	Agitação marítima _____	50
5.2.2.4.	Afluências de água doce _____	51
5.2.3.	Condições iniciais _____	53
5.3.	Validação _____	54
5.3.1.	Costa Portuguesa -Nível 1 _____	55
5.3.2.	Costa Aveiro-Sines -Nível 2 _____	57
5.3.3.	Lagoa de Óbidos -Nível 4 _____	58
5.3.3.1.	Níveis _____	58
5.3.3.1.1.	<i>Modelo simplificado da Lagoa de Óbidos</i> _____	63
5.3.3.2.	Correntes _____	65
5.3.4.	Zona costeira adjacente -Nível 5 _____	67
6.	APLICAÇÃO AO EMISSÁRIO DA FOZ DO ARELHO _____	71
6.1.	Condição inicial da pluma - campo próximo _____	72
6.2.	Campo afastado _____	76
6.2.1.	Efeito do vento _____	76
6.2.2.	Validação à superfície _____	79
6.3.	Análise de acordo com a legislação _____	82
6.3.1.	Zona balnear da Foz do Arelho _____	82
6.3.1.1.	Bactérias Coliformes e Bactérias Coliformes Termotolerantes _____	82
6.3.1.2.	Enterococos e Escherichia Coli _____	85
6.3.2.	Zona de descarga _____	88
6.3.2.1.	Parâmetros físico-químicos _____	88
6.3.2.2.	Nutrientes e Clorofila- <i>a</i> _____	89
6.3.2.3.	Indicadores microbiológicos _____	91
6.3.2.3.1.	<i>Bactérias coliformes termotolerantes</i> _____	91
6.3.2.3.2.	<i>Escherichia coli e enterococos</i> _____	92
7.	GESTÃO E DADOS _____	93
7.1.	Página <i>Web</i> _____	93
7.2.	Base de dados _____	94
8.	CONCLUSÕES E TRABALHO FUTURO _____	97
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS _____	101
	ANEXOS	

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1- Localização do emissário submarino da Foz do Arelho. A configuração do difusor pode ser vista no canto superior esquerdo.	4
Figura 2.1- Localização geográfica da Lagoa de Óbidos e zona costeira adjacente.....	10
Figura 2.2- Imagens de detecção remota obtidas pelo satélite MODIS no domínio de estudo: (esquerda) temperatura da superfície do mar e (direita) Clorofila- <i>a</i> em Maio de 2005 As temperaturas mais baixas próximo da costa e a grande concentração em pigmentos da Clorofila- <i>a</i> são evidências do fenómeno de <i>upwelling</i> na região.	12
Figura 2.3- Perfis verticais de temperatura na zona de estudo em diferentes alturas do ano.	13
Figura 2.4- Perfis verticais de salinidade entre campanhas na zona de descarga do emissário submarino da Foz do Arelho (estação #1).	13
Figura 2.5- Perfis verticais de salinidade entre campanhas num ponto de referencia localizado 1 km a Norte da descarga (estação #2).	14
Figura 3.1- Jacto perpendicular às correntes do meio receptor (FONTE: Jirka <i>et al.</i> , 1996).	19
Figura 3.2- Jacto num meio ambiente estratificado sem correntes (FONTE: Jirka <i>et al.</i> , 1996).....	19
Figura 3.3- Principais regiões de dispersão que ocorrem aquando da descarga do efluente de um emissário submarino no meio ambiente (Adaptado de Monteiro, 1995).	20
Figura 4.1- Cálculo da velocidade média dos traçadores (Adaptado de Leitão, 1997).	32
Figura 4.2 – Movimento aleatório forçado por vórtices maiores que o traçador (círculo cinzento).....	33
Figura 4.3 – Malha ilustrativa das potencialidades de discretização vertical do sistema MOHID.....	35
Figura 4.4 – Exemplo de aplicação de passo variável na Lagoa de Óbidos.	35
Figura 4.5 – Condições para um ponto de cálculo de velocidades se considerar descoberto.	38
Figura 5.1- Modelos encaixados implementados para as simulações (1-costa Portuguesa, 2- Costa entre Aveiro-Sines, 3-Costa entre Nazaré-Peniche, 4-Lagoa de Óbidos e 5-zona costeira adjacente à Lagoa de Óbidos). Os círculos a branco indicam os marégrafos existentes na costa Portuguesa.	42
Figura 5.2- Dados batimétricos da zona costeira entre Nazaré-Peniche.....	45
Figura 5.3-Dados batimétricos utilizados para efectuar a batimetria da Lagoa de Óbidos e zona costeira adjacente.	46
Figura 5.4- Localização dos marégrafos e secções no interior da Lagoa de Óbidos e da estação litoral de observação no exterior desta.	47
Figura 5.5- Localização das estações de amostragem na Lagoa de Óbidos e emissário submarino da Foz do Arelho.....	48
Figura 5.6. Localização das estações de amostragem na zona balnear da Foz do Arelho: Foz do Arelho-Mar, Foz do Arelho-Lagoa e Foz do Arelho-Bom Sucesso.	49
Figura 5.7. Domínios de resolução do modelo MM5, começando pelo modelo de menor resolução (81km) para o modelo de maior resolução (9km).	50
Figura 5.8- Identificação das sub-bacias hidrográficas drenantes para a Lagoa de Óbidos e da estação meteorológica de Óbidos (monitorização do INAG- 17C/07).	51
Figura 5.9- Caudal médio mensal dos principais afluentes (Rio Arnóia e Cal), estimado com base na precipitação medida na estação de Óbidos e na área da respectiva sub-bacia.	52
Figura 5.10- Comparação do nível obtido a partir de componentes de maré com os resultados do modelo da costa Portuguesa em Peniche e Sesimbra.	55
Figura 5.11- Coeficiente de correlação para os níveis de maré na costa Portuguesa.	56

Figura 5.12- Enviesamento do modelo para os níveis de maré na costa Portuguesa.	56
Figura 5.13- Raiz do erro quadrático médio (RMSE) do modelo para os níveis de maré na costa Portuguesa.	57
Figura 5.14- Coeficiente de correlação do modelo para os níveis de maré no nível 1 (costa Portuguesa) e no nível 2 (Aveiro-Sines).	57
Figura 5.15- Raiz do erro quadrático médio (RMSE) do modelo para os níveis de maré no nível 1 (costa Portuguesa) e no nível 2 (Aveiro-Sines).	58
Figura 5.16- Níveis previstos pelo modelo e sua comparação com as medidas, quando se considera o forçamento isolado da maré.	59
Figura 5.17- Níveis previstos pelo modelo e sua comparação com as medidas, quando se considera o forçamento isolado da maré (a) e o forçamento combinado de ondas e maré (b), para um período onde ocorrem ondas de alta energia.	60
Figura 5.18- Níveis previstos pelo modelo e sua comparação com as medidas, quando se considera o forçamento isolado da maré (a) e o forçamento combinado de ondas e maré (b), para um período onde ocorrem ondas de baixa energia.	61
Figura 5.19- Nível medido no oceano, estação do braço da Barrosa e estação do Cais da Foz do Arelho durante um período de ondas de alta energia (a) e ondas de baixa energia (b).	63
Figura 5.20- Lagoa esquemática.	64
Figura 5.21- Nível previsto com o modelo simplificado para a lagoa e oceano com e sem o efeito das ondas (a). Nível previsto com o modelo simplificado com o efeito das ondas para o oceano, lagoa com o canal real, lagoa com um canal do dobro do real e caso do estuário do Tejo (b).	65
Figura 5.22- Comparação dos valores de corrente previstos pelo modelo com as medidas na estação da Barra (a), Cais da Foz do Arelho (b) e Topo do Canal (c).	66
Figura 5.23- Diagramas de dispersão a diferentes profundidades das medidas de velocidades das correntes com o ADCP e o modelo ao longo do período de 14 a 30 de Novembro de 2000.	68
Figura 5.24- Velocidade Este (a) e Norte (b) da corrente à superfície medidas pelo ADCP e simuladas pelo modelo MOHID, entre 15 a 17 de Novembro de 2000. A velocidade do vento é representada na mesma figura.	69
Figura 5.25- Velocidade Este (a) e Norte (b) da corrente a 10 m medidas pelo ADCP e simuladas pelo modelo MOHID, entre 15 a 17 de Novembro de 2000. A velocidade do vento é representada na mesma figura.	69
Figura 5.26- Velocidade Este (a) e Norte (b) da corrente a 20 m medidas pelo ADCP e simuladas pelo modelo MOHID, entre 15 a 17 de Novembro de 2000. A velocidade do vento é representada na mesma figura.	69
Figura 6.1- Diluição da concentração de coliformes fecais no campo próximo, em função da distância a partir do ponto de lançamento para os cenários C1 e C2.	74
Figura 6.2- Diluição da concentração de coliformes fecais no campo próximo, em função da distância a partir do ponto de lançamento para os cenários C3 e C4.	74
Figura 6.3- Trajectória vertical da pluma em função da distância a partir do ponto de lançamento para os cenários C1 e C3.	74
Figura 6.4- Concentrações de <i>Bactérias Coliformes Termotolerantes</i> ou coliformes fecais a três profundidades (s, m e f) na zona de descarga do emissário submarino da Foz do Arelho (estação #1) nas campanhas de Março a Novembro de 2007.	75
Figura 6.5- Perfis verticais de temperatura na zona de descarga do emissário submarino da Foz do Arelho (estação #1) nas campanhas de Março a Novembro de 2007.	75
Figura 6.6- Dispersão da pluma de coliformes fecais à superfície com vento de Norte/Nordeste intensidade média de cerca de 7 m/s.	77

Figura 6.7- Dispersão da pluma de coliformes fecais à superfície com vento de Sul/Sudoeste e intensidade média de cerca de 7 m/s.	78
Figura 6.8- Dispersão da pluma de coliformes fecais à superfície com vento de Oeste e intensidade constante de cerca de 7m/s.	78
Figura 6.9- Dispersão da pluma à superfície numa situação no instante da recolha das amostras de Bac. Coliformes Termotolerantes durante a campanha de Outubro de 2005.	80
Figura 6.10- Dispersão da pluma à superfície numa situação no instante da recolha das amostras de Bac. Coliformes Termotolerantes durante a campanha de Março de 2007.....	81
Figura 6.11- Dispersão da pluma à superfície no instante da recolha das amostras de Bac. Coliformes Termotolerantes durante a campanha de Janeiro de 2008.	81
Figura 6.12- <i>Bactérias Coliformes</i> e <i>Bactérias Coliformes Termotolerantes</i> durante a época balnear de 2007, em Foz do Arelho-Mar.	83
Figura 6.13- <i>Bactérias Coliformes</i> e <i>Bactérias Coliformes Termotolerantes</i> durante a época balnear de 2007, em Foz do Arelho-Lagoa.	84
Figura 6.14- <i>Bactérias Coliformes</i> e <i>Bactérias Coliformes Termotolerantes</i> durante a época balnear de 2007, em Foz do Arelho-Bom Sucesso.....	85
Figura 6.15- Distribuição das frequências cumulativas dos resultados obtidos na em Foz do Arelho-Mar na época balnear de 2007 para o parâmetro <i>Enterococos</i> e <i>Escherichia Coli</i>	86
Figura 6.16- Distribuição das frequências cumulativas dos resultados obtidos na em Foz do Arelho-Lagoa na época balnear de 2007 para o parâmetro <i>Enterococos</i> e <i>Escherichia Coli</i>	87
Figura 6.17- Distribuição das frequências cumulativas dos resultados obtidos na em Foz do Arelho-Bom Sucesso na época balnear de 2007 para o parâmetro <i>Enterococos</i> e <i>Escherichia Coli</i>	87
Figura 6.18- Perfis verticais de saturação de oxigénio dissolvido entre campanhas na zona de descarga do emissário submarino da Foz do Arelho (estação #1).	88
Figura 6.19- Concentrações de Clorofila-a no ponto #1 e #2 (superfície, meio e fundo) entre Outubro de 2004 e Janeiro de 2008, na Foz do Arelho.	90
Figura 6.20- Concentrações de amónia nas estações #1 e #2 em três profundidades (superfície, meio e fundo) nas campanhas de amostragem entre Outubro 2004 e Janeiro de 2008.....	90
Figura 6.21- Concentrações de nitrato na estação #1 e #2 em três profundidades (superfície, meio e fundo) nas campanhas de amostragem entre Outubro 2004 e Janeiro de 2008.....	90
Figura 6.18- Comparação dos valores de <i>Bactérias Coliformes Termotolerantes</i> medidos à superfície desde a entrada em funcionamento do emissário submarino nos pontos #1 a #5 segundo o Decreto-Lei Nº236/98.	91
Figura 6.23- Distribuição das frequências cumulativas dos resultados obtidos ao longo das campanhas para o parâmetro <i>Enterococos</i> e <i>Escherichia Coli</i>	92
Figura 7.1- <i>Home page</i> da página da Internet do projecto.	94
Figura 7.2- Controlo de navegação.	95
Figura 7.3- Output de uma pesquisa exemplo para a amónia.	96

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1- Principais características do difusor (HP, 1998).....	4
Tabela 3.1-Parâmetros a ter em consideração para a classificação de jactos e plumas (adaptado de Monteiro, 1995).	18
Tabela 4.1-Módulos principais do modelo MOHID.....	24
Tabela 4.2-Propriedades de cada jacto à saída dos orifícios do difusor.	36
Tabela 5.1- configuração do modelo desenvolvido para estudar a pluma do emissário submarino.....	44
Tabela 5.2-Valores de caudais médios anuais estimados com base na precipitação para os anos de 2001, 2002 e 2003.	52
Tabela 5.3-Valores característicos de caudal anual (m ³ /s) referidos na literatura (Adaptado de VÃO, 1991).	52
Tabela 5.4- Médias e desvio padrão dos resultados do modelo das observações, coeficiente de correlação, RMSE, bias e skill para o modelo de nível 1.....	56
Tabela 5.5- Médias e desvio padrão dos resultados do modelo e das observações, coeficiente de correlação, RMSE, bias e skill no modelo de nível 2.	58
Tabela 5.6- Médias e desvio padrão dos resultados e das observações, coeficiente de correlação, RMSE, bias e Skill para um situação de ondas de alta energia no modelo de nível 4.....	62
Tabela 5.7- Médias e desvio padrão dos resultados e das observações, coeficiente de correlação, RMSE, bias e Skill para um situação de ondas de baixa energia no modelo de nível 4.....	62
Tabela 5.8- Valor médio e desvio padrão do modelo e das medida, coeficiente de correlação, RSME, bias e skill para as estações da Barra, Cais da Foz do Arelho e Topo do Canal a montante.....	67
Tabela 5.9- Valor médio e desvio padrão do modelo e medidas, coeficiente de correlação, RSME, bias e skill para a componente meridional ou Norte-Sul.	70
Tabela 5.10- Valor médio e desvio padrão do modelo e medidas, coeficiente de correlação, RSME, bias e skill para a componente zonal ou Este-Oeste.	70
Tabela 6.1- Resumo das principais variáveis seleccionadas para os cenários simulados com o CORMIX.	72
Tabela 6.2- Valores medidos na câmara de degaseificação e câmara de carga do emissário submarino da Foz do Arelho.	79
Tabela 6.3- Valores máximos recomendáveis (VMR) e admissíveis (VMA) para os parâmetros microbiológicos em águas balneares aferidos segundo o Anexo XV do DL N°236/98 de 1 de Agosto.	82
Tabela 6.4- Classificação da qualidade da água para uso balnear (Excelente/Boa/Suficiente) de acordo com a Directiva 2006/7/CE.....	86

LISTA DE NOTAÇÕES E SIGLAS

AdO – águas do oeste

ADCP - *acoustic doppler current profiler*

D – dimensão do modelo (2D, 3D, 4D)

DH – dimensão do modelo hidrodinâmico (2DH, 3DH)

CORJET – *cornell buoyant jet integral model*

CORMIX – *cornell mixing zone*

DL – decreto lei

DQA - directiva quadro da água

EUROSTRATAFORM - *european margin strata formation*

EPA – *environmental protection agency*

ETAR - estações de tratamento de águas residuais

FORTTRAN – *mathematical formula translating system*

GEBCO - *general bathymetric chart of the oceans*.

GOTM – general ocean turbulence model

HDF - *hierarchical data format*

IH - instituto hidrográfico

INAG – instituto nacional da água

IST - instituto superior técnico

IPIMAR - instituto das pescas e investigação do mar

JETLAG – *lagrangian jet model*

NCSA - *national center of supercomputing applications*

MM5 – *mesoscale model*

MOHID – modelo hidrodinâmico

MOHIDJET – modelo de jactos integrais

PLUMES – *visual plumes model*

PostgreSQL - *structured query language*

R – coeficiente de correlação

REQM - raiz do erro quadrático médio

RMSE – *root mean square error*

SIG - sistema de informação geográfica

SIMRIA – sistema municipal da Ria de Aveiro

STWAVE - *steady state wave model*

VISJET - *visualizing ocean sewage discharge near-field jet integral model*

VMR - valores máximos recomendáveis

VMA - valores máximos admissíveis

WEB - *world wide web*

WEBGIS - *geographic information systems resource*

LISTA DE SÍMBOLOS

- A – superfície (m^2)
- A_L - área da lagoa (m^2)
- A_c - área do canal (m^2)
- A_m – amplitude da maré (m)
- b_c - largura do canal (m)
- C – Concentração (mg/l)
- C_a – Celeridade da onda num referencial relativo absoluto (m/s)
- C_d - coeficiente de atrito
- C_g – Celeridade de grupo média (m/s)
- C_{gr} – Celeridade de grupo (m/s)
- C_{ga} – Celeridade de grupo num referencial absoluto (m/s)
- C_o – Concentração inicial (mg/l)
- C_r – Celeridade da onda num referencial relativo à corrente (m/s)
- d – profundidade da água (m)
- D_D - diâmetro de cada orifício (m)
- D_o – Diluição inicial
- D50 – sedimentos com um diâmetro de 50 mm
- E – espectro de densidade de energia
- f - valor instantâneo de uma propriedade
- \overline{f} - valor médio de uma propriedade
- f' - flutuações turbulentas
- \vec{F} - Fluxo de uma propriedade
- F_{in} - fluxo da energia
- g – aceleração da gravidade (m/s^2)
- h_c - profundidade do canal (m)
- H – Profundidade do difusor (m)
- H_{ij} - profundidade total ou altura da coluna de água (m)
- h_{ij} - profundidade ou cota a que se encontra o fundo (m)
- HMIN - altura mínima de coluna de água (m)
- H_{mo} - energia baseada no momento zero da altura da onda (KW/m)
- H_0 - elevação do difusor (acima do fundo) em relação ao centro dos orifícios (m)
- k - número de onda

K_B - taxa de inactivação
 k_p - número de onda associado ao o pico do espectro
 L_c - comprimento do canal (m)
 L_D - comprimento do difusor (m)
 n - coeficiente de manning
 \vec{n} - vector normal à superfície de fronteira do volume de controle
 n - número de orifícios
 p - pressão (N/m^2)
 p_{atm} - pressão atmosférica (N/m^2)
 P - Propriedade
 Q_c - caudal de entrada no canal da lagoa (m^3/s)
 Q_0 - Caudal emitido através do orifício (m^3/s)
 R - coordenada na direcção do raio da onda
 R_s - tensão de radiação das ondas (m^2/s^2)
 S - salinidade (ppm)
 S_D - espaçamento entre orifícios (m)
 T - Temperatura ($^{\circ}C$)
 T_{90} - tempo necessário para a concentração de bactérias ser reduzida em 90%
 t - tempo (s)
 U - velocidade da corrente (m/s)
 u_0 - velocidade da corrente (m/s)
 u - velocidade em x (m/s)
 u_* - velocidade de corte (m/s)
 v - velocidade em y (m/s)
 \vec{v} - vector da velocidade 3D do escoamento (m^2/s)
 V - volume de controle
 V_v - velocidade do vento (m/s)
 V_{max} - velocidade máxima (m/s)
 w - velocidade em z (m/s^2)
 \bar{x} - valor médio
 z - profundidade (m)
 α = direcção da ortogonal da onda
 β_0 - ângulo entre o eixo do orifício e o plano vertical ($^{\circ}$)
 γ - ângulo do difusor em relação às correntes do meio ($^{\circ}$)

Γ_E -fluxo da energia

δ - direcção da corrente ($^\circ$)

Δh_0 - Espessura inicial do traçador (m)

Δt - passo temporal

Δx - passo da malha

η - cota da superfície livre (m)

η_{ij} - nível ou cota a que se encontra a superfície livre (m)

η_L - nível na lagoa (m)

η_o - nível no oceano (m)

θ_0 - direcção média de propagação ($^\circ$)

θ_m - ângulo entre o eixo do orifício e o plano horizontal ($^\circ$)

λ - coeficiente de partição

μ - direcção do raio da onda ($^\circ$)

$\nu_H = \nu_x$ - viscosidade turbulenta horizontal (m^2/s)

$\nu_T = \nu_y$ - viscosidade turbulenta (m^2/s)

$\nu_V = \nu_z$ - viscosidade turbulenta vertical (m^2/s)

ρ - massa volúmica (kg/m^3)

ρ_a - massa volúmica do ar (kg/m^3)

ρ_e - massa volúmica do efluente à saída do orifício (kg/m^3)

ρ_0 - massa volúmica de referência (kg/m^3)

ρ_w - massa volúmica da água (kg/m^3)

σ - desvio padrão

Ω - aceleração angular (m/s^2)

ω - frequência angular (rad/s)

ω_a - frequência angular num referencial absoluto (rad/s)

ω_r - frequência angular num referencial relativo à corrente (rad/s)

1. INTRODUÇÃO

A presente dissertação enquadra-se na área de modelação ambiental de sistemas costeiros e pretende simular a dispersão da pluma do emissário submarino da Foz do Arelho. Mais concretamente, pretende-se estudar o impacte microbiológico na zona de descarga e na praia da Foz do Arelho. Nos próximos capítulos é feito um enquadramento do estudo abordando os problemas de qualidade da água em questão. São ainda apresentados, os objectivos propostos e a organização do documento.

1.1. Problemas a resolver

A Directiva Quadro da Água (DQA) veio integrar as directivas relacionadas com os recursos hídricos (i.e. Directiva Nitratos (91/676/CEE), Águas Residuais (91/271/CEE), Águas Balneares (76/160/CEE), etc.), e estabelecer os compromissos que os estados membros devem respeitar nos programas de monitorização.

Pela DQA, as acções de monitorização (obrigatórias) devem numa primeira fase avaliar o estado dos meios hídricos e identificar os casos em risco de não cumprirem os objectivos ambientais definidos pelas directivas (monitorização de vigilância). Em seguida, devem ser elaborados planos de acção que deverão incluir campanhas de monitorização para acompanhar a evolução da situação e eficácia desses planos (monitorização operacional). A monitorização é interpretada num sentido amplo que inclui o recurso a modelos como ferramenta integradora dos dados recolhidos.

O desenho dos planos de acção e campanhas de monitorização requerem o conhecimento dos processos que regem a qualidade de água num sistema. Do mesmo modo, a modelação ambiental, baseia-se na descrição de processos e a qualidade dos seus resultados depende desse conhecimento.

Em grande parte dos sistemas costeiros, o excesso de nutrientes (azoto e fósforo), normalmente causado pela descarga de efluentes urbanos ou industriais, leva à proliferação excessiva de algas, que, ao entrarem em decomposição, levam ao aumento do número de microorganismos e à consequente deterioração da qualidade da água.

Os principais problemas de qualidade da água na Lagoa de Óbidos resultam do processo de eutrofização nos braços da lagoa e consequente produção de grandes quantidades de macroalgas (algas de grandes dimensões), acumulação de matéria orgânica no fundo e elevado consumo de oxigénio (Carvalho *et al.*, 2005). Scott Nixon (1995) considera basicamente a eutrofização como sendo o aumento dos fluxos de matéria orgânica no meio aquático, associando directamente a eutrofização ao consumo de oxigénio.

A eutrofização pode ser natural, já que todas as lagoas tendem para esse estado, ou cultural, quando as manifestações não se processam à escala do tempo geológico, mas a um ritmo galopante, provocado pela intervenção do homem (Goldman and Horne, 1983; Carpenter *et al.*, 2000, in Havens *et al.*, 2001), acelerando no tempo todo o processo. No caso da Lagoa de Óbidos, os principais afluentes (Rio Arnóia e Real e Rio da Cal) são apontados como uma das principais causas do processo de eutrofização da lagoa, por transportarem excessivas cargas de nutrientes e matérias sedimentáveis, levando mesmo à sua classificação como sensível em relação aos critérios de eutrofização segundo o Decreto-Lei (DL) Nº149/2004 de 22 de Junho 1. Esta classificação teve como base a Directiva Relativa ao Tratamento das Águas Residuais Urbanas, 91/271/CEE, de 21 de Maio de 1991.

Uma das soluções encontradas para reduzir a carga poluente descarregada no ecossistema lagunar, consiste no pré-tratamento dos esgostos domésticos/industriais (para remoção de sólidos grosseiros e parte do material em suspensão) e a sua disposição no mar através do emissário submarino da Foz do Arelho. O emissário submarino da Foz do Arelho revela-se como uma peça fundamental, para obter uma redução da carga no sistema lagunar, podendo ser visto como uma medida de solução a adoptar em áreas densamente ocupadas onde existem diversas unidades industriais.

As razões de preferência desta solução, incluem o somatório das vantagens de ordem económica, técnica (funcionamento e exploração) e de impacte ambiental. O peso deste último argumento incide

essencialmente na constatação da não alteração de forma significativa da qualidade da água do mar na área de influência do exutor submarino.

1.2. Emissário submarino da Foz do Arelho

A designação "Emissário Submarino" refere-se à descarga no mar de águas residuais que já sofreram um determinado grau de tratamento numa ETAR. O emissário submarino da Foz do Arelho, recolhe o efluente das Estações de Tratamento de Águas Residuais (ETAR) de Óbidos, Carregal, Charneca, Caldas da Rainha e Foz do Arelho, tendo como destino final o mar, a cerca de 2 km da praia da Foz do Arelho (Figura 1.1). O início da descarga deu-se em Agosto de 2005 (Santos *et al.*, 2005; Alves *et al.*, 2006).

Este tipo de sistema é constituído por uma longa tubagem (cerca de 2050 m), assente no fundo marinho e que no seu troço final atinge grandes profundidades (cerca de 30 m), onde ocorre o lançamento de esgoto através de vários orifícios (difusor) permitindo, assim, uma diluição eficaz do efluente lançado. O difusor possui, um conjunto de 10 orifícios, espaçados entre si a uma determinada distância, através dos quais é libertado o efluente, cujo caudal é de cerca de 0.3 m³/s e a concentração coliformes fecais de 2x10⁶ coli_fecais/100 ml. Os orifícios são do tipo *riser* (tubulações verticais fixadas no tubo) e válvulas *duckbill* ou "bico de pato". Este tipo de válvulas previne a intrusão da cunha salina (água do mar, que possui maior densidade que o efluente) e sedimentos; e melhora a eficiência da diluição do efluente. O sistema do difusor tem uma configuração do tipo multiorifícios unidireccional (ver Figura 1.1), a qual consiste no conjunto dos orifícios alinhados horizontalmente em relação ao leito do fundo e mais ou menos perpendiculares ao alinhamento da estrutura física do sistema difusor. Na Tabela 1.1 apresentam-se as principais características do emissário da Foz do Arelho, determinantes para simular este tipo de sistema.

As descargas emitidas no mar através do emissário submarino da Foz do Arelho devem satisfazer, o tratamento previsto na lei (ou seja o primário) e as condições do DL N^o149/2004 (o qual altera o DL N^o152/97 de 19 de Junho). Este decreto identificou que as zonas consideradas como menos sensíveis¹, devem respeitar os seguintes valores limite à superfície: no Verão o oxigénio dissolvido deve ser superior a 90% do valor de saturação e as concentrações de Clorofila-*a* inferiores a 10 µg/l, e no Inverno os nitratos devem ser inferiores a 15 µmole/l (0.21 mgN/l) e a transparência superior a 2 m. Pelo facto de o emissário se localizar no extremo norte da praia da Foz do Arelho, deverá ainda de ser respeitada a qualidade das águas balneares (Anexo XV do DL N^o236/98 de 1 de Agosto).

¹ São identificadas como zonas menos sensíveis, as águas costeiras com uma boa renovação das águas e que não estão sujeitas, nem a eutrofização, nem a empobrecimento de oxigénio, ou cuja eutrofização ou empobrecimento de oxigénio na sequência das descargas das águas residuais urbanas se considera improvável.



Figura 1.1- Localização do emissário submarino da Foz do Arelho. A configuração do difusor pode ser vista no canto superior esquerdo.

Tabela 1.1- Principais características do difusor (HP, 1998).

Características do difusor	
H	30 m
L_D	91.5 m
n	10
S_D	10 m
D_D	110 mm
H_0	1.98 m
θ_0	0°
β_0	90°
γ	0°

1.3. Contexto da tese

Na perspectiva da protecção da saúde pública, da gestão integrada dos recursos hídricos e da preservação do ambiente, torna-se necessária uma análise periódica das condições do meio aquático. Especificamente no que diz respeito à descarga das águas residuais no mar, é essencial uma monitorização do funcionamento dos sistemas de descarga.

Com o intuito de monitorizar e avaliar o estado de referência na Lagoa de Óbidos e zona costeira adjacente antes e depois da entrada em funcionamento do emissário submarino da Foz do Arelho, surge em Julho de 2004, o “Programa de Monitorização da Lagoa de Óbidos e emissário submarino da Foz do Arelho”, com a parceria do Instituto Superior Técnico (IST) e Instituto das Pescas e Investigação do Mar (IPIMAR), e cujo financiamento é feito pelas AdO (Águas do Oeste).

O programa de monitorização consiste em uma componente de trabalho de campo na zona de mar e interior da lagoa e uma componente de modelação. A componente de trabalho de campo visa a avaliação e controlo da qualidade do meio receptor, complementar eventuais lacunas na informação já existente, que conjuntamente com uma componente de modelação permite uma análise pormenorizada dos processos físicos, químicos e biológicos que ocorrem no sistema. Neste sentido, a modelação da Lagoa de Óbidos e zona costeira onde é efectuada a descarga, requerem a simulação matemática de um grande número de processos, englobando e interligando diferentes áreas do conhecimento. O MOHID Water Modelling System surge como uma ferramenta apropriada para a modelação na Lagoa de Óbidos e zona costeira adjacente no sentido em que permite simular os principais processos físicos e também os processos químicos e biológicos que ocorrem no sistema lagunar e meio marinho.

Esta dissertação surge assim, como a sequência lógica do trabalho desenvolvido ao longo do “Programa de Monitorização da Lagoa de Óbidos e emissário submarino da Foz do Arelho”.

1.4. Objectivos

O presente trabalho tem como principal objectivo modelar as descargas de poluentes na zona costeira da Foz do Arelho através de difusores submersos. O modelo desenvolvido permite avaliar o impacte em termos de contaminação bacteriológica (coliformes fecais ou bactérias coliformes termotolerantes) na qualidade da água da zona de descarga e na praia da Foz do Arelho. Outro objectivo passa pelo armazenamento, processamento e divulgação dos dados adquiridos ao longo do programa de monitorização. Por último, pretende-se ainda a validação e comparação dos resultados da modelação com os dados de campo disponíveis. A execução de todos estes objectivos em conjunto resulta no

desenvolvimento de uma ferramenta integrada de modelação para a Lagoa de Óbidos e zona costeira adjacente.

1.5. Estrutura do documento

No presente texto, procura-se apresentar uma visão integral, muito sintética, centrada na descrição de cada uma das principais componentes deste trabalho. A tese está organizada em oito capítulos e anexos, sendo o primeiro capítulo a introdução.

Capítulo 1: Introdução

No capítulo da introdução abordam-se questões pertinentes para um trabalho deste tipo, onde se pretende traçar um diagnóstico da situação actual em relação à zona de estudo. A introdução fornece ao leitor o enquadramento para a leitura do documento, onde se pretende esclarecer a natureza do problema e a possível solução encontrada para este.

Capítulo 2: Descrição da Área de Estudo – Lagoa de Óbidos e Zona Costeira

Este capítulo descreve de uma forma geral, algumas características da Lagoa de Óbidos e zona costeira onde é efectuada a descarga do emissário submarino. São apresentadas as características hidromorfológicas da Lagoa de Óbidos, sendo abordadas os principais aspectos relativos às questões ecológicas. Na zona costeira, é feita uma descrição das características peculiares do troço da costa onde está implementado o emissário submarino da Foz do Arelho e das correntes que a caracterizam, sendo ainda feita uma descrição dos principais processos físicos que ocorrem na costa Portuguesa.

Capítulo 3: Revisão Bibliográfica

Neste capítulo dá-se uma visão geral do comportamento do efluente após descarregado no meio. Faz-se uma abordagem sobre o problema da diluição no campo próximo e transporte/dispersão no campo afastado. São ainda abordados alguns dos modelos mais utilizados na modelação da dispersão de poluentes através de difusores submersos.

Capítulo 4: O modelo MOHID

Neste capítulo dá-se a indicação dos métodos usados para atacar o problema, que neste caso consiste na utilização de um modelo para compreender quais os parâmetros mais importantes na modelação dos processos envolvidos. É feita uma descrição do modelo utilizado neste estudo (MOHID, *Water Modelling System*), bem como os principais pressupostos assumidos.

Capítulo 5: Sistema de Modelação

Neste capítulo é descrita a forma como foram implementados os modelos hidrodinâmicos encaixados e de dispersão lagrangeano, que contemplam a zona costeira onde é efectuada a descarga do emissário submarino da Foz do Arelho. A metodologia utilizada permite correr vários modelos encaixados em simultâneo, sendo as condições de fronteira fornecidas em cascata. O modelo geral fornece as condições de fronteira para os sub-modelos e estes por sua vez aos níveis seguintes. Esta filosofia permite estudar com detalhe áreas de pequenas dimensões com uma malha muito fina. São descritas as malhas usadas nas simulações bem como as respectivas condições de fronteira e iniciais impostas nos modelos.

Capítulo 6: Aplicação ao emissário da Foz do Arelho

Neste capítulo apresentam-se os resultados alcançados após a aplicação do modelo hidrodinâmico e de dispersão ao emissário da Foz do Arelho, abordando os resultados obtidos no campo próximo e afastado. Neste capítulo, a componente da discussão tem a finalidade de mostrar as relações existentes entre os dados recolhidos na pesquisa e os resultados obtidos pelo modelo. A discussão assenta em algumas questões que poderão permitir concluir acerca do comportamento da pluma na zona costeira mediante diferentes cenários e na avaliação da qualidade da água de acordo com a legislação vigente.

Capítulo 7: Ferramenta WEBGIS para Gestão de Dados

Aqui descreve-se a aplicação desenvolvida em WEBGIS (*Geographic Information Systems Resource*) que permite o armazenamento, organização e pesquisa de dados de campo recolhidos na Lagoa de Óbidos e zona costeira adjacente. A aplicação permite, através de um Sistema de Informação Geográfica (SIG), consultar e visualizar as várias estações de amostragem. Este capítulo descreve, muito sumariamente, a ferramenta construída e fornece algumas indicações para a sua utilização.

Capítulo 8: Comentários Finais

Neste capítulo pretende-se destacar as contribuições do trabalho e mostrar que os objectivos iniciais foram atendidos. A componente da conclusão contém a resposta que se obteve com as aplicações do modelo MOHID, referindo a dispersão da pluma e suas consequências na zona de descarga e praia da Foz do Arelho. Fala-se ainda do trabalho que poderá ser desenvolvido a longo prazo e dos aspectos que ficaram por abordar.

2. DESCRIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A zona de estudo compreende a Lagoa de Óbidos e a zona costeira adjacente à Lagoa de Óbidos. Sendo duas zonas diferenciadas em termos de processos físicos, serão abordados os aspectos mais relevantes que diferenciam a sua caracterização.

A Lagoa de Óbidos (Figura 2.1) é uma laguna costeira² pouco profunda que se integra no cordão litoral que vai da Nazaré a Peniche, com 7 km² de superfície e com 1,8 km de largura e 4.5 km de comprimento máximo. A comunicação com o mar é feita através de um canal com características de uma barra móvel (deslocamentos sazonais e de largura variável), vulgarmente conhecido como "aberta". A circulação da água na lagoa é principalmente causada pela propagação das marés que são do tipo semi-diurno, com amplitude média de 2 m, propagando-se por toda a lagoa com características de uma onda progressiva amortecida. O regime de ondas junto da aberta da Lagoa de Óbidos apresenta ondas superiores a 1 m durante 88% do tempo (Oliveira *et al.*, 2006). As ondas dominantes apresentam maioritariamente direcções perpendiculares à costa, 315º Norte, e períodos que variam entre 5 a 20 s (Oliveira *et al.*, 2006).

O canal de ligação ao oceano apresenta tendências para assoreamento, ocorrendo naturalmente fechos episódicos da embocadura desde há vários séculos (DHI, 1997). Estes fechos são causados pelo facto das correntes de vazante não serem suficientes para compensar a deposição de sedimentos

² As lagunas costeiras são zonas pouco profundas cujas superfícies livres se encontram acima do nível médio das águas do mar, com comunicação efémera ou permanente com o mar através de uma barreira. Uma vez formadas, ficam fortemente confinadas pela variação dos níveis do mar e pela quantidade de sedimentos disponíveis, levando ao assoreamento da lagoa e também à evolução da barreira.

de origem costeira junto da embocadura, promovidos pela agitação marítima e pelas correntes de enchente. Isto acontece porque, a enchente é mais curta do que a vazante, criando-se maiores velocidades durante a enchente. Sendo as correntes de enchente mais intensas que as correntes de vazante, o transporte residual é para montante, fazendo com que o sistema tenda a assorear (Friedrichs *et al.*, 1988). Neste caso, a entrada de material sólido não é compensada com a saída a jusante, e nestas condições diz-se que na Lagoa de Óbidos há dominância de enchente. A progressiva diminuição da área líquida da lagoa tem vindo a reduzir o prisma de maré, promovendo assim a instabilidade da barra (Fortunato *et al.*, 2002, Freire *et al.*, 2004). No Anexo 1 encontra-se uma sequência de levantamentos batimétricos da Lagoa de Óbidos efectuados pelo Instituto Hidrográfico (IH), que mostram a evolução desde 2000 até ao levantamento mais recente, ou seja 2004. Os levantamentos mostram nitidamente os deslocamentos sazonais da barra e a meandrização dos canais, nomeadamente na proximidade da aberta.

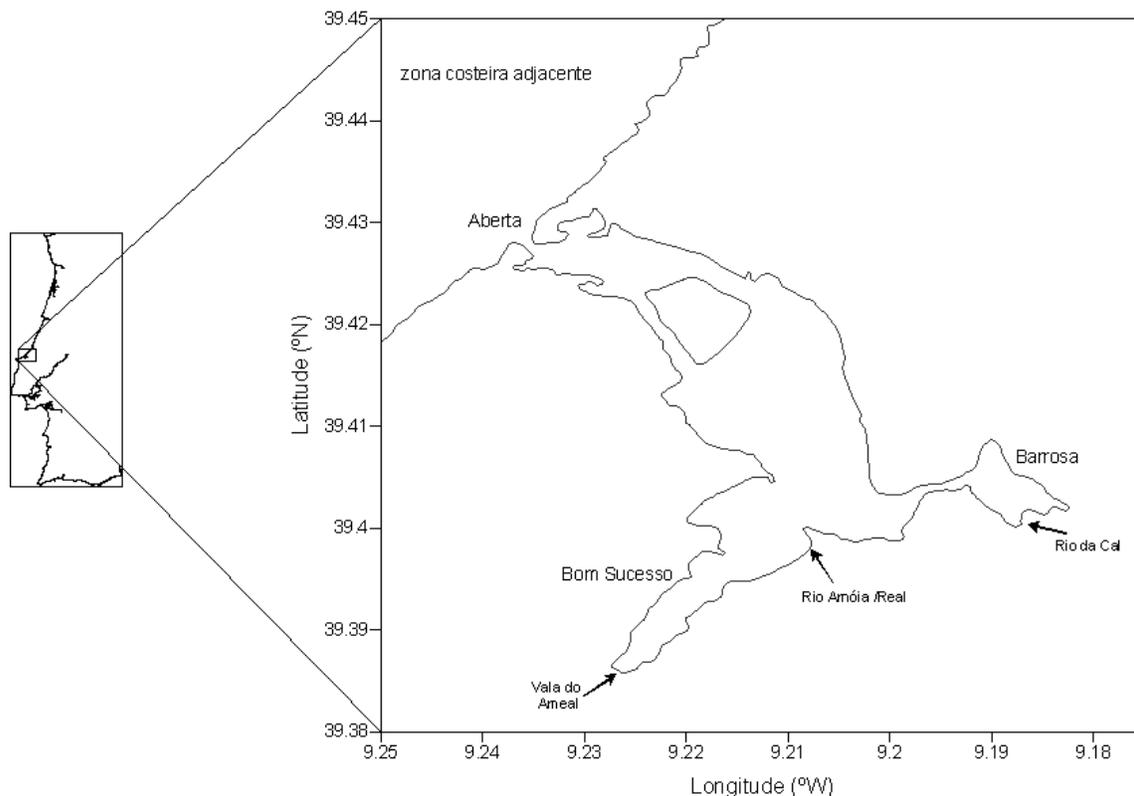


Figura 2.1- Localização geográfica da Lagoa de Óbidos e zona costeira adjacente.

Na zona central da lagoa, entre os canais norte e sul existe um extenso banco de sedimentos arenosos que divide a lagoa em dois grandes corpos, com massas de água com características e dinâmicas muito diferentes. Na zona de montante a lagoa tem dois braços, braço da Barrosa e Bom Sucesso, entre os quais desaguam o Rio Arnóia e Real. O Rio Arnóia e Real representam cerca de 90% das afluições de água doce e são a principal fonte de sedimentos cuja deposição originou um extenso sapal. O Rio da Cal desagua no braço da Barrosa e a Vala do Ameal, no braço do Bom

Sucesso. A salinidade da lagoa é elevada (normalmente acima de 28 ‰), como consequência do baixo contributo dos rios para o prisma de maré, sendo um bom exemplo de uma lagoa hipersalina (Mudge *et al.*, 2007).

Na metade mais próxima do mar (metade de jusante), os sedimentos são essencialmente areias de origem marinha, evoluindo para vasa arenosa e finalmente para lodo à medida que progredimos para perto das cabeceiras da lagoa, como consequência da localização das fontes de materiais finos e da hidrodinâmica (Carvalho *et al.*, 2006). Na zona de montante as velocidades são muito menores, em particular nos braços da lagoa, Barrosa e Bom Sucesso. O menor hidrodinamismo desta região aumenta o tempo de residência da água, criando-se condições preferenciais para deposição da matéria particulada fina, rica em matéria orgânica, a qual tem papel determinante na produção primária da lagoa.

As correntes que se fazem sentir em frente da Lagoa de Óbidos são dos seguintes tipos: (i) correntes oceânicas, (ii) correntes de maré e (iii) correntes devidas ao vento. As correntes oceânicas na costa Portuguesa têm direcção predominante Norte-Sul com um valor médio de persistência de 50% e uma velocidade média de 20 a 25 cm/s (Coelho, 2001). Já as correntes de maré em costa aberta e fora da embocadura da lagoa, como é o caso da localização do emissário, são pouco significativas. As correntes devidas ao vento são importantes, porque o vento desempenha um papel determinante no forçamento do escoamento na zona de estudo, originando variabilidade no campo de correntes. Os ventos locais são predominantemente do quadrante Norte e apresentam uma intensidade média de cerca de 6 m/s. O campo de correntes induzido pelo vento, é predominantemente paralelo à costa com valores típicos na ordem dos 20 cm/s e direcção predominante de Norte/Nordeste e Sul/Sudeste. A correlação entre os ventos e correntes mostra que o vento é responsável por cerca de 70% do valor da corrente, sendo o resto devido entre outros efeitos, à maré (Anexo 2).

O padrão de circulação na zona de estudo é principalmente marcado pelo afloramento costeiro ou *upwelling*, que ocorre maioritariamente durante os meses de verão, tipicamente entre Abril e Outubro em resposta aos ventos persistentes de Norte (Wooster *et al.*, 1970; Fiúza *et al.*, 1996). Este processo está associado à divergência que ocorre junto à costa provocada pelos ventos de quadrante Norte que predominam nessa altura do ano. As águas superficiais (mais quentes) são afastadas para o largo (i.e. para a direita do vento) e as águas do fundo, mais frias e ricas em nutrientes, ascendem à superfície. Esta manifestação à superfície do fenómeno do afloramento costeiro, pode ser facilmente detectada a partir de imagens de detecção remota da temperatura da superfície da água na zona de estudo,

obtidas através do satélite MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*: <http://modis.gsfc.nasa.gov/>)³(Figura 2.2).

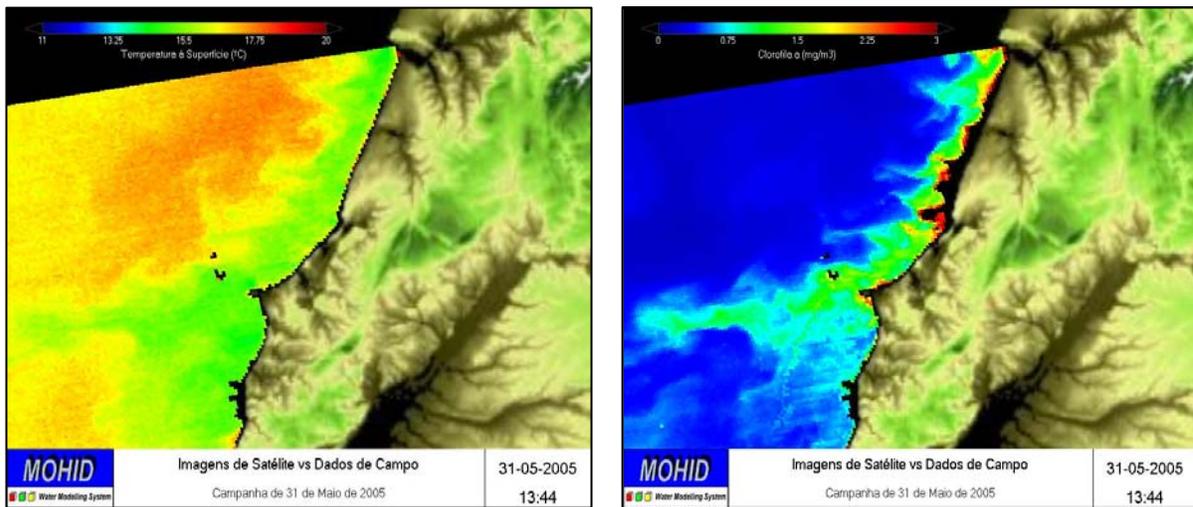


Figura 2.2- Imagens de detecção remota obtidas pelo satélite MODIS no domínio de estudo: (esquerda) temperatura da superfície do mar e (direita) Clorofila-*a* em Maio de 2005. As temperaturas mais baixas próximo da costa e a grande concentração em pigmentos da Clorofila-*a* são evidências do fenómeno de *upwelling* na região.

A temperatura na zona de estudo tem duas fontes de variabilidade, nomeadamente: as trocas de calor com a atmosfera e os processos de advecção vertical associados ao vento (aflorentamento costeiro). As trocas de calor com a atmosfera induzem uma variabilidade diária que afecta apenas a água superficial e uma variabilidade sazonal que condiciona toda a coluna de água. Os processos acima referidos, ocasionam a formação de termoclinas nas camadas mais superficiais, que contrastam com as condições hidrográficas quase homogéneas observadas no Inverno. Dados de base existentes sobre a temperatura da água do mar na zona de estudo em diferentes alturas do ano (Figura 2.3), põem em evidência massas de água com características diferentes, sendo a superficial resultante do aquecimento pelo sol. Durante o Inverno a circulação mostrou ser essencialmente barotrópica, já no Verão existe a tendência para ocorrerem movimentos de natureza baroclínica (i.e. a temperatura varia em função das camadas de densidade).

A salinidade não apresenta características distintas nas massas águas superficiais, uma vez que não existem descargas de rios importantes. A descarga mais importante a Norte da zona de estudo é o Rio Mondego, não chegando a induzir variações na salinidade. A pluma de salinidade da Lagoa de Óbidos não produz alterações nas massas de água da zona costeira adjacente, porque tal como referido anteriormente, a lagoa é um bom exemplo de uma lagoa hipersalina. Através dos dados de campo

³ Os sensores da NASA têm uma resolução espacial de 1.1 km têm acesso livre e gratuito.

disponíveis constatou-se que a salinidade não sofria influência com a profundidade, apresentado valores na ordem dos 36 ‰. Após a entrada em funcionamento do emissário submarino da Foz do Arelho, é detectada esporadicamente a influência da descarga, sendo visível em algumas campanhas (Figura 2.4) uma “anomalia” na salinidade, associada à descarga do emissário (fonte de água doce). Resultados obtidos perto da descarga do emissário e num ponto de referência (1 km a Norte da descarga), confirmam que a variação em profundidade da salinidade é devida à descarga do emissário. A descarga do emissário pode provocar uma diminuição de cerca de 1 ‰ na salinidade.

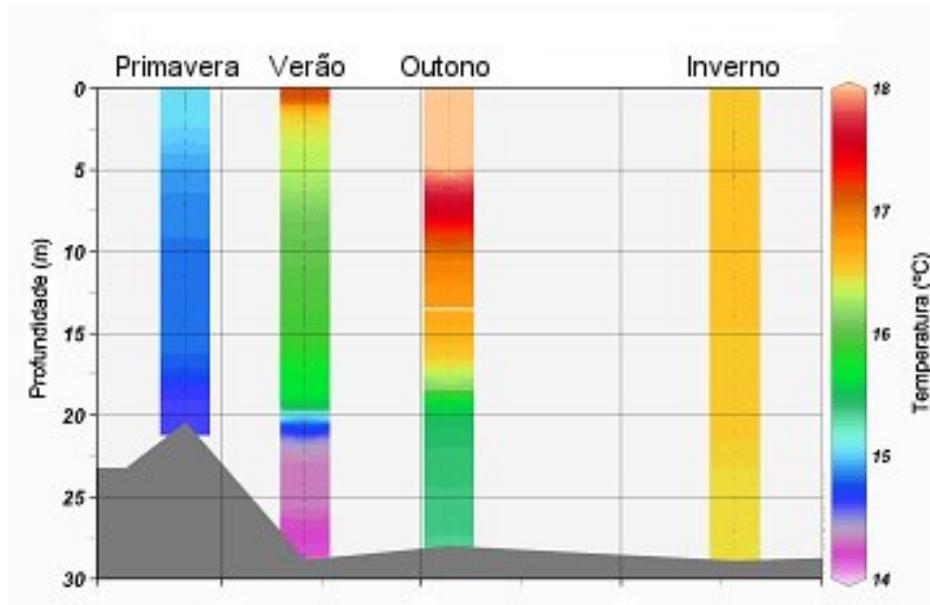


Figura 2.3- Perfis verticais de temperatura na zona de estudo em diferentes alturas do ano.

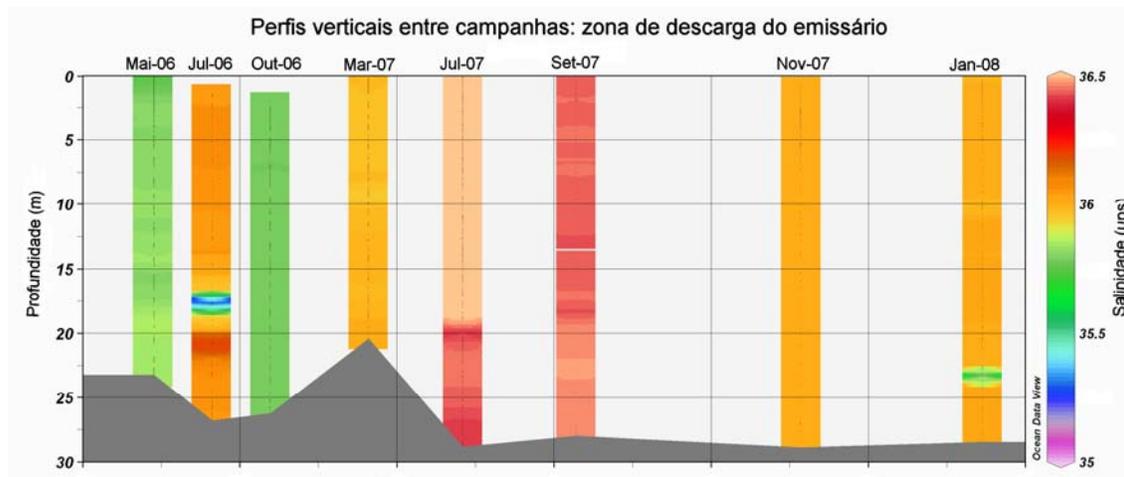


Figura 2.4- Perfis verticais de salinidade entre campanhas na zona de descarga do emissário submarino da Foz do Arelho (estação #1).

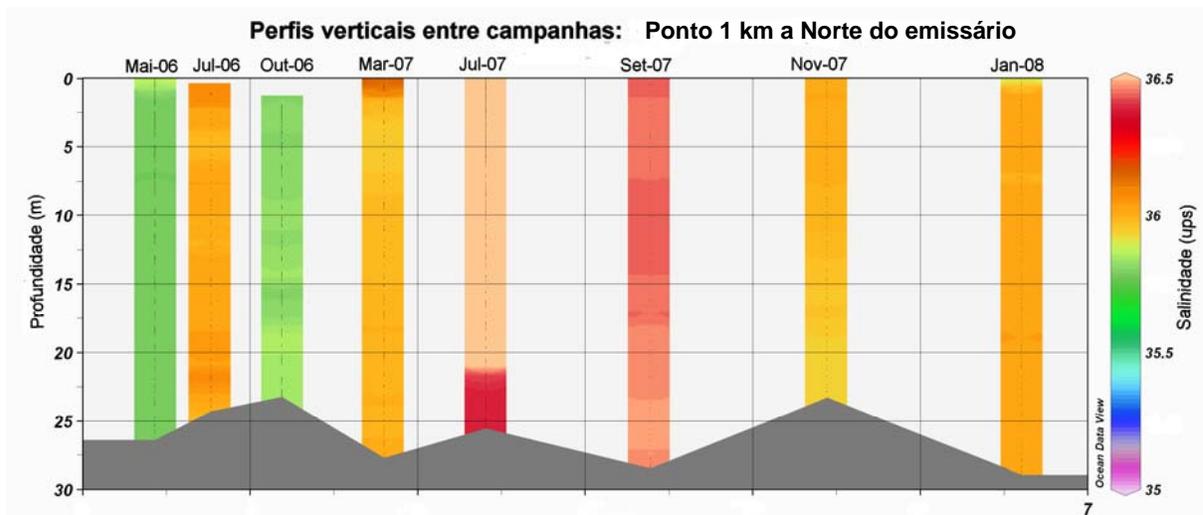


Figura 2.5- Perfis verticais de salinidade entre campanhas num ponto de referencia localizado 1 km a Norte da descarga (estação #2).

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A maneira mais comum de descarregar efluentes de águas residuais domésticas e/ou industriais no mar é através de emissários submarinos. Este tipo de sistemas possui uma elevada capacidade de diluição e conta com processos de inactivação de microorganismos, como a radiação solar, salinidade e tempo de residência, entre outros.

A utilização de sistemas difusores multiorifícios, é fundamental para garantir a qualidade da água após o processo de diluição inicial do efluente na zona de mistura (Rawn *et al.*, 1960). O comportamento inicial da pluma vai depender exclusivamente de alguns processos físicos que ocorrem perto da descarga, bem como da orientação e geometria dos orifícios do difusor. Mais tarde, as condições envolventes do meio actuam sobre o fluido libertado na superfície determinando o comportamento da pluma.

Neste capítulo são descritas as diferentes fases a que a descarga do efluente fica sujeita no meio ambiente, bem como os principais processos físicos e as forças responsáveis que determinam o escoamento do fluido. São ainda abordados os modelos de dispersão mais utilizados no seio da comunidade científica.

3.1. Definições e conceitos básicos de jactos e plumas

Quando é feita a descarga do efluente no meio marinho, torna-se difícil perceber os comportamentos associados ao efeito desta no meio, devido a um grande número de variáveis que afectam o seu comportamento. Face a esta complexidade, a maior parte dos estudos foram feitos tendo em mente

apenas o estudo de determinados processos físicos, recorrendo para isso a ambientes simplificados (i.e. estratificação uniforme ou linear, correntes paralelas ou normais à direcção da descarga).

Basicamente, aquando da descarga do efluente por meio de um emissário submarino, o seu comportamento inicial é influenciado essencialmente pelos fluxos de massa, pela quantidade de movimento e pela força ascensional.

O fluxo de massa consiste na quantidade de massa de fluido que atravessa uma determinada secção do jacto por unidade de tempo. A quantidade de movimento ou também chamado apenas momento, corresponde à quantidade de matéria em movimento. A força ascensional é originada pelas diferenças de densidade existentes entre o meio receptor e o efluente descarregado, forçando por conseguinte o movimento vertical do fluido. A força ascensional, ou também denominada força de impulsão, entende-se como sendo a força cuja intensidade corresponde ao valor do peso submerso do corpo e sentido contrário a este.

Assim, os diversos tipos de escoamento que ocorrem na dispersão do efluente descarregado por um difusor submerso depende dos diferentes processos e forças físicas que se fazem sentir aquando da descarga. Deste modo, define-se como jacto, o escoamento que resulta de uma descarga através de um orifício ou de uma fenda, de um fluido com densidade igual ou próxima da do meio receptor (Fischer *et al.*, 1979). No entanto, a maior parte das descargas em águas costeiras têm sempre associadas quantidades de movimento inicial, existindo também gradientes de densidade entre o fluido descarregado e o meio receptor, pelo que implica que o fluido descarregado fique sujeito a uma força ascensional que é originada pelas diferenças de densidade. Nestas circunstâncias, os escoamentos são denominados de jactos ascensionais ou *buoyant jets*.

Pelo contrário, se o escoamento se comporta como jacto propriamente dito, ou seja, sem diferenças de densidade entre o fluido descarregado e o meio receptor, estamos perante um jacto simples, o qual depende essencialmente da quantidade de movimento inicial da descarga (Fischer *et al.*, 1979). No caso de só actuar a força ascensional no escoamento, considerando-se nestas circunstâncias o fluxo de massa e a quantidade de movimento nulas no início da descarga, e o escoamento originado é denominado de pluma simples (Roberts, 1979). Como não existe quantidade de movimento inicial, todas as variáveis do escoamento são função da força ascensional, da viscosidade do fluido e da distância ao ponto onde é efectuada a descarga.

Pode no entanto dizer-se que, o jacto ascensional é influenciado inicialmente pela quantidade de movimento inicial, tendo por isso nessa fase um comportamento semelhante ao de jacto simples. A partir de uma determinada distância ao orifício de descarga, a quantidade de movimento tem um

decaimento muito mais rápido do que os gradientes de densidade, tornando-se por conseguinte as forças ascensionais dominantes. Nesta fase, a diluição e a trajetória do jacto passam a ser independentes da quantidade de movimento inicial, passando a ter um comportamento análogo ao das plumas ascensionais, desde que exista uma extensão suficientemente grande para que o jacto se desenvolva (Monteiro, 1995). Pelo facto de o jacto ascensional acabar por se converter em pluma, grande parte da análise de descargas através de difusores submersos é efectuada com base nas fórmulas usadas para estudar o comportamento das plumas ascensionais (Fischer *et al.*, 1979).

Uma vez atingida a superfície e após estabilização vertical, o transporte do fluido passa a ser independente das condições iniciais de descarga (i.e. efeitos induzidos pela geometria e configuração dos orifícios do difusor, gradientes de densidade, etc.), passando o comportamento (diluição e trajetória) do fluido a depender dos parâmetros ambientais, nomeadamente do grau de turbulência e das correntes sentidas no local. (Fischer *et al.*, 1979). A mancha ou espaço ocupado pela mistura quando começa a ser transportada por advecção denomina-se de pluma.

3.1.1. Classificação de jactos e plumas

Tal como referido anteriormente, para além do comportamento hidrodinâmico do meio em que é feita a descarga do efluente de um emissário submarino, também a configuração e geometria dos difusores instalados se revela crucial, uma vez que influencia também o comportamento da descarga. Deste modo existe um número de parâmetros a ter em conta para a classificação de jactos e plumas. A primeira classificação foi proposta Gu and Stefan (1988), sendo revista por Chen (1991), optando por considerar três grupos básicos de parâmetros: parâmetros da descarga, do meio receptor e geométricos.

Os parâmetros da descarga abordam as características cinemáticas e dinâmicas iniciais da descarga, tais como os fluxos de massa (caudal), quantidade de movimento e força ascensional. Estes parâmetros determinam o tipo de jacto em causa (i.e. jacto simples ou jacto ascensional), tal como foi devidamente explicado na secção 3.1. Os parâmetros relacionados com o meio receptor, incluem as principais características físicas do meio propriamente dito, podendo passar pela turbulência, mecanismo de correntes e estratificação do meio. Por fim, os parâmetros geométricos referem-se à morfologia (forma e número de orifícios) e instalação do difusor (orientação, submersão e fronteiras na sua proximidade). Na Tabela 3.1 é apresentado um pequeno resumo dos parâmetros considerados e as variáveis consideradas em cada grupo distinto.

A utilização deste tipo de parâmetros orienta a comparação de dados experimentais com as previsões de modelos matemáticos, tendo em conta cada situação particular.

Tabela 3.1-Parâmetros a ter em consideração para a classificação de jactos e plumas (adaptado de Monteiro, 1995).

Parâmetros da Descarga	Caudal			
	Quantidade de Movimento			
	Força Ascensional			
Parâmetros do Meio Receptor	Regime	Turbulento Laminar		
	Correntes	Estagnado		
		Com Correntes	Perpendiculares à Descarga	
			Paralelas à Descarga	No sentido da Descarga No sentido Contrário
	Estratificação	Homogéneo		
		Estratificado	Estratificação Linear Estratificação com Termoclina	
Geometria	Forma do Orifício			
	Orientação	Vertical Horizontal Inclinado		
	Submersão	Submerso Superficial		
	Fronteiras	Jacto Livre Jacto contra a Parede		
	Número de Orifícios	Único		

3.2. Dispersão no campo próximo e campo afastado

Os mecanismos que governam a mistura de uma descarga de um emissário submarino não são os mesmos durante todos os processos de dispersão, variando com a distância à fonte. Com base nisto a maior parte dos investigadores divide estes processos em duas fases principais, geralmente chamadas de **campo próximo** e **campo afastado**, dependendo dos mecanismos físicos que dominam os processos de mistura. Alguns autores preferem incluir ainda uma terceira fase, a qual é chamada de zona de sedimentação, sendo esta definida com a região de transição entre a zona de dispersão do campo próximo e campo afastado. Contudo, Tsanis and Valeo (1994) consideram esta terceira região como sendo a região que abrange a parte final do campo próximo. Também aqui, nesta tese, a discussão estará mais assente nos processos de mistura relativos aos campos próximo e afastado.

Segundo Roberts (1979), no processo de dispersão de um efluente ocorrem duas fases distintas, consoante os processos físicos dominantes na dispersão.

A primeira fase, referente à mistura inicial e ocorre na região chamada de campo próximo ou *near-field*, dependendo basicamente das condições ambientais (nível de turbulência, velocidade da corrente e estratificação térmica) e das características geométricas do difusor (nº de orifícios, diâmetros, alinhamento) (Valeo and Tsanis, 1996). Como valor padrão, para um sistema difusor ser considerado eficiente, este deve alcançar diluições mínimas na ordem dos 100 ($D_0=C_0/C$; sendo D_0 a diluição inicial, C_0 a concentração inicial e C a concentração final), no campo próximo (Fortis, 2005). De acordo com (Valeo and Tsanis, 1996), a região do campo próximo engloba a diluição inicial do jacto, e engloba o escoamento do jacto ascensional até à respectiva interacção com a superfície livre, ou seja até que a pluma esteja formada e estabilizada na vertical. Segundo Jirka and Lee (1994), a escala espacial do campo próximo é na ordem dos 10 m, com uma escala temporal na ordem dos minutos a uma hora.

O conjunto associado dos factores mencionados anteriormente condicionam e modificam o comportamento do fluido no meio ambiente. Deste modo, os jactos lançados através dos orifícios do difusor, podem ser afectados pelas correntes do meio ambiente e pela estratificação térmica. As correntes tendem a deflectir gradualmente o jacto flutuante na direcção do seu escoamento (Figura 3.1) induzindo um aumento da mistura. Por outro lado, um ambiente estratificado, irá diminuir a aceleração vertical do jacto, aprisionando a pluma a um certo nível da coluna de água (Figura 3.2). Estas situações são muito comuns em águas profundas (geralmente mais de 10 m) e estratificadas (com variação da temperatura ao longo da coluna de água).

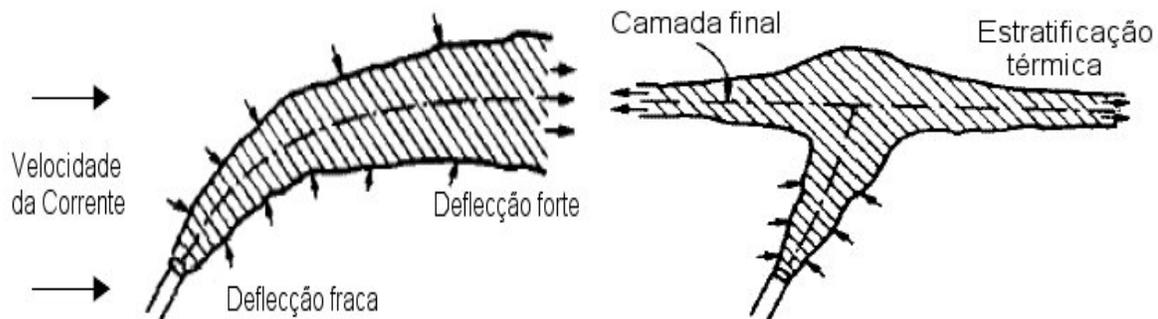


Figura 3.1- Jacto perpendicular às correntes do meio receptor (FONTE: Jirka et al., 1996).

Figura 3.2- Jacto num meio ambiente estratificado sem correntes (FONTE: Jirka et al., 1996).

Conforme a pluma se afasta do ponto de lançamento, as características geométricas do difusor passam a ter menor importância no processo de dispersão, iniciando-se uma segunda fase, na qual a turbulência do ambiente irá controlar a trajetória e a taxa de diluição da pluma. Esta região é chamada de campo afastado ou *far-field*. Esta fase é caracterizada pelo transporte advectivo, devido às correntes existentes no meio ambiente. Após a pluma estar estabilizada (constituída pela mistura obtida por diluição entre o efluente descarregado e o meio receptor) o transporte passa a ser

independente das suas condições iniciais. Assim, a trajetória e a diluição da pluma passam a ser controladas pelas condições existentes do meio envolvente, nomeadamente as correntes e o grau de turbulência. Basicamente, a circulação geral da zona é a força motriz do transporte da pluma, sendo a sua mistura na água unicamente devida aos processos de turbulência. De acordo com Jirka and Lee (1994), a escala espacial do campo afastado é acima dos 10 km, sendo a escala temporal na ordem de algumas horas a uns poucos dias.

As regiões abordadas e descritas anteriormente (campo próximo e campo afastado) estão apresentadas na Figura 3.3, a qual mostra o comportamento de uma pluma proveniente dum exutor submerso.

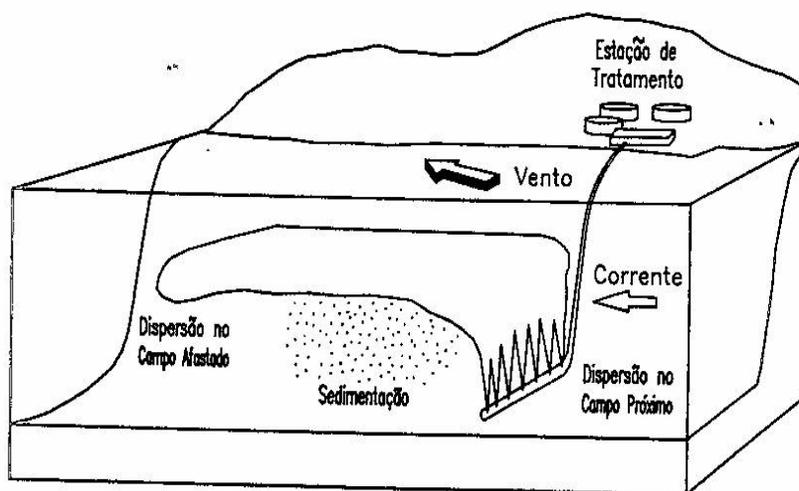


Figura 3.3- Principais regiões de dispersão que ocorrem quando da descarga do efluente de um emissário submarino no meio ambiente (Adaptado de Monteiro, 1995).

3.3. Modelos matemáticos para estudo da dispersão de efluentes

A utilização de modelos numéricos para simular os processos de dispersão da pluma de um emissário submarino, constitui actualmente uma ferramenta essencial para reproduzir as zonas de mistura no meio receptor. Os modelos matemáticos têm ganho relevo nos últimos tempos, embora remontem desde há muito tempo atrás.

A região do campo próximo foi em tempos tratada usando fórmulas empíricas simples para o cálculo da diluição inicial, tal como as encontradas por Cederwall (1968) e Abraham (1963). Estas expressões foram desenvolvidas através de estudos experimentais de descargas pontuais, não sendo necessário usar análise dimensional ou quaisquer conceitos hidráulicos, tendo sido os resultados reanalisados por Rawn *et al.*, 1960, utilizando parâmetros adimensionais.

Actualmente, são usados modelos numéricos que permitem calcular a diluição inicial. Grande parte dos modelos desenvolvidos dispõe de um sistema de classificação dos escoamentos com base em parâmetros adimensionais, calculados em função das características de estratificação e correntes do meio receptor, bem como das características dinâmicas e geométricas da descarga (Jirka and Doneker, 1991). Os modelos normalmente utilizados em engenharia para estudar a zona próxima dos emissários são o CORMIX (*cornell mixing zone*), CORJET (*Cornell Buoyant Jet Integral Model*) PLUMES (*visual plumes model*) e JETLAG (*Lagrangean Jet Model*). O CORMIX (<http://www.cormix.info/>) é o mais conhecido, e é recomendado pela U.S. EPA (<http://www.epa.gov/>). Estes modelos resolvem a pluma do emissário na sua forma integral admitindo propriedades ambientais estacionárias. A pluma do emissário pode ser vista como um jacto ou um conjunto de jactos com impulsão, que são emitidos junto ao fundo. A equação resolvida, é a equação de conservação de quantidade de movimento segundo 3 direcções. Nesta equação admitem o efeito da impulsão na direcção vertical da mistura, por efeito de corte e de arrastamento, nas direcções tangencial e normal ao eixo da pluma. Estes modelos, também resolvem uma equação de conservação de massa que tem apenas em conta a mistura por efeito de corte e de arrastamento da pluma no meio receptor.

O modelo CORMIX, CORJET, PLUMES e JETLAG apenas permitem estudar a região do campo próximo de um emissário, sendo por isso necessário recorrer a modelos que resolvam o campo afastado. A primeira abordagem para a modelação do campo afastado foi efectuada recorrendo a métodos eulerianos, embora estes métodos apresentem uma certa dificuldade em representar o termo advectivo. Face a esta limitação diversos autores têm apresentado implementações de métodos eulerianos-lagrangeanos para resolver a equação de transporte. A vantagem dos modelos lagrangeanos face aos eulerianos é a de que permitem a aplicação a zonas com grandes gradientes. Holly and Polatera (1984), apresentaram esquemas numéricos híbridos que consistiam em utilizar das características em todo o domínio, excepto em zonas de elevados gradientes, em que utilizavam partículas lagrangeanas.

Este tipo de modelos foi inicialmente (anos 60) concebido com a finalidade de realçar as particularidades do escoamento. Nesta abordagem, um traçador representa uma porção de matéria, cuja trajectória é seguida. Nestes modelos as propriedades básicas de um traçador são as suas coordenadas e a sua origem. Com o aumento da capacidade de cálculo dos computadores, desenvolveram-se novas aplicações, especialmente modelos de dispersão com o objectivo de simular a dispersão de poluentes no meio marinho e o seu impacte no ecossistema. Nestes modelos as variáveis associadas a cada traçador incluem as características da matéria transportada (por ex. os coliformes, a temperatura, o fitoplâncton), podendo também incluir outras propriedades tais como:

volume ocupado, velocidade de sedimentação, comprimento de mistura e velocidade aleatória, entre outros.

No princípio dos anos 80, a utilização dos modelos de dispersão de traçadores, como ferramenta de gestão de emissões pontuais no meio marinho, generalizou-se. Destacam-se como principais aplicações, a simulação: de emissões pontuais de água quente provenientes de centrais termo-eléctricas (Bork, 1978), de esgotos domésticos (Chu and Gardner 1986; Monteiro e Neves, 1992), da dispersão de manchas de hidrocarbonetos (Shiau, 1991; Mansur, 1992), do transporte de sedimentos (Chiu and Chen, 1969) e do crescimento do fitoplâncton (Dippner, 1993).

Mais recentemente, é possível acoplar os modelos lagrangianos que resolvem o campo afastado e os modelos que resolvem o campo próximo, a sistemas de modelação 4D, permitindo simular a variação espacial (3D) e temporal (1D) do meio receptor. Esta é a estratégia adoptada pelo VISJET (*visualizing ocean sewage discharge near-field jet integral model* - <http://www.aoe-water.hku.hk/visjet/visjet.htm>) (Cheung et al., 2000) e também pelo modelo aplicado nesta tese, cuja descrição é feita no capítulo que se segue. A abordagem utilizada, é semelhante à do modelo JETLAG para resolver o campo próximo, sendo facilmente integrado em sistemas 4D de modelação do meio aquático. Esta abordagem permite resolver o campo próximo e afastado de emissários submarinos.

4. O MODELO MOHID

Neste capítulo é explicado o modelo utilizado neste caso de estudo, a qual passa por uma breve descrição do sistema e principais módulos utilizados nesta aplicação.

4.1. Descrição geral do sistema

O desenvolvimento do sistema MOHID teve início na década de 80 (Neves, 1985), tendo sido feitos sucessivos aperfeiçoamentos face à aplicação a diferentes projectos científicos e tecnológicos (Portela and Neves, 1994; Cancino e Neves, 1994, 1998; Martins *et al.*, 2001; Santos *et al.*, 2002).

O MOHID, utiliza uma estratégia de programação orientada por objectos que conjuntamente com todas as potencialidades do FORTRAN 95, permite uma organização por módulos que, embora distintos, se interligam de forma a determinar os objectivos pretendidos em cada caso de aplicação. O sistema MOHID é composto actualmente por cerca de 40 módulos que utilizam mais de 150 linhas de código. Os módulos principais são apresentados na Tabela 4.1.

Esta abordagem permite a adopção de uma filosofia de modelação integrada, não só de processos (físicos e biogeoquímicos), mas também de diferentes escalas (possibilitando a utilização de modelos encaixados) e sistemas (estuários + bacias hidrográficas), graças à adopção de uma filosofia de programação orientada por objectos, como a que é descrita em Decyk (Decyk *et al.*, 1997), tornando a sua utilização e expansão, muito robustas (Miranda *et al.*, 2000).

Actualmente, o sistema MOHID encontra-se dividido em três grandes grupos: (i) MOHID Water, (ii) MOHID Land e (iii) MOHID Soil. O MOHID Water permite a simulação dos processos hidrodinâmicos, simulação de fenómenos de dispersão (abordagens lagrangeana e euleriana), propagação de ondas, transporte de sedimentos, qualidade da água / processos biogeoquímicos na coluna de água e trocas com o fundo (Fernandes, 2005). O MOHID Land é um modelo de bacia enquanto que o MOHID Soil simula o fluxo de água através de meios porosos.

Tabela 4.1-Módulos principais do modelo MOHID.

Nome do módulo	Informação gerida
Model	Controla o fluxo da informação entre o módulo hydrodynamic e os dois módulos do transporte bem como a comunicação entre sub-modelos
Hydrodynamic	Módulo hidrodinâmico baroclínico 3D: calcula o nível de água, as velocidades e os fluxos da água
Water Properties (Eulerian Transport)	Módulo de transporte de Euleriano: controla a evolução das propriedades da água (temperatura, salinidade, oxigénio, etc.) usando uma aproximação euleriana
Lagrangian	Módulo de transporte de Lagrangiano: controla a evolução das mesmas propriedades que o módulo das propriedades da água usando uma aproximação lagrangiana. Pode também ser usado para simular a dispersão do petróleo
Water Quality	modelo de qualidade de água: simula o ciclo do oxigénio, do azoto e do fósforo. É Usado pelos módulos euleriano e lagrangiano
Oil Dispersion	Módulo da dispersão de petróleo: simula processos de espalhamento e processos internos como a evaporação, a emulsificação, a dispersão, a dissolução e a sedimentação
Turbulence	Modelo 1D de turbolencia: usa a formulação do modelo de GOTM
Geometry	Guarda e actualiza a informação sobre os volumes finitos
Atmosphere	Condições atmosféricas
InterfaceWaterAir	Condições entre a atmosfera e a coluna de água à superfície (tensões de corte)
InterfaceSedimentWater	Condições de fundo
Jet	Módulo auxiliar para calcular a diluição inicial associada a emissários submarinos
Discharges	Descargas de água com origens em Rios ou em actividades antropogénicas
Waves	Condições de tensão de radiação das ondas

Para simplificar a utilização do MOHID foi desenvolvida uma interface gráfica, cujo funcionamento está dividido em três partes distintas: **Pre-processing**, relativo à aquisição e fornecimento dos dados; **Execution**, a execução dos cálculos propriamente dita e **Postprocessing**, permitindo a exploração e interpretação dos resultados. Os resultados do modelo podem ser visualizados em dois formatos distintos: séries temporais de valores obtidos para determinadas células e resultados na forma matricial, usando o *Hierarchical Data Format* (HDF), desenvolvido pelo *National Center of Supercomputing Applications* (NCSA) (Saraiva, 2005).

Nos últimos anos o MOHID Water tem sido alvo de diversas aplicações, nomeadamente: no Atlântico Norte para estudar a circulação geral (Neves *et al.*, 1998, Coelho *et al.*, 2002; Santos *et al.* 2002), derrames de petróleo (Leitão *et al.*, 2003), circulação, eutrofização e tempos de residência em estuários (Saraiva *et al.*, 2007) e albufeiras (Braunschweig, 2001).

De seguida é descrito de um modo muito sucinto o MOHID Water, modelo numérico usado neste trabalho, bem como as características dos principais módulos utilizados na implementação do modelo hidrodinâmico e de dispersão da pluma do emissário submarino da Foz do Arelho, englobando uma descrição geral dos principais processos envolvidos. Descrições mais pormenorizadas sobre a estrutura, potencialidades e aplicações do sistema MOHID podem ser encontradas em Leitão (2003) ou na *web site* do modelo (www.mohid.com).

4.1.1. MOHID water

O MOHID Water permite o cálculo da evolução das propriedades relativamente a dois tipos de referenciais: (i) referencial eulereano, (ii) referencial lagrangeano.

No primeiro caso, para o cálculo das propriedades, o modelo baseia-se no conceito de volume finito, ou seja, as equações são aplicadas macroscopicamente a cada volume de controlo (i.e. a cada célula da malha sob forma de um fluxo divergente). Esta metodologia consiste em aplicar as leis (físicas, químicas e biológicas) que regem os processos que se pretendem simular, directamente a um volume de controlo na forma de uma divergência de fluxo. Como consequência, automaticamente este método garante a conservação de massa das propriedades simuladas (Adcroft *et al.*, 1997), que podem ser hidrodinâmicas (por ex. velocidades, nível da água, fluxos de água e viscosidade turbulenta) e propriedades da água (por ex. a salinidade, temperatura, densidade, nutrientes, sedimentos coesivos, fitoplâncton, macroalgas bentónicas, etc.).

No caso do referencial ser lagrangeano, o cálculo da evolução das propriedades da água é feito relativamente à posição da massa de água. Este conceito é de uma enorme utilidade para a simulação de trajectórias de massas de água para quantificar trocas entre secções (i.e. trocas entre o oceano profundo e a plataforma continental) e para calcular tempos de residência (INAG, 2002) (Braunschweig *et. al*, 2003).

Hoje em dia o modelo lagrangeano pode ser utilizado para simular processos de qualidade de água, tal como a deriva de manchas de petróleo (por ex. o acidente com o Prestige) e plumas de emissários submarinos (por ex. o projecto com a parceria da SIMRIA-Saneamento Integrado dos Municípios da Ria, S. A."- para estudar o emissário de São Jacinto).

4.1.1.1. Módulo hidrodinâmico

O módulo hidrodinâmico do sistema MOHID gera e actualiza a informação do escoamento, resolvendo as equações primitivas do movimento no espaço tridimensional para fluidos incompressíveis. Assume-se o equilíbrio hidrostático, bem como a aproximação de Boussinesq. A discretização espacial destas equações é feita utilizando uma técnica de volumes finitos (Martins *et al.*, 2001) a qual permite a utilização de um sistema de coordenadas verticais genérico, tornando o modelo independente da discretização vertical. Assim, o modelo pode facilmente ser aplicado a diferentes locais com geometrias variadas. A discretização temporal é baseada na utilização de um esquema semi-implícito. É também incorporado um esquema de turbulência baseado no modelo GOTM (*General Turbulence Ocean Model*), largamente validado numa vasta gama de locais. O modelo permite a consideração de condições de fronteira abertas ou fechadas. As condições de fronteira abertas podem ser do tipo nível imposto, radiativas ou um misto das duas.

4.1.1.1.1. Equações resolvidas

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V P dV = - \oint_A \vec{F} \cdot d\vec{A} + FPA \text{ (fontes - poços)} \quad (\text{Eq.1})$$

Sendo, A a superfície que define a fronteira do volume controle V , onde o integral de superfície de \vec{F} corresponde ao fluxo da propriedade P através de A .

O módulo hidrodinâmico tem como objectivo simular a evolução das propriedades do escoamento. As velocidades segundo X e Y (horizontais) são umas dessas propriedades, as quais são calculadas com base na equação (Eq.1) e admitindo que:

$$P = \rho \cdot \vec{v} \wedge \vec{F} = P \cdot (\vec{v} \cdot \vec{n}) = \rho \cdot \vec{v} \cdot (\vec{v} \cdot \vec{n}) \quad (\text{Eq.2})$$

$$\text{Fontes - Poços} = \sum \text{Forças} = \text{Gravíticas} + \text{Pressão} + \text{Viscosas} \quad (\text{Eq.3})$$

Onde ρ é a massa volúmica, \vec{v} é o vector da velocidade 3D do escoamento e $\vec{n} = (n_x, n_y, n_z)$ é o vector normal à superfície fronteira (A) do volume de controle (V).

As forças gravíticas englobam as forças de atracção gravítica exercidas sobre o volume de controlo em

estudo pelo planeta Terra $\left(g \int_V \rho dV \right)$, pela Lua e pelo Sol (potencial da maré).

O potencial de maré é um termo que adquire importância em domínios de grandes dimensões, da ordem das centenas de quilómetros, sendo resolvido com base na formulação proposta por Choi *et al.* (1997).

As forças de pressão e as forças viscosas são exercidas sobre a superfície fronteira do volume de controlo e resultam da interacção deste com o meio envolvente. As forças de pressão são normais à superfície de fronteira $\left(-\oint_A p \cdot \vec{n} dA\right)$ enquanto que as forças viscosas $\left(\oint_A \vec{\nu} dA\right)$ podem ser subdivididas em tangenciais e normais.

No que diz respeito às forças viscosas tangenciais é necessário definir condições de fronteira no fundo e à superfície. No fundo é utilizada uma lei quadrática em que a tensão de corte é igual ao coeficiente de *Chezy* vezes o quadrado da velocidade. Na superfície, caso um dos agentes forçadores seja o vento, a tensão de corte é a tensão de corte do vento caso contrário o seu valor é nulo.

Outra propriedade fundamental a ter em consideração é a nível da superfície livre cuja evolução é calculada com base na equação (Eq.1) admitindo que o meio é 2D, isto é, a sua evolução só é condicionada pelos fluxos de água. Neste caso os termos da equação podem-se escrever na forma:

$$P = \rho \wedge \vec{F} = \rho \cdot \vec{v} \quad (\text{Eq.4})$$

$$\text{Fontes} - \text{Poços} = \text{Descargas} + \text{Precipitação} - \text{Evaporação} \quad (\text{Eq.5})$$

A equação (Eq.1, torna-se então numa equação de conservação de massa 2D:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho dV = -\oint_A \rho \vec{v} \cdot d\vec{n} + \text{Descargas} + \text{Precipitação} - \text{Evaporação} \quad (\text{Eq.6})$$

Ao contrário da equação anterior em que a propriedade transportada era a incógnita, aqui a propriedade é conhecida (ρ) e a incógnita é o próprio volume de controlo.

Uma vez que se trata de um abordagem 3D é ainda necessário especificar uma equação para o cálculo da velocidade vertical, a qual é obtida a partir da equação de conservação de massa anteriormente descrita admitindo a hipótese hidrostática.

4.1.1.1.2. Principais aproximações

A equação (Eq.1) aplicada à conservação de quantidade de movimento é válida para um referencial fixo. No entanto, o referencial natural, a Terra, está em permanente rotação, sendo o efeito desta

rotação sobre o escoamento usualmente contabilizado na forma de uma força inercial denominada força de Coriolis.

Outra aproximação, usualmente efectuada na aplicação da lei de conservação de quantidade de movimento a escoamentos oceânicos e costeiros, explora o facto das variações de densidade da água nestes casos ser muito pequena, menos de 3%. Neste caso a densidade pode ser considerada constante para o cálculo da sua massa e forças de inércia, excepto para as forças que são função da aceleração da gravidade. A esta simplificação chama-se aproximação de Boussinesq.

Uma terceira simplificação adoptada tem em consideração que, no oceano e em águas costeiras, as escalas na vertical são pequenas e, conseqüentemente, o escoamento tem de uma forma geral velocidades muito baixas nessa direcção. Para além da dimensão das escalas verticais a estratificação vertical de densidade estável tem também um papel importante, porque tende a inibir qualquer movimento vertical por acção da impulsão. As acelerações verticais são baixas tal como as forças viscosas. O fluido por sua vez, no que diz respeito aos movimentos verticais, comporta-se como se estivesse num equilíbrio estático. Nestas condições é válida a hipótese hidrostática, isto é, é possível desprezar todos os termos de inércia e admitir que o gradiente de pressão vertical está em equilíbrio com a força da gravidade. A pressão, no caso da hipótese hidrostática, é então apenas função da profundidade e do gradiente vertical de densidade.

Na discretização do termo de pressão optou-se pela divisão deste numa componente barotrópica e outra baroclínica. A primeira contabiliza o efeito do gradiente de nível sobre a pressão, enquanto a segunda contabiliza o efeito do gradiente de densidade. Esta divisão permite correlacionar directamente a variação da superfície livre com a pressão (barotrópica). Desta forma a superfície livre pode ser utilizada para calcular o volume de controlo e simultaneamente servir como estimativa da pressão barotrópica. Por outro lado, podem-se aplicar métodos numéricos diferentes a cada um dos termos.

A consideração das aproximações à lei de conservação de quantidade de movimento, apresentadas anteriormente, dá origem à equação (Eq.7).

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \vec{v} dV = - \oint_A (\vec{v} \cdot \vec{v}) d\vec{n} + \oint_A v_T \frac{\partial(\vec{v})}{\partial n} d\vec{n} - \underbrace{g \oint_A (\eta - z) \cdot d\vec{n}_x}_{\text{Força barotrópica segundo X}} - \underbrace{g \oint_A \left(\int_z^\eta \frac{\rho - \rho_0}{\rho_0} dz \right) \cdot d\vec{n}_x}_{\text{Força baroclínica segundo X}}$$

$$\begin{aligned}
& - \underbrace{g \oint_A (\eta - z) \cdot d\vec{n}_y}_{\text{Força barotrópica segundo Y}} - \underbrace{g \oint_A \left(\int_z^\eta \frac{\rho - \rho_0}{\rho_0} dz \right) \cdot d\vec{n}_y}_{\text{Força baroclínica segundo Y}} - \underbrace{\oint_A p_{atm} d\vec{n}_x}_{\text{pressão atmosférica X}} - \underbrace{\oint_A p_{atm} d\vec{n}_y}_{\text{pressão atmosférica Y}} \\
& + \underbrace{\int_V 2\vec{\Omega} \times \vec{v} dV}_{\text{Força de coriolis}} + \text{Potencial da Maré}
\end{aligned} \tag{Eq.7}$$

Onde, ρ é a massa volúmica, ρ_0 é a massa volúmica de referência, \vec{v} é o vector da velocidade 3D do escoamento, $\vec{n} = (n_x, n_y, n_z)$ é o vector normal à superfície fronteira (A) do volume de controle (V), Ω é a velocidade angular, η é cota da superfície livre, z é a profundidade, ν_T a viscosidade turbulenta e p_{atm} a pressão atmosférica.

O módulo hidrodinâmico resolve assim a equação de conservação de quantidade de movimento 3D (Eq.7) para calcular as componentes horizontais da velocidade e uma equação de conservação de massa (Eq.6), para um meio 2D, para calcular a variação da superfície livre no tempo. Finalmente resolve mais uma vez a equação (Eq.6), agora para um meio 3D, para calcular a velocidade vertical do escoamento.

4.1.1.1.3. Módulo de turbulência

A resolução numérica das equações do módulo hidrodinâmico além de ser discreta no espaço também o é no tempo. Por este motivo, o módulo hidrodinâmico resolve na realidade as equações apresentadas anteriormente com base numa decomposição à Reynolds.

Esta decomposição pode ser perspectivada como uma filtragem temporal, em que os valores instantâneos das propriedades (f) são substituídos por quantidades médias (\bar{f}) mais flutuações turbulentas (f').

A integração temporal da equação (Eq.7) permite escrevê-la em termos de valores médios surgindo, devido aos efeitos não lineares, termos adicionais (tensores de Reynolds). Estes termos representam a contribuição do transporte turbulento para o campo médio e podem ser vistos como o transporte das flutuações do campo variável em estudo pelas flutuações do campo da velocidade.

Levanta-se assim um novo problema usualmente designado por "fecho da teoria da turbulência". Existem diversos métodos de resolver este problema sendo comum admitir que este novo termo é proporcional ao gradiente da propriedade média transportada, ou seja:

$$\overline{\frac{\partial \vec{v}}{\partial n}} = \nu_T \frac{\partial \vec{v}}{\partial n} \quad (\text{Eq.8})$$

A variável ν_T é designada por viscosidade turbulenta. Nos casos em que o meio possa ser considerado isotrópico pode-se admitir que ν_T é constante. Caso contrário é necessário calcular para cada uma das direcções um valor, $\nu_T = (\nu_x, \nu_y, \nu_z)$.

Na maioria dos casos admite-se $\nu_x = \nu_y$, uma vez que na horizontal os processos normalmente podem-se considerar homogéneos. A grande diferença reside nas escalas características das direcções horizontal e vertical. Nesta perspectiva, o coeficiente de viscosidade turbulenta pode ser dividido em viscosidade turbulenta horizontal e vertical, $\nu_T = (\nu_H, \nu_H, \nu_V)$.

Uma vez que se admitiu que o novo termo tem uma natureza matemática semelhante ao termo das forças viscosas, a sua ordem de grandeza é facilmente comparável. As escalas normalmente resolvidas pelos modelos hidrodinâmicos são da ordem dos metros, a que corresponde uma viscosidade turbulenta várias ordens de grandeza superiores à viscosidade molecular, pelo que as forças viscosas podem ser consideradas desprezáveis.

O fecho turbulento vertical é feito com base o módulo de turbulência do modelo GOTM. Neste módulo podem-se encontrar um conjunto de diferentes modelos para a descrição das trocas turbulentas nas camadas de mistura. Todos os modelos usam o princípio de viscosidade turbulenta, que permite obter os coeficientes de troca turbulenta em função de propriedades do escoamento médio. Para mais informação sobre as aplicações e os avanços teóricos no módulo de turbulência do modelo GOTM pode consultar-se a página web (<http://www.gotm.net>).

4.1.1.1.4. Módulo de transporte Euleriano/propriedades da água

Se por um lado é necessário o cálculo das velocidades e coeficientes de difusividade turbulenta calculados pelo modelo hidrodinâmico, por outro lado é também necessário estudar o transporte e evolução das propriedades da água. O transporte e evolução das propriedades da água (salinidade e temperatura), relativamente a um referencial euleriano é calculado pelo módulo de propriedades da água ou *ModuleWaterProperties*, como é usualmente denominado no modelo MOHID. Este módulo resolve a Equação 7, aplicada a um meio 3D, resolvendo explicitamente os termos advectivos e difusivos horizontais são resolvidos e implicitamente os termos advectivos e difusivos verticais. O termo advectivo pode ser resolvido recorrendo a um dos seguintes tipos de discretização: diferenças centradas e upwind.

A densidade é calculada com base na equação de estado para a salinidade e a temperatura (Leendertsee and Liu, 1978):

$$\rho = \frac{(5890 + 38T - 0.375T^2 + 3S)}{(1779.5 + 11.25T - 0.0745T^2) - (3.8 + 0.01T)S + 0.698(5890 + 38T - 0.375T^2 + 3S)} \quad (\text{Eq.9})$$

A temperatura e a salinidade podem ser valores constantes ou evoluir no tempo devido ao efeito do transporte por parte do escoamento de descargas pontuais, de fluxos à superfície, de trocas de calor no caso da temperatura (radiação solar, radiação infravermelha, calor latente e sensível) e trocas de massa no caso da salinidade (evaporação/precipitação).

4.1.1.1.5. Módulo de transporte lagrangeano

Os modelos de transporte lagrangeano baseiam-se na simulação do movimento de traçadores num referencial lagrangeano. Estes, utilizam o conceito de traçador e são normalmente referidos apenas como modelos de traçadores (*particle tracking models*). A principal característica é evitarem a resolução explícita do termo advectivo da equação de transporte, evitando os problemas de instabilidade. A grande vantagem dos modelos de transporte lagrangeanos incide em aplicações onde existem gradientes muito acentuados, uma vez que a abordagem lagrangeana não arrasta consigo os problemas de difusão numérica que caracteriza os modelos de transporte euleriano.

Inicialmente, o módulo de transporte lagrangeano (3D) foi desenvolvido para ser acoplado á primeira versão do módulo hidrodinâmico do modelo MOHID (MOHID2D), cujo início começou com Neves, em 1985. Uma vez que este era apenas usado para visualização dos resultados e validação do modelo hidrodinâmico 2DH, surge necessidade de alterar o modelo de traçadores, de modo que fosse capaz de simular mecanismos mais complexos, tais como descargas de águas residuais, emissão pontual de sedimentos (i.e. rios e material dragado), trajectórias de manchas de petróleo e cálculo de tempos de residência. Os últimos avanços no modelo lagrangeano tornaram possível acoplar não só modelos hidrodinâmicos 2DH como também 3DH (Leitão, 1997).

Actualmente no módulo de transporte lagrangeano os traçadores (ou partículas) possuem seis características principais: coordenadas espaciais (x, y, z), velocidade horizontal/vertical, tempo durante o qual o traçador mantém a velocidade, velocidade de sedimentação, massa e volume. Para cada umas destas propriedades é resolvida uma equação de evolução. A massa pode ser um array de mais de 30 propriedades (i.e. nutrientes, fitoplâncton, matéria em suspensão) (Leitão, 1997).

Descrições mais pormenorizadas sobre a estrutura, potencialidades e aplicações do modelo lagrangeano podem ser encontradas em Leitão (1997).

4.1.1.1.5.1. Deslocamento de traçadores

As coordenadas espaciais são calculadas a partir da definição de velocidade:

$$\frac{dx_i}{dt} = U_i(x_i, t) \quad (\text{Eq.10})$$

Esta é resolvida através de um método explícito simples:

$$x_i^{t+\Delta t} = x_i^t + \Delta t \cdot u_i' \quad (\text{Eq.11})$$

A aplicação de métodos de ordem mais elevada, implica a utilização de procedimentos iterativos. O método de Heun utilizado por Monteiro (1995) corresponde a um esquema de previsão-correcção de dois níveis temporais, com um grau de precisão de 2ª ordem no tempo. Costa (1991) concluiu que a adopção de esquemas de ordem mais elevada só é necessária quando as linhas de corrente apresentam uma curvatura acentuada e o passo temporal é elevado. Para a maioria dos escoamentos naturais, a precisão, associada ao método explícito, é suficiente para se obterem bons resultados.

Para calcular a velocidade, em qualquer ponto do domínio, é utilizada uma interpolação linear (Figura 4.1) também neste caso se poderia optar por um método de interpolação mais preciso, como a interpolação bilinear utilizada por Monteiro (1995), embora este aumento de precisão torne o algoritmo mais lento.

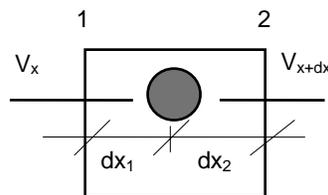


Figura 4.1- Cálculo da velocidade média dos traçadores (Adaptado de Leitão, 1997).

Às velocidades U_x e U_{x+dx} , segundo x , nas faces 1 e 2 podem ainda ser adicionadas uma velocidade de deriva devido ao vento, uma velocidade representativa do transporte difusivo /turbulento e ainda a velocidade de espalhamento do petróleo, caso se simule um derrame de hidrocarbonetos.

O transporte turbulento é forçado pelos vórtices não resolvidos pelo modelo, os quais dependem da razão entre os tamanhos dos vórtices e dos traçadores. Os vórtices maiores que os traçadores induzem um movimento aleatório ao traçador (Figura 4.2).

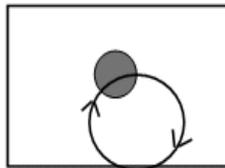


Figura 4.2 – Movimento aleatório forçado por vórtices maiores que o traçador (círculo cinzento).

4.1.1.1.5.2. Inativação bacteriológica

As águas residuais contêm uma grande variedade de microorganismos, alguns dos quais patogénicos. A determinação directa dos organismos patogénicos requer complexas análises microbiológicas. Com o objectivo de facilitar a verificação da qualidade água e permitir assim implementar esquemas de análise de água que permitam monitorizar extensas áreas (por ex. praias, barragens, rios), utilizam-se indicadores biológicos fáceis de medir, que permitem estimar indirectamente o grau de contaminação da água. A maioria das normas, estabelecidas pelas autoridades sanitárias e pelos organismos responsáveis pela qualidade da água dos meios receptores, referem-se a níveis máximos e aconselhados de concentração de indicadores biológicos. Os coliformes totais e fecais são os principais indicadores utilizados.

A inativação bacteriológica é condicionada por uma grande variedade de factores (Monteiro, 1995) como a radiação solar, temperatura, salinidade; predação pelo biota do meio receptor, concentração de nutrientes, substâncias tóxicas, sedimentação após descarga, ressuspensão de sedimentos contaminados e taxa de crescimento dos microorganismos no meio receptor. De todos estes factores, o que condiciona mais a inativação bacteriológica é sem dúvida a radiação solar. Num ambiente sem luz, o processo de inativação pode demorar, pelo menos, duas ordens de grandeza mais do que mesmo processo exposto à radiação solar.

Na simulação da inativação, admite-se, normalmente, que este segue uma reacção de primeira ordem (Eq. 15),

$$\frac{dC}{dt} = -K_B C \quad \wedge \quad K_B = \frac{\ln 10}{T_{90}} \quad (\text{Eq.12})$$

onde K_B - taxa de inativação, T_{90} - tempo necessário para a concentração de bactérias ser reduzida em 90% e C - concentração de bactérias. Neste caso de estudo considerou-se um T_{90} variável, que têm em conta a variabilidade da radiação solar ao longo do dia (método de acordo com Canteras *et al.*, 1995).

4.1.1.1.5.3. Emissão

O modelo permite 5 tipos diferentes de emissão, emissão pontual, emissão em caixas, emissão em caixas e acidente.

A emissão pontual pode ser feita em contínuo ou instantaneamente. A primeira, é útil no caso da emissão de efluentes e a segunda na identificação de trajetórias de massas de águas pontuais.

O caso da emissão em caixas é mais utilizada para caracterizar massas de água e compreender os mecanismos de trocas entre regiões. Se os traçadores forem colocados nos centros da célula do módulo hidrodinâmico representam porções de água com volume variável, isto é, volume igual ao da célula. Outra alternativa é utilizar traçadores, todos com o mesmo volume, sendo a sua localização calculada em função do volume da célula. Os primeiros são úteis para identificar o transporte de matéria à superfície. As emissões em caixas, permitem calcular o tempo de residência dos traçadores em áreas definidas pelo utilizador

A emissão tipo acidente foi desenvolvida para simular emissões quase instantâneas de grandes massas de poluentes, estando especialmente vocacionada para a simulação de material flutuante, que é o caso dos hidrocarbonetos. Neste caso a emissão não é pontual mas a área inicial pode ser inferior à da célula do modelo hidrodinâmico.

4.1.1.1.6. Módulo Geometry (geometria/discretização vertical)

A discretização vertical é feita recorrendo ao módulo Geometry. Na discretização vertical é comum a utilização de transformação de coordenadas para otimizar a precisão da malha. Esta metodologia possibilita igualmente o desenvolvimento, sem muito esforço, de diferentes tipos de coordenadas verticais alternativas que melhor se adaptem a um caso particular (Martins, 1999). Na modelação de escoamentos geofísicos têm sido utilizados vários tipos de discretização vertical do domínio real (i.e. coordenadas cartesianas, sigma, isopícnica, lagrangeana, células cortadas, etc.) com o intuito de descrever de forma adequada o fundo, conservar a resolução vertical em todo o domínio e melhorar as propriedades numéricas dos esquemas de cálculo utilizados (Beckers, 1991).

Por exemplo, uma discretização grosseira na vertical pode dar origem a excesso de difusão numérica e pode tornar impraticável, a simulação do efeito da estratificação sobre um escoamento, como em geral é o caso da simulação da dispersão da pluma de um emissário submarino, em particular o da Foz do Arelho. Os modelos de volumes finitos permitem uma grande flexibilidade, ao nível da discretização espacial, uma vez que a geometria é introduzida numa forma explícita através das áreas e volumes de cada célula (Fernandes, 2005). Esta versatilidade permite subdividir o domínio tanto na horizontal como na vertical, em zonas com diferentes discretizações.

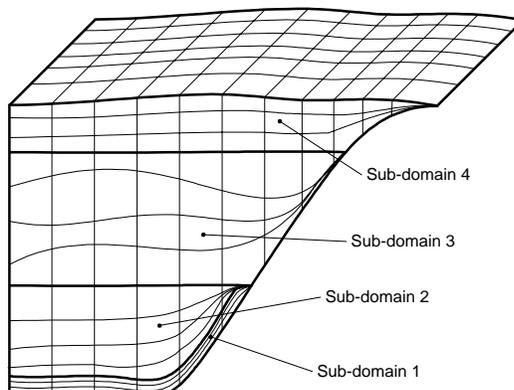


Figura 4.3 – Malha ilustrativa das potencialidades de discretização vertical do sistema MOHID.

A flexibilidade do sistema MOHID ao nível da discretização vertical permite a respectiva utilização tanto em ambientes oceânicos, como em escoamentos, em albufeiras ou até em processos de pequena escala como seja a dispersão de plumas térmicas.

A resolução horizontal do sistema MOHID é variável na sua extensão, possibilitando simulações mais detalhadas em zonas específicas da malha de cálculo.

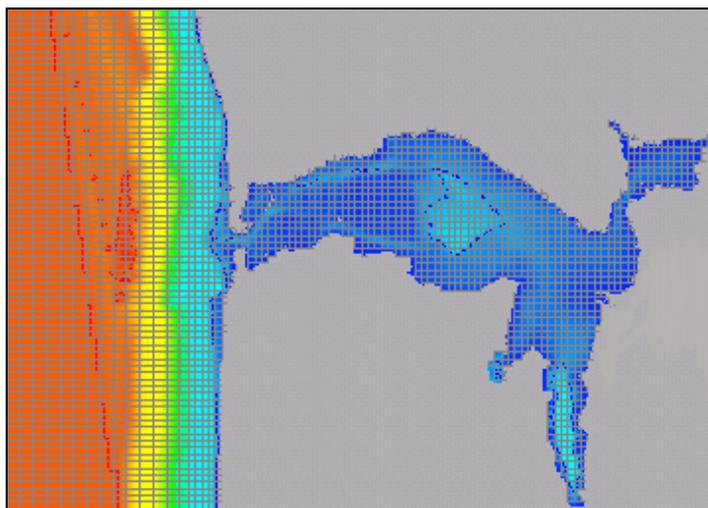


Figura 4.4 – Exemplo de aplicação de passo variável na Lagoa de Óbidos.

4.1.1.1.7. Módulo MOHIDJET

O cálculo da dispersão da pluma do emissário submarino da Foz do Arelho no campo próximo, é feita recorrendo ao módulo de dispersão MOHIDJET (modelo de jactos integrais). Este módulo visa simular a diluição inicial associada a emissários submarinos resolvendo de uma forma integral, jactos com impulsão. A diluição inicial é simulada recorrendo à evolução de um traçador com uma forma geométrica cilíndrica, utilizando um referencial lagrangiano para a discretização espacial (Leitão, 2004), abordagem semelhante à utilizada no modelo JETLAG (Lee and Cheung, 1990) (<http://www.aewaterhku.hk/visjet/index.htm>).

O seu papel no modelo MOHID, consiste em gerar as condições iniciais do módulo de transporte lagrangeano ou *Lagrangian*, utilizado para simular a dispersão da pluma de emissários no campo afastado. Desta forma, o modelo MOHID é capaz de simular a dispersão de plumas de emissários no campo próximo (módulo MOHIDJET) e no campo afastado (módulo lagrangeano) de uma forma integrada.

A condição inicial do jacto, à saída dos orifícios é condicionada pelo diâmetro e orientação relativamente à corrente do meio receptor e pelo caudal e diferença de massa volúmica entre o efluente e o meio receptor. As propriedades apresentadas na Tabela 4.2, são utilizadas para descrever cada jacto à saída dos orifícios do difusor.

Tabela 4.2-Propriedades de cada jacto à saída dos orifícios do difusor.

Propriedade	Descrição
Δh_0	Espessura inicial do traçador
D_D	Diâmetro do orifício
Q_0	Caudal emitido através do orifício
ρ_e	Massa volúmica do efluente à saída do orifício
θ_0	Ângulo entre o eixo do orifício e o plano horizontal
β_0	Ângulo entre o eixo do orifício e o plano vertical

No caso da parametrização dos processos de mistura turbulenta por efeito de corte e por arrastamento, o utilizador do MOHIDJET pode escolher entre as parametrizações utilizadas pelo modelo CORJET ou JETLAG, baseadas em Lee and Cheung (1990) e em Jirka (1999).

O MOHIDJET acoplado ao sistema MOHID tem vindo a ser utilizado no modelo operacional do estuário do Tejo (<http://www.mohid.com/tejo-op>) para fazer previsões diárias da evolução da pluma de coliformes fecais associado a este emissário (http://www.mohid.com/tejoop/Aq_Prev_Mapas.asp).

4.1.1.1.8. Condições fronteira

O modelo permite considerar condições de fronteira abertas e fechadas. As primeiras são usualmente utilizadas para definir a interacção do módulo hidrodinâmico com outras massas de água, enquanto as segundas são utilizadas para definir a linha de costa e os processos de cobertura e descobertura em zonas intertidais.

As condições de fronteira aberta podem ser divididas em dois tipos: passivas e activas. As condições de fronteira passivas dependem da solução interna e têm como principal objectivo deixar sair perturbações geradas dentro do domínio. Um exemplo deste tipo de condição de fronteira são as fronteiras, utilizadas em diversos tipos de aplicação, tais como ondas de vento, e escoamentos oceânicos e costeiros. Pelo contrário as condições de fronteira activas, são impostas e não calculadas pelo modelo. Como exemplo destaca-se a imposição de uma curva de maré para simular a hidrodinâmica de um estuário ou a imposição da vazão de um rio para simular uma cunha salina.

As fronteiras fechadas podem dividir-se em fixas e móveis. As primeiras são utilizadas para definir a linha de Costa, enquanto as segundas são extremamente úteis para definir processos de cobertura e descobertura em zonas intertidais. Tanto ao nível de fluxo de massa como de quantidade de movimento optou-se, por defeito, por impor fluxo nulo ao longo destas fronteiras fechadas.

4.1.1.1.8.1. Fronteiras Abertas

Este é um tema complexo e exige um acompanhamento constante do estado da arte e investigação das várias soluções. A experiência acumulada tem mostrado que não existe uma solução universal e que, em cada caso, é necessário testar diferentes soluções, optando pela que menos perturbe a solução e simultaneamente não deixe o modelo divergir.

A metodologia para definir condições de fronteira abertas é extremamente versátil. Uma forma que o utilizador tem de garantir que a simulação não tende a divergir da solução conhecida, é definindo uma solução exterior (ou de referência) e fornecê-la ao módulo hidrodinâmico na entrada de dados. Esta solução exterior pode ser definida de uma forma contínua para cada ponto de cálculo recorrendo a campos de propriedades definidos em arquivos ASCII, que podem ser constantes ou variáveis no tempo.

Outra hipótese é definir a solução em alguns pontos, e o módulo hidrodinâmico durante o *Run* interpolar a solução para os pontos fronteira. Esta é a metodologia utilizada na imposição da maré. Esta abordagem tem a vantagem de minimizar a entrada de dados. A informação pode ser dada na forma duma série temporal ou na forma de componentes harmónicas no caso da maré.

Em alternativa, também é possível utilizar o próprio módulo hidrodinâmico para calcular a solução de referência recorrendo ao conceito de modelos encaixados, sendo a metodologia usada neste estudo. Deste modo foi definido um modelo de larga escala com um passo espacial grosseiro, onde foi relativamente fácil definir as condições de fronteira, e de seguida foram-se implementando modelos encaixados, até à zona de estudo, reduzindo-se gradualmente (respeitando a razão de 1:3 do *downscaling*) o passo da malha até se obter a precisão desejada, resultando num conjunto de 4 modelos encaixados. Uma vez que toda a programação do sistema MOHID está orientada por objectos, o número de modelos encaixados que o utilizador pode definir é ilimitado, dependendo sempre do caso de estudo e do problema a estudar. Esta metodologia é extremamente poderosa, tendo como única desvantagem a exigência em termos de capacidade de cálculo.

4.1.1.1.8.2. Fronteiras Fechadas

Fisicamente existem trocas de quantidade de movimento entre a costa e o escoamento por atrito lateral. Todavia este processo é desprezável relativamente ao atrito no fundo, devido à diferença existente entre o passo espacial na horizontal e na vertical. O seu efeito do atrito lateral sobre o escoamento só será visível no escoamento para passos de malha inferior a 10 m. Nestes casos o utilizador tem que escolher a opção de não escorregamento lateral.

Como foi anteriormente referido, a fronteira móvel é uma fronteira fechada cuja posição evolui no tempo. Este tipo de fronteira é utilizado para simular zonas intertidais. Neste caso é necessário fazer uma verificação constante de todos os pontos de cálculo de velocidades que estão descobertos onde é imposta a condição de fluxo de massa e fluxo de quantidade de movimento nulos. Um ponto de cálculo das velocidades se considera descoberto se uma das seguintes condições ocorrer:

$$\begin{aligned} H_{ij} < HMIN & \quad \text{e} \quad \eta_{ij-1} < -h_{ij} + HMIN \\ H_{ij-1} < HMIN & \quad \text{e} \quad \eta_{ij} < -h_{ij-1} + HMIN \end{aligned}$$

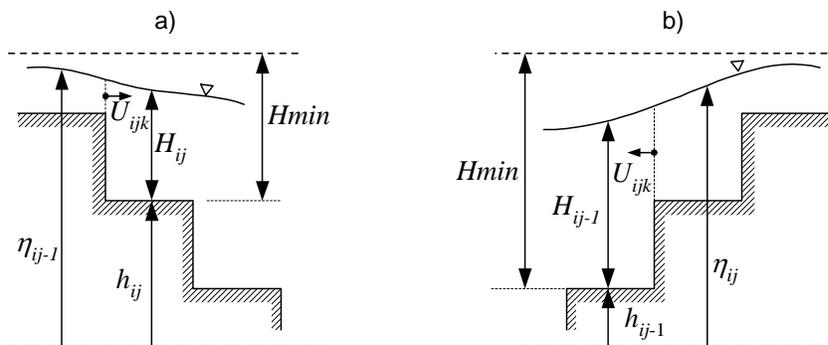


Figura 4.5 – Condições para um ponto de cálculo de velocidades se considerar descoberto.

HMIN é a altura mínima de coluna de água, abaixo do qual se considera que um ponto de cálculo de níveis já não tem água. Este valor tem que ser suficientemente grande de modo a minimizar a criação artificial de massa mas, por outro lado, se for demasiado grande pode introduzir erros na propagação da maré nas zonas intertidais.

O ruído provocado pelas variações bruscas de velocidade nas fases de cobertura ou descobertura deve ser controlado através de uma escolha criteriosa de *HMIN*. O valor normalmente utilizado é na ordem dos 4 cm. As outras variáveis são H_{ij} profundidade total (ou altura da coluna de água), h_{ij} profundidade (ou cota a que se encontra o fundo) e η_{ij} nível (ou cota a que se encontra a superfície livre utilizando um referencial simétrico ao das profundidades).

4.1.1.1.9. Módulo Waves

O módulo Waves é utilizado para ler a solução de diferentes parâmetros característicos das ondas (tensões de radiação), para posterior cálculo dos campos de correntes produzidos pela acção combinada de ondas e correntes. O cálculo das tensões de radiação em cada ponto da malha, foi efectuado com base no modelo numérico STWAVE (*Steady State Wave Model*), cujo algoritmo foi desenvolvido pelo U.S. Army Corps of Engineers (Smith *et al.*, 1998) (Smith *et al.*, 2001). Este modelo é especialmente vocacionado para simular a propagação da agitação, com especial enfoque em zonas com importantes processos de interacção entre ondas e correntes (por ex. barra da Lagoa de Óbidos, barra da Ria de Aveiro, etc.). Uma descrição pormenorizada do modelo é fornecida no Anexo 3.

4.1.1.1.10. Módulo Sand

Este módulo permite seguir a evolução da batimetria no sistema lagunar sujeito à acção das ondas, correntes ou à acção combinada de ondas e correntes. Sendo a lagoa um sistema em constante mutação é importante a inclusão deste módulo. Para uma dada batimetria, tipo de sedimentos e correntes locais, o modelo calcula as taxas de transporte de sedimentos de acordo com uma de diversas fórmulas de transporte ao dispor do utilizador (por ex. Meyer-Peter and Muller, Baillard, Bijker, Van Rijn, Ackers and White). É assim possível avaliar de forma contínua a evolução da batimetria local bem como os respectivos volumes de erosão/sedimentação.

Na ausência de dados precisos sobre a granulometria das areias do fundo para determinação das taxas de transporte optou-se por utilizar a metodologia proposta por Skou e Vieira (1999) segundo a qual a granulometria das areias poderá ser relacionada com a velocidade máxima através da relação $d_{50} = V_{max}/k$ (sendo k uma constante de calibração). A utilização deste conceito para um cálculo da distribuição das granulometrias das areias no interior da lagoa permitiu construir uma matriz de distribuição de diâmetros e efectuar uma simulação qualitativa dos processos de transporte. Ainda que

não seja possível validar o modelo de transporte por falta de dados para o efeito, a utilização de um modelo de fundo móvel apresenta a vantagem de permitir alguma adaptação da batimetria às condições do escoamento. Este aspecto é especialmente importante na zona da barra para a qual não existem levantamentos fiáveis que possam ser utilizados para fazer a batimetria.

5. SISTEMA IMPLEMENTADO

Neste caso de estudo foi implementado um sistema integrado de 5 modelos encaixados, capazes de simular a propagação da agitação marítima, determinar os campos de correntes associados à acção conjunta da agitação, maré e vento, e finalmente, simular a dispersão da pluma do emissário submarino da Foz do Arelho.

Este capítulo fala sobre a filosofia dos modelos encaixados e sua implementação, referindo todo o tipo de condições e forçamentos utilizados para simular os objectivos em causa. A validação dos modelos implementados também é aqui apresentada.

5.1. Modelos encaixados

A metodologia de modelos encaixados representa uma solução eficiente para resolver problemas de escala. Através desta metodologia torna-se possível fazer *downscaling* da solução, bem como forçar os modelos locais com processos de grande escala. Esta metodologia permite ainda a integração numa ferramenta, de diversos modelos locais forçados pelo mesmo modelo regional.

Este sistema permite integrar processos desde a escala dos quilómetros, como é o caso da maré, com processos da escala das centenas de metros, como é o caso da pluma da Lagoa de Óbidos. Esta filosofia permite fazer *downscaling* da solução, bem como forçar modelos locais com processos de grande escala. A comunicação entre modelos é feita *one-way*, ou seja, os modelos de maior escala influenciam os modelos de menor escala, mas o contrário não ocorre. Os modelos "pai" vão transmitir a informação para os seus "filhos" e assim sucessivamente. Esta metodologia permite que a

informação de uns seja a condição de fronteira dos outros, tornando possível que diversos modelos locais sejam forçados pelo mesmo modelo regional.

O sistema de modelos implementados para estudar a dispersão da pluma do emissário submarino da Foz do Arelho, utiliza cinco níveis diferentes de modelos encaixados (Figura 5.1). As condições utilizadas são objecto de maior detalhe na secção 5.2 (Implementação do Sistema), sendo aqui apenas abordados os aspectos mais relevantes. Recorreu-se a cinco níveis de modelos encaixados de para respeitar a razão de 1:3 entre as malhas, habitualmente usada na modelação de *downscaling* da solução.

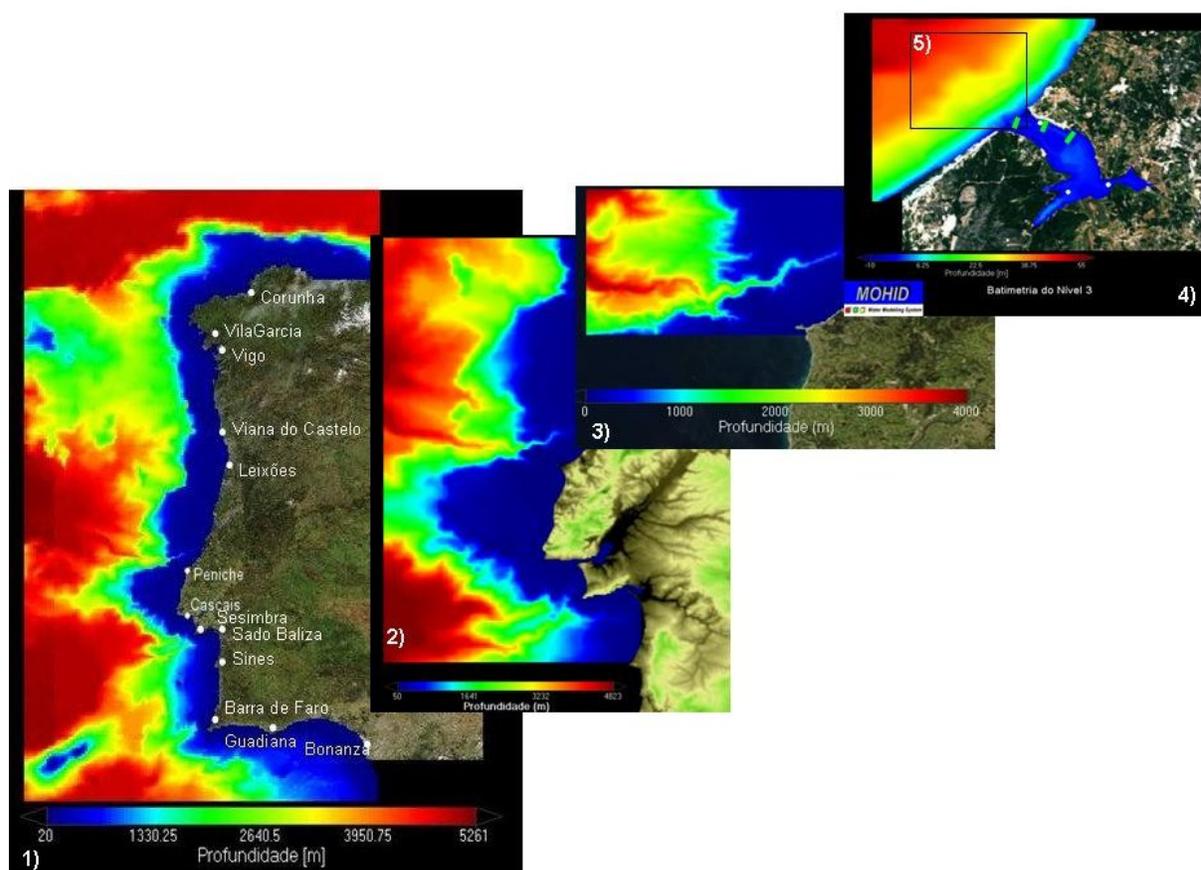


Figura 5.1- Modelos encaixados implementados para as simulações (1-costa Portuguesa, 2- Costa entre Aveiro-Sines, 3-Costa entre Nazaré-Peniche, 4-Lagoa de Óbidos e 5-zona costeira adjacente à Lagoa de Óbidos). Os círculos a branco indicam os marégrafos existentes na costa Portuguesa.

O modelo de maior nível cobre toda a costa Portuguesa e a costa da Galiza e é forçado pela maré e vento, e não apresenta discretização vertical – 2DH (sem gradientes de densidade - fluxo barotrópico). A sua única função é fornecer as condições de fronteira de oceano aberto para o segundo nível de modelos encaixados, o qual cobre a extensão da costa desde Aveiro até Sines. O terceiro nível (Nazaré-Peniche), recebe as condições de fronteira do nível anterior (nível 2). Basicamente a função dos modelos de nível 2 e 3 é levar a solução de maré até aos modelos locais.

O modelo de nível 4 (de escala local) cobre a totalidade da Lagoa de Óbidos e área costeira adjacente. Pretende-se com este nível simular a pluma de salinidade e temperatura da Lagoa de Óbidos. No que respeita às condições de fronteira à superfície (interface água-atmosfera), são considerados vento, temperatura, radiação, humidade relativa e fluxos de calor. São também impostas as descargas dos Rios Arnóia e Real; e Rio da Cal. Os valores utilizados para as descargas são médios diários (ver 5.2 – Afluências de água doce). A simulação da propagação da agitação foi feita com o modelo STWAVE, permitindo o forçamento conjunto de ondas e maré. Foi ainda considerada a evolução da batimetria no sistema lagunar (modelo de fundo móvel) devido à acção combinada de ondas e correntes.

O último nível é um modelo local e ocupa a zona costeira onde é feita a descarga do emissário submarino da Foz do Arelho. Este nível serve para monitorizar o impacto do emissário submarino, e estudar problemas de qualidade da água em termos de contaminação fecal junto à praia da Foz do Arelho. O modelo é baroclinico tridimensional (com gradientes de densidade), com uma discretização vertical de 10 camadas de domínio cartesiano. No que respeita às condições de fronteira à superfície (interface água-atmosfera), são considerados vento, temperatura, radiação, humidade relativa e fluxos de calor. São também impostos os caudais de enchente e vazante da Lagoa de Óbidos, e a pluma de temperatura e salinidade. Como condições iniciais usaram-se perfis verticais de salinidade e temperatura típicos da zona estudo para uma situação de Verão e Inverno. A diluição inicial (campo próximo) da pluma é calculada acoplado ao modelo hidrodinâmico 3DH, o modelo MOHIDJET. O modelo só precisa que sejam fornecidas as características do emissário descritas na introdução deste documento. A dispersão no campo afastado é simulada através do módulo de traçadores lagrangianos. Desta forma, é possível a simulação tridimensional integrada de dispersão de poluentes no campo próximo e afastado da emissão.

Com a filosofia de modelos encaixados, foi possível afastar a fronteira aberta para o mar alto e forçar modelos de maior detalhe com resultados de um modelo de larga escala. Sintetizando, o sistema implementado simula o escoamento na Lagoa de Óbidos e a dispersão da pluma do emissário submarino da Foz do Arelho, encaixando este domínio num modelo regional da costa Portuguesa de forma a melhorar a condição de fronteira do lado do mar. Para além de simular a dispersão da pluma, este caso de aplicação mostrou enorme versatilidade do modelo, uma vez que foi possível definir as condições de fronteira em células da malha pretendidas. Neste exemplo de aplicação, revelou-se de enorme utilidade uma vez que deste modo, foi possível fugir a zonas de descobertura nas quais seria difícil de impor a fronteira.

Na próxima tabela (Tabela 5.1) é descrita a configuração do modelo desenvolvido para estudar a dispersão da pluma do emissário submarino da Foz do Arelho, que recorre à filosofia de modelos encaixados.

Tabela 5.1- configuração do modelo desenvolvido para estudar a pluma do emissário submarino.

Nível	1	2	3	4	5
Zona da Malha	costa Portuguesa e Galiza	Aveiro-Sines	Nazaré-Peniche	Lagoa de Óbidos e zona costeira adjacente	Zona de descarga do emissário da Foz do Arelho
Número de Pontos	324x218	296x215	185x376	102x132	166x195
Passo espacial mínimo (m)	2000	700	250	80	25
Passo Temporal (seg.)	80	40	20	10	5
Discretização Vertical	⊗	⊗	⊗	⊗	10 camadas (cartesianas)
Componentes Modeladas	Hidrodinâmica	Hidrodinâmica	Hidrodinâmica	Hidrodinâmica+ Salinidade e Temperatura	Hidrodinâmica, diluição inicial + dispersão da pluma do emissário
Fluxo	Barotrópico	Barotrópico	Barotrópico	Barotrópico	Baroclínico
Maré Imposta	√	⊗	⊗	⊗	⊗
Ondas	⊗	⊗	⊗	√	√
Esquema de Advecção	Upwind 1ª Ordem	Upwind 1ª Ordem	Upwind 1ª Ordem	Upwind 1ª Ordem	TVD
Descargas	⊗	⊗	⊗	Rio Arnóia+Real, e Rio da cal	Lagoa de Óbidos
Interface água-atmosfera	Vento	Vento	Vento	Vento, temperatura, radiação, humidade relativa, fluxos de calor	Vento, temperatura, radiação, humidade relativa, fluxos de calor
Relaxação (U,V)	⊗	Banda de onze células	Banda de onze células	Banda de onze células	⊗

5.2. Implementação do Sistema

Neste apartado é descrita a implementação do modelo, a qual passa pela montagem (domínios de estudo e condições de fronteira) e validação (dados de campo *vs* modelo). Deste modo, são descritos os dados batimétricos, as condições de fronteira e dados de campo usados para a validação dos resultados previstos pelo modelo.

5.2.1. Dados

5.2.1.1. Batimetrias

As batimetrias dos modelos de maior escala foram feitas com base na informação do GEBCO (*General Bathymetric Chart of the Oceans* - <http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/gebco/>). Esta informação foi complementada com outra informação batimétrica, proveniente de cruzeiros efectuados no âmbito do projecto EUROSTRATAFORM (*European Margin Strata Formation*) (IST, 2003) (Figura 5.2). As batimetrias dos modelos locais (Figura 5.3), foram efectuadas com base na informação recolhida no âmbito do projecto MAMBO (Monitorização Ambiental da Lagoa de Óbidos) ao abrigo do qual foram efectuados levantamentos sucessivos na Lagoa de Óbidos e zona costeira adjacente entre 2000 e 2004 (IH, 2001a), (IH, 2001b), (IH, 2002a), (IH, 2002b). Na parte de mar, utilizou-se ainda como informação complementar, os dados obtidos a partir da digitalização da carta náutica (carta hidrográfica 34) produzida pelo IH. Para este trabalho foram seleccionados os levantamentos de 2002, por corresponderem a um período para o qual estavam disponíveis as medidas de correntes e níveis.

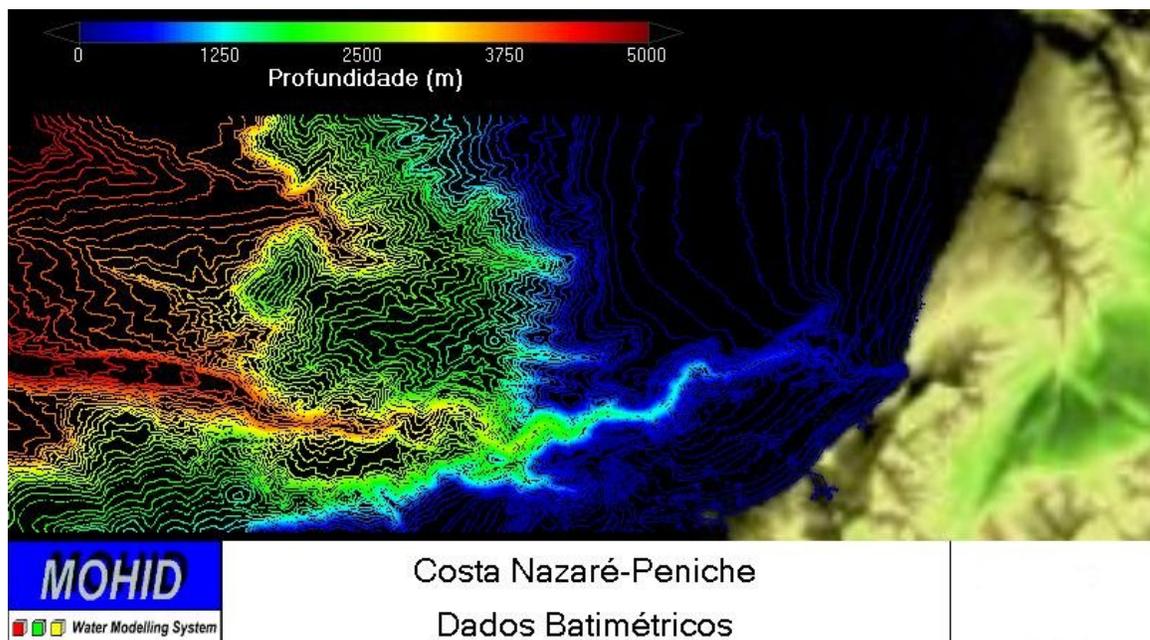


Figura 5.2- Dados batimétricos da zona costeira entre Nazaré-Peniche.

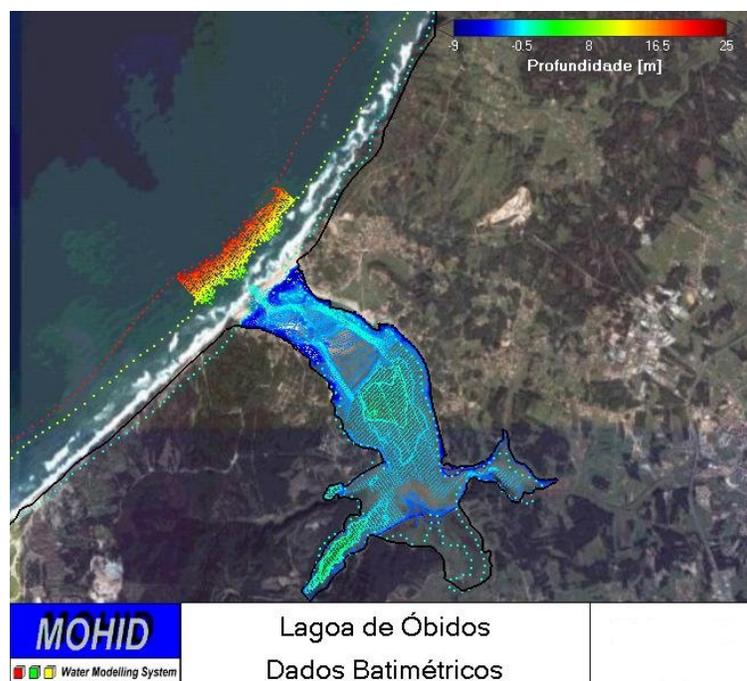


Figura 5.3-Dados batimétricos utilizados para efectuar a batimetria da Lagoa de Óbidos e zona costeira adjacente.

5.2.1.2. Níveis e correntes

Os dados de campo são fundamentais porque permitem validar o modelo implementado garantindo assim um suporte de base para todos os cenários simulados. Os dados de campo utilizados neste trabalho para validar o modelo hidrodinâmico advêm do projecto MAMBO (IH, 2001a), (IH, 2001b), (IH, 2002a), (IH, 2002b). Este projecto foi solicitado pelo Instituto da Água (INAG) ao Instituto Hidrográfico (IH), no sentido de ser efectuada uma monitorização ambiental da Lagoa de Óbidos durante um período de 8 meses, com início a 24 de Outubro de 2000.

No início do programa de monitorização foram instaladas três estações lagunares no interior da Lagoa de Óbidos, uma estação litoral de observação na zona exterior e uma estação meteorológica automática para recolha de dados meteorológicos na zona.

A estação litoral de observação é composta por um *Acoustic Doppler Current Profiler* (ADCP), fundeado na zona exterior da lagoa, entre as batimétricas dos 20 e 30 metros (referidas ao zero hidrográfico). Esta estação permitiu o registo em contínuo dos níveis médios da superfície livre (nível médio do mar), agitação marítima (altura e direcção da ondulação) e o perfil vertical das correntes. Os valores disponíveis foram medidos para um período contínuo desde 14 de Novembro de 2000 a 6 de Junho de 2001. A amostragem foi feita de 10 em 10 minutos e a várias profundidades no caso das correntes.

As três estações lagunares foram colocadas em locais pré-determinados pelo INAG, tendo sido instalados em cada uma delas marégrafos digitais que permitiram o registo em contínuo do nível de superfície livre (maré). As medições de correntes no interior da lagoa foram realizadas com recurso a um ADCP. Estas foram medidas em três secções localizadas ao longo do canal principal para dois períodos distintos (Novembro 2000 e Maio 2001). A localização das estações de monitorização pode ser observada na Figura 5.4.

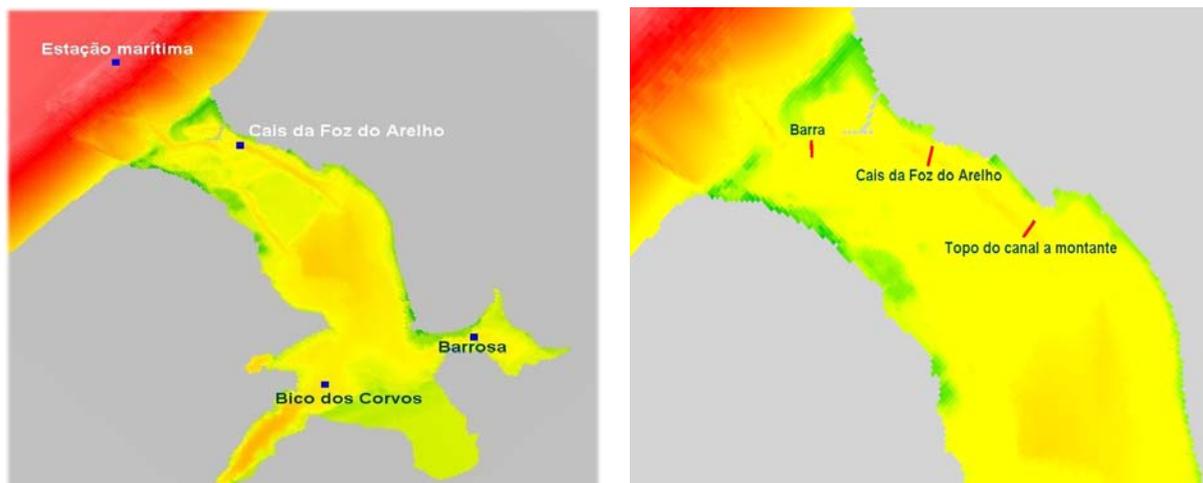


Figura 5.4- Localização dos marégrafos e secções no interior da Lagoa de Óbidos e da estação litoral de observação no exterior desta.

5.2.1.3. Parâmetros físico-químicos, indicadores microbiológicos, nutrientes e Clorofila-*a*

Os dados obtidos através do programa de monitorização na Lagoa de Óbidos e emissário submarino da Foz do Arelho, desde Outubro de 2004 a Janeiro de 2008, foram utilizados para compreender a zona de estudo, apoiar a modelação e avaliar o impacto da descarga do emissário submarino de acordo com a legislação.

O programa de monitorização na zona costeira e Lagoa de Óbidos tem campanhas sazonais para medição de grandezas físico – químicas⁴, biológicas⁵ e microbiológicas⁶ relevantes para avaliar a qualidade da água após a entrada em funcionamento do emissário submarino da Foz do Arelho na perspectiva da Directiva Quadro da Água. As campanhas de monitorização na Lagoa de Óbidos, compreenderam 6 estações de amostragem (LG#2 a LG#5, ver Figura 5.5) em duas situações de maré (preia-mar e baixa-mar) na coluna de água. Uma das estações fica localizada junto à foz (LG#2), duas no corpo central da Lagoa (LG#3a e LG#3b), uma perto da descarga do Rio Arnóia/Real

⁴ Os parâmetros físico-químicos incluíram a medição de salinidade, temperatura, pH, turbidez, sólidos suspensos totais (SST) e oxigénio dissolvido (OD).

⁵ As grandezas biológicas incluíram a determinação dos principais nutrientes azotados (amónia, nitrato e nitrito) e fosfatados (ortofosfato e fósforo total) e Clorofila-*a*.

⁶ Os indicadores microbiológicos incluíram a determinação de *Bactérias Coliformes* ou coliformes totais, *Bactérias Coliformes Termotolerantes* ou coliformes totais, *Escherichia Coli* e *Enterococos*

(LG#3) e duas nos braços da Lagoa: Barrosa (LG#4) e Bom Sucesso (LG#5). Na zona costeira a amostragem foi feita a três profundidades (superfície~1 m, meio~10 m e fundo~20) em cinco estações (Figura 5.5). Paralelamente, foram feitos perfis verticais dos principais parâmetros físico-químicos com uma sonda multiparamétrica (YSI 6600 EDS: www.yisi.com). As estações #2 e #3 estão localizadas a 1 km a Norte e a Sul, respectivamente do ponto de descarga (EMAO#1) e as estações EMAO#4 e EMAO#5 a 500 m para Este e Oeste, respectivamente. Foram adoptadas estas estações com base no conhecimento adquirido através dos dados de campos de correntes na zona de estudo.

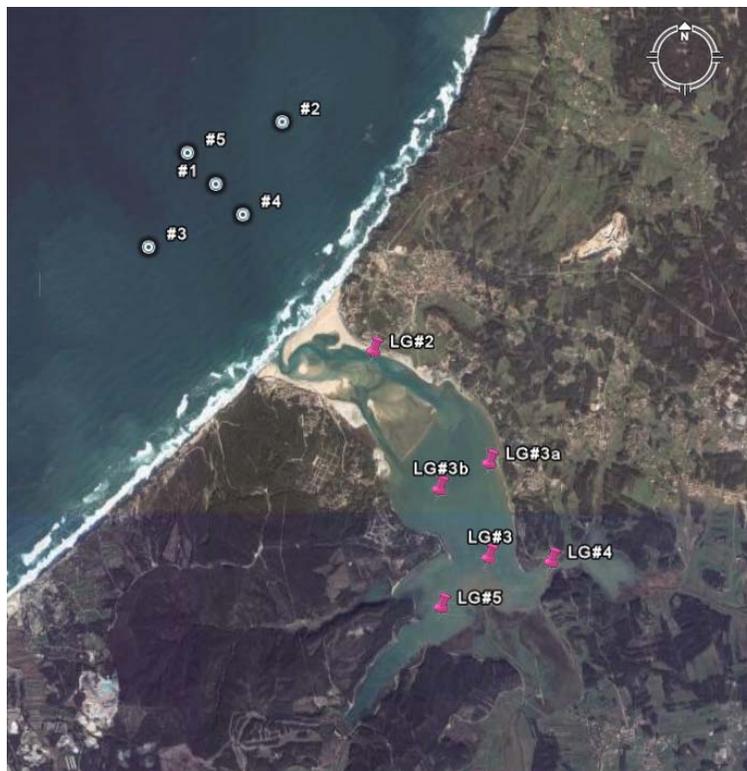


Figura 5.5- Localização das estações de amostragem na Lagoa de Óbidos e emissário submarino da Foz do Arelho.

Para além da monitorização da Lagoa de Óbidos e da zona costeira onde descarrega o emissário submarino da Foz do Arelho, foi ainda monitorizada a zona Balnear da Foz do Arelho, durante a época balnear de 2007. As campanhas, foram mais ou menos quinzenais, com início a 4 de Junho de 2007 e fecho a 30 de Agosto de 2007, perfazendo um total de 7 campanhas. A recolha foi feita em 5 locais (Figura 5.6), para determinação dos principais indicadores microbiológicos. Uma das estações fica localizada no interior da lagoa junto à margem Sul (FA#5: Foz do Arelho Bom Sucesso), outra perto da margem Norte (FA#4: Foz do Arelho Lagoa) e três ao longo da praia da praia da Foz do Arelho, distando cerca de 500 m (FA#1-FA#3: Foz do Arelho Mar).



Figura 5.6. Localização das estações de amostragem na zona balnear da Foz do Arelho: Foz do Arelho-Mar, Foz do Arelho-Lagoa e Foz do Arelho-Bom Sucesso.

5.2.2. Condições de fronteira

As condições de fronteira para forçar o sistema implementado são descritas de seguida. Estas incluem: condições de fronteira aberta (maré e agitação marítima), condições de fronteira fechadas (rios e valas de drenagem afluentes à Lagoa de Óbidos) e forçamento atmosférico (como por ex. ventos, radiação solar, temperatura do ar).

5.2.2.1. Maré

O maior nível, costa Portuguesa, foi forçado com a solução global de maré calculada pelo modelo global FES95.2 (Le Provost *et al.*, 1998). A partir deste domínio, são fornecidas as condições de fronteira de oceano aberto para os seguintes domínios de modelos encaixados.

5.2.2.2. Forçamento atmosférico

O forçamento atmosférico do modelo é conseguido a partir das previsões de um modelo meteorológico. O modelo em questão é um modelo operacional para a costa Portuguesa, desenvolvido no Instituto Superior Técnico na Secção de Ambiente e Energia e coordenado pelo Prof. Delgado Domingos, que se baseia no modelo MM5 (*Mesoscale Model* - <http://meteo.ist.utl.pt>). Este modelo utiliza três domínios de resolução diferente: $dx=81$ km, $dx=27$ km e $dx=9$ km (Figura 5.7).

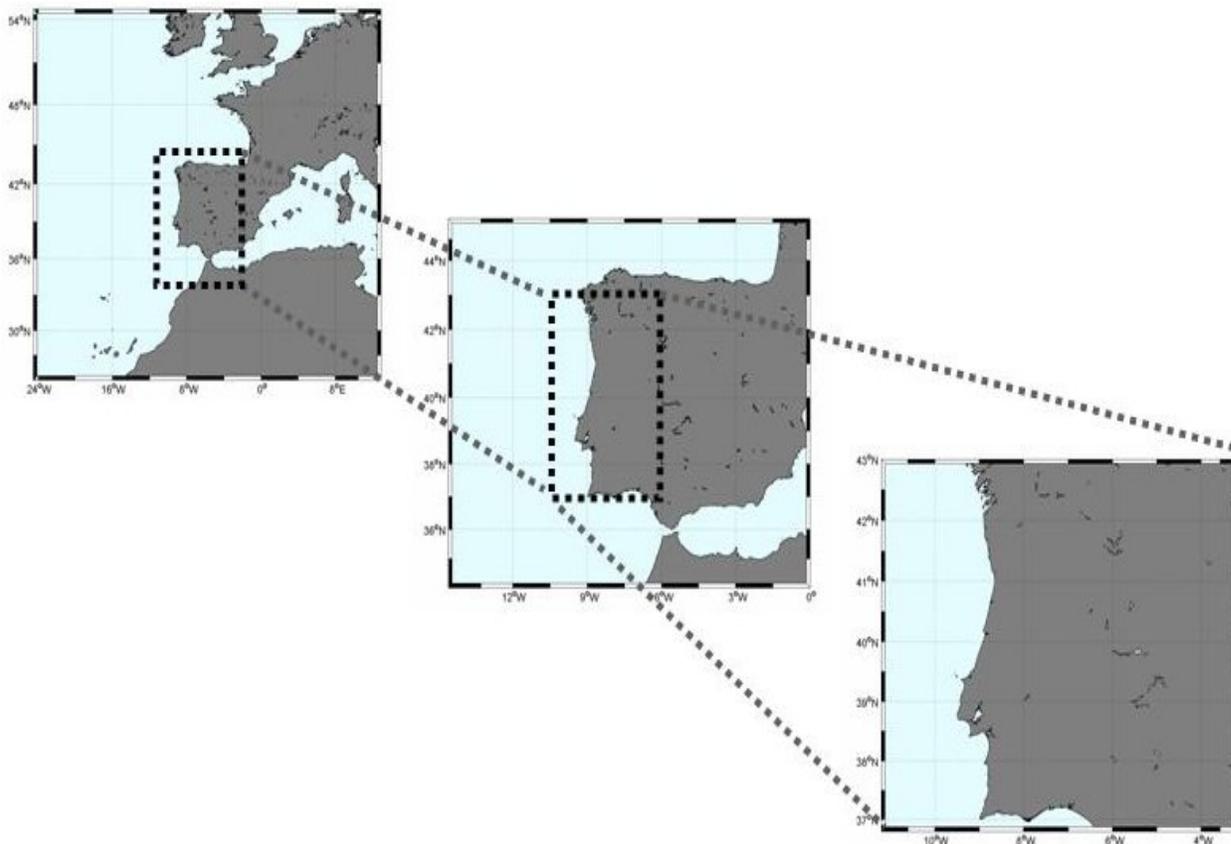


Figura 5.7. Domínios de resolução do modelo MM5, começando pelo modelo de menor resolução (81km) para o modelo de maior resolução (9km).

As previsões atmosféricas fornecidas pelo modelo MM5 são horárias e foram interpoladas para a malha de cálculo do modelo MOHID, para os períodos simulados. Cada domínio de estudo é forçado de acordo com a largura da malha de cálculo do modelo atmosférico. O domínio de nível 1 é forçado com as malhas de 27 e 81 km, o domínio de nível 2 com a malha de 27 km, e os restantes domínios (nível 3, 4 e 5) com a malha mais fina ou seja de 9 km. Nos domínios de maior escala, para além da variabilidade temporal é possível considerar a variabilidade espacial das propriedades atmosféricas no forçamento. Dada a largura da malha mais fina do modelo MM5 e face à dimensão da lagoa e zona costeira adjacente, as previsões meteorológicas são iguais em cada ponto da malha e portanto, não é considerada variabilidade espacial das propriedades atmosféricas.

5.2.2.3. Agitação marítima

A simulação da agitação marítima na embocadura da Lagoa de Óbidos, foi efectuada com base no modelo de propagação da energia da onda (STWAVE). Basicamente o que se fez foi, correr o modelo com uma malha fina junto à costa (10 m), para posterior cálculo das tensões de radiação com base nos principais parâmetros característicos das ondas na zona de estudo (i.e. altura, período e

direcção). As tensões de radiação obtidas foram interpoladas para a malha de cálculo do modelo MOHID, aplicada na Lagoa de Óbidos e zona costeira adjacente.

5.2.2.4. Afluências de água doce

Foi necessário estimar o caudal dos principais afluentes à Lagoa de Óbidos uma vez que não existiam dados disponíveis de caudal para impor no modelo. Deste modo, foi assumido que o caudal destas descargas é controlado pela precipitação e optou-se por estimar um caudal médio com base na precipitação.

A estação meteorológica gerida pelo INAG (www.inag.pt) mais próxima da zona de estudo que tem valores de precipitação disponíveis é a estação de Óbidos (circulo verde Figura 5.8). Com base na topografia é possível delimitar as bacias hidrográficas que drenam para a Lagoa de Óbidos tornando possível determinar a área total drenada (Figura 5.8).

Da delimitação das bacias hidrográficas é possível verificar que existem 5 bacias hidrográficas que drenam para a Lagoa de Óbidos, perfazendo uma área total de 450 km². A maior bacia é a do Rio Arnóia e Real que ocupa cerca de 90% da bacia hidrográfica da Lagoa de Óbidos. A bacia do Rio da Cal (segunda bacia mais importante) tem cerca de 18 km², desagua no braço da Barrosa e drena a região das Caldas da Rainha. A vala do Ameal tem cerca de 10 km² e desagua no braço do Bom Sucesso. A Vala do Ameal é a menos relevante porque drena uma área pequena. As pequenas bacias de jusante ocupam uma área total de cerca de 30 km² e são pouco importantes.

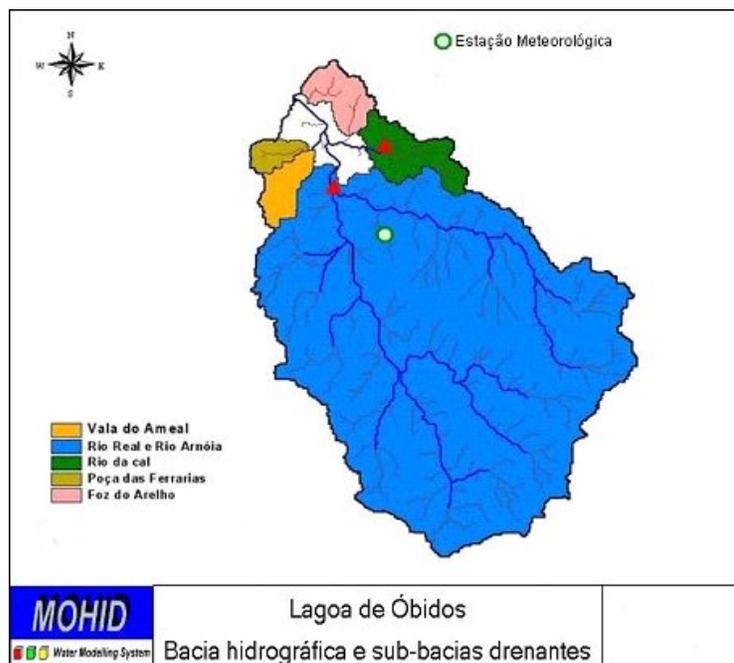


Figura 5.8- Identificação das sub-bacias hidrográficas drenantes para a Lagoa de Óbidos e da estação meteorológica de Óbidos (monitorização do INAG- 17C/07).

A área de cada bacia multiplicada pela precipitação permite estimar o valor de caudal (Figura 5.9). Deste modo os caudais foram estimados com base na chuva medida na estação de Óbidos, admitindo que 1/3 da chuva origina caudal no rio, sendo os restantes 2/3 retidos e evapotranspirados. Nesta hipótese, os caudais fluviais seriam os indicados na Figura 5.9 e os valores médios anuais os indicados na Tabela 5.2. A Tabela 5.3 mostra valores referidos na literatura em função das características do ano hidrológico que são concordantes com os estimados a partir da chuva.

A variação sazonal e inter-anual do caudal, permite verificar que o Rio Arnóia e Real e Rio Cal, só apresentam caudais significativos no Inverno, chegando a registar cheias em anos de maior pluviosidade. Nos meses estivais, em regra, a grande maioria das linhas de água seca e o caudal das restantes é quase exclusivamente constituído por águas residuais.

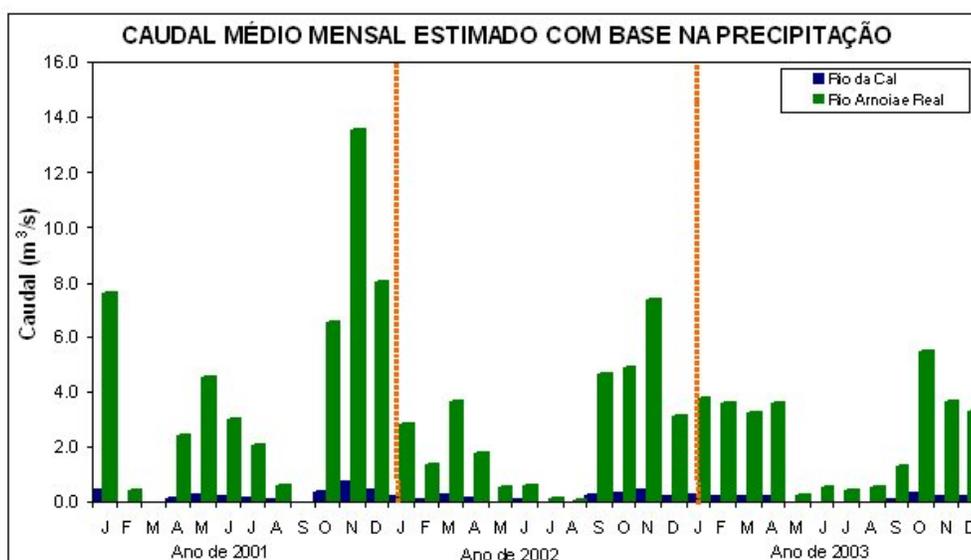


Figura 5.9- Caudal médio mensal dos principais afluentes (Rio Arnóia e Cal), estimado com base na precipitação medida na estação de Óbidos e na área da respectiva sub-bacia.

Tabela 5.2-Valores de caudais médios anuais estimados com base na precipitação para os anos de 2001, 2002 e 2003.

Ano	Caudal (m ³ /s)	
	Bacia do Rio Arnóia e Real	Bacia do Rio da Cal
2000/2001	4.06	0.22
2001/2002	2.58	0.14
2002/2003	2.49	0.13

Tabela 5.3-Valores característicos de caudal anual (m³/s) referidos na literatura (Adaptado de VÃO, 1991).

Bacia Hidrográfica	Muito Seco	Seco	Médio	Húmido	Muito Húmido
Rio Cal	0.01	0.07	0.14	0.21	0.28
Rio Arnóia	0.07	0.52	0.99	1.47	1.92
Rio Real	0.18	1.05	1.95	2.87	3.73
Vala do Ameal	0.00	0.04	0.08	0.12	0.17

5.2.3. Condições iniciais

Os dados de salinidade e temperatura adquiridos ao longo do projecto de monitorização (IST, 2006) foram utilizados para impor as condições iniciais no modelo da Lagoa de Óbidos e na zona costeira adjacente. Na lagoa foi usada a distribuição espacial de temperatura e salinidade obtida ao longo das campanhas de monitorização e na zona costeira um perfil vertical característico.

5.3. Validação

O modelo simulou os níveis e correntes em cada domínio de estudo para o período de 1 Outubro a 31 de Dezembro de 2000, sendo o primeiro mês considerado de *spin-up*. Considera-se como *spin-up* o tempo necessário para que o modelo desenvolva a dinâmica completa dos modelos locais e de maior escala, a mais aproximada à situação real, a partir das condições iniciais impostas. A análise é feita somente para a altura em que existem dados disponíveis, ou seja Novembro a Dezembro de 2000.

A validação dos modelos de maior escala, costa Portuguesa e Aveiro-Sines, foi feita com base nos resultados de níveis. Para tal, comparam-se os resultados do modelo com os resultados de níveis de maré determinados por um programa que se baseia nas componentes de maré (*TidePrev*), obtidas a partir de resultados históricos de marégrafos. No caso do modelo de Nazaré-Peniche, os níveis não foram comparados porque os marégrafos ficavam situados próximos das fronteiras do domínio. Para o modelo da Lagoa de Óbidos a validação foi efectuada com base na comparação de níveis nas três estações de monitorização (Cais da Foz do Arelho, Barrosa e Bico dos Corvos) e de velocidades da corrente na Barra, Cais da Foz do Arelho e Topo do Canal. Por fim o modelo da zona costeira foi validado com dados de correntes a três profundidades.

Para verificar a qualidade final dos resultados obtidos com o modelo em cada nível, surge a necessidade de utilizar ferramentas estatísticas para análise dos resultados obtidos. Deste modo os resultados foram avaliados em termos de valor médio (\bar{x}) e respectivo desvio padrão (σ), coeficiente de correlação (R), raiz do erro quadrático médio (REQM) ou *root mean square error* (RMSE), bias ou “enviesamento” e *skill*. O valor médio é o valor representativo do conjunto de dados, referindo-se no fundo ao valor com maior probabilidade de ocorrência. Sendo o desvio padrão uma medida de dispersão, podemos dizer que quanto maior a dispersão dos dados, maior o valor do mesmo. O coeficiente de correlação permite avaliar o grau de correlação entre os dados do modelo e os observados. O RMSE ou REQM, representa a raiz do erro quadrático médio entre a previsão do modelo e a observação, indicando no fundo o erro sistemático. Quanto menor o valor fornecido pelo RMSE, melhor é a aproximação. O enviesamento permite perceber se o modelo está a sobrestimar ou subestimar as medidas. Por fim, o skill ou performance do modelo, varia entre 0 e 1. Valores próximos de 1 evidenciam uma boa performance do modelo.

5.3.1. Costa Portuguesa -Nível 1

O modelo da costa (nível 1) foi validado em treze marégrafos (Corunha, Villa Garcia, Vigo, Viana do Castelo, Leixões, Peniche, Cascais, Sesimbra, Sado Baliza, Sines, Barra de Faro, Guadiana de Bonanza), cuja localização se encontra na Figura 5.1. Os níveis do modelo foram comparados com os níveis de maré obtidos pelo *TidePrev* para os marégrafos referidos anteriormente. Na Figura 5.10 apresenta-se a comparação directa de níveis do modelo e níveis obtidos pelo *TidePrev* em dois marégrafos escolhidos a título de exemplo.

Na Tabela 5.4 apresenta-se o valor médio, coeficiente de correlação, RSME, bias e skill em todos os marégrafos. De um modo geral podemos dizer que o modelo apresenta uma boa resposta à variabilidade dos dados das componentes de maré, uma vez que foram obtidos coeficientes de correlação elevados, com valores acima de 0.94 (ver Figura 5.11). As correlações mais baixas (cerca de 0.94 a 0.95) foram obtidas em Guadiana, Sines e Peniche. Este resultado é reflexo do número de componentes de maré utilizadas como base, para calcular os níveis. Por exemplo, em Cascais foram utilizadas 32 componentes de maré face a 9 componentes em Guadiana e Peniche. Quanto ao enviesamento (Figura 5.12), podemos dizer que o modelo apresenta pouco viés, uma vez que os valores são próximos de zero. Na Figura 5.13 apresenta-se um gráfico com a raiz do erro quadrático médio. Embora os valores do RMSE não se afastem muito de uns locais para outros, podemos no entanto dizer que as zonas de Guadiana, Sines e Peniche, têm uma tendência para apresentar valores ligeiramente superiores para a raiz do erro quadrático médio.

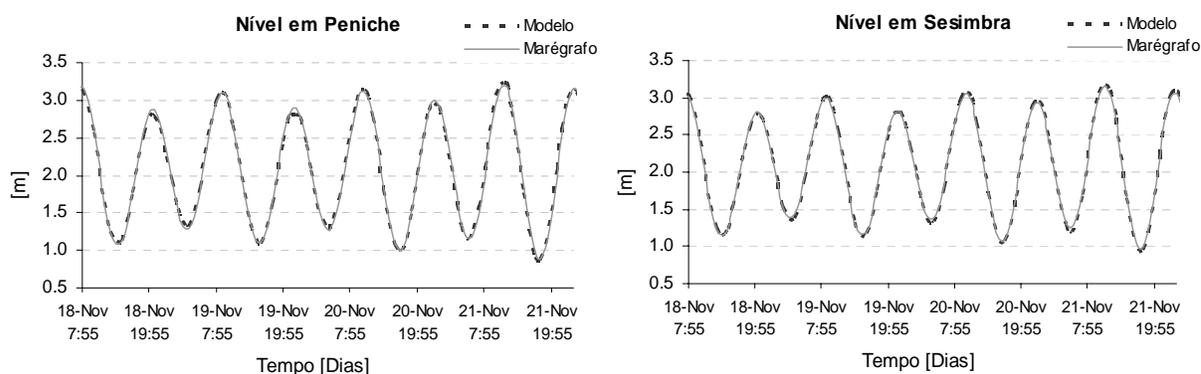


Figura 5.10- Comparação do nível obtido a partir de componentes de maré com os resultados do modelo da costa Portuguesa em Peniche e Sesimbra.

Tabela 5.4- Médias e desvio padrão dos resultados do modelo das observações, coeficiente de correlação, RMSE, bias e skill para o modelo de nível 1.

Marégrafos	$(\bar{x} \pm \sigma)$ (m)		R (m)	RMSE (m)	BIAS (m)	Skill
	Medidas	Modelo				
Bonanza	2.08±0.79	2.08±0.84	0.976	0.185	0.003	0.98
Guadiana	2.09±0.80	2.08±0.86	0.966	0.221	0.011	0.95
Barra de Faro	2.08±0.86	2.08±0.83	0.976	0.185	0.002	0.99
Sines	2.08±0.85	2.08±0.84	0.966	0.220	0.005	0.95
Sado Baliza	2.08±0.84	2.08±0.84	0.978	0.177	0.003	0.99
Sesimbra	2.08±0.84	2.08±0.84	0.980	0.170	0.003	0.99
Cascais	2.08±0.84	2.08±0.85	0.979	0.171	-0.002	0.99
Peniche	2.08±0.90	2.08±0.88	0.966	0.232	0.005	0.94
Leixoes	2.09±0.93	2.08±0.91	0.977	0.197	0.008	0.99
VianadoCastelo	2.08±0.90	2.08±0.92	0.975	0.202	0.004	0.99
Vigo	2.08±0.96	2.08±0.94	0.979	0.196	0.004	0.99
Vilagarcia	2.08±0.98	2.08±0.96	0.976	0.214	0.004	0.99
Corunha	2.08±1.03	2.08±1.01	0.981	0.203	0.005	0.98

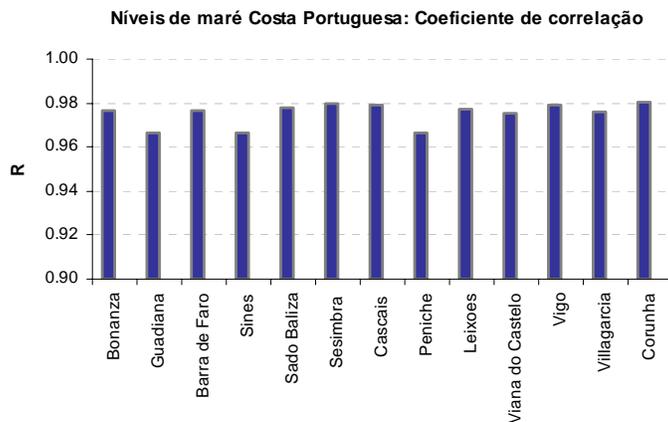


Figura 5.11- Coeficiente de correlação para os níveis de maré na costa Portuguesa.

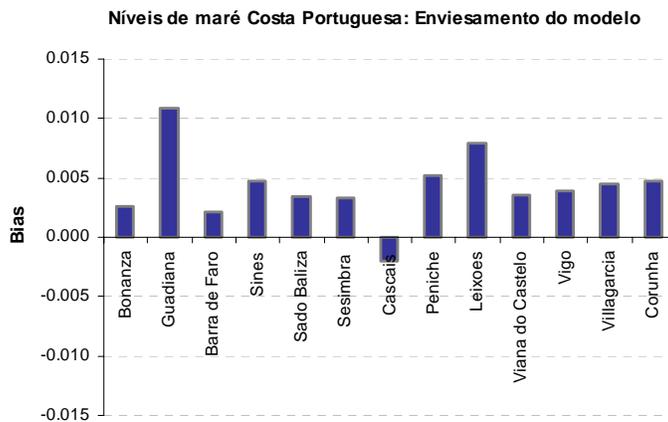


Figura 5.12- Enviesamento do modelo para os níveis de maré na costa Portuguesa.

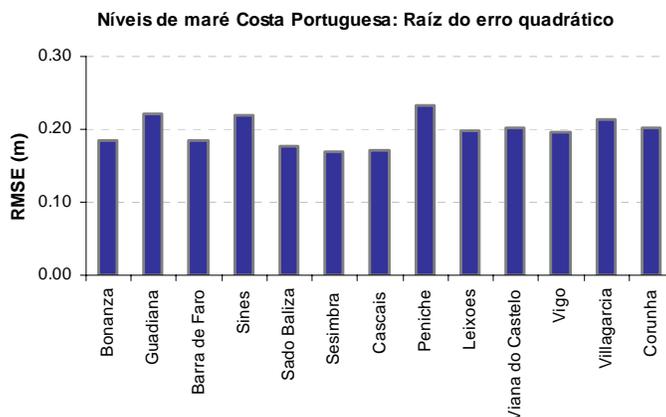


Figura 5.13- Raiz do erro quadrático médio (RMSE) do modelo para os níveis de maré na costa Portuguesa.

5.3.2. Costa Aveiro-Sines -Nível 2

O modelo da costa Aveiro-Sines (nível 2) foi validado em três marégrafos (Peniche, Sesimbra e Cascais). Na Tabela 5.5 apresenta-se o valor médio, coeficiente de correlação, RSME, bias e skill para as estações referidas anteriormente.

A Figura 5.14 compara o coeficiente de correlação do modelo para os níveis de maré no nível 1 (costa Portuguesa) e nível 2 (Aveiro-Sines) nos mesmos locais, e a Figura 5.15 compara a raiz do erro quadrático médio. Os resultados mostram que, no nível 2 o coeficiente de correlação foi mais elevado que no nível 1, para os mesmos locais. Veja-se que, também o RMSE foi menor no nível 2. Este resultado é reflexo da malha, uma vez que este domínio apresenta uma malha menos grosseira que o domínio anterior. Esta é uma das vantagens do *downscaling*, ou seja, a melhoria da solução à medida que se vai refinando a malha.

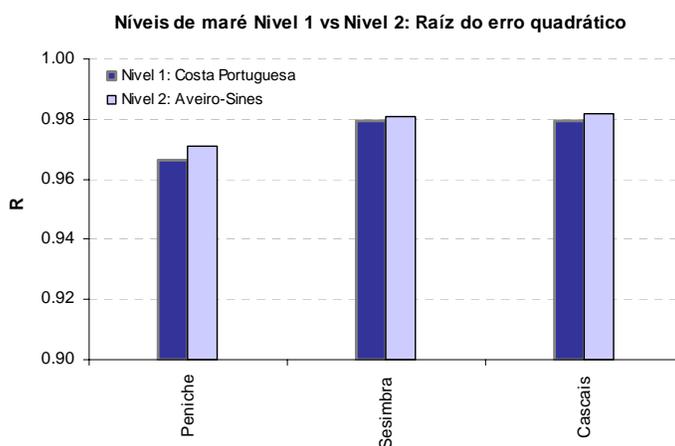


Figura 5.14- Coeficiente de correlação do modelo para os níveis de maré no nível 1 (costa Portuguesa) e no nível 2 (Aveiro-Sines).

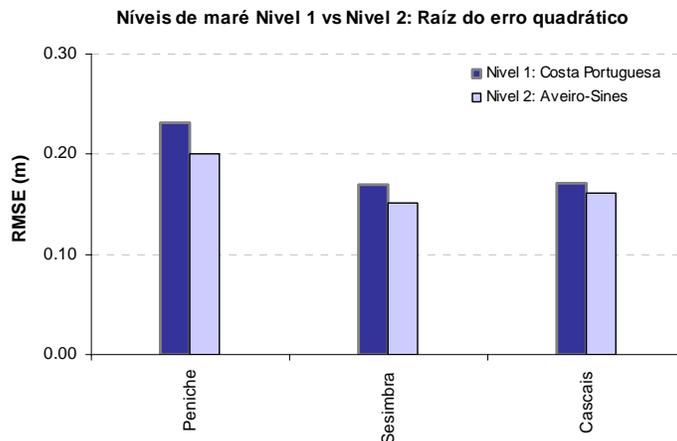


Figura 5.15- Raiz do erro quadrático médio (RMSE) do modelo para os níveis de maré no nível 1 (costa Portuguesa) e no nível 2 (Aveiro-Sines).

Tabela 5.5- Médias e desvio padrão dos resultados do modelo e das observações, coeficiente de correlação, RMSE, bias e skill no modelo de nível 2.

Estações	$(\bar{x} \pm \sigma)$ (m)		R (m)	RMSE (m)	BIAS (m)	Skill
	Medidas	Modelo				
Peniche	2.08±0.90	2.08±0.89	0.971	0.201	0.004	0.98
Sesimbra	2.08±0.84	2.08±0.84	0.981	0.152	0.002	0.99
Cascais	2.08±0.84	2.08±0.84	0.982	0.161	-0.001	0.99

5.3.3. Lagoa de Óbidos -Nível 4

A validação do modelo hidrodinâmico da Lagoa de Óbidos foi efectuada com base na comparação de níveis nas estações do Cais da Foz do Arelho, Barrosa e Bico dos Corvos e de velocidades da corrente na Barra, Cais da Foz do Arelho e Topo do Canal.

5.3.3.1. Níveis

A Figura 5.16 mostra um período de simulação longo e compara os níveis previstos pelo modelo e as medidas na estação do Cais da Foz do Arelho. Estes resultados foram obtidos com o forçamento isolado da maré e mostram que o modelo acompanha as medidas em alguns períodos, mas não consegue representar toda a sua variabilidade. A maré consegue explicar grande parte da variabilidade das medidas, existindo no entanto um período onde não existe correlação entre modelo e medidas. Durante este período existe uma sobrelevação do nível na lagoa, que não é acompanhada pelo modelo. Este resultado foi também visível nas outras estações da lagoa, mostrando que devem ser considerados outros efeitos para além do forçamento da maré. Para perceber a importância do forçamento da maré na variabilidade das medidas foi usado um filtro de baixas-frequências (o qual remove processos de alta-frequência), concluindo-se que a maré explica apenas 80% da variabilidade das medidas. Foram simulados outros cenários onde foram considerados valores diferentes para o caudal dos rios. O efeito das descargas não tem importância para o aumento dos níveis. Antes de incluir o

forçamento adicional das ondas foi feita uma análise aos dados de ondas e níveis de maré, para um período com ocorrência de ondas de alta energia e outro com ondas de baixa energia. A análise mostrou que existia uma correlação de cerca de 20% entre a altura significativa das ondas (H_s) e os níveis no interior da lagoa para o período de ondas de alta energia. Pelo contrário, na ocorrência de ondas de baixa energia não foi encontrado qualquer tipo de correlação. Esta análise permitiu concluir que para além do forçamento da maré devia ser considerado o forçamento das ondas.

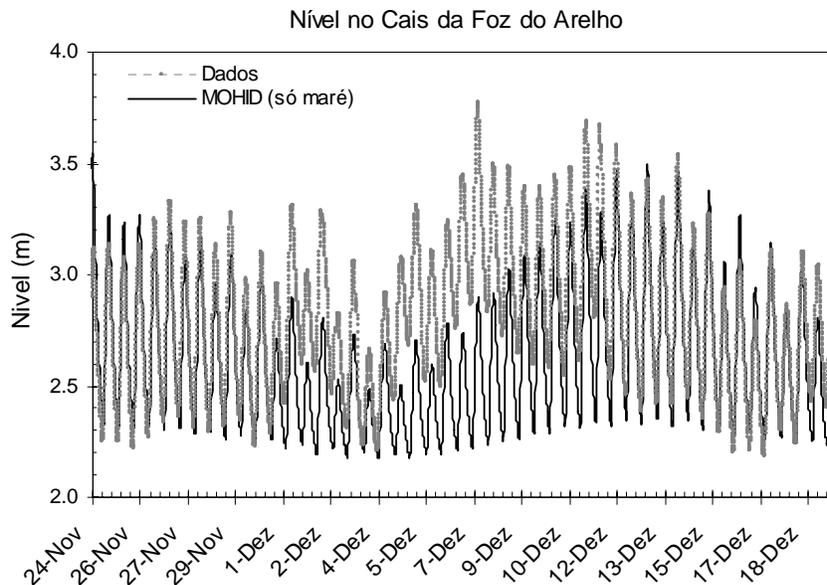


Figura 5.16- Níveis previstos pelo modelo e sua comparação com as medidas, quando se considera o forçamento isolado da maré.

Os resultados obtidos para um período com ondas de alta energia são apresentados na Figura 5.17. Na mesma figura apresentam-se os resultados obtidos para o forçamento simulados só com maré (Figura 5.17 a) e com ondas e maré (Figura 5.17 b). A Figura 5.18 representa o mesmo tipo de resultados, mas para um período de ondas de baixa energia. Os resultados mostram que o forçamento combinado das ondas e maré explica a variabilidade das medidas. O modelo consegue acompanhar a tendência das medidas e reproduzir as sobrelevações do nível de água. As ondas de alta energia (i.e. H_s maior que 3m), podem fazer subir os níveis no interior da lagoa na ordem dos 0.4 m. O mesmo não acontece com ondas de baixa energia, uma vez que não induzem nenhuma alteração do nível.

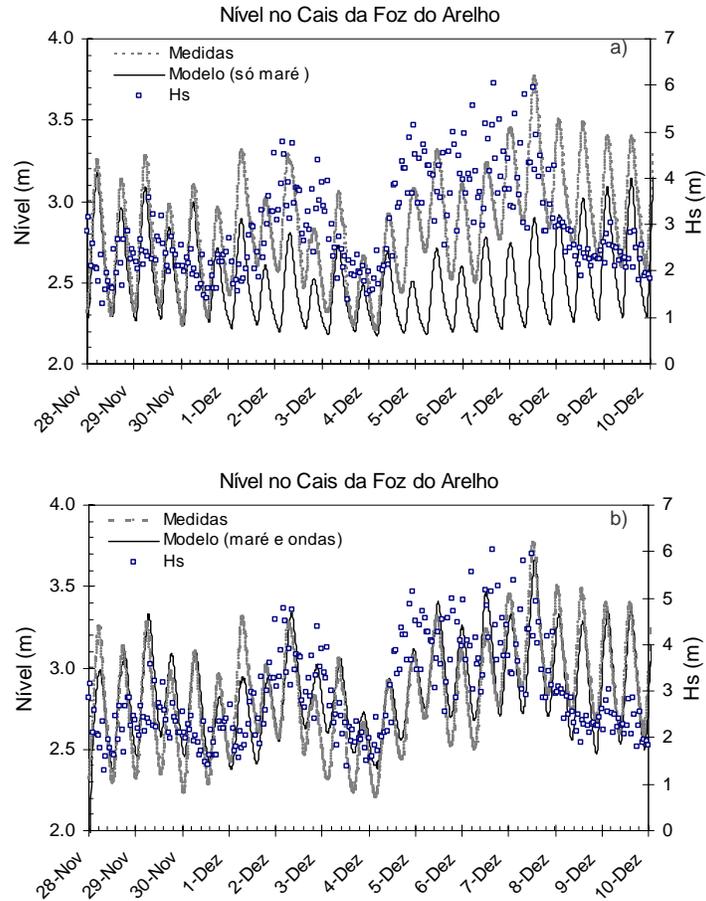
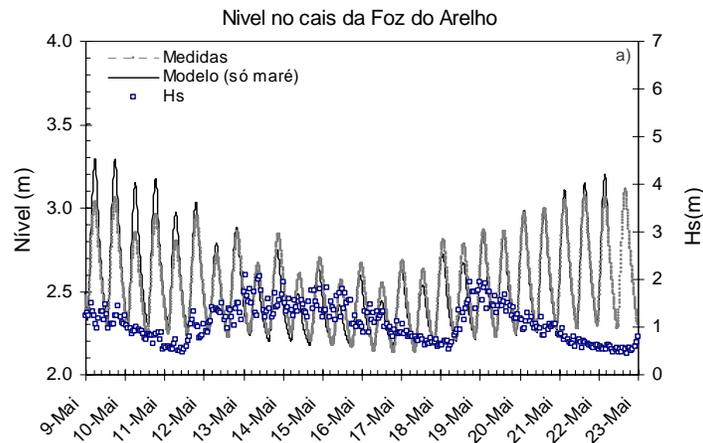


Figura 5.17- Níveis previstos pelo modelo e sua comparação com as medidas, quando se considera o forçamento isolado da maré (a) e o forçamento combinado de ondas e maré (b), para um período onde ocorrem ondas de alta energia.



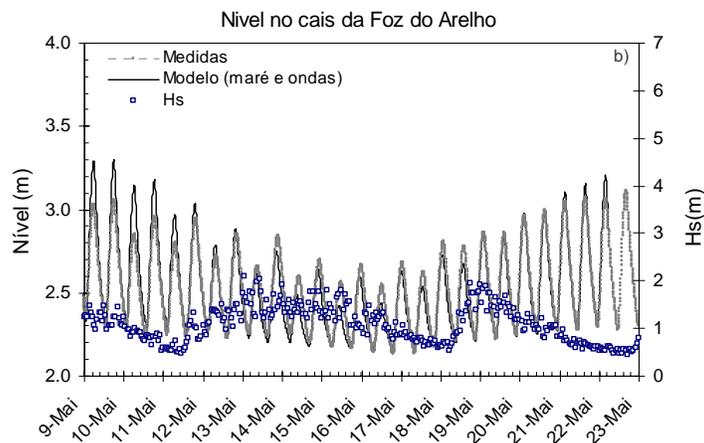


Figura 5.18- Níveis previstos pelo modelo e sua comparação com as medidas, quando se considera o forçamento isolado da maré (a) e o forçamento combinado de ondas e maré (b), para um período onde ocorrem ondas de baixa energia.

A Tabela 5.6 compara os resultados obtidos para o forçamento isolado da maré e o forçamento conjuntos de ondas e maré numa situação de ondas de alta energia. Na Tabela 5.7 apresenta-se a mesma comparação, mas para uma situação de ondas e baixa energia. Os resultados mostram um coeficiente de correlação de 0.90 para o forçamento conjunto de ondas e maré e 0.77 para o forçamento isolado da maré. Isto quer dizer que o modelo consegue reproduzir bem as diferenças entre os dois tipos de forçamentos considerados, evidenciando a importância das ondas no nível da lagoa. Por esta razão, o forçamento isolado da maré apresenta um valor mais elevado de RMSE (1.0). Este valor elevado está claramente associado com o valor do bias. O valor do skill é de cerca de 0.94 para o forçamento combinado de ondas e maré, mostrando que o modelo tende a reproduzir melhor a tendência média das medidas.

Para uma situação de ondas de baixa energia. A correlação foi de cerca de 0.92 para os dois forçamentos considerados. O coeficiente de correlação foi mantido porque, a variabilidade das medidas é a mesma, em ambos os forçamentos considerados. Este resultado mostra a menor importância das ondas de baixa energia na variação do nível na lagoa. O valor de RMSE apresenta um valor baixo, cerca de 0.15 para os dois tipos de forçamentos. O reflexo deste resultado é sentido no valor do bias, uma vez que o valor obtido é muito próximo de zero. O valor de skill é próximo de 1.0 nos dois casos, mostrando uma boa precisão entre as previsões do modelo e as medidas.

Em jeito de conclusão podemos dizer que a maré aparenta ser o mecanismo dominante na hidrodinâmica da Lagoa de Óbidos, embora existam períodos em que se torna necessário considerar o forçamento conjunto de ondas e maré. No entanto, este forçamento só se torna importante em situações de ondas de alta energia. Nestas situações é importante considerar o forçamento conjunto de ondas e maré, uma vez que o forçamento isolado da maré não explica toda a variabilidade dos níveis na lagoa.

Tabela 5.6- Médias e desvio padrão dos resultados e das observações, coeficiente de correlação, RMSE, bias e Skill para um situação de ondas de alta energia no modelo de nível 4

Ondas de alta energia	$(\bar{x} \pm \sigma)$ (m)		R (m)	RMSE (m)	BIAS (m)	Skill
	Medidas	Modelo				
Só Maré	2.8±0.32	2.5±0.25	0.77	1.0	0.32	0.68
Maré e Ondas	2.8±0.32	2.8±0.28	0.90	0.10	-0.008	0.94

Tabela 5.7- Médias e desvio padrão dos resultados e das observações, coeficiente de correlação, RMSE, bias e Skill para um situação de ondas de baixa energia no modelo de nível 4.

Ondas de baixa energia	$(\bar{x} \pm \sigma)$ (m)		R (m)	RMSE (m)	BIAS (m)	Skill
	Medidas	Modelo				
Só Maré	2.5±0.23	2.5±0.27	0.92	0.15	0.002	1.0
Maré e Ondas	2.5±0.22	2.5±0.26	0.92	0.15	0.005	0.90

Uma vez que os fenómenos de *wave set-up*⁷ são comuns em zonas costeiras com praias na sua proximidade, foram analisados os níveis medidos no oceano e dentro da lagoa e em duas situações distintas de ondas, ou seja, alta e baixa energia. Pensou-se nesta comparação, porque em situações de ondas de alta energia ou *storm waves*, os níveis no oceano podem aumentar acima do nível médio (Callaghan *et al.*, 2006). O aumento do nível no lado de fora poderia condicionar o nível medido dentro da lagoa em determinados períodos.

Na Figura 5.19 apresentam-se os níveis medidos no oceano, na estação da Barrosa e no Cais da Foz do Arelho, para um período de ondas de alta energia (a) e ondas de baixa energia (b). As medidas mostram que durante um período de ondas de alta energia os níveis estão quase sempre acima do nível no oceano. Já num período de ondas de baixa energia o mesmo não acontece, uma vez que o nível de maré na lagoa está ao mesmo nível do oceano, pondo em evidência a menor importância das ondas na variação do nível. O nível médio no oceano mantém-se em qualquer situação de ondas, pondo de parte a hipótese formulada inicialmente. Porque será que em determinadas altura de ondas o nível na lagoa aumenta comparado com o nível no oceano? Para perceber e explicar porque esta sobrelevações acontecem quando as ondas são significativamente importantes, foi desenvolvido um modelo simplificado da lagoa, o qual é descrito na secção seguinte.

⁷ *Wave set-up* refere-se ao aumento do nível no oceano acima do nível médio do mar.

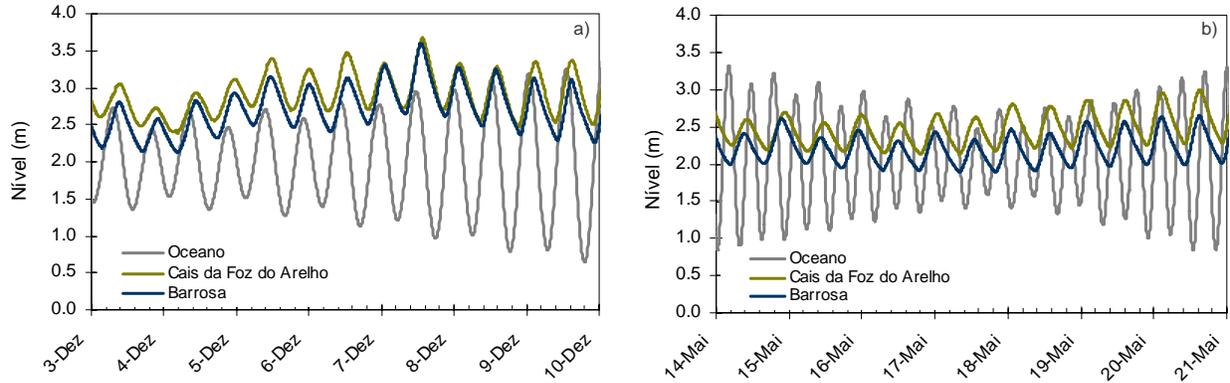


Figura 5.19- Nível medido no oceano, estação do braço da Barrosa e estação do Cais da Foz do Arelho durante um período de ondas de alta energia (a) e ondas de baixa energia (b).

5.3.3.1.1. Modelo simplificado da Lagoa de Óbidos

Para perceber o efeito das ondas na Lagoa de Óbidos, foi desenvolvido um modelo simplificado da lagoa, onde se considerou uma lagoa esquemática como a representada na Figura 5.20. Este modelo, foi facilmente implementado numa folha de excel, e utilizado para fazer previsões dos níveis na lagoa e no oceano, considerando diversos mecanismos forçadores, tal como o forçamento das ondas. Considerando que existe conservação de massa no sistema lagunar, quando se assume que as flutuações da lagoa são uniformes ao longo da área da lagoa, o nível da lagoa pode ser dado por:

$$\eta_L(t + \Delta t) = \eta_L(t) + \Delta t \frac{Q_c(t + \Delta t)}{A_L} \quad (\text{Eq.13})$$

Onde A_L é a área da lagoa, η_L o nível na lagoa, t o tempo, Δt o passo temporal e Q_c o caudal de entrada no canal da lagoa. O caudal de entrada no canal da lagoa foi calculado com base na equação de transporte, considerando a variação de nível associada ao gradiente de pressão, a força de atrito e a força induzida pelas ondas. A equação obtida é dada por:

$$Q_c(t + \Delta t) = Q_c(t) + \Delta t \left(g \frac{\eta_o - \eta_L}{L_c} A_c(t) - C_d \frac{|Q_c(t)| Q_c(t)}{A_c(t)^2} b_c + R_s \cdot b_c \right) \quad (\text{Eq.14})$$

Onde η_o é o nível no oceano, L_c é o comprimento do canal, b_c a largura do canal, R_s a tensão de radiação das ondas, C_d o coeficiente de atrito e A_c a área do canal. O nível no oceano é dado por:

$$\eta_o = A_m \sin(\omega t) \quad (\text{Eq.15})$$

Onde A_m é a amplitude de maré e ω a frequência angular. O coeficiente de atrito é definido através da formula de Manning (Chow, 1973),

$$C_d = gn^2 h_c^{-1/3} \quad (\text{Eq.16})$$

Onde g é a aceleração da gravidade, n é o coeficiente de manning e h_c é a profundidade do canal. A area do canal é dada por:

$$A_c(t) \approx b_c \cdot \left(h_c + \frac{\eta_L + \eta_o}{2} \right) \quad (\text{Eq.17})$$

Onde b_c é a largura do canal, h_c é a profundidade do canal, η_o é o nível no oceano e η_L o nível na lagoa.

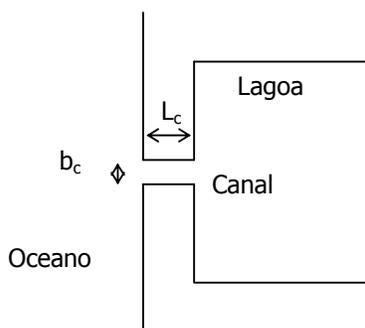


Figura 5.20- Lagoa esquemática.

O modelo simplificado da Lagoa de Óbidos foi utilizado para prever o nível no oceano e no interior da lagoa, considerando as dimensões reais da Lagoa de Óbidos ($A_L=7.0 \times 10^8 \text{ m}^2$, $L_c=150 \text{ m}$, $h_c=1.5 \text{ m}$ e $b_c=25 \text{ m}$). O valor da tensão de radiação das ondas ($R_s=0.16 \text{ m}^2/\text{s}^2$) foi obtido através do modelo STWAVE, tendo como base as características das ondas num período de ondas de alta energia (i.e. $h_s=4\text{m}$, $T=10\text{s}$ e $\text{dir}=315^\circ$ Norte). Na Figura 5.21 a, apresentam-se os resultados obtidos para a Lagoa de Óbidos com e sem o forçamento das ondas. Os resultados mostram um comportamento semelhante ao discutido anteriormente para as medidas, com o nível da lagoa acima do nível do oceano quando existe o forçamento das ondas. A presença das ondas cria uma força no sentido da costa, provocando um aumento do caudal junto ao canal de ligação da lagoa ao mar. Este aumento, é equilibrado através do aumento dos níveis no interior da lagoa. Isto acontece porque o canal de ligação da lagoa com o mar não é capaz de compensar o caudal criado devido ao efeito das ondas. Na Figura 5.21 b apresentam-se os resultados com o forçamento das ondas em três situações: Lagoa de Óbidos com as dimensões reais, canal com o dobro de largura do canal actual da lagoa e o caso do estuário do Tejo. Quando se considera um canal com o dobro das dimensões do canal real,

tende a diminuir-se o aumento do nível na lagoa em relação ao nível do oceano. Isto acontece como resposta à alteração do canal, uma vez que o efeito das ondas tende a ser menos importante com um canal de dimensões maiores. Consequentemente, se o canal da lagoa tivesse a dimensão necessária para compensar o aumento de caudal devido ao efeito das ondas de alta energia, os níveis no interior da lagoa seriam iguais aos níveis no oceano. O mesmo modelo foi aplicado ao estuário do Tejo ($L_c=1 \times 10^4$ m, $h_c=15$ m e $b_c=400$ m) e como se pode ver através dos resultados (Figura 5.21 b) não existe diferença entre o nível no oceano e o nível no interior do estuário. Isto acontece porque o canal do estuário do Tejo é suficientemente grande para compensar o aumento de caudal criado em situações de ondas de alta energia. Nesta situação, o efeito das ondas é atenuado, e como resposta o nível no oceano é semelhante ao nível do estuário.

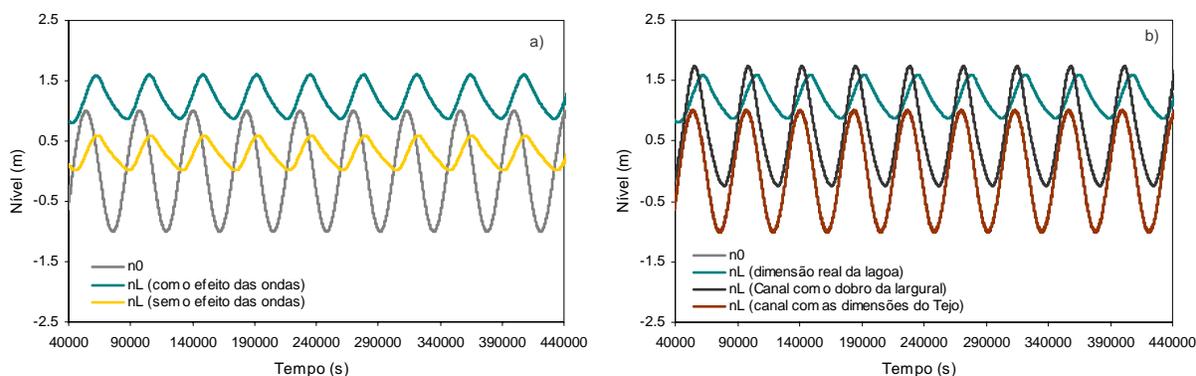


Figura 5.21- Nível previsto com o modelo simplificado para a lagoa e oceano com e sem o efeito das ondas (a). Nível previsto com o modelo simplificado com o efeito das ondas para o oceano, lagoa com o canal real, lagoa com um canal do dobro do real e caso do estuário do Tejo (b).

5.3.3.2. Correntes

Os resultados de correntes previstos pelo modelo e a sua comparação com as medidas para a estação da Barra, Cais da Foz do Arelho e Topo do canal são apresentados na Figura 5.22. Na Tabela 5.8, apresenta-se o valor médio, coeficiente de correlação, RSME, bias e skill para as estações referidas anteriormente.

Os resultados obtidos na estação do Cais e Topo do canal apresentam uma boa concordância com as correntes medidas, com coeficientes de correlação de 0.96 e 0.94, respectivamente. As elevadas correlações com as medidas, indicam que os valores previstos pelo modelo apresentam a mesma tendência das medidas. Os valores obtidos para o RMSE são reflexo da boa concordância entre o modelo e as medidas, uma vez que os erros são baixos (0.07 e 0.05). O valor de skill é próximo de 1.0 nos dois casos, mostrando uma boa precisão entre as correntes previstas pelo modelo e medidas.

Na estação da Barra, obtiveram-se piores resultados comparativamente com as outras estações, com um erro na ordem dos 0.29 e coeficiente de correlação de 0.87. Este resultado teve reflexos em termos do skill, cujo valor foi de cerca de 0.84. Os resultados obtidos, podem estar relacionados com os dados batimétricos, ou seja, o facto de não existir levantamento batimétrico da barra pode em parte condicionar as correntes obtidas, uma vez que não se sabe ao certo as profundidades da barra. Verifica-se ainda que o modelo reproduz a ocorrência de correntes de enchente mais intensas do que as correntes vazantes, características desta zona do canal Norte da lagoa.

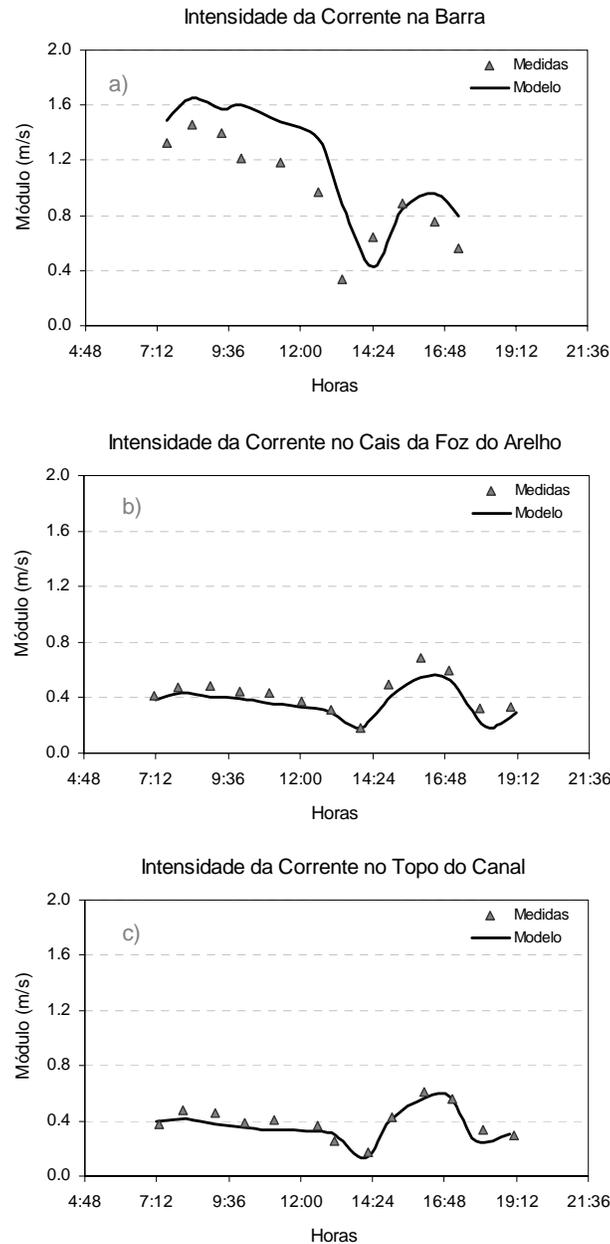


Figura 5.22- Comparação dos valores de corrente previstos pelo modelo com as medidas na estação da Barra (a), Cais da Foz do Arelho (b) e Topo do Canal (c).

Tabela 5.8- Valor médio e desvio padrão do modelo e das medida, coeficiente de correlação, RSME, bias e skill para as estações da Barra, Cais da Foz do Arelho e Topo do Canal a montante.

Estações	$(\bar{x} \pm \sigma)$ (m)		R (m)	RMSE (m)	BIAS (m)	Skill
	Medidas	Modelo				
Barra	0.97±0.37	1.19±0.42	0.868	0.289	0.212	0.84
Cais	0.43±0.13	0.37±0.11	0.959	0.072	-0.061	0.94
Canal	0.39±0.12	0.36±0.12	0.944	0.048	-0.029	0.95

5.3.4. Zona costeira adjacente -Nível 5

A validação do modelo hidrodinâmico da zona costeira foi efectuada com base na comparação das correntes previstas pelo modelo com as correntes medidas pelo ADCP.

Na Figura 5.23 apresentam-se diagramas de dispersão a diferentes profundidades, das medidas de velocidades das correntes com o ADCP e o modelo ao longo do período de 14 a 30 de Novembro de 2000. De um modo geral, o modelo reproduz as velocidades instantâneas medidas a qualquer profundidade. Veja-se no entanto que, as medidas à superfície estão ligeiramente mais dispersas que os valores previstos pelo modelo. Esta diferença em termos de variabilidade também é visível através da evolução temporal das correntes à superfície (Figura 5.24) para períodos de cerca de 72 horas.

Da Figura 5.24 à Figura 5.26 apresentam-se gráficos da velocidade das correntes medidas pelo ADCP e simuladas pelo modelo MOHID para períodos de 72 horas à superfície, 10 metros e 20 metros, respectivamente. Nas mesmas figuras representa-se ainda a velocidade do vento.

Numa primeira análise podemos dizer que a intensidade da corrente apresentou uma variação com a vertical induzida pelo efeito do vento, com valores mais elevados nas camadas à superfície do que no fundo. O sinal do vento, também é visível nas camadas intermédias, sendo no entanto, nas camadas superficiais que se faz sentir o seu efeito mais directo. Esta variação é visível nos dados de campo e consegue ser reproduzida pelos dados do modelo. Apesar do modelo mostrar a importância do vento, verifica-se que existe uma reduzida capacidade de resposta do modelo à variabilidade temporal das medidas em diferentes profundidades. Constata-se que o comportamento do modelo tende a reproduzir tendencialmente o comportamento instantâneo do escoamento, tanto à superfície como no fundo, embora existam algumas diferenças.

Este resultado pode ser reflexo do forçamento do vento, uma vez que o passo espacial do modelo atmosférico de resolução mais fina é de cerca de 9km. Nestas condições o modelo atmosférico tem dificuldade em reproduzir a variabilidade espacial e temporal induzida pela topografia junto à costa. Não devemos por de parte também a difusão numérica associada à inclinação da malha face à direcção do escoamento. Ou seja, a malha do modelo da zona

costeira vai ser perpendicular ao escoamento, aumentando a difusão numérica. Uma maneira de diminuir a difusão numérica seria alinhar a malha com o escoamento (i.e. rodar de cerca de 45°N), no entanto isso implicaria rodar todas as malhas de todos os domínios implementados, uma vez que neste momento o modelo MOHID só permite fazer *downscaling* da solução considerando a mesma rotação em todos os domínios. Neste caso, iria diminuir a difusão no modelo da zona costeira pois alinhava o escoamento com a malha, mas em contrapartida iria aumentar a difusão nos modelos de maior escala, principalmente no modelo pai (costa Portuguesa) cuja direcção da malha com o escoamento passaria a ser perpendicular. Deste modo, se por um lado melhora os resultados na coluna de água da zona costeira, por outro lado condicionaria a propagação da maré para os níveis seguintes.

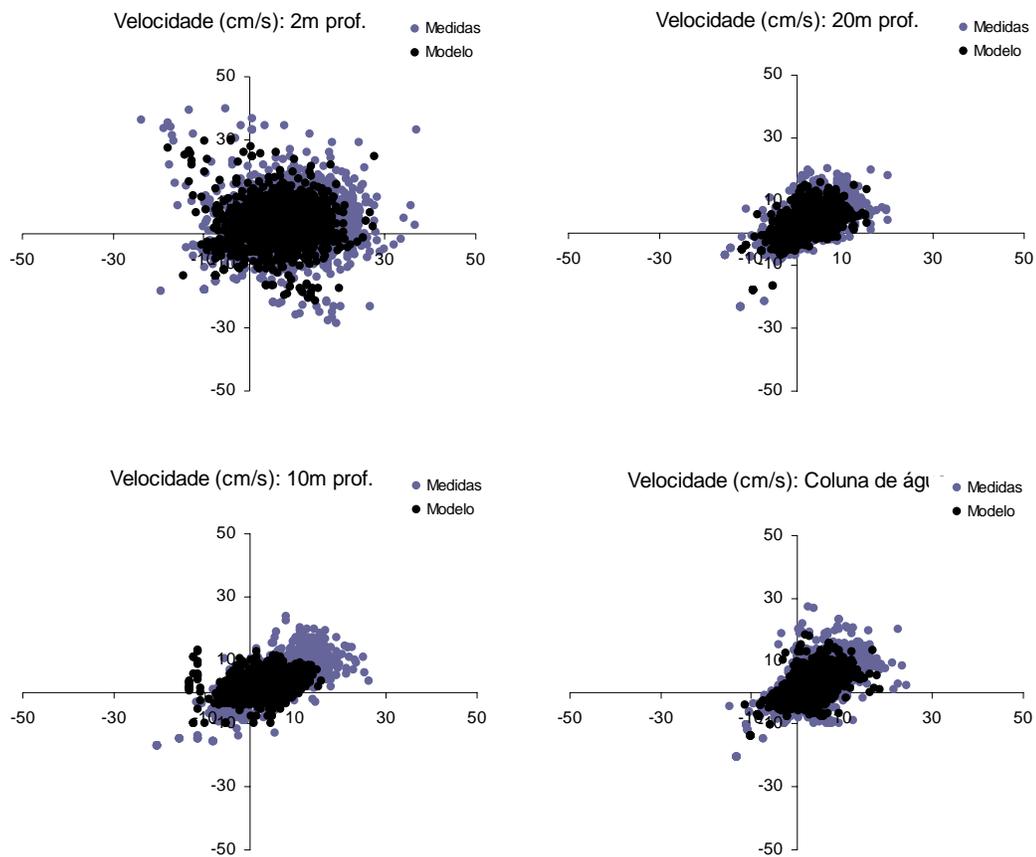


Figura 5.23- Diagramas de dispersão a diferentes profundidades das medidas de velocidades das correntes com o ADCP e o modelo ao longo do período de 14 a 30 de Novembro de 2000.

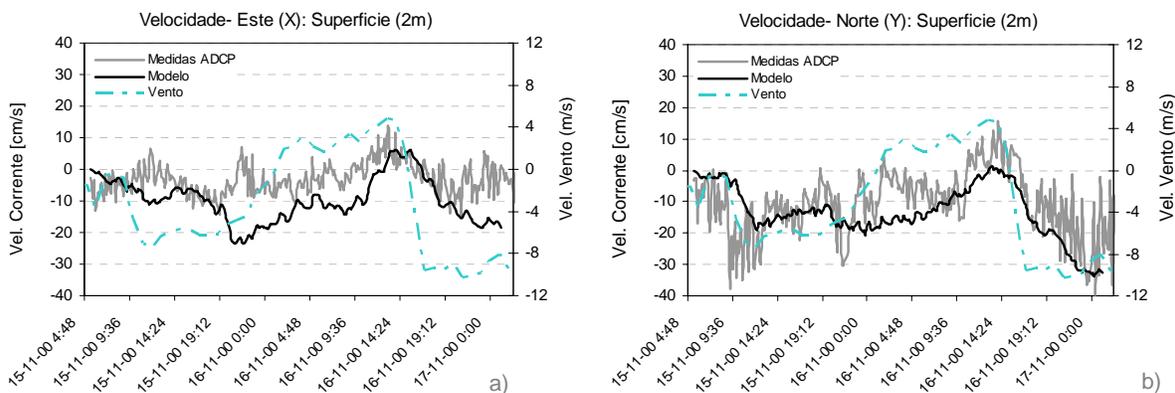


Figura 5.24- Velocidade Este (a) e Norte (b) da corrente à superfície medidas pelo ADCP e simuladas pelo modelo MOHID, entre 15 a 17 de Novembro de 2000. A velocidade do vento é representada na mesma figura.

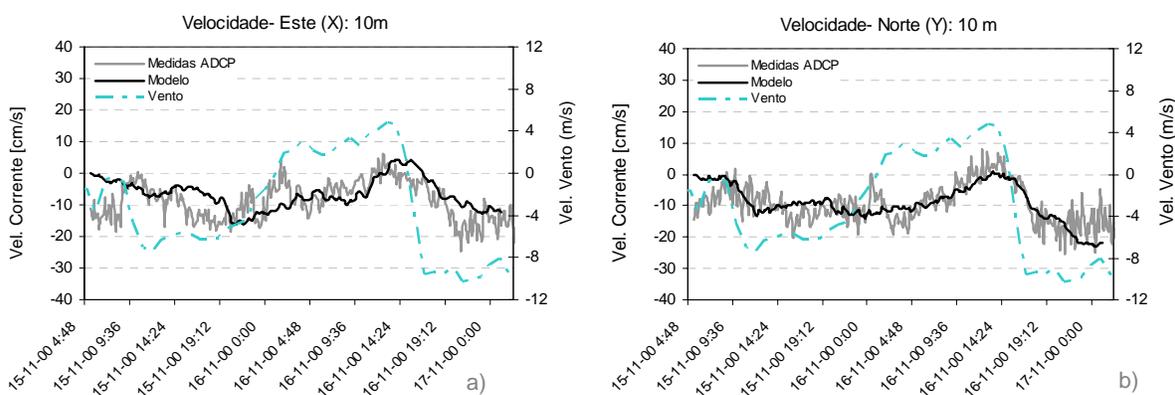


Figura 5.25- Velocidade Este (a) e Norte (b) da corrente a 10 m medidas pelo ADCP e simuladas pelo modelo MOHID, entre 15 a 17 de Novembro de 2000. A velocidade do vento é representada na mesma figura.

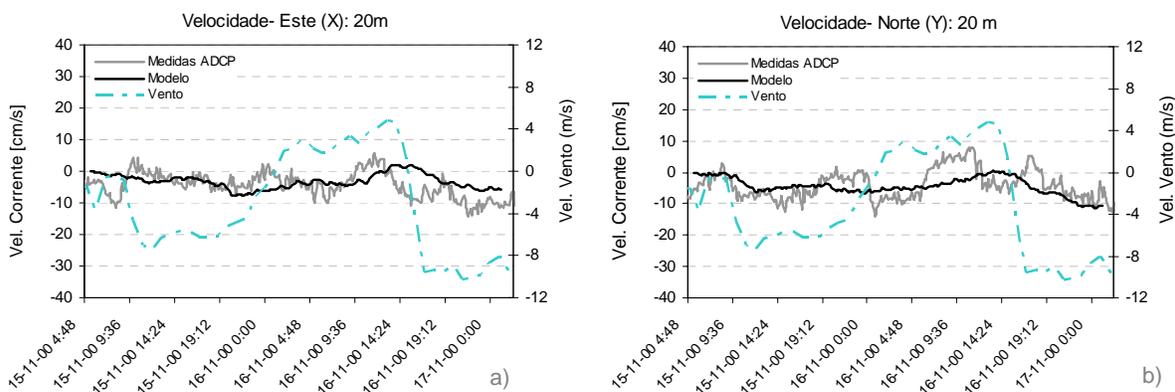


Figura 5.26- Velocidade Este (a) e Norte (b) da corrente a 20 m medidas pelo ADCP e simuladas pelo modelo MOHID, entre 15 a 17 de Novembro de 2000. A velocidade do vento é representada na mesma figura.

Para além da análise da reprodução dos principais padrões, demonstrada pela variação temporal a várias profundidades e pelos diagramas de dispersão, procedeu-se ainda a uma análise estatística, no sentido de quantificar efectivamente o desempenho do modelo em relação às medidas. O período analisado reporta entre 14 a 30 de Novembro de 2000. Foram

calculados os índices estatísticos referidos no início do capítulo da validação, separadamente para a componente meridional (Norte-Sul) e zonal (Este-Oeste). Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 5.9 e Tabela 5.10, respectivamente.

Verifica-se que foram obtidas maiores correlações à superfície do que no fundo, e que existe em média uma melhor correlação para a componente meridional do vento. Este resultado pode ser explicado pelo facto desta ser a componente mais importante do vento. A orientação da malha também podem causar estas diferenças, uma vez que acaba por ser mais relevante na componente zonal (Este-Oeste). O RMSE tende a aumentar à medida que o desvio padrão aumenta, com tendência para ser mais significativo à superfície. A evolução temporal e os diagramas de dispersão à superfície, mostram que de facto, é nas camadas superficiais da coluna de água que existe maior variabilidade das medidas. A esta variabilidade está associada uma maior dispersão e por conseguinte um maior desvio padrão, acabando por se reflectir em termos do erro do modelo em relação às medidas.

Tabela 5.9- Valor médio e desvio padrão do modelo e medidas, coeficiente de correlação, RSME, bias e skill para a componente meridional ou Norte-Sul.

Estações	Mean Value($\bar{x} \pm \sigma$) (cm/s)		R (cm/s)	RMSE (cm/s)	BIAS (cm/s)	Skill (cm/s)
	Medidas	Modelo				
Superfície	12±10	10±7.0	0.50	4.2	-3.5	0.70
Fundo	1.5±2.5	2.1±1.8	0.42	2.5	-4.4	0.60

Tabela 5.10- Valor médio e desvio padrão do modelo e medidas, coeficiente de correlação, RSME, bias e skill para a componente zonal ou Este-Oeste.

Estações	Mean Value($\bar{x} \pm \sigma$) (cm/s)		R (cm/s)	RMSE (cm/s)	BIAS (cm/s)	Skill (cm/s)
	Medidas	Modelo				
Superfície	4.0±5.0	2.5±6.0	0.45	6.1	-2.0	0.65
Fundo	0.9±1.5	1.5±2.0	0.39	3.3	-3.1	0.54

6. APLICAÇÃO AO EMISSÁRIO DA FOZ DO ARELHO

A modelação matemática é uma ferramenta importante para a gestão dos recursos hídricos; na análise da qualidade da água através do comportamento hidrodinâmico; no processo de diluição inicial do efluente e na dispersão do poluente em águas costeiras.

Um dos principais objectivos da aplicação ao emissário da Foz do Arelho, é a simulação da distribuição de coliformes na zona costeira adjacente à Lagoa de Óbidos, com origem na descarga do emissário. A descarga na zona costeira corresponde ao local do emissário, com caudais e concentrações medidas à saída da ETAR. Neste contexto, foram feitas simulações e analisados dados de campo para:

- Analisar a condição inicial da pluma para diferentes cenários e validar os valores de diluição inicial produzidos com o MOHIDJET;
- Analisar o campo afastado com base no efeito do vento;
- Validar o modelo de coliformes nos dias das campanhas na zona de descarga;
- Avaliar o impacto na praia da Foz do Arelho de acordo com o Anexo XV do DL Nº236/98 de 1 de Agosto (qualidade das águas balneares) e DL Nº149/2004 (zonas costeiras menos sensíveis sujeitas a descargas de efluentes domésticos e ou industriais).

6.1. Condição inicial da pluma - campo próximo

O campo próximo é a zona em que a pluma ascende até à superfície ou profundidade de equilíbrio, devido às diferenças de densidade. Durante a subida, o processo dominante é a diluição, dependente das correntes do meio, da estratificação e da forma e características do difusor.

As simulações da dispersão da pluma no campo próximo tiveram como ferramenta de referência o modelo CORMIX, já referenciado nesta tese, um dos mais conhecidos e utilizado modelo de dispersão de plumas a nível mundial. O modelo CORMIX é um sistema especialista de análise do campo próximo, sendo utilizado com o objectivo de validar os valores de diluição inicial produzidos pelo MOHIDJET e analisar as condições iniciais para diferentes cenários. Com o objectivo de verificar se o MOHIDJET produz resultados realistas, compararam-se os resultados obtidos com o CORMIX e o MOHIDJET no caso particular do emissário da Foz do Arelho para diferentes cenários. Uma vez que o modelo CORMIX não tem associado um modelo hidrodinâmico capaz de simular o valor das correntes no local, é necessário definir como dados de entrada a velocidade da corrente (u_0), vento (V_v) e condições de estratificação (valores de densidade na coluna de água), entre outros. Os dados fornecidos tiveram como base os dados obtidos na zona de estudo. Os cenários considerados para as simulações perfizeram um total de 4 cenários (Tabela 6.1).

Tabela 6.1- Resumo das principais variáveis seleccionadas para os cenários simulados com o CORMIX.

Cenários		
Inverno. Sem estratificação ($\rho_{\text{uniforme}} = 1022\text{kg/m}^3$)		
C1	$u_0 = 25\text{ cm/s}$	$Q_0 = 0.3\text{m}^3/\text{s}$
	$V_v = 6\text{m/s}$	
	$C = 2 \times 10^6\text{ (n}^\circ/100\text{ml)}$	
Inverno. Sem estratificação ($\rho_{\text{uniforme}} = 1022\text{kg/m}^3$)		
C2	$u_0 = 10\text{ cm/s}$	$Q_0 = 0.3\text{m}^3/\text{s}$
	$V_v = 2\text{m/s}$	
	$C = 2 \times 10^6\text{ (n}^\circ/100\text{ml)}$	
Verão. Com estratificação ($\rho_{\text{superfície}} = 1022\text{kg/m}^3; \rho_{\text{fundo}} = 1023\text{kg/m}^3$)		
C3	$u_0 = 25\text{ cm/s}$	$Q_0 = 0.3\text{m}^3/\text{s}$
	$V_v = 6\text{m/s}$	
	$C = 2 \times 10^6\text{ (n}^\circ/100\text{ml)}$	
Verão. Com estratificação ($\rho_{\text{superfície}} = 1022\text{kg/m}^3; \rho_{\text{fundo}} = 1023\text{kg/m}^3$)		
C4	$u_0 = 10\text{ cm/s}$	$Q_0 = 0.3\text{m}^3/\text{s}$
	$V_v = 2\text{m/s}$	
	$C = 2 \times 10^6\text{ (n}^\circ/100\text{ml)}$	

Os resultados obtidos no campo próximo com o modelo MOHIDJET e CORMIX para os cenários de Inverno e Verão, são apresentados na Figura 6.1 e Figura 6.2, respectivamente. Os parâmetros apresentados são a diluição inicial e a trajectória vertical da pluma em função da distância a partir do ponto de lançamento, para diferentes condições de estratificação e velocidades da corrente.

Numa primeira análise dos resultados, podemos dizer que o modelo MOHIDJET reproduz o mesmo tipo de jacto (i.e. comportamento no meio ambiente) previsto pelo CORMIX, nas duas condições de estratificação. O comportamento previsto por ambos os modelos, é condicionado pelas condições de estratificação e velocidades da corrente no meio. Observa-se que, nos cenários de Inverno (sem gradientes de densidade) o jacto à saída apresenta uma ligeira deflexão, ao contrário do que acontece num ambiente estratificado (cenários de Verão). Estas diferenças, acontecem porque num meio estratificado a quantidade de movimento inicial é menos importante do que os gradientes de densidade. Nestas condições o jacto tem um comportamento semelhante a um jacto ascensional, uma vez que as forças ascensionais acabam por ser dominantes.

Em termos dos valores previstos para a diluição existem algumas diferenças, com tendência para o CORMIX apresentar valores ligeiramente superiores ao MOHIDJET. Estas diferenças podem ser devidas às limitações discutidas na validação do modelo 3DH (secção 5.3.4. zona costeira adjacente – Nível 5). As diferenças entre os dois modelos, acabam por não ser significativas porque os valores de diluição variam normalmente em potências de 10. Nestas condições pode-se dizer que os valores obtidos pelos dois modelos são comparáveis.

Observa-se ainda que, para velocidades de correntes baixas (i.e. 10 cm/s) o limite do campo próximo é menor, tal como a diluição inicial. Isto acontece porque a advecção é menor para correntes mais fracas, condicionado o processo de dispersão da pluma. Analisando agora o campo próximo em relação às condições de estratificação do meio, verifica-se que, os gradientes de densidade que existem no meio ambiente, limitam a diluição inicial muito mais do que qualquer outra característica ambiental, nomeadamente a intensidade da corrente. Deste modo, a diluição é limitada pela camada de estratificação térmica (condição de Verão), uma vez que, muito dificilmente se observa uma mistura total da coluna de água. Paralelamente, estes gradientes verticais, condicionam o comportamento da pluma na vertical. Nesta situação a pluma tende a ficar "armadilhada" nas camadas junto ao fundo. Pelo contrário, sem estratificação, a pluma tende a atingir as camadas superficiais da coluna de água. Em condições de estratificação (cenário de Verão), a profundidade de equilíbrio da pluma (onde termina o campo próximo) anda à volta dos 27 m já no cenário de Inverno ronda os 15 m.

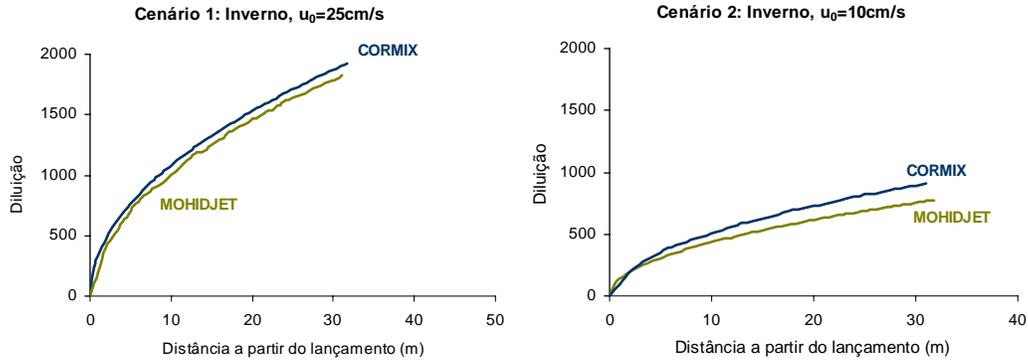


Figura 6.1- Diluição da concentração de coliformes fecais no campo próximo, em função da distância a partir do ponto de lançamento para os cenários C1 e C2.

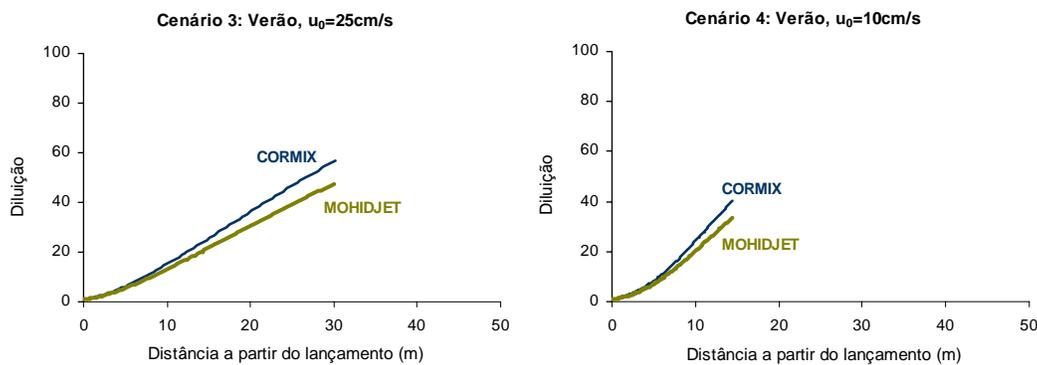


Figura 6.2- Diluição da concentração de coliformes fecais no campo próximo, em função da distância a partir do ponto de lançamento para os cenários C3 e C4.

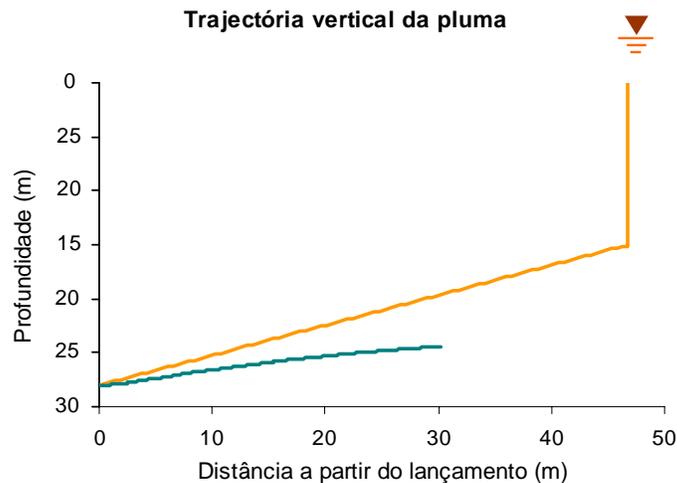


Figura 6.3- Trajectória vertical da pluma em função da distância a partir do ponto de lançamento para os cenários C1 e C3.

Na Figura 6.4 apresentam-se as concentrações de coliformes fecais ou *Bactérias Coliformes Termotolerantes* a três profundidades no ponto perto da descarga do emissário (#1), de Março a Novembro de 2007. Na Figura 6.5 apresentam-se os perfis de temperatura na mesma estação

e período. De entre os indicadores microbiológicos analisados, optou-se por representar os coliformes fecais porque são considerados os melhores traçadores da pluma.

Os dados de coliformes fecais a três níveis da coluna de água (superfície, meio e fundo) (Figura 6.4) conjuntamente com perfis verticais de temperatura (Figura 6.5), obtidos durante as campanhas de 2007, corroboram o efeito da estratificação no deslocamento vertical da pluma. Em situações de forte estratificação (como por ex. na campanha de Julho e Agosto de 2007) a pluma tem tendência a ficar aprisionada nas camadas junto ao fundo, devido às maiores diferenças de densidade na coluna de água. Os resultados de coliformes fecais a três profundidades (superfície, meio e fundo), mostram concentrações mais elevadas na profundidade designada de "fundo", nas campanhas de Verão. Já num meio sem estratificação, como as condições obtinhas na campanha de Inverno (Novembro de 2007), a pluma tem tendência a subir até à superfície, uma vez que a coluna de água se encontra completamente misturada.

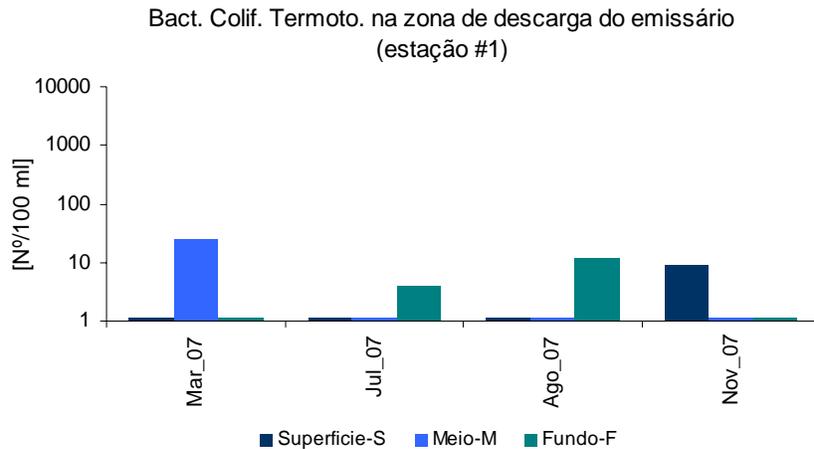


Figura 6.4- Concentrações de *Bactérias Coliformes Termotolerantes* ou coliformes fecais a três profundidades (s, m e f) na zona de descarga do emissário submarino da Foz do Arelho (estação #1) nas campanhas de Março a Novembro de 2007.

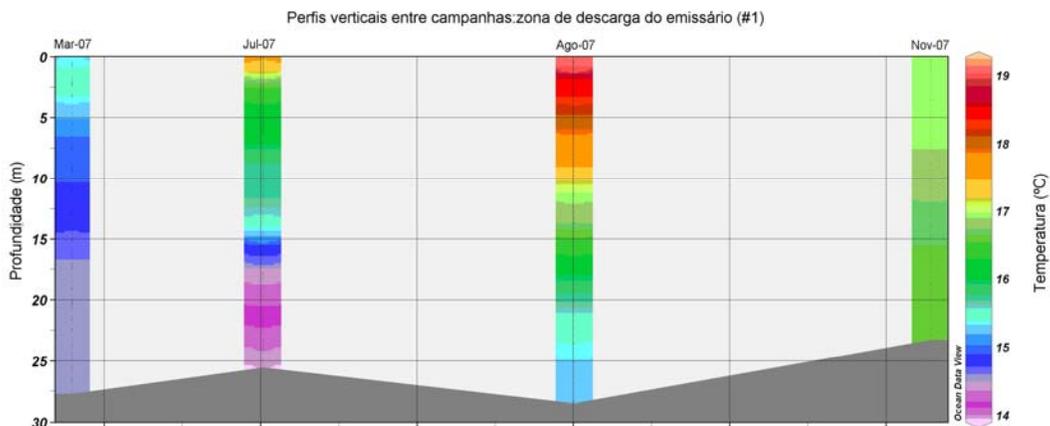


Figura 6.5- Perfis verticais de temperatura na zona de descarga do emissário submarino da Foz do Arelho (estação #1) nas campanhas de Março a Novembro de 2007.

6.2. Campo afastado

O campo afastado, corresponde à zona em que pluma é transportada pelo escoamento. Nesta zona, são a mortalidade devido à radiação solar e à salinidade e a dispersão devida às correntes que permitirão garantir que a qualidade balnear na praia da Foz do Arelho não seja afectada pelo efluente. O campo afastado foi analisado com base em simulações para diferentes regimes de ventos e através de validação à superfície com dados de campo.

6.2.1. Efeito do vento

Foram simulados 4 regimes de vento diferentes para analisar o comportamento da pluma na zona costeira e na praia da foz do Arelho:

- Direcção Norte/Nordeste e intensidades médias na ordem dos 7 m/s;
- Direcção Sul/Sudoeste intensidades médias na ordem dos 7 m/s;
- Direcção Oeste e intensidade constante de 7m/s.

Para estas simulações apenas se mudou o regime de ventos, mantendo sempre constantes as características da descarga do emissário (i.e. caudal de 0.3 m³/s e concentração de coliformes de 2x10⁶ n^o/100 ml). O regime de ventos considerado para a direcção Norte/Nordeste e Sul/Sudeste, corresponde a um período de ventos reais, no qual estas direcções foram as mais predominantes. Já no caso do vento Oeste, por ser uma direcção atípica na zona de estudo, optou-se por considerar um vento constante, porque não existia nenhum período do ano em que o vento fosse predominantemente de Oeste. A direcção Norte é a mais frequente ao longo do ano, em especial no período do Verão enquanto que a direcção Oeste é uma situação desfavorável, porque tende empurrar a pluma na direcção da praia da Foz do Arelho.

Os resultados obtidos à superfície para as situações de vento referidas anteriormente, são apresentados da Figura 6.6 à Figura 6.8. As figuras incluem a sobreposição dos dois últimos níveis (Lagoa de Óbidos e zona de descarga do emissário submarino), podendo ser visualizada a circulação nos dois níveis e a pluma do emissário submarino.

Numa primeira análise dos resultados pode-se concluir que a pluma tende a dispersar-se mais quando as velocidades no meio receptor são mais intensas e que o regime de ventos determina o seu deslocamento.

A pluma tem uma forma alongada, com tendência a deslocar-se preferencialmente paralela à costa, sendo desviada para Sul/Sudoeste com um vento de Norte/Nordeste. Com vento de Norte/Nordeste a pluma apresenta o padrão inverso do vento Sul/Sudoeste. Em condições de ventos característicos da zona de estudo, as correntes são paralelas à costa e seguem a direcção do vento, afastando a pluma da praia da Foz do Arelho. Já com um vento atípico,

vento de Oeste, as correntes têm a direcção perpendicular à costa, deslocando a pluma no sentido da praia da Foz do Arelho. Esta situação é a situação mais desfavorável para a praia da Foz do Arelho, uma vez que para este regime de ventos, as correntes empurram a pluma na direcção da praia. Uma vez que a intensidade do vento influencia a dispersão da pluma, numa situação de vento forte, a pluma poderá eventualmente atingir a praia da Foz do Arelho. Dado este regime de ventos ser atípico, a probabilidade de o vento ser persistentemente de Oeste durante um determinado período é muito baixa, reduzindo a possibilidade de a pluma atingir a praia. Mesmo que a pluma atinja a praia da Foz do Arelho, não existe perigo para a qualidade da água balnear, porque o maior impacte em termos de contaminação fecal é na proximidade da zona de descarga. O decaimento devido à radiação solar e à salinidade bem como a dispersão devido ao efeito do vento, contribuem para que o impacto na qualidade da água seja apenas local, ficando confinado à proximidade da zona de descarga do emissário.

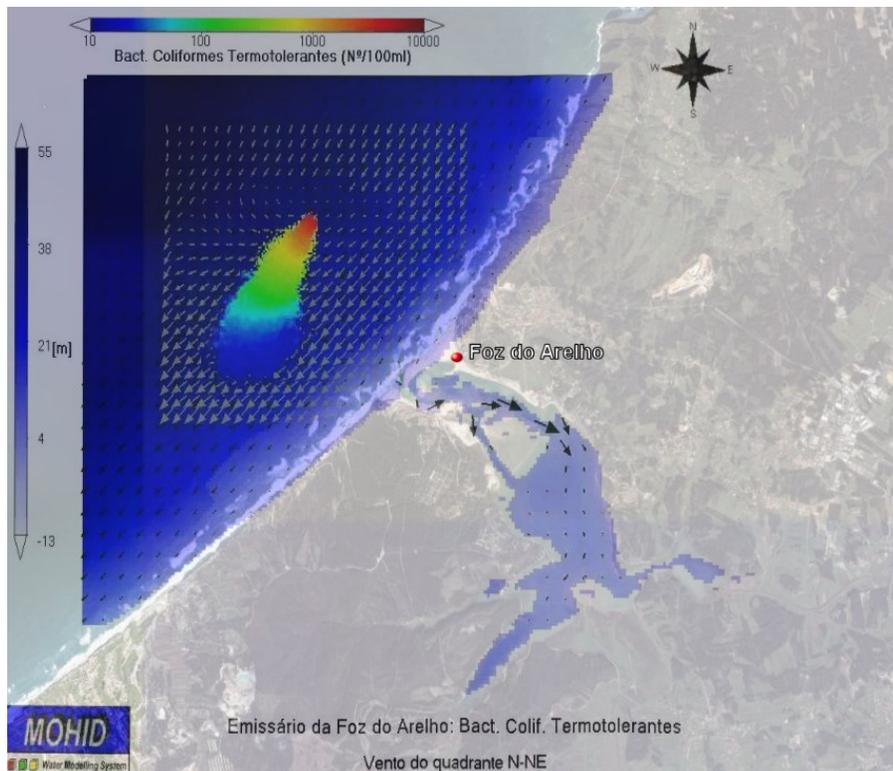


Figura 6.6- Dispersão da pluma de coliformes fecais à superfície com vento de Norte/Nordeste intensidade média de cerca de 7 m/s.

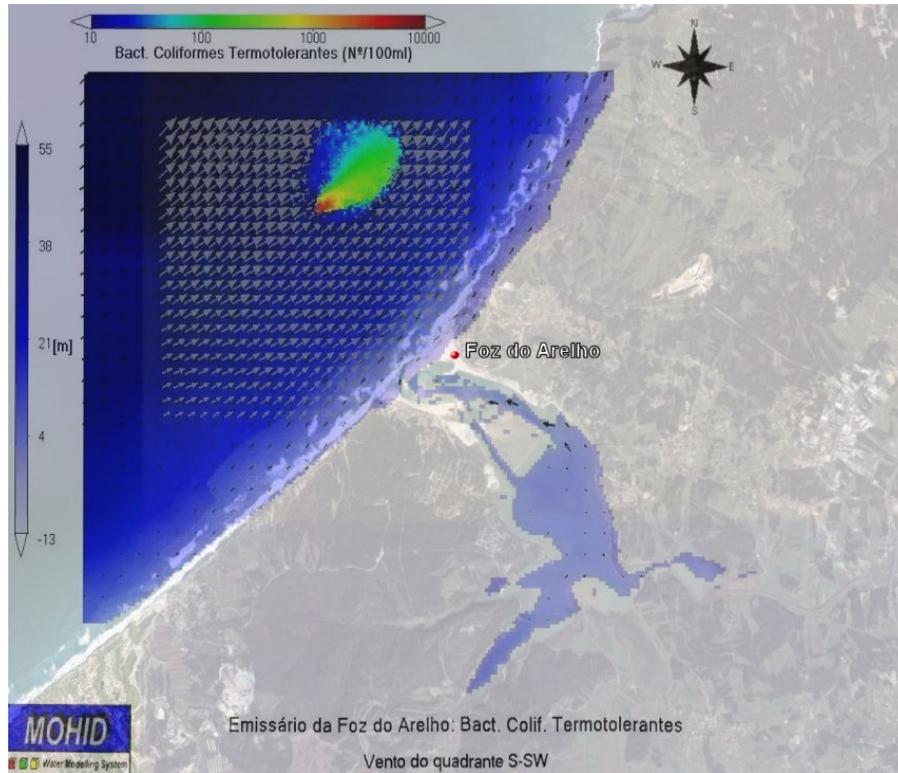


Figura 6.7- Dispersão da pluma de coliformes fecais à superfície com vento de Sul/Sudoeste e intensidade média de cerca de 7 m/s.

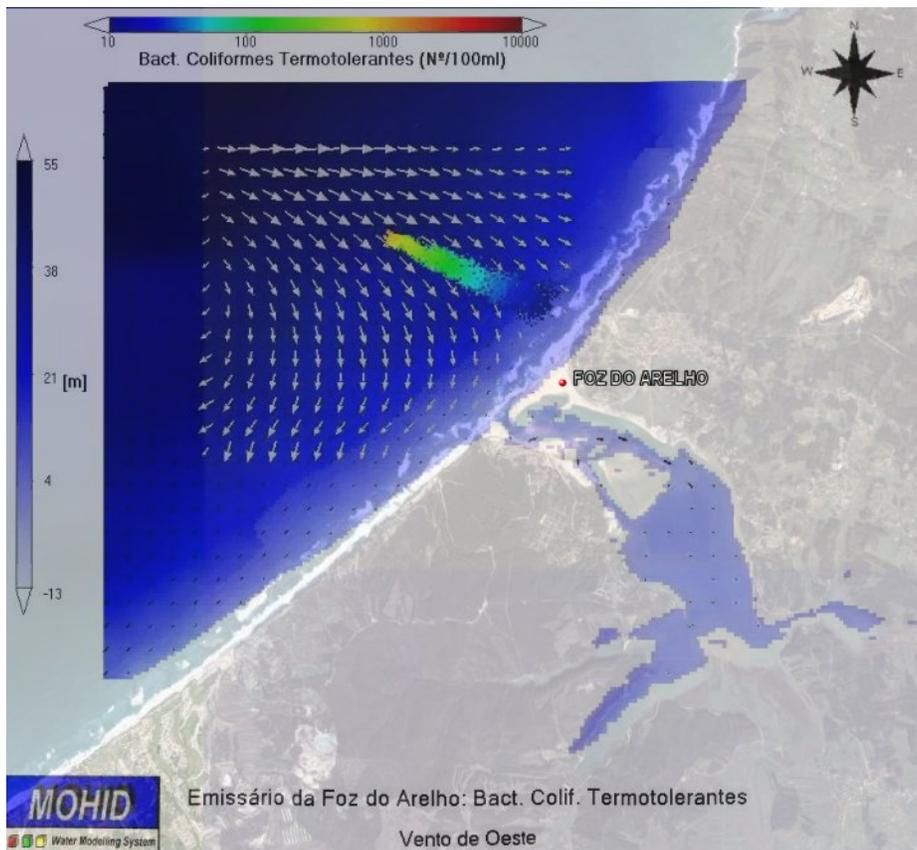


Figura 6.8- Dispersão da pluma de coliformes fecais à superfície com vento de Oeste e intensidade constante de cerca de 7m/s.

6.2.2. Validação à superfície

A validação do modelo de dispersão da pluma, foi feita com base nos dados obtidos em campanhas de monitorização na zona de estudo. Deste modo, e para que a validação fosse feita com mais rigor, para além da recolha de amostras no mar foram também recolhidas amostras do efluente. Ou seja, quando se iniciava a amostragem no mar, outra equipa, efectuava amostragem em terra. A amostragem em terra consistia em: medições de caudal horárias na câmara de desgaseificação do emissário submarino, medições *in situ* de temperatura e condutividade do efluente e recolha de amostras na câmara de carga do emissário para determinação de coliformes fecais em laboratório. Foram apenas determinados coliformes fecais, porque este parâmetro é considerado o indicador por excelência para avaliar o impacte microbiológico. Os valores da monitorização do efluente, foram inseridos no modelo MOHID, para efectuar as simulações para o mesmo dia em que ocorreram campanhas de monitorização. Os valores utilizados para cada dia de campanha são apresentados na Tabela 6.2.

Tabela 6.2- Valores medidos na câmara de desgaseificação e câmara de carga do emissário submarino da Foz do Arelho.

Dia da Campanha	Condutividade ($\mu\text{s}/\text{cm}$)	Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)	Concentração de Coliformes fecais ($\text{n}^{\circ}/100 \text{ ml}$)	Q_0 (m^3/s)
24 de Outubro de 2005	1160	19.5	$2.2\text{E}^6/100 \text{ ml}$	0.30
16 de Março de 2007	1159	20.0	$2.0\text{E}^6/100 \text{ ml}$	0.30
29 de Janeiro de 2008	1162	21.0	$4.0\text{E}^5/100 \text{ ml}$	0.13

As concentrações previstas pelo modelo, foram comparadas com as concentrações medidas sendo os resultados apresentados da Figura 6.9 à Figura 6.11. Optou-se por apresentar apenas os resultados mais interessantes, para não tornar o capítulo exaustivo. As figuras mostram a concentração prevista pelo modelo à superfície, comparando-o com o valor medido (representado por um círculo) no instante aproximado em que foi efectuada a recolha.

Os resultados mostram que o caudal é um parâmetro importante, uma vez que, determina a carga à saída do emissário. Deste modo, para além dos processos e parâmetros que têm vindo a ser referidos ao longo desta tese, o caudal também é um parâmetro importante porque condiciona as concentrações obtidas à superfície. No caso das campanhas em que foram medidos caudais e concentrações mais elevadas, os valores à superfície são superiores cerca de 100 vezes. Quando a pluma atinge a superfície no dia da campanha de Outubro de 2005 e Março de 2007, a concentração de coliformes fecais à superfície é mais ou menos da ordem de 10^4 coli_fecais/100mL, sendo a taxa de diluição inicial promovida pelo difusor da ordem de 1:1000 (considerando um concentração de cerca de 2.0E^6 coli_fecais /100 ml). Já na campanha de Janeiro de 2008 a taxa de diluição promovida pelo difusor é menor (cerca de 1:100).

Uma vez na superfície, a pluma começa a ser transportada e espalhar-se rodando de acordo com o sentido do vento. O transporte desta é essencialmente devido ao vento e correntes. Após iniciado o transporte, essencialmente advecção, a distância máxima para que a concentração da pluma desça para ordem das dezenas é da cerca de 2 km. O decaimento, é consequência da dispersão "de campo afastado" e da mortalidade devida à salinidade e radiação solar.

A comparação do modelo com as medidas mostra resultados coerentes, nas campanhas de Outubro de 2005 e Janeiro de 2008. Na campanha de Março de 2007, os valores previstos pelo modelo são ligeiramente superiores às medidas. Apesar de existirem pequenas diferenças, os valores obtidos sugerem que o modelo está a calcular relativamente bem a dispersão da pluma e a prever um valor de diluição aceitável.

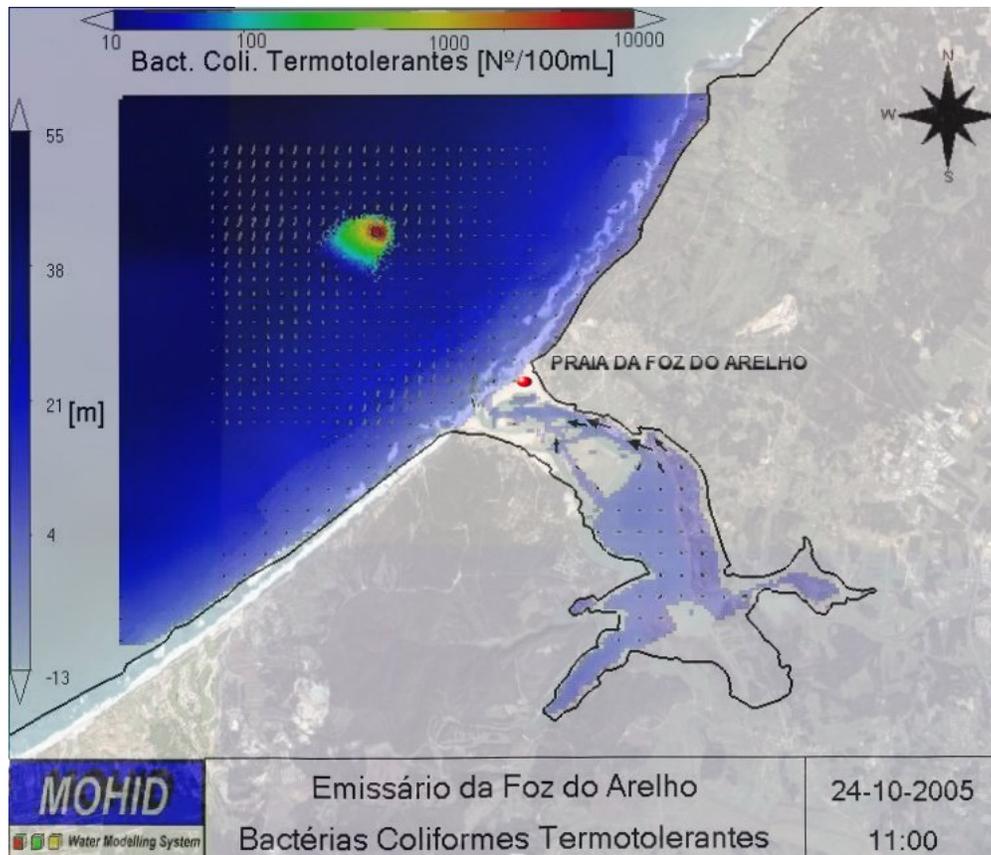


Figura 6.9- Dispersão da pluma à superfície numa situação no instante da recolha das amostras de Bac. Coliformes Termotolerantes durante a campanha de Outubro de 2005.

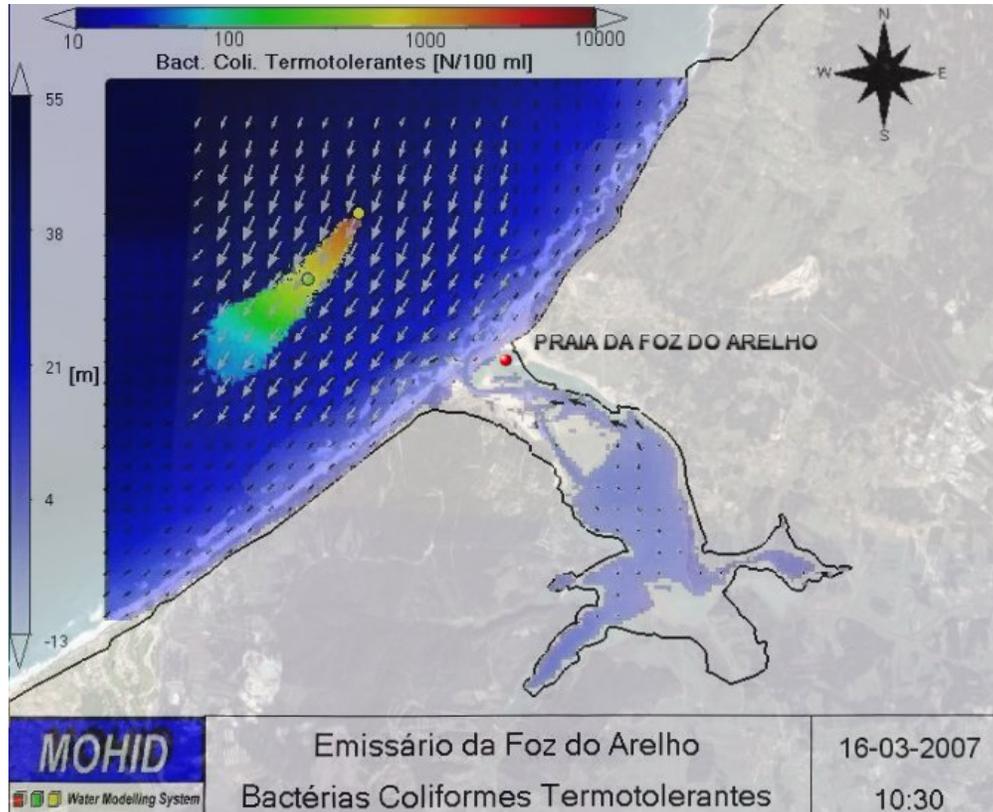


Figura 6.10- Dispersão da pluma à superfície numa situação no instante da recolha das amostras de Bac. Coliformes Termotolerantes durante a campanha de Março de 2007.

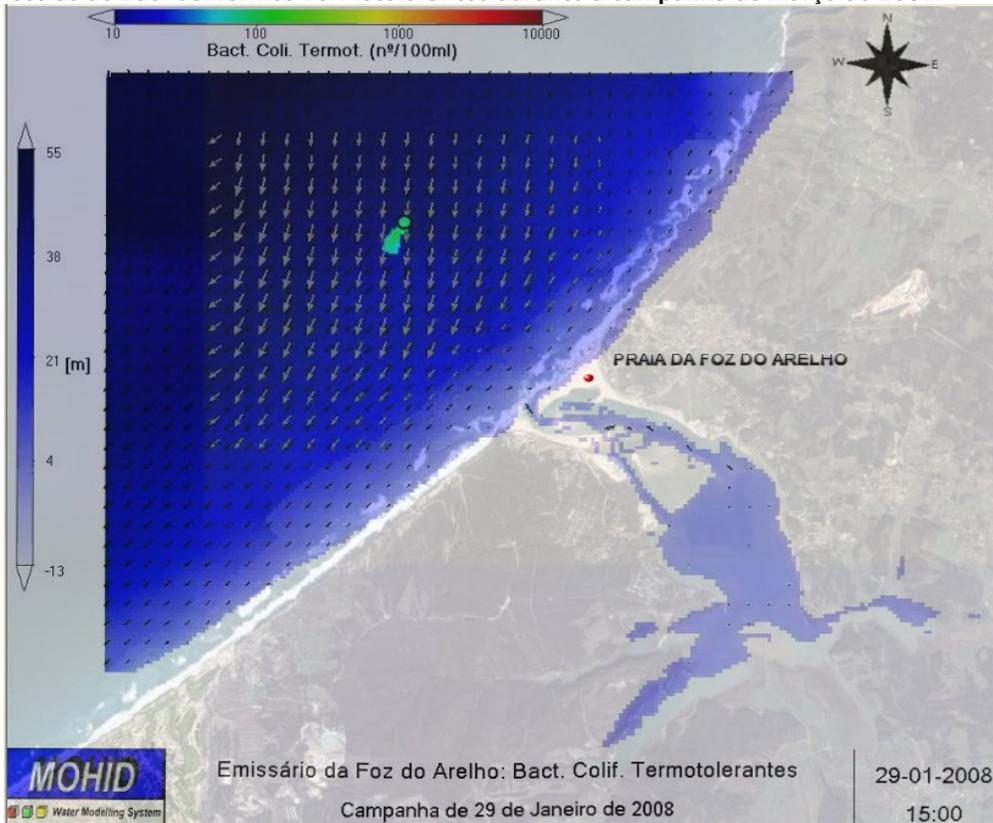


Figura 6.11- Dispersão da pluma à superfície no instante da recolha das amostras de Bac. Coliformes Termotolerantes durante a campanha de Janeiro de 2008.

6.3. Análise de acordo com a legislação

A entrada em funcionamento do emissário submarino da Foz do Arelho pode pôr questões relativas ao seu potencial impacte na qualidade da água local nomeadamente no que respeita aos níveis de contaminação microbiológica observados na zona balnear da Foz do Arelho, uma vez que o emissário submarino está instalado a cerca de 2 km no extremo norte da praia. Nestas condições, deve ser respeitada a qualidade requerida para as águas de banho ou para recreio com contacto directo, indicada no Anexo XV do Decreto-Lei n.º 236/98, de 1 de Agosto. A condição mais importante a verificar centra-se na não contaminação bacteriológica de origem fecal. Já na zona de descarga, espera-se que não exista o enriquecimento das massas de águas por excesso de nutrientes (DL N.º149/2004).

É por esta razão que, é necessário realizar programas de monitorização locais com vista à caracterização dos parâmetros microbiológicos e biológicos, com o intuito de detectar eventuais ocorrências desta natureza e, em caso de se verificarem, permitir actuar em conformidade.

6.3.1. Zona balnear da Foz do Arelho

Os resultados obtidos para os principais parâmetros microbiológicos (*Bactérias Coliformes* e *Bactérias Coliformes Termotolerantes*, *Enterococos* e *Escherichia Coli*) através do programa de monitorização na zona balnear da Foz do Arelho foram avaliados de acordo com o Anexo XV do Decreto-Lei n.º 236/98, de 1 de Agosto e o Anexo I da Directiva 2006/7/CE (em vigor em 2015).

6.3.1.1. Bactérias Coliformes e Bactérias Coliformes Termotolerantes

Em termos legais, os parâmetros *Bactérias Coliformes Termotolerantes* e *Bactérias Coliformes*, foram analisados de acordo com a directiva aplicada ao uso de águas balneares (Anexo XV do DL 236/98) (Tabela 6.3), porque no período de Verão a Lagoa é frequentemente usada para a prática de banhos, para além de que após a descarga do emissário submarino da Foz do Arelho, a exigência é a de que não seja detectada contaminação fecal na praia da Foz do Arelho.

Tabela 6.3- Valores máximos recomendáveis (VMR) e admissíveis (VMA) para os parâmetros microbiológicos em águas balneares aferidos segundo o Anexo XV do DL N.º236/98 de 1 de Agosto.

Parâmetro	Unidade	VMR	VMA
Bactérias Coliformes	/100 ml	500	10000
Bactérias Coliformes Termotolerantes	/100 ml	100	2000
Estreptococos Fecais	/100 ml	100	-

Os resultados obtidos para os parâmetros *Bactérias Coliformes* e *Bactérias Coliformes Termotolerantes* na zona balnear da Foz do Arelho, são apresentados da Figura 6.12 à Figura 6.14. Os resultados obtidos são discutidos por zona balnear, e mostram que:

Foz do Arelho-Mar: Valores vestigiais de contaminação microbiológica em todos os pontos amostrados, inferiores aos valores máximos recomendados (VMR) (Decreto-Lei n.º 236/98, de 1 de Agosto).

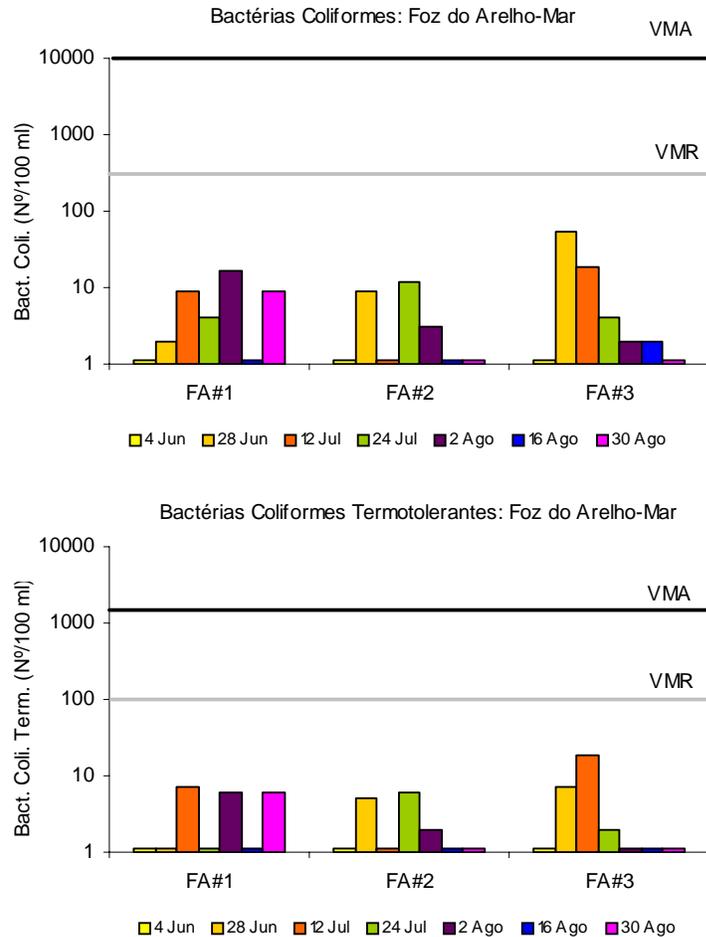


Figura 6.12- *Bactérias Coliformes* e *Bactérias Coliformes Termotolerantes* durante a época balnear de 2007, em Foz do Arelho-Mar.

Foz do Arelho-Lagoa: Valores vestigiais de contaminação microbiológica em todos os pontos amostrados, inferiores aos valores máximos recomendados (VMR) pela legislação para uso balnear (Decreto-Lei n.º 236/98, de 1 de Agosto).

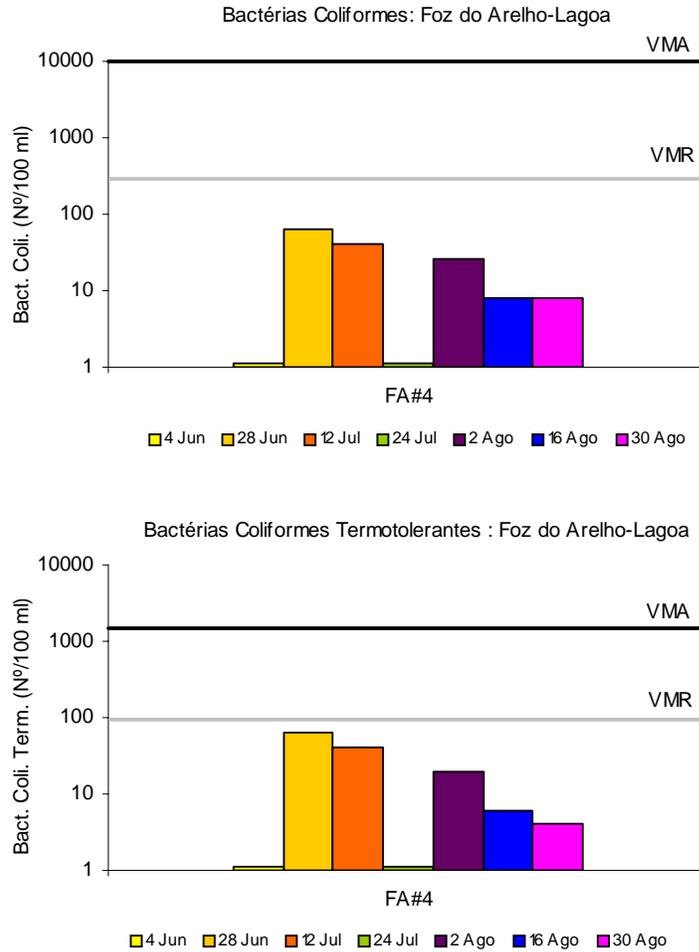


Figura 6.13- *Bactérias Coliformes* e *Bactérias Coliformes Termotolerantes* durante a época balnear de 2007, em Foz do Arelho-Lagoa.

Foz do Arelho-Bom Sucesso: As análises microbiológicas, mostraram apenas valores vestigiais para a contaminação microbiológica, com excepção na campanha de 28 de Junho de 2007. Nesta campanha os valores obtidos foram superiores aos valores máximos admissíveis. No entanto, apesar de ao longo desta monitorização ter sido registada uma análise má, não significa que a água na zona balnear do Bom Sucesso não satisfaça as exigências impostas para uso de águas balneares. Esta contaminação, aparentemente indica ser pontual, eventualmente associada a alguma descarga não controlada a montante, uma vez que foi provado, através do trabalho de monitorização do ano anterior, que a pluma do emissário não atinge a praia da Foz do Arelho. Sendo este um ponto interior da Lagoa, é ainda menos espectável que o valor esteja associado à descarga do efluente no mar.

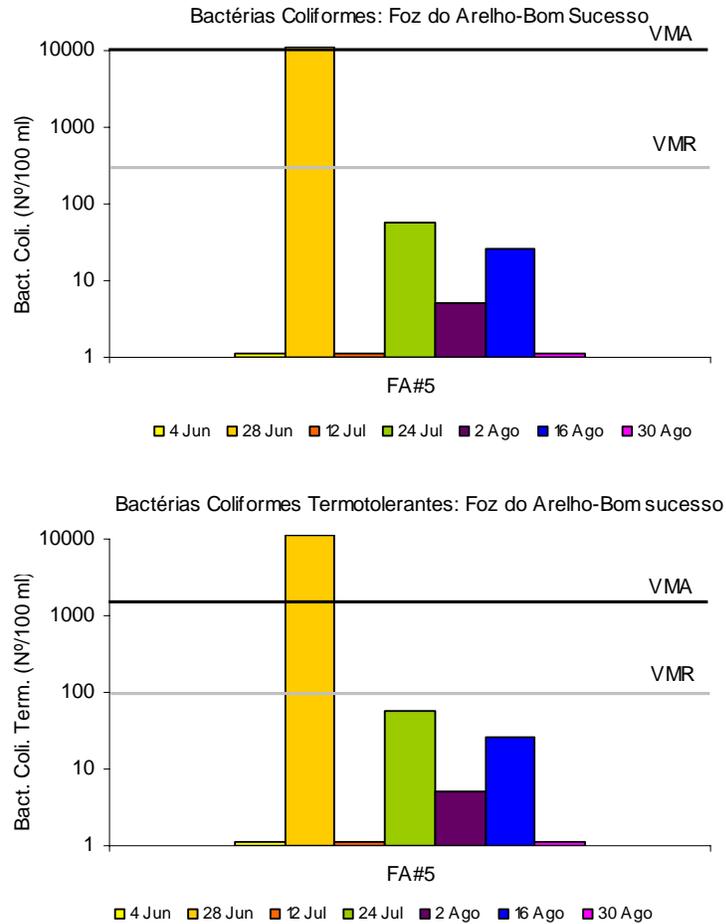


Figura 6.14- *Bactérias Coliformes* e *Bactérias Coliformes Termotolerantes* durante a época balnear de 2007, em Foz do Arelho-Bom Sucesso.

6.3.1.2. Enterococos e Escherichia Coli

Os parâmetros *Enterococos* e *Escherichia Coli*, foram analisados segundo o Anexo I da Directiva 2006/7/CE (em vigor em 2015), a qual classifica a água para uso balnear como Excelente/Boa/Suficiente de acordo com os critérios apresentados na Tabela 6.4. Tendo em consideração os critérios definidos de acordo com esta directiva, optou-se por apresentar as frequências cumulativas para estes parâmetros. A frequência cumulativa é definida como o número de ocorrências de classes de uma determinada variável (neste caso *Enterococos* e *Escherichia Coli*), dividido pelo número total de amostras analisadas, vezes 100 (unidades em %).

Tabela 6.4- Classificação da qualidade da água para uso balnear (Excelente/Boa/Suficiente) de acordo com a Directiva 2006/7/CE.

Parâmetro	Classificação	Critério (Directiva 2006/7/CE)
<i>Escherichia Coli</i>	Excelente	95% das análises apresentarem valores inferiores a 250/100 ml
	Boa	95% das análises apresentarem valores inferiores a 500/100 ml
	Suficiente	90% das análises apresentarem valores inferiores a 500/100 ml
<i>Enterococos</i>	Excelente	95% das análises apresentarem valores inferiores a 100/100 ml
	Boa	95% das análises apresentarem valores inferiores a 200/100 ml
	Suficiente	90% das análises apresentarem valores inferiores a 185/100 ml

As frequências cumulativas foram calculadas para Foz do Arelho-Mar, Foz do Arelho-Lagoa e Foz do Arelho-Bom Sucesso, permitindo assim obter uma classificação mais correcta da zona que é efectivamente mais usada para a prática de banhos. Os resultados obtidos são apresentados da Figura 6.15 à Figura 6.17. As figuras mostram o número de ocorrências para as diferentes classes (barras de cores diferentes) e a respectiva percentagem acumulada (linha laranja). A análise da distribuição das frequências cumulativas para os Enterococos e *Escherichia Coli* apontam para o seguinte:

Foz do Arelho-Mar: 100% das análises efectuadas durante o período balnear de 2007, apresentou valores na classe de 100/100 ml no caso da *Escherichia Coli* e 250/100 ml no caso dos Enterococos. A classificação obtida para a qualidade da água em relação a ambos os parâmetros foi de Excelente.

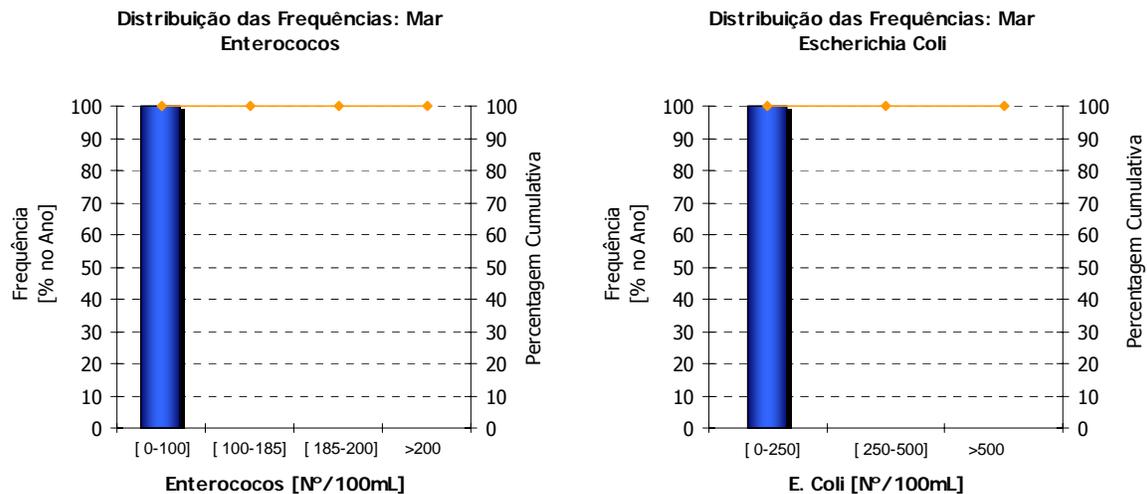


Figura 6.15- Distribuição das frequências cumulativas dos resultados obtidos na em Foz do Arelho-Mar na época balnear de 2007 para o parâmetro *Enterococos* e *Escherichia Coli*.

Foz do Arelho-Lagoa: 100% das análises efectuadas durante o período balnear de 2007, apresentou valores na classe de 100/100 ml no caso da *Escherichia Coli* e 250/100 ml no caso dos Enterococos. A classificação obtida para a qualidade da água em relação à *Escherichia Coli* foi de Excelente e aos Enterococos foi de Suficiente.

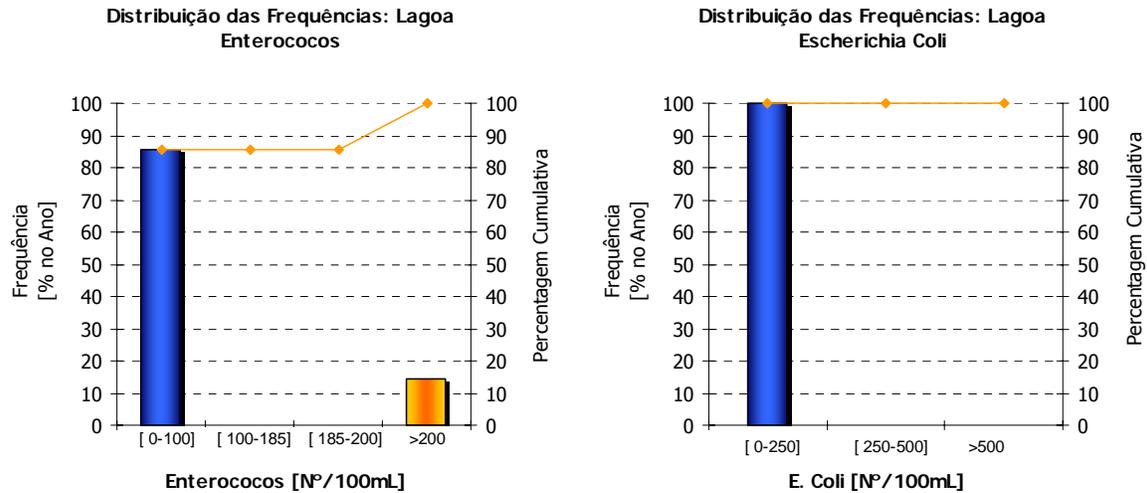


Figura 6.16- Distribuição das frequências cumulativas dos resultados obtidos na em Foz do Arelho-Lagoa na época balnear de 2007 para o parâmetro *Enterococos* e *Escherichia Coli*.

Foz do Arelho-Bom Sucesso: 100% das análises efectuadas durante o período balnear de 2007, apresentou valores na classe de 250/100 ml no caso dos Enterococos. No caso da *Escherichia Coli*, 86% das análises incidu na classe de 100/100 ml e 14% foram superiores a 200/100. A classificação obtida para a qualidade da água em relação ao parâmetro Enterococos foi de Excelente e no caso da *Escherichia Coli* foi de Suficiente.

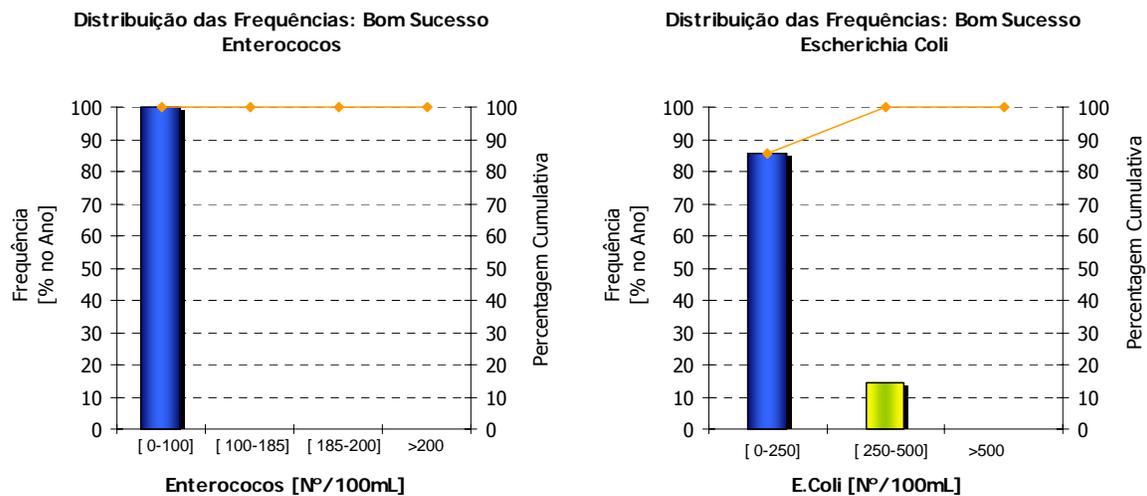


Figura 6.17- Distribuição das frequências cumulativas dos resultados obtidos na em Foz do Arelho-Bom Sucesso na época balnear de 2007 para o parâmetro *Enterococos* e *Escherichia Coli*.

6.3.2. Zona de descarga

Como já foi referido na introdução desta tese, as descargas emitidas no mar através do emissário submarino da Foz do Arelho devem respeitar os seguintes valores limite à superfície: no Verão o oxigénio dissolvido deve ser superior a 90% do valor de saturação e as concentrações de Clorofila-*a* inferiores a 10 µg/l, e no Inverno os nitratos devem ser inferiores a 15 µmole/l (0.21 mgN/l) e a transparência superior a 2 m. Nesta perspectiva, os resultados obtidos através do programa de monitorização na zona de descarga foram comparados de acordo com a legislação aplicada a zonas costeiras menos sensíveis, que recebem descargas de efluentes (DL N°149/2004). Já os resultados obtidos para os principais parâmetros microbiológicos (*Bactérias Coliformes Termotolerantes*, *Enterococos* e *Escherichia Coli*), foram avaliados de acordo com o Anexo XV do Decreto-Lei n.º 236/98, de 1 de Agosto e o Anexo I da Directiva 2006/7/CE (em vigor em 2015).

6.3.2.1. Parâmetros físico-químicos

Os perfis verticais de percentagem de saturação de O₂ obtidos ao longo do programa de monitorização, são apresentados na Figura 6.18, mostrando que existe uma boa oxigenação da coluna de água (valores de Saturação de O₂ na ordem dos 100%) e que existe variação na vertical, com valores ligeiramente superiores nas camadas superficiais. Verificou-se ainda que, a percentagem de saturação foi superior a 90% na campanha de Verão (e nas outras campanhas que não só no Verão), respeitando os valores recomendados para águas sujeitas a descargas de efluentes. Quanto à transparência (determinada com o disco de Secchi), os valores foram superiores a 2m nas campanhas de Inverno (Novembro de 2007 e Janeiro de 2008), respeitando também os valores recomendados para águas sujeitas a descargas de efluentes.

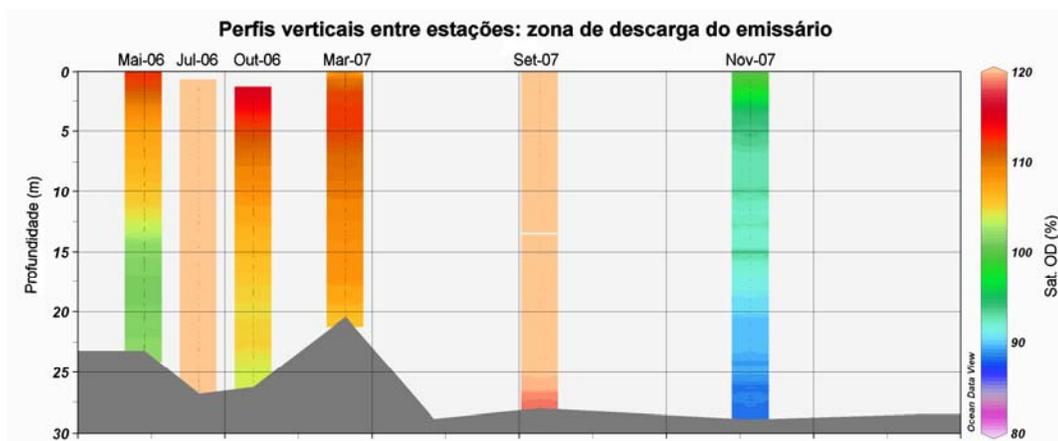


Figura 6.18- Perfis verticais de saturação de oxigénio dissolvido entre campanhas na zona de descarga do emissário submarino da Foz do Arelho (estação #1).

6.3.2.2. Nutrientes e Clorofila-*a*

Os parâmetros seleccionados para apresentar foram a amónia, o nitrato e a Clorofila-*a*. A amónia porque é um bom indicador de descargas de esgotos domésticos/industriais e o nitrato e Clorofila-*a* porque estes parâmetros são referidos na legislação de descargas de emissários em águas costeiras menos sensíveis. Comparativamente, apresentam-se os resultados obtidos no ponto de descarga (#1) e num ponto de referência (#2).

De um modo geral, podemos dizer que os resultados obtidos ao longo das campanhas, evidenciam um comportamento e concentrações semelhantes antes e após a descarga do emissário. Por outro lado, verifica-se também que o ponto escolhido como referência, não mostra concentrações inferiores aos valores obtidos no ponto perto de descarga.

Os resultados de Clorofila-*a* (Figura 6.19) mostram que as concentrações são semelhantes em todas as campanhas de amostragem, com excepção da campanha de Outubro de 2005 e Julho de 2007 onde se registaram valores mais elevados nas 2 estações e 3 profundidades: próximo de 12 µg/L em Outubro 2006 e próximo de 4 µg/L em Julho de 2007. Estes valores estão fortemente associados aos processos de afloramento costeiro (vulgo, upwelling) o qual ocorre tipicamente entre Julho e Outubro, como resposta aos ventos de Norte. Deste modo, a ascensão de águas mais frias e ricas em nutrientes acaba por determinar a produção primária ao longo da Costa Portuguesa. Em termos legais pode-se dizer que os valores medidos à superfície nas campanhas de Verão, foram inferiores aos recomendados para zonas costeiras menos sensíveis, indicando portanto uma acção inócua do emissário submarino, de acordo com este parâmetro.

Os resultados de amónia (Figura 6.20) mostram que as concentrações foram mais ou menos semelhantes nas duas estações, com excepção de Janeiro de 2006. As concentrações registadas foram cerca de duas vezes superiores ao período anterior. Foram também observados máximos de amónia em Outubro de 2004 na estação #2 e em Julho de 2007 e Janeiro de 2008 nas duas estações. O máximo registado em Janeiro de 2006 não parece ser explicado pelo ciclo normal de produção primária, visto que o pico de Clorofila-*a* precede o de amónia e não o contrário. Geralmente, a maior disponibilidade de nutrientes é seguida de um *bloom* de fitoplâncton devido à maior disponibilidade de "alimento". Neste caso não foi o que se observou. Apesar destas flutuações não se verificaram diferenças significativas com a entrada em funcionamento do emissário.

Os teores de nitratos (Figura 6.21), foram em todas as campanhas e nas duas estações, inferiores aos valores recomendados para zonas costeiras menos sensíveis segundo o Decreto referido no início deste capítulo. Apenas em Maio de 2006 se observaram valores superiores a 0.1 mgN/l e em Julho de 2007 atinge 0.2 mgN/l na profundidade meio.

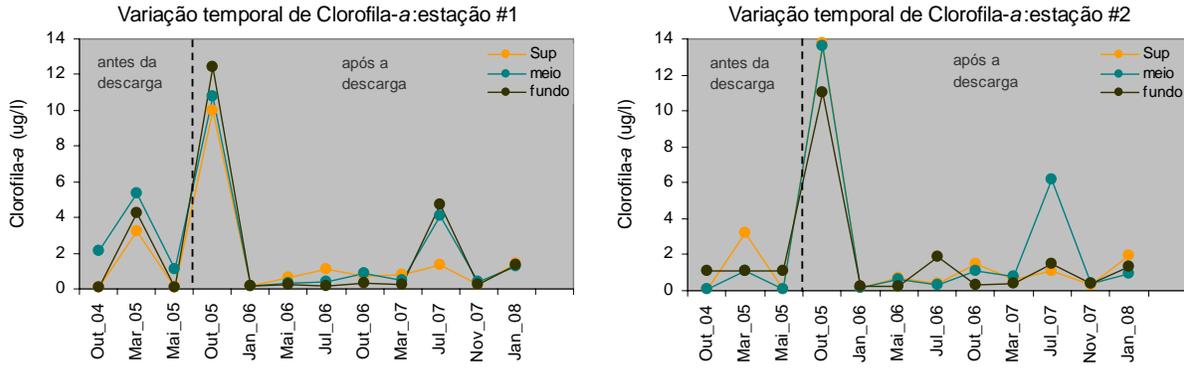


Figura 6.19- Concentrações de Clorofila-a no ponto #1 e #2 (superfície, meio e fundo) entre Outubro de 2004 e Janeiro de 2008, na Foz do Arelho.

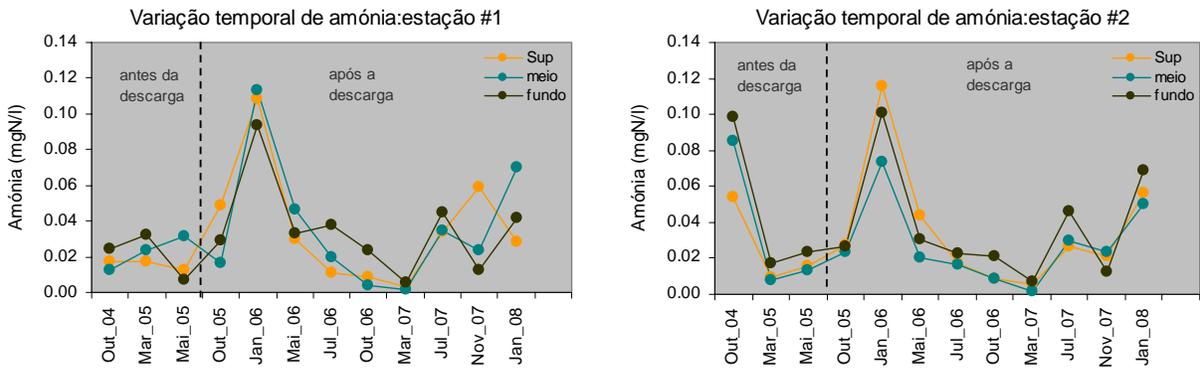


Figura 6.20- Concentrações de amônia nas estações #1 e #2 em três profundidades (superfície, meio e fundo) nas campanhas de amostragem entre Outubro 2004 e Janeiro de 2008.

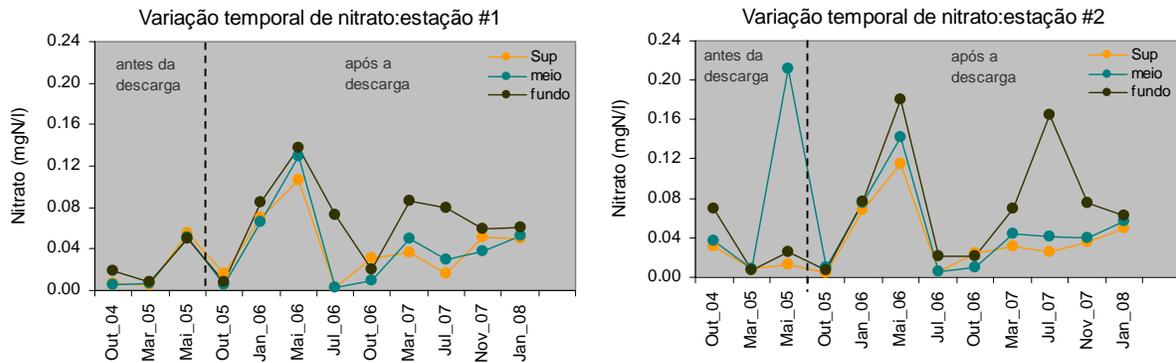


Figura 6.21- Concentrações de nitrato na estação #1 e #2 em três profundidades (superfície, meio e fundo) nas campanhas de amostragem entre Outubro 2004 e Janeiro de 2008.

6.3.2.3. Indicadores microbiológicos

6.3.2.3.1. Bactérias coliformes termotolerantes

Na Figura 6.22 são apresentados os resultados de *Bactérias Coliformes Termotolerantes* à superfície nos 5 pontos de amostragem, após o início da descarga na zona costeira. Optou-se por representar os valores obtidos nos 5 pontos à superfície porque nos permite tirar informação sobre o decaimento da concentração nos pontos vizinhos ao ponto de descarga. As maiores concentrações de *Bactérias Coliformes Termotolerantes*, foram em todas as campanhas medidas na proximidade do ponto de descarga (tal como era de esperar), reflectindo a presença da descarga do emissário submarino da Foz do Arelho. O sinal da pluma é maioritariamente detectado na estação #3 (1 km a Sul da descarga), comparativamente com as outras estações. Este resultado é reflexo do regime de ventos na zona de estudo, os quais são predominantemente do quadrante Norte. Nesta situação a pluma encontra-se maioritariamente desviada para Sul.

De acordo com os limites definidos pela directiva aplicada a águas balneares, as análises efectuadas após entrada em funcionamento do emissário submarino da Foz do Arelho, cumprem os valores máximos admissíveis (VMA) em todas as campanhas. O valor máximo recomendável (VMR), apenas foi ultrapassado no ponto #1 nas campanhas de Outubro e Julho de 2006 e Janeiro de 2008.

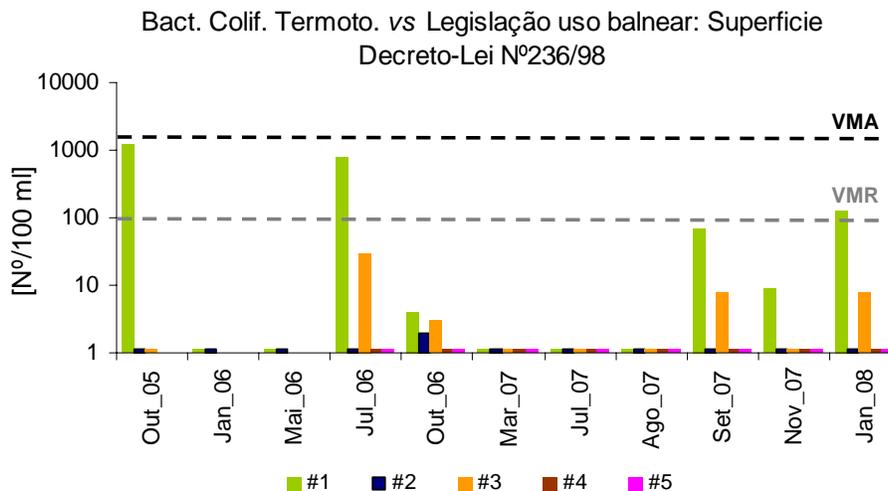


Figura 6.22- Comparação dos valores de *Bactérias Coliformes Termotolerantes* medidos à superfície desde a entrada em funcionamento do emissário submarino nos pontos #1 a #5 segundo o Decreto-Lei N°236/98.

6.3.2.3.2. *Escherichia coli* e enterococos

Para o parâmetro *Escherichia Coli* e *Enterococos* são apresentadas as frequências cumulativas. Em termos legais os valores são analisados de acordo com o Anexo XV do DL 236/98 e o Anexo I da Directiva 2006/7/CE (a qual entra em vigor em 2015), aplicados a águas balneares. Os parâmetros *Enterococos* e *Escherichia Coli*, foram analisados de acordo com os mesmos critérios referidos na secção 6.3.1.2. (zona balnear da Foz do Arelho). As frequências cumulativas para os *Enterococos* e *Escherichia Coli* na zona costeira são apresentadas na Figura 6.23. A figura mostra o número de ocorrências para as diferentes classes (barras de cores diferentes) e a respectiva percentagem acumulada (linha laranja). A análise da distribuição das frequências cumulativas para os *Enterococos* e *Escherichia* mostram que, no caso dos *Enterococos* mais de 98% das análises efectuadas até à data apresentam valores inferiores a [0-100]/100 ml, sendo a classificação obtida de Excelente. No caso da *Escherichia Coli* verificou-se 100% das análises efectuadas até à data apresentam valores inferiores a [0-250]/100 ml, sendo a classificação obtida de Excelente.

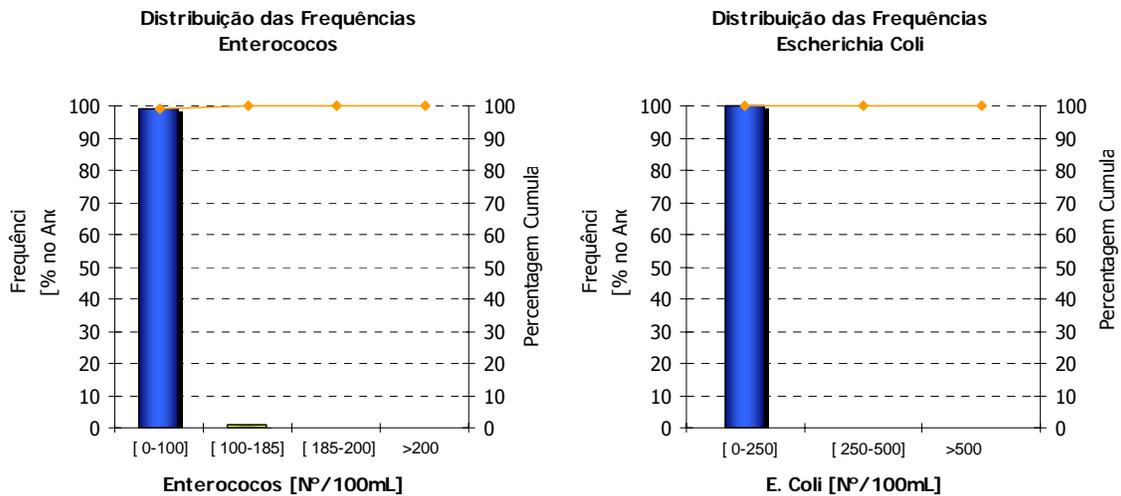


Figura 6.23- Distribuição das frequências cumulativas dos resultados obtidos ao longo das campanhas para o parâmetro *Enterococos* e *Escherichia Coli*.

7. GESTÃO E DADOS

A organização e armazenamento dos diversos dados de campo obtidos ao longo do Programa de monitorização da Lagoa de Óbidos e Emissário Submarino da Foz do Arelho, revela-se indispensável, devido ao volume de dados adquiridos ao longo do tempo. Os dados recolhidos, ao longo de décadas, podem, muitas vezes, ser fundamentais para a compreensão da dinâmica natural do sistema ecológico e para a implementação de práticas de gestão de recursos adequadas. Neste sentido, foi desenvolvida uma página da Internet que contém a informação relevante obtida ao longo do projecto. Foi ainda desenvolvida uma aplicação WEBGIS para a Lagoa de Óbidos que, se revela como uma solução efectiva para a organização e gestão de dados recolhidos no programa de Monitorização da Foz do Arelho e dados históricos recolhidos ao longo do projecto.

7.1. Página *Web*

O trabalho desenvolvido ao longo do âmbito do projecto encontra-se disponível em <http://maretec.mohid.com/projects/FozdoArelho/index.htm>. Esta *web page* disponível para a empresa e para o público, permite a consulta privada de certos documentos, como os relatórios e propostas de trabalho. A consulta, é efectuada mediante uma *password* e *username*, de acordo com um período restrito predefinido pelas AdO.

Os resultados do projecto estão organizados de modo a permitir as consultas das bases de dados do programa de monitorização (amostragem clássica e com sensores), resultados mais relevantes do

modelo, relatórios e propostas de trabalho (sob consulta mediante uma *password*) e participações em conferências.

MONITORIZAÇÃO DA LAGOA DE ÓBIDOS E DO EMISSÁRIO SUBMARINO DA FOZ DO ARELHO

OBJECTIVOS

- Caracterização da situação de referência da Lagoa de Óbidos
- Caracterização da situação de referência do Emissário Submarino da Foz do Arelho
- Armazenar os dados históricos e das campanhas numa base de dados em MAPSERVER

AGENDA

- 1ª Campanha Monitorização: 7 e 12 de Outubro de 2004
- 2ª Campanha Monitorização: 3 de Março 2005
- 3ª Campanha Monitorização: 31 de Maio 2005
- 4ª campanha Monitorização: 25 de Outubro de 2005
- 5ª Campanha de Monitorização: 31 de Janeiro de 2006
- 6ª campanha de Monitorização: 4 e 10 de Maio de 2006
- 7ª Campanha de Monitorização: 27 de Julho de 2006
- 8ª Campanha de Monitorização: 24 de Agosto de 2006
- 9ª Campanha de Monitorização: 30 de Outubro de 2006
- 10ª Campanha de Monitorização: 16 de Março de 2007
- 11ª Campanha de Monitorização: 18 de Abril de 2007

COMUNICAÇÕES

- 1º Seminário sobre Sistemas Lagunares (ICN), Novembro 2004, Vila nova Santo André-Portugal
- ENEG 2005, Novembro 2005, Lisboa- Portugal
- 2º Seminário sobre Sistemas Lagunares (ICN), Junho 2006, Vila Nova de Santo André-Portugal
- HIC, Setembro 2006, Nice-França
- 12º Encontro de Saneamento Básico, Outubro 2006, Cascais-Portugal

Home | Parceiros | Galeria | Modelação | Monitorização | Relatórios | Contactos

Figura 7.1- Home page da página da Internet do projecto.

7.2. Base de dados

A base de dados desenvolvida no decorrer do programa de monitorização, encontra-se disponível em <http://www.mohid.com/gis/obidos2/gis.aspx> e armazena os dados obtidos ao longo do projecto, num servidor de base de dados PostgreSQL (*Structured Query Language*) A actualização dos dados tem sido feita gradualmente e é da responsabilidade do IST.

Actualmente, a base de dados inclui os dados disponíveis até à data, obtidos através da amostragem clássica na Lagoa de Óbidos e seus afluentes, zona costeira adjacente e praias. A visualização dos dados é feita através da WEB (*world wide web*), tendo-se acesso à localização geográfica das estações de monitorização. É possível fazer diversos tipos de pesquisas sobre os diferentes registos existentes (i.e. amostras na coluna de água ou sedimento).

A Figura 7.2 mostra um exemplo da base de dados existente actualmente para a Lagoa de Óbidos, seus afluentes, zona costeira adjacente e zona balnear da Foz do Arelho. A Figura 7.3 mostra um

output para uma pesquisa feita para a temperatura medida na coluna de água em alguns pontos de monitorização do exemplo apresentado.

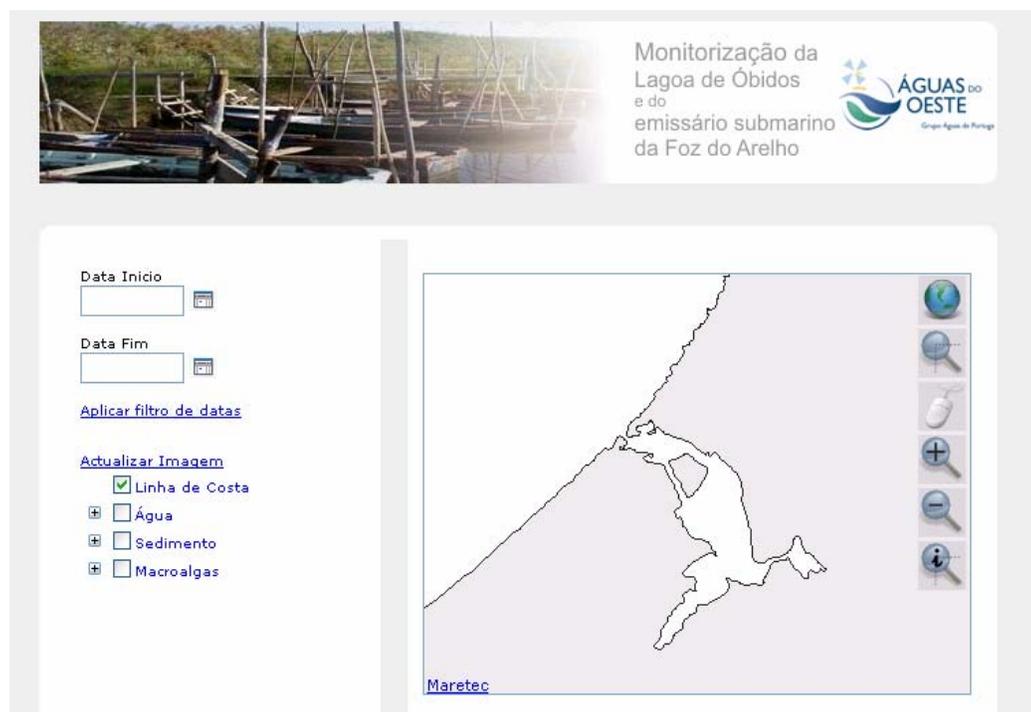
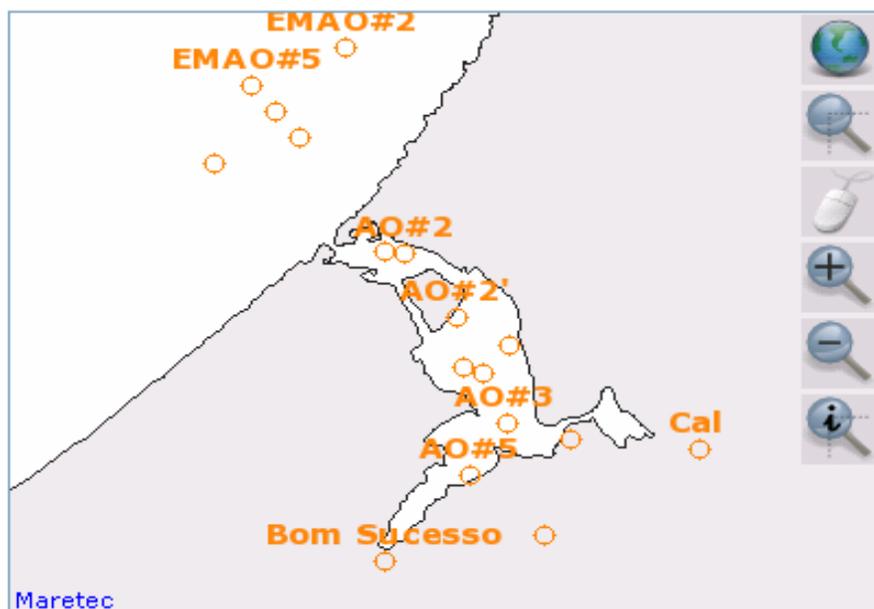


Figura 7.2- Controlo de navegação.



ponto	data	tipoamostra	parametro	valor	unidades
EMAO#4	16-03-2007 15:00:00	Água	Azoto Amoniacal (NH4)	0,0056	mg NH4/l
EMAO#4	16-03-2007 14:41:00	Água	Azoto Amoniacal (NH4)	0,0056	mg NH4/l
EMAO#4	16-03-2007 14:51:00	Água	Azoto Amoniacal (NH4)	0,0028	mg NH4/l
EMAO#3	16-03-2007 14:30:00	Água	Azoto Amoniacal (NH4)	0,0112	mg NH4/l
EMAO#3	16-03-2007 14:00:00	Água	Azoto Amoniacal (NH4)	0,0028	mg NH4/l
EMAO#3	16-03-2007 13:21:00	Água	Azoto Amoniacal (NH4)	0,0056	mg NH4/l
EMAO#3	30-10-2006 11:32:00	Água	Azoto Amoniacal (NH4)	0,025	mg NH4/l
EMAO#3	30-10-2006 11:15:00	Água	Azoto Amoniacal (NH4)	0,011	mg NH4/l
EMAO#3	30-10-2006 10:52:00	Água	Azoto Amoniacal (NH4)	0,064	mg NH4/l
EMAO#1	16-03-2007 11:30:00	Água	Azoto Amoniacal (NH4)	0,0028	mg NH4/l
EMAO#1	16-03-2007 11:25:00	Água	Azoto Amoniacal (NH4)	0,006	mg NH4/l
EMAO#1	16-03-2007 12:00:00	Água	Azoto Amoniacal (NH4)	0,0112	mg NH4/l
EMAO#1	03-03-2005 11:25:00	Água	Azoto Amoniacal (NH4)	0,064	mg NH4/l
EMAO#1	03-03-2005 11:20:00	Água	Azoto Amoniacal (NH4)	0,047	mg NH4/l
EMAO#1	03-03-2005 11:15:00	Água	Azoto Amoniacal (NH4)	0,035	mg NH4/l
EMAO#1	12-10-2004 10:55:00	Água	Azoto Amoniacal (NH4)	0,049	mg NH4/l
EMAO#1	12-10-2004 10:50:00	Água	Azoto Amoniacal (NH4)	0,025	mg NH4/l
EMAO#1	12-10-2004 10:45:00	Água	Azoto Amoniacal (NH4)	0,034	mg NH4/l
EMAO#1	27-07-2006 10:20:00	Água	Azoto Amoniacal (NH4)	0,075	mg NH4/l
EMAO#1	27-07-2006 10:00:00	Água	Azoto Amoniacal (NH4)	0,039	mg NH4/l

1 2 3 4 5

[Importar como xls](#)

No caso do parâmetro salmonelas 1 indica uma amostra positiva e 0 uma amostra negati

Figura 7.3- Output de uma pesquisa exemplo para a amónia.

8. CONCLUSÕES E TRABALHO FUTURO

A descarga de esgoto no mar através de emissários submarinos, pode ser a solução mais correcta para o destino final dos poluentes, dependendo do tratamento considerado em terra para os poluentes. Prevendo um maior tratamento em terra, acaba por se proteger o ambiente marinho, mas como não existem soluções sem desvantagens, acaba por se criar riscos maiores no ambiente circundante. No entanto, os emissários submarinos são vistos como uma forma eficaz de reduzir efluentes domésticos e/ou industriais. Os estudos que permitem estudar o comportamento da pluma numa região costeira, conjuntamente com a monitorização das águas costeiras, revelam-se ferramentas essenciais para a gestão integrada da qualidade das águas. Os estudos podem ser feitos recorrendo á modelação numérica que permite a análise dos parâmetros relevantes para o estudo em causa. Os modelos quando devidamente validados, tornam-se úteis na implementação destes sistemas em zonas costeiras, uma vez que através da modelação é possível simular a previsão dos comportamentos do meio receptor, sobre diferentes cenários.

O comportamento do efluente no meio marinho vai depender de um enorme número de factores, podendo estes estar associados aos processos físicos que ocorrem aquando a descarga, e também associados á implementação, configuração e geometria do difusor. Todos estes factores devem ser tidos em conta, quando se pretende projectar um emissário submarino, de forma a minimizar o impacto da descarga no meio ambiente, e até mesmo modelar a dispersão da pluma do emissário. A dinâmica do meio ambiente também deve ser considerada, nomeadamente as correntes e a estratificação do meio.

O modelo hidrodinâmico MOHID reproduziu fielmente os níveis de maré na costa Portuguesa e nos modelos locais. Destaca-se em particular o caso da Lagoa de Óbidos, cuja validação dos níveis foi exaustiva, buscando sempre a compreensão dos factores que determinam a sua hidrodinâmica. Depreendeu-se a partir desta análise que, a circulação na lagoa é governada essencialmente pela maré, não devendo pôr-se de parte no entanto, o forçamento da agitação marítima. Mesmo que este só seja determinante em certos períodos, não o considerar, é o suficiente para conduzir a resultados grosseiros da previsão do nível de maré na lagoa. Já zona costeira, o modelo reproduziu tendencialmente a variação do escoamento ao longo do tempo, sobretudo na superfície, embora os resultados devam ser melhorados.

Apesar de algumas limitações encontrada no decorrer deste trabalho, o modelo hidrodinâmico implementado, consegue simular o escoamento nos modelos regionais e locais. Foi com base nas simulações do escoamento efectuadas através do modelo hidrodinâmico, que foi possível analisar o impacto da pluma do emissário da Foz do Arelho na zona de descarga e na praia. Através do estudo efectuado para o campo próximo pode concluir-se que, os dois modelos, CORMIX e MOHIDJET, apresentaram serem viáveis na sua utilização, para estudar o campo próximo de emissários submarinos. Da análise dos resultados, destaca-se o efeito da estratificação (com gradientes de densidade) no campo próximo e na diluição inicial da pluma. Em situações de forte estratificação, a pluma do emissário submarino tende a ficar aprisionada nas camadas intermédias e do fundo. Se no campo próximo a densidade pareceu determinante na estabilização da pluma na vertical e diluição inicial, pelo contrario no campo afastado as correntes do meio ambiente, governam o deslocamento da pluma do emissário da Foz do Arelho. Destaca-se o cenário de vento de Oeste, o qual pode empurrar a pluma no sentido da praia da Foz do Arelho.

Com respeito à avaliação da eficiência do emissário submarino da Foz do Arelho, ficou provado que este emissário consegue diluições na ordem de 1:1000, mostrando ser eficiente na diluição das concentrações de coliformes fecais. A elevada diluição é conseguida pelas características do difusor e pelo facto de descarregar numa zona costeira altamente dinâmica. Nestas condições, é de esperar que o impacte local na zona de descarga e na praia seja mínimo. Dados obtidos ao longo do programa de monitorização, corroboram esta hipótese. Os resultados demonstram que, o emissário submarino da Foz do Arelho está a descarregar de acordo com as exigências legais impostas, não havendo evidências de impactes em termos de contaminação microbiológica decorrentes da respectiva entrada em funcionamento, uma vez que se cumprem os valores legais de acordo com a qualidade das águas balneares. O facto de esta ser uma região sujeita a *upwelling* intenso e de as correntes serem fortes, mostra que a pluma do emissário tem um efeito secundário em termos de produção primária à escala da região e por isso o importante é garantir uma diluição inicial elevada, para minimizar o impacte

local. A construção de um emissário longo (cerca de 2 km), perpendicular à costa (i.e. à corrente dominante) e descarregando numa zona profunda (30 metros) garante este objectivo.

Finalmente pode-se concluir que os objectivos propostos para esta tese foram atendidos e que desenvolvimento de sistemas integrados capazes de conjugar dados de campo em tempo real e modelos, perfila-se como a melhor forma para entender, analisar, acompanhar e gerir sistemas dinâmicos, como é o caso da lagoa e zona costeira adjacente. Esta abordagem, tem ainda um enorme potencial para a gestão costeira, uma vez que são um bom suporte de apoio nos planos de monitorização traçados pelas entidades empresariais. Convém destacar também, a capacidade do modelo MOHID simular a dispersão da pluma no campo próximo e afastado, indicando que os processos de dispersão que actuam na altura que é feita a descarga logo na proximidade da fonte, e mais tarde no meio ambiente estão a ser bem simulados. Esta particularidade deve ser destacada, porque existem poucos modelos capazes de simular de um modo integrado o campo próximo e campo afastado de emissários submarinos.

Como sugestão para trabalhos futuros, ressalta-se a inclusão de um modelo de previsão de salinidade e temperatura à escala da costa Português. Deste modo, os modelos regionais poderão assimilar os dados de salinidade e temperatura para posterior forçamento dos modelos locais. Sugere-se também, a possibilidade de poder correr com malhas não rodadas encaixadas em malhas rodadas. Esta abordagem resolveria alguns problemas de difusão no último nível, uma vez que permitira ter em todos os níveis a malha alinhada com o escoamento. O forçamento atmosférico deverá ser igualmente melhorado. Prevê-se a curto prazo, a inclusão de um domínio mais fino ($dx= 2$ km) no modelo de previsão atmosférica (MM5). Por fim, todas as melhorias do sistema implementado deverão tender para que, no futuro se tenha um sistema de previsão operacional dos níveis e escoamento; e da dispersão da pluma do emissário submarino da Foz do Arelho. Este sistema operacional deverá servir de "alerta" para eventuais impactes microbiológicos, que possam surgir na praia da Foz do Arelho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abraham, G., 1963. *Jet Diffusion in Stagnant Ambient Fluid, Delft Hydraulics*. Laboratory, Publ. 29, Series 1, Group 14, pp.183.
- Adcroft A. J., Hill C. N., Marshall J., 1997. Representation of Topography by Shaved Cells in a Height Coordinate Ocean Model. *Mon. Weather Rev.* **125**: 2293-2315.
- Alves, C., Carvalho, S., Santos, M., Zenha, J. H. S., Neves, R., 2006. *Monitoring and Modelling Foz do Arelho submarine outfall plume*. In 7th International Conference on Hydroinformatics HIC 2006, 3 a 7 September, Nice, FRANCE.
- Battjes, J. A., 1982. A case study of wave height variations due to currents in a tidal entrance. *Coast. Eng.* **6**,47-57.
- Battjes, J. A., and Ianssen, J. P. F. M., 1978. *Energy loss and set-up due to breaking of random waves*. Proc. 16th Coastal Eng. Conf., ASCE, 569- 587.
- Beckers, P., 1991. *CAD Technology in Optimal Design in Computer Aided Optimal Design: Structural and Mechanical Systems*. NATO ASI Series, Series F: Computer Systems Sciences, vol.27, Ed. Carlos Mota Soares, Springer-Verlag, 1987, second edition 1991.
- Bork, I. and Maier-Reimer, E., 1978. On the Spreading of Power Plant Cooling Water in a Tidal River Applied to the River Elbe. *Advances in Water Resources*, Vol. 1 No.3.
- Braunschweig, F., 2001. *Generalização de um modelo de circulação costeira para albufeiras*. Tese de Mestrado em Ecologia, Gestão e Modelação dos Recursos Marinhos, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, Portugal.
- Braunschweig, F., Martins, F., Chambel, P., Neves R., 2003. A methodology to estimate renewal time scales in estuaries: the tagus estuary case. *Ocean Dynamics*, **53**, 137-145.

- Callaghan, D. P., Nielsen, P., Cartwright, N., Gourlay, M. R., Baldock, E. T., 2006. Atoll lagoon flushing forced by waves. *Coastal Engineering*, **53**, 691-704.
- Cancino, L. and Neves, R., 1994. 3D-numerical modelling of cohesive suspended sediment in the western Scheldt estuary (the Netherlands), Netherlands. *Journal of Aquatic Ecology*, **28** (3-4) 337-345.
- Cancino L. Neves, R. J. J., 1998: Hydrodynamic and sediment suspension modelling in estuarine systems. part I: description of the numerical models. *Journal of Marine Systems*, **22**, 105-116.
- Canteras, J. C., Juanes, J. A., Perez, L. and Koev, K. N., 1995. Modelling the Coliforms Inactivation Rates in the Cantabrian-Sea (Bay-of-Biscay) from in- Situ and Laboratory Determinations of T-90. *Water Science and Technology* **32**, 37-44.
- Carpenter, S. R., Ludwig, D., Brock, W.A., 2000. Management of eutrophication in lakes subject to potentially irreversible change. *Ecological Applications*, **9**, 751-771.
- Carvalho, S., Gaspar, M. B., Moura, A., Vale, C., Antunes, P., Gil, O., Fonseca; L. C., Falcão, M., 2006. The use of the marine biotic index AMBI in the assessment of the ecological status of the Óbidos lagoon (Portugal). *Marine Pollution Bulletin* **52**, 1414-1424.
- Carvalho, S., Moura, A., Gaspar, M. B., Pereira, P., Fonseca; L. C., Falcão, M., Drago, T., Leitão, F., Regala, J., 2005. Spatial and inter-annual variability of the macrobenthic communities within a coastal lagoon (Óbidos lagoon) and its relationship with environmental parameters. *Acta Oecologica* **27**, 143-159.
- Cederwall, K., 1968. *Hydraulics of marine waste disposal*. Tech. Rep. No.42, Hydraulic Div., Chalmers Institute of Technology, Goteborg, Sweden.
- Chen, H. B., 1991. *Turbulent Jets and Plumes in Flowing Ambient Environments*. PhD Thesis, Dep. Civil. Eng., University of Aalborg, Denmark, pp.158.
- Cheung, S. K. B., Leung, D. Y. L., Wang, W., 2000. *VISJET – A computer ocean outfall modelling system*. Department of Computer Science and Information Systems, University of Hong Kong.
- Chiu, C. and Chen, K., 1969. *Stochastic hydrodynamics of sediment transport*. Journal of the Engineering Mechanics Division - Proceedings of the American Society of Civil Engineers Vol. 95, No. EM5.
- Choi H. B., Kim, D. G., Kim, D. H., 1997. *A Numerical Tidal Model for the Southeast Asian Seas*. Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers. Vol. 9, No. 2, pp. 63-73, June.
- Chu, W. and Gardner, 1986. A two-dimensional particle tracking estuarine transport model. *Water Resources Bulletin*, Vol. 22, No. 2.
- Coelho H. S., 2001. *Modelação de processos físicos relacionados com a circulação oceânica na margem continental Ibérica*. Dissertação para a obtenção do grau de doutor em Engenharia do Ambiente, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, Portugal, pp. 272.
- Coelho, H. S., Neves, R. J. J., White, M., Leitão, P.C., Santos, A. J., 2002. A model for ocean circulation on the Iberian coast. *Journal of Marine Systems*, **32**: 153- 179.
- Costa, M. V., 1991. *A Three-Dimensional Eulerian-Lagrangian Method for Predicting Plume Dispersion in Natural Waters*. Diplôme d'Etudes Approfondies Européen en Modélisation de l'Environnement Marin - ERASMUS.
- Danish Hydraulic Institute, DHI, 1997. *Hydraulic and Sedimentologic Studies design of a Dike/Channel System*. Relatório realizado no âmbito do Projecto para a Fixação da Aberta da Lagoa de Óbidos, INAG, pp.112.

- Decyk, V. K.; Norton, C. D.; Szymanski, B. K, 1997. *Expressing Object-Oriented Concepts in Fortran90*. in ACM Fortran Forum, 16.
- Dippner, J., 1993. A Lagrangian model of phytoplankton growth dynamics for the Northern Adriatic Sea. *Continental Shelf Research*, **13** (2-3): 331-355, 1993.
- Fernandes, R. M., 2005. *Modelação Operacional no estuário do Tejo*. Dissertação para a obtenção do grau de mestre em Engenharia do Ambiente Gestão e Modelação dos Recursos Marinhos, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, Portugal, pp. 95.
- Fisher, H.B., List E. J. , Koh R.C.H., Imberger J., Brooks N.H., 1979. *Mixing in Inland Coastal Waters*. Academic Press, New York, U.S.A., pp.483.
- Fiúza, A. F. G., J. H. Dias and J. Alonso, 1996: *Long-Term Current Measurements on the West Iberian Margin*, MORENA, Relatório Técnico e Científico No 36,. Instituto de Oceanografia, Universidade de Lisboa, Lisboa, Portugal.
- Fortis, R. M., 2005. *Modelação computacional da dispersão da pluma do efluente dos emissários submarinos do Tebar-Petrobrás*. Dissertação para a obtenção do grau de mestre em Engenharia do Ambiente, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil, pp. 250.
- Fortunato A., Freire P., Portela L., 2002. *Análise da Implementação do Plano de Gestão Ambiental da Lagoa de Óbidos: Simulação de Alternativas de Gestão*. Relatório, LNEC.
- Freire P. M. Cardoso da Silva and L. Trovisco, 2004. *Revisão do Plano de Gestão Ambiental da Lagoa de Óbidos: Caracterização da Situação Actual*. Relatório, LNEC.
- Friedrichs, C. T. and D. G. Audrey, 1988. Non-Linear Tidal Distortion in Shallow Well-Mixed Estuaries: a Synthesis. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, **27**: 521-545.
- Goldman, C. R. and Horne, A. J., 1983. *Limnology (International Student Edition)*. McGraw-Hill.
- Gu, R. and H. G. Stefan, 1988. Analysis of Turbulent Buoyant Jets in Density Stratified Water. *J. Environ. Eng.*, ASCE, **114**: 878-897.
- Hasselmann, K., Barnett, T.P., Bouws, E., Carlson, H., Cartwright, D.E., Enke, K., Ewing, J.A., Gienapp, H., Hasselmann, D.E., Kruseman, P., Meerburg, A., Muller, P., Olbers, D.J., Richter, K., Sell, W., and Walden, H., 1973. Measurements of wind-wave growth and swell decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP). *Deut. Hydrogr. Zo, Suppl. A*, **8** (12), 1-95.
- Havens, K. E., Hauxwell, J., Tyler, A. C., Thomas, S., McGlathery, K. J., Cebrian, J., Valiela, I., Steinman, A. D., Hwang, S., 2001. Complex interactions between autotrophs in shallow marine and freshwater ecosystems: implications for community responses to nutrient stress. *Environmental Pollution* **113**: 95-107.
- Hidrotécnica Portuguesa, HP, 1998. *Exutor Submarino da Foz do Arelho: Projecto de Execução*, Relatório. SMAS das Caldas da Rainha, pp.51.
- Holy, F.M. and J.M.V. Polatera, 1984. Dispersion in Two Dimensional Tidal Flow, *J. Hydr. Eng.*, ASCE, **110**: 905-926.
- Instituto da Água, INAG, 2002. *Water Quality in Portuguese Estuaries: Tejo, Sado and Mondego*. Relatório, MARETEC, pp.134.
- Instituto Hidrográfico, IH, 2001a. *Monitorização Ambiental da Lagoa de Óbidos NOV 2000–JUN 2001*. Relatório Técnico Final, Report TF. 08/ 2001 (in Portuguese).
- Instituto Hidrográfico, IH, 2001b. *Monitorização Ambiental da Lagoa de Óbidos JUL 2001–DEZ 2001*. Relatório Técnico Final, Report PT. OC. 06/2001 (in Portuguese).
- Instituto Hidrográfico, IH, 2002a. *Monitorização Ambiental da Lagoa de Óbidos DEZ 2001–ABR 2002*. Relatório Técnico Final, Report PT. OC. 02/2002 (in Portuguese).

- Instituto Hidrográfico, IH, 2002b. *Monitorização Ambiental da Lagoa de Óbidos MAI 2002–AGO 2002*. Relatório Técnico Final, Report PT. OC. 05/2002 (in Portuguese).
- Instituto Hidrográfico, IH, 2001a. *Monitorização Ambiental da Lagoa de Óbidos NOV 2000–JUN 2001*. Relatório Técnico Final, Report TF. 08/ 2001 (in Portuguese).
- Instituto Superior Técnico, IST, 2003. EUROSTRATAFORM. Relatório, MARETEC, pp.11.
- Instituto Superior Técnico, IST, 2006. *Caracterização da Lagoa de Óbidos e do emissário submarino da Foz do Arelho desde Outubro de 2004 a Outubro de 2006*. Relatório Final, MARETEC, pp.68.
- Instituto Superior Técnico, IST, 2008. *Variação sazonal e inter-anual da Lagoa de Óbidos, seus afluentes e do emissário submarino da Foz do Arelho*. Relatório Final, MARETEC, pp.130.
- Jirka, G. H and Doneker R. L., 1991. Hydrodynamic Classification of Submerged Single-Port Discharges. *J. Hydr. Eng.*, ASCE, **117**: 1095-1112.
- Jirka, G. H and Lee J. H., 1994. Shallow Jets, in: *Recent Advances in the Fluid Mechanics of Turbulent Jets and Plumes*, P.A. Davies and M.J. Valente Neves (Ed.s), Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.
- Jirka, G. H., Doneker, R. L., Hinton, S. W., 1996. *User's manual for Cormix: a hydrodynamic mixing zone model and decision support system for pollutant discharges into surface waters*. DeFrees Hydraulics Laboratory, School of Civil and Environmental Engineering, Cornell University, Ithaca, NY.
- Jirka, G. H., 1999. *Five Asymptotic Regimes of a Round Buoyant Jet in Stratified Crossflow*. 28th IAHR Biennial Congress, Graz (Austria), 23-27 Aug 1999.
- Jonsson, I. G., 1990. *Wave-current interactions. The sea*. Chapter 3, Vol. 9, Part A, B. LeMehaute and D. M. Banes, ed., John Wiley and Sons, Inc., New York.
- Lee, J. H. W. and V. Cheung, 1990. Generalized Lagrangian model for buoyant jets in current. *Journal of Environmental Engineering*, ASCE, **116** (6):1085-1105.
- Leendertsee J. and Liu S., 1978. *A three-dimensional turbulent energy model for non-homogeneous estuaries and coastal sea systems*, in: Nihoul J. (Eds.). *Hydrodynamics of Estuaries and Fjords*, Elsevier, Amsterdam, pp. 387-405.
- Leitão, P., 2004. *Simulação integrada da dispersão de poluentes no campo próximo e afastado de um emissário*, in 7º Congresso da Água. Lisboa, Portugal, 8-12 Mar.
- Leitão, P., 2003. *Integração de Escalas e de Processos na Modelação do Ambiente Marinho*. Dissertação para a obtenção do grau de Doutor em Engenharia do Ambiente. Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, pp.279.
- Leitão, P., 1997. *Modelo de Dispersão Lagrangeano*. Tese de Mestrado em Ecologia, Gestão e Modelação dos Recursos Marinhos, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, Portugal.
- Le Provost, C., F. Lyard, J.M. Molines, M.L. Genco and F. Rabilloud, 1998. A Hydrodynamic Ocean Tide Model Improved by assimilating a satellite altimeter derived dataset. *J. Geophys. Res.*, Vol. 103 N. C3.
- Mansur, L. and Price D. M., 1992. *Oil-RW: A mathematical model for predicting oil spills trajectory and weathering. Hydraulic and Environmental Modelling: Coastal Waters*. Proceedings of the Second International Conference on Hydraulic and Environmental Modelling of Coastal, Estuarine and River Waters, Volume 1, pp. 201 - 212.
- Martins, F. 1999. *Modelação Matemática Tridimensional de Escoamentos Costeiros e Estuarinos usando uma Abordagem de Coordenada Vertical Genérica*. Tese de Doutoramento, Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior Técnico, Lisboa.

- Martins, F., R. J. Neves, P.C. Leitão and A.J.R. Silva, 2001. 3D modelling in the Sado estuary using a new generic coordinate approach. *Oceanologica Acta*, **24**: S51-S62.
- Mei, C. C., 1989. *The applied dynamics of ocean surface waves*. World Scientific Publishing, Singapore.
- Miche, M., 1951. *Le pouvoir réfléchissant des ouvrages maritimes exposes a l' action de la houle. Annals des Pans et Chaussess, 121e Annee*. 285-319 (translated by Lincoln and Chevron, University of California, Berkeley, Wave Research Laboratory, Series 3, Issue 363, June 1954).
- Miranda, R., Braunschweig, F., Leitão, P. Neves, R., Martins, F. and Santos, A., 2000. *Mohid 2000, A Costal integrated object oriented model*. Hydraulic Engineering Software VIII, WIT Press.
- Monteiro, A. J., Neves, R. J., Sousa, E. R., 1992. Modelling Transport and Dispersion of Effluent Outfalls. *Water Science and Technology WSTED4*, **25** (9): 143-154.
- Monteiro, A. J., 1995. *Dispersão de Efluentes através de Exutores Submarinos*. Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, Portugal, pp. 265.
- Mudge, S.M., Icelly, J.D., Newton, A., 2008. Residence times in a hypersaline lagoon: Using salinity as a tracer. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 1-7.
- Neves, R. J. J., 1985. *Étude Experimentale et Modélisation des Circulations Trasitoire et Résiduelle dans l'Estuaire du Sado*. Ph. D. Thesis, Univ. Liège, Belgium.
- Neves, R., Coelho, H., Leitão, P., Martins, H., Santos, A., 1998. *A numerical investigation of the slope current along the western European margin*, in Computational Methods in Water Resources XII, 2, pp.369-376.
- Nixon, S.W., 1995. Coastal marine eutrophication: A definition, social causes, and future concerns. *Ophelia*, **41**: 199-219.
- Oliveira, A., Fortunato, A. B., Sancho, F., 2005. *Morphodynamic modeling of the Óbidos lagoon*. In: Proceedings of the 29th International Conference on Coastal Engineering, **3**:.2506–2518.
- Oliveira, A., Fortunato, André B., Rego João, R. L., 2006. Effect of morphological changes on the hydrodynamics and flushing properties of the Óbidos lagoon (Portugal). *Continental Shelf Research* **26**, 917-942.
- Portela, L. I., Neves, R. J. J., 1994. Numerical modelling of suspended sediment transport in tidal estuaries: a comparison between the Tagus (Portugal) and the Scheldt (Belgium-The Netherlands), Netherlands. *Journal of Aquatic Ecology*, **28**: 329-335.
- Rawn, A. M., Bowerman, Brooks N. H., 1960. Diffusers for disposal of Sewage in Seawater. *J. Sanitary Eng. Div., ASCE*, **86**:65-105.
- Resio, D. T., 1987. *Shallow-water waves. I: Theory*. J. Waterway., Port, Coast., and Oc. Eng. , ASCE, **113** (3), 264-281.
- Resio, D. T. and Perrie, W., 1989. Implications of a 4 equilibrium range for wind-generated waves. *J: Phys. Oceanography*, **19**: 193-204.
- Roberts, P. J. W., 1979. Line Plume and Ocean Outfall Dispersion, J. Hydr. Div., ASCE, **105**: 607-611.
- Santos, M., Carvalho, S., Alves, C., Neves, R., 2005. *Programa de Monitorização da lagoa de Óbidos e Emissário Submarino da Foz do Arelho*. ENEG, 22 a 24 Novembro, Lisboa, Portugal.
- Santos, A., Martins, H., Coelho, H., Leitão, P., Neves, R., 2002. A circulation model for the European ocean margin. *Applied Mathematical Modelling*, **26** (5): 563-582.

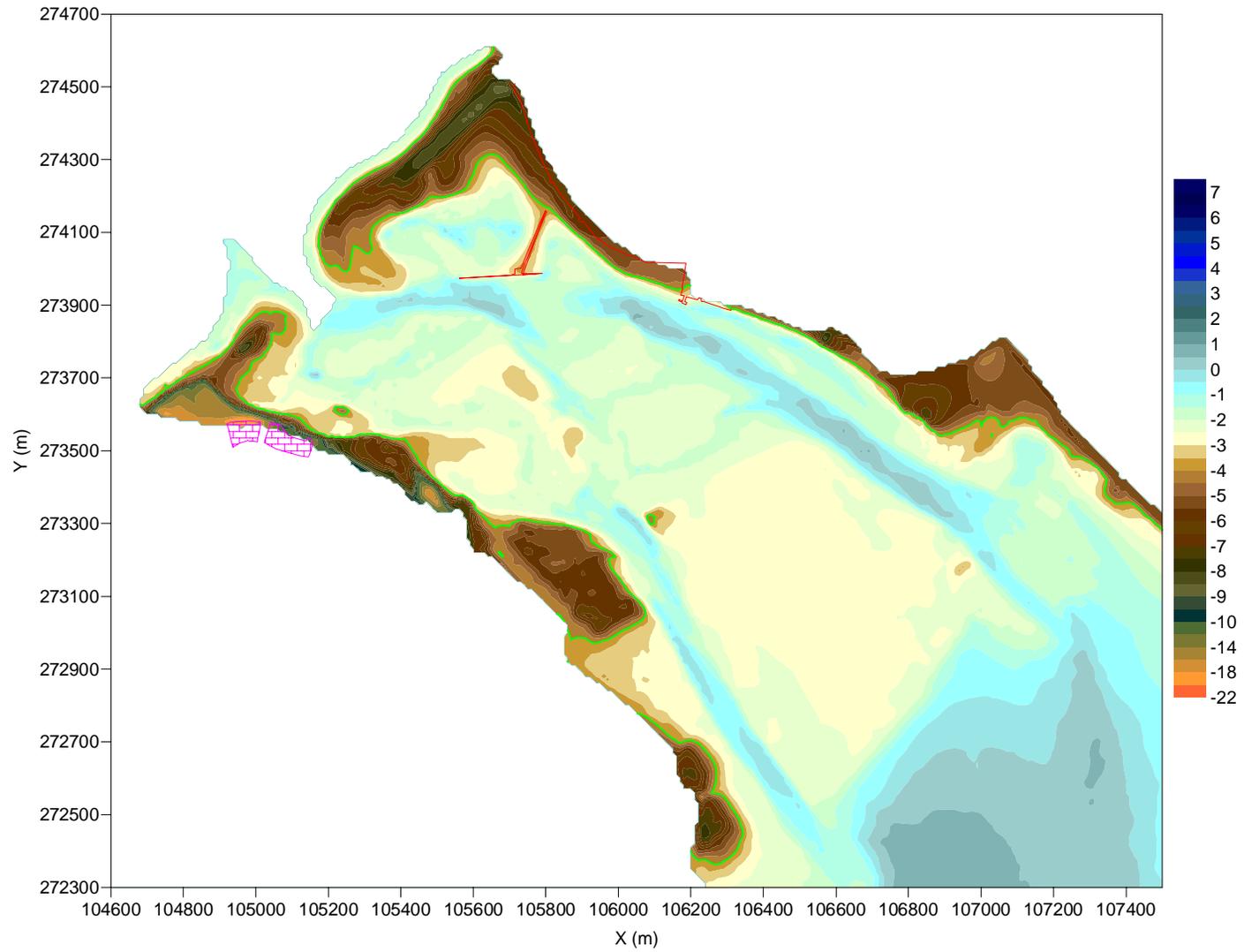
- Saraiva, A. S., 2005. *Modelação Ecológica da Ria de Aveiro: O Papel das Macro Algas*. Dissertação para a obtenção do grau de mestre em Gestão e Modelação dos Recursos Marinhos, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, Portugal, pp. 127.
- Saraiva, S., Pina, P., Martins, F., Santos, M., Neves, R. 2007. Modelling the influence of nutrient loads on Portuguese estuaries. *Hydrobiologia*, **587**: 5–18.
- Shiau, B., 1991. Computer modelling of oil pollutants transport on the water. *Computer modelling in Ocean Engineering*, **91**: 467-475.
- Skou, A. and Vieira, J., 1999. *A Practical Procedure for Sediment Mapping for 2D Modelling Application*. DHI Software Conference.
- Smith, J. M., Resio, D. T., and Vincent, C.L., 1997. *Current-induced breaking at an idealized inlet*. Proc. Coastal Dynamics '97, ASCE, 993- 1002.
- Smith, J. M., Militello, A., and Smith, S. J., 1998. *Modeling waves at Ponce de Leon Inlet, Florida*. Proc. 5th International Workshop on Wave Hindcasting and Forecasting, Environment Canada, Downsview, Ontario, 201-214.
- Smith, J. M., Sherlock, A.R., and Resio, D.T., 2001. *STWAVE: Steady-state wave model user's manual for STWAVE, Version 3.0. ERDC/CHL SR-01-1, U.S. Army Engineer Research and Development Center, Vicksburg, MS*(<http://chl.wes.army.mil/research/wave/wavesprg/numeric/wtransformation/downld/erdc-chl-sr-01-11.pdf>).
- Tsanis, I. K., and Valeo, C., 1994. Comparison of near-field mixing zone models for multi port diffusers in the Great Lakes, *Can. J. Civ. Eng.*, **21**:141-155.
- Valeo, C., and Tsanis, I. K., 1996. Two case studies of dilution models applied to thermal discharges. *Can. J. Civ. Eng.*, **23**.
- VÃO Arquitectos Associados, 1991. *Estudo de Recuperação e Ordenamento da Lagoa de Óbidos, Concha de São Martinho do Porto e Orla Litoral Intermédia*, Vol. I, II e V, Relatório.
- Wooster, W. S., and J. H. Jones., 1970. The California undercurrent off northern Baja California. *J. Mar. Res.*, **28**(2):235-250.

ANEXOS

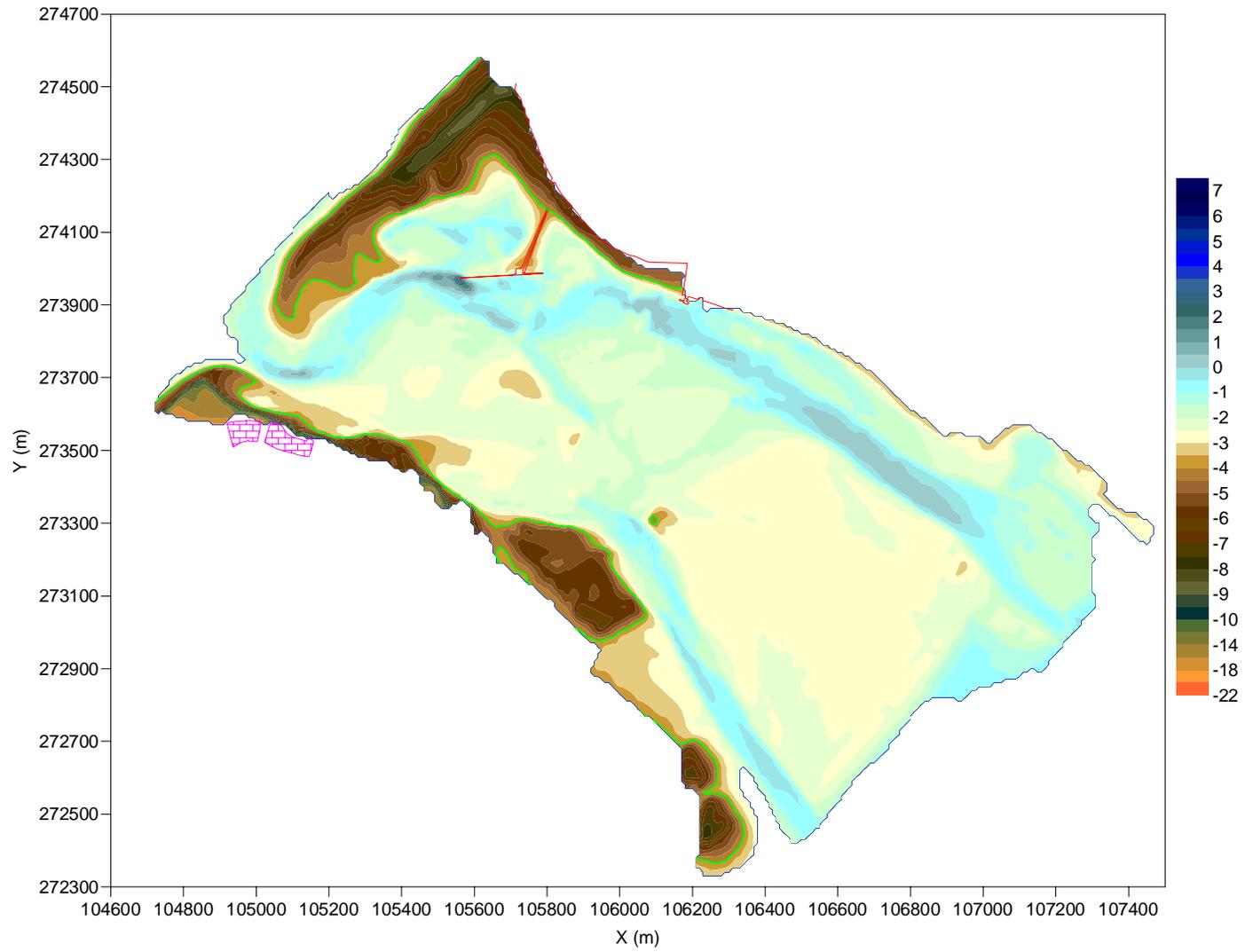
ANEXO 1

Levantamentos batimétricos da Lagoa de Óbidos

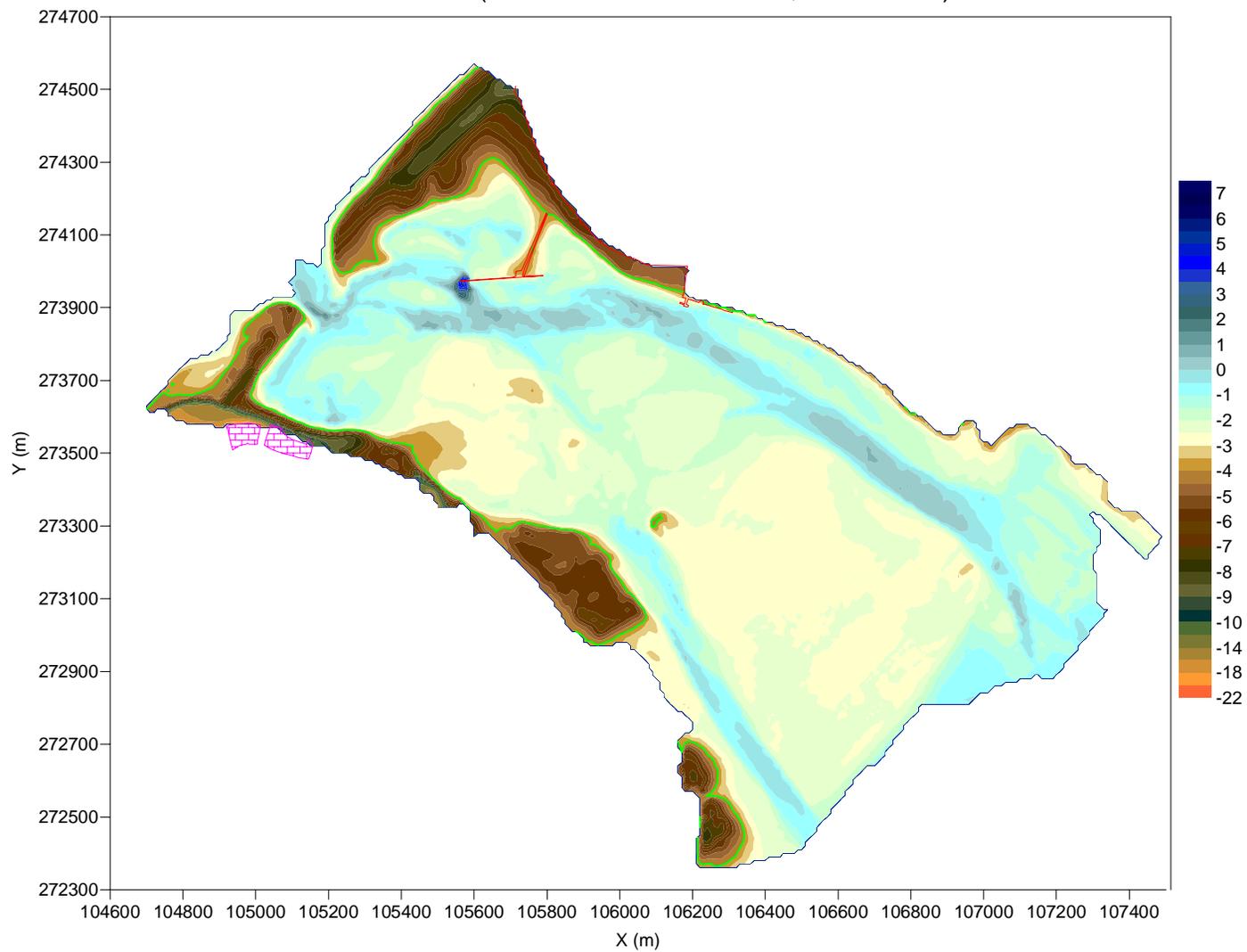
Junho 2000 (Sondas referidas ao ZH, em metros)



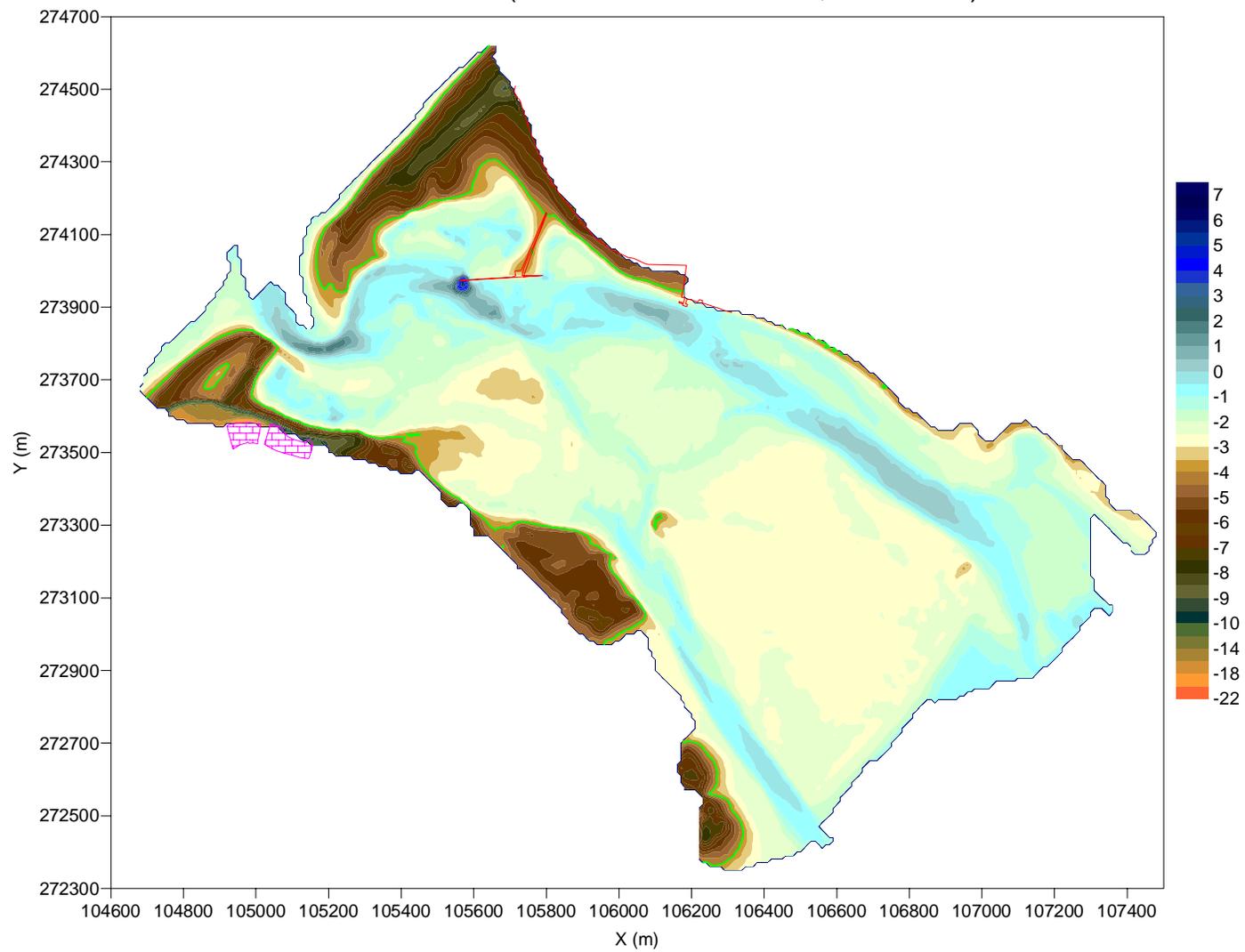
Novembro 2000 (Sondas referidas ao ZH, em metros)



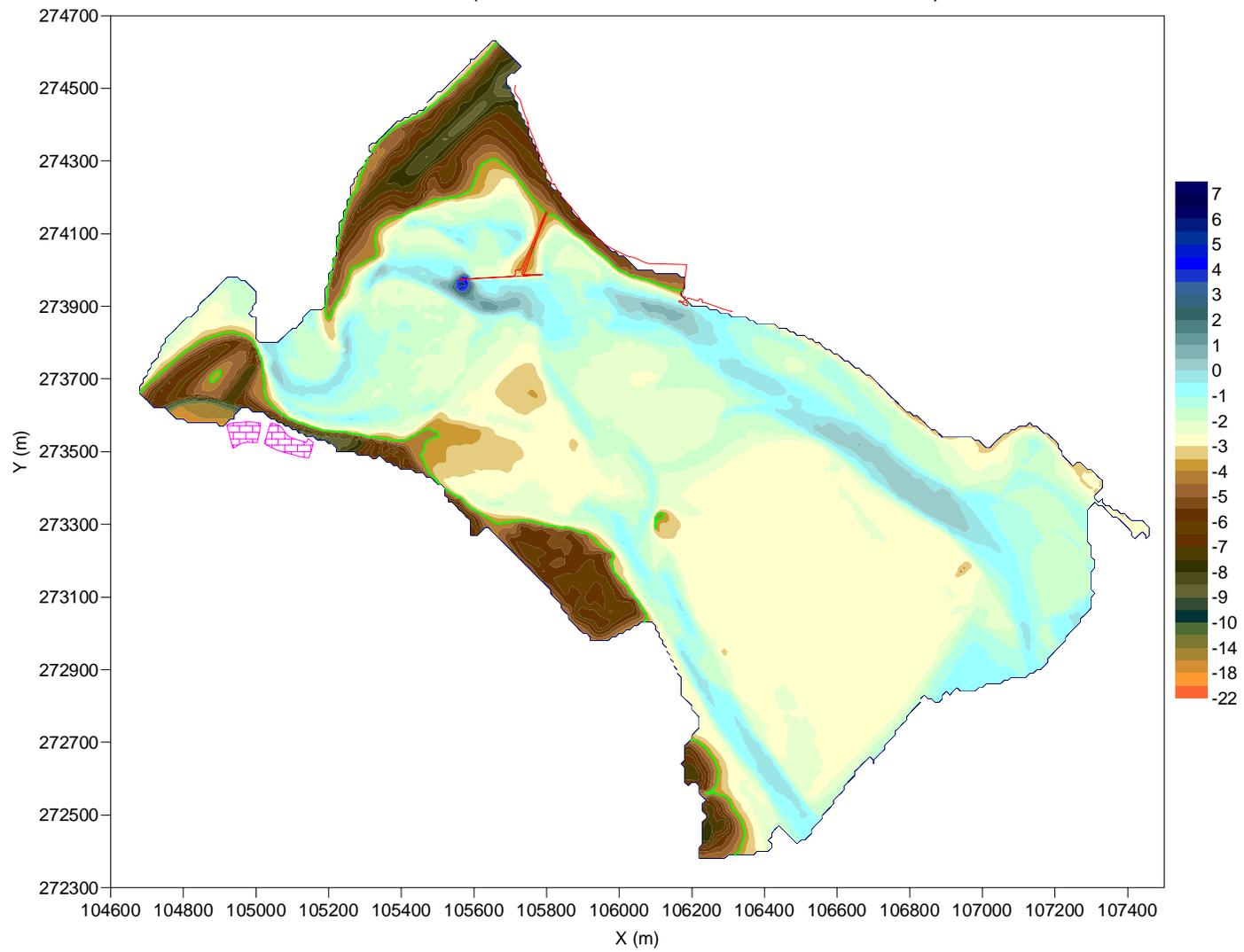
Julho 2001 (Sondas referidas ao ZH, em metros)



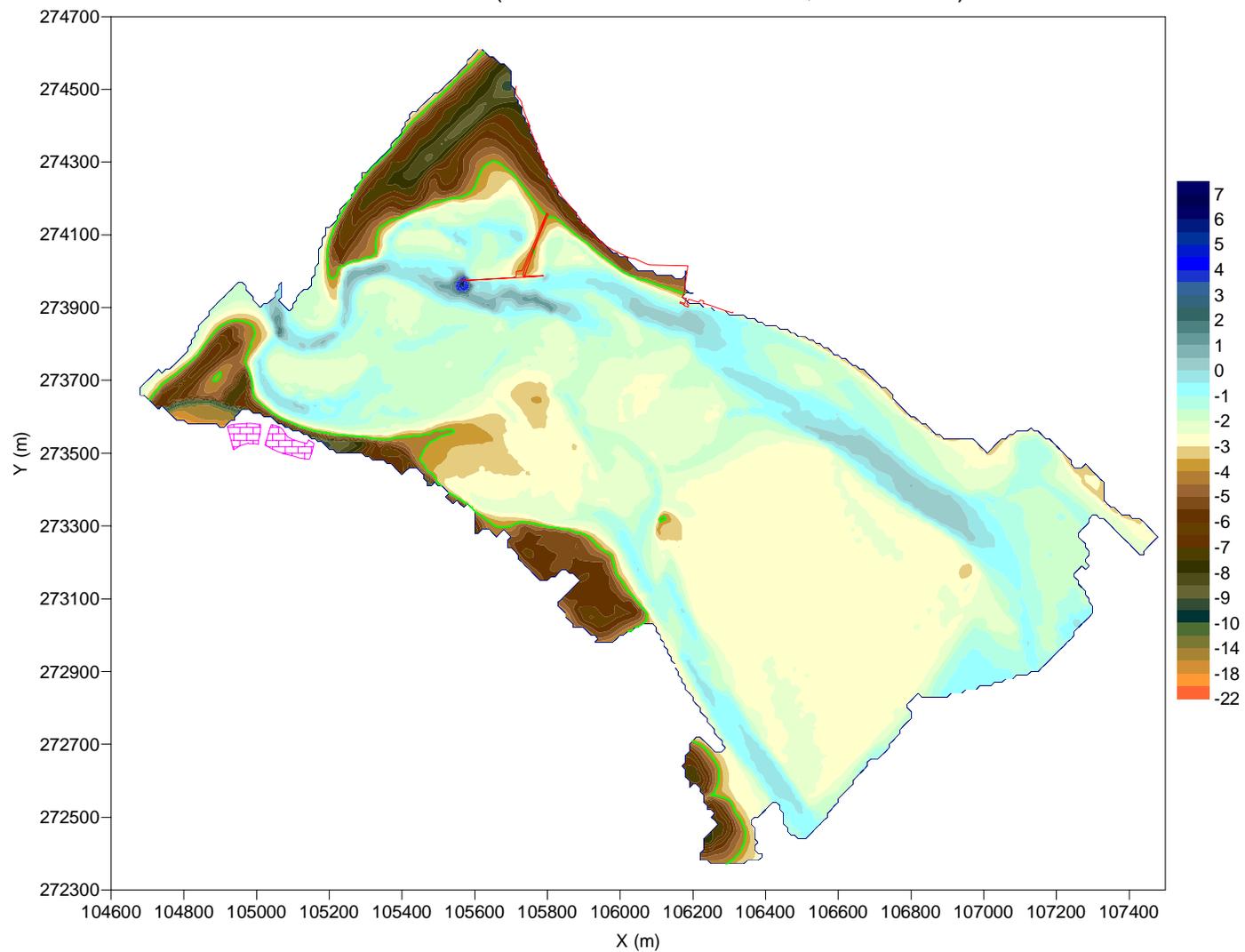
Novembro 2001 (Sondas referidas ao ZH, em metros)



Abril 2002 (Sondas referidas ao ZH, em metros)



Outubro 2002 (Sondas referidas ao ZH, em metros)



ANEXO 2
Caracterização da Zona de Estudo

Neste anexo apresenta-se uma caracterização da situação de referência das propriedades físicas e químicas da zona de estudo, apresentando-se uma análise de dados meteorológicos, hidrológicos e oceanográficos obtidos na zona da Foz do Arelho.

A2.1. Análise dos Dados Meteorológicos

Na Figura A2-1 apresentam-se os dados da frequência anual do vento e intensidade média anual do vento, para o período de 14 de Novembro de 2000 a 6 de Junho de 2001. A análise dos dados mostra valores médios anuais de cerca de 6 m/s, e direcção de maior frequência do quadrante Norte (cerca de 30%) para o período de 14 de Novembro a 31 de Dezembro de 2000. Para o período de 1 de Janeiro a Junho de 2001, verifica-se uma intensidade média de 4 m/s e direcção de maior frequência Norte (cerca de 15% dos valores).

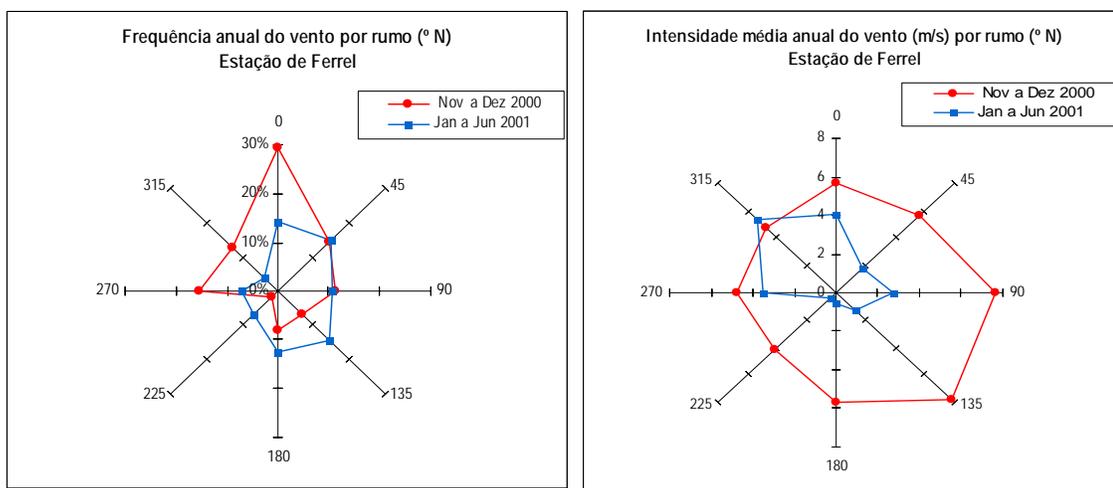


Figura A2-1- Frequência anual (a) e intensidade média anual (b) do vento por rumo (° do Norte) para o período de 14 de Novembro a 6 de Junho de 2001 (fonte: estação de Ferrel).

Na Figura A2-3 é apresentada a evolução temporal do valor das componentes Oeste-Este e Sul-Norte do vento, para o período referido anteriormente. O período de 2000, abrange o início de Inverno, verificando-se que os valores máximos são na ordem dos 15 m/s. O período de 2001 abrange o final de Inverno e Primavera. Na Primavera os valores atingem no máximo cerca de 8 m/s.

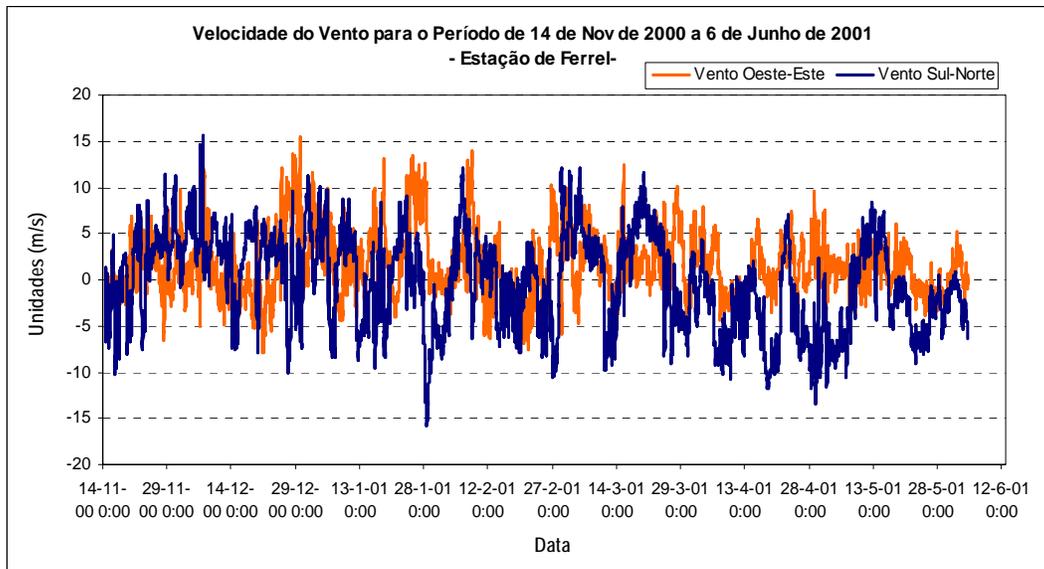


Figura A2-3: Evolução do valor das componentes Oeste-Este e Sul-Norte para o período de 2000 obtida das medições efectuadas na estação de Ferrel.

A análise dos valores de temperatura para o período de 14 de Novembro de 2000 a 6 de Junho de 2001 são apresentados na Figura A2-4, identificando-se um valor médio anual de cerca de 14° C, com o valor máximo a situar-se nos 20°C e o valor mínimo a rondar os 5° C.

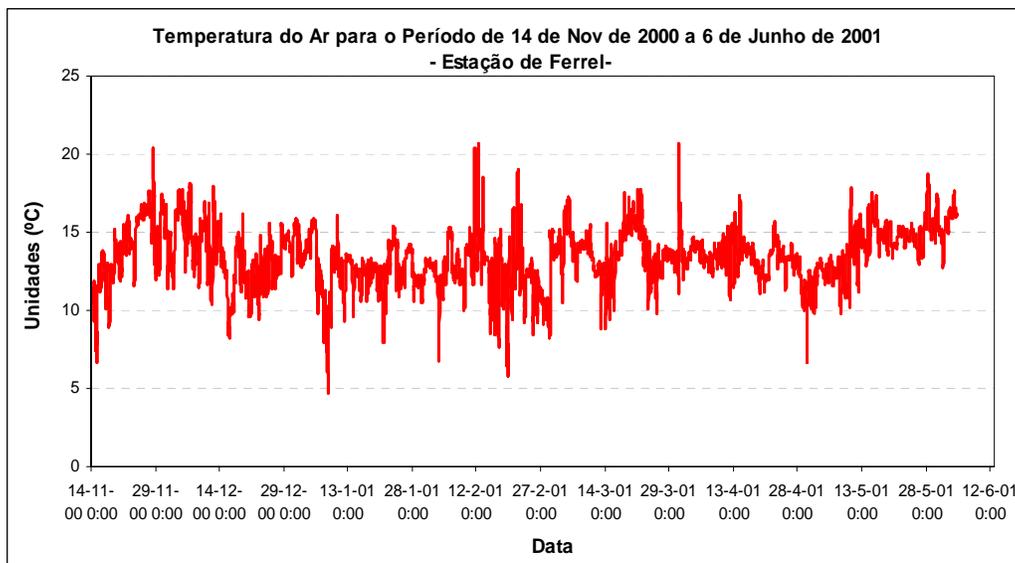


Figura A2-4: Evolução da temperatura do ar no período de 14 de Novembro a 31 de Dezembro de 2000 obtida na estação de Ferrel.

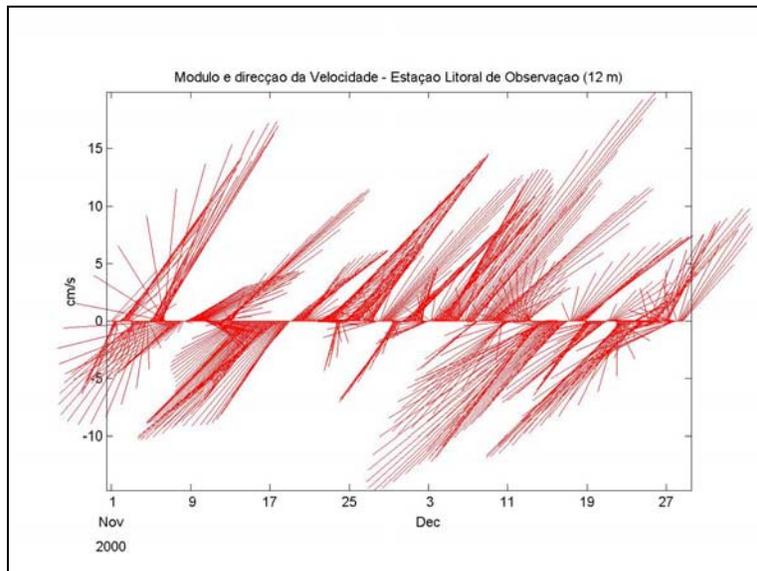
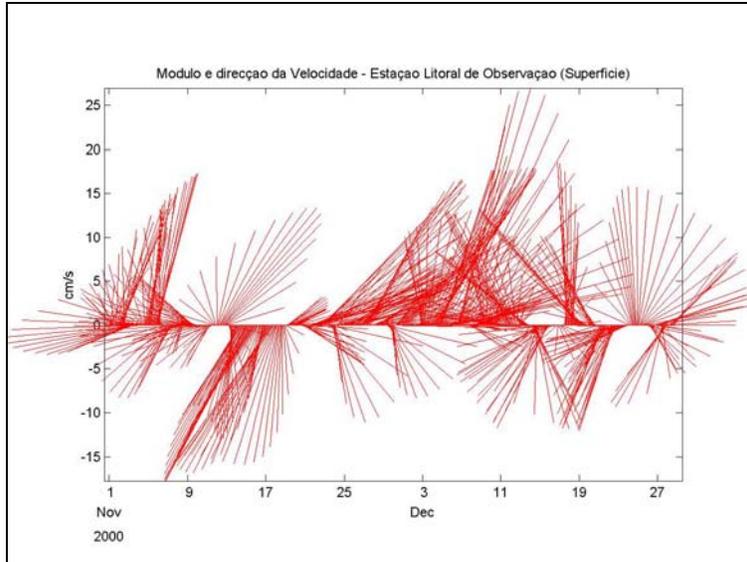
3.2. Caracterização das Correntes

Para análise das correntes no meio receptor, foram consideradas duas épocas diferentes: período de Novembro/Dezembro de 2000, o qual incide nos meses de Inverno e Abril/Junho de 2001, o qual é representativo da estação de Primavera. As correntes medidas para os períodos mencionados anteriormente, estão apresentadas na Figura A-5 e Figura A2-6, respectivamente. São apresentados nestas figuras, os valores medidos á superfície (~3m) a 12 m e a 20 m para ambos os períodos considerados. Os valores medidos foram filtrados de modo a retirar toda a variabilidade com um período abaixo das 30h, para remover a influência de fenómenos de alta-frequência.

Para o período de Novembro/Dezembro de 2000 predominam as correntes dirigidas para o quadrante Norte/Este perto da superfície, tal como é visível pela Figura A2-5 no gráfico da corrente à superfície. Os valores de corrente parecem determinados pelas condições de vento na zona, uma vez que a intensidade da corrente é maior á superfície (cerca de 25 cm/s), sendo na ordem dos 15 cm/s a 12 e 20 m.

Os valores de corrente medidos, para o período de Abril/Junho, indicam que as correntes mais frequentes nesta época do ano são dirigidas em geral para Sul/Sudoeste tanto perto da superfície (~3m) como em profundidade (12 e 20 m), tal como é visível na Figura A2-6. A direcção das correntes de maior intensidade, que chegam a atingir os 25-30 cm/s à superfície e 6-8 cm/s a 12 e 25 m, é também tendencialmente, neste período, cuja direcção mais frequente é de Sul/Sudoeste.

A Figura A2-7, mostra a correlação entre a componente Norte-Sul da corrente e da velocidade do vento para o período de Novembro/Dezembro. A correlação entre o vento e a corrente para este período apresenta um valor de coeficiente de correlação (R^2) de 0.4834, sugerindo que o vento é o principal mecanismo gerador desta corrente (os outros são a maré e a circulação geral na zona costeira). É apenas apresentada a correlação para o período de Nov/Dez 2000, porque é o período para o qual se pretende efectuar as simulações. Escolheu-se este período, porque é o período para o qual se reúne o maior conjunto de dados.



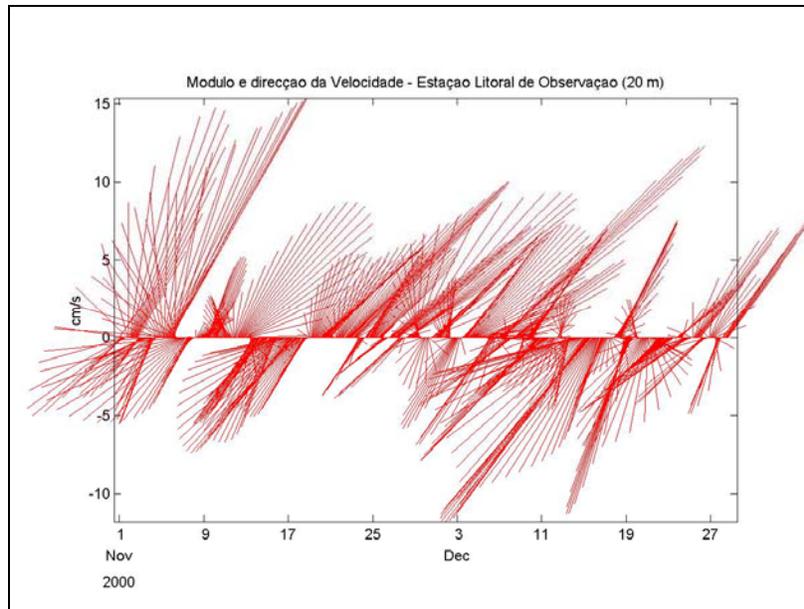
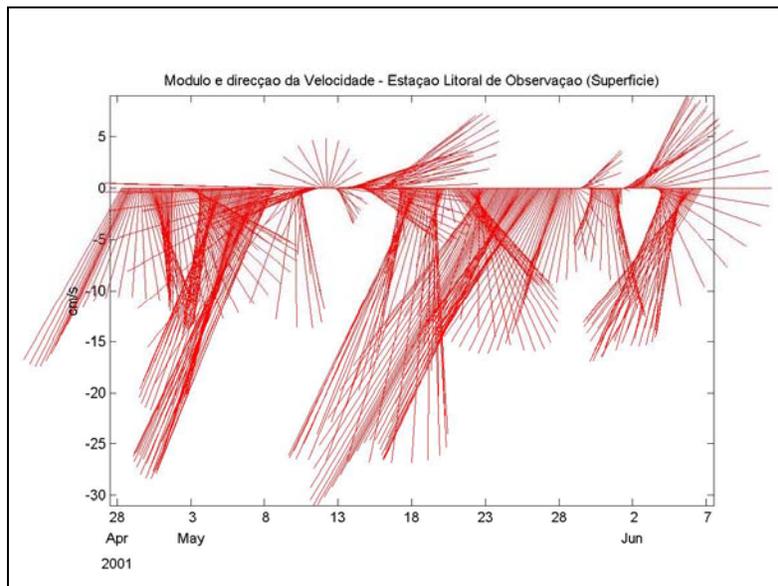


Figura A2-5- Módulo e direcção da velocidade de corrente medida na estação Litoral de Observação á superfície (~3m) a 12 e 20 m, para o período de 1 de Novembro a 27 de Dezembro de 2000. O eixo vertical dá o valor da intensidade da corrente, e a direcção á dada pela inclinação dos segmentos. Os valores de corrente apresentados, representam os valores filtrados para remoção do sinal com um período inferior a 30h.



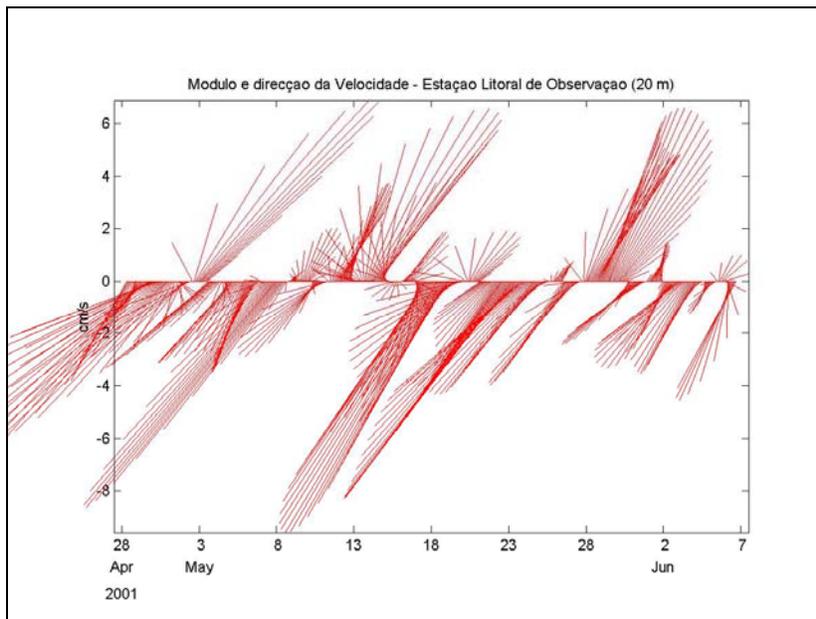
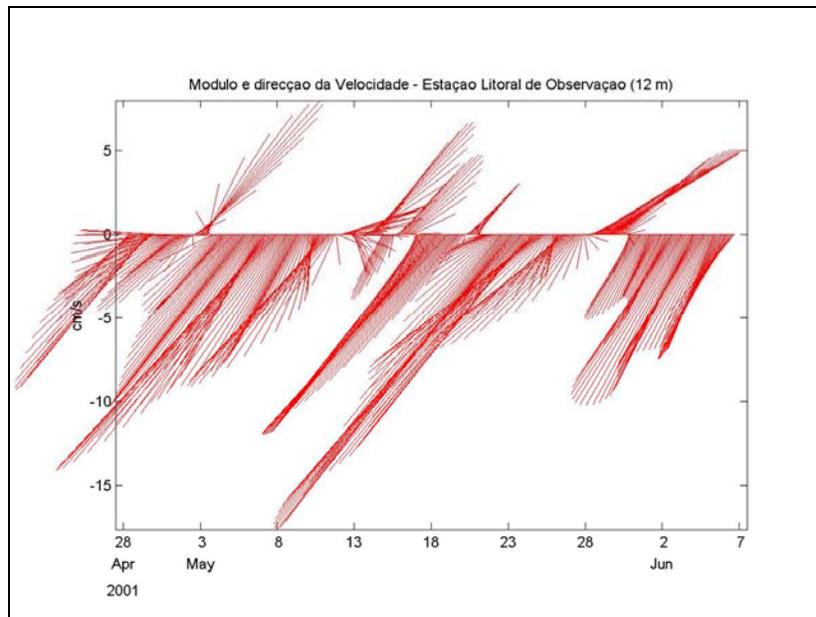
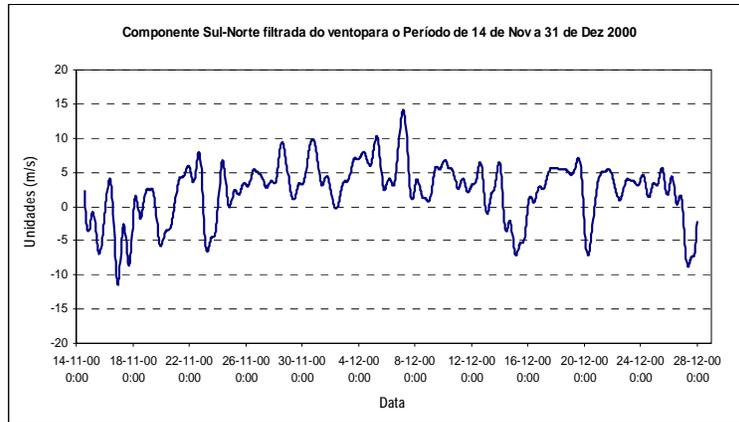
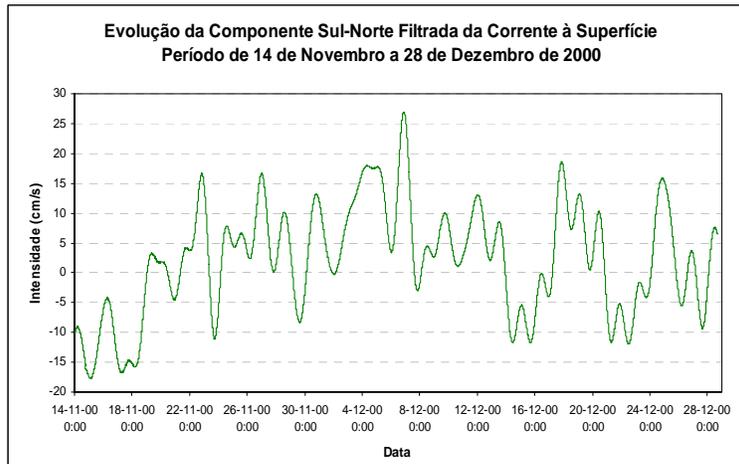


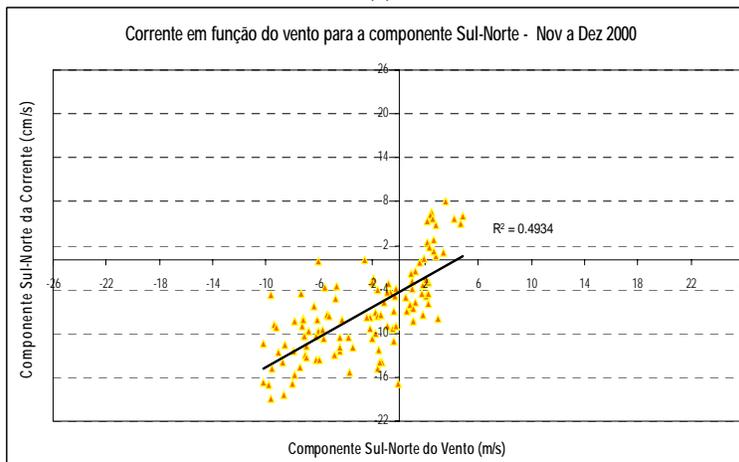
Figura A2-6- Módulo e direcção da velocidade de corrente medida na estação Litoral de Observação á superfície (~3m) a 12 e 20 m, para o período de 28 de Abril a 6 de Junho de 2001. O eixo vertical dá o valor da intensidade da corrente, e a direcção á dada pela inclinação dos segmentos. Os valores de corrente apresentados, representam os valores filtrados para remoção do sinal com um período inferior a 30h.



(a)



(b)



(c)

Figura A2-7- Evolução do valor da componente Sul-Norte do vento (a) e da corrente (b) para o período de 14 de Novembro a 31 de Dezembro de 2000, componente Sul-Norte da corrente (c); corrente em função do vento para a componente Sul-Norte.

ANEXO 3

Descrição do modelo STWAVE

A3.1. Descrição Geral

Neste Anexo é efectuada uma descrição do modelo numérico STWAVE especialmente vocacionado para simular a propagação da agitação com especial enfoque em zonas com importantes processos de interacção entre ondas e correntes.

A finalidade de aplicar modelos da transformação da onda é descrever quantitativamente a mudança dos parâmetros da onda (altura de onda, período, direcção e densidade espectral) entre o largo e a costa (tipicamente profundidades de 20 m ou de menos). Em águas relativamente profundas o campo das ondas é razoavelmente homogéneo na escala dos quilómetros, mas junto à costa, onde as ondas são influenciadas fortemente por variações da batimetria, o nível de água e as correntes, os parâmetros da onda podem variar significativamente na escala da dezena de metros.

A informação *offshore* relativa às características das ondas tem tipicamente origem em bóias ondógrafo ou em modelos de previsão de escala global ou regional. Esta informação, para efeitos de projectos de engenharia na costa, tem depois de ser transferida para as zonas de interesse, sendo este processo usualmente efectuado com base em modelos numéricos ou físicos (mais raramente). As ondas promovem o transporte de sedimentos e dão origem a correntes de deriva, promovem sobrelevações junto à costa (*wave set-up*) e o espraiamento (*wave runup*), dão origem a oscilações dentro dos Portos e têm impacto directo nas estruturas costeiras.

O modelo STWAVE permite simular os processos de refacção e empolamento das ondas (por acção das variações da batimetria e/ou de correntes), os processos de rebentação, os processos de difracção (de forma simplificada) e ainda interacções onda-onda e o *white-capping*.

O espectro da onda é uma representação estatística de um campo de ondas. Conceptualmente, um espectro é uma sobreposição linear de ondas monocromáticas e descreve a distribuição da energia das ondas em função da frequência (espectro 1D) ou da frequência e da direcção (espectro 2D). O modelo STWAVE utiliza como *input* um espectro 2D e é baseado na suposição de que as fases relativas das componentes do espectro são aleatórias. Em aplicações práticas, a informação sobre a fase da onda sobre todo o domínio raramente é conhecida de forma suficientemente precisa para justificar a utilização de modelos que resolvam a fase das ondas. Tipicamente a informação da fase só é necessária para resolver variações da altura da onda perto das estruturas litorais onde os processos de reflexão e difracção podem assumir um papel preponderante.

A3.2. Hipóteses do Modelo

As hipóteses assumidas no código do modelo STWAVE são basicamente as seguintes:

- *Inclinação dos fundos suave e reflexão insignificante da onda.* STWAVE é um modelo que funciona num meio-plano, o que significa que a energia da onda só se pode propagar do largo para a costa. As ondas reflectidas na costa ou por variações acentuadas do fundo propagam-se em direcções fora deste meio plano sendo assim negligenciadas.
- *condições offshore homogéneas espacialmente.* A variação do espectro da onda ao longo do limite *offshore* do domínio raramente é conhecida, e para domínios na ordem da dezena dos quilómetros espera-se ser pequena. Assim, o espectro de entrada do modelo STWAVE é constante ao longo do limite *offshore*. Versões futuras do modelo podem vir a permitir a consideração de uma entrada variável.
- *ondas, correntes e ventos estacionários.* O STWAVE é formulado como um modelo de estado estacionário. Uma formulação de estado estacionário reduz o tempo de cálculo e é apropriado para as condições da onda que variam mais lentamente do que o tempo necessário para a onda atravessar o domínio de cálculo. Para a geração da onda a suposição de estado estacionário significa que os ventos permanecem constantes durante um período suficientemente longo para que as ondas alcancem uma condição de limitação pelo fetch ou se encontrem inteiramente desenvolvidas (as ondas não são limitadas pela duração dos ventos).
- *Refracção e empolamento lineares.* O STWAVE incorpora somente a refração e empolamento lineares da onda não representando assim a assimetria da onda. A precisão do modelo é assim menor para números de *UrSELL* elevados (as alturas de onda são subestimadas).
- *Correntes uniformes.* Os processos de interacção ondas-correntes baseiam-se no pressuposto que a corrente é uniforme na coluna de água. Em situações de fortes gradientes verticais esta limitação deve ser tida em consideração.
- *O atrito de fundo é desprezado.* A relevância do atrito na dissipação da onda tem sido um tópico de debate. Os coeficientes de atrito têm sido utilizados frequentemente como um coeficiente de calibração para ajustar os resultados modelo a medidas. Embora o atrito seja fácil de aplicar num modelo de ondas, determinar os coeficientes apropriados já é mais difícil. Tendo igualmente em consideração que as distâncias da propagação num modelo deste tipo são geralmente relativamente curtas (dezena de quilómetros), o atrito é desprezado.

A3.3. Equações

A interacção das ondas com correntes é considerada num referencial da referência que se move com a corrente. Os parâmetros da onda neste referencial são denotados com o subscrito r , ("relativo" à corrente) e os parâmetros no referencial fixo são referidos com o subscrito a (absoluto). A relação de dispersão da onda é calculada no referencial móvel como (Jonsson et al, 1990).

$$\omega_r^2 = g k \tanh kd \quad (\text{Eq.A3-1})$$

onde:

ω_r = frequência angular

g = aceleração da gravidade

k = número de onda

d = profundidade da água

No referencial absoluto, a relação de dispersão será,

$$\omega_a = \omega_r + k U \cos (\delta - \alpha) \quad (\text{Eq.A3-2})$$

onde:

U = velocidade da corrente

δ = direcção da corrente

α = direcção da ortogonal da onda

O número de onda é resolvido substituindo a equação A3-1 na equação A3-2 e resolvendo iterativamente para K .

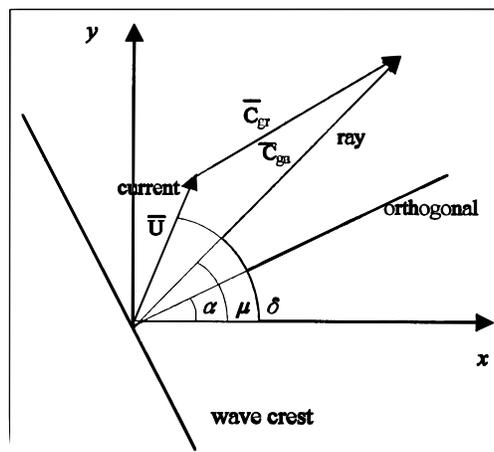


Figura A-8 – Esboço da definição da onda e de vectores de corrente.

As soluções para a refração e empolamento também requerem a definição da celeridade da onda, C , e da celeridade de grupo, C_g , em ambos os referenciais. No referencial relativo à corrente,

$$C_r = \frac{\omega_r}{k} \quad (\text{Eq.A3-3})$$

$$C_{gr} = 0.5 C_r \left(1 + \frac{2kd}{\sinh 2kd} \right) \quad (\text{Eq.A3-4})$$

No referencial absoluto será:

$$C_a = C_r + U \cos(\delta - \alpha) \quad (\text{Eq.A3-5})$$

$$(C_{ga})_i = (C_{gr})_i + (U)_i \quad (\text{Eq.A3-6})$$

onde o *subscript* i se refere à notação do tensor para as componentes de x e de y . A celeridade de grupo absoluta define a direcção do raio da onda. Assim a direcção do raio da onda (Figura A-8) é definida como,

$$\mu = \tan^{-1} \left(\frac{C_{gr} \sin \alpha + U \sin \delta}{C_{gr} \cos \alpha + U \cos \delta} \right) \quad (\text{Eq.A3-7})$$

A distinção entre a ortogonal (direcção perpendicular à crista da onda) e o raio da onda (direcção da propagação da energia) é importante para descrever a interacção ondas-correntes. Sem correntes, os raios e as ortogonais da onda são os mesmos, mas com correntes, a energia da onda move-se ao longo dos raios visto que a direcção da onda é definida pelas ortogonais.

A direcção ortogonal da onda para o estado estacionário é dada por (Mei 1989; Jonsson 1990),

$$C_{ga} \frac{D_\alpha}{DR} = - \frac{C_r k}{\sinh 2kd} \frac{Dd}{Dn} - \frac{k_i}{k} \frac{DU_i}{Dn} \quad (\text{Eq.A3-8})$$

onde D é uma derivada, R é uma coordenada na direcção do raio da onda, e n é uma coordenada normal à ortogonal. A equação para a conservação do estado estacionário da acção espectral da onda ao longo de um raio é dada por (Jonsson 1990),

$$(C_{ga})_i \frac{\partial}{\partial x_i} \frac{C_a C_{ga} \cos(\mu - \alpha) E}{w_r} = \sum \frac{S}{w_r} \quad (\text{Eq.A3-9})$$

sendo E o espectro de densidade de energia da onda e S os termos de fonte e poço.

A.3.3.1. Refracção e empolamento

Os processos de refracção e empolamento estão implementados no modelo STWAVE com base na aplicação do princípio de conservação da acção da onda ao longo dos raios. Os espectros bidimensionais da onda são fornecidos como dado de entrada ao longo da primeira coluna da malha de cálculo (o limite *offshore*). Para um ponto na segunda coluna da malha, o espectro é calculado efectuando o cálculo do raio no sentido inverso para cada componente do espectro em frequência e direcção. Somente as direcções que se propagam para a costa (- 87.5 a +87.5 graus) são incluídas. A energia que se propaga para o largo é negligenciada.

O raio da onda é assim seguido até à origem na coluna anterior calculando-se o comprimento do segmento Dr . As derivadas das componentes da profundidade e da corrente normais à ortogonal são estimados (com base na direcção da ortogonal na coluna 2) e substituídos na equação (Eq.A3-9) para calcular a direcção da ortogonal na coluna I. Seguidamente, o número de onda, as celeridades da onda e de grupo, e o ângulo do raio na coluna precedente são calculados. A energia é calculada como uma média pesada da energia entre os dois pontos de malha adjacentes.

No caso da presença de uma corrente (por exemplo correntes de vazante numa embocadura) as ondas podem ser obstruídas pelas correntes. A obstrução ocorre quando não é possível encontrar uma solução para a relação de dispersão (Eq.A3-2). Se a obstrução ocorrer a energia da onda é dissipada por um processo de rebentação.

A.3.3.2. Difracção

O processo de difracção é considerado de uma maneira simples considerando um alisamento da energia da onda. O modelo alisa a energia numa banda de frequência e direcção usando a seguinte formulação,

$$E_j(w_a, \theta) = 0.55E_j(w_a, \theta) + 0.225(E_{j+1}(w_a, \theta) + E_{j-1}(w_a, \theta)) \quad (\text{Eq.A3-10})$$

onde E representa a densidade da energia numa dada banda de frequência e direcção, e o subscripto j indica o índice da linha da malha (posição paralela à costa). A equação anterior conduz ao alisamento dos gradientes acentuados que ocorrem em áreas abrigadas mas não introduz alterações na direcção. Esta formulação depende assim das características da malha de cálculo o que constitui uma limitação que deve ser tida em consideração na análise dos resultados.

A.3.3.3. Fontes e poços

Rebentação

O critério de rebentação utilizado na primeira versão de STWAVE era baseado numa função da relação da altura de onda com profundidade da água,

$$\frac{H_{m0_{\max}}}{d} = 0.64 \quad (\text{Eq.A-11})$$

onde H_{m0} representa a energia baseada no momento zero da altura da onda. Numa barra, onde as ondas empolem devido à interacção com as correntes, o processo de rebentação é acentuado pelo incremento no processo de empolamento. Smith, Resio, e Vincent (1997) efectuaram as medidas em laboratório de rebentação de ondas irregulares sobre uma corrente de vazante e verificaram que uma formulação baseada no critério de Miche (1951) constituía uma opção simples, robusta e precisa (ver também Battjes, 1982 e Battjes e Janssen, 1978):

$$H_{m0_{\max}} = 0.1L \tanh kd \quad (\text{Eq.A-12})$$

A energia do espectro é reduzida em cada frequência e direcção em proporção à quantidade de energia disponível antes da rebentação na banda de frequência e direcção. Transferências de energia devidas a processos não lineares que ocorrem durante a rebentação não são representadas no modelo.

Vento

As ondas desenvolvem-se com transferência de momento do campo do vento para campo das ondas. O fluxo da energia, F_{in} , no é calculado com base em (Resio 1988a),

$$F_{in} = \lambda \frac{\rho_a}{\rho_w} 0.85 C_m \frac{u_*^2}{g} \quad (\text{Eq.A-13})$$

Onde λ é um coeficiente de partição, ρ_a representa densidade do ar, ρ_w representa densidade da água, C_m é a celeridade média da onda e u_* é a velocidade de corte (igual ao produto da velocidade de vento, V_v , pela raiz quadrada do coeficiente de atrito, $C_d = .0012 + .000025 V_v$)

Em águas profundas o modelo fornece uma taxa de crescimento da energia total consistente com Hasselmann *et al.* (1973). O ganho da energia do espectro é calculado multiplicando o fluxo da energia pelo tempo necessário para a onda se propagar entre duas células,

$$\Delta t = \frac{\Delta x}{\beta C_g \cos \theta_m} \quad (\text{Eq.A3-15})$$

onde Δt representa o tempo de deslocação, Δx é o passo da malha, β é um factor igual a 0.9, C_g celeridade de grupo média e θ_m representa a direcção média de propagação.

Interacções onda-onda e processos de white-capping

À medida que o vento alimenta a energia das ondas è redistribuído através de processos de interação onda-onda. A energia é transferida do pico do espectro a para frequências mais baixas (que diminuem a frequência de pico ou que aumentam o período de pico) e para altas-frequências (onde é dissipada).

O modelo STWAVE permite que a frequência de pico aumente com o *fetch*. A equação para esta taxa de mudança da f_p é dada por,

$$(f_p)_{i+1} = \left[(f_p)_i^{7/3} - \frac{9}{5} \zeta \left(\frac{u_*}{g} \right)^{4/3} \Delta t \right]^{-3/7} \quad (\text{Eq.A3-16})$$

onde os subscritos i e $i+1$ representam os índices das colunas da malha de cálculo e ζ é uma constante adimensional (Resio e Perrie, 1989).

A energia ganha pelo espectro é distribuída pelas frequências inferiores à frequência de pico mantendo a forma do espectro. A energia é dissipada através de transferências para as altas-frequências e dissipada através de rebentação (white capping) e de efeitos turbulentos/viscosos. Existe um balanço dinâmico entre a energia incorporada por efeito do vento e a energia dissipada por efeito dos fluxos não-lineares para as frequências mais elevadas (Resio 1987, 1988a). O fluxo da energia para as altas-frequências é representado em STWAVE como

$$\Gamma_E = \frac{\epsilon g^{1/2} E^3 k_p^{9/2}}{\tanh^{3/4}(k_p d)} \quad (\text{Eq.A3-17})$$

onde o Γ_E é o fluxo da energia, ϵ é um coeficiente igual a 30, E é a energia total do espectro e o k_p é o número de onda associado ao o pico do espectro (Resio, 1987).