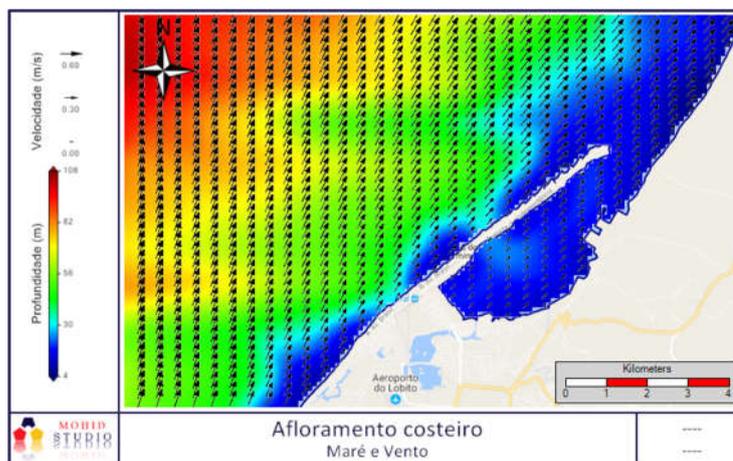


UNIVERSIDADE DE LISBOA  
INSTITUTO SUPERIOR TÉCNICO



*Modelação da Hidrodinâmica e Qualidade da Água na Baía do Lobito*

**António Evaristo**

**Tese aprovada em provas públicas para a obtenção do Grau de Doutor em**

**Engenharia do Ambiente**

**Orientador: Doutor Ramiro Joaquim de Jesus Neves**

**Qualificação atribuída pelo Júri Aprovado**

**Júri**

**Presidente-Presidente do Conselho Científico do IST**

**Vogais:**

**Doutor Ramiro Joaquim de Jesus Neves**

**Doutor António Jorge Silva Guerreiro Monteiro**

**Doutor Flávio Augusto Bastos da Cruz Martins**

**Doutora Maria Manuela Fraga Juliano**

**UNIVERSIDADE DE LISBOA**  
**INSTITUTO SUPERIOR TÉCNICO**

***Modelação da Hidrodinâmica e Qualidade da Água na Baía do Lobito***

**António Evaristo**

**Tese aprovada em provas públicas para a obtenção do Grau de Doutor em**  
**Engenharia do Ambiente**

**Orientador:** Doutor Ramiro Joaquim de Jesus Neves

**Qualificação atribuída pelo Júri Aprovado**

**Júri**

**Presidente:** Presidente do Conselho Científico do IST

**Vogais:**

**Doutor Ramiro Joaquim de Jesus Neves, Professor Associado do Instituto Superior Técnico da Universidade de Lisboa**

**Doutor António Jorge Silva Guerreiro Monteiro, Professor Associado do Instituto Superior Técnico da Universidade de Lisboa**

**Doutor Flávio Augusto Bastos da Cruz Martins, Professor Coordenador do Instituto Superior de Engenharia da Universidade do Algarve**

**Doutora Maria Manuela Fraga Juliano, Professora Auxiliar da Faculdade de Ciências Agrárias do Ambiente da Universidade dos Açores**

# ÍNDICE

<b>Abreviaturas</b> .....	1
Resumo .....	1
Agradecimentos .....	2
1. INTRODUÇÃO .....	3
1.1. Enquadramento .....	3
1.2. Motivação .....	4
1.3. Hipótese .....	5
1.4. Objectivos da tese .....	6
1.5. Estrutura da tese .....	6
1.6. Área de estudo .....	7
1.7. O problema a resolver .....	8
1.8. Metodologia geral .....	9
2. HIDRODINÂMICA DA BAÍA DO LOBITO. PARTE I – CORRENTES DE MARÉ....	11
2.1. Introdução .....	12
2.2. Materiais e métodos .....	13
2.3. Marés .....	13
2.4. Correntes .....	13
2.5. Ventos .....	15
2.6. Sistema de modelagem mohid water .....	15
2.7. Batimetria e malha de cálculo .....	16
2.8. Condições de fronteira .....	17
2.9. Resultados e discussão .....	18
2.10. Análise dos níveis de maré .....	18
2.11. Campo de velocidades .....	20
1.1. Tempo de residência .....	22
1.1.1. Conclusões .....	24
1.1.2. Referências Bibliográficas .....	26
3. HIDRODINÂMICA DA BAÍA DO LOBITO. PARTE II – ESCOAMENTO BAROCLINICO .....	28
1.2. Introdução .....	28
1.3. Área de estudo .....	29
1.4. Materiais e métodos .....	31
1.4.1. Equação para o escoamento .....	31
1.4.2. Aplicação na Baía do Lobito .....	32
1.4.3. Resultados obtidos .....	34
1.5. Análise e discussão dos resultados .....	43

1.6.	Conclusão.....	44
1.7.	Referências Bibliográficas.....	45
4.	MODELO ECOLÓGICO E QUALIDADE ÁGUA.....	47
4.1.	Introdução.....	47
4.2.	Descrição do modelo ecológico.....	47
4.3.	Equações do modelo.....	49
4.4.	Parametrização do modelo.....	51
4.5.	Condições iniciais e de fronteira.....	55
4.6.	Condições Iniciais impostas no modelo.....	55
4.7.	Condições de Fronteira imposta no modelo.....	55
4.8.	Qualidade da água na Baía do Lobito.....	58
4.9.	Salinidade.....	58
4.10.	Temperatura.....	59
4.11.	Nutrientes e Oxigénio.....	59
4.12.	Caudal fluvial.....	61
4.13.	Cenários Simulados.....	62
4.14.	Resultados do modelo da qualidade da água.....	64
4.15.	Nitrato.....	65
4.16.	Séries temporais.....	71
4.17.	Resultados.....	74
4.17.1.	Nitrato.....	75
4.17.2.	Cenários – séries temporais.....	81
5.	Conclusões.....	89
5.1	Recomendação para trabalho futuro.....	91
6.	Referências Bibliográficas.....	92
I.	Anexos.....	94
II-	Anexo.....	103

## **Índice de Tabelas**

Tabela 1- Amplitude e fase das componentes da maré obtidas com os dados .....	14
Tabela 2- Valores médios do vento no domínio do modelo, para cada mês do ano. ....	18
Tabela 3- Comparação da amplitude e fase das principais constituintes da maré obtidas com os dados e com os resultados do modelo .....	19
Tabela 4- Parametrização do modelo ecológico.....	54
Tabela 5- Caudais e concentrações das descargas das valas Quileva.....	57
Tabela 6- Valores médios de caudal e de concentração para o nitrato e a amónia na Baía do Lobito .....	57

## Índice de Figuras

Figura 1 - Imagem da Baía do Lobito com a Restinga em 1º plano e o Porto e a cidade ao fundo .....	5
Figura 2 (a)-Localização da Baía do Lobito em Angola; (b) mostra a zona húmida na foz do rio Catumbela, a sul da Baía do Lobito; (c) identifica as entradas de água doce na Baía .....	8
Figura 3 - Representação esquemática do sistema de correntes no Atlântico Sul (Adaptado de Tomczak and Godfrey [1994]) .....	9
Figura 4 - Correntes oceânicas ao largo de Angola de acordo com os autores indicados em cada uma delas. ....	14
Figura 5 - Ventos: Climatologia mensal obtida a partir de ventos medidos por satélite. ....	15
Figura 6 - Batimetria da área de estudo da Baía do Lobito (a) e malha de cálculo do modelo regional e do modelo da baía (b) .....	17
Figura 7 - Comparação dos níveis de maré calculados pelo modelo e obtidos a partir das componentes harmónicas medidas no Porto do Lobito. ....	19
Figura 8 - Evolução do nível de maré calculado pelo modelo da Baía do Lobito ao longo de um ciclo de maré viva – maré morta. ....	20
Figura 9 - Campo de velocidades na Baía do Lobito em vazante sem vento(a) maré e vento (c). Campo de velocidades na Baía do Lobito em enchente sem vento (b) maré e vento (d). ....	20
Figura 10 - Campos de velocidade residual (em 2D) devida à maré mais o vento .....	22
Figura 11- Localização dos traçadores lagrangeanos no início da simulação as 0 horas do dia 1-03-2011 dentro da baía do Lobito .....	23
Figura 12-- Evolução temporal da percentagem de traçadores emitidos em cada uma das caixas que ainda está no interior da baía - Caixa 1 (fundo da baía), Caixa 2 (zona intermédia da baía) e Caixa 3 (embocadura da baía) - considerando exclusivamente o forçamento de maré. ....	24
Figura 13-Comparação da evolução temporal da percentagem de traçadores, com e sem vento, em bidimensional. ....	24
Figura 14-Localização das principais indústrias em redor da Baía. ....	30
Figura 15-Velocidades médias mensais na Baía do Lobito obtidas a partir de resultados do modelo GFS (NOAA) para o ano de 2014 .....	30
Figura 16 - Sistema dos modelos Hidrodinâmico .....	34
Figura 17 -Sistema de modelos encaixados utilizado para simular o escoamento baroclínico na Baía do Lobito. ....	34
Figura 18-Valores horários da velocidade do vento durante o mês de junho de 2014. ....	36
Figura 19-Nível da água na Baía simulado durante o mês de Junho pelos modelos 2D e 3D. A semelhança dos níveis mostra que o nível só é sensível à maré. ....	36
Figura 20 - Campos nível e de velocidade residuais à superfície e no fundo durante o mês de Junho de 2014. ....	36
Figura 21-Corte vertical do campo de velocidades ao longo do eixo da Baía no dia 23 de Junho de 2014 às 14 horas .....	37

Figura 22-Locais de realização de perfis verticais de Temperatura na zona da Baía do Lobito em Junho de 2014 (Esquerda) e diferenças entre perfis medidos nas estações 28 e 6 e 28 e 14 e perfis calculados nos mesmos pontos.....	37
Figura 23-Temperatura a superfície prevista pelo modelo para as 12 horas do dia 24 de Junho de 2014, pondo em evidência o processo de upwelling no interior da Baía associado ao vento de oeste .....	38
Figura 24- Correntes superficiais instantâneas na Baía do Lobito dias 24-08 de 2014 às 10 horas início da vazante, numa altura em que o efeito do vento e da maré no escoamento sul tem sentidos opostos.....	40
Figura 25-Campos de velocidades no dia 2 de Dezembro de 2014.....	41
Figura 26-Caixas de emissão (3) dos traçadores Lagrangeanos e localização dos traçadores uma semana depois da emissão.....	42
Figura 27-Evolução temporal da relação entre traçadores no modelo 3D, no interior da Baía nos primeiros dois metros da coluna de água a contar da superfície considerando o forçamento da maré e atmosférico.....	42
Figura 28 - Esquema conceptual do modelo; adaptado de (Pina, 1999). .....	48
Figura 29 - Esquema conceptual do modelo de qualidade da água.....	51
Figura 30- Dinâmica do fitoplâncton assumido pelo modelo ecológico.....	53
Figura 31-Localização das duas descargas na baía do Lobito Managal (Sonamet) e Quileva...	57
Figura 32-Perfil de nutrientes no oceano. Fonte: (NOCD) .....	61
Figura 33Perfil de oxigénio no oceano. Fonte: (NOCD).....	61
Figura 34 -Representação esquemática do efeito modelador do caudal fluvial num estuário. ..	62
Figura 35- Mapa de velocidades com a descarga na baía do Lobito (esquerda) e sem descargas (direita), a 24 de Junho de 2014 as 12horas. As figuras são semelhantes.....	64
Figura 36- Perfil vertical da velocidade no interior da baía do Lobito com vento Norte às 22hora no dia 2 de Dezembro 2014 com maré alta. O escoamento está bloqueado no interior da baía e há recirculação vertical. ....	64
Figura 37- Evolução da concentração de nitrato ao longo de uma simulação de 12 horas no dia 20 de Junho de 2014 num ponto de estações de amostragem (mgN/l), e comparação com descargas a esquerda e sem descargas a direita.....	67
Figura 38-Perfil e da concentração do nitrato às 12 horas no dia 20 de Junho de 2014 ao longo da linha amarela representada no mapa.....	67
Figura 39-Perfil de concentração do nitrato às 12 horas no dia 20 de Junho de 2014, COM descarga, ao longo da linha amarela representada no mapa.....	67
Figura 40 - Perfil de concentração do nitrato às 12 horas no dia 20 de Junho de 2014 ao longo da linha amarela representada no mapa, numa situação SEM descarga.....	68
Figura 41- Perfil e da concentração do nitrato às 12 horas no dia 20 de Junho de 2014 ao longo da linha amarela representada no mapa, numa situação sem descarga. ....	68
Figura 42-Evolução da concentração de fitoplâncton ( $\mu\text{gCl}_a/\text{L}$ ), ao longo de uma simulação de 12 horas no dia 20 de Junho de 2014 SEM descargas à esquerda e COM descargas à direita. .	70

Figura 43-Perfil vertical de Fitoplâncton às 12 horas no dia 20 de Junho de 2014 SEM descargas.....	70
Figura 44-Perfil vertical de Fitoplâncton às 0 horas no dia 20 de Junho de 2014 COM descargas .....	70
Figura 45-Comparação entre as séries temporais de concentração de Nitrato nos cenários com e sem descargas, obtidas para a célula na fronteira Norte.....	72
Figura 46-Mapa3D temperatura a superfície sem descarga (esquerda) prevista pelo modelo para as 12 horas do dia 25 de Junho de 2014, pondo em evidência o processo de upwelling no interior da Baía associado ao vento de oeste; a direita sem descargas a direita .....	73
Figura 47- Mapa 3D Salinidade a superfície com descarga e (esquerda) sem descargas (directa), prevista pelo modelo para as 12 horas do dia 25 de Junho de 2014.....	73
Figura 48- Mapa de velocidades com a descarga na baía do Lobito (esquerda) e sem descargas (direita), a 24 de Junho de 2014 as 12horas. ....	74
Figura 49 - Perfil vertical da velocidade no interior da baía do Lobito com vento Norte as 22 hora no dia 2 de Dezembro 2014 com maré alta. ....	74
Figura 50-Evolução da concentração de nitrato ao longo de uma simulação de 12 horas no dia 20 de Junho de 2014 num ponto de estações de amostragem (mgN/l), e comparação com descargas a esquerda e sem descargas a direita. ....	76
Figura 51 - Perfil e da concentração do nitrato de uma simulação instântia as 12 horas no dia 20 de Junho de 2014 num ponto de estações de amostragem (mgC/l), feita na camada XZ a meio do domínio e comparação com descargas .....	77
Figura 52-Perfil e da concentração do nitrato de uma simulação instântia as 12 horas no dia 20 de Junho de 2014 num ponto de estações de amostragem (mgN/l), feita na camada e YZ a meio do domínio e comparação com descargas .....	77
Figura 53- Imagem da Baía do Lobito com a Restinga em 1º plano e o Porto e a cidade ao fundo -Perfil e da concentração do nitrato de uma simulação instântia as 12 horas no dia 20 de Junho de 2014 num ponto de estações de amostragem (mgN/l), feita na camada XZ a meio do domínio e comparação sem descargas.....	77
Figura 54-Perfil e da concentração do nitrato de uma simulação instântia as 12 horas no dia 20 de Junho de 2014 num ponto de estações de amostragem (mgN/l), feita na camada YZ a meio do domínio e comparação sem descargas.....	78
Figura 55-Evolução da concentração de fitoplâncton ao longo de uma simulação de 12 horas no dia 20 de Junho de 2014 num ponto de estações de amostragem (mgC/l), e comparação sem descargas e com descargas a( direita).....	80
Figura 56-Perfil vertical de Fitoplâncton às 12 horas no dia 20 de Junho de 2014 SEM descargas.....	80
Figura 57 -Perfil vertical de Fitoplâncton às 0 horas no dia 20 de Junho de 2014 COM descargas.....	80
Figura 58-Localização dos pontos das séries temporais na Baía do Lobito.....	81
Figura 59-Comparação entre as séries temporais dos vários cenários obtidas para a célula na fronteira Norte. Cenário 1 – sem descargas; cenário 2 – descargas da Quileva e Sonamet.....	82
Figura 60-Comparação entre as séries temporais dos vários cenários obtidas para a célula na fronteira Oeste. Cenário 1 – sem descargas; cenário 2 – todas as descargas. ....	83

Figura 61-Comparação entre as séries temporais dos vários cenários obtidas para a célula na fronteira Oeste. Cenário 1 – sem descargas; cenário 2 – todas as descargas. ....	83
Figura 62-Comparação entre as séries temporais dos cenários concentração de Nitrato ao longo do ano 2014 no ponto Sonamet da célula com descarga e sem descarga (mgN/l), interior da baía do Lobito. ....	84
Figura 63-Comparação entre as séries temporais dos vários cenários obtidas para a célula em que é feita a descarga da Sonamet. Cenário 1 – sem descargas; cenário 2 – com as descargas. ....	84
Figura 64-Comparação entre as séries temporais dos vários cenários obtidas para a célula na fronteira Norte. Cenário 1 – sem descargas; cenário 2 – todas as descargas. ....	85
Figura 65 - a-Evolução entre as séries temporais dos vários cenários obtidas para a célula na fronteira Norte. Cenário 1 – sem descargas; cenário 2 – todas as descargas.A Figura 64(a) mostra a concordância ilustrada na Figura 65 .....	85
Figura 66-Comparação entre as séries temporais dos vários cenários obtidas para a célula das descargas. Cenário – todas as descargas.....	86
Figura 67- concentração máxima do fitoplâncton superfície na Baía do Lobito ao longo de uma simulação instantânea as 10 horas no dia 4 de Dezembro de 2014 num ponto de estações de amostragem (mgC/l), com descargas.....	87
Figura 68-Perfil e da concentração Fitoplâncton de uma simulação instantânea as 12 horas no dia 4 de Dezembro de 2014 num ponto de estações de amostragem (mgC/l), feita na camada YZ a meio do domínio com descargas .....	87
Figura 69-Perfil e da concentração Fitoplâncton de uma simulação instantânea as 12 horas no dia 20 de Dezembro de 2014 num ponto de estações de amostragem (mgC/l), feita na camada x- x a meio do domínio com descargas .....	87

## **Abreviaturas**

*British Oceanographic Data Center* INAG -Instituto Nacional de Água

ECMWF -European Centre for Medium-Range Weather Forecasts

EASL-Empresa de água e Saneamento do Lobito

FES -Finite Element Solution 2004

GFS, -Global Forecasting System

IST -Instituto Superior Técnico)

I.G.C.A -Instituto Geográfico e Cadastrais de Angola

Maretec- Centro de Estudos Ambientais e Tecnologias Marinhas

Mohid-Modelo hidrodinâmico

NOAA- National, Oceanic, Atmospheric Administration

NASA SRTM 30 (*Shuttle Radar Topography Mission*)

IST- Instituto superior Técnico

WOCE -World Ocean Circulation Experiment

## Resumo

Esta tese apresenta um estudo de modelação matemática da circulação hidrodinâmica e da qualidade da água na Baía do Lobito. A Baía do Lobito alberga o segundo maior porto de Angola e um dos maiores da África Austral e está junto a uma das grandes cidades Angolanas, com cerca de 1 milhão de pessoas. A Baía está por isso sujeita a grandes pressões antropogénicas, mas não foi objecto de nenhum estudo detalhado dos processos de circulação, nem dos processos que determinam a sua qualidade da água.

Este estudo teve como objectivo base caracterizar a hidrodinâmica da Baía, perceber os processos que a forçam e através destes perceber os mecanismos que determinam a qualidade da água no seu interior, a qual está sujeita a descargas urbanas, provenientes da cidade do Lobito e às pressões inerentes à actividade Portuária. A Baía é separada do mar por uma restinga arenosa que é a principal zona balnear da região, albergando algumas das melhores instalações da região.

O estudo é baseado essencialmente em modelação matemática. Esta ferramenta foi escolhida pelo baixo custo e por requerer uma logística mínima quando comparada com a via experimental, que requer equipamentos, instalações físicas e uma equipa para operação e manutenção dos equipamentos. Depois de se terem identificado os processos mais importantes para a hidrodinâmica da Baía foi levada a cabo uma campanha de medição de temperaturas e salinidades para caracterizar a estratificação térmica, que foi importante para a validação do padrão de circulação. Os dados recolhidos durante esta campanha juntamente com os dados de maré de medições realizadas no início dos anos 70 permitiram fazer uma primeira validação dos resultados do modelo.

O estudo mostra que as correntes de maré são pouco importantes quando comparadas com as correntes induzidas pelo vento que é dominante do quadrante sul, gerando uma corrente superficial orientada para fora da baía e uma corrente de sinal contrário junto ao fundo. Este padrão de circulação é responsável por baixos tempos de residência da água no interior da baía o que contribui para a sua boa qualidade. Situações prolongadas de vento norte de são pouco frequentes, mas quando existem provocam a retenção da água no interior da baía e nessa altura a qualidade da água tende a baixar.

**PALAVRAS-CHAVE:** Hidrodinâmica, Baía do Lobito, Tempos de Residência.

## Agradecimentos

Primeiramente a Deus que sempre me deu forças para seguir o meu caminho e a todos os bons espíritos que sempre me ajudaram nos momentos mais difíceis.

Aos meus queridos pais, Carlos Manuel e Rosa Ngueve, que me deram educação, amor e confiança necessária para alcançar mais um objectivo na minha vida, aos meus irmãos pela paciência e apoio durante toda a minha trajectória académica.

Agradecimentos O espaço limitado desta seção de agradecimentos, seguramente, não me permite agradecer, como devia, a todas as pessoas que, ao longo do meu Doutoramento em Engenharia do Ambiente ajudaram-me, directa ou indirectamente, a cumprir os meus objectivos e a realizar mais esta etapa da minha formação académica.

Desta forma, deixo apenas algumas palavras, poucas, mas um sentido e profundo sentimento de reconhecido agradecimento. Ao Professor Dr. Ramiro Joaquim de Jesus Neves, do Departamento de Mecânica do Instituto Superior Técnico pela orientação, pelos seus ensinamentos, pela sua confiança que em mim depositou e o apoio incondicional que muito elevaram os meus conhecimentos científicos e, sem dúvida, muito estimularam o meu desejo de querer, sempre, saber mais e a vontade constante de querer fazer melhor.

Aproveito também para agradecer a toda a sua equipa do Centro de Estudos Ambientais e Tecnologias Marinhas (MARETEC – Instituto Superior Técnico) pela simpatia, privilégio e disposição que me proporcionaram para a elaboração da minha Tese e por permitirem a minha integração num centro de investigação de tão elevada qualidade e exigência que é a MARETEC.

A Ligia Pinto, Marco Mateus, João Sobrinho, Francisco Javier Campuzano, Isabella Ascione Kenov, Hilda Pablo, Carina e Guillaume Riflet expressos o meu profundo agradecimento pelo profissionalismo, pela amabilidade, amizade, boa disposição em todos os momentos e pelos apoios incondicionais na orientação e o sentido de responsabilidade que me incutiram em todas as fases do Projeto. As suas sabedorias foram essenciais para que chegasse ao fim deste trabalho com um enorme sentimento de satisfação.

Aos meus amigos em especial ao Franck, com a sua capacidade para absolver novas tecnologias de informação.

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1. Enquadramento

A orla Costeira do Lobito no sul de Angola inclui a Baía do Lobito com cerca de 6 km de comprimento e 2 km de largura, o estuário do Rio Catumbela a sul e o estuário do Rio Hanha a norte, a distâncias da ordem dos 10 a 20 km da embocadura da baía. Estes rios têm comprimentos da ordem das centenas de km e drenam zonas pouco povoadas. O clima na região é semi-árido e os rios têm regime torrencial, com caudal nulo durante uma parte importante do ano. A morfologia da baía que é separa do mar por uma língua de areia orientada para nordeste indicia transporte preferencial nesta direcção.

O Lobito é uma cidade portuária, com grande potencial de desenvolvimento industrial. Além das facilidades permitidas pelo porto, a cidade conta ainda com um aeroporto e com boas ligações às cidades vizinhas, de onde se destaca a cidade de Benguela cerca de 30 km a sul. No seio da zona urbana existe uma zona húmida que desempenha um papel importante para algumas espécies e ainda como bacia de retenção de escorrências provenientes da zona urbana e da zona agrícola localizada entre a cidade do Lobito e o estuário do Catumbela.

A Baía do Lobito, é um sistema semi-fechado cuja qualidade ambiental é determinada pelas cargas provenientes de terra, pela actividade portuária e pelas trocas com o oceano. Os impactes destas actividades sobre a qualidade da água e dos sedimentos da baía dependem da taxa de renovação da água da baía e das propriedades da água na zona costeira, nomeadamente dos efeitos da matéria particulada transportada pelos rios.

A circulação Oceânica nesta região é dominada pela interacção entre as correntes de Benguela e de Angola. A corrente de Benguela está associada à corrente das Agulhas proveniente do índico e transporta água fria desde a região do Cabo da Boa Esperança até à zona do Namibe. A Corrente de Angola está associada a uma grande recirculação entre a corrente de Benguela e a corrente equatorial no Golfo da Guiné. Na zona do Lobito o escoamento tem variabilidade sazonal importante, embora seja dominante para sul, transportando água quente de norte para sul Sangolay (2004) embora seja dominante para sul, transportando água quente de norte para sul. pois o transporte de sedimentos é para norte.

Núcleos urbanos localizados junto à linha de costa vêm enfrentando sérios problemas relacionado a gestão das suas águas costeiras (praias, baías e estuários), principalmente no que diz respeito ao uso desses corpos d'água como depósitos de efluentes domésticos e industriais e pelo uso desordenado de seus espelhos de água, não só como depositários de resíduos de natureza variada como pelo loteamento indevido das suas margens, dragagens e aterros, entre outros.

Com o agravamento da perda de qualidade das águas desses corpos de água para o uso recreativo e turístico, com o assoreamento e a redução da captura de pescado, resultantes dos factores acima descritos, as preocupações com questões ambientais vêm ganhando acentuada importância, não apenas no meio científico, como também na opinião pública de modo geral.

Esta preocupação com a preservação do meio ambiente tem justificado a realização de uma série de trabalhos objectivando a melhor compreensão dos mecanismos determinantes da circulação, deposição de sedimentos e dispersão de substâncias, bem como a previsão destes processos em função de factores internos e externos. Os processos físicos são, aliás, aqueles que condicionam, em grande medida, a extensão dos restantes, uma vez que são os responsáveis pelo transporte da água que constitui o meio onde a maior parte dos processos se desenrola. A modelação ecológica da Baía do Lobito requer por conseguinte a simulação da hidrodinâmica e dos processos de transporte, que é o factor de interligação das diferentes áreas do conhecimento.

Baía do Lobito, é um sistema semi-fechado cuja qualidade ambiental é ameaçada pelas cargas provenientes de terra e pela actividade portuária e beneficiada pelas trocas com o oceano, sendo os impactos destas actividades sobre a qualidade da água e dos sedimentos da Baía dependentes da taxa de renovação da água e das propriedades da água costeira que recebe o material descarregado pelos Rios.

O MOHID Water, surge como uma ferramenta apropriada para a modelação ecológica na Baía do Lobito, no sentido em que permite simular os principais processos físicos e também os processos químicos e biológicos que ocorrem no meio aquático. Este sistema de modelos detém já uma vasta série de aplicações na modelação ecológica de sistemas estuarinos (Antunes, 1998; Pina, 2001; INAG/MARETEC, 2002; INAG/MARETEC, 2003; Leitão, 2003, Ascione, 2015

## 1.2. Motivação

Baía do Lobito, Figura 1 tem importância económica e social crescente por via das vastas instalações aí implementadas, que incluem indústrias de apoio petrolífero, um porto comercial e de pesca, actividade turística e desportos náuticos. As pressões devidas a estas actividades e a pressão dos efluentes urbanos geram ameaçam a qualidade da água na Baía e criam conflitos de interesses cuja regulação requer conhecimento dos processos que determinam a qualidade da água e ferramentas que permitam a quantificação de impactes e que possam ser utilizadas como instrumentos de suporte à gestão. A capacidade dos modelos matemáticos para responderem a estas duas necessidades motivaram a realização desta tese orientada para a modelação, na perspectiva de diagnóstico da situação e de integração da informação de campo existente, que é ainda reduzida.



*Figura 1- Imagem da Baía do Lobito com a Restinga em 1º plano e o Porto e a cidade ao fundo*

### 1.3. Hipótese

O conhecimento necessário à identificação e compreensão dos processos que determinam a qualidade da água na Baía pode ser adquirido por via experimental e/ou através da modelação matemática. Se o trabalho se iniciar pela via experimental, os dados obtidos podem ser utilizados para calibrar e para validar o modelo, mas a escala de tempos é longa: é necessário conseguir os financiamentos, constituir uma equipa multidisciplinar e fazer campanhas ao longo de alguns anos. Se o trabalho se iniciar pela modelação matemática pode ser levado a cabo por uma pessoa inserida num grupo de modelação. Não será possível validar quantitativamente os resultados, mas poderá ser feita uma análise de consistência e por conseguinte utilizá-los para suportar um modelo

conceptual que poderá em seguida ser usado para encurtar e reduzir os custos do trabalho experimental necessário à validação dos resultados.

Esta tese foi realizada baseada nesta segunda hipótese, de que o estudo de sistemas onde o conhecimento de campo é diminuto pode começar pela modelação matemática de forma a encurtar tempos de resposta e a reduzir custos.

A estratégia seguida no caso da Baía do Lobito é extrapolável a inúmeras regiões de países em vias de desenvolvimento onde os problemas ambientais só agora começam a ser uma preocupação da sociedade.

#### 1.4. Objectivos da tese

Este trabalho tem como principais objectivos, desenvolver modelos matemáticos para a hidrodinâmica e os processos de transporte na Baía do Lobito, identificando a importância da estratificação vertical na renovação da água da baía, de modo a responder às seguintes questões:

- Os efeitos baroclínicos são relevantes na dinâmica da Baía?
- Qual a importância dos ventos locais sobre a Baía?
- Qual é a importância relativa de cada uma das cargas afluentes à Baía?
- Em que medida a qualidade da água na Baía depende das trocas com o exterior?

Para atingir o objectivo da tese e responder às perguntas foi decidido implementar o modelo numérico MOHID, em 2D e em 3D. Este modelo permite simular a circulação oceânica à escala da região costeira e da Baía do Lobito, utilizando modelos encaixados para conseguir boa resolução no interior da Baía.

#### 1.5. Estrutura da tese

No seguimento do que atrás foi dito, este trabalho está dividido em 5 capítulos, incluindo esta introdução, que inclui a caracterização da região e descreve a metodologia seguida no trabalho.

No capítulo 2º é analisada a hidrodinâmica devida à maré utilizando a versão 2D do modelo e são descritos os dados históricos de maré recolhidos por diversas instituições de investigação no passado e que foram disponibilizados, na maioria dos casos por centros europeus de armazenamento de dados (BODC—*British Oceanographic Data Center*). Este capítulo permitiu simular e validar os níveis de maré e mostrou que

as correntes de maré não podem explicar a hidrodinâmica da Baía, justificando a implementação do modelo 3D descrita no capítulo 4°.

O capítulo 3° é analisado os efeitos baroclínicos e do vento utilizando a implementação 3D do modelo. As densidades na região costeira são impostas utilizando dados hidrográficos da base de dados do WOCE (World Ocean Circulation Experiment) e os ventos são obtidos a partir de resultados do modelo GFS da NOAA. E os resultados são analisados à luz dos dados recolhidos numa campanha realizada no âmbito desta tese. Os resultados do modelo permitiram explicar os dados de campo e mostram que o vento e a estratificação vertical da temperatura são determinantes para os tempos de residência e por conseguinte para a qualidade da água na Baía, que é analisada no capítulo 5°.

O capítulo 4° descreve a implementação do modelo de qualidade da água e descreve os resultados obtidos em vários cenários de descarga. Finalmente no capítulo 5° são apresentadas as conclusões e são feitas recomendações para trabalhos futuros, que deverão incluir a caracterização das cargas afluentes à Baía, a monitorização da qualidade da água e as cargas provenientes dos rios Catumbela e Hanha. É ainda recomendado que o estudo seja integrado, de modo a caracterizar a afluência e o transporte de sedimentos, de modo a contribuir para a gestão do cordão dunar que constitui a restinga.

## 1.6. Área de estudo

A Baía do Lobito situa-se na zona central de Angola – Figura 2 na costa ocidental da África Austral, entre as latitudes 12°20'S e 13°34'S. A área de estudo é limitada a norte pelo rio Hanha e a sul pelo rio Catumbela. A Baía do Lobito é uma vasta baía natural com uma largura máxima de 2 km e profundidade média da ordem dos 18 metros e limitada a oeste por uma restinga de 4 km de comprimento. É muito semelhante a outras Baías existentes ao longo da costa de Angola, nomeadamente à Baía de Luanda e por isso esta tese pode constituir um estudo de referência em Angola.

No interior da baía está localizado o Porto do Lobito que, com um terminal para minério e um terminal comercial, é o segundo mais importante de Angola e deverá crescer como consequência da entrada em funcionamento de uma refinaria (da SONAREF) em fase construção, que será equipada com um emissário submarino para descarga directa no mar. Na zona circundante da baía está localizada a cidade do Lobito com cerca de 1 milhão de habitantes, cujo sistema de saneamento tem dois pontos

principais de descarga, um situado no interior da baía e outro localizado no mar a sul da baía. A zona industrial em redor da baía inclui um terminal de produtos petrolíferos e estaleiros de construção e reparação naval e ainda indústria metalomecânica de apoio à exploração de petróleo *offshore*.

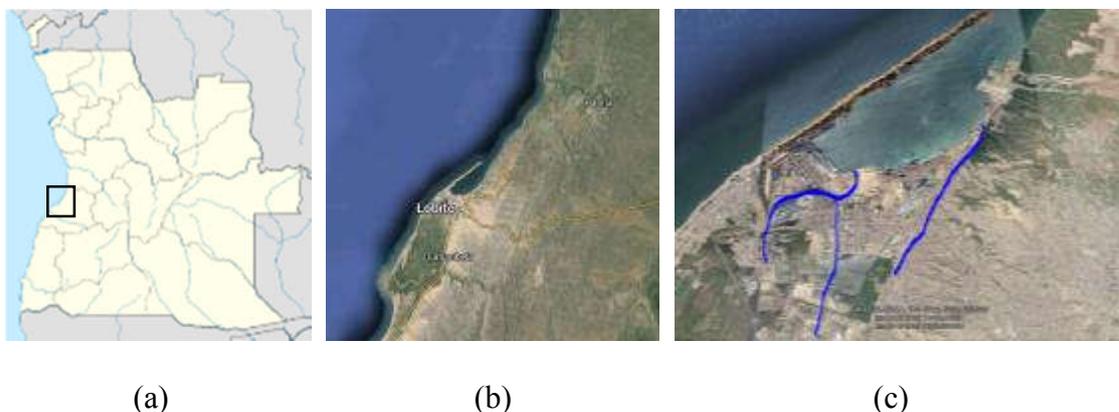


Figura 2 (a)-Localização da Baía do Lobito em Angola; (b) mostra a zona húmida na foz do rio Catumbela, a sul da Baía do Lobito; (c) identifica as entradas de água doce na Baía

Morfologicamente a região inclui dois segmentos principais: uma faixa de falésia entre o rio Hanha e a embocadura da restinga e uma costa arenosa, com cerca de 10 km, desde o extremo norte da restinga até ao rio Catumbela, cuja metade norte é usada como zona balnear. O rio Catumbela é a principal fonte de água doce, de nutrientes e de sedimentos na região formando um pequeno delta junto à sua foz. O rio Hanha é uma fonte importante de água de rega, sendo o caudal na foz baixo na época de estiagem, o que permite o seu fecho natural por uma língua de areia durante esse período. No interior da baía as descargas urbanas e industriais directas ou através dos canais, representados na Figura 2 (c) são uma pressão importante sobre a qualidade da água devido aos tempos de residência elevados.

### 1.7. O problema a resolver

A intermitência das correntes na região do Lobito faz com que a baía possa ser influenciada por descargas a norte e a sul, para além das descargas efectuadas directamente no seu interior. A morfologia da costa mostra que o transporte litoral de sedimentos nesta zona é de sul para norte, embora as descrições a circulação oceânica existentes para a região sugiram que o transporte dominante seja para sul, Figura 3. A morfologia da baía, nomeadamente a existência da língua de areia que delimita a baía - orientada para nordeste - sugere que o transporte seja para norte. Esta orientação pode ser uma consequência do clima de agitação marítima associado ao regime de ventos,

que nesta zona é dominante de sul ou uma consequência de um padrão de circulação local demasiado fino para ser detectado nos estudos de circulação geral existentes.

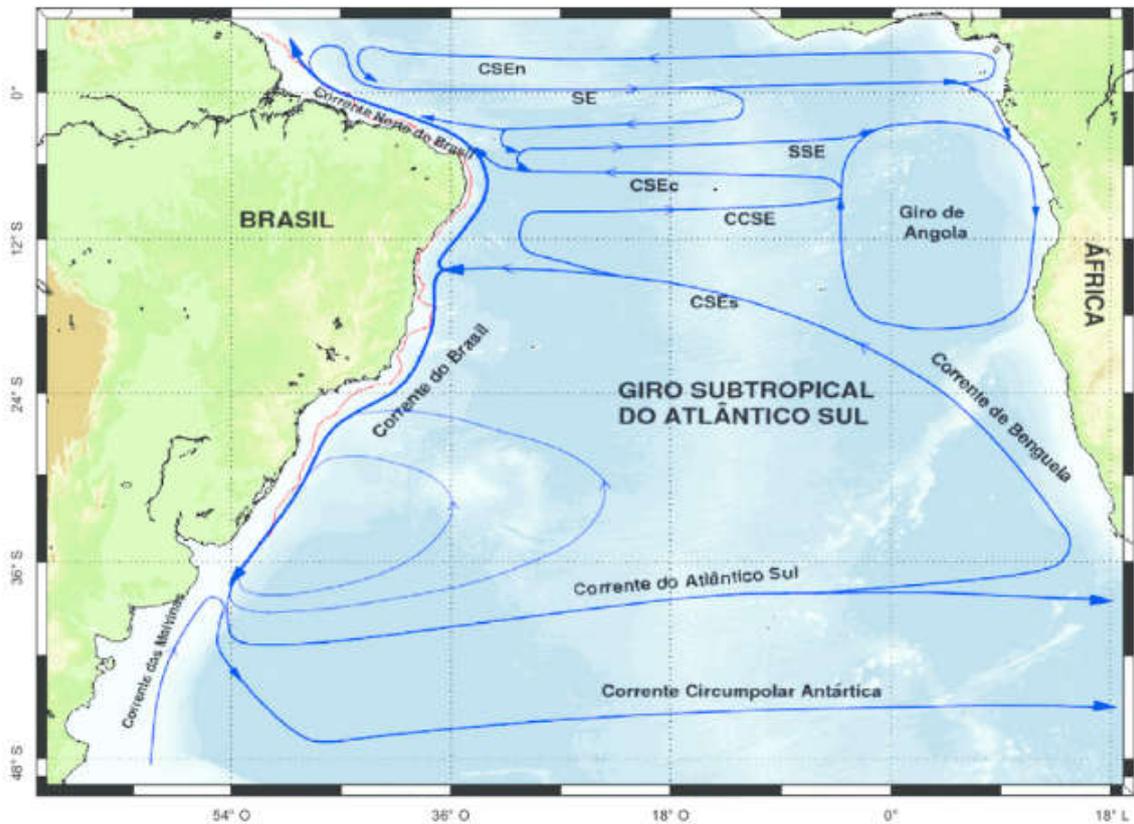


Figura 3- Representação esquemática do sistema de correntes no Atlântico Sul (Adaptado de Tomczak and Godfrey [1994])

## 1.8. Metodologia geral

O presente trabalho inicia-se com a recolha de informação de observações disponíveis de maré, circulação oceânica e de ventos dominantes na região do Lobito, com base nas quais foram caracterizados os processos hidrodinâmicos na orla costeira do Lobito região de Angola.

Numa segunda etapa, foi implementado o modelo hidrodinâmico MOHID Water numa formulação 2D para simular a propagação da maré na região e finalmente foi implementado o modelo tridimensional utilizando a metodologia de downscaling (Campuzano et al., 2013), que consiste na simulação da hidrodinâmica e qualidade da água na escala local com base em resultados de modelos de maior escala.

A estrutura implementada utiliza modelos encaixados aqui designados por “níveis”. A primeira etapa para a implementação do modelo foi a criação da batimetria para o nível 0, o nível de maior abrangência geográfica (3952 km<sup>2</sup>) forçado pela maré com

passo espacial de 2 km. Este modelo é forçado pela maré fornecida pelo modelo FES2004 (Finite Element Solution 2004). Neste modelo foram subsequentemente encaixados outros modelos, também bidimensionais ou tridimensionais. No caso dos modelos tridimensionais, para além do vento é necessário fornecer temperaturas e salinidades em toda a coluna de água, ao longo da fronteira aberta. Essa informação, bem como a informação necessária para especificar as condições iniciais de temperatura e de salinidade foram fornecidas pelo modelo MyOcean, interpolando para a malha de 2 km passo espacial (igual ao do nível 0). Um modelo de passo espacial de 0,5 Km (nível 2) e um modelo de passo espacial de 0,11 Km (nível 3) também forçados pelo vento fornecido pelo GFS foram utilizados para detalhar os resultados na Baía e junto à costa. Os modelos tridimensionais utilizaram 27 camadas. Os níveis de maré no interior da Baía foram validados com medidas registadas junto à capitânia do porto do Lobito.

Para visualização dos resultados do modelo baroclínico ao longo da coluna da água foram feitos cortes longitudinais verticais até 40 metros, em duas secções (Figura 3 e anexos).

A interface gráfica usada para a visualização foi o Mohid Studio que inclui ferramentas para o pré-processamento de dados e processamento de resultados e ainda para a gestão de simulações. Os mapas podem ser visualizados através de um sistema GIS integrado e as séries temporais podem ser exibidas num motor gráfico integrado de visualização. O *software* contém ainda ferramentas que permitem criar e arquivar os dados processados pelo modelo.

## 2. HIDRODINÂMICA DA BAÍA DO LOBITO. PARTE I – CORRENTES DE MARÉ

### **Resumo**

Este trabalho descreve o estudo das correntes de maré na Baía do Lobito Angola, utilizando um modelo de malha mais fina para o interior da Baía encaixado num modelo de maior escala para a região, de forma a impor a maré a partir dos resultados do modelo FES2004. Foi utilizado um modelo 2D, integrado na vertical, para calcular o escoamento de maré e um modelo 3D baroclínico para estudar o efeito do vento e da estratificação termohalina. Nesta parte I é descrito o escoamento de maré: escoamento transiente, escoamento residual e o contributo da maré para os tempos de residência. Os resultados do modelo são validados comparando os níveis calculados com dados maregráficos reconstituídos a partir da análise harmónica de níveis medidos no interior da Baía. O modelo mostra velocidades muito baixas, com velocidades transientes da ordem dos cm/s e velocidades residuais da ordem dos mm/s. O escoamento residual devido à maré é dominado por dois grandes vórtices, ocupando cada um cerca de metade da baía. Os níveis medidos e calculados são semelhantes, mostrando que a condição de maré imposta (FES2004) na fronteira do modelo é adequada e que a maré no interior da baía está representada correctamente. Os tempos de residência excessivos - da ordem de meses – obtidos nas simulações sugerem que a estratificação das correntes é determinante para a renovação da água da baía. Efectivamente é essa a conclusão da segunda parte deste trabalho.

## 2.1. Introdução

A Baía do Lobito, em Angola, é um sistema semi-fechado com cerca de 4 km de comprimento e 2 km de largura em cuja envolvente estão instaladas zonas urbanas (cidade do Lobito), zonas de turismo (Restinga), zonas industriais e um porto. Estas actividades exercem pressões sobre a qualidade da água da baía cujos impactes dependem da hidrodinâmica e especialmente do tempo de residência da água no seu interior, conhecimento fundamental para a gestão ambiental do sistema no presente quadro de crescimento demográfico e industrial que se regista na região.

As velocidades no interior da baía são baixas, o que lhe confere características muito favoráveis à actividade portuária. Os campos de velocidade no interior da baía são mal conhecidos, limitando-se os dados de campo existentes às características da maré. A modelação matemática pode por isso desempenhar um papel fundamental no estudo da hidrodinâmica do sistema, dando uma primeira ideia das correntes e dos processos de transporte, informação que poderá ser utilizada para orientar trabalhos de campo futuros.

Em termos de modelação do sistema, as marés e a hidrodinâmica de grande escala são fornecidas por modelos globais (e.g. FES2004 para a maré e CMEMS para as correntes de densidade e distribuições de temperatura e de salinidade). O refinamento destas soluções através de um processo de *downscaling* é a forma mais rápida e mais económica de conhecer os processos de transporte no interior da Baía do Lobito e os factores que a influenciam.

As importâncias relativas dos processos responsáveis pela hidrodinâmica da baía podem ser identificadas através da simulação independente da maré, do vento e da densidade. O vento actua na superfície livre e associado à estratificação vertical de densidade acentua o carácter baroclínico do escoamento e por isso deve ser simulado por um modelo tridimensional. A maré, pelo contrário tem carácter barotrópico e pode ser simulada por um modelo 2D integrado na profundidade. Por essa razão foi decidido apresentá-la separadamente nesta “Parte I” deste trabalho. O modelo bidimensional integrado na profundidade faz o *downscaling* da solução de maré FES2004 (Lyard *et al.*, 2006) e os resultados são validados com dados de maré medidos no interior da Baía

## 2.2. Materiais e métodos

### 2.3. Marés

Para a área em estudo existem dados horários de nível medidos ao longo de um ano (1972/73) - numa estação maregráfica localizada no extremo do cais da capitânia do Porto do Lobito ( $12^{\circ}20'S;13^{\circ}33,5'E$ ) disponíveis na base de dados do British Oceanographic Data Centre (<https://www.bodc.ac.uk/>). As constituintes harmónicas da maré foram obtidas por análise harmónica destes dados utilizando o programa em Matlab T-Tide (Foreman, 1978) e são apresentadas na Tabela 1. A tabela mostra que as componentes  $M_2$ ,  $S_2$ ,  $N_2$  e  $K_1$  são as mais importantes, somando as respectivas amplitudes cerca de 0,75 m. As marés vivas médias ( $M_2$ ,  $S_2$ ) têm amplitude de cerca de 1,2 m e as marés mortas médias têm cerca de 0,6 m, o que significa que as velocidades do escoamento são bastante diferentes em cada regime de maré.

### 2.4. Correntes

No interior da baía, não existem registos de medições de velocidade e o padrão de circulação é mal conhecido. Ao largo de Angola a circulação geral é no entanto bem conhecida da comunidade científica internacional. A Figura 4 mostra três imagens publicadas descrevendo a circulação na região. A parte (a) Stramma e England (1999) pondo em evidência o “Giro de Angola”, por vezes designado por “Domo de Angola” limitado a sul pela corrente de Benguela e a norte pela Corrente Equatorial Sul, que associada a este giro forma a corrente de Angola. A parte (b) da figura mostra o escoamento local calculado por Juliano e Alves (2007) utilizando um modelo geostrófico. A figura mostra maior detalhe do campo de velocidades, mostrando as mesmas correntes e a presença do domo. A parte (c) da figura Schneider *et al.* (1996) mostra também a circulação de forma esquemática, mostrando também a localização da frente “Angola-Benguela” ABF e um domo com localização semelhante à de Juliano e Alves (2007). Esta parte (c) indica ainda a presença de uma contracorrente costeira, consistente com a existência de afloramento costeiro associado aos ventos alíseos.

Na região situada entre  $5^{\circ} S$  e  $13^{\circ} S$ , a circulação é condicionada pelo efeito conjugado do upwelling forçado pelo vento e do downwelling induzido pelo “Domo de Angola”. Quanto mais intensa for a circulação do “Domo de Angola” mais quente é a água costeira entre a Ponta do Morro e Quicombo/Lobito e mais costeira é a corrente de Angola. Os períodos de afloramento costeiro mais intenso resultam no afastamento da

costa da corrente de Angola. Isto é, mesmo circulando para sul, a corrente de Angola torna-se mais oceânica do que costeira, tendo como limite litoral neste período o talude da plataforma continental (Sangolay, 2004).

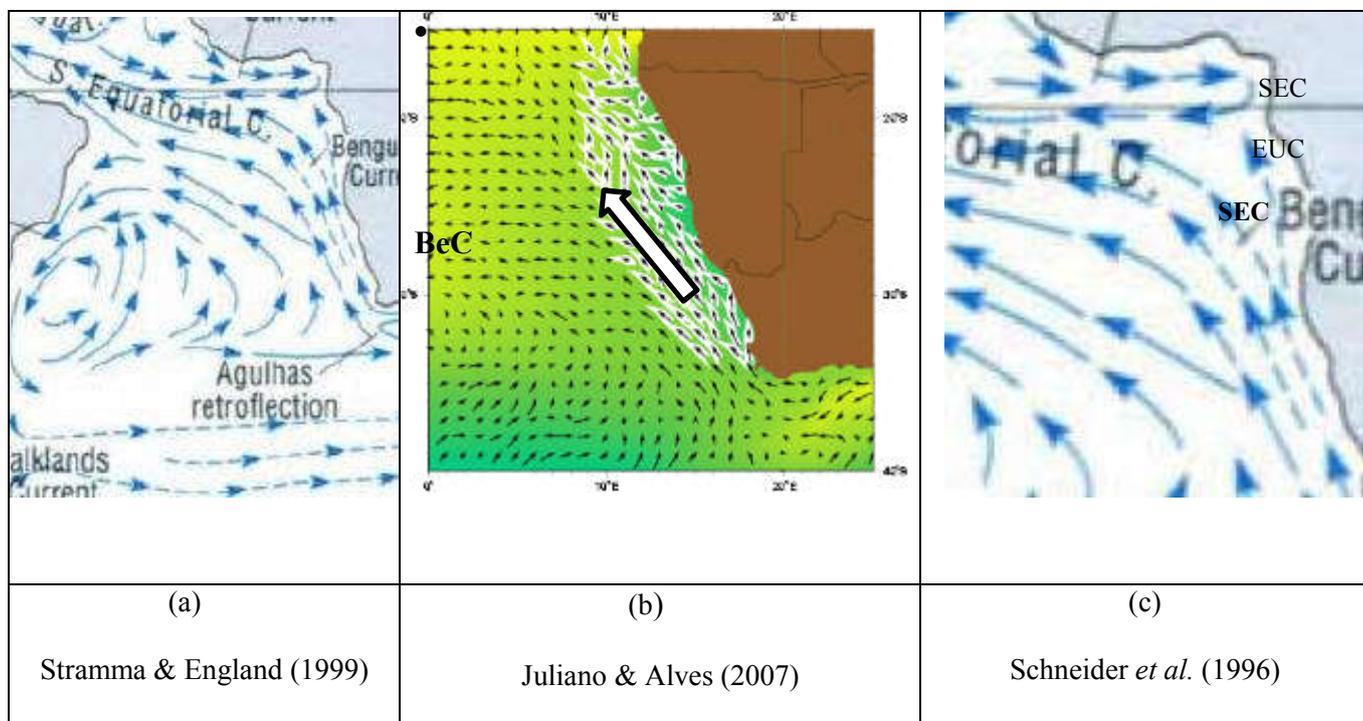


Figura 4- Correntes oceânicas ao largo de Angola de acordo com os autores indicados em cada uma delas.

Todas as figuras mostram a corrente de Benguela a Sul (BC) e (a) mostra também a Corrente Equatorial Sul (SEC) a norte, entre África e o Brasil. “Domo de Angola (AD)” está localizado junto a Angola, na confluência destas duas correntes.

Tabela 1- Amplitude e fase das componentes da maré obtidas com os dados

Constituinte de maré	Frequência (graus/h)	Amplitude (m)	Fase (°)
Q1	13,3987	0,0064	356,2
O1	13,9430	0,0114	47,2
K1	15,0411	0,0657	190,1
N2	28,4397	0,0948	81,6
M2	28,9841	0,4549	84,7
L2	29,5285	0,0106	73,1
S2	30,0	0,1463	97,6
MO3	42,9271	0,0031	73,0
MK3	44,0252	0,0002	269,3
MN4	57,4238	0,003	158,1
MS4	58,9841	0,0064	244,5
MK4	38,2947	0,0022	255,3

## 2.5. Ventos

Na área de estudo, o sistema de ventos é dominado por ventos de sul durante a maior parte do ano, sendo os ventos de norte quase inexistentes. A Figura 5 mostra a climatologia dos ventos na região. São apresentados campos médios mensais para os meses de janeiro, abril e setembro medidos por satélite. As figuras põem em evidência a dominância dos ventos de sul, com ligeira rotação para Oeste na zona do Lobito e enfraquecimento no mês de Setembro. Na zona onde ocorre o “Domo de Angola” as velocidades são mais baixas (até 10 m/s), sendo ainda mais baixas junto à costa. Velocidades mais elevadas ocorrem na zona da corrente de Benguela onde a velocidade média mensal é da ordem dos 15m/s.

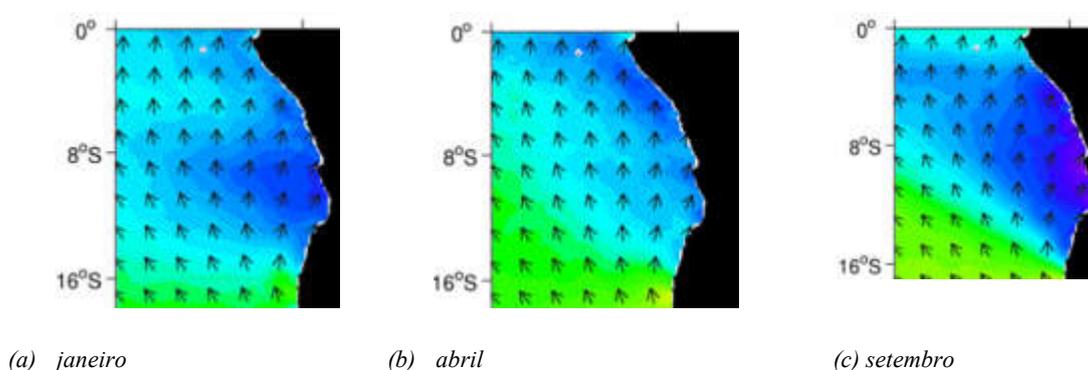


Figura 5- Ventos: Climatologia mensal obtida a partir de ventos medidos por satélite no âmbito do programa “Climatology of global ocean winds (cogow)”, [http://cioss.coas.oregonstate.edu/cogow/1101/23\\_one\\_x\\_one.html](http://cioss.coas.oregonstate.edu/cogow/1101/23_one_x_one.html) em Janeiro, Abril e Setembro.

## 2.6. Sistema de modelagem mohid water

Neste capítulo, é feita uma breve descrição do modelo MOHID e da sua implementação no sistema em estudo, que inclui a construção da batimetria e a definição das descargas e dos forçamentos atmosférico e de maré.

O MOHID ([www.mohid.com](http://www.mohid.com)) é um sistema de modelação de sistemas aquáticos cujo desenvolvimento foi iniciado no Centro de Ambiente e de Tecnologias Marítimas (MARETEC) no Instituto Superior Técnico (IST), da Universidade de Lisboa, em Portugal. A estrutura modular do sistema é descrita em Neves (2013) e permite o uso de diferentes tipos de equações, de métodos numéricos e o uso de formulações alternativas para a simulação de processo biogeoquímicos, que estão agrupados em dois subsistemas: MOHID Water e o MOHID Land. O sistema inclui interfaces gráficas para facilitar a sua implementação e a exploração dos resultados, cuja versão mais recente - MOHID Studio ([www.actionmodulers.pt](http://www.actionmodulers.pt)).

Neste trabalho é utilizado o sistema MOHID Water que é aplicável em ambientes com superfície livre (oceânicos, costeiros, estuarinos ou albufeiras). Este sistema tem sido aplicado em Portugal e em outras áreas do mundo. São exemplos de aplicação em zonas costeiras a aplicação no estuário do Gironde (Cancino e Neves, 1998), na Ria Vigo em Espanha (Taboada et al., 1998), no estuário do Sado (Martins et al., 2001), na Ria de Aveiro (Vaz et al., 2007), na Lagoa de Óbidos em Portugal (Malhadas et al., 2010), no Estuário do Tejo, Vaz et al (2015), na zona costeira de Sines (Salgueiro et al, 2015) na margem da Ocidental Europeia (Coelho et al., 1999) no Arquipélago de Cabo Verde (Gomes et al, 2015). Em M. Mateus e R. Neves (2013) é feita uma compilação de aplicações do modelo.

O Módulo de hidrodinâmica é o núcleo central do sistema de modelação MOHID Water e pode ser utilizado em modo bidimensional (2D) ou tridimensional (3D). No estudo de maré descrito neste texto o modelo foi aplicado com uma configuração 2D e as equações correspondentes são:

$$\frac{\partial n}{\partial t} + \left[ \frac{\partial}{\partial x}(uD) + \frac{\partial}{\partial n} + (vD) \right] = 0 \quad \text{Eq.1}$$

$$\frac{\partial n}{\partial t} + (uD) + \left[ \frac{\partial}{\partial x}(u^2D) + \frac{\partial}{\partial y} + (uvD) \right] + f v D = -gD \frac{dn}{dn} + \tau^x + D \left[ \frac{d}{dx} \left( A \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( A \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right] \quad \text{Eq.2}$$

$$\frac{\partial}{\partial t} + (vD) - \left[ \frac{\partial}{\partial x}(uvD) + \frac{\partial}{\partial y} + (v^2D) \right] + f u D = -gD \frac{dn}{dy} + \tau^y + D \left[ \frac{d}{dx} \left( A \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( A \frac{\partial v}{\partial y} \right) \right] \quad \text{Eq.3}$$

Onde  $\eta$  é a elevação da superfície livre acima do zero hidrográfico,  $D = h + \eta$  é a altura total da coluna de água e  $h$  é a profundidade medida em relação ao zero hidrográfico,  $u$  e  $v$  são as componentes horizontais de velocidade nas direcções  $x$  e  $y$  respectivamente,  $f$  é o parâmetro de Coriolis, função da latitude,  $A$  é o coeficiente de viscosidade horizontal e  $\tau^x$  e  $\tau^y$  são as tensões de corte devidas ao vento nas direcções  $x$  e  $y$ , respectivamente.

## 2.7. Batimetria e malha de cálculo

A batimetria é um dos factores que mais influência a circulação de água e consequentemente as suas propriedades. Os dados batimétricos utilizados neste estudo

tiveram como base a carta nº227 do I.G.C.de Angola de onde foram retiradas as linhas isobáticas. A batimetria utilizada nas simulações obtida por interpolação triangular dos dados batimétricos (Figura 6a). A malha construída tem um espaçamento que varia entre 50 m e 1 km na direcção x e 200 m e 1 km na direcção y (Figura 6b) de modo a obter a máxima resolução na Baía do Lobito, objecto principal do presente estudo. A informação da linha de costa utilizada foi retirada do Google Earth.

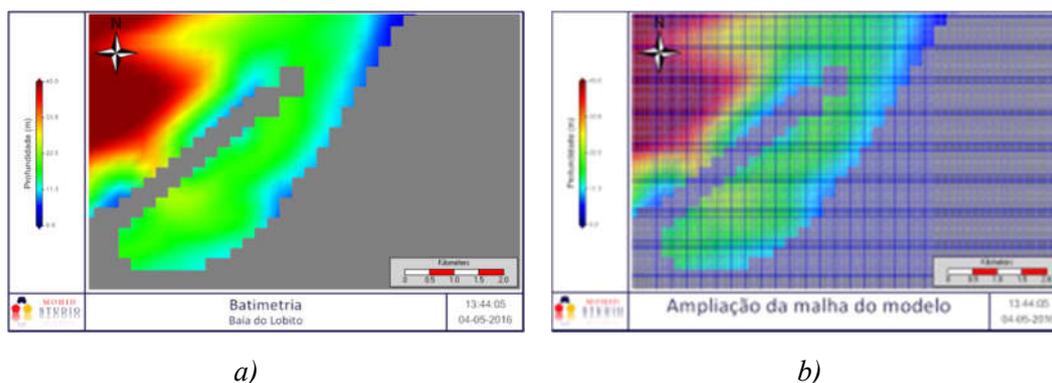


Figura 6- Batimetria da área de estudo da Baía do Lobito (a) e malha de cálculo do modelo regional e do modelo da baía (b)

## 2.8. Condições de fronteira

O modelo hidrodinâmico 2D necessita de dados de maré na fronteira aberta, de dados de vento na superfície livre e das descargas dos rios, dependendo o papel destas últimas na hidrodinâmica do valor do caudal e da geometria na região da embocadura. Nesta aplicação foi considerada só a descarga do rio Catumbela. O seu papel é secundário na hidrodinâmica calculada pelo modelo 2D, mas é importante em termos de transporte de sedimentos e de qualidade da água.

Os dados de maré na fronteira aberta foram obtidos a partir dos resultados do modelo FES 2004. Deste modelo foram extraídas 25 componentes harmónicas: SSA, Q1, O1, P1, K1, OO1, EPS2, 2N2, MU2, N2, NU2, M2, L2, S2, K2, MO3, M3, SK3, MN4, M4, MS4, MK4, S4, 2MS6 que foram usadas para reconstruir a maré ao longo da fronteira aberta.

Os dados de vento foram obtidos no ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts). Para a área de estudo existem dados entre 1990 e 2002 e com base nestes campos de vento foram calculados valores médios mensais para todo o domínio (Tabela 2).

Tabela 2- Valores médios do vento no domínio do modelo, para cada mês do ano.

<b>Mês</b>	<b>Componente Este – Oeste (m/s)</b>	<b>Componente Sul – Norte (m/s)</b>	<b>Módulo da velocidade (m/s)</b>
<b>Janeiro</b>	<u>2.00</u>	<u>1.12</u>	2.29
<b>Fevereiro</b>	<u>1.89</u>	<u>1.38</u>	2.34
<b>Março</b>	<u>1.49</u>	<u>1.44</u>	2.07
<b>Abril</b>	<u>1.37</u>	<u>1.93</u>	2.37
<b>Maio</b>	<u>1.49</u>	<u>2.56</u>	2.96
<b>Junho</b>	<u>1.48</u>	<u>1.98</u>	2.47

## 2.9. Resultados e discussão

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos. É analisada a consistência dos padrões dos campos de velocidades obtidos e é feita a validação dos níveis de maré por comparação com os níveis obtidos a partir das constituintes harmónicas dos dados do marégrafo

São apresentados resultados em dois cenários, um considerando exclusivamente o forçamento de maré e outro considerando a maré e o vento. A simulação hidrodinâmica do modelo 2D foi efectuada para um período de 12 meses (2011/01/03 – 2011/12/31). As diferenças devidas ao vento são pequenas por estarem integradas na vertical – o modelo é 2D – e por a baía ter pequenas dimensões e por isso o *fetch* ser pequeno.

### 2.10. Análise dos níveis de maré

A

Figura 7 mostra a comparação dos primeiros seis (6) do ano entre os níveis reconstituídos a partir das constituintes harmónicas obtidas por análise harmónica dos dados de campo medidos em 1972/73 e o resultado do modelo. As duas séries temporais são muito semelhantes, o que mostra que o modelo está a calcular bem a propagação de maré desde a fronteira aberta até a baía. Podemos por isso dizer que a malha é adequada à simulação e que a maré imposta na fronteira aberta está correcta.

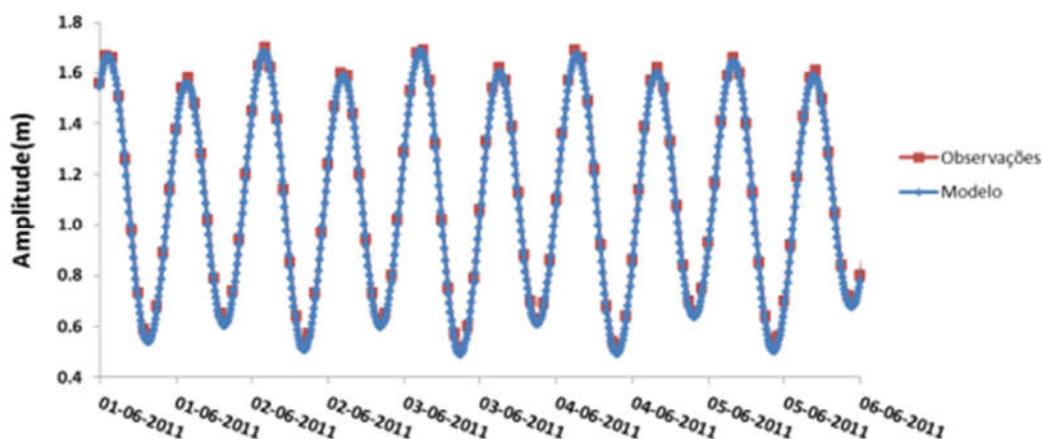


Figura 7 - Comparação dos níveis de maré calculados pelo modelo e obtidos a partir das componentes harmônicas medidas no Porto do Lobito.

A Tabela 3 mostra as amplitudes e fases das constituintes de maré obtidas a partir dos dados de campo e dos resultados do modelo e as diferenças entre elas. As diferenças entre as amplitudes são da ordem dos mm, o que é consistente com os pequenos desvios observados na Figura 7-entre a série temporal medida e calculada. A diferença de fase entre a componente M2 medida e a calculada são 6 graus, que correspondem a cerca de 12 minutos. As diferenças de fase das componentes de menor amplitude são maiores, mas por via da pequena amplitude introduzem pequenas diferenças.

Tabela 3- Comparação da amplitude e fase das principais constituintes da maré obtidas com os dados e com os resultados do modelo

Constituinte Harmônica	Frequência (°/h)	Fase (°)	Amplitude dados	Amplitude modelo	Diferença de amplitude (m)	Diferença de fase (°)
O1	13,9	12,812	0,0114	0,0122	-0,0008	-11,96
K1	15,0	170,07	0,0657	0,0685	-0,0028	19,98
M2	29,0	78,682	0,4549	0,4551	0,0042	6,018
S2	30,0	63,702	0,1463	0,1421	0,0042	33,92
MS4	58,9	219,982	0,0064	0,0083	-0,0019	24,52

A Figura 7 (mostra uma série temporal de níveis de duas semanas de duração calculados no interior da baía. A figura mostra que a variação de amplitude da maré num ciclo maré-morta, maré viva é baixa, variando o nível entre 0,5 m e 1,7 m em maré viva varia e entre 0,7 m e 1,55 m em maré morta. Este resultado é uma consequência da pequena

amplitude da componente  $S_2$  quando comparada com as componentes diurnas (componentes com índice 1 na Tabela 1).

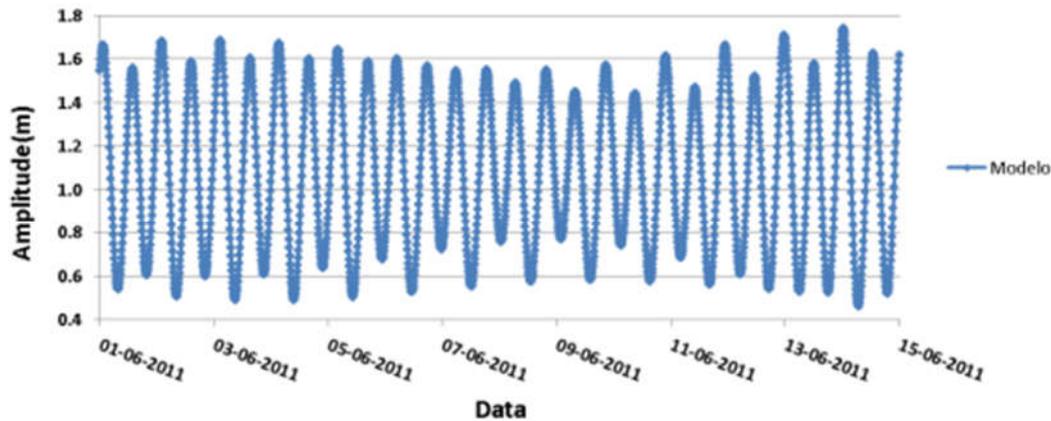


Figura 8 - Evolução do nível de maré calculado pelo modelo da Baía do Lobito ao longo de um ciclo de maré viva – maré morta.

### 2.11. Campo de velocidades

A Figura 9 mostra os campos de velocidades forçada pela maré respectivamente em enchente (a) e em vazante (b). As intensidades máximas da corrente são da ordem de 5 cm/s e ocorrem na zona da embocadura quer na enchente. No interior da baía as velocidades são baixas por ser um sistema fechado e no exterior as velocidades são baixas por as profundidades serem elevadas não existindo acidentes topográficos.

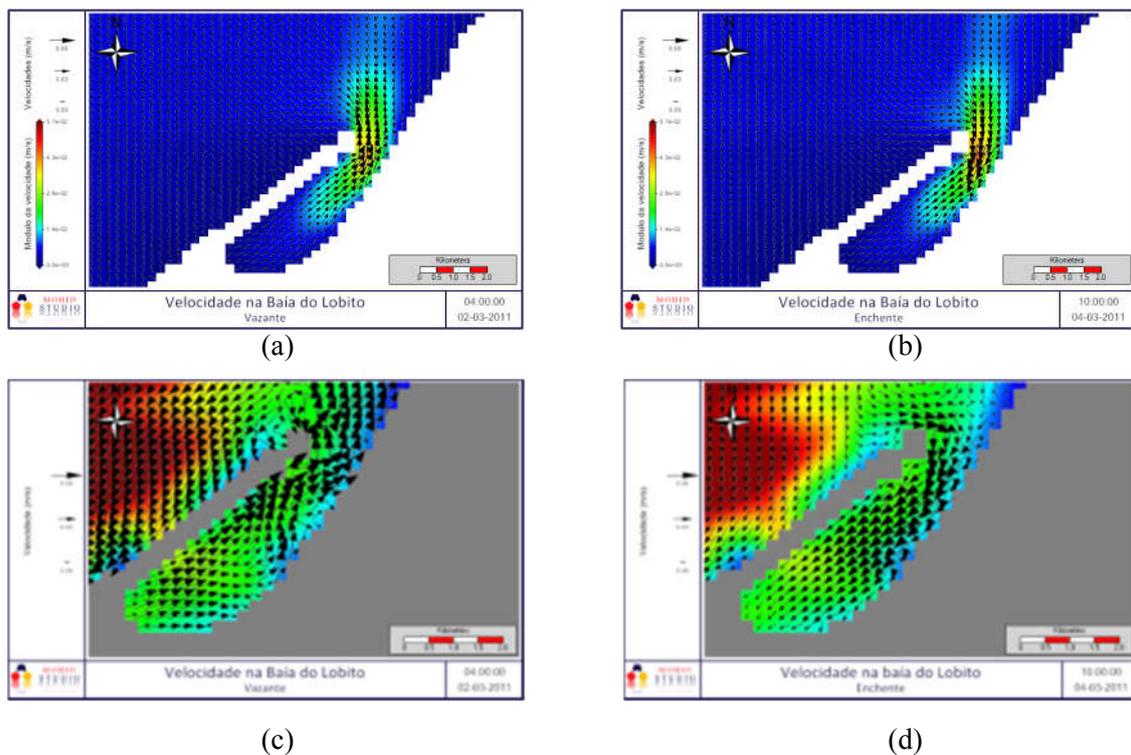


Figura 9 - Campo de velocidades na Baía do Lobito em vazante sem vento(a) maré e vento (c). Campo de velocidades na Baía do Lobito em enchente sem vento (b) maré e vento (d).

A Figura 9- mostra a circulação residual produzida pela maré (c) e pela maré mais o vento (d) em 2D. As velocidades máximas são muito baixas - da ordem de 1mm/s – o que é consistente com o facto de as velocidades de maré também serem baixas (5 cm/s). O campo de velocidades mostra dois vórtices de maior velocidade, na região da embocadura, um do lado de dentro da Baía na metade mais próxima da embocadura e outro no exterior. Ainda no interior da baía é visível um vórtice de menos intensidade que ocupa a metade interior da Baía. O vórtice no exterior é devido ao jacto de vazante que tende a sair alinhado com a restinga e que em seguida é deflectido para a esquerda pelo efeito de coriolis. O primeiro vórtice localizado dentro da baía está associado à curvatura do escoamento de enchente que tem que contornar a ponta da restinga para entrar na baía e ao efeito de coriolis que mantem o escoamento à esquerda, i.e. do lado de terra durante a enchente e do lado da restinga durante a vazante. O segundo vórtice, localizado no interior da baía, está associado à topografia e à deflexão do escoamento que lhe está associada.

A circulação residual fornece informação qualitativa sobre o transporte em escalas de tempo superiores às da maré (dias a meses). O facto de as intensidades do escoamento serem baixas no interior da baía e especialmente de o campo ser dominado por dois vórtices mostra que os produtos descarregados no interior da baía tendem a recircular e por isso tendem a ter tempos de residência elevados. Na metade de jusante da baía os produtos tendem a residir menos tempo porque na zona da embocadura há mistura entre as águas que circulam no vórtice interior e no vórtice exterior. Para melhor compreender a circulação no interior da baía os tempos de residência dentro da baía foram calculados através de simulações de traçadores lagrangeanos.

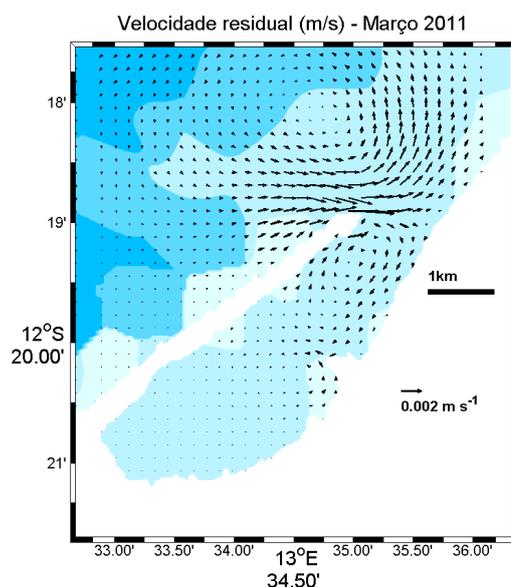


Figura 10 - Campos de velocidade residual (em 2D) devida à maré mais o vento

### 1.1. Tempo de residência

O tempo de residência é definido como o tempo necessário para que um contaminante descarregado no interior de um sistema saia para o exterior. Este tempo é, por conseguinte, equivalente ao tempo de renovação da água do sistema. Experimentalmente este tempo só pode ser estimado utilizando um traçador. Em estuários a salinidade é um traçador natural (Kenov et al, 2012), mas num sistema como a Baía do Lobito o seu cálculo só pode ser feito numericamente porque os gradientes de salinidade são muito baixos. Neste trabalho foi seguida a metodologia proposta por Braunschweig et al. (2003) baseado no uso de traçadores lagrangeanos e incluído no modelo MOHID. De acordo com este método o tempo de residência é definido como o tempo necessário para expulsar 80% dos traçadores colocados no interior do sistema. Cada traçador tem um volume, definido de tal modo que o somatório dos volumes dos traçadores é igual ao volume total do sistema. O módulo lagrangeano do modelo MOHID permite a divisão do domínio em caixas e permite calcular o tempo de residência da água de cada caixa.

Para a aplicação na Baía do Lobito foram definidas três caixas representadas na Figura 11 (a). O volume total dos traçadores emitidos em cada caixa é igual volume da caixa e o volume das três caixas é igual ao volume da baía. Figura 11 (b) mostra a localização dos traçadores 1 mês depois do início da simulação. A figura mostra que alguns traçadores saíram da baía, mas sobretudo mostra que houve mistura no interior

da baía. Os traçadores azuis não são visíveis por questões técnicas. Eles são representados antes dos verdes e dos vermelhos e por isso ficam “cobertos” na imagem.

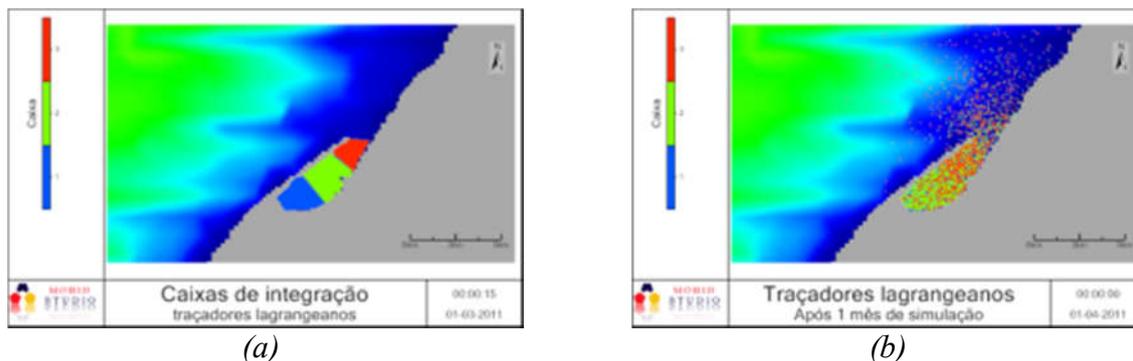


Figura 11- Localização dos traçadores lagrangeanos no início da simulação as 0 horas do dia 1-03-2011 dentro da baía do Lobito

Os resultados apresentados foram obtidos com um modelo integrado na vertical e por isso a velocidade dos traçadores é obtida como o somatório da velocidade calculada pelo modelo hidrodinâmico e a componente aleatória não resolvida pelo modelo que foi admitida como sendo da ordem de 10% da velocidade instantânea.

A Figura 11 (b) mostra a evolução temporal da percentagem de traçadores emitidos em cada uma das caixas, que ainda está no interior da baía. A caixa 1 (azul) está localizada no fundo da baía, a caixa 3 (vermelho) na zona da embocadura e a caixa 2 (verde) está localizada entre as outras duas. Consequentemente os traçadores da caixa 3 saem mais rapidamente e os da caixa 1 são os que têm maior tempo de residência. Após um mês de simulação verifica-se que na caixa 1 (linha azul) permanecem cerca de 50% dos traçadores iniciais, na Caixa 2 (linha verde) cerca de 40% e na Caixa 3 (linha vermelha) cerca de 15%, mostrando que só na zona da embocadura é que o tempo de residência seria inferior a 1 mês se a maré fosse o mecanismo dominante de geração de escoamento.

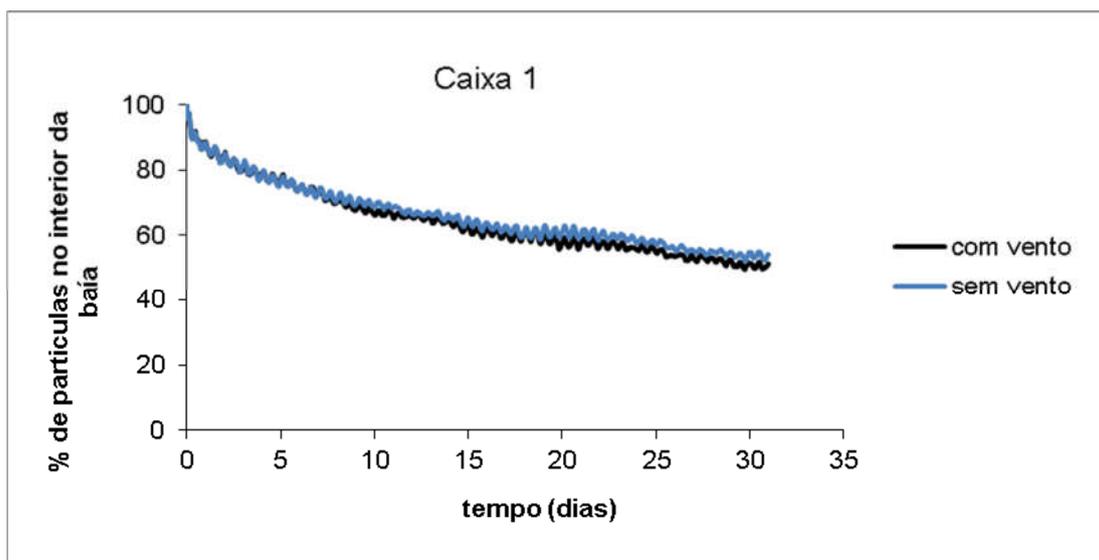


Figura 12-- Evolução temporal da percentagem de traçadores emitidos em cada uma das caixas que ainda está no interior da baía - Caixa 1 (fundo da baía), Caixa 2 (zona intermédia da baía) e Caixa 3 (embocadura da baía) - considerando exclusivamente o forçamento de maré.

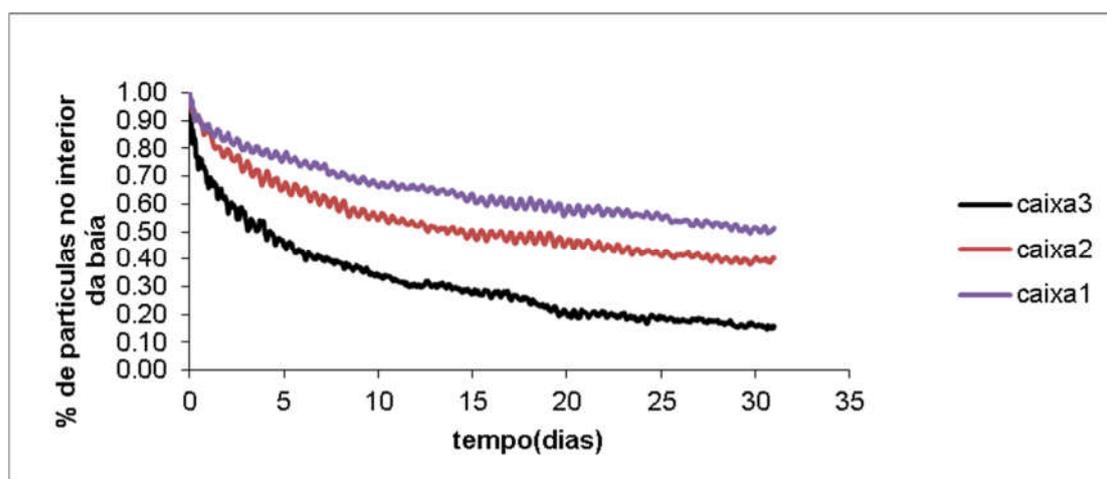


Figura 13-Comparação da evolução temporal da percentagem de traçadores, com e sem vento, em bidimensional, mas caixas 1 e 3. Os resultados mostram que em 2D o vento não altera o escoamento de maré.

A Figura 13-compara as evoluções temporais das percentagens de traçadores emitidos nas caixas 1 e 3 considerando só a maré e a maré + o vento. A Figura 13 apresenta evoluções muito semelhantes, mostrando que o vento altera pouco os resultados de simulações 2D.

#### 1.1.1. Conclusões

A aplicação do modelo hidrodinâmico bidimensional à Baía do Lobito permitiu simular a propagação da maré e conhecer os campos de velocidade transiente e residual na baía e região envolvente e estimar os tempos de residência nas diferentes partes da

baía. O trabalho permitiu verificar que o forçamento do modelo na fronteira na fronteira aberta resultados da maré do modelo FES2004 é adequado, tendo o modelo reproduzido os níveis de maré reconstituídos a partir das co0nstituintes harmónicas extraídas dos dados maregráficos existentes para o interior da baía.

As alturas de maré são inferiores a 1 m, mesmo em maré viva. As componentes mais importantes são as semidiurnas, M2, S2 e N2. A componente diurna mais importante é a K1, com uma amplitude que é cerca de 15% da M2. As correntes de maré são globalmente baixas, atingindo intensidades máximas na zona da embocadura da ordem dos 5 cm/s como consequência da pequena amplitude da maré e sobretudo das pequenas dimensões da baía. Como consequência das baixas intensidades das correntes de maré, também as correntes residuais são de baixa intensidade (da ordem de 1 mm/s). No interior da baía existem dois vórtices residuais cada um deles ocupando sensivelmente metade da Baía. Como consequência, se a maré fosse o principal mecanismo de forçamento do escoamento a água tenderia a recircular em duas células e o tempo de residência (ou de renovação) da água seria muito elevado, sendo na região mais interior da baía da ordem dos dois meses.

O vento (nesta simulação 2D) tem globalmente pouca influência nos resultados da hidrodinâmica da baía por o *fetch* ser pequeno e por a profundidade ser elevada. Contudo, o efeito do vento associado a estratificação térmica importante pode alterar radicalmente o escoamento superficial e através deste o transporte de materiais flutuantes. O estudo da acção do vento tem por conseguinte que ser levado a cabo com um modelo 3D baroclínico. Esse será o tema da Parte 2 deste trabalho.

### 1.1.2. Referências Bibliográficas

Ascione Kenov I.; Garcia, A. C.; Neves, R. (2012) Residence time of water in the Mondego estuary (Portugal). *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 106: 13-22.

Braunschweig F., Martins, F., P. Leitão &., Neves, R. (2003). A methodology to estimate renewal time scales in estuaries: the Tagus Estuary case. *Ocean Dynamics*. 53: 137-145.

Cancino L., Neves, R. (1998) Hidrodinâmica e modelagem suspensão de sedimentos em sistemas estuarinos. Part I: Descrição dos modelos numéricos. *Journal of Marine Systems*, 22(1998), pp105-116

Coelho H., Neves R., Leitão P., Martins H., Santos A. (1999) The slope current along the western European margin: A numerical investigation. *Bol. Inst. Esp. Oceanogr.* 1999; 15(1-4): 61-72.

Gomes.N, Neves, R, Ascione-Kenov I, Campuzano FJ, Pinto L (2015) Tide and Tidal Currents in the Cape Verde Archipelago. *Revista de Gestão Costeira Integrada/Journal of Integrated Coastal Management* 15(3): 395-408. Available at: <http://dx.doi.org/10.5894/rgci483>

Juliano, M. Alves, M. (2007) The Atlantic Subtropical Front/Current Systems of Azores and St. Helena, *JPO*, 37, pp 2573 - 2598

*M. Mateus, R. Neves, R. (2013) Ocean modelling for coastal management - Case studies with MOHID, ISBN978-989-8481-24-5,*  
<http://www.mohid.com/books/2013OceanModellingMOHID.pdf>

Malhadas, M.S., Neves, R., Leitão, P.C., Silva, A. (2010) Influence of tide and waves on water renewal in Óbidos Lagoon, Portugal. *Ocean Dynamics* 60:41-55.

Martins F, Leitão P, Silva A, Neves, R. (2001) 3D modelling in the Sado estuary using a new generic vertical discretization approach. *Oceanologica Acta*. 2001; 24(Supplement 1):51-62.

Neves, R. (2013) *The Mohid Concept. In Ocean modelling for coastal management - Case studies with MOHID. Eds. M. Mateus & R. Neves, pp 1-11.*

Salgueiro; D. V, de Pablo H, Neves; R., Mateus, M. “Modelling the thermal effluent of a near coast power plant (Sines, Portugal)”, *JICZM*, Volume 15-4, (2015), <http://www.aprh.pt/rgci/rgci577.html>

Sangolay, B. (2004) Caracterização dos eventos quentes e de baixa salinidade ao longo da plataforma continental angolana 1982-1999 117p, Tese de Mestrado em Estudos Marinhos e Costeiros, Faculdade de Ciências do Mar e Ambiente, Universidade do Algarve, Portugal.

Schneider, R.R., Müller, P.J., Ruhland, G., Meinecke, G., Schmidt, H., and Wefer, G. (1996) Late Quaternary surface temperatures and productivity in the east-equatorial South Atlantic: response to changes in trade/monsoon wind forcing and surface water advection. In Wefer, G., Berger, W.H., Siedler, G., and Webb, D. (Eds.), *The South Atlantic: Present and Past Circulation*: Berlin (Springer-Verlag), 527–551.

Stramma, L. and England M. (1999) On the water masses and mean circulation of the South Atlantic Ocean, *JGR*, Vol. 104, C9, pp 20863 - 20883.

Taboada, J. (1998) “Evaluation of the Seasonal Variations in the Residual Circulation in the Ria of Vigo (NW Spain) by Means of a 3D Baroclinic Model”. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. 1998;47(5):661-670.

Vaz, N, Mateus, MD, Plecha, S, Sousa, MC, Leitão, PC, Neves, R, Dias, JM (2015) “Modeling SST and chlorophyll patterns in a coupled estuary-coastal system of Portugal: The Tagus case study” *JMS* 147,

### 3. HIDRODINÂMICA DA BAÍA DO LOBITO. PARTE II – ESCOAMENTO BAROCLINICO

#### **Resumo**

Este trabalho constitui a segunda parte do estudo da hidrodinâmica da Baía do Lobito (Angola). Na primeira parte do trabalho foi estudada a hidrodinâmica produzida pela maré utilizando um modelo bidimensional e foram calculados os tempos de residência que deveriam ser esperados na Baía se o escoamento fosse só devido à maré. Nesta segunda parte do trabalho é estudado a hidrodinâmica forçada também pelo vento – dominante do quadrante oeste - e pela estratificação térmica, utilizando um modelo tridimensional baroclínico. São apresentados resultados para diferentes regimes de vento e é posta em evidência a circulação dominante em duas camadas, com entrada de água do mar pelo fundo e saída pela superfície, o que induz tempos de residência no interior da baía que podem variar entre dias e semanas.

#### 1.2. Introdução

A Baía do Lobito é um sistema costeiro separado do mar por uma restinga de areia longa e estreita, com cerca de 6 km de comprimento e 300 metros de largura, onde a afluência de água doce é essencialmente devida a descargas de águas residuais urbanas da cidade do Lobito e da zona portuária. Do lado de terra a costa é montanhosa com elevações do terreno de 350 metros a 8 km da costa, protegendo a Baía dos ventos de Leste. No interior da baía está instalado o Porto do Lobito, o segundo maior de Angola.

A primeira parte do trabalho (Evaristo *et al* 2016) descreve o escoamento de maré e mostra que o modelo simula bem a sua propagação, reproduzindo as fases e as amplitudes medidas no interior da Baía. A maré gera dois grandes vórtices residuais concordantes com a batimetria, um na metade interior da baía e outro na metade exterior. Se a maré fosse o principal mecanismo responsável pela hidrodinâmica da Baía, estes dois vórtices seriam os principais responsáveis pelo tempo de residência, o qual seria de meses na metade interior. O estado trófico da água no interior da Baía é bom, com concentrações de clorofila medidas em Junho de 2014 de 4.2 µg/l, o que sugere que a acumulação de nutrientes das descargas provenientes da cidade e de outras fontes locais é baixa. Para que a acumulação de nutrientes seja baixa é necessário que o tempo de residência seja baixo. Esta hipótese foi avaliada implementando um modelo

tridimensional baroclínico na Baía, forçado pelo vento, pelas trocas de calor com a atmosfera e pela maré. Esta última é importante para simular as variações de nível e incluir o efeito das oscilações de nível nas zonas de entre - marés existentes na região urbana do Lobito na hidrodinâmica e no tempo de residência. Os dados necessários à imposição do forçamento atmosférico são provenientes do modelo GFS, (Global Forecasting System da, NOAA, National, Oceanic, Atmospheric Administration) <https://www.ncdc.noaa.gov/data-access/model-data/model-tasets/global-forecast-system-gfs> e os dados necessários ao forçamento baroclínico nas fronteiras abertas são provenientes do Copernicus Marine Service (<http://marine.copernicus.eu/>). Foram simulados períodos de ventos de Oeste, que representam as situações típicas na Baía.

O cálculo dos tempos de residência foi levado a cabo utilizando a metodologia proposta por Braunschweig *et al.*, 2003 para o estuário do Tejo e validada por Kenov *et al.*, 2012 no estuário do Mondego e utilizada nesta baía por Evaristo *et al.*, 2015 para calcular os tempos de residência considerando exclusivamente o efeito da maré. Com base nesses resultados foi mostrado que a maré condiciona os níveis (e por isso as trocas entre a baía e o sapal existente na região) mas não condiciona os tempos de residência no interior da baía, tendo sido adiantada a hipótese de que o tempo de residência seja condicionado pela conjugação da estratificação térmica e do vento dominante, de Oeste. As descargas de águas residuais urbanas e eventuais descargas de águas residuais provenientes da envolvente da Baía constituem a maior pressão sobre a qualidade da água. Estas descargas são transportadas por água doce e por conseguinte são transportadas à superfície. Sendo o vento determinante para os tempos de residência no interior da Baía é de esperar que o tempo de residência destas descargas seja inferior ao tempo de residência médio da água na Baía. Este regime de ventos associado à estratificação térmica é, por conseguinte, determinante para a qualidade da água no interior da baía em condições normais.

### 1.3. Área de estudo

A Baía do Lobito, Figura 14, é o principal corpo de água costeira, em termos de ocupação populacional e industrial, da província de Benguela e tem condições portuárias excepcionais. A profundidade é da ordem dos 18 metros e a restinga oferece condições naturais de protecção que tornam este porto num dos principais da África Austral. O porto do Lobito serve o corredor centro e sul de Angola, através de caminho-



#### 1.4. Materiais e métodos

O escoamento foi simulado utilizando o modelo numérico Mohid Water (Neves, 2013) é um sistema de modelação modular, de código aberto desenvolvido no Instituto Superior Técnico (IST), Universidade de Lisboa baseado em volumes finitos, que permite utilizar malhas verticais cartesianas, sigma ou uma combinação de ambas. O modelo permite o movimento vertical das camadas da malha para reduzir as trocas de água entre camadas e assim minimizar a difusão numérica associada a ondas internas. A versatilidade da estrutura modular permite que o modelo possa ser utilizado em praticamente qualquer escoamento com superfície livre. O modelo MOHID já foi aplicado na maioria dos estuários portugueses para simular a hidrodinâmica e qualidade da água (Vaz, et al., 2005); (Trancoso, et al., 2005), (Coelho, et al., 1998). (Saraiva et al., 2007; Lopes et al., 2009; Malhadas et al., 2010; Kenov et al., 2012) e em mares regionais (Martins et al., 2001, Mateus, 2012). Outras aplicações do MOHID incluem estuários da Galiza, como a Ria de Vigo (TABOADA et al.,1998; MONTERO, 1999 e MONTERO et al.,1999); Recentemente, o MOHID foi aplicado na costa do Sul da América (Campuzano et al., 2013).

##### 1.4.1. Equação para o escoamento

As equações que descrevem o escoamento tridimensional em estuários e baías admitindo pressão hidrostática e a aproximação de Boussinesq são:

A discretização espacial destas equações é feita utilizando uma técnica de volumes finitos a qual permite a utilização de um sistema de coordenadas verticais genérico. A discretização temporal é baseada na utilização de um esquema semi-implícito. O modelo permite a consideração de condições de fronteira abertas ou fechadas. As condições de fronteira abertas podem ser do tipo valor imposto, radiativas ou um misto das duas.

Conservação da massa:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0$$

Conservação da quantidade de movimento:

$$\frac{\partial u_1}{\partial t} + \frac{\partial(u_j u_j)}{\partial x_j} = -f u_2 - g \frac{\rho_\eta}{\rho_0} \frac{\partial \eta}{\partial x_1} - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p_s}{\partial x_1} - \frac{g}{\rho_0} \int_z^\eta \frac{\partial \rho'}{\partial x_1} dx_3 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( A_j \frac{\partial u_1}{\partial x_j} \right) \quad \text{Eq.4}$$

$$\frac{\partial u_2}{\partial t} + \frac{\partial(u_2 u_j)}{\partial x_j} + f u_1 = -g \frac{\partial \eta}{\partial x_2} - g \int_z^\eta \left( \frac{\partial \rho'}{\partial x_2} \right) dz + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \nu \frac{\partial u_1}{\partial x_j} \right) \quad \text{Eq 5}$$

A resolução destas equações necessita ainda de uma equação de estado  $\rho' = f_\rho(S, T)$  relacionando as flutuações de densidade com a Temperatura e a Salinidade (desprezando o efeito da matéria particulada na densidade). Estas propriedades são calculadas através da equação de transporte:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial(Cu_j)}{\partial x_j} = - \frac{\partial}{\partial x_j} \left( g \frac{\partial C}{\partial x_j} \right) \quad \text{Eq 6}$$

No caso da Salinidade os fluxos através da superfície livre são nulos. No caso da Temperatura os fluxos de calor são nulos através do fundo e na superfície livre são função da radiação e das trocas de calor sensível e latente entre a água e atmosfera. Um modelo de turbulência para calcular a difusividade de quantidade de movimento completa as equações resolvidas.

#### 1.4.2. Aplicação na Baía do Lobito

A aplicação na Baía do Lobito utiliza o sistema de 4 modelos encaixados representado. O modelo de maior extensão (nível zero) utiliza uma malha de 4 km de passo espacial e resolve a propagação da maré utilizando uma camada, *i. e.* em 2D. O modelo de maré é forçado simula o escoamento baroclínico, o vento e a maré utilizando um passo espacial de 2 km. Este utilizando resultados do modelo FES2004 (Evaristo *et al*, 2016). O modelo seguinte (nível 1) modelo é forçado utilizando resultados do serviço Copernicus cujo nível é perturbado pelos resultados do modelo de maré (nível zero). As temperaturas e salinidades na fronteira são as do serviço Copernicus e os níveis são a soma dos níveis fornecidos por este serviço (valor médio diário) e dos níveis de maré calculados pelo modelo de nível zero. Estes dois modelos constituem a infra-estrutura básica de simulação, de nível 2 um submodelo do modelo baroclínico de nível 1. Utiliza um passo espacial de 500 metros e produz resultados para forçar o modelo da Baía que utiliza um passo espacial de 110 metros. Todos os modelos 3D utilizam a mesma discretização vertical, baseada numa malha cartesiana com 27 camadas na zona mais profunda.

A escassez de dados na Baía do Lobito inclui a falta de dados de batimetria. Esta falta de dados que poderá ser explicado pela profundidade média elevada e a baixa taxa de assoreamento, e conseqüente facilidade de gestão das operações portuárias, com necessidade de dragagens só em zonas restritas. Os dados de batimetria são provenientes da NASA SRTM 30 (*Shuttle Radar Topography Mission*) e a linha de costa foi extraída da base de dados do NGDC (*National Geophysical Data Center*) os

quais foram os melhores encontrados para esta zona. A Batimetria foi objecto de verificação aquando da realização de perfis verticais de salinidade e de temperatura, que mostrou que a profundidade na generalidade da Baía é da ordem dos 20 metros. A linha de costa foi verificada / corrigida utilizando as imagens do Google Earth Figura 17 mostra a batimetria do nível 3 (modelo mais refinado) utilizada nas simulações.

A meteorologia é outro dos dados que só foi possível encontrar em bases de dados internacionais. Neste caso foram utilizados resultados do GFS da NOAA. O facto de esta região estar sob acção directa dos ventos forçados pelo anticiclone do Atlântico Sul e de estes soprarem no Lobito predominantemente do mar permite a utilização de ventos provenientes de um modelo com baixa resolução como é o GFS nesta zona (0.5 graus).

Os níveis de maré foram validados por comparação com os resultados de Evaristo et al (2016) o qual validou os resultados do modelo de maré utilizando componentes de maré obtidas a partir da análise harmónica de registos de maré do início dos anos 70 no Porto do Lobito. Não foi possível verificar estas componentes harmónicas utilizando outros dados de campo, no entanto a estabilidade batimétrica da Baía e a concordância entre os níveis calculados a partir daquelas componentes e os níveis de maré calculados pelo modelo sugere que ainda são válidas. O escoamento tridimensional foi analisado essencialmente em termos de consistência do padrão de circulação, complementados com a utilização de alguns perfis de temperatura e de salinidade medidos numa campanha realizada em Junho de 2014.

O sistema de modelos encaixados utilizado neste trabalho permitiu assim obter resultados na Baía do Lobito utilizando dados do domínio público produzidos por modelos de escala global e alguns dados históricos disponíveis. Os resultados obtidos são consistentes com os dados disponíveis e com o conhecimento geral do funcionamento da Baía, mostrando que esta metodologia é adequada para iniciar estudos ambientais em regiões com falta de dados.

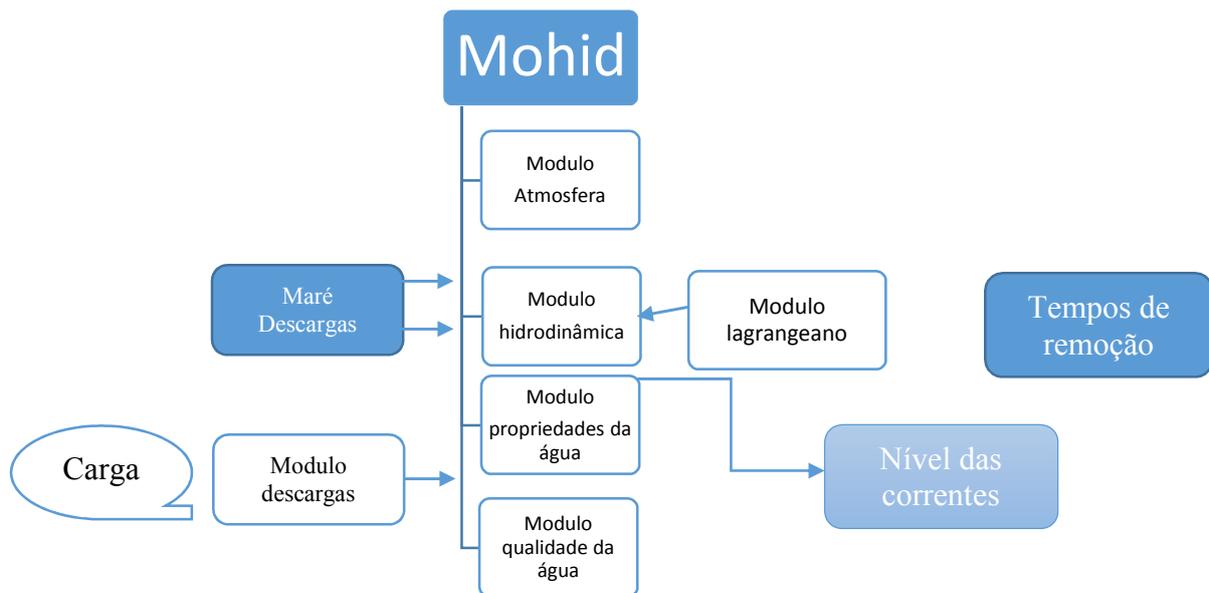


Figura 16 - Sistema dos modelos Hidrodinâmico

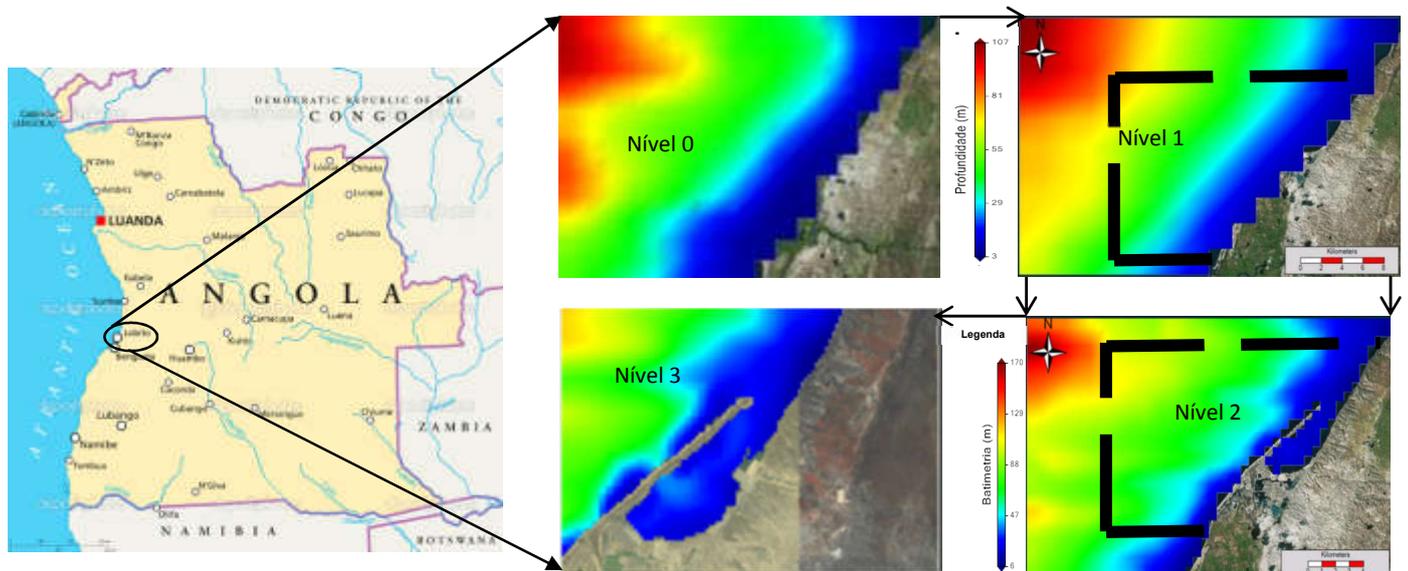


Figura 17 - Sistema de modelos encaixados utilizado para simular o escoamento baroclínico na Baía do Lobito. O modelo de maior extensão (nível zero,) e o modelo de nível 1 têm passo espacial de 2 km. O modelo de nível 2 tem passo espacial de 500 m e o modelo mais fino 110 m.

### 1. 4.3.3 Resultados obtidos

A circulação na Baía é forçada pela maré, pelo campo de densidade e pelo vento. A maré é responsável pela oscilação do nível no interior da Baía mas gera correntes instantâneas e residuais muito baixas, que dificilmente promoveriam a renovação da água da Baía (Evaristo et al, 2016). A estratificação de densidade no interior da Baía é essencialmente de origem térmica, porque os caudais de água doce descarregados no seu interior são muito baixos. As afluições de água doce na região são provenientes essencialmente do rio Catumbela, a sul da Baía e por isso não geram escoamento no

interior da Baía. Assim, é de esperar que as condições hidrodinâmicas da baía sejam forçadas essencialmente pela maré, pelo vento e pelo aquecimento superficial, sendo os resultados apresentados neste capítulo organizados de acordo com este modelo conceptual de funcionamento. Os resultados do mês de Junho de 2014 foram escolhidos para ilustrar o padrão de circulação porque para este mês estão disponíveis perfis de temperatura e salinidade superficial no interior da Baía e na sua envolvente.

A Figura 18 mostra a velocidade do vento durante o mês de Junho. A parte superior da figura mostra médias diárias para todo o mês, a parte intermédia mostra valores horários durante todo o mês e a parte de baixo mostra médias horárias para os primeiros 10 dias numa escala que facilita a leitura. As médias diárias mostram que ao longo de todo o mês o regime é idêntico e as médias horárias mostram que também os padrões diários se repetem, com alternância de direcção e sentido em cada dia, com vento intenso de noroeste ao início do dia e vento de sudoeste mais persistente, mas menos intenso durante cerca de 2/3 do dia. A integração ao longo do dia mostra a dominância de oeste, que associada ao efeito de coriolis força um escoamento superficial dirigido para fora da Baía.

A Figura 18 mostra, para um ponto localizado no interior da Baía - Porto do Lobito a comparação entre os níveis calculados pelo modelo 3D e os níveis calculados pelo modelo 2D. As duas evoluções são idênticas, o que mostra que os níveis no interior da baía são determinados essencialmente pela maré.

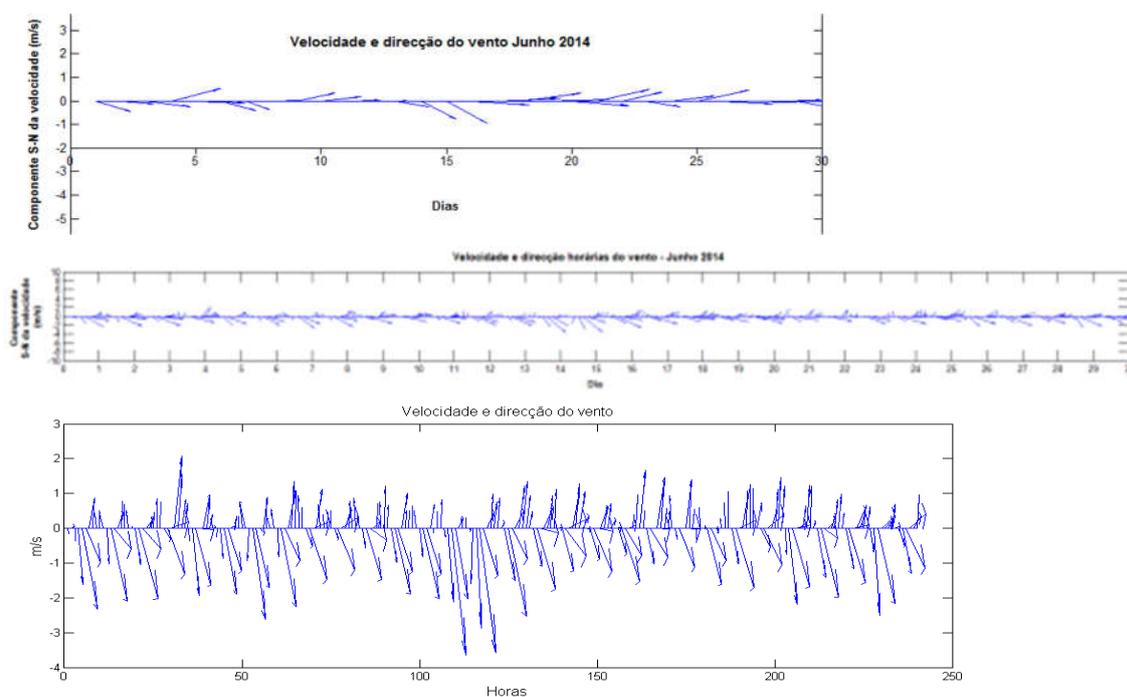


Figura 18-Valores horários da velocidade do vento durante o mês de junho de 2014. A parte superior da figura mostra médias diárias para todo o mês, a parte intermédia mostra valores horários durante todo o mês e a parte de baixo mostra médias horárias para os primeiros 10 dias de Junho

A Figura 19 mostra o escoamento instantâneo num corte longitudinal ao longo do eixo da Baía. A figura mostra que a estratificação vertical do escoamento é também clara no escoamento instantâneo, que mostra um escoamento em duas camadas. A análise da figura mostra que existem trocas de água entre estas duas camadas, que induz recirculação da água da água da camada superficial, que é responsável pelo aumento da temperatura da água do fundo. Este aumento de temperatura é visível nas medidas e nos resultados do modelo e é responsável pelo pequeno aumento do nível médio residual no interior da Baía apresentado na Figura 6.

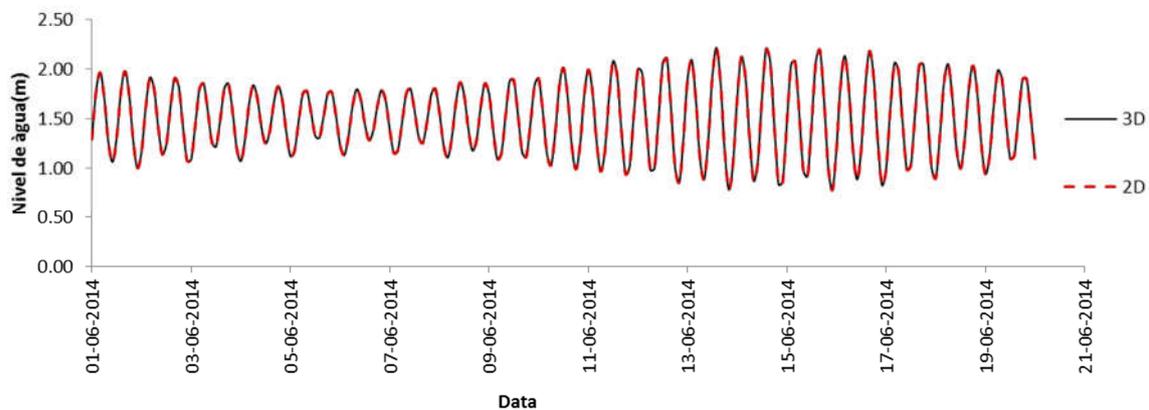


Figura 19-Nível da água na Baía simulado durante o mês de Junho pelos modelos 2D e 3D. A semelhança dos níveis mostra que o nível só é sensível à maré

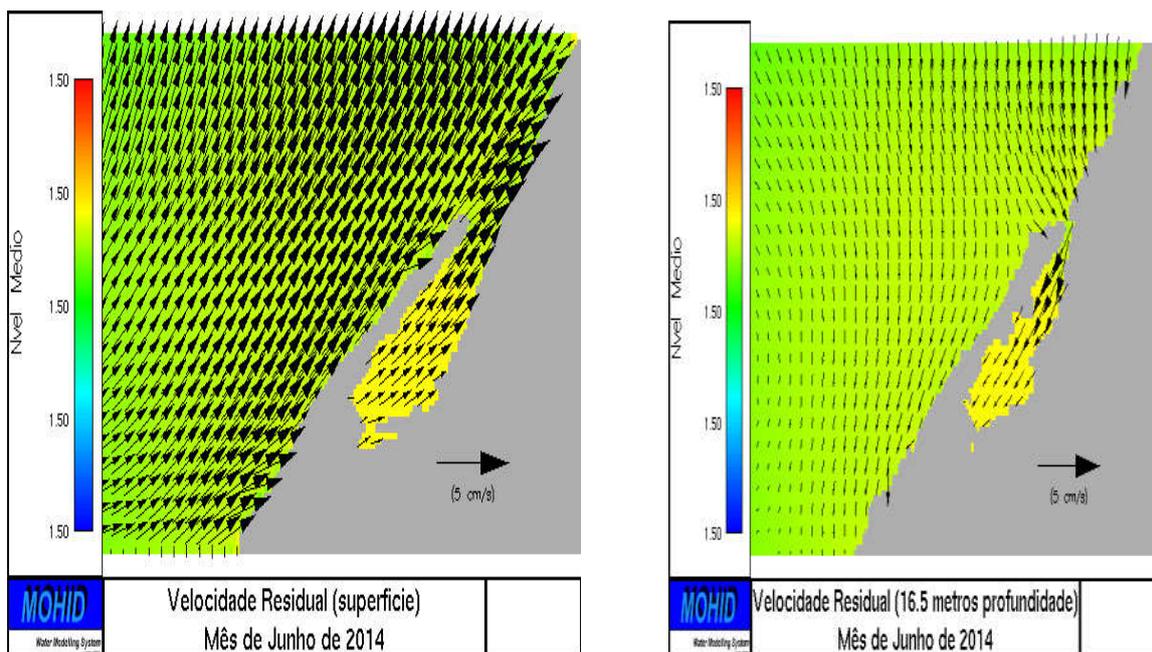


Figura 20 - Campos nível e de velocidade residuais à superfície e no fundo durante o mês de Junho de 2014.

As figuras mostram que à superfície o escoamento para fora da baía e que no fundo é dirigido para o seu interior. E que os níveis no interior da Baía são ligeiramente superiores aos níveis fora da Baía.

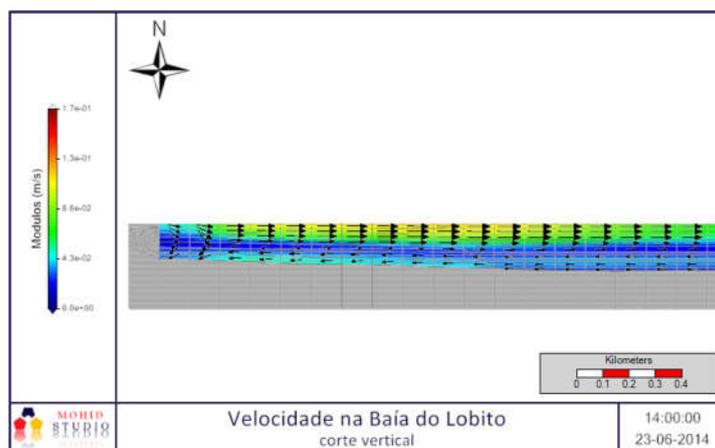


Figura 21-Corte vertical do campo de velocidades ao longo do eixo da Baía no dia 23 de Junho de 2014 às 14 horas. A água entra na metade inferior da coluna de água e sai na metade superior

Perfis verticais de temperatura são a informação disponível para validação dos resultados do modelo. São perfis instantâneos e por isso são insuficientes para validar as temperaturas simuladas (muito dependentes dos valores impostos na fronteira) mas permitem validar a dinâmica do sistema, nomeadamente através das diferenças de temperatura entre o interior e o exterior da baía e através da forma dos perfis verticais. Do lado direito da Figura 22 são apresentadas diferenças entre o perfil medido no interior da Baía (estação 28) e os perfis medidos nas estações 6 e 14. Quer as medidas quer o modelo mostram que nos primeiros 4 metros a água é mais fria no interior da Baía do que no exterior, mas que a profundidades superiores a 5 metros acontece ao contrário. Este resultado é consistente com a estratificação do escoamento residual e instantâneo e com o nível residual mais elevado detectado no interior da baía e com a mistura entre as duas camadas posta em evidência pelo corte vertical do perfil instantâneo.

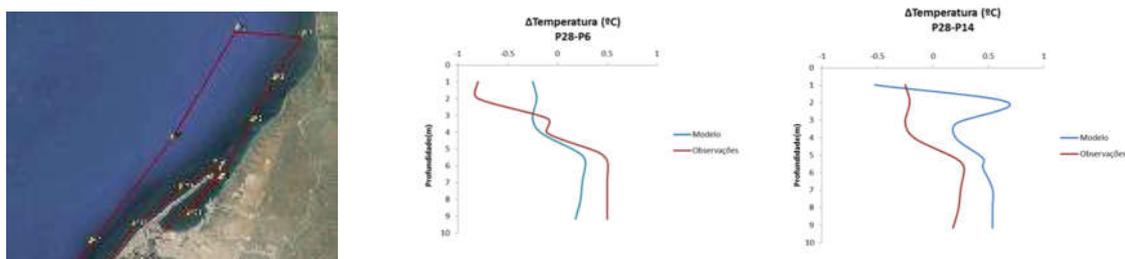


Figura 22-Locais de realização de perfis verticais de Temperatura na zona da Baía do Lobito em Junho de 2014 (Esquerda) e diferenças entre perfis medidos nas estações 28 e 6 e 28 e 14 e perfis calculados nos mesmos pontos

As diferenças mostram que a dinâmica os primeiros 4 metros da coluna de água têm dinâmica distinta das camadas inferiores, quer nas medidas, quer no modelo.

A Figura 23 mostra a distribuição superficial de temperatura calculada pelo modelo para o dia 24 de Junho às 12 horas. A figura mostra valores de temperatura superficial mais baixos na baía, como consequência do upwelling.

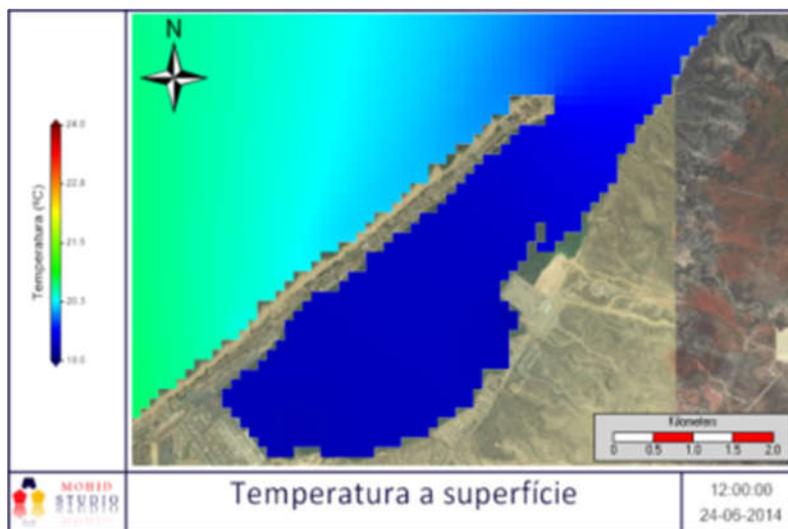
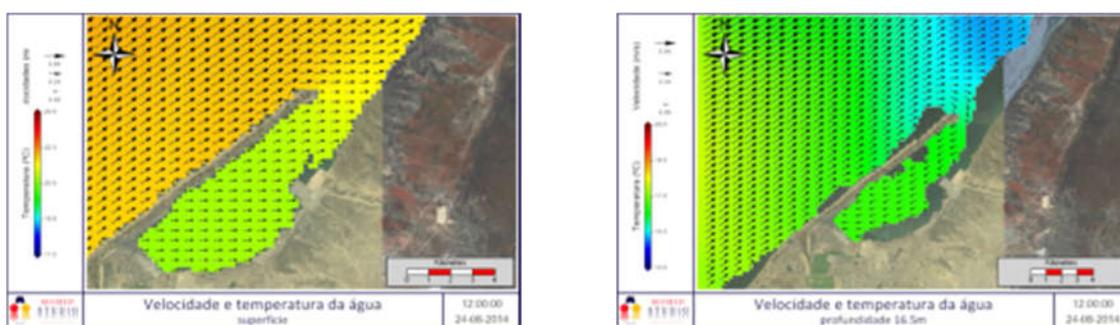
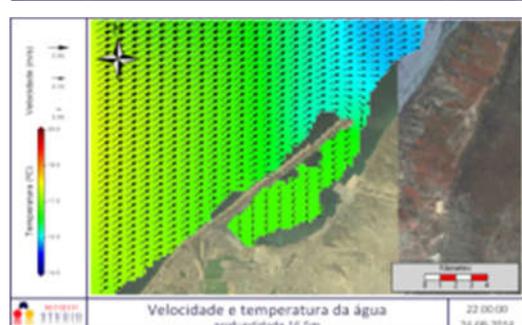
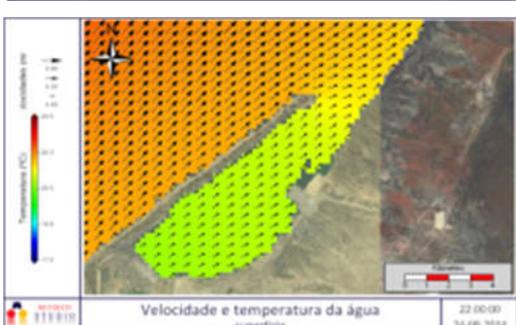
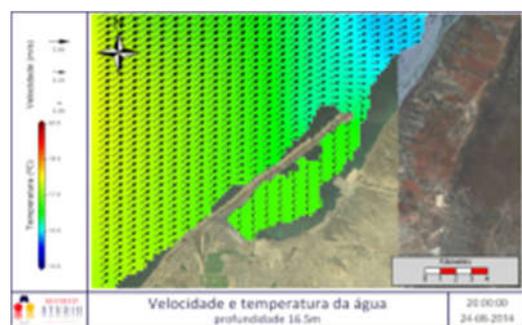
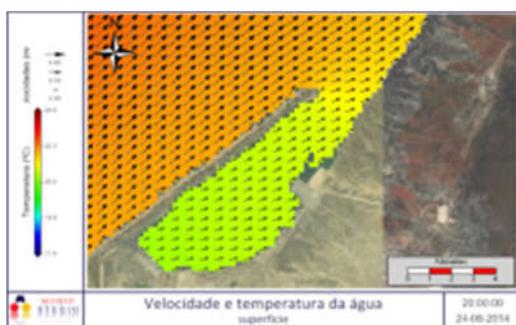
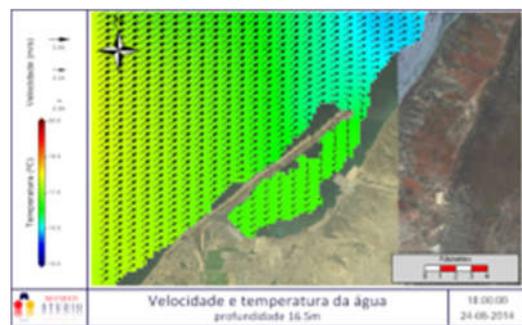
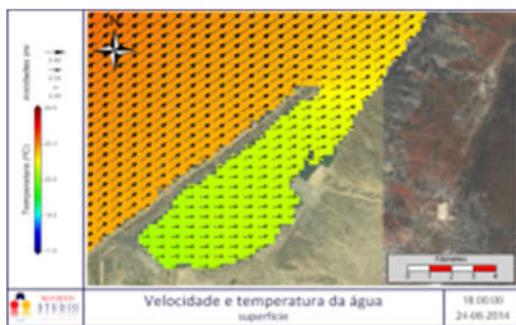
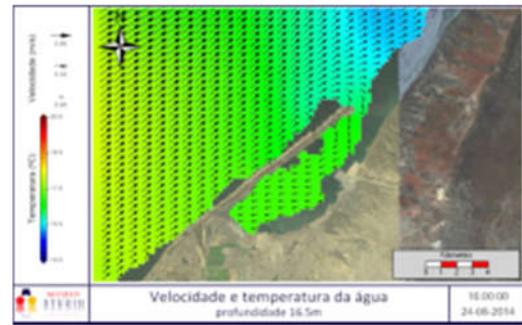
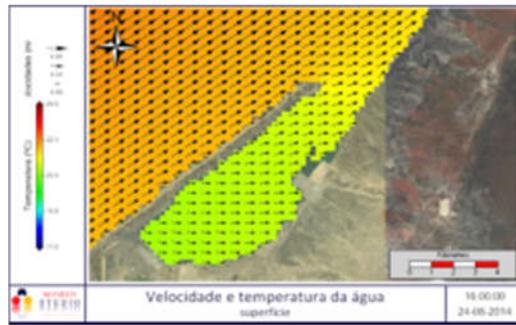
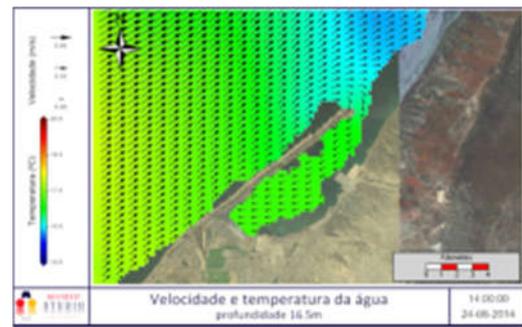
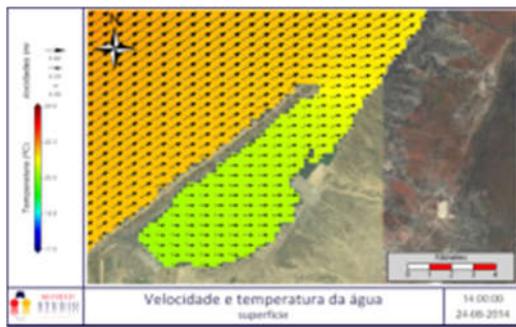


Figura 23-Temperatura a superfície prevista pelo modelo para as 12 horas do dia 24 de Junho de 2014, pondo em evidência o processo de upwelling no interior da Baía associado ao vento de oeste

A Figura 24 mostra campos de velocidades à superfície e no fundo previsto para o dia 24 de Agosto de 2014 separados de 2 horas, para um período de maré (12 horas). Durante todo este período, o escoamento apresenta o mesmo padrão, com velocidade para fora à superfície e para dentro da baía no fundo. Durante todo o período a temperatura à superfície é menor do que no exterior e no fundo é mais elevada, pondo em evidência a mistura vertical referida acima. A Figura 24 mostra também o escoamento ao longo de um período de maré, mas durante a época mais quente (Dezembro). O padrão de circulação à superfície e no fundo continua a ser distinto, com escoamento dominante no fundo dirigido para o interior da baía.





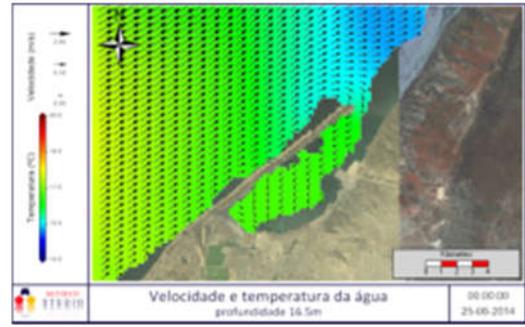
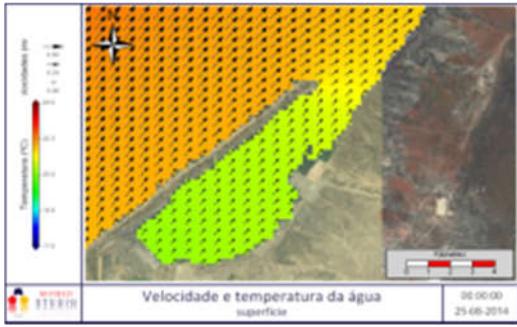
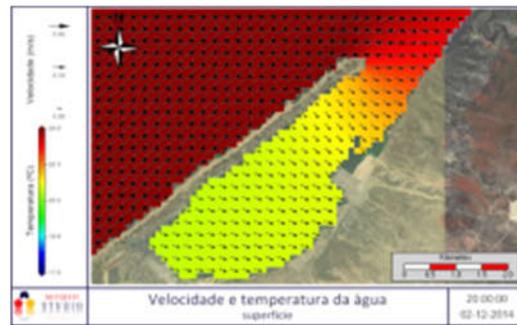
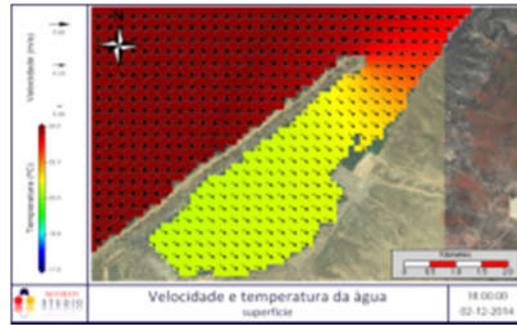
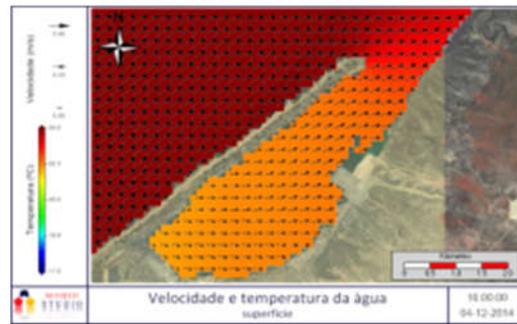
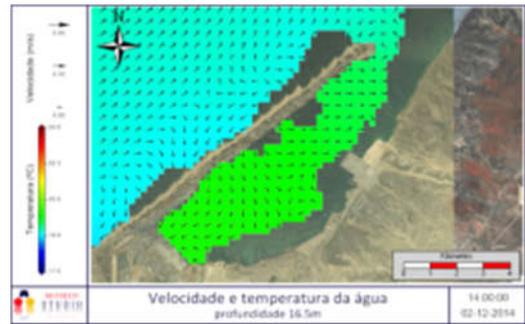
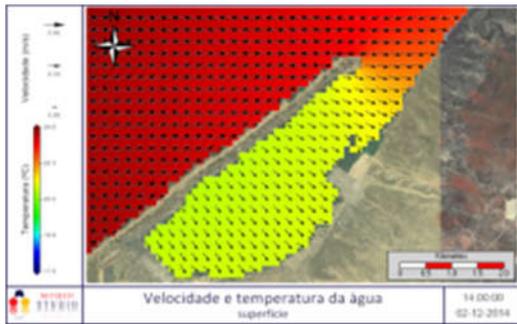


Figura 24- Correntes superficiais instantâneas na Baía do Lobito dias 24-08 de 2014 às 10 horas início da vazante, numa altura em que o efeito do vento e da maré no escoamento sul tem sentidos opostos.



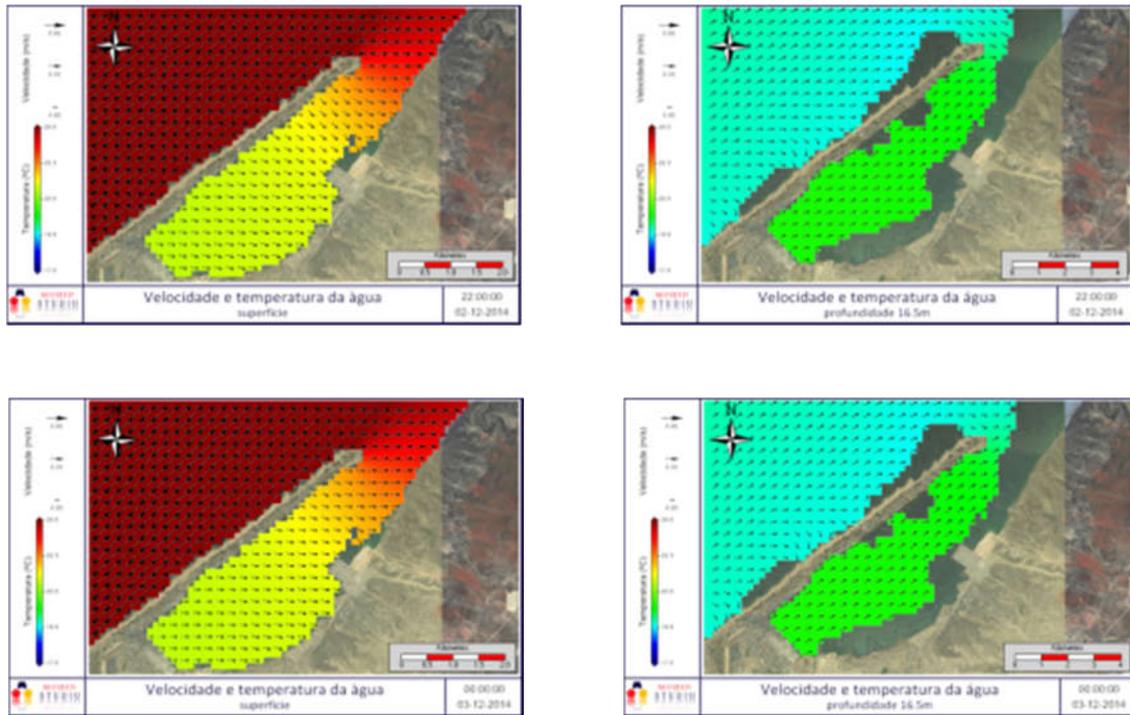


Figura 25-Campos de velocidades no dia 2 de Dezembro de 2014

A Figura mostra o mesmo padrão de escoamento registado em Junho e em agosto, mas com temperaturas mais elevadas, como seria de esperar

Os campos de correntes calculados foram usados para estimar tempos de residência à semelhança do que foi feito em Evaristo *et al* (2016) com as velocidades de maré. Naquele trabalho os autores verificaram que se a maré fosse o principal mecanismo responsável pela renovação da água da Baía, os tempos de residência seriam da ordem dos meses. Se assim fosse a qualidade da água na Baía teria que ser muito inferior à existente. Neste estudo foi repetido o procedimento usado por Evaristo *et al* (2016). A Baía foi dividida em 3 caixas que foram preenchidas com traçadores lagrangeanos seguindo o método proposto por Braunschweig *et al* e (2003) e verificado mais tarde por Kenov *et al* (2012), respectivamente no estuário do Tejo e no estuário do Mondego. A Figura 26 Figura 26-Caixas de emissão (3) dos traçadores Lagrangeanos e localização dos traçadores uma semana depois da emissão.

A Figura 26-mostra as caixas de emissão à esquerda e a localização dos traçadores duas semanas mais tarde, à direita. A figura mostra que depois de duas semanas, a generalidade dos traçadores já saiu do domínio. A Figura 27 mostra a evolução temporal da percentagem de traçadores ainda no interior da Baía. A Figura 27 mostra que a generalidade dos traçadores da caixa 3, localizada mais perto do mar sai em 4 dias e que ao fim desse período, 93% dos traçadores emitidos na caixa mais interna também já

sáiram. Definindo tempo de residência como o tempo necessário para renovar 80% da água da baía, o tempo de residência em Junho seria de 21 dias.

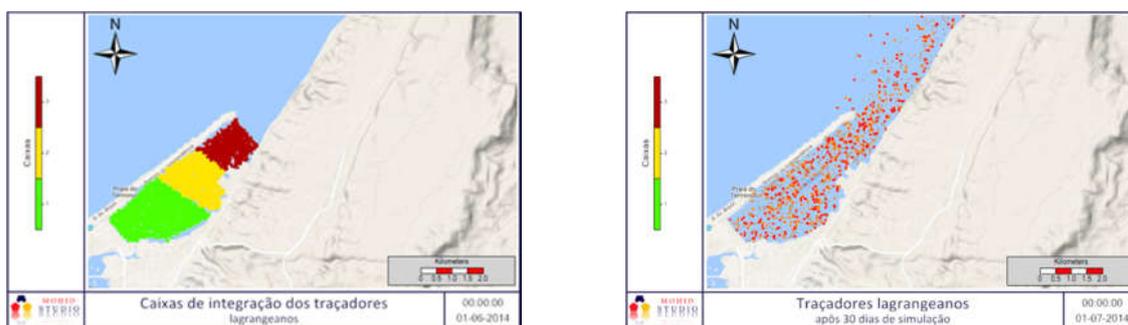


Figura 26-Caixas de emissão (3) dos traçadores Lagrangeanos e localização dos traçadores uma semana depois da emissão.

Este resultado é consistente com a inexistência de relatos de poluição graves no interior da Baía, apesar de ela albergar o segundo maior porto de Angola e de nela serem descarregadas águas residuais não tratadas de uma percentagem considerável da população do Lobito.

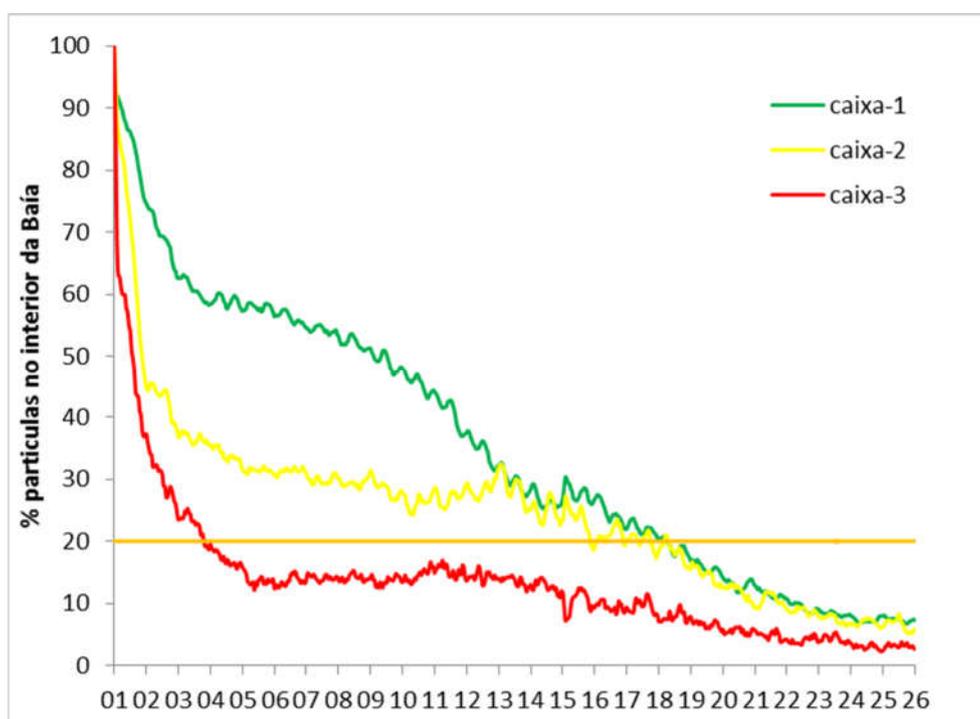


Figura 27-Evolução temporal da relação entre traçadores no modelo 3D, no interior da Baía nos primeiros dois metros da coluna de água a contar da superfície considerando o forçamento da maré e atmosférico. Dezoito dias depois da emissão só a caixa mais interior

### 1.5. Análise e discussão dos resultados

A hidrodinâmica da Baía é condicionada pela maré, pelo vento e pelas trocas de calor, que condicionam a densidade da água. Evaristo et al (2016) mostrou que a maré determina o nível, mas não pode ser o principal mecanismo gerador de escoamento. A análise do regime de ventos mostrou que os ventos dominantes de Oeste deverão desempenhar papel determinante na hidrodinâmica da Baía. Sendo o vento dominante de Oeste é de esperar que o escoamento à superfície seja dirigido predominantemente para fora da Baía e conseqüentemente que o escoamento no fundo seja orientado preferencialmente para o seu interior. Este foi efectivamente o padrão de circulação encontrado e originaria níveis dentro da Baía inferiores aos níveis exteriores se a temperatura no interior da baía e no exterior fossem idênticas. Na realidade a temperatura média na coluna de água no interior da baía é mais elevada do que no exterior e isso permite que os níveis sejam mais elevados cerca de 0.5 mm. Em Junho, à superfície da baía, a temperatura é efectivamente inferior à temperatura no exterior, no entanto a circulação em duas camadas origina mais mistura vertical no interior do que no exterior e por isso a temperatura média no interior é superior à temperatura no exterior, permitindo que no fundo a pressão seja inferior gerando um escoamento dirigido de fora para dentro.

No verão (ilustrado pelos resultados de Dezembro) o vento tende a soprar de Noroeste, forçando o escoamento superficial é dirigido para o interior da baía. Este efeito contribui para a retenção da água no seu interior e ao aumento da sua temperatura e estratificação vertical. O padrão de escoamento apresentado na Figura 25 é consistente com este efeito. A velocidade na camada de fundo continua a ser dirigida para o interior da baía, como consequência da redução da densidade. O efeito combinado da redução de densidade e do vento resulta no padrão de velocidade apresentado, com escoamento superficial perpendicular ao eixo da baía e junto ao fundo dirigido para o seu interior durante a maior parte do período de maré. A relação entre a importância da estratificação e do vento depende da intensidade do vento e da duração destes eventos e deverá ser abordada com base em modelação ecológica, preferencialmente orientada para a reprodução de eventos quantificados com dados de campo.

## 1.6. Conclusão

A aplicação do modelo hidrodinâmico tridimensional à Baía do Lobito permitiu simular e conhecer os campos de velocidade transiente e residual na baía e região envolvente e estimar os tempos de residência nas diferentes partes da baía. Os resultados mostraram que o vento determina a dinâmica do escoamento, sendo o seu efeito visível no padrão de circulação e quantificável através dos tempos de residência.

Este estudo representa um primeiro passo para a compreensão da circulação na Baía do Lobito, cujo conhecimento deve suportar o ordenamento do território necessário à preservação de todas as actividades económicas que dependem da qualidade da água, nomeadamente o turismo. A confirmação exaustiva dos resultados beneficiaria de mais trabalho de campo, nomeadamente da medição de correntes. A importância do vento mostra também que o estudo da baía pode beneficiar de um melhor conhecimento da circulação atmosférica e por isso da existência de um modelo local de alta definição.

Os resultados das simulações realizadas são também de grande importância para o planeamento do trabalho de campo e para a minimização dos seus custos. A metodologia seguida baseada no downscaling de dados de domínio público produzidos por programas de escala global (GPS, CMEMS, ETOPO, EMODNET) mostra ser adequada ao diagnóstico de sistemas pouco conhecidos experimentalmente, permitindo um progresso muito mais rápido (e económico) do que acontecia no passado quando o trabalho de campo efectuado no local era necessariamente o primeiro passo para o estudo de um sistema costeiro.

## 1.7. Referências Bibliográficas

Braunschweig F, Martins, F, Leitão, P & Neves, R. 2003: A methodology to estimate renewal time scales in estuaries: the Tagus Estuary case. *Ocean Dynamics*. 53(3):137–145.

Campuzano F. J., Mateus, M. D., Leitão, P. C., Leitão, P. C., Marín, V. H., Delgado, L. E., Tironi, A., Pierini, J. O., Sampaio, A. F. P., Almeida, P. & Neves, R. J. 2013. Integrated coastal zone management in South America: A look at three contrasting systems. *Ocean & Coastal Management*, 72, 22-35.

Coelho, H. S., R. R. Neves, P. C. Leitão, H. Martins, A. P. Santos (1998) The slope current along the western European margin: A numerical investigation. *Boletim Instituto Espanhol de Oceanografia*. 15, 1998, pp. 61-72.

Evaristo *et al* 2016)

J.F. Lopes, Ana Cristina Cardoso, Maria Teresa Moita, Alfredo C.Rocha, Juan A.Ferreira (2009) Modelling the temperature and the phytoplankton distributions at the Aveiro near coastal zone, Portugal. *Ecological modelling*. 2009, Vol. 220, pp. 940-961.

Kenov, A., Garcia AC, Neves R. (2012) "Residence time of water in the Mondego estuary (Portugal)". *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 106:13-22

Malhadas M.S., Neves, R., Leitão, P.C., Silva, (2010) A. Influence of tide and waves on water renewal in Óbidos Lagoon, Portugal. *Ocean Dynamics* 60:41-55.

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

Mateus, M. , G. Riflet , P. Chambel , L. Fernandes , R. Fernandes , M. Juliano , F. Campuzano , H. de Pablo, and R. Neves, (2012) An operational model for the West Iberian coast: products and services, *Ocean Sci.*, 8, 713–732, 2012, doi:10.5194/os-8-713-2012

Monteiro, F. A., Solé-Cava, A. M. & Thorpe, J. P. (1997). Extensive genetic divergence between populations of the common intertidal sea anemone *Actinia equina* from Britain, the Mediterranean and the Cape Verde Islands. *Marine Biology*, 129, 425-433.

Montero P, Gomez-gesteira M, Taboada JJ, Ruiz, Villarreal M, Santos AP, Neves, R. , Pérez-Villar. (1999) On residual circulation of the Ria of Vigo, using a 3-D baroclinic model. *Bol. Inst. Esp. Oceanogr.* 1999; 15(1-4): 31-38

Neves, R. (2013) “*The Mohid Concept*”. In *Ocean modelling for coastal management - Case studies with MOHID*. Eds. M. Mateus & R. Neves, pp 1-11.

Saraiva, S., Pina, P., Martins, F., Santos, M., Braunschweig, F. R. Neves (2007) Modelling the influence of nutrient loads on Portuguese estuaries. *Hydrobiologia*, 587, 5-18.

Taboada, J. J., Prego, R., Ruiz-Villarreal, M., Montero, P., Gómez-Gesteira, M., Santos, A. P. & Pérez-Villar, V. Evaluation of the seasonal variations in the residual patterns in

## 4. MODELO ECOLÓGICO E QUALIDADE ÁGUA

### 4.1. Introdução

Os modelos ecológicos pretendem descrever as relações de dependência entre as variáveis biológicas e o meio ambiente e a interdependência entre elas, do tipo “presa-predador”, i.e. pretendem descrever os processos que ocorreriam num mesocosmos onde não existe transporte advectivo nem difusivo. Acoplados a um modelo de transporte estes modelos permitem calcular as distribuições espaciais das propriedades.

É a descrição espacial da geometria e conseqüentemente a formulação do modelo de transporte que confere a dimensionalidade ao modelo. Assim, um modelo ecológico programado para simular unicamente os processos de transformação de uma variável em função das propriedades biogeoquímicas locais, é um modelo “0D”, sendo o número de dimensões definido quando o modelo é acoplado ao modelo de transporte. O modelo ecológico desenvolvido no MARETEC Pina (2001), Marcos (2012) e da Isabella (2012) e outro que resolve a aproximação com pressão não hidrostática (equações de Boussinesq, Silva, 1993 está organizado na perspectiva “zero-dimensional”, com uma estrutura que permite a sua utilização por modelos de transporte com formulação Euleriana ou Lagrangeana. O modelo de qualidade da água pode simular os ciclos do Azoto e do Fósforo e da Sílica, sendo as concentrações de Oxigénio Dissolvido e de CBO calculadas como subprodutos da simulação daqueles ciclos.

A Baía do Lobito é bastante profunda e não tem zonas de cobertura/descobertura significativas e por isso foi considerada unicamente produção primária pelágica, pelo Fitoplâncton, não tendo sido consideradas macroalgas nem ervas marinhas. A simulação do ciclo do Azoto inclui as três principais formas inorgânicas - Amónia, Nitrato e Nitrito, e três formas orgânicas - fracção refractária e não-refractária do Azoto orgânico dissolvido, e Azoto orgânico particulado. A Figura 28 mostra a relação entre estas variáveis e o Fitoplâncton e Zooplâncton e os parágrafos seguintes apresentam as principais equações utilizadas pelo modelo. Uma listagem exaustiva é apresentada em anexo.

### 4.2. Descrição do modelo ecológico

O modelo Ecológico descreve o ciclo dos elementos Azoto, Fósforo e da Sílica e Carbono de acordo com o conceito ilustrado na Figura 28 para o ciclo do Azoto. Nesta figura as propriedades da coluna da esquerda representam as formas minerais do Azoto,

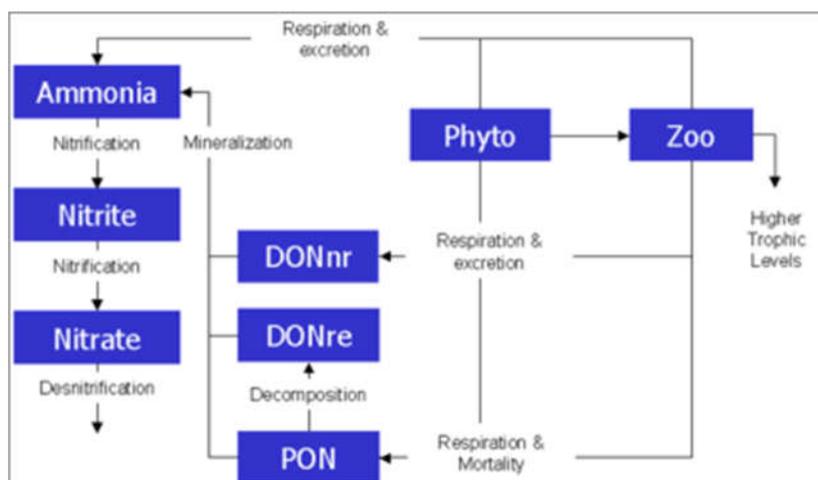


Figura 28 - Esquema conceptual do modelo; adaptado de (Pina, 1999).

A segunda coluna representa as orgânicas mortas, na forma dissolvida e na forma particulada (incluindo detritos). Os produtores primários são representados pelo Fitoplâncton que consome nutrientes minerais da água e fixa carbono através da fotossíntese. O nível trófico seguinte, constituído pelos consumidores primários ou produtores secundários – zooplâncton, consome os compostos orgânicos sintetizados pelos produtores primários, sendo o zooplâncton por sua vez consumido pelos níveis tróficos superiores. As excreções do fito e zooplâncton incluem amónia, azoto orgânico particulado e azoto orgânico dissolvido lábil. Por sua vez, a decomposição do azoto orgânico particulado produz amónia e azoto orgânico dissolvido refractário ou não lábil.

Esta formulação é normalmente designada por NPZ (Nitrogen, Phytoplankton and Zooplankton) assume que a relação de Redfield entre Azoto, Fósforo e Carbono de mantém constante, independentemente do stress por nutrientes. De acordo com esta hipótese, o Fitoplâncton tem que perder Azoto quando respira, como consequência da perda de Carbono. Na realidade a relação de Redfield é variável e o Fitoplâncton só excreta Azoto por respiração se a concentração no seu interior – nos vacúolos – for elevada. Modelos mais complexos podem simular este processo de desvio à relação de Redfield (e.g. Marcos 2006), mas só se justificam quando a estratificação vertical de nutrientes na coluna de água é importante e a comunidade fitoplanctónica é dominada por dinoflagelados, que através do seu próprio movimento conseguem assimilar nutrientes nas zonas escuras, mais profundas, e deslocar-se em seguida para a zona fótica para fazerem fotossíntese.

### 4.3. Equações do modelo

Um modelo ecológico é constituído por um conjunto de equações onde cada termo descreve um processo de produção/consumo e por um conjunto de taxas que descrevem a intensidade do processo. As taxas são função das condições ambientais e por vezes das concentrações das variáveis consumidas no processo. As equações do modelo garantem conservação de massa, i.e., os termos de produção de uma variável (termos fonte, positivos) são equilibrados por termos correspondentes negativos (poço) nas equações das variáveis que estão a ser consumida para produzir a primeira.

O ciclo do azoto inclui nitrato ( $\text{NO}_3$ ), nitrito ( $\text{NO}_2$ ) e amónia ( $\text{NH}_4$ ) como formas inorgânicas, enquanto o azoto orgânico é dividido em azoto orgânico particulado (PON), azoto orgânico dissolvido refractário (DONr) e azoto orgânico dissolvido não refractário (DONnr). A diferença entre estas duas últimas formas consiste nas taxas de mineralização, sendo que a forma não refractária é tipicamente degradada no próprio dia em que é produzida, e a forma refractária, por ser mais complexa, tem um tempo de degradação na ordem de dias/semanas. Esta descrição é muito simplificada, pois um mesmo organismo tem muitos tipos de matéria orgânica e alguns têm tempos de degradação da ordem dos anos (e.g. a celulose). A hipótese subjacente à descrição é que esse tipo de matéria orgânica muito refractária é uma pequena fracção da matéria orgânica total.

A Figura 29 representa o mesmo tipo de informação da, Figura 28 de uma forma menos convencional, mas fácil de interpretar e representando também um tipo de bactérias. Os círculos representam variáveis de estado e as setas representam processos de produção/consumo, consoante o seu sentido. A estrutura do diagrama é clara – neste caso simples porque põe em evidência os ciclos e a interdependência entre as variáveis.

A inclusão do ciclo bacteriano tem como objectivo evitar a imposição de taxas de transformações (e.g. taxa de mineralização) que são mediadas por bactérias (e.g. processos de nitrificação/desnitrificação) e, por conseguinte, as taxas são efectivamente função da dimensão das populações das várias bactérias e da sua actividade, que dependem no mínimo da disponibilidade de carbono, da temperatura e do teor em Oxigénio. O ciclo bacteriano representado no diagrama vai no sentido de melhorar a simulação da mineralização da matéria orgânica, mas está muito simplificado. Apesar de ser simplificado não foi utilizado nas simulações porque os dados de campo são insuficientes para justificarem a complexidade adicional.

As formas de Fósforo presentes no modelo ecológico consistem, tal como para o caso do azoto, nas formas orgânica e inorgânica, sendo que as formas orgânicas consideradas incluem fósforo particulado (POP), fósforo dissolvido refractário (DOPre) e fósforo dissolvido não refractário (DOPnr). Já o fósforo inorgânico está representado no modelo na forma de orto-fosfato (PO<sub>4</sub>). Estas formas de Fósforo são processadas pelos organismos em paralelo com as formas correspondentes de Azoto, tal como ilustra a Figura 28, tentando os organismos manter proporções próximas das relações de Redfield. O nutriente que se extingue em primeiro lugar é o nutriente limitante e por isso aquele que controla o sistema ecológico. O modelo tem obrigatoriamente que simular o ciclo desse nutriente. Os outros nutrientes, por estarem sempre presentes, não necessitam de ser simulados.

Na realidade os produtores primários utilizam um grande número de nutrientes. Normalmente fala-se só em Azoto e Fósforo (e por vezes em sílica) porque é normalmente um destes que é limitante. Nos sistemas marinhos o nutriente limitante é normalmente o Azoto. Na Baía do Lobito os dados não permitem saber qual é o nutriente limitante e por isso foram considerados os dois ciclos. As condições ambientais são representadas pela radiação solar e pela temperatura e as cargas urbanas foram estimadas a partir de dados de monitorização das duas valas através das quais é descarregada a maioria das águas residuais da cidade (vala do Quileva e da Sonamet).

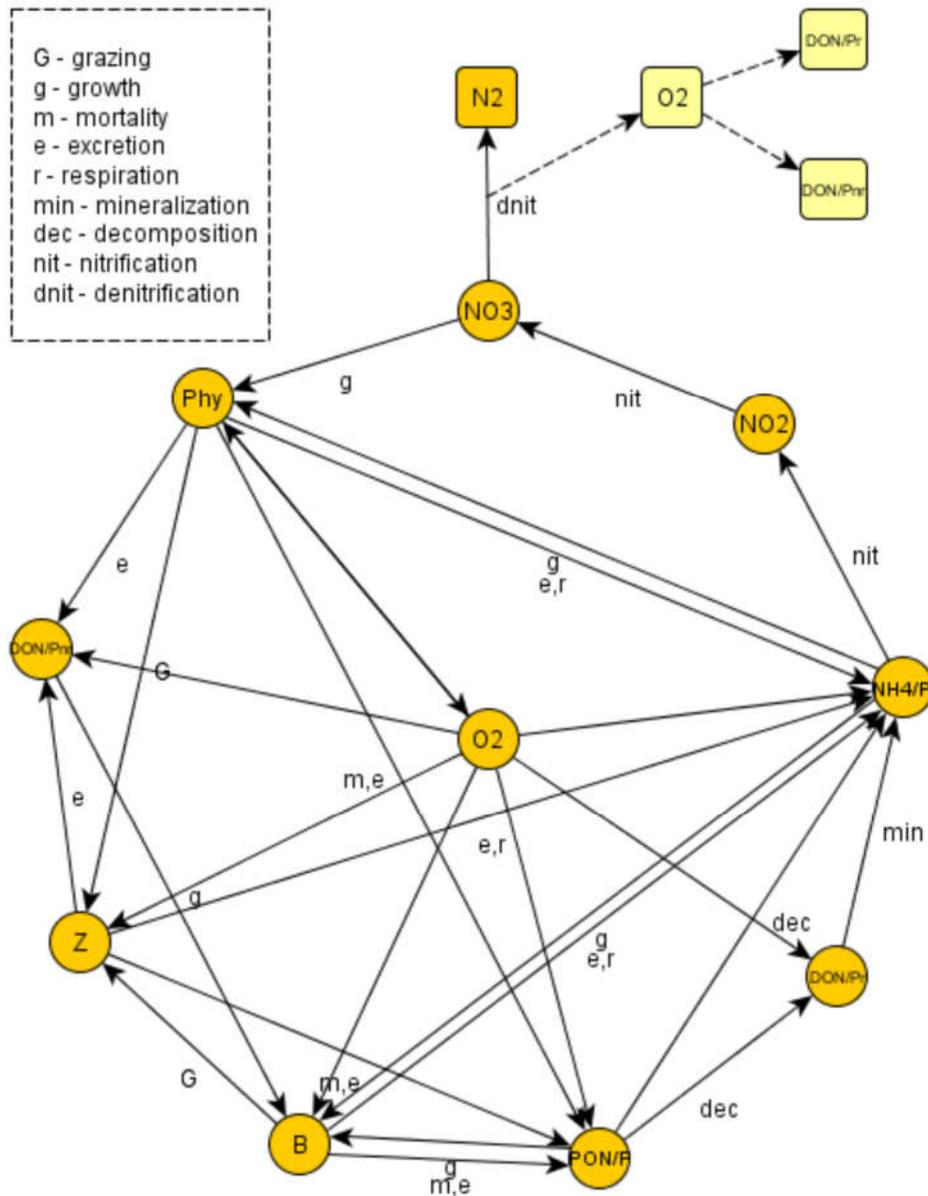


Figura 29 - Esquema conceptual do modelo de qualidade da água.

#### 4.4. Parametrização do modelo

Na parametrização do modelo ecológico é necessário, em primeiro lugar, seleccionar as variáveis a simular, de acordo com os objectivos pretendidos para o trabalho. Essa selecção deve ser comum a todos os níveis do sistema de modelos encaixados, por uma questão de consistência dos fluxos nas fronteiras. Foram simulados os ciclos biogeoquímicos do azoto e do fósforo, o fitoplâncton, zooplâncton e o oxigénio.

Os parâmetros associados ao modelo ecológico assim como os valores utilizados para cada um destes são apresentados na (Tabela 4) e foram adaptados do guia do

módulo de qualidade da água do sistema MOHID e a partir de outros trabalhos Fransz et al. (1991) Mateus et al. (2012). As equações modelo ecológico são apresentadas em anexo, sendo neste capítulo apresentada apenas a equação de balanço de massa do fitoplâncton que é a propriedade mais importante do ciclo porque é através dela que se produz matéria orgânica, i.e. é através dela que se injecta energia no sistema. Por essa razão é também a variável mais importante para a demonstração de resultados. A equação que descreve a actividade do Fitoplâncton (i.e. excluindo mortalidade predatória) é:

$$\frac{dF}{dt} = (\mu - r - e_x - s - m)F \quad \text{Eq 7}$$

onde F é a concentração de fitoplâncton ( $\text{mg C l}^{-1}$ ),  $\mu$  a taxa bruta de crescimento fitoplanctónico ( $\text{dia}^{-1}$ ), r a taxa de respiração ( $\text{dia}^{-1}$ ),  $e_x$  a taxa de excreção ( $\text{dia}^{-1}$ ) e m a mortalidade não predatória ( $\text{dia}^{-1}$ ).

Como mostra a Equação 7, e como foi apresentado na (Figura 29), e de acordo com a formulação do modelo ecológico, a concentração de fitoplâncton tem um termo de produção responsável pelo aumento de biomassa, e diminui através da sua actividade (respiração celular e excreção) ou da mortalidade e finalmente pela predação, normalmente devida maioritariamente ao zooplâncton, embora em alguns sistemas os organismos filtradores possam desempenhar papel de relevo no controlo do fito (e do zoo). Esta e as restantes equações do modelo serão descritas em detalhe no anexo I.

Do ponto de vista dos nutrientes e oxigénio, o fitoplâncton consome nutrientes inorgânicos como amónia, nitrato, fósforo inorgânico e pela mortalidade e excreção produz, respectivamente, azoto e fósforo particulados, e amónia e hidratos de carbono. Durante o dia, de acordo com a intensidade de radiação, o Fitoplâncton faz fotorrespiração produzindo oxigénio e durante a noite faz respiração celular consumindo oxigénio para produzir energia (Figura 30).

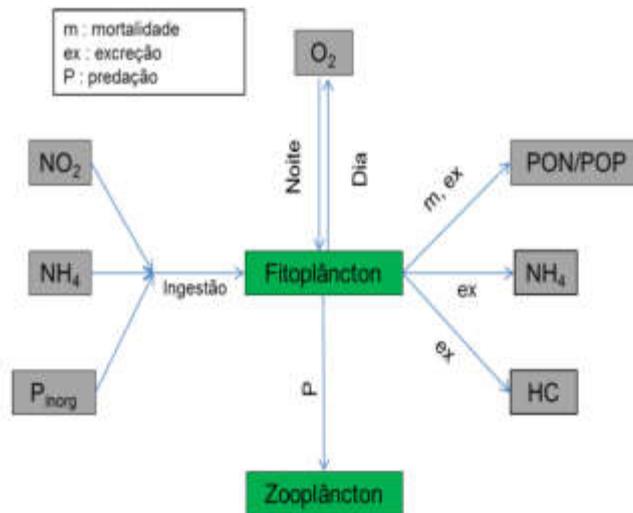


Figura 30- Dinâmica do fitoplâncton assumido pelo modelo ecológico.

O modelo considera como factores limitantes do crescimento do fitoplâncton a insuficiência de luz e alimento, que para o fitoplâncton (no modelo) consiste em nitrato e amónia e fosfato. O modelo usa um factor de preferência para distinguir entre os consumos de Amónia e de Nitrato, que depende das concentrações da cada um deles e das suas concentrações de semi-saturação para o Fitoplâncton. (Formulação do tipo Michaelis - Menten).

A Figura 30 apresenta o conjunto de parâmetros utilizados na simulação da Baía do Lobito. São valores típicos publicados na bibliografia e utilizados por defeito no modelo MOHID. A ausência de dados de campo não permite fazer a calibração destes parâmetros para o nosso caso, tendo os resultados sido avaliados em termos de consistência.

Tabela 4- Parametrização do modelo ecológico.

Valor	Descrição	Unidades
<b>Fitoplâncton</b>		
2.0	Taxa de crescimento máximo	d <sup>-1</sup>
0.0175	Constante de respiração endógena	d <sup>-1</sup>
0.07	Fracção da fotossíntese que é oxidada por fotorrespiração	adim
0.02	Constante de excreção	adim
0.03	Taxa de mortalidade máxima	d <sup>-1</sup>
0.5	Constante de semi-saturação	mg C l <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup>
	Constante de semi-saturação de azoto	mg P/l
121	Constante de semi-saturação de fósforo	mg P/l
10.25	Intensidade óptima para a fotossíntese	W/m <sup>2</sup>
<b>Zooplâncton</b>		
0.3	Taxa de crescimento máxima	d <sup>-1</sup>
0.2	Constante de ivlev	l/mg C
	Constante de semi-saturação para a predação	mgC/l
0.045	Concentração mínima de fitoplâncton para predação	mg/l
0.0	Taxa de excreção	d <sup>-1</sup>
1.03	Constante para a curva de excreção	adim
0.0	Constante para a curva de mortalidade	adim
0.0	Taxa de mortalidade mínima	d <sup>-1</sup>
0.04	Taxa de mortalidade máxima	d <sup>-1</sup>
<b>Azoto</b>		
0.1	Taxa de nitrificação de referência	d <sup>-1</sup>
2	Constante de semi-saturação da nitrificação	mgO <sub>2</sub> /l
0.06	Taxa de referência da mineralização de DONnr	d <sup>-1</sup>
1.02	Coefficiente de temperatura da nitrificação	adim
0.1	Coefficiente de temperatura associado à mineralização de DONnr	d <sup>-1</sup>
0.1	Constante de semi-saturação da desnitrificação	mgO <sub>2</sub> /l
<b>Oxigénio</b>		
2.67	Rácio O/C do CO <sub>2</sub>	mgO <sub>2</sub> /mgC
2.67	Rácio O/C da fotossíntese	mgO <sub>2</sub> /mgC
3.43	Rácio O/C do nitrato	mgO <sub>2</sub> /mgC
2.06	Rácio O/C do fosfato	mgO <sub>2</sub> /mgC
2.67	Rácio O/C na respiração do fitoplâncton	mgO <sub>2</sub> /mgC
2.67	Rácio O/C na respiração do mesozooplâncton	mgO <sub>2</sub> /mgC
2.67	Rácio O/C na respiração do microzooplâncton	mgO <sub>2</sub> /mgC
1.4	Rácio O/C na respiração do azoto orgânico	mgN/mgC
0.18	Rácio O/C na respiração do fósforo orgânico	mgN/mgC
10	Concentração mínima de O <sub>2</sub> para crescimento	mgO <sub>2</sub> /l

#### 4.5. Condições iniciais e de fronteira

A resolução das derivadas parciais em que se baseia o modelo requer condições iniciais e de fronteira nas interfaces com terra, com o oceano e com a atmosfera. Na fronteira com terra o modelo impõe normalmente fluxos nulos, excepto no fundo onde impõe um fluxo difusivo de quantidade de movimento (tensão de corte no fundo).

A fronteira aberta é a mais complexa. Nesta fronteira o modelo tem que conhecer os valores das propriedades que entram no domínio, que nem sempre são bem conhecidas. A melhor forma de impor esta condição varia de caso para caso. Na superfície livre é necessário impor os fluxos das propriedades calculadas pelo modelo. Esta imposição é mais fácil quando estão disponíveis resultados de um modelo meteorológico. A melhor forma de o fazer depende também de caso para caso. As descargas pontuais (i.e. com dimensão inferior ao passo espacial do modelo) são impostas como descargas pontuais.

As condições iniciais em sistemas abertos são esquecidas ao longo do tempo, passando estes a depender exclusivamente dos fluxos através das fronteiras e dos processos internos. Quanto mais realistas forem as condições iniciais mais rapidamente a solução se aproxima da realidade. Assim, a melhor solução inicial depende da informação disponível. (Leitão, 2003)

No caso de o modelo ser encaixado num modelo para uma região mais extensa, a melhor forma de as impor é por interpolação da solução do “modelo pai”. No caso de uma solução deste tipo não estar disponível é necessário fazer uma aproximação.

A aproximação mais grosseira mas simples é admitir um valor uniforme.

#### 4.6. Condições Iniciais impostas no modelo

O modelo ecológico foi inicializado utilizando valores climatológicos e simulando um período de aquecimento de 1 ano que é superior ao tempo de residência da água no interior do sistema, o tempo mínimo requerido para que o sistema tenha esquecido as condições iniciais no período que se pretende simular.

#### 4.7. Condições de Fronteira imposta no modelo

O esgoto doméstico é a principal fonte de nutrientes de origem antropogénica para a Baía Lobito. As indústrias localizadas na orla da Baía são também fontes de contaminação, mas do tipo industrial e juntamente com o porto estão na origem de descargas de óleos e de metais lixos e de dejetos sólidos. Estas actividades são ainda

responsáveis por aterros de grandes dimensões, que têm necessariamente implicações em termos de circulação hidrodinâmica. Estas questões estão fora do âmbito desta tese e por isso não foram consideradas. A sua análise numa fase posterior é, no entanto, facilitada pelo trabalho desenvolvido nesta tese.

As águas residuais urbanas chegam à Baía através de duas descargas principais: Sonamet e Quileva Figura 31 que foram construídas com o objectivo fazer as descargas provenientes das zonas altas e baixa do município da cidade do Lobito respectivamente e fazem parte de um sistema de saneamento que recolhe os efluentes das fossas e das chuvas, reduzindo assim os níveis de poluição e impacto ambiental da qual depende a economia e população

A descarga da Sonamet recebe as águas residuais da zona baixa da cidade e a do Quileva descarrega as águas residuais da zona alta. A Tabela 5 apresenta caudais e concentrações mensais de Amónia, Nitrato, Azoto Orgânico Dissolvido Refractário, Azoto Particulado, Fósforo Orgânico Dissolvido Refractário e Fósforo Particulado para a vala Quileva. A descarga apresenta concentrações elevadas de Azoto Orgânico e de Amónia, consequência da presença de esgoto. Os valores de Oxigénio Dissolvido apresentados são elevados, embora. O facto de serem constantes ao longo de todo o ano retira-lhe, no entanto, credibilidade.

Com base nos valores apresentados, a carga estimada de nutrientes para o ano de 2014, para a vala da Quileva foi de 199 ton de azoto total e 30.8 ton/ano de fósforo total, sendo que a forma principal de azoto descarregada é a amónia e para o fósforo, o fósforo orgânico dissolvido. A carga da Sonamet é mal conhecida. Por a zona drenada ser semelhante foi admitido que a carga seria idêntica à da Quileva. Nestas condições, a carga total anual descarregada no interior da baía é aproximadamente 300 ton/ano de azoto e 62 ton/ano de fósforo. A variabilidade mensal está associada à variabilidade da chuva, pois as descargas recebem também águas pluviais.

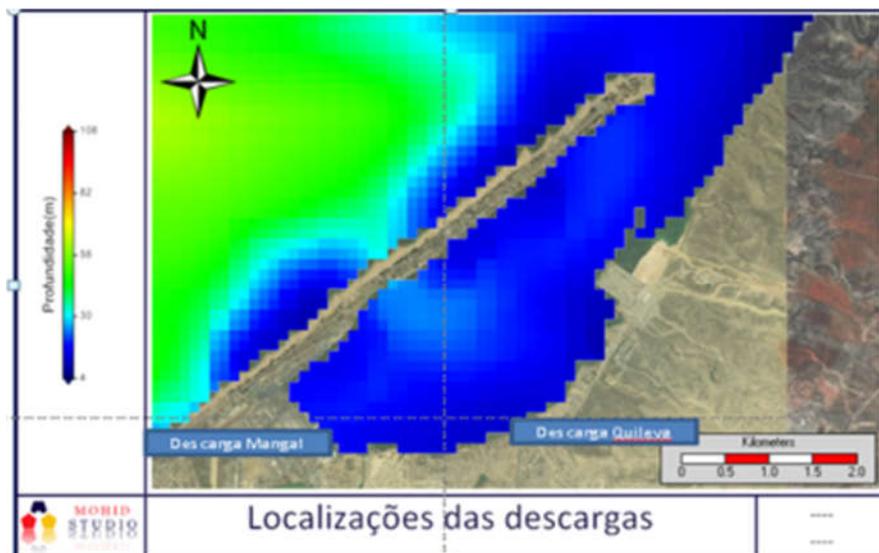


Figura 31-Localização das duas descargas na baía do Lobito Managal (Sonamet) e Quileva

Tabela 5- Caudais e concentrações das descargas das valas Quileva

Meses 2014	Volume m <sup>3</sup>	NO <sub>3</sub> mg/l	NO <sub>2</sub> mgN/l	O <sub>2</sub> mgO <sub>2</sub>	NH <sub>4</sub> mgN/l	DONr mgN/l	DOPr mgN/l	DONnr mgN/l	DOPnr mgN/l	PON mgP/l	POP mgP/l
1	4536000	1.14	0.01	6	17.3	0.69	0.35	1.61	0.89	2.3	0.53
2	3758400	0.64	0.01	6	9.8	0.39	0.25	0.91	0.62	1.3	0.37
3	4406400	0.69	0.01	6	10.5	0.42	0.1	0.98	0.26	1.4	0.15
4	3888000	0.41	0	6	6.2	0.25	0.36	0.58	0.9	0.83	0.54
5	4276800	0.54	0.01	6	8.3	0.33	0.14	0.77	0.36	1.1	0.22
6	3628800	0.79	0.01	6	12	0.48	0.18	1.12	0.45	1.6	0.27
7	2592000	0.48	0	6	7.2	0.29	0.38	0.67	0.95	0.96	0.57
8	2851200	0.45	0	6	6.8	0.27	0.16	0.64	0.41	0.91	0.24
9	2851200	0.37	0	6	5.6	0.23	0.35	0.53	0.87	0.75	0.52
10	3369600	0.27	0	6	4.1	0.17	0.08	0.39	0.2	0.55	0.12
11	4406400	0.21	0	6	3.2	0.13	0.15	0.3	0.38	0.43	0.23
12	3240000	0.35	0	6	5.3	0.21	0.18	0.5	0.45	0.71	0.27

Tabela 6- Valores médios de caudal e de concentração para o nitrato e a amónia na Baía do Lobito

		Ano	2014
		Caudal Médio (m <sup>3</sup> /s)	0.341
Concentração Média de Nitrato (NO <sub>3</sub> µg-N/l)		Ponto Quileva I,K,J Amostragem	7.8
Concentração Média de Amónia (NH <sub>4</sub> µg-N/l)		Ponto Quileva I,K,J Amostragem	96.3

Tabela7 -concentrações das cargas dos nutrientes

Mês	NO <sub>3</sub> (ton)	NO <sub>2</sub> (ton)	O <sub>2</sub> (ton)	NH <sub>4</sub> (ton)	DON (ton)	DOPr (ton)	DONnr (ton)	DOPnr (ton)	PON (ton)	POP (ton)
1	0.025	0.0002	0.272	0.156	0.0311	0.036	0.02	0.019	0.0521	0.0117
2	0.012	0.0001	0.2255	0.007	0.0071	0.017	0.012	0.011	0.00563	0.0338
3	0.015	0.0002	0.2643	0.231	0.0092	0.022	0.006	0.0057	0.03084	0.0030
4	0.008	0	0.233	0.120	0.0046	0.011	0.0175	0.0174	0.01632	0.0104
5	0.011	0.0002	0.2566	0.177	0.0070	0.016	0.0076	0.00769	0.0213	0.0047
6	0.014	0.0002	0.2177	0.217	0.0174	0.02	0.0163	0.01632	0.01088	0.002
7	0.006	0	0.1555	0.093	0.0075	0.009	0.0108	0.01088	0.01244	0.0036
8	0.007	0	0.1710	0.096	0.0031	0.009	0.00598	0.00598	0.01283	0.0034
9	0.005	0	0.1710	0.079	0.0031	0.007	0.01226	0.01226	0.01026	0.0074
10	0.007	0	0.2021	0.069	0.0057	0.006	0.00336	0.00336	0.00909	0.0020
11	0.005	0	0.2643	0.0705	0.0057	0.007	0.00837	0.00837	0.00925	0.0050
12	0.005	0	0.1944	0.085	0.0034	0.008	0.0071	0.0071	0.01134	0.0042

#### 4.8. Qualidade da água na Baía do Lobito

Por forma a permitir a caracterização geral do estuário da Baía do Lobito em termos de qualidade da água, há que ter em conta as suas principais fontes de poluição, assim como a distribuição de alguns parâmetros físico-químicos relevantes para a qualidade da água, tais como: a salinidade, parâmetro de referência fundamental em estudos de estuários o oxigénio dissolvido, dada a sua importância para os organismos vivos; de determinados nutrientes, tais como o azoto e o fósforo, visto compostos destes nutrientes terem interesse, não só como factores condicionantes da produtividade primária, mas também como indicadores de desequilíbrios na qualidade da água.

#### 4.9. Salinidade

Uma característica importante e comum aos estuários é a sua baixa diversidade de organismos e a sua elevada produtividade. Isto não é surpreendente, uma vez que as espécies que os habitam têm que se adaptar a constantes alterações no seu habitat, em especial à salinidade e às correntes, de acordo com o ritmo diário das marés (Carapeto, 1999).

As variações de salinidade dos sistemas estuarinos estão associadas às entradas de águas oceânicas e as descargas fluvias (Aminot et Chaussepied, 1983). A salinidade constitui um parâmetro fundamental no estudo dos estuários (Portela et Neves, 1993) pela sua influência em processos físicos (com interferência no transporte de sedimentos

e na produção primária), em processos químicos (afectando a flocculação de partículas em suspensão e contribuindo para uma maior sedimentação) e em processos biológicos (afectando a distribuição das espécies).

Definida com base na determinação da condutividade eléctrica, a salinidade é um factor indicador dos sais inorgânicos em solução (e.g., iões cloreto, sódio, sulfato, magnésio, cálcio e potássio) por unidade de massa de água do mar (Portela, 1996).

#### 4.10. Temperatura

A temperatura é uma medida da energia cinética média das moléculas de um corpo (Nybakken, 1993).

É considerada um parâmetro essencial para a qualidade da água, por regular um grande número de processos químicos (responsável pela solubilidade de sais e gases nas águas) e biológicos (Bowie et al., 1985 in Portela, 1996). Por exemplo, o fitoplâncton é capaz de desenvolver a sua actividade metabólica numa larga gama de temperatura (de 0°C a 30°C), no entanto a sua taxa de crescimento máxima ocorre para valores de temperatura próximos de 20°C (Boney, 1975 in Saraiva, 2001).

De uma forma geral, a temperatura das águas superficiais é fortemente influenciada pela temperatura do ar cuja variação é responsável pelas trocas de calor verificadas na interface ar-água.

Embora a variabilidade espacial da temperatura seja elevada nos ecossistemas estuarinos, a temperatura tem um papel menos importante em termos de dinâmica, dado que nestes sistemas, os gradientes de densidade resultam fundamentalmente da salinidade (Pickard & Emery, 1990 in Portela, 1996).

#### 4.11. Nutrientes e Oxigénio

A concentração de nutrientes dissolvidos no estuário é um factor determinante para a sua produtividade primária. Os fosfatos, e as diversas formas de azoto inorgânico em solução, nomeadamente nitratos, nitritos e azoto amoniacal, bem como os silicatos, têm sido, pela sua importância, dos compostos mais frequentemente estudados (Neves *et al.*, 1991).

Estabelecer (qual) o factor limitante para o crescimento do fitoplâncton não é fácil. Para águas estuarinas e marinhas, os macronutrientes que mais provavelmente serão limitantes (assumindo que não ocorre limitação pela luz) são P, N e Si. O nutriente que mais provavelmente será limitante poderá ser estimado a partir da proporção em que

estes nutrientes existem no tecido algal (razão de Redfield) com a proporção relativa com que se encontram no ambiente estuarino exterior. Em águas costeiras e estuarinas durante o pico de produção fitoplanctónica, a proporção entre N e P nas suas formas inorgânicas dissolvidas tende a ser inferior à razão 16:1 observada na constituição celular das células do fitoplâncton (Day *et al*, 1989) tornando o Azoto o nutriente normalmente limitante do crescimento Fitoplâncton marinho e estuarino, enquanto em águas interiores o Fitoplâncton é normalmente limitado pelo fósforo (Valiela,1995; Heip *et al*, 1995; Day *et al*, 1989; Wollast, 1996; Codispoti, 1997; Falkowski, 1997; Nybakken, 1993). Como consequência do consumo, a razão N:P deve variar, sendo mínima após os picos de crescimento (no verão) e máxima nas zonas mais próximas das fontes de nutrientes (e.g. na entrada dos estuários).

A Figura 32 e a Figura 33 mostram dois perfis verticais de nutrientes e de oxigénio dissolvido para o oceano profundo produzidos com dados do NODC. As figuras apresentam valores entre a superfície e 4500 metros e mostram que na zona fótica (primeiros 100 metros) as concentrações de nutrientes são muito baixas e que o Oxigénio Dissolvido aumenta a partir da superfície. Abaixo da zona fótica o Azoto e o Fósforo começam a aumentar atingindo o valor máximo a cerca de 800 metros de profundidade. O Oxigénio Dissolvido aumenta entre a superfície livre e a base da zona fótica devido à produção primária e diminui entre este ponto e os 800 metros devido ao consumo da matéria orgânica produzida à superfície. Abaixo dos 800 metros o Azoto e o Fósforo permanecem constantes, enquanto a Sílica continua a aumentar. Este processo é frequentemente designado por “bomba Biológica” e mostra que os nutrientes provenientes de terra são acumulados nas camadas mais profundas do oceano através da combinação de processos biológicos e físicos subjacentes à “Bomba Biológica”. Nas zonas polares e nas zonas de upwelling estes nutrientes são transportados para a superfície, sendo responsáveis por elevadas produtividades biológicas, em contraste com a generalidade do oceano aberto, onde a produtividade é limitada pelos nutrientes.

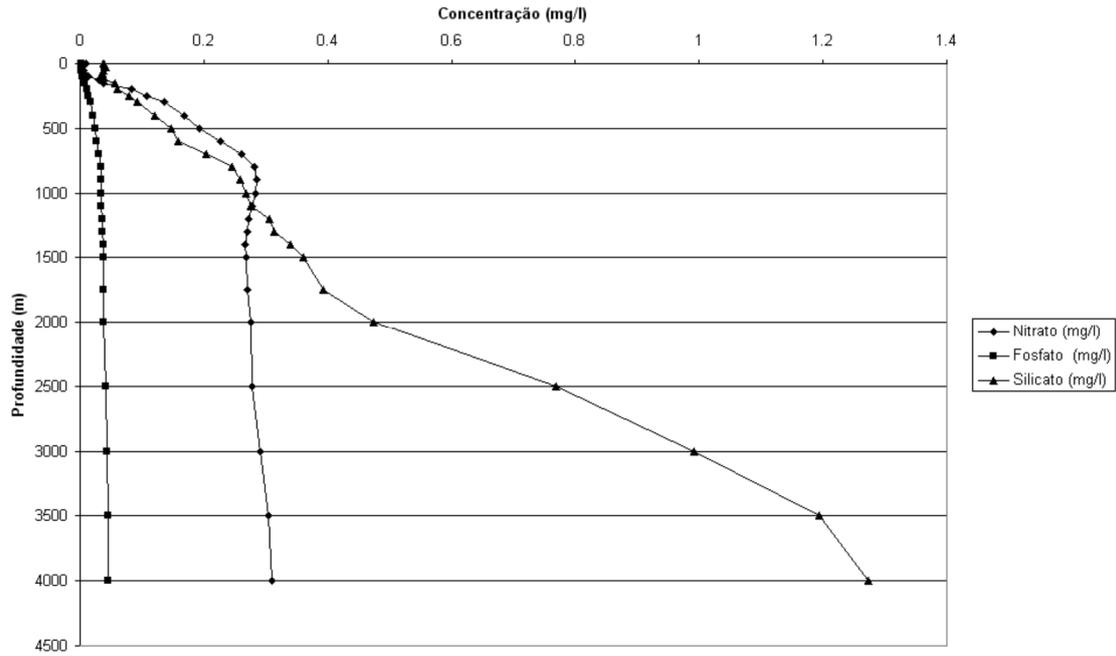


Figura 32-Perfil de nutrientes no oceano. Fonte: (NODC)

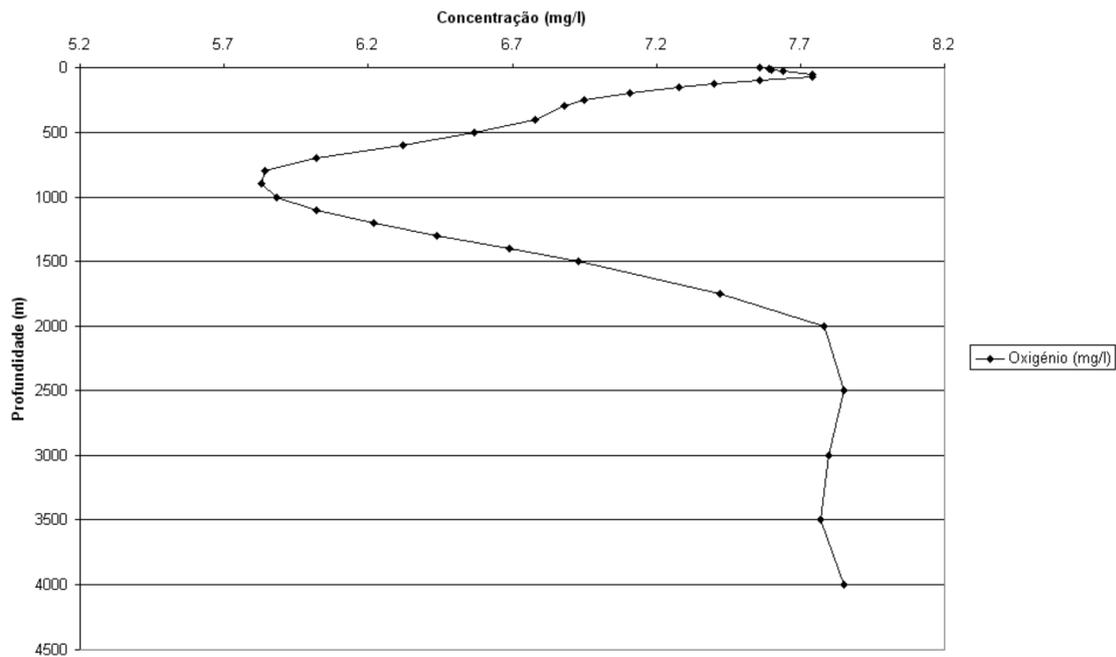


Figura 33Perfil de oxigênio no oceano. Fonte: (NODC)

#### 4.12. Caudal fluvial

O caudal fluvial é o factor determinante do funcionamento dos ecossistemas estuarinos, pelas cargas de nutrientes que transporta e porque altera o seu regime físico. O efeito global é normalmente de aumento da actividade biológica, embora os processos incluam alguns factores de stress, que nas zonas de maior gradiente reduzem a

biodiversidade como consequência da variabilidade da salinidade e por conseguinte da pressão osmótica que os organismos têm que suportar. O aumento da turbidez devido às descargas de sedimentos e consequente redução da disponibilidade de luz é um factor limitador muito importante da produtividade dos estuários. A estratificação de densidade é um factor incrementador da produtividade quando a concentração de nutrientes à superfície é elevada (que é normalmente o caso quando é produzida pela descarga de água doce, rica em nutrientes). No caso da Baía do Lobito o caudal fluvial é mínimo e por isso não é causador de stress osmótico, mas a concentração de nutrientes é elevada, o que associado à estratificação térmica cria condições óptimas para o desenvolvimento do Fitoplâncton. Neste ecossistema é o tempo de residência que –por ser normalmente baixo- reduz o impacto das descargas na qualidade da água.

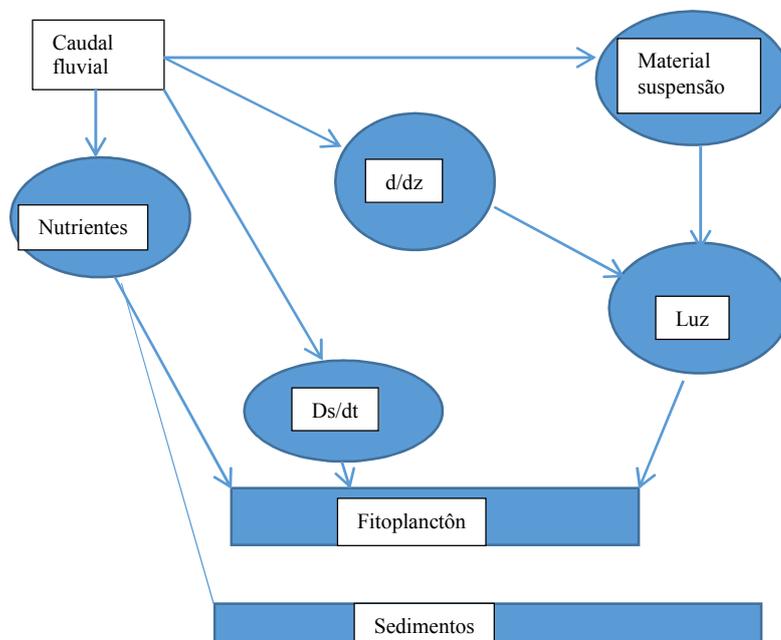


Figura 34 -Representação esquemática do efeito modelador do caudal fluvial num estuário.

#### 4.13. Cenários Simulados

Depois da compreensão da hidrodinâmica da Baía, o segundo objectivo desta tese era estudar o impacte das descargas de águas residuais urbanas na Baía. Para isso foram simulados dois cenários, respectivamente com e sem descargas e foram comparados os resultados. O modelo permite ainda comparar outros cenários de descarga, com o

objectivo de analisar o impacto da alteração das políticas de descarga, mas também de analisar as incertezas para os resultados, dos valores descarregados actualmente.

A análise dos resultados recorre a mapas e a séries temporais em pontos específicos e focaliza-se nas variáveis biogeoquímicas, com especial ênfase para o nitrato por o azoto ser o principal nutriente limitante na área de estudo e para o fitoplâncton por ser o indicador da qualidade da água. Estas variáveis são analisadas à luz dos resultados da hidrodinâmica descrita nos capítulos anteriores.

É também analisada a influência das descargas de água doce na hidrodinâmica, por ser factor que altera a estratificação através da modificação da salinidade. Globalmente é de esperar que as descargas de água doce não alterem significativamente a hidrodinâmica da Baía, porque os caudais são muito baixos e por isso as alterações de salinidade esperadas são também baixas. As descargas da Quileva e Sonamet reduzem a densidade da camada superficial promovendo um aumento do nível da superfície livre no fundo da Baía, o qual gera um forçamento extra nas correntes para norte à superfície. Esse escoamento remove água da superfície e baixa a pressão junto ao fundo e consequentemente, junto ao fundo, as correntes para sul também tendem a ser intensificadas. Figura 47 mostra comparações de salinidades superficiais com e sem descarga. A figura mostra alterações da ordem de 0.5 psu, demasiado baixas para alterarem significativamente o campo de velocidades, representado na Figura 35. Nessa figura, mostra que o padrão de escoamento não se altera, embora as velocidades superficiais sejam um pouco superiores, como era esperado. Também se pode verificar que as descargas não afectam a zona costeira adjacente, uma vez que as velocidades perto da fronteira Oeste são idênticas com e sem descarga.

Na Figura 36 mostra-se a distribuição superficial de velocidade e um corte vertical (norte - sul) no interior da baía do Lobito no período de simulação do dia 2 de Dezembro 2014 com um registo de maré alta com vento norte. A figura mostra que o vento de norte induz um escoamento transversal, com sentido oeste-este, por estarmos no hemisfério sul. O corte vertical mostra que a recirculação ocupa toda a coluna de água. Este escoamento dificulta a renovação da água da Baía e por isso é de esperar que nestas condições a concentração de Fitoplâncton tenda a aumentar no interior da baía.

O mês de Dezembro faz parte de um período onde se conjugam três factores que tendem a aumentar o crescimento Fitoplâncton: (1) aumento do tempo de residência como consequência da maior probabilidade de ocorrência de vento norte, (1) maior duração do período fotossintético (solstício) e (3) final de primavera e por isso um

período em que ainda há alguma abundância de nutrientes. No caso da Baía os dois primeiros efeitos são os mais importantes e são o que mais distingue o interior do exterior da Baía.

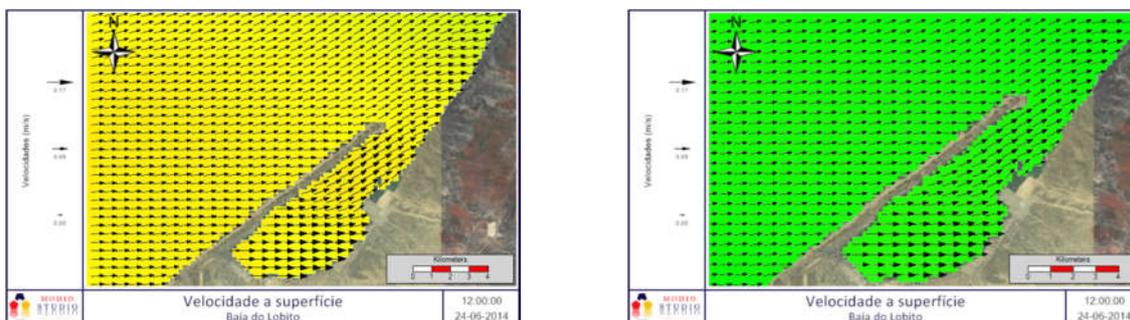


Figura 35- Mapa de velocidades com a descarga na baía do Lobito (esquerda) e sem descargas (direita), a 24 de Junho de 2014 as 12horas. As figuras são semelhantes.

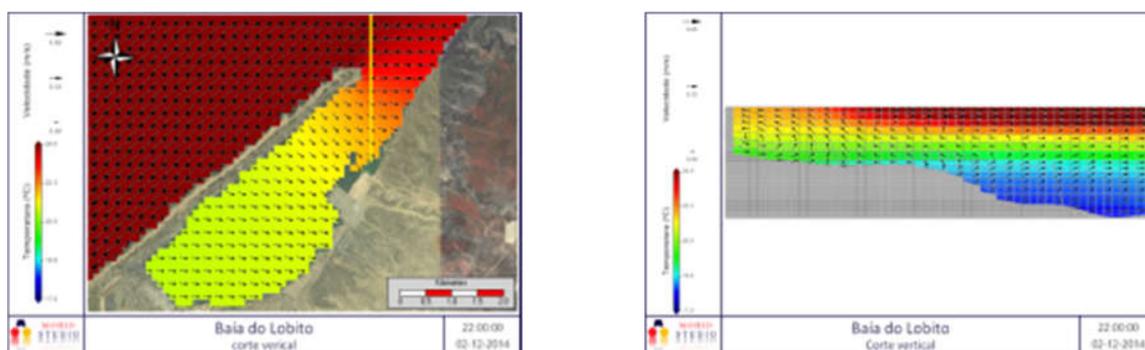


Figura 36- Perfil vertical da velocidade no interior da baía do Lobito com vento Norte às 22hora no dia 2 de Dezembro 2014 com maré alta. O escoamento está bloqueado no interior da baía e há recirculação vertical.

#### 4.14. Resultados do modelo da qualidade da água

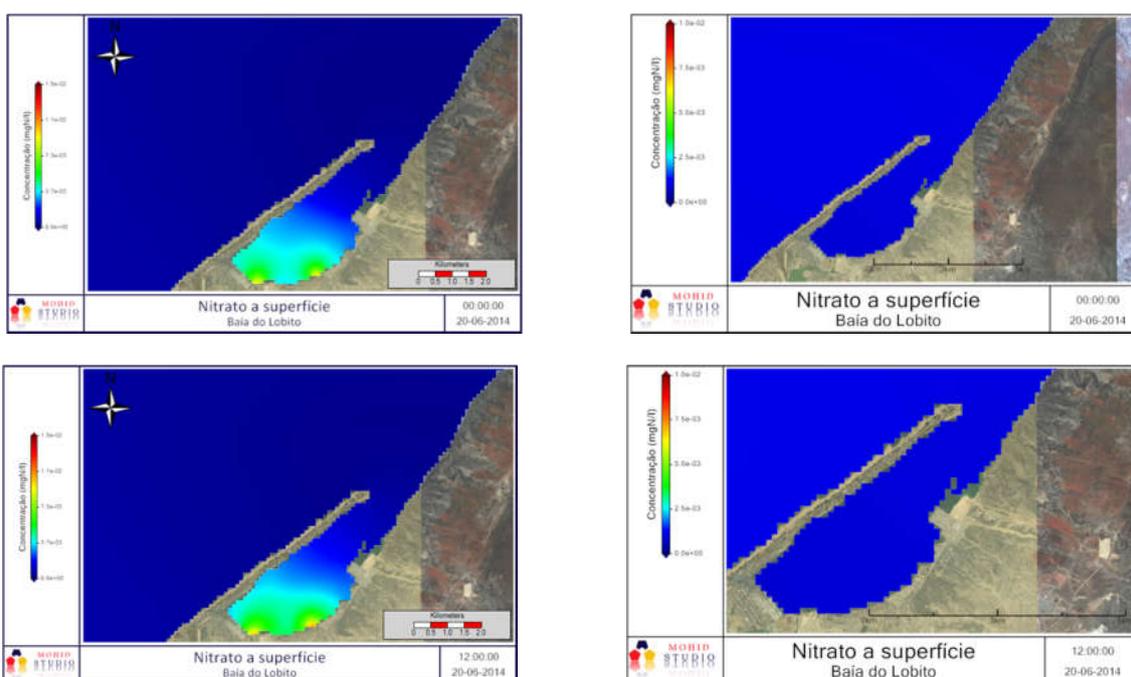
São apresentados resultados na forma de distribuição espacial e na forma de séries temporais, sempre comparando os dois cenários: sem e com descargas. São apresentados resultados para o Fitoplâncton e para o nitrato, que é o nutriente limitante na baía. São apresentados mapas com distribuições à superfície e com cortes verticais para ilustrar a variação na coluna de água. As distribuições espaciais são sempre do mesmo tipo ao longo de todo o ano, com concentrações de fitoplâncton mais elevadas dentro da Baía em ambos os cenários - com e sem descargas. O mês de Junho foi escolhido para ilustrar os resultados. As séries temporais são apresentadas para um ano e mostram que a concentração máxima de fitoplâncton é atingida no período Outubro – Dezembro, i.e. durante a primavera austral.

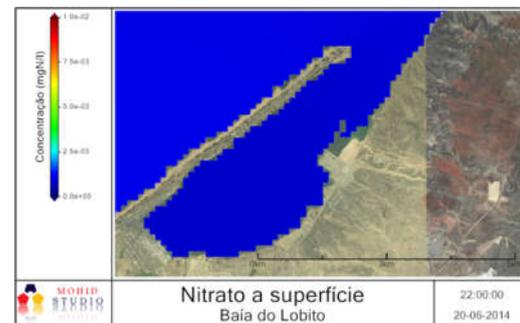
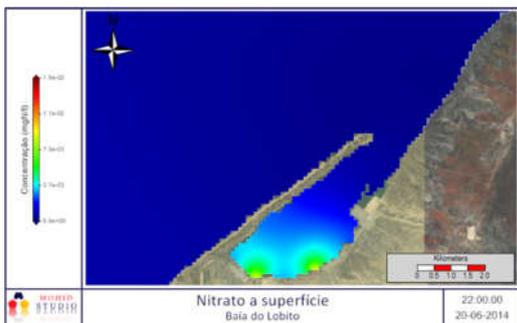
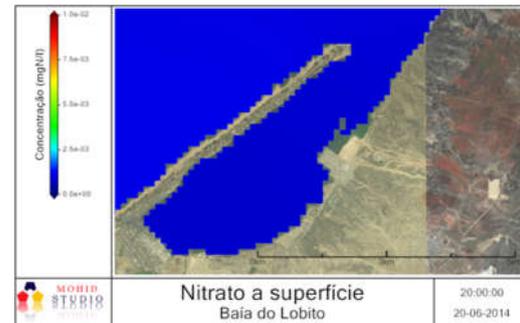
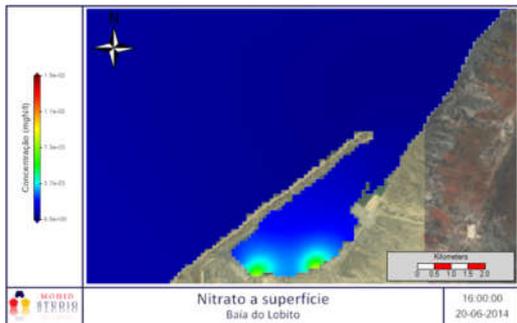
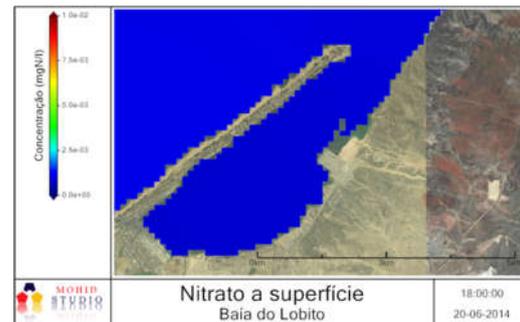
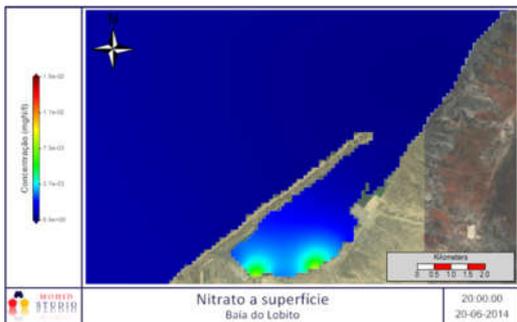
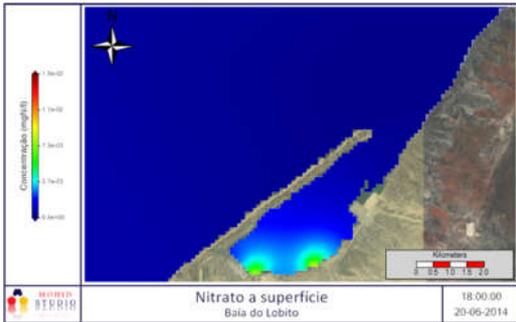
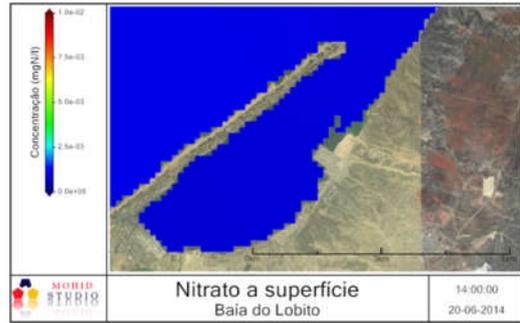
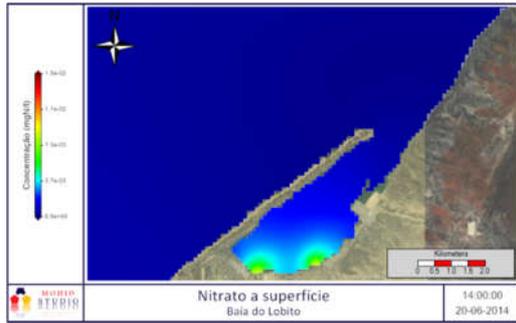
#### 4.15. Nitrato

As figuras abaixo mostram distribuições espaciais no dia 20 de Junho de 2014, em várias situações de maré. As distribuições mostram concentrações máximas no interior da Baía, à superfície. Na região próxima da embocadura é bem visível o perfil vertical de concentração, com concentrações à superfície típicas do interior da Baía e no fundo típicas do exterior. Na zona interior da Baía o gradiente vertical é menos nítido, devido à mistura vertical associada ao atrito entre as duas camadas de água (superficial e do fundo).

As séries temporais mostram concentrações de Nitrato máximas no inverno e de fitoplâncton máximas no final da primavera. O que estes resultados sugerem é que, ao longo do tempo, e à medida que a intensidade solar aumenta, o fitoplâncton começa a consumir cada vez mais nitrato, sendo que em meados de Outubro, a concentração de nitrato Figura 37 chega a um mínimo.

Nas figuras apresentadas abaixo é possível observar o efeito das descargas das valas Sonamet e Quileva, em que os nutrientes são transportados à superfície, em direcção a Norte, de acordo com o vento e as correntes dominantes (neste caso o vento dominante é de Sul). É ainda interessante ver o ciclo diário do Nitrato, com as concentrações a aumentarem durante a noite, por ausência de consumo (o caudal da descarga é assumido constante ao longo das 24 horas do dia) e a diminuir durante o dia.





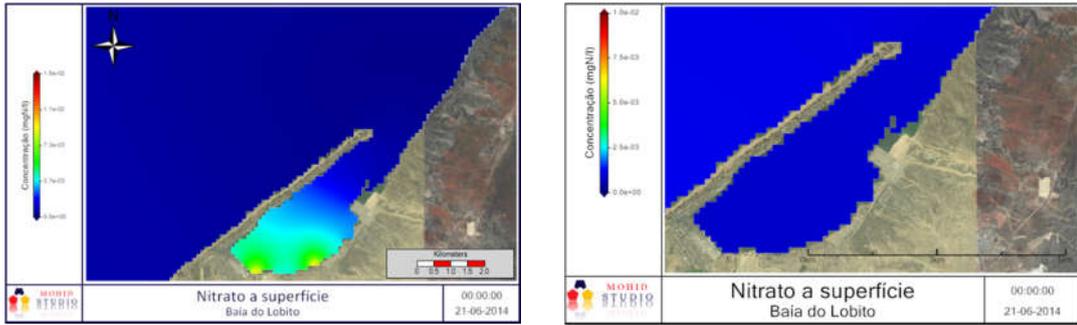


Figura 37- Evolução da concentração de nitrato ao longo de uma simulação de 12 horas no dia 20 de Junho de 2014 num ponto de estações de amostragem (mgN/l), e comparação com descargas a esquerda e sem descargas a direita

As Figura 38,38, 39 e 40 mostram perfis verticais, ao longo das linhas representadas nos mapas. Quando o corte é feito ao longo da linha horizontal, a orientação do perfil é facilmente compreendida olhando para a posição da restinga. No caso dos cortes ao longo de linhas verticais (norte-sul) a orientação é fácil de perceber olhando para a posição da fronteira aberta e da terra, no perfil.

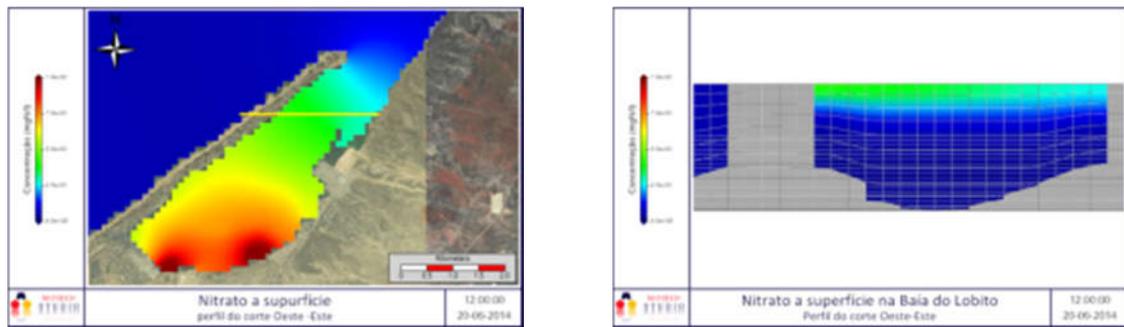


Figura 38-Perfil e da concentração do nitrato às 12 horas no dia 20 de Junho de 2014 ao longo da linha amarela representada no mapa.

O perfil mostra a forte estratificação de nitrato com valores máximos à superfície, por ser proveniente das descargas.

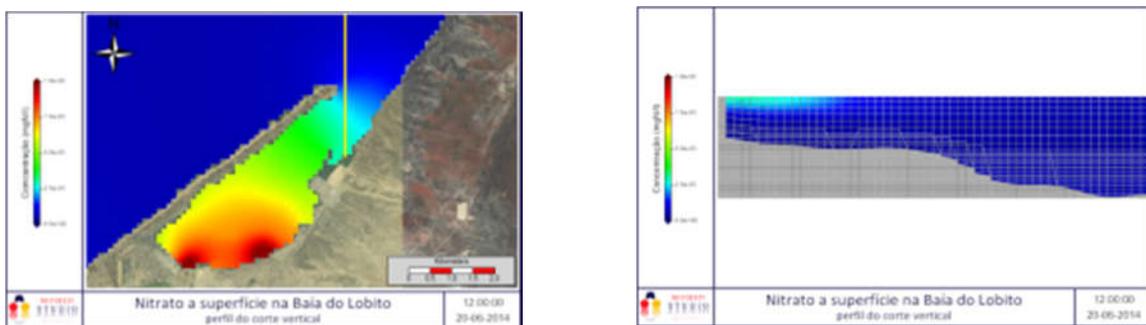


Figura 39-Perfil de concentração do nitrato às 12 horas no dia 20 de Junho de 2014, COM descarga, ao longo da linha amarela representada no mapa.

O perfil mostra a forte estratificação de nitrato com valores máximos à superfície, por ser proveniente das descargas. No exterior da Baía a concentração decai rapidamente por consumo e diluição.

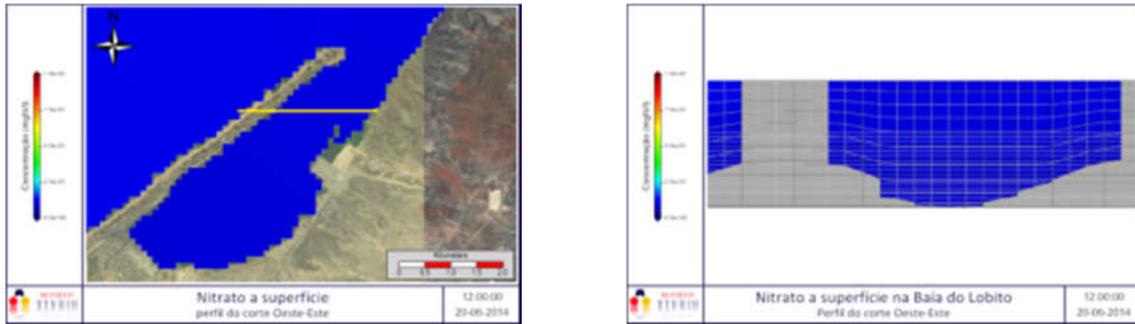


Figura 40 Perfil de concentração do nitrato às 12 horas no dia 20 de Junho de 2014 ao longo da linha amarela representada no mapa, numa situação SEM descarga.

O perfil mostra que a concentração é mínima em toda a coluna de água, por a luz chegar até ao fundo e por isso haver consumo em toda a coluna de água.

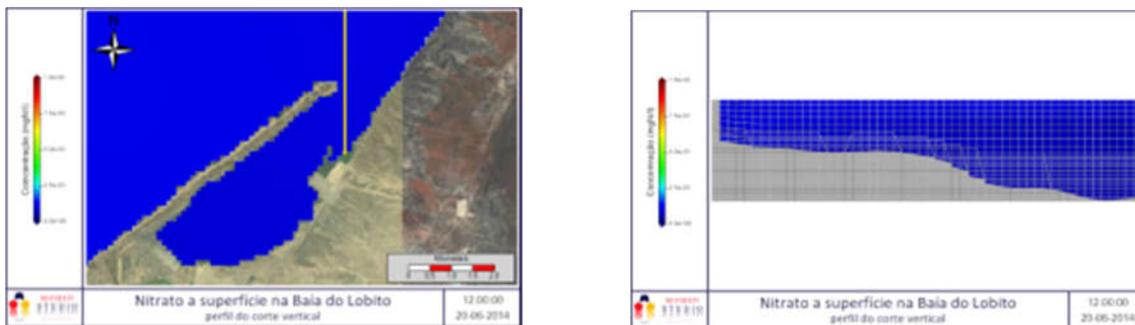
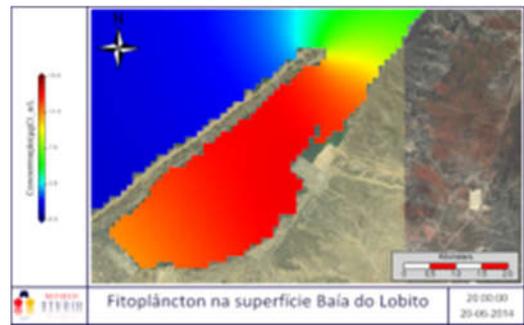
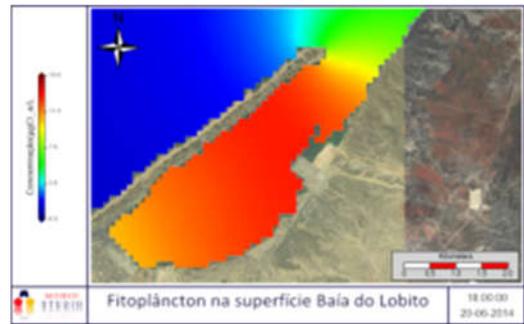
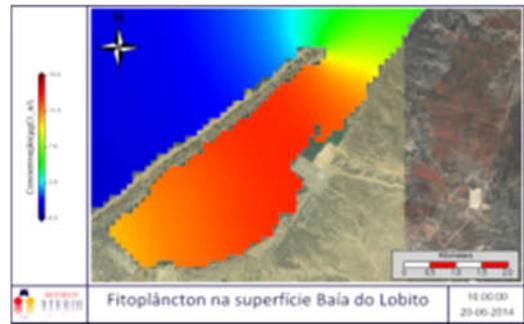
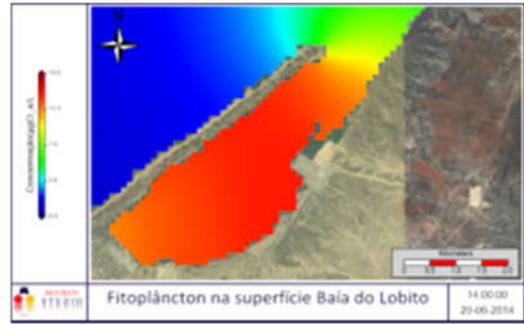
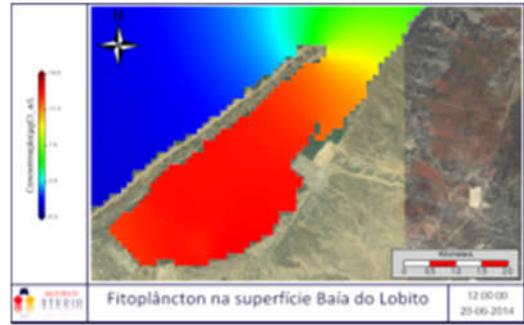


Figura 41- Perfil e da concentração do nitrato às 12 horas no dia 20 de Junho de 2014 ao longo da linha amarela representada no mapa, numa situação sem descarga.

O perfil mostra que a concentração é mínima em toda a coluna de água, por a luz chegar ao fundo e por isso haver consumo em toda a coluna de água.

As Figura 42 a mostram distribuições de Fitoplâncton nas mesmas condições das do Nitrato. Com descargas, as concentrações são mais elevadas do que sem descargas, mas sem descargas as concentrações no interior da Baía são mais elevadas do que no exterior, como consequência do *upwelling* devido ao vento, que traz nutrientes para a superfície, onde a intensidade luminosa é mais elevada. É também interessante registar a dispersão de Fitoplâncton do lado de fora da embocadura e o ciclo diário da produção de fitoplâncton, mesmo sem descargas. A concentração vai subindo ao longo do dia, para ser máxima pelas 20 horas. Fitoplâncton não é mais elevado na zona próxima da descarga, visto que o nitrato aí não ser limitante.



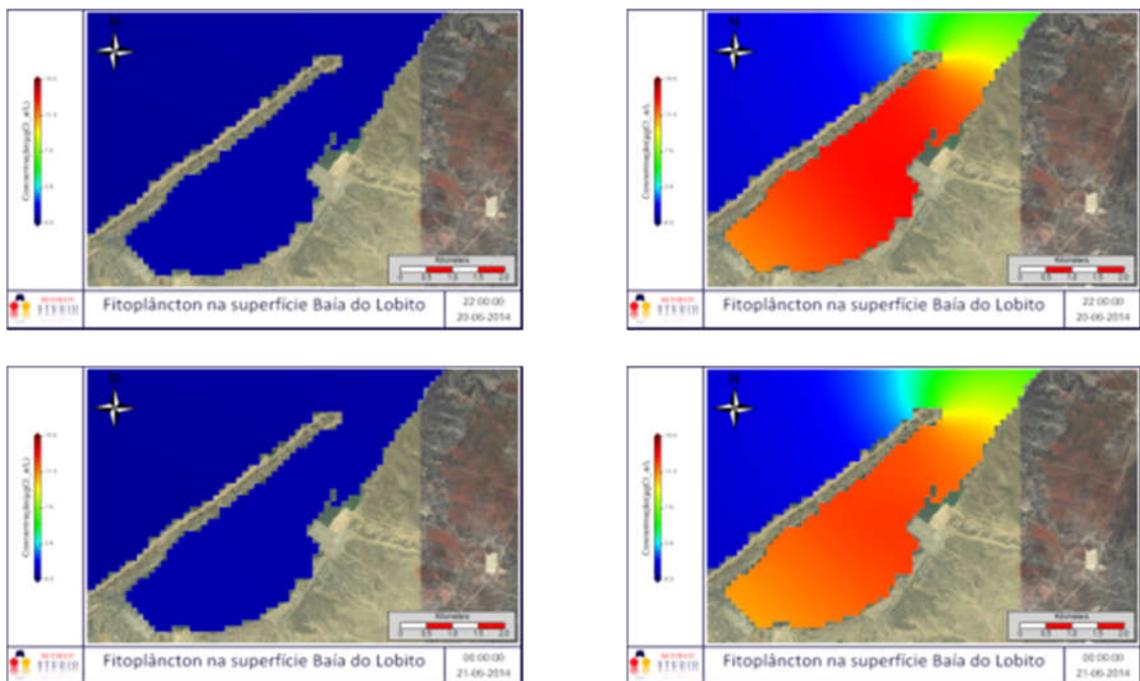


Figura 42-Evolução da concentração de fitoplâncton ( $\mu\text{gCl}_a/\text{L}$ ), ao longo de uma simulação de 12 horas no dia 20 de Junho de 2014 SEM descargas à esquerda e COM descargas à direita.

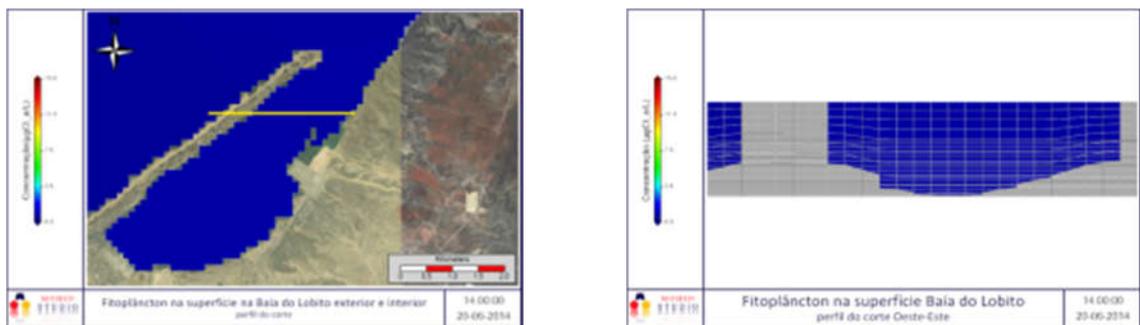


Figura 43-Perfil vertical de Fitoplâncton às 12 horas no dia 20 de Junho de 2014 SEM descargas.

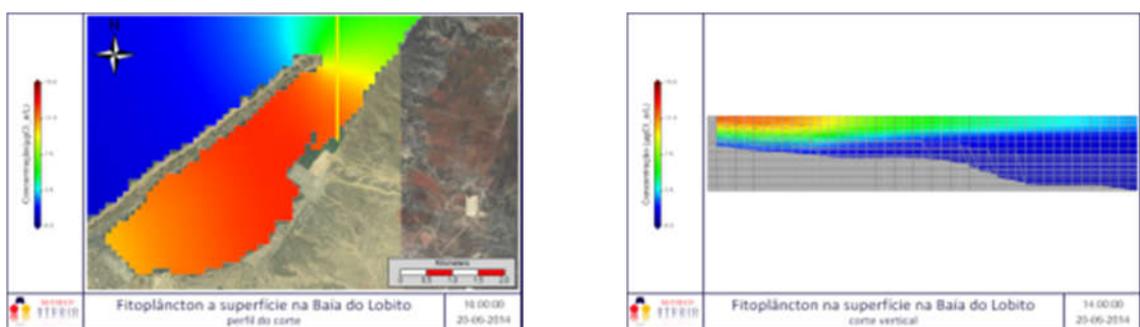


Figura 44-Perfil vertical de Fitoplâncton às 0 horas no dia 20 de Junho de 2014 COM descargas

A Figura 43 e Figura 44 mostram perfis verticais de Fitplâncton SEM e COM descarga residuais. A Figura 43 mostra concentrações mais inferiores às da Figura 44 como seria de esperar, mas o mais interessante é a diferença da localização da concentração máxima. Sem descargas a concentração é máxima perto do fundo por os

nutrientes serem provenientes das camadas mais profundas e por a luz conseguir atravessar a coluna de água. Na Figura 43 as concentrações são máximas junto à superfície porque a produção é alimentada maioritariamente por nutrientes provenientes das descargas urbanas, que são transportados à superfície por a salinidade das descargas ser baixa. É também interessante verificar que nesta figura as concentrações junto ao fundo são da mesma ordem das registadas sem descargas, embora um pouco superiores, como consequência da mistura vertical que vai ocorrendo ao longo do escoamento.

A Figura 44 mostra um gradiente de concentração à superfície elevado na zona da embocadura. A Figura correspondente para a distribuição de Nitratos mostra concentrações muito baixas em toda esta região, o que mostra que a produção é baixa nesta região e por isso o decaimento da concentração é devido à dispersão, mas também à mortalidade.

#### 4.16. Séries temporais

Nesta secção são apresentados os resultados obtidos pelo modelo para as séries temporais das células à superfície do domínio situadas nas fronteiras Norte e Oeste, e para a célula do domínio onde é feita as descargas da Quileva e Sonamet Figura 58. Não é apresentada a série temporal localizada na fronteira Sul visto que o resultado não mostra informação que já não seja mostrada nas restantes séries temporais. As séries temporais nos cenários com e sem as descargas, da Quileva e da Sonamet, são idênticas junto às fronteiras, o que mostra que a influência das descargas que já vimos ser grande no interior da Baía, não chega até às fronteiras do domínio, isto é, se confina à Baía e à zona próxima da embocadura. Longe da Baía, a produção primária é condicionada exclusivamente pelos nutrientes existentes no mar e pelos processos de mistura vertical que os trazem até à zona fótica.

As zonas balneares estão localizadas essencialmente do lado de fora da restinga e por conseguinte o impacte da produção primária na qualidade das águas balneares é mínimo. No interior da Baía também não é crítico porque os valores máximos da concentração de Fitoplâncton registados são da ordem de 2 ( $\mu\text{gCl}_a/\text{L}$ ), o que corresponde a concentrações da ordem de 20  $\mu\text{g}/\text{L}$  de Clorofila, que não é suficientemente elevada para comprometer a balneabilidade das águas. No que se refere à qualidade microbiológica da água também não foi detectado impacte destas duas

descargas por o tempo necessário para atingir as zonas balneares ser elevado e por isso permitir a ocorrência de mortalidade.

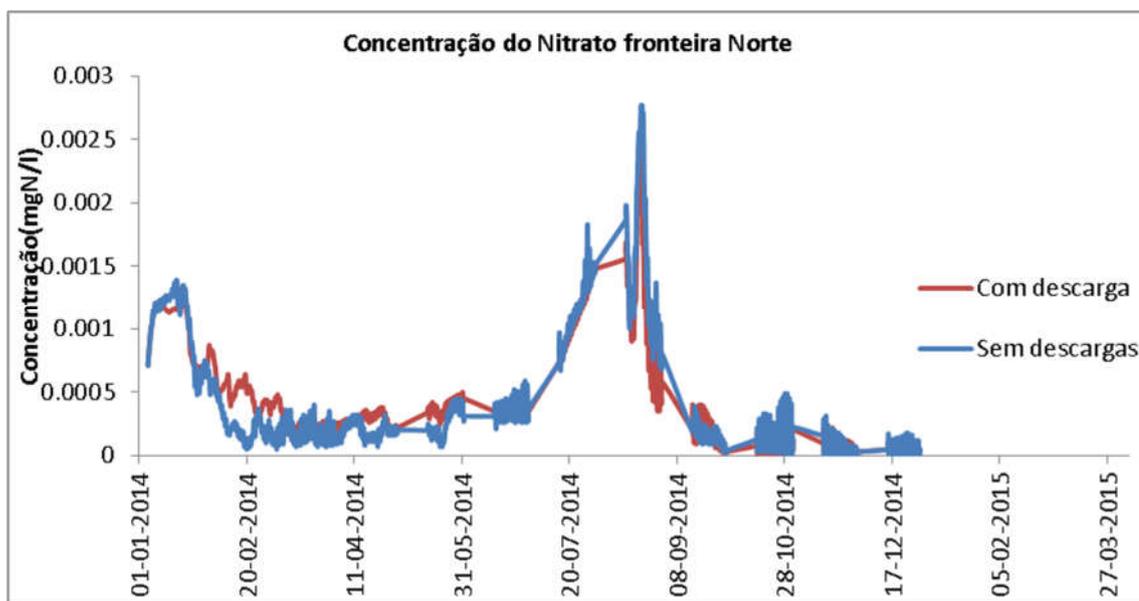


Figura 45-Comparação entre as séries temporais de concentração de Nitrato nos cenários com e sem descargas, obtidas para a célula na fronteira Norte.

Como se pode verificar na figura acima, a concentração de Nitrato na fronteira Norte com e sem descarga é muito semelhante, com valores sempre muito baixos. Mesmo nos meses de inverno, quando os valores são máximos, as concentrações continuam a ser muito baixas. Na fronteira Oeste Figura 60 a solução é idêntica, com valores também muito baixos. As figuras mostram por vezes situações em que com descargas a concentração de Nitrato é menor do que sem descargas. Isto é uma consequência da não-linearidade do sistema. Com descargas o Fitoplâncton pode crescer mais e como consequência vai consumir mais Nitrato fazendo com que o valor mínimo seja menor.

A Figura 47 Salinidade a superfície com e sem factor de descargas. Os dados obtidos ao longo do programa da implantação do modelo apresentam salinidades entre 35.5 a 36, valores característicos de águas marinhas, não se detectando a presença de fontes de água doce significativas

A Figura 48 apresenta mapas de velocidade com e sem as descargas da Quileva e da Somanet. Como se pode observar nestas figuras os campos de velocidades são praticamente idênticos, sendo apenas perceptíveis as pequenas alterações nas zonas das descargas.

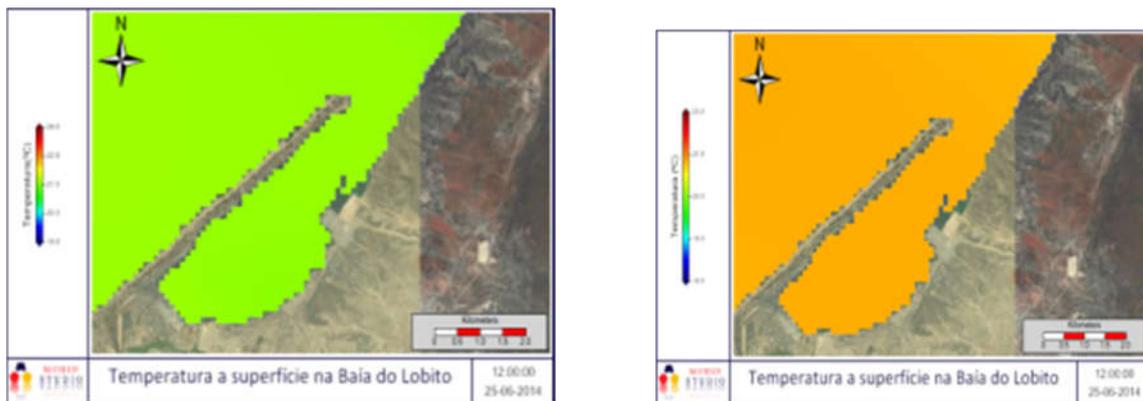


Figura 46-Mapa3D temperatura a superfície sem descarga (esquerda) prevista pelo modelo para as 12 horas do dia 25 de Junho de 2014, pondo em evidência o processo de upwelling no interior da Baía associado ao vento de oeste; a direita sem descargas a direita

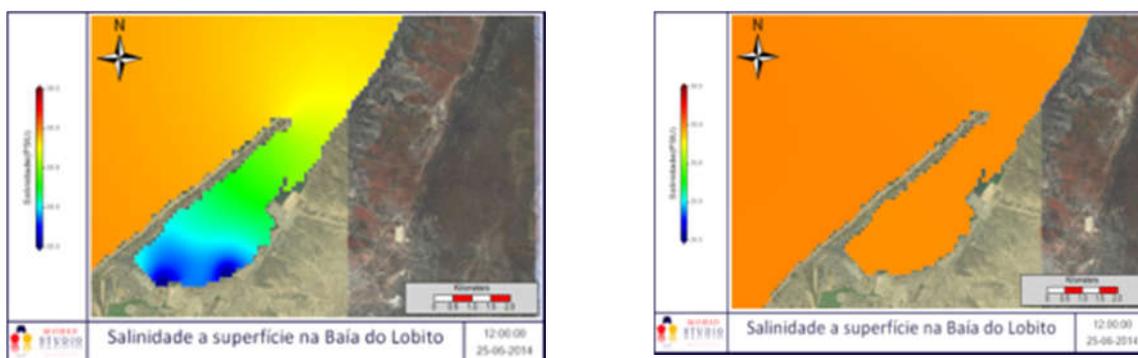


Figura 47- Mapa 3D Salinidade a superfície com descarga e (esquerda) sem descargas (directa), prevista pelo modelo para as 12 horas do dia 25 de Junho de 2014

A adição das descargas da Quileva e Sonamet implica um forçamento extra nas correntes para norte e abrandamento das correntes para o sul, pois a água descarregada tem uma salinidade menor e aumenta ligeiramente o gradiente que se verifica em geral para os pólos. Isto pode ser observado nas Figura 48 acima a pluma originada pela descarga no dia 25 de Junho de 2014.

Na Figura 48, são apresentados os mapas do módulo da velocidade resultante da adição das descargas da Quileva e da Sonamet, são comparação os resultados obtido no cenário sem descargas e com descargas.

Como se pode observar nestas figuras os fluxos para Norte são intensificados na presença das descargas da Sonamet e Quileva representando em alguns casos sem diferença do módulo de velocidade. No entanto também se pode verificar que as descargas não afectam principalmente a zona costeira adjacente, uma vez que as velocidades perto da fronteira Oeste são quase idênticas sem descarga.

Na Figura 49 refere-se o corte vertical no interior da baía do Lobito no período de simulação do dia 2 de Dezembro 2014 com um registo de maré alta com vento norte.

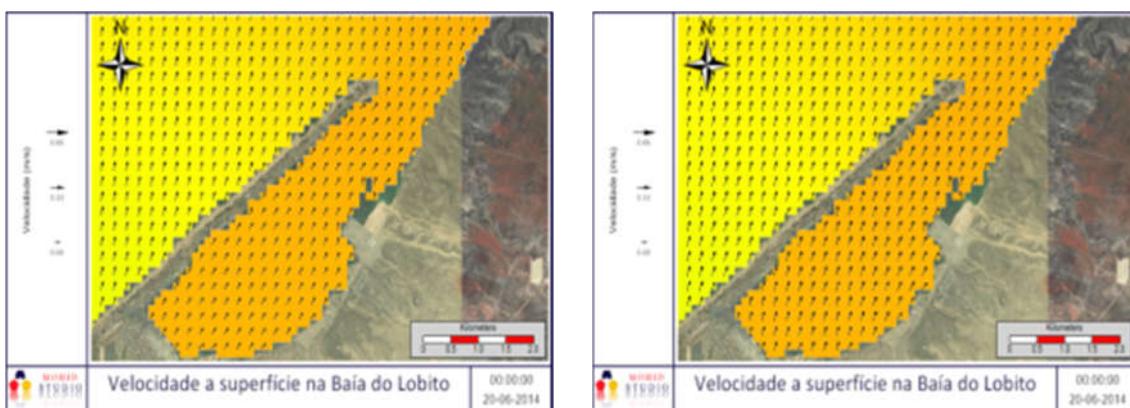


Figura 48- Mapa de velocidades com a descarga na baía do Lobito (esquerda) e sem descargas (direita), a 24 de Junho de 2014 as 12horas.

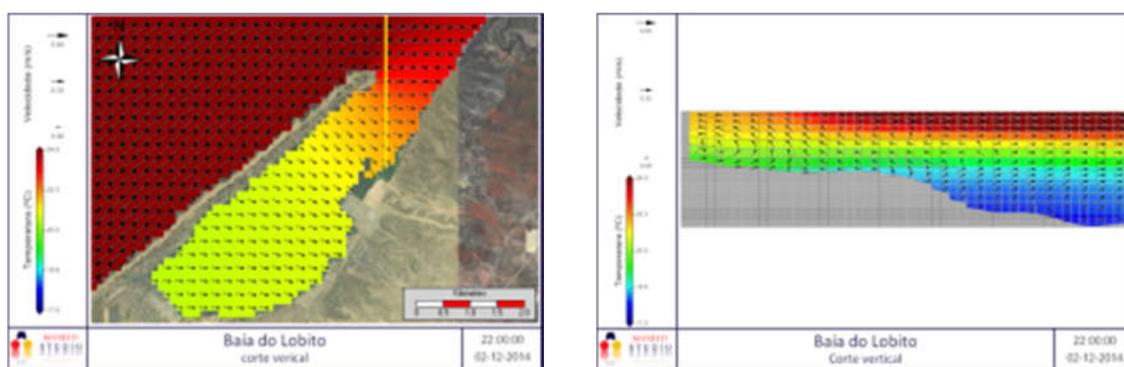


Figura 49 - Perfil vertical da velocidade no interior da baía do Lobito com vento Norte as 22 hora no dia 2 de Dezembro 2014 com maré alta.

Como já foi referido, é importante estudar a circulação na Bía do Lobito-Angola uma vez que é determinante para os processos ecológicos que ocorrem no interior da Baía.

#### 4.17. Resultados

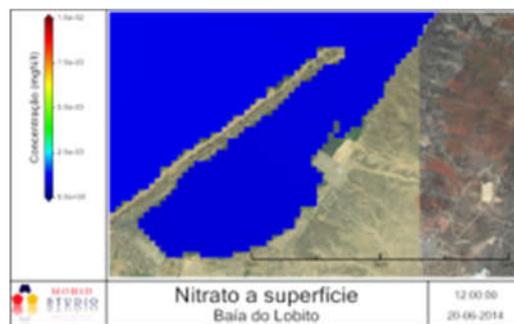
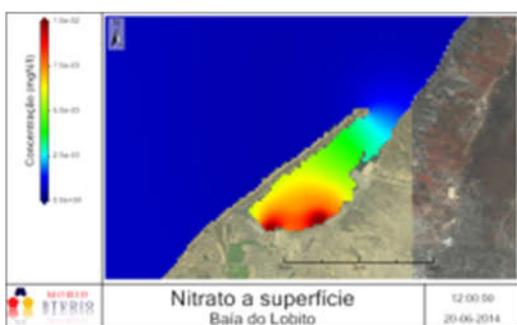
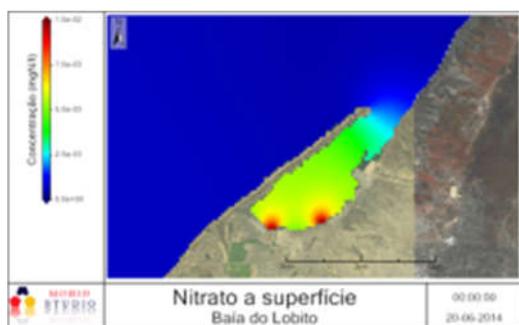
São apresentadas figuras abaixo com a distribuição ao longo de todo o estuário do fitoplâncton e dos nutrientes e nitrato em vários instantes considerados representativos do ciclo anual do fitoplâncton, nomeadamente em Novembro quando atinge o seu pico, assim como em alguns instantes anteriores e posteriores a esta data, quando se observam concentrações inferiores de fitoplâncton mais elevadas dos seus dois nutrientes.

São também apresentadas séries temporais destas duas variáveis nas várias estações de amostragem, comparando os valores obtidos pelo modelo ao longo do ano. São apresentados gráficos representando a variação total da concentração de fitoplâncton e nitrato.

#### 4.17.1. Nitrato

Em termos de nutrientes na Baía do Lobito ocorrem altas concentrações principalmente fósforo e nitrogénio. O afloramento em específico trás mudanças significativas à sua distribuição espacial, mas ao longo do tempo verifica-se um transporte das camadas mais profundas para as camadas mais superficiais. As figuras abaixo mostram a evolução que se verificou ao longo do período simulado, em que se pode verificar que a concentração de nitrato diminui entre as datas apresentadas, e observa-se o efeito do *bloom* de primavera. O que estes resultados sugerem é que, ao longo do tempo, e à medida que a intensidade solar aumenta, o fitoplâncton começa a consumir cada vez mais nitrato, sendo que em meados de Outubro, a concentração de nitrato *Figura 50* chega a um mínimo.

Nas figuras apresentadas abaixo é possível observar o efeito das descargas e sem descargas das valas Sonamet e Quileva, em que os nutrientes são transportados à superfície, em direcção a Norte, consoante o vento e as correntes dominantes (neste caso o vento dominante é de Sul.)



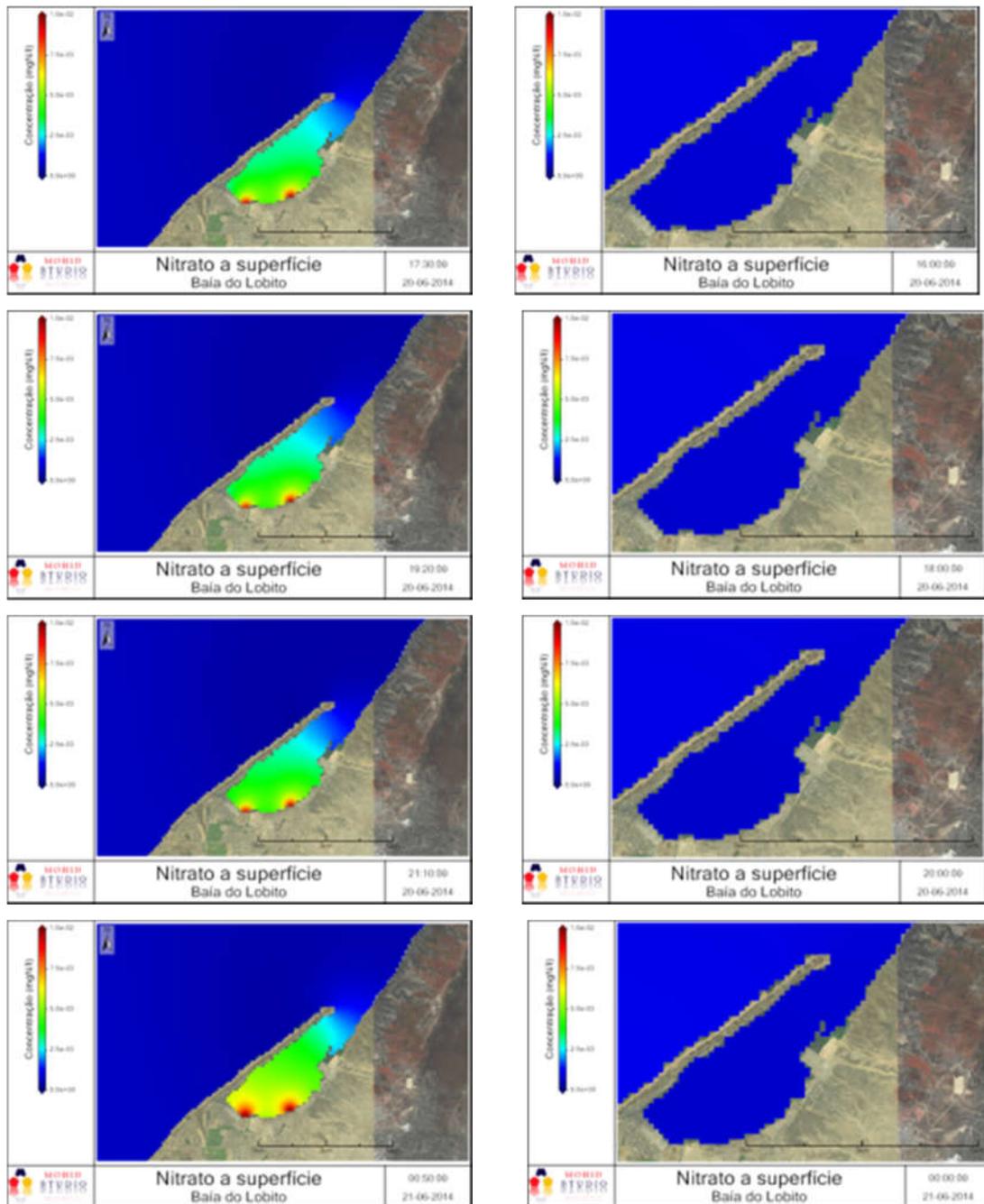


Figura 50-Evolução da concentração de nitrato ao longo de uma simulação de 12 horas no dia 20 de Junho de 2014 num ponto de estações de amostragem (mgN/l), e comparação com descargas a esquerda e sem descargas a direita.

Desta avaliação é possível observar uma intensa actividade biológica, principalmente na parte superior do estuário, devido essencialmente ao baixo nível de água (mais luz disponível) e a uma concentração de nutrientes elevadas. As figuras mostram também que as descargas das valas são as principais fontes de amónia e nitrato (Evaristo, 2016).

A evolução do nitrato ao longo de uma simulação de 12 horas a sua concentração com as descargas, mostra que durante o período da noite é baixa devido ao consumo do fitoplâncton.

As Figura 51 e Figura 52 mostram perfil e cortes no domínio da Baía do Lobito num ponto, no sentido de observamos as camadas da concentração dos nutrientes .

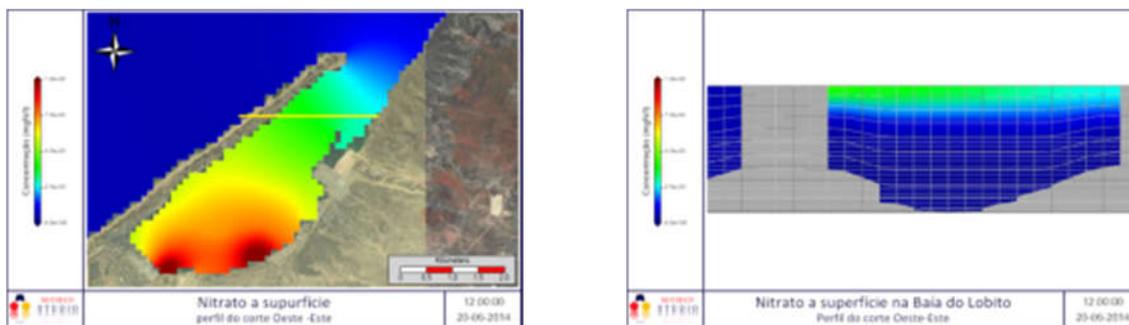


Figura 51 - Perfil e da concentração do nitrato de uma simulação instântia as 12 horas no dia 20 de Junho de 2014 num ponto de estações de amostragem (mgC/l), feita na camada XZ a meio do domínio e comparação com descargas

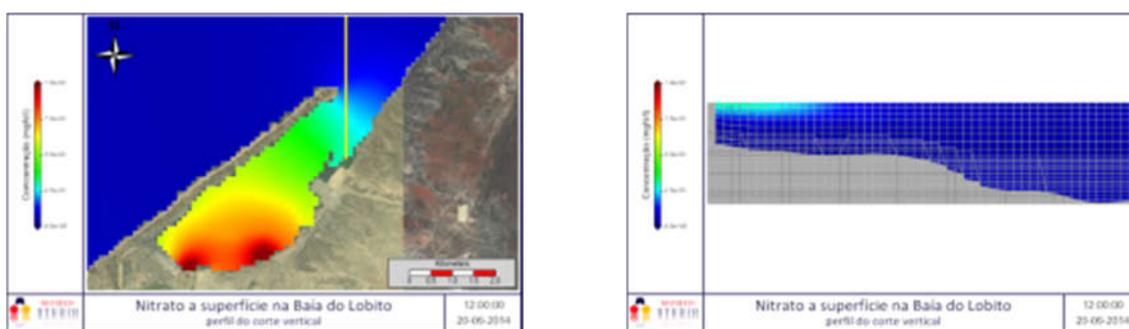


Figura 52-Perfil e da concentração do nitrato de uma simulação instântia as 12 horas no dia 20 de Junho de 2014 num ponto de estações de amostragem (mgN/l), feita na camada YZ a meio do domínio e comparação com descargas

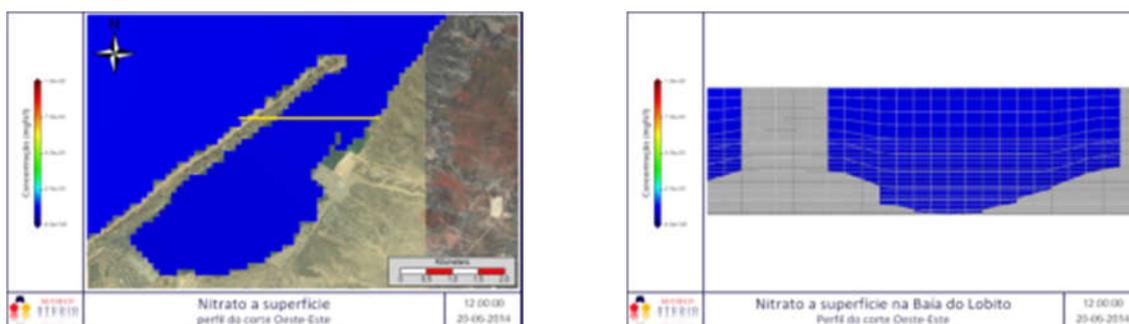


Figura 53- Imagem da Baía do Lobito com a Restinga em 1º plano e o Porto e a cidade ao fundo -Perfil e da concentração do nitrato de uma simulação instântia as 12 horas no dia 20 de Junho de 2014 num ponto de estações de amostragem (mgN/l), feita na camada XZ a meio do domínio e comparação sem descargas

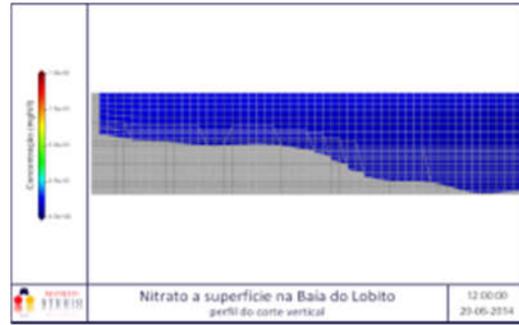
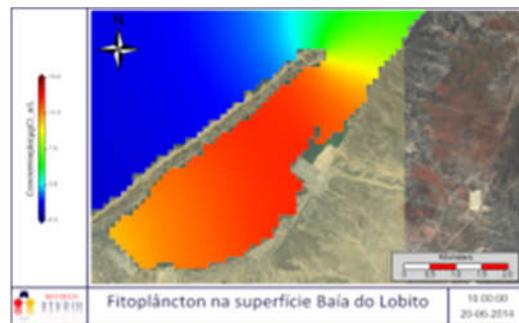
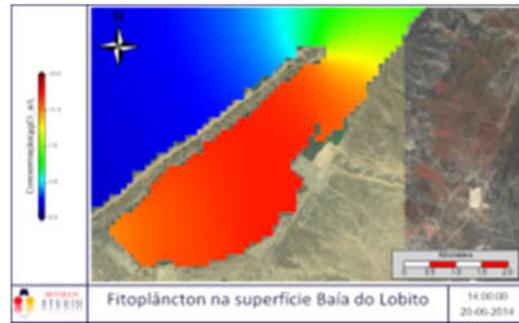
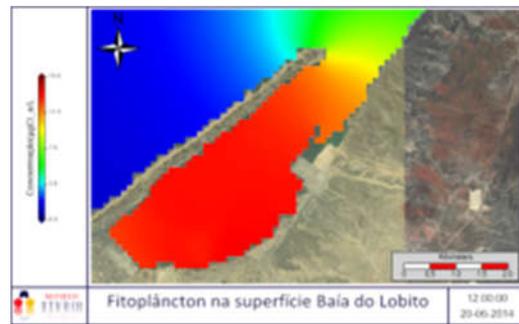
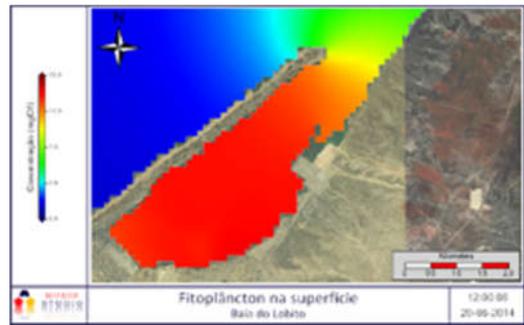
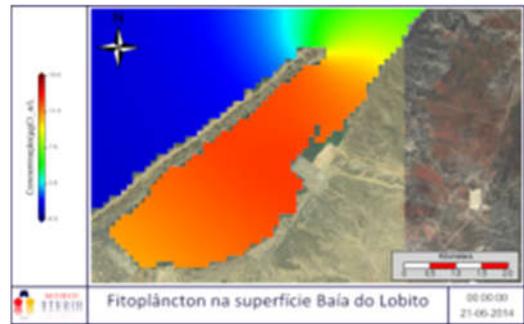
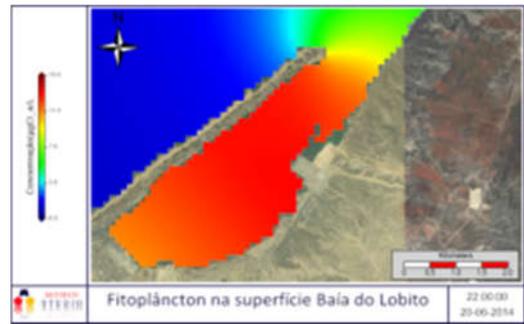
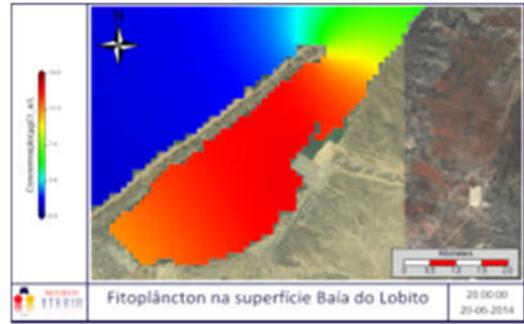
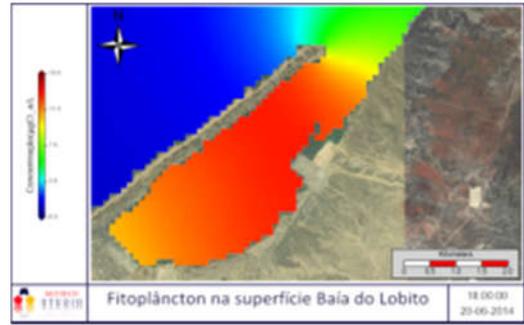


Figura 54-Perfil e da concentração do nitrato de uma simulação instântia as 12 horas no dia 20 de Junho de 2014 num ponto de estações de amostragem (mgN/l), feita na camada YZ a meio do domínio e comparação sem descargas.

Neste cenário dedicado ao fitoplâncton, são analisados o ciclo de simulação durante 12 horas no dia 20 de Junho de 2014 no interior da Baía do Lobito, com e sem descargas na Figura 55.





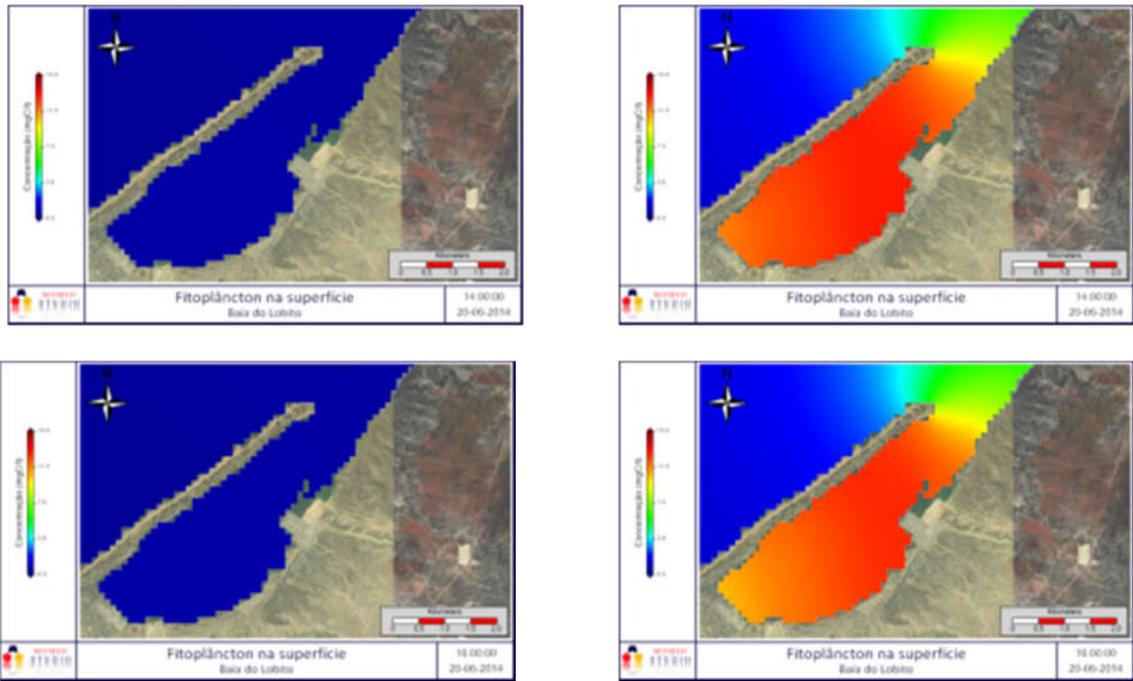


Figura 55-Evolução da concentração de fitoplâncton ao longo de uma simulação de 12 horas no dia 20 de Junho de 2014 num ponto de estações de amostragem (mgC/l), e comparação sem descargas e com descargas a( direita).

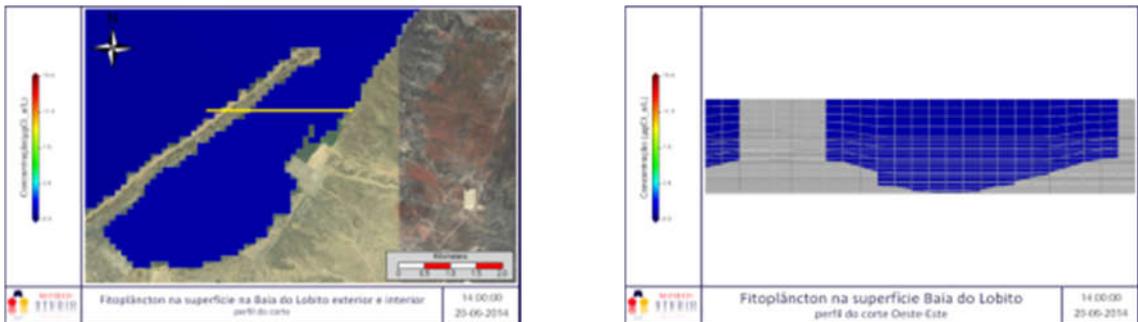


Figura 56-Perfil vertical de Fitoplâncton às 12 horas no dia 20 de Junho de 2014 SEM descargas.

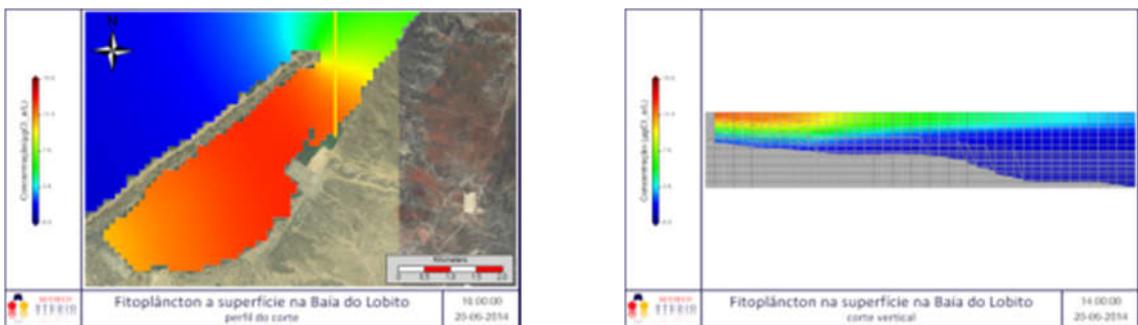


Figura 57 -Perfil vertical de Fitoplâncton às 0 horas no dia 20 de Junho de 2014 COM descargas

O perfil do corte vertical, mostra que a concentração do fitoplâncton aumenta em toda a superfície da Baía do Lobito com a entrada das descargas e diminuindo conforme a profundidade.

As distribuições horizontais mostram a existência de uma variabilidade espacial elevada em torno da Baía. Os perfis verticais mostram que essa variabilidade está associada à topografia e à direcção do escoamento.

Fitoplâncton relativamente aos indicadores da simulação instantânea na Figura 55 é de onde se pode concluir que a produção se dá dentro do estuário e depois é exportada para o oceano. A análise do fluxo dos nutrientes são mais complexos porque entra em linha de conta com as descargas locais, o consume e regeneração das variáveis.

#### 4.17.2. Cenários – séries temporais

Nesta secção são apresentados os resultados obtidos pelo modelo para as séries temporais das células à superfície do domínio situadas nas fronteiras Norte e Oeste, e para a célula do domínio onde é feita as descargas da Quileva e Sonamet. Não é apresentada a série temporal localizada na fronteira Sul visto que o resultado não mostra informação que já não seja mostrada nas restantes séries temporais. Os resultados mostram que os cenários duas (2) (descarga da Quileva) e (descarga da Sonamet) são quase idênticos em termos de concentrações de nitrato e fitoplâncton nas 2 fronteiras considera. O impacte das descargas no interior da Baía do Lobito na produção primária e na qualidade das águas balneares foi analisado com base nos dados de campo obtidos e nas simulações dos modelos implementados para a zona de estudo. No que se refere à análise dos dados recolhidos para caracterização do meio, pode-se concluir que o impacte das descargas é reduzido e muito localizado, quer no que se refere à qualidade microbiológica da água, quer no que se refere ao nível trófico do ecossistema. Da mesma forma, nenhuma água balnear é afectada pelas duas descargas, porque existe uma elevada mortalidade pela radiação solar, salinidade e dispersão devido às correntes do meio.

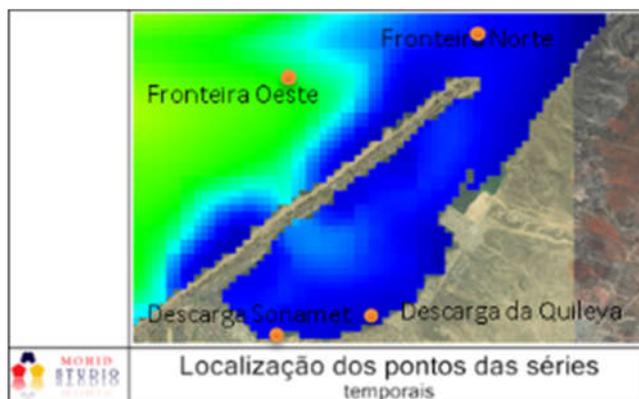


Figura 58-Localização dos pontos das séries temporais na Baía do Lobito

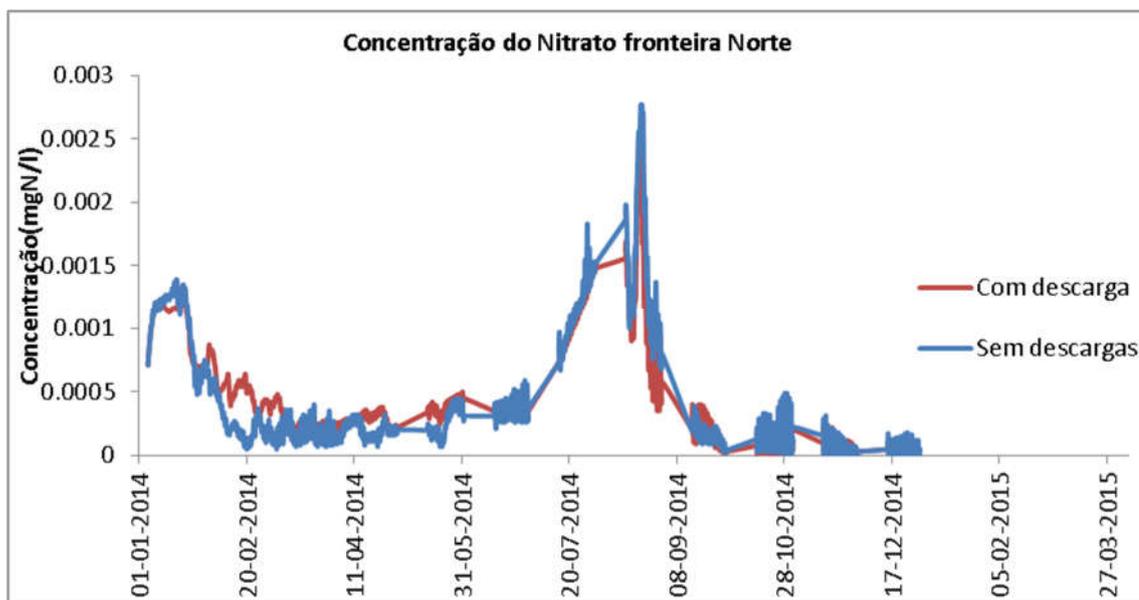


Figura 59-Comparação entre as séries temporais dos vários cenários obtidas para a célula na fronteira Norte. Cenário 1 – sem descargas; cenário 2 – descargas da Quileva e Sonamet.

Como se pode verificar na figura acima, a concentração de nitrato na fronteira Norte é fortemente influenciada pelo que vem do oceano, apesar das descargas da Quileva e Sonamet provocar uma redução da concentração em algumas alturas, como se pode verificar para o dia 20 de Fevereiro em que a concentração passa para valor baixo. A diferença é explicada pela concentração de fitoplâncton na fronteira Norte Figura 64, em que no caso do cenário 1 (sem descargas) diminui até um valor muito abaixo daquele verificado nos restantes cenários. Esta diminuição do fitoplâncton no cenário 1 leva a que, quando o nitrato aumenta, o fitoplâncton demore mais tempo a crescer do que o fitoplâncton nos restantes cenários.

Finalmente, o facto de o fitoplâncton crescer mais depressa nos cenários 2 e 3 (com descargas) leva a que o nitrato seja consumido em maior quantidade, atingindo valores de concentração mais baixos que no cenário 1. Em termos de importância, as descargas da Quileva e Sonamet contribui com máximo de 0.003% para a concentração de nitrato.

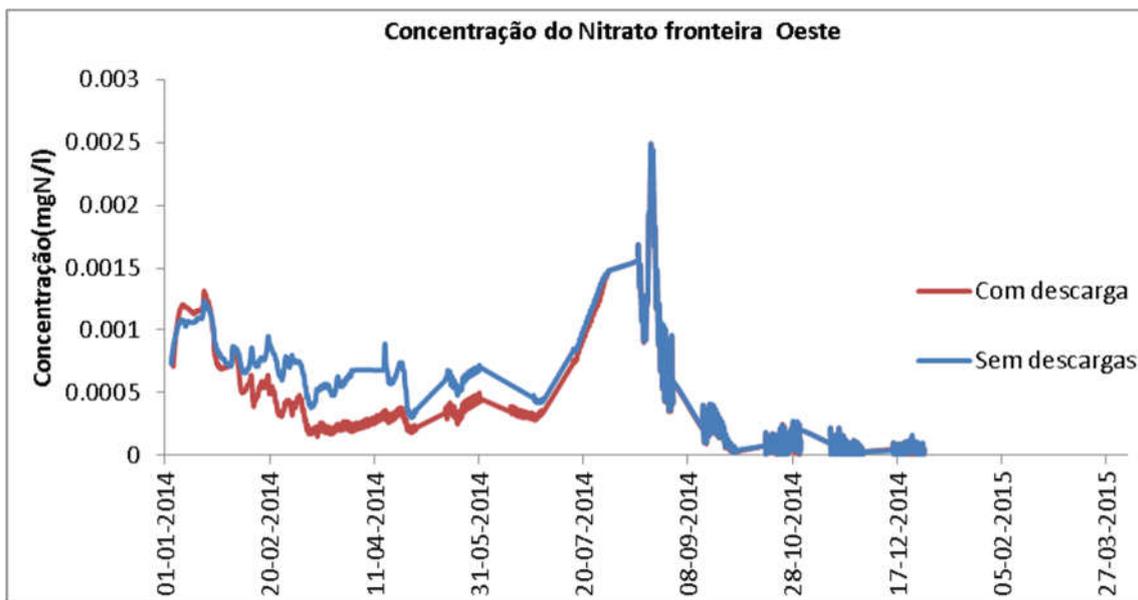


Figura 60-Comparação entre as séries temporais dos vários cenários obtidas para a célula na fronteira Oeste. Cenário 1 – sem descargas; cenário 2 – todas as descargas.

Na fronteira Oeste Figura 60, as séries temporais mostram que as descargas da (Quileva e Sonamet) pouco alteram a concentração de nitrato ao longo do período simulado, sendo a diferença máxima registada de 0.5% quando é introduzida a descargas. Em termos de valores médios, estas contribuições não alteram a concentração de nutrientes. É também de notar a diminuição da concentração de nitrato, resultado do aumento rápido de fitoplâncton na mesma altura.

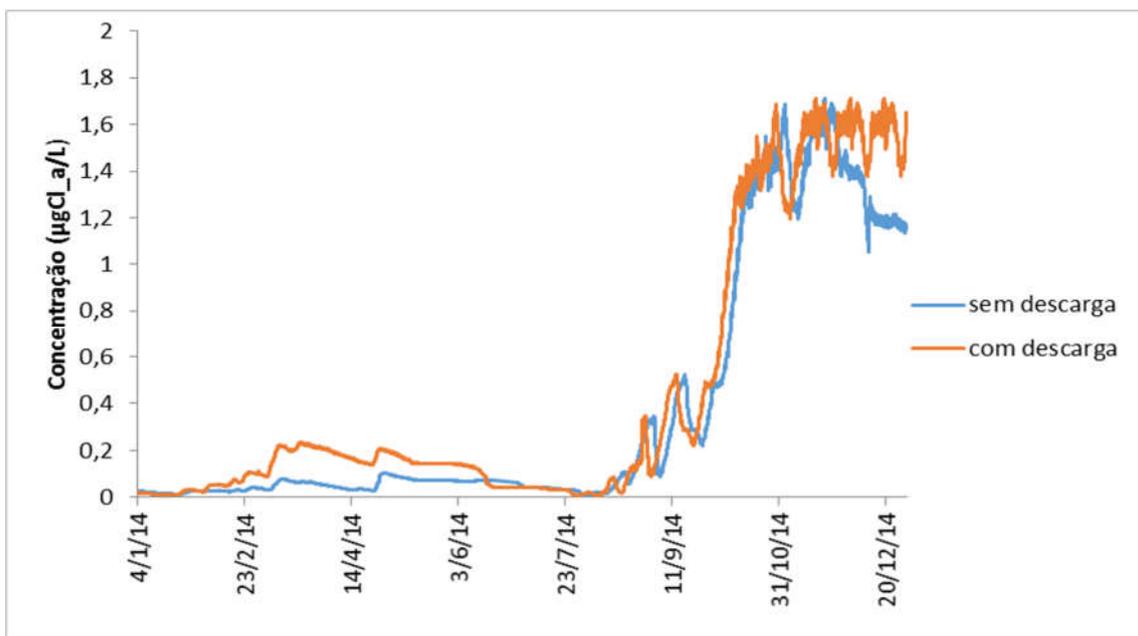


Figura 61-Comparação entre as séries temporais dos vários cenários obtidas para a célula na fronteira Oeste. Cenário 1 – sem descargas; cenário 2 – todas as descargas.

Como de pode verificar na Figura 61, os resultados obtidos para a concentração do fitoplâncton apresentam uma diferença muito pequena entre os vários cenários, o que sugere que a influência tanto da Quileva e Sonamet, não se estende até esta fronteira e a produção primária é condicionada exclusivamente pelo que vem do oceano.

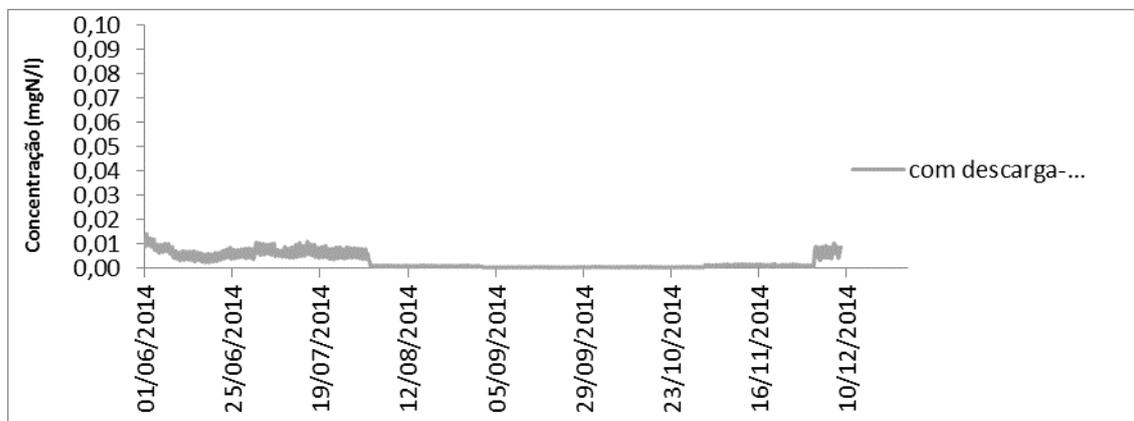


Figura 62-Comparação entre as séries temporais dos cenários concentração de Nitrato ao longo do ano 2014 no ponto Sonamet da célula com descarga e sem descarga (mgN/l), interior da baía do Lobito.

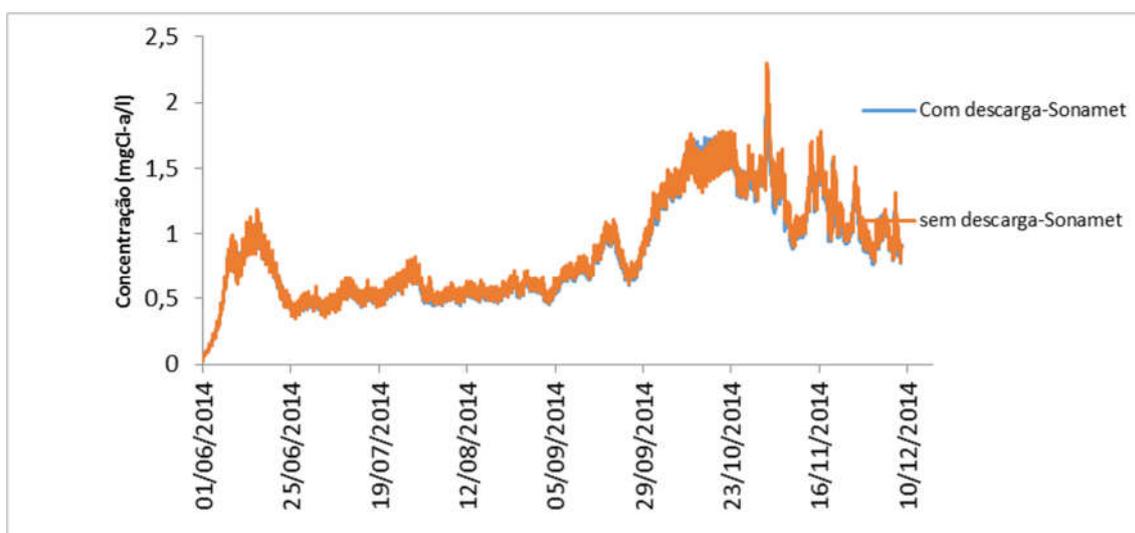


Figura 63-Comparação entre as séries temporais dos vários cenários obtidas para a célula em que é feita a descarga da Sonamet. Cenário 1 – sem descargas; cenário 2 – com as descargas.

Relativamente ao local de descarga da Quileva e Sonamet Figura 63, as séries temporais não mostram uma situação muito diferente das registadas nas fronteiras do domínio. Neste caso a influência das descargas é consideravelmente menos importante, chegando não representar um aumento em relação ao cenário 1 e 2 (sem descargas e com descargas).

Em seguida são analisados os resultados obtidos para as mesmas séries mas em relação à concentração de fitoplâncton. No caso da fronteira Norte, os resultados apresentados na Figura 64 mostram em primeiro lugar uma variabilidade ao longo do dia, o que é ditado pela influência da variabilidade da intensidade da luz solar ao longo do dia. Em segundo lugar, é possível verificar que a descarga representa um aumento máximo na concentração de fitoplâncton de 56% e uma média de 0.4%.

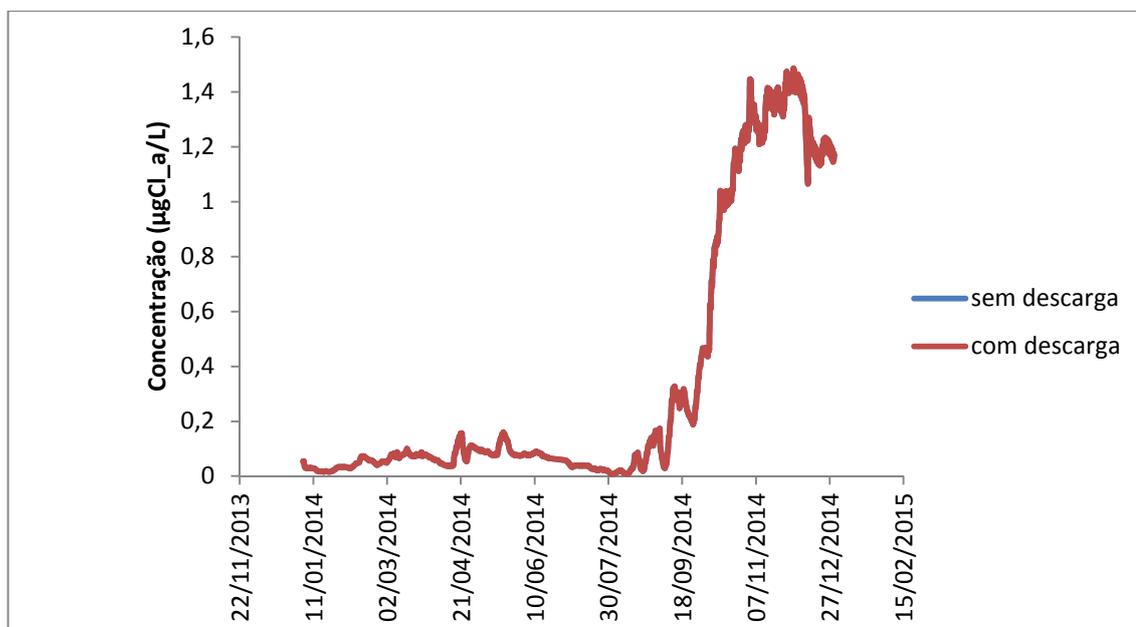


Figura 64-Comparação entre as séries temporais dos vários cenários obtidas para a célula na fronteira Norte. Cenário 1 – sem descargas; cenário 2 – todas as descargas.

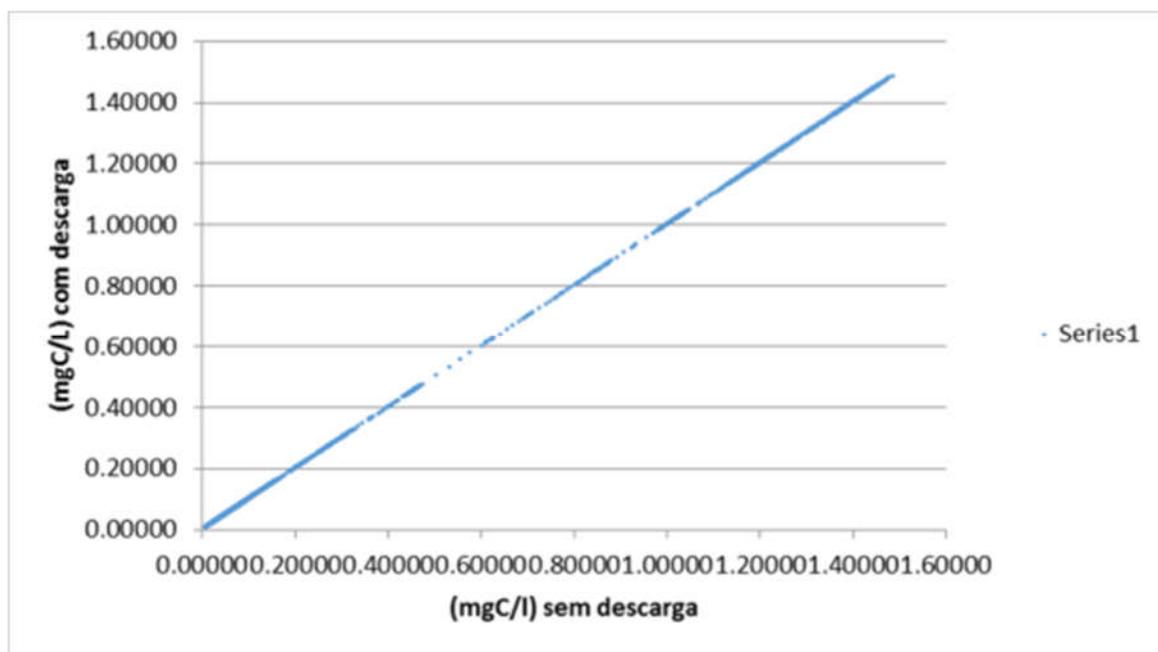


Figura 65 - a-Evolução entre as séries temporais dos vários cenários obtidas para a célula na fronteira Norte. Cenário 1 – sem descargas; cenário 2 – todas as descargas. A Figura 64(a) mostra a concordância ilustrada na Figura 65

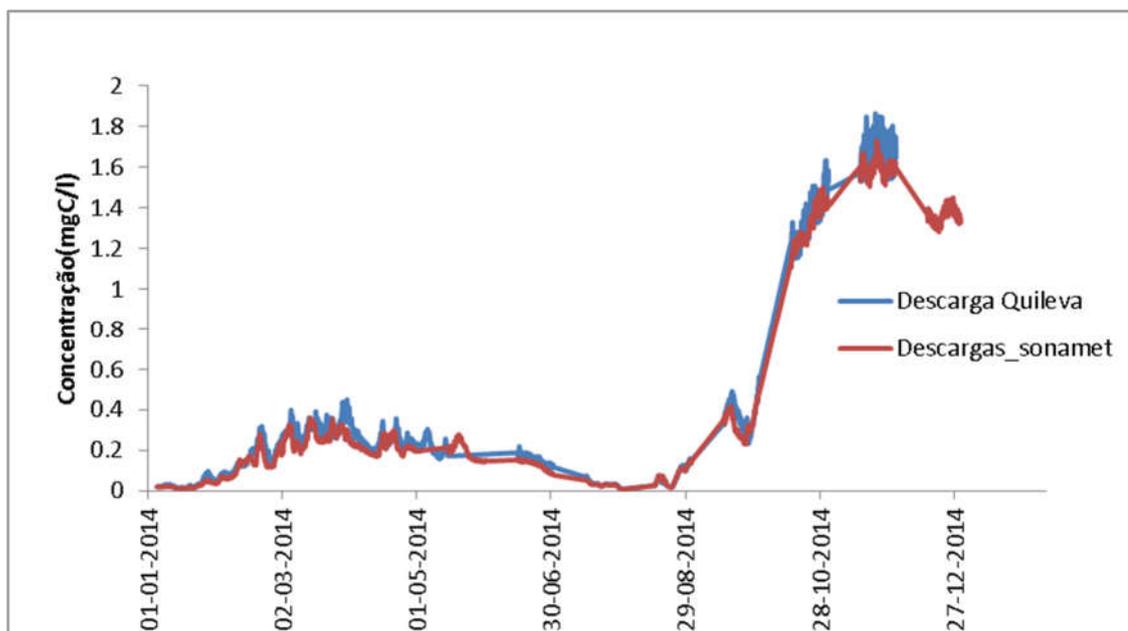
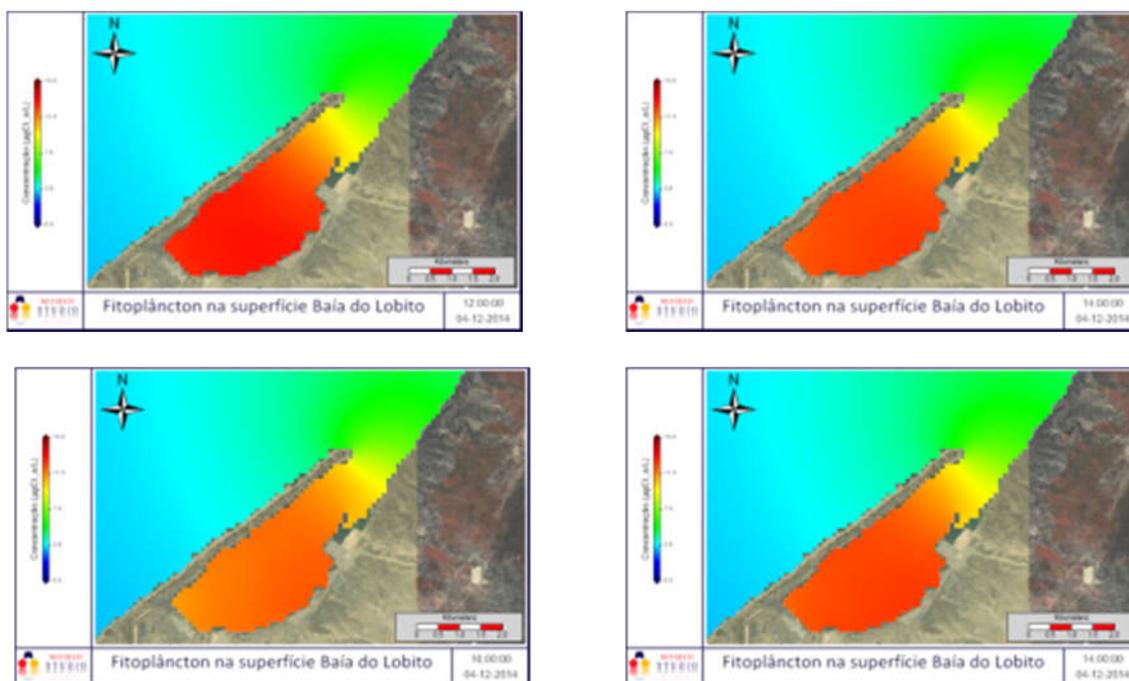


Figura 66-Comparação entre as séries temporais dos vários cenários obtidas para a célula das descargas. Cenário – todas as descargas.

As Figura 66 mostram o dia em que os picos mas altos da concentração do fitoplâncton e o nitrato atingem na baía do Lobito no ano de 2014, no seu último nível do modelo, embora não se dispusesse as series temporais de dados como foram obtidas os parâmetros físicos foi simulado com um espaço espacial de 110 m de modo obter figuras com os parâmetros biológicos e químicos.



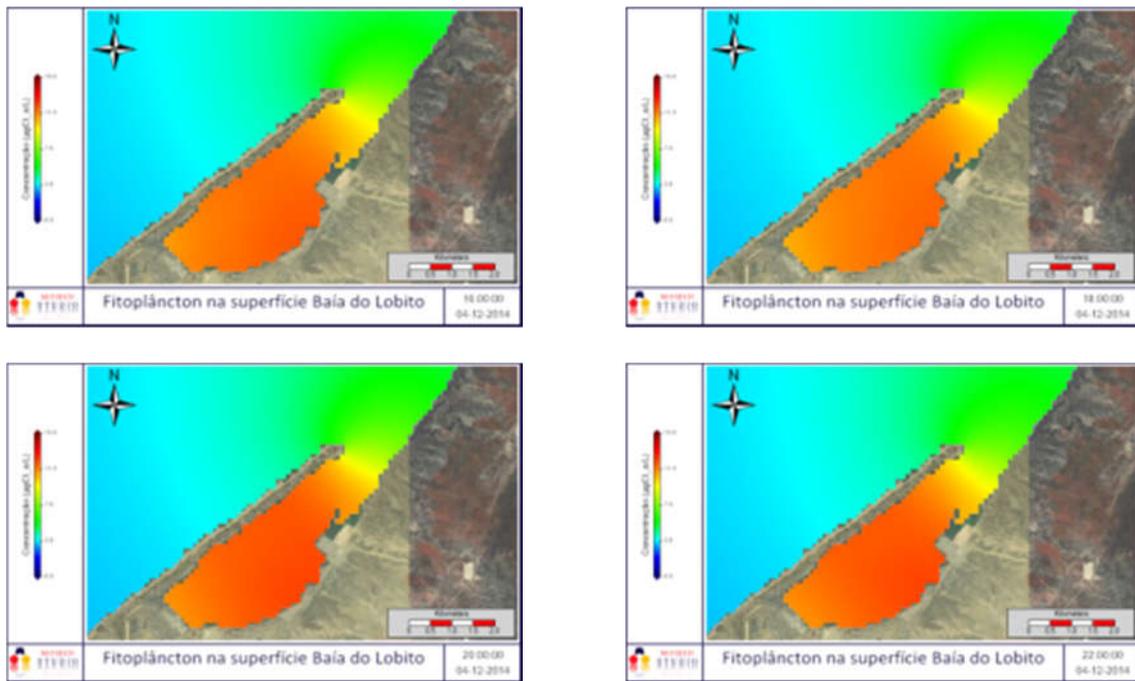


Figura 67- concentração máxima do fitoplâncton superfície na Baía do Lobito ao longo de uma simulação instantânea as 10 horas no dia 4 de Dezembro de 2014 num ponto de estações de amostragem (mgC/l), com descargas.

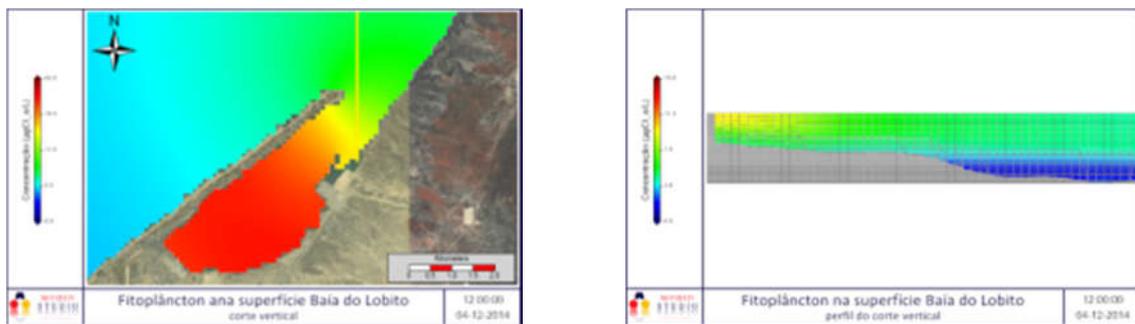


Figura 68-Perfil e da concentração Fitoplâncton de uma simulação instantânea as 12 horas no dia 4 de Dezembro de 2014 num ponto de estações de amostragem (mgC/l), feita na camada YZ a meio do domínio com descargas

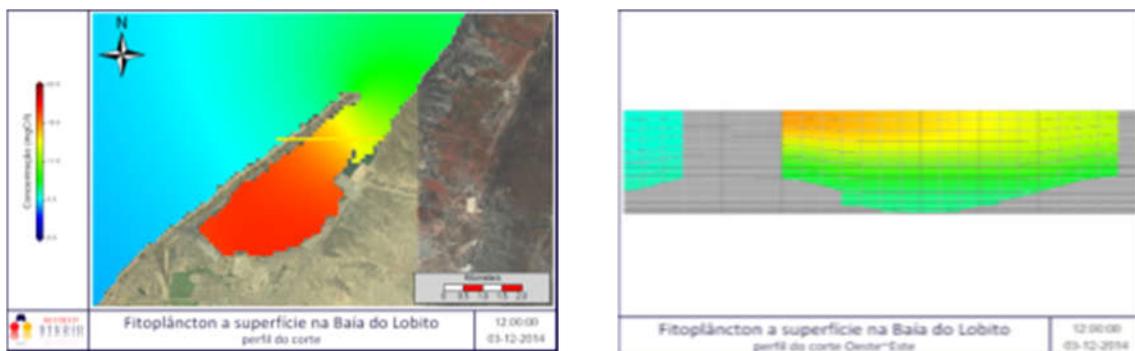


Figura 69-Perfil e da concentração Fitoplâncton de uma simulação instantânea as 12 horas no dia 20 de Dezembro de 2014 num ponto de estações de amostragem (mgC/l), feita na camada x-x a meio do domínio com descargas

A análise das séries temporais mostra que o fitoplâncton apresenta um pico no início do mês de Dezembro, atingindo valores máximos da ordem de  $1.80 \text{ mgC/l} \cong 18\mu\text{gChla/L}$

na presença das descargas e de  $1.50 \text{ mgC/l} \cong 15 \mu\text{gChla/L}$  sem descargas não interior da Baía, na zona das descargas. A análise da

Figura 67 mostra que valores desta ordem de grandeza são registados em certa de 2/4 da superfície da Baía, embora o máximo absoluto seja registado a cerca meio comprimento da Baía.

O pico de fitoplâncton no início de Dezembro pode ser explicado como o resultado da conjugação entre disponibilidade de luz necessária para a fotossíntese e abundância de nutrientes, amónia e nitrato. O aumento do Fitoplâncton entre o ponto de descarga e o meio da Baía é consequência do crescimento durante o movimento da água para fora da Baía. Esse aumento é pequeno porque está limitado pela disponibilidade de nutrientes. No caso de estuários onde a produção primária é também limitada pela penetração da luz, a posição do máximo fitoplanctónico ao longo do eixo longitudinal do estuário depende da posição do máximo de turbidez e da disponibilidade de nutrientes (Garcia de Soto, 1990).

## 5. Conclusões

Este trabalho representa um passo para uma compreensão da hidrodinâmica e dos processos que controlam a qualidade da água na Baía do Lobito, em Angola. O estudo utilizou todos os dados disponíveis localmente, os quais foram analisados à luz de estudos de maior escala espacial realizados com o objectivo de conhecer a dinâmica global dos oceanos e atmosfera. Na ausência de dados de campo, a verificação dos resultados do modelo foi apoiada pelo acordo com processos físicos, onde o vento e o aquecimento superficial desempenham papel fundamental.

A aplicação do modelo hidrodinâmico bidimensional à Baía do Lobito permitiu simular a propagação da maré e conhecer a oscilação da superfície livre. Este estudo mostrou que a velocidade transiente e a velocidade residual devidas à maré são muito baixas e, por conseguinte, que os tempos de residência no interior da Baía seriam da ordem de meses, se este fosse o principal mecanismo gerador de escoamento.

O modelo de maré foi forçado utilizando resultados do modelo FES2004 e a oscilação no interior da Baía foi validada utilizando componentes harmónicas de um registo de maré realizado em 1971. As componentes mais importantes são as semidiurnas, M2, S2 e N2. A componente diurna mais importante é a K1, com uma amplitude que é cerca de 15% da M2. A concordância entre os resultados do modelo e os valores medidos mostra que os resultados do FES2004 são adequados para o forçamento de modelos locais nesta zona. Como consequência das baixas intensidades das correntes de maré - máximas na zona da embocadura onde atingem valores da ordem dos 5 cm/s - as correntes residuais são também de baixa intensidade (da ordem de 1 cm/s). No interior da baía existem dois vórtices residuais cada um deles ocupando sensivelmente metade da Baía. Como consequência a água tende a recircular em duas células e o tempo de residência (ou de renovação) da água seria elevado no interior da baía seria da ordem dos dois meses se a maré fosse o principal mecanismo forçador do escoamento.

A simulação baroclínica 3D do escoamento mostrou que o vento e a estratificação térmica são determinantes para a hidrodinâmica da Baía, para o tempo de residência da água no seu interior, para os processos de mistura na vertical e consequentemente para a qualidade da água no seu interior.

O vento na costa do Lobito é dominante de sul/oeste em praticamente todo o ano, apresentando variabilidade diária devida às variações de temperatura em terra e

períodos curtos em que pode soprar do norte. Este regime de ventos, associado ao efeito de coriolis cria escoamento superficial com componente dirigida para norte, que arrasta a água para fora da Baía. Este escoamento superficial reduz o tempo de residência da camada superficial (e por isso de material proveniente de descargas de água doce) e induz upwelling no interior da baía, promovendo a entrada de água de fundo mais fria, mas mais rica e em nutrientes - para o seu interior. Este tipo de escoamento é dominante, mas por vezes é interrompido por vento proveniente do quadrante norte. Durante estes eventos o tempo de residência da água no interior da Baía aumenta, permitindo maior produção primária no seu interior.

Os resultados do modelo Baroclínico puseram em evidência o padrão de escoamento esperado, mostrando o escoamento em duas camadas na situação de vento sul e a recirculação no interior da Baía na situação de vento norte. Os perfis verticais de salinidade e de temperatura foram validados com dados de campo recolhidos em Junho de 2014, mostrando-se, de uma maneira geral, concordantes com os dados de campo. O modelo de produção primária foi corrido para o cenário actual em que as principais descargas são provenientes das valas da Quileva e da Sonamet e num cenário pristino em que não existira nenhuma descarga antropogénica. Os resultados mostram que mesmo sem a presença de descargas a concentração de fitoplâncton no interior da Baía é superior à concentração fora da Baía, como consequência do upwelling induzido pelo vento e que a produção é limitada pelos nutrientes. A simulação considerando as descargas mostrou que a produção primária aumenta no interior da Baía, mas que em condições normais não cria situações críticas. Na ausência de descargas, a concentração de Fitoplâncton seria máxima junto ao fundo por ser alimentada a partir de nutrientes provenientes do mar, que entram na Baía através do escoamento de fundo. No caso real, com descargas, a concentração máxima é registada à superfície. As concentrações mantêm-se moderadas (da ordem de  $18\mu\text{gChla/L}$ ) porque o tempo de residência é baixo. As maiores concentrações são registadas no final de Novembro/início de Dezembro, na segunda metade da primavera, quando há maior disponibilidade de nutrientes e quando o vento de sul é mais fraco e a probabilidade de eventos de vento norte é mais elevada. Devido a este mecanismo de renovação da água, as descargas das valas da Quileva e Sonamet não põem em causa a qualidade da água na Baía, nem as águas balneares das praias da Restinga.

## 5.1 Recomendação para trabalho futuro

Este trabalho, apesar das suas limitações, constitui uma ferramenta útil para a simulação do comportamento da Baía do Lobito, dando uma primeira visão da hidrodinâmica da Baía e dos processos que a determinam e que condicionam a qualidade da água no seu interior.

Ficou a faltar a validação completa dos resultados. Essa validação exige mais dados de campo que têm que ser levados a cabo em programas ambientais que iam para além do âmbito desta tese, pelos custos e pela logística que exigem. Este trabalho constitui um contributo para o planeamento desse trabalho futuro a desenvolver especialmente na área da qualidade da água. Este trabalho conjuntamente com esses trabalhos experimentais constitui uma ferramenta essencial para estudos de impacte ambiental, com vista à obtenção de uma melhor gestão e preservação dos recursos estuarinos.

De acordo as conclusões no que tange o comprimento da área de estudo avaliada do presente trabalho, sugere-se que seja acrescentado uma rede de monitorização de qualidade de água EASL e pontos de amostragens para águas superficiais no canal da Baía do Lobito, e portanto, utilização de modelos hidrodinâmicos e de dispersão acoplados considerando os valores medidos de concentração de poluentes e suas propriedades físicas e biogeoquímicas.

## 6. Referências Bibliográficas

Ascione Kenov I, Garcia AC, Neves R (2012) Residence time of water in the Mondego estuary (Portugal). *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 106:13-22

Abbott, M.B., Damsgaard and Rodenhuis, G.S. 1973. Sytem 21, Jupiter, a design system for two dimensional nearly horizontal flows. *J. Hyd. Res.* 1, 1973, pp. 1-28

Braunschweig F., Martins, F., P. Leitão & R. Neves., 2003. A methodology to estimate renewal time scales in estuaries: the Tagus Estuary case. *Ocean Dynamics*. 53: 137-145.  
Carapeto, C., (1999). *Poluição das águas: Causas e efeitos*. 1ª edição. Universidade Aberta. Lisboa, 241 pp.

Aminot, A. et Chaussepied, M., (1983). *Manuel des Analyses Chimiques en Milieu Marin*. Centre National Pour L'Exploitation des Océans, 395 pp.

Coelho, H. S (2002). *Modelação de Processos Físicos Relacionados com a circulação Codispot* (1997) Evolution of the nitrogen cycle and its influence on the biological sequestration of CO<sub>2</sub> in the ocean

Day, J.; Hall, C.; Kemp, W.; Arancibia, A. (1989) - *Estuarine ecology*. Wiley, 558 pp.

P Falkowski et al 1997. The evolution of modern eukaryotic phytoplankton

Leitão, P. 2003. *Integração de Escalas e de processos na Modelação do Ambiente Marinho*. Instituto Superior Técnico.

Garcia de soto (1990)

Heip *et al*, 1995) Heip, C. H. R.; Goosen, N. K.; Herman, P. M. J.; Kromkamp, J.; Middelburg, J. J.; Soetaert, K. (1995) – Production and consumption of biological particles in temperate tidal estuaries. *Oceanography and Marine Biology: an Annual Review* 1995, vol. 33, 1-149 pp.

Mateus M. A process-oriented model of pelagic biogeochemistry for marine systems. Part I: Model description. *Journal of Marine Systems*. 2012; 94(Supplement): S78–S89

Mateus M, Vaz N, Neves R. A process-oriented model of pelagic biogeochemistry for marine systems. Part II: Application to a mesotidal estuary. *Journal of Marine Systems*. 2012; 94(Supplement): S90–S101

Nybakkew (1993). *Ecology and Management of Mangrove*

Neves, R.J.J. e Silva, A.J.R., 1991, An Extension of the Boussinesq Equations to Deep Water - Computer Modelling in Ocean Engng., 1991. A.S. Arcilla, M. Pastor, O.C. Zienkiewicz & B.A. Schrefler, eds. Balkema, Rotterdam, p. 301-309.

Pina, P. 2001. An Integrated Approach to Study The Tagus Estuary Water Quality. Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa. 2001. p. 70, Dissertação para a obtenção do Grau de Mestre em Ecologia, Gestão e Modelação dos Recursos Marinhos)

Portela, L. et Neves, R., (1993). Modelling of Salt distribution in the Tejo estuary using the Quick scheme *in*: L.C. Wrobel, C.A. Brebbia (eds.), Water Pollution II: Modelling, Measuring and Prediction, 121-128 pp. Comput. Mech. Publ., Southampton

Portela, L., (1996). Modelação matemática de processos hidrodinâmicos e de qualidade da água no Estuário do Tejo. Dissertação para obtenção do grau de Doutor em engenharia do Ambiente. Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, 240 pp.

## I. Anexos

### A.1-Dados da Qualidade da água Obtidos na Baía do Lobito

No âmbito da tese foram realizadas campanhas de observação da qualidade da água na baía do Lobito. Os dados de temperatura da água utilizados no modelo referem-se a médias mensais, obtidas a partir dos dados disponibilizados pelas campanhas de observação da qualidade da água (Tabela A.1). A partir dos elementos fornecidos por estas campanhas sobre a distribuição da temperatura da água no interior e exterior da Baía do Lobito, pode-se constatar que a diferença entre as temperaturas à superfície e junto ao fundo (Figura A.1), calculada para um total de 31 observações efectuadas em 4 estações de amostragem revelou-se inferior a  $0.3^{\circ}\text{C}$  em 80% das observações (Tabela A.3), pelo que são utilizados valores de temperatura da água média na vertical.

Na orla costeira da região da baía do Lobito considera-se a época fria entre o mês de Junho a Setembro, em que a distribuição da temperatura na camada superficial varia entre  $21^{\circ}\text{C}$  e  $24^{\circ}\text{C}$  (INAMET2013). Neste período a corrente de Benguela está associada à corrente das Agulhas proveniente do Índico e transporta água fria desde a região do Cabo da Boa Esperança até à zona do Namibe. Nas (Figuras 28 e 29) observa-se uma água mais fria na parte sul, correspondente à corrente fria de Angola, e na parte norte a temperatura é mais elevada, influenciada pelas águas quentes da contracorrente alísia. Ao longo da região envolvente da costa do litoral da baía do Lobito nota-se que não há grande variação da temperatura, oscilações entre  $22^{\circ}\text{C}$  a  $24^{\circ}\text{C}$ , e a temperatura mais baixa está localizada na parte sul e a mais alta na parte norte de Angola.

Tabela A.1- Valores médios mensais da temperatura da água, utilizados na aplicação do modelo na orla costeira do Lobito.

<b>Temperatura média mensal (C°)</b>	
Janeiro	30
Fevereiro	28
Março	27
Abril	27
Mai	26
Junho	23
Julho	21
Agosto	20
Setembro	19
Outubro	22
Novembro	26
Dezembro	28

Ao longo desta secção será feita a validação do modelo baroclínico, 3D, através das análises dos resultados do modelo com as observações de dados, e as informações existentes sobre a circulação hidrodinâmica na região do Lobito Angola.

Após validação, o modelo hidrodinâmico baroclínico implementado na região do Lobito Angola, poderá descrever e identificar diferentes tipos de massas de água e correntes que ocorrem na região. Essas massas de águas poderão ser identificadas com base no fluxo baroclínico que depende da distribuição de densidade da massa de água, tendo em conta a temperatura e salinidade.

Tabela A.2 – Coordenadas geográfica (Lat.; Long.), dos pontos em análises dos resultados no domínio do modelo.

	Latitude	Longitude
NOROESTE (NO)	13.618	-12.279
NORDESTE (NE)	13.470	-12.278
SUDOESTE (SO)	13.618	-12.363
SUDESTE (SE)	13.470	-12.364

A colecta dos dados de temperatura e salinidade, na parte sul de Angola da orla costeira do Lobito, foi feita durante o ano 2014, patrocinado pelo Maretec. Foram utilizados como base de colecta para os dados de Temperatura, Salinidade, Clorofila e profundidade o correntómetros e o rebocador de pesquisa Kalua (Figura 51). Os entre os meses de Junho, caracterizando uma situação de dados (Tabela A1.)

A tabela (A.3) descreve das informações sobre dos pontos para colecta de dados para área de estudo. Dentre as estações oceanográficas realizadas, foram analisadas somente as que se encontravam dentro dos limites geográficos estabelecidos e, as quais, os perfis não apresentaram problemas na sua qualidade em função de falhas, durante a aquisição dos dados. A (Figura 22), mostra a distribuição dos pontos principais das estações utilizadas nesta dissertação.



Figura A.0 Aplicação dos correntômetros juntos aos marégrafos (robocador de pesquisa Kalua)

Tabela A.3- A listagem das estações

Estação	latitude	longitude	Profundidade(m)		Data
P1	-12.3193	13.58817	23	Marégrafo 1	23-06-2014
P2	-12.2826	13.61001	17		23-06-2014
P3	-12.2551	13.62482	24		23-06-2014
P4	-12.2251	13.64475	12	foz rio Hanha	23-06-2014
P5	-12.2218	13.59756	46		23-06-2014
P6	-12.2942	13.55459	58		23-06-2014
P7	-12.3608	13.50122	63		23-06-2014
P8	-12.4471	13.4603	27	foz catumbela	23-06-2014
P9	-12.4528	13.46802	7		23-06-2014
P10	-12.4351	13.46587	13		23-06-2014
P11	-12.4186	13.48089	5	Praia bebe	23-06-2014
P12	-12.3881	13.50234	6	descarga cabaia	23-06-2014
P13	-12.3497	13.53025	42		23-06-2014
P14	-12.3259	13.56127	43	canal da restinga	23-06-2014
P15	-12.314	13.58825	22	Marégrafo 3	23-06-2014
P17	-12.316	13.58828	17	bóia	25-06-2014
P18	-12.3185	13.59215	4	Marégrafo 2	25-06-2014
P19	-12.3215	13.59182	2.1	encosta	25-06-2014
P20	-12.3231	13.58811	7	canal	25-06-2014
P21	-12.3203	13.58387	22	boia3	25-06-2014
P22	-12.3272	13.58362	16	porto mineiro	25-06-2014
P23	-12.3263	13.57954	25	canal	25-06-2014
P24	-12.3267	13.57196	10	encosta da restinga	25-06-2014
P25	-12.3351	13.5719	29	canal	25-06-2014
P26	-12.3399	13.57499	7	emissario sonangol	25-06-2014
P27	-12.346	13.57278	4		25-06-2014
P28	-12.3429	13.56726	10	Marégrafo 4	25-06-2014
P29	-12.3401	13.56457	31	Canal	25-06-2014
P30	-12.3373	13.5582	17	Igreja restinga	25-06-2014
P31	-12.3414	13.55293			25-06-2014

As Figuras abaixo, representam os pontos dos perfis verticais de temperatura na zona da Baía do Lobito em Junho de 2014. Os gráficos mostram as diferenças entre perfis medidos no interior e exterior da Baía do Lobito, nas estações 28 e 6, 28 e 14 e perfis calculados nos mesmos pontos. As diferenças mostram que a dinâmica os primeiros 4 metros da coluna de água têm dinâmica distinta das camadas inferiores, quer nas medidas, quer no modelo.

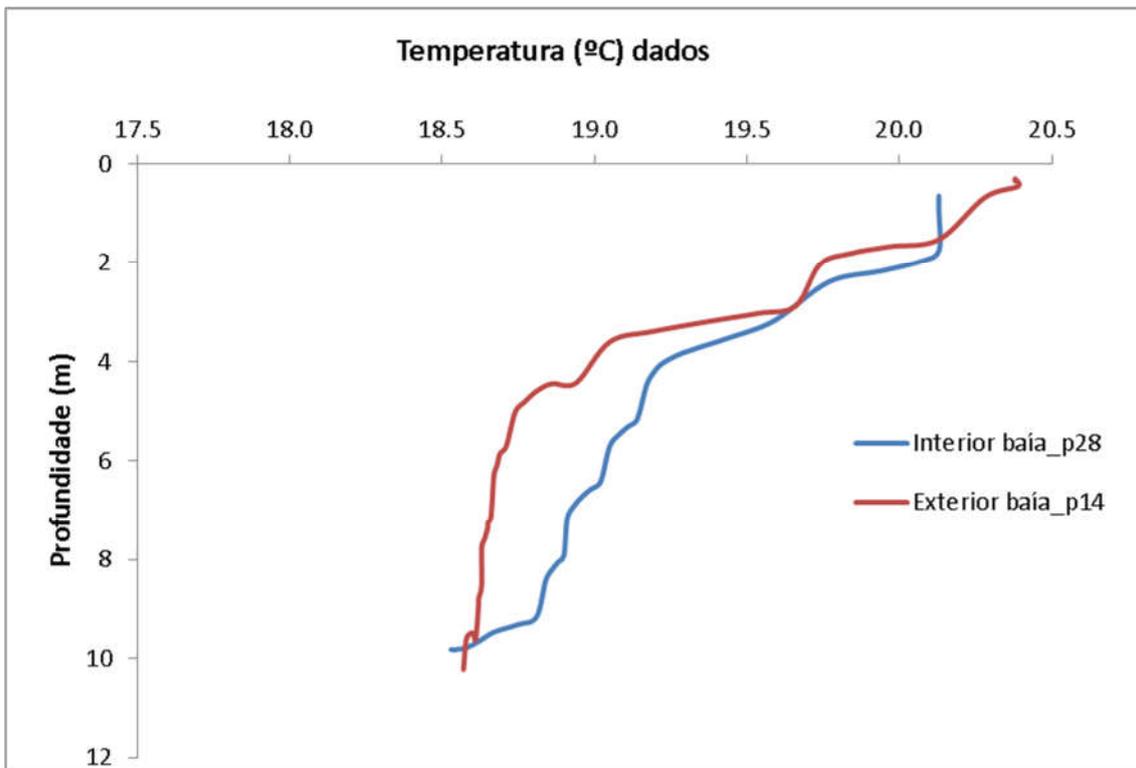


Figura A.1- Perfil longitudinal vertical das temperaturas das nas estações 28 e 14 a superfície e as respectivas profundidades no dia 25 de Junho de 2014 às 12.30 horas

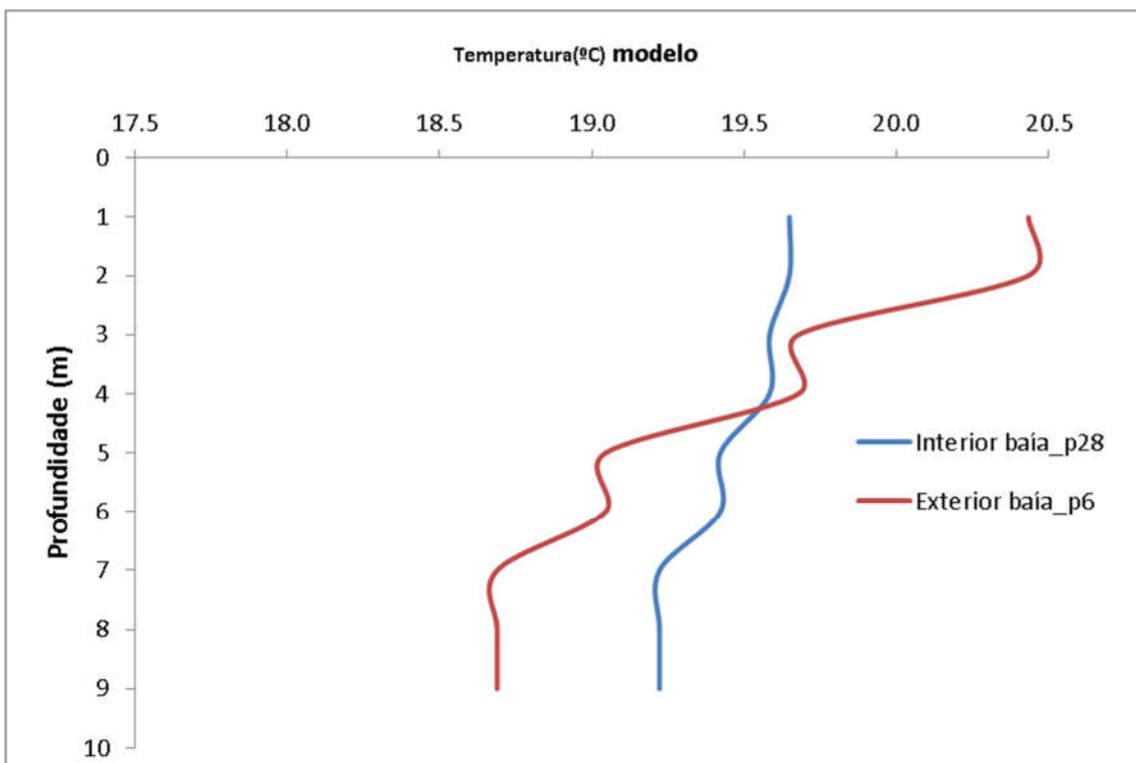


Figura A.2-Perfil longitudinal vertical das temperaturas das nas estações 28 e 6 a superfície e a respectiva profundidade no dia 25 de Junho de 2014 às 12.30 horas

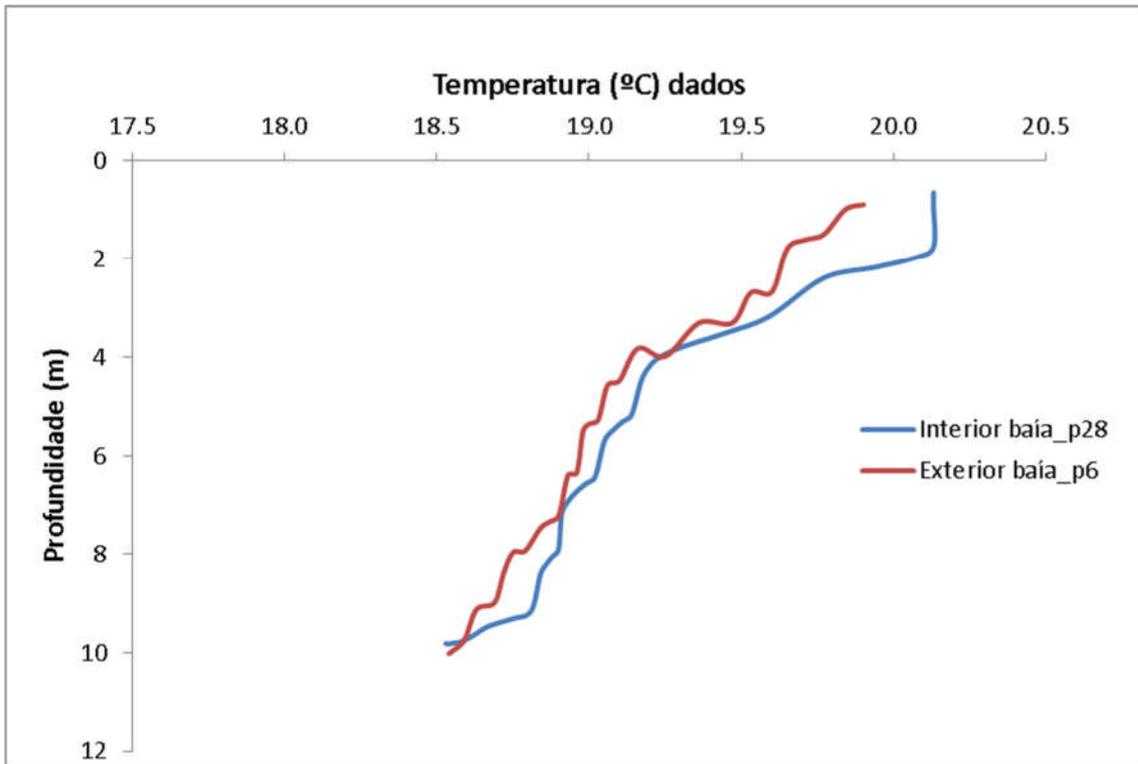


Figura A.3- Perfil longitudinal vertical das temperaturas das na estação p6 e p28 a superfície e a respectivaprofundidade no dia 25 de Junho de 2014 às 12.30 horas

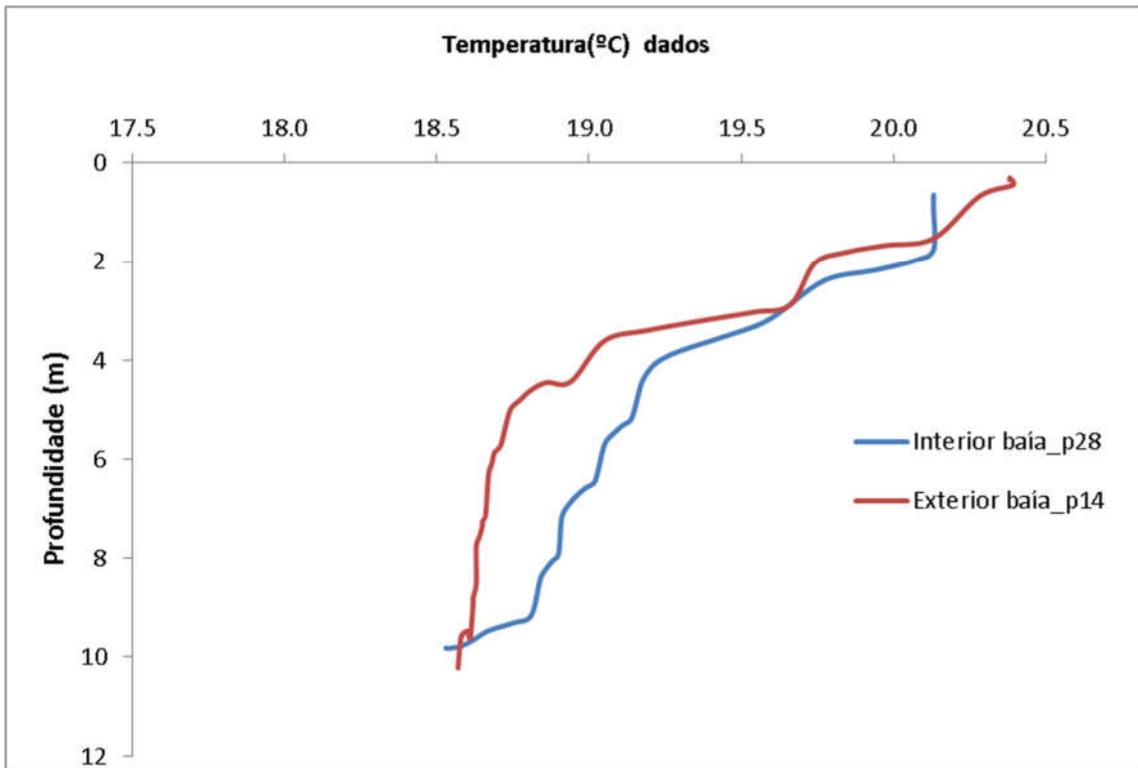


Figura A.4- Comparação dos perfis longitudinal vertical das temperaturas das na estação 28 com dados e o modelo a superfície e a respectiva profundidade no dia 25 de Junho de 2014 às 12.30 horas

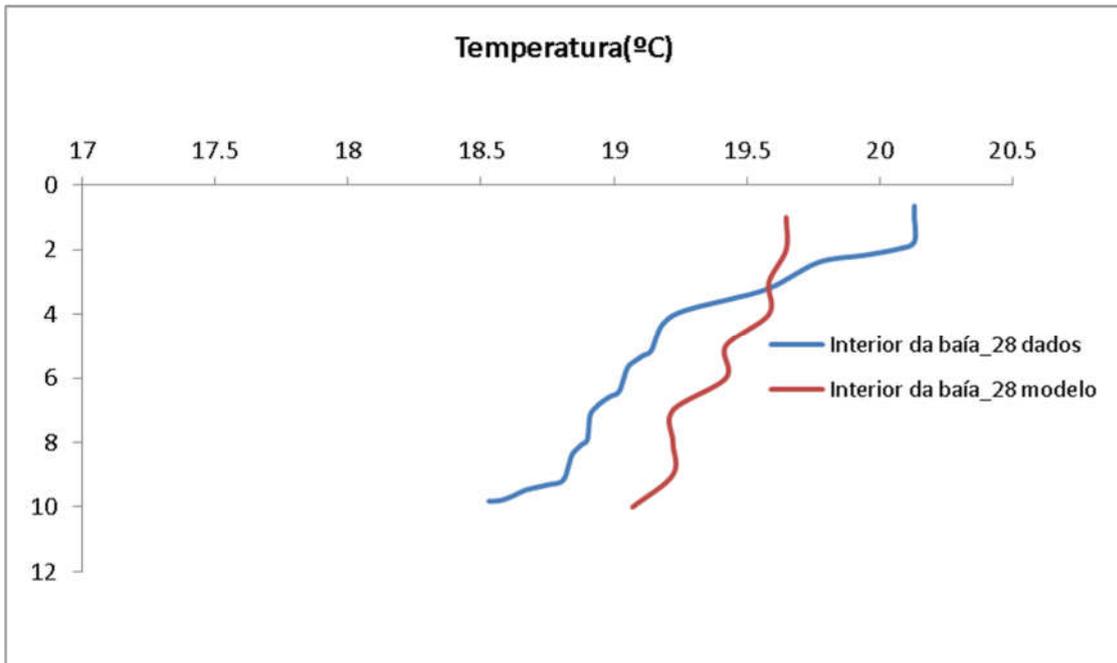


Figura A.5-Comparação dos perfis longitudinal vertical das temperaturas da na estação 14 com dados e o modelo a superfície e a respectiva profundidade no dia 25 de Junho de 2014 às 12.30 horas.

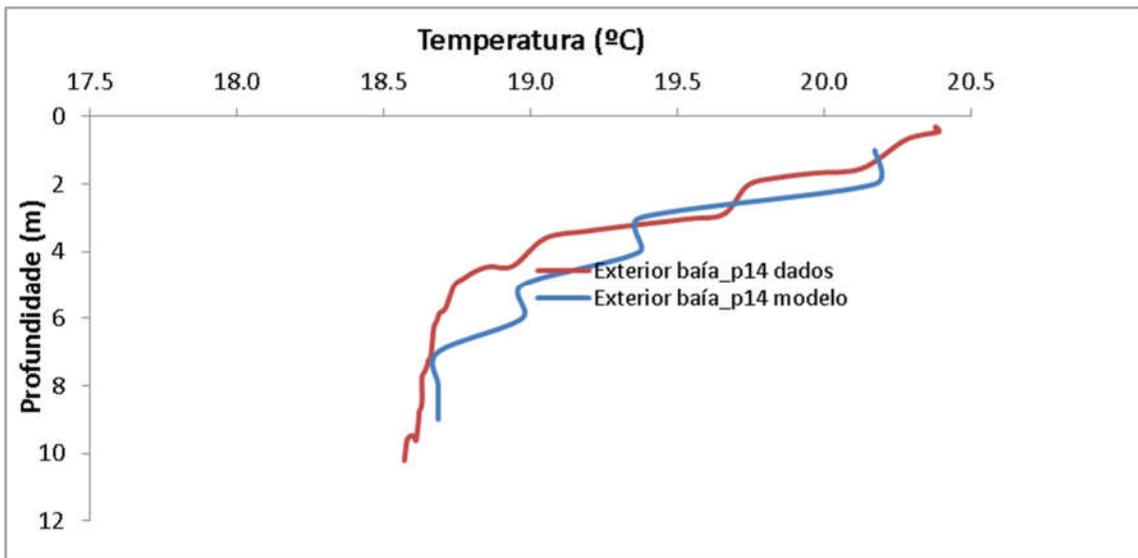


Figura A.6-Comparação dos perfis longitudinal vertical das temperaturas das na estação 6 com dados e o modelo a superfície e a respectiva profundidade no dia 25 de Junho de 2014 às 12.30 horas

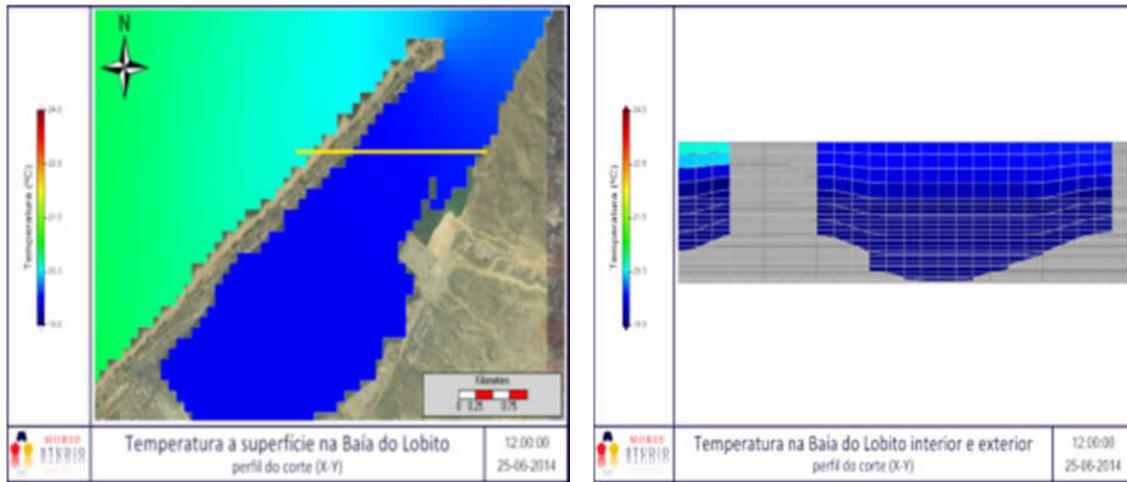


Figura A.7-Perfil corte horizontal da temperatura da baía do Lobito as 12 horas do dia 25-06-2014. A representação do corte diz que dentro da baía a água é mais fria do que fora .

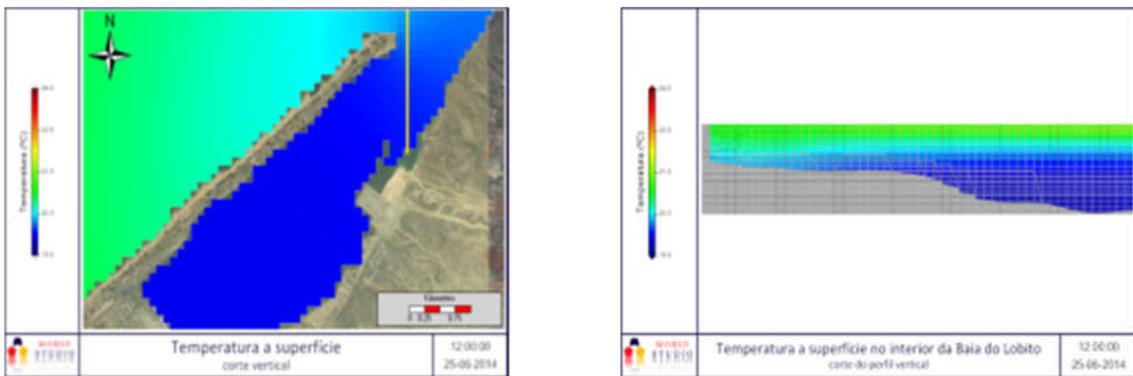


Figura A.8-Perfil corte vertical da temperatura da baía do Lobito as 12 horas do dia 25-06-2014 .A água com temperatura mais quente a superfície que no fundo

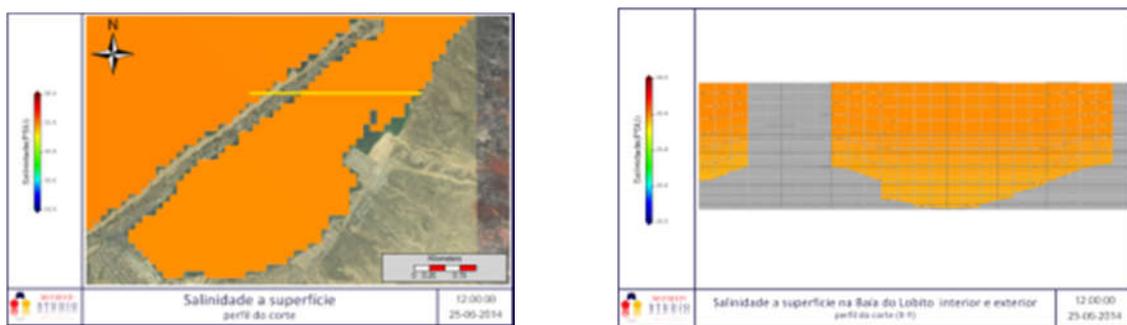
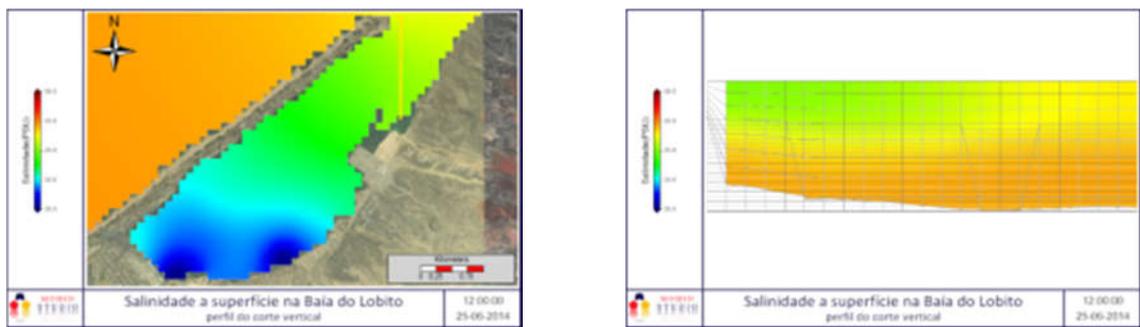


Figura A.9 Salinidade a superfície corte horizontal no dia 25 de junho às 12h, feita na camada XZ a meio do domínio, aproximadamente a embocadura da baía do Lobito.



*Figura A.10 Salinidade a superfície corte vertical no dia 25 de junho às 12h, feita na camada YZ a meio do domínio, aproximadamente a embocadura da baía do Lobito com descargas.*

## II-Anexo

Neste capítulo será apresentada a metodologia adoptada para os cálculos dos dados de entrada do modelo assim como os resultados obtidos, o que inclui as equações usadas assim como a parametrização associada a estas equações e as hipóteses consideradas

### Equações do modelo Fitoplâncton

A variação da variável de estado P (fitoplâncton) é dada por:

$$\frac{dP}{dt} = (\mu_p - r_p - e_p - m_p) \cdot P - (G_{ZZ}^P \cdot Z_2) \quad 16$$

$\mu_p$  Taxa de crescimento bruto;

$r_p$  - Taxa de respiração endógena e fotorrespiração;

$e_p$  - Fracção de produção primária excretada como DON/DOP;

$m_p$  Taxa de mortalidade natural do fitoplâncton

$G_{ZZ}^P$  Mortalidade devida à predação pelo mesozoplâncton.

A taxa de crescimento do fitoplâncton é dada por:

$$\mu_p^{max} \cdot \psi(T)_p \psi(L)_p \text{Min}[\psi(N)_p, \psi(P)_p] \quad 17$$

$\mu_p^{max}$  - Taxa de crescimento máxima para uma temperatura de referência.

$\psi(T)$ ,  $\psi(L)$ ,  $\psi(N)$  e  $\psi(P)$  representam os factores de limitação da temperatura, da luz, do azoto e do fósforo, respectivamente.

Factor de limitação dos nutrientes:

É usada uma função de Michaelis-Menten para as limitações de azoto e fósforo:

$$\psi(N)_p = \frac{N_{inorg}}{K_N^P + N_{inorg}} \quad 18$$

$K_N^P$  - Constante de semi-saturação do azoto inorgânico para o fitoplâncton

$N_{inorg}$  - Concentração de azoto inorgânico dissolvido (amónia + nitrato).

$$\psi(P)_p = \frac{P_{inorg}}{K_P^P + P_{inorg}} \quad 19$$

$K_P^P$  - Constante de semi-saturação de fósforo inorgânico para o fitoplâncton;

$P_{inorg}$  - Concentração de fósforo inorgânico dissolvido.

Factor de limitação da luz:

$$\psi(L)_p = \frac{I(z)}{I_s} \cdot e^{\left[1 - \frac{I(z)}{I_s}\right]} \quad 20$$

□

Em que:

$$I(z) = I_0 e^{(-K_d \cdot z)} \quad 21$$

$I$  - Intensidade de luz óptima para a fotossíntese;

$I_0$  -Radiação solar efectiva à superfície;

$z$  - Profundidade;

$K_d$  Factor de extinção da luz, obtido de acordo com Parsons *et al.* (1995):

$$K_d = 0,04 + 0,00088 \cdot ch^{2/3}$$

$Ch$  - Concentração de clorofila.

A respiração divide-se entre respiração nocturna e fotorrespiração. A respiração nocturna é definida de acordo com Parker *et al.* (1980), como sendo:

$$r_e = K_r^p e^{0,069T} \quad 22$$

$K_R^p$  - Constante de respiração endógena;

$T$  - Temperatura.

A fotorrespiração é proporcional à taxa fotossintética bruta, e é dada por:

$$r_p = K_p^p \mu_p \quad 23$$

$K$  - Fracção da fotossíntese que é oxidada por fotorrespiração.

Assim, a taxa de respiração é definida da forma:

$$r^p = r_e + r_p \quad 24$$

A taxa de excreção é dada por:

$$e_p = K_e^p \mu_p \cdot (1 - \psi(L)) \quad 25$$

$K_e^p$   $K$  - Constante de excreção.

A mortalidade natural, seguindo uma formulação de Michaelis-Menten modificada, proposta por Rodgers and Salisbury (1981), é:

$$m_e = m_{max}^{Tref} \frac{\frac{\rho}{\mu_p}}{k_m^p + \frac{\rho}{\mu_p}} \quad 26$$

$m_{max}^{Tref}$  - Taxa de mortalidade máxima;

$K_m^p$  - Constante de semi-saturação da mortalidade.

As concentrações de fitoplâncton morto são depois convertidas em azoto e fósforo usando rácios N:C e P:C ( $(P)_{N:C}$   $\alpha$  ( $(P)_{P:C}$   $\alpha$  da forma:

$$m_p^N = m_p - \alpha_{N:C}^p \quad 27$$

$$m_p^P = m_p \alpha_{P:C}^p \quad 28$$

### Zooplâncton

A variação temporal da biomassa de microzooplâncton é igual a:

$$\frac{dZ_1}{dt} (\mu_{z1} - e_{z1} - m_{z1}) \cdot Z_1 - G_{Z2}^{Z1} \cdot Z_2 \quad 29$$

$\mu_{z1}$  - Taxa de crescimento bruto;

$G_z$  - Taxa de predação por mesozooplâncton;

$m_{z1}$  - Taxa de mortalidade;

$e_{z1}$  - Taxa de excreção.

A predação das bactérias pelo microzooplâncton é dada por

$$\mu_{z1} = a_z \cdot G_{Z1}^B g_{z1}^{max} \cdot \psi_{z1}^B \cdot \psi(T)$$

A taxa de crescimento bruto do microzooplâncton é definida por:

$a_{z1}$  - Coeficiente de assimilação de bactérias pelo microzooplâncton;

$G_{Z1}^B$  - Predação de bactérias pelo microzooplâncton.

A predação das bactérias pelo microzooplâncton é dada por:

$G_{z1}^{max}$  - Taxa de ingestão máxima;

$\psi_{z1}^B$  - Factor de limitação da biomassa de bactérias disponível;

$\psi(T)$  - Factor de limitação da temperatura.

O factor de limitação por falta de alimento é calculado segundo uma formulação de Michaelis-Menten, que inclui um limiar da concentração de bactérias a partir da qual a predação deixa de existir ( $\psi_{pred}^{prey} = 0$ ).

$$\psi_{z1}^B = \frac{C_{Z1}^B \cdot B - S_{Z1}^{Bmin}}{k_{z1} + C_{Z1}^B B - S_{Z1}^{BMIN}}$$

Se  $C_{Z1}^B B - S_{Z1}^{Bmin} > 0$

$C_{z1}^B$  - Eficiência de captura de bactérias;

$S_{z1}^{Bmin}$  - Limiar da concentração de bactérias a partir da qual a predação deixa de existir;

$K_{z1}$  - Constante de semi-saturação para a predação.

Se a condição não for satisfeita, então  $\psi_{z1}^B = 0$

Mesozooplâncton

A variação temporal da biomassa de mesozooplâncton é:

$$\frac{d_{z2}}{dt} = (\mu_{z2} - e_{z2})z_2 \quad 31$$

$\mu_{z2}$ - Taxa de crescimento bruto;

$m_{z2}$ - Taxa de mortalidade;

$e_{z2}$ - Taxa de excreção.

$$\mu_{z2} = g_{z2}^{\rho} \cdot G_{z2}^{\rho} + g_{z2}^{z1} \cdot G_{z2}^{z1} \quad 31$$

$g_{z2}^{\rho}$ - Coeficiente de assimilação de microzooplâncton pelo mesozooplâncton;

$G_{z2}^{\rho}$  -Predação de fitoplâncton;

$G_{z2}^{z1}$ - Predação de microzooplâncton.

$$G_{z2}^{\rho} = (1 - \rho_{\rho}) \cdot (I_{max} - G_{z2}^{\rho}) \cdot \psi_{z2}^{\rho} \psi(T) \quad 32$$

$$G_{z2}^{z1} = (1 - \rho_{\rho}) \cdot (I_{max} - G_{z2}^{\rho}) \cdot \psi_{z2}^{z1} \psi(T) \quad 33$$

$\rho_{\rho}$  - Proporção de fitoplâncton na ingestão do mesozooplâncton;

$I_{max}$ - Taxa máxima de ingestão;

$\psi_{z2}^{\rho}$  - Factor de limitação por falta de fitoplâncton;

$\psi_{z2}^{z1}$ - Factor de limitação por falta de microzooplâncton.

Estes factores limitantes são definidos por:

$$\psi_{z2}^{\rho} = \frac{c_{z2}^{\rho} \cdot P - S_{z2}^{Pmin}}{K_{z2}^{\rho} + (c_{z2}^{\rho} + P - S_{z2}^{z1min})} \quad 34$$

$c_{z2}^{\rho}$ - Eficiência de captura de fitoplâncton;

$S_{z2}^{Pmin}$  - Limiar de concentração de fitoplâncton abaixo da qual deixa de haver predação;

$k_{z2}^{\rho}$ - Constante de semi-saturação para a ingestão de fitoplâncton;

$c_{z2}^{z1min}$ - Eficiência de captura de microzooplâncton;

$K_{z2}^{z1}$  - Constante de semi-saturação para a ingestão de microzooplâncton.

A taxa de mortalidade do Zooplâncton  $X m$  está directamente relacionada com a concentração das presas  $X F$ . Abaixo de um certo limiar de concentração de presas ( $minX F$ ), a mortalidade é alta e constante  $maxX m$ , uma vez que é assumido que a mortalidade do zooplâncton está ligada à falta de alimento. Assim, a mortalidade é calculada da forma:

$$m_x = \frac{a_x^m}{F_X} + m_x^0; \text{ Se } F_X > F_X^{min} \quad 35$$

$$m_x = m_x^{max}, \text{ se } F_x \leq F_x^{min}$$

$m_{0x}$ -; taxa de mortalidade mínima.

$a_{0x}^m$  factor de forma da curva de mortalidade

Cada grupo de zooplâncton tem os seus próprios valores de  $X F$ ,  $min X F$ ,  $max X m$ , e  $0 X m$ .  $X F$  para o microzooplâncton corresponde à concentração de bactérias e fitoplâncton, e para o mesozooplâncton corresponde às concentrações de fitoplâncton e microzooplâncton.

O carbon libertado neste processo é convertido a azoto e fósforo utilizando rácios de N:C e P:C ( $\alpha_x^N$ )e( $\alpha_x^P$ ).

$$\begin{aligned} m_x^P &= m_x \cdot \alpha_x^N \\ m_x^P &= m_x \cdot \alpha_x^P \end{aligned} \quad 36$$

A taxa de excreção  $e_x$  é dada por Andersen e Nival (1989) como uma função da temperatura:

$$e_x = (a_x \cdot b_x) \quad 37$$

$a_x$ - Taxa de excreção a 0°C;

$b_x$ - Factor de forma para a curva de excreção;

$T$  - Temperatura.

O carbono libertado é convertido a azoto e a fósforo usando os rácios de N:C e P:C( $\alpha_x^N$ )e( $\alpha_x^P$ )

$$e_x^N = e_x^r \cdot \alpha_x^N \quad 38$$

$$e_x^P = e_x^r \cdot \alpha_x^P$$

A taxa de respiração  $r_x$  é usada para a simulação do oxigénio. É assumido que o consumo de oxigénio pelos organismos heterotróficos é constante  $\rho_x$  e que todo o processo é dependente da temperatura  $\psi(T)$ . Assim, a taxa de respiração é dada por:

$$r_x = p_x \psi(T) \quad 39$$

### Dinâmica de nutrientes

Taxa de nitrificação:

$$K_{dnit} = K_{nit}^{ref} T_{nit}^{(T-20.0)} \cdot \frac{[O_2]}{K_{nit}^{sat} + [O_2]} \quad 40$$

$K_{nit}^{ref}$  - Taxa de nitrificação de referência;  
 $T_{nit}$  - Coeficiente de temperatura da nitrificação;  
 $T$  - Temperatura;  
 $K_{nit}^{sat}$  - Constante de semi-saturação da nitrificação.

Taxa de desnitrificação:

$$K_{dnit} = K_{dnit}^{ref} \cdot T_{dnit}^{(T-20.0)} \frac{K_{dnit}^{sat}}{K_{dnit}^{sat}(O_2)} \quad 41$$

$K_{dnit}^{ref}$  - Taxa de desnitrificação de referência;  
 $T_{dnit}$  - Coeficiente de temperatura da desnitrificação;  
 $K_{dnit}^{sat}$  - Constante de semi-saturação da desnitrificação.

Taxa de decomposição do azoto orgânico particulado (PON):

$$k_{dec}^{Np} = k_{dec}^{ref} T_{dec}^{(T-20.0)} \cdot \frac{\rho}{K_r^\rho + P} \quad 42$$

$K_{dec}^{ref}$  - Taxa de referência de decomposição de PON;  
 $T_{dec}$  - Coeficiente de temperatura associado à decomposição de PON.  
Taxa de mineralização do azoto orgânico dissolvido refractário DONre:

$$k_{min}^{Ndr} = k_{min}^{ref} T_{min}^{(T-20.0)} \frac{\rho}{K_r^\rho + P} \quad 43$$

$K_{min}^{ref}$  Taxa de referência da mineralização de DONre;

$T_{min}$  - Coeficiente de temperatura associado à mineralização de DONre;  
 $K_r^\rho$  - Taxa de semi-saturação para a regeneração de nutrientes pelo fitoplâncton.

Taxa de mineralização do azoto orgânico dissolvido não refractário DONnr:

$$k_{min}^{\rho Ndr} = k_{min}^{ref} T_{min}^{(T-20.0)} \frac{\rho}{K_r^\rho + P} \quad 44$$

$K_{min}^{ref}$  - Taxa de referência da mineralização de DONnr;

$T_{min}$  - Coeficiente de temperatura associado à mineralização de DONnr;

$K_r^\rho$  - Taxa de semi-saturação para a regeneração de nutrientes pelo fitoplâncton.

Taxa de mineralização do fósforo orgânico dissolvido não refractário DOPnr:

**Nitrato ( $NO_3$ )**

$$\frac{dN_1}{dt} = -[(1 - \Phi_{N_2}) \alpha_P \cdot \mu_P] \cdot P + K_{nit} N_{1-2} - K_{dnit} \cdot N_1 \quad 45$$

O factor de preferência  $\Phi_{N_2}$  usado no modelo é descrito pela fórmula:

$$\Phi_{N_2} = \frac{[N_1] \cdot [N_2]}{K_N^P + [N_1]} + \frac{K_N^P \cdot [N_2]}{[N_1] + [N_2] \cdot K_{N+}^P [N_1]} \quad 46$$

$K_N^P$ - Constante de semi-saturação do azoto.

**Nitrito ( $NO_2$ )**

$$\frac{dN_{1-2}}{dt} K_{nit} N_2 - K_{nit} N_{1-2} \quad 47$$

**Amónia  $NH_4^+$**

$$\begin{aligned} \frac{dN_2}{dt} = & [(e_p^N \cdot \varepsilon_p^{SOL}) - (\Phi_{N_2} \mu_p \alpha_p)]P + [(e_B \alpha_B) - \mu_B^{N_2}]B + (e_{Z1}^N \varepsilon_Z^{SOL}) + (e_{Z2}^N \varepsilon_Z^{SOLIn})Z_2 \\ & + K_{min}^{Ndr} N_{dr} + (k_{dec}^{Np} \Phi_p) \cdot N_p - K_{nit} N_2 \end{aligned} \quad 48$$

$\Phi_{N_2}$  -Factor de preferência de amónia para o fitoplâncton;

$\varepsilon_p^{solIn}$  -Fracção de inorgânicos dissolvidos excretados pelo fitoplâncton;

$\varepsilon_Z^{solIn}$  Fracção de material inorgânico solúvel excretado pelo zooplâncton;  
 $\Phi_p$  PON disponível para mineralização em amónia.

**Azoto orgânico dissolvido não refractário (DONnr)**

$$\begin{aligned} \frac{dN_{dnr}}{dt} = & [(1 - \varepsilon_p^{Sol}) e_p^N \varepsilon_p^{Sol}]P - [(\mu_B^{Ndr2})B] + [(e_{Z1}^N \varepsilon_Z^{SOL}) \\ & + (e_{Z1}^N (1 - \varepsilon_Z^{SolIn}) \varepsilon_Z^{Diss or})Z_1 + (e_{Z2}^N (1 - \varepsilon_Z^{Sol}) \varepsilon_Z^{Diss org})Z_2 \end{aligned} \quad 49$$

$\varepsilon_p^{Dis or}$  - Fracção de orgânicos dissolvidos excretados pelo fitoplâncton;

$\varepsilon_Z^{Dis or}$  Fracção de orgânicos dissolvidos excretados pelo zooplâncton.

**Azoto orgânico dissolvido refractário (DONr)**

$$\frac{dN_{dnr}}{dt} = K_{dec}^{Np} (1 - \Phi_p) N_p - K_{min}^{Ndr} N_{dr} \quad 50$$

**Azoto Orgânico particulado (PON)**

$$\begin{aligned} \frac{dN_p}{dt} = & [e_p^N \cdot (1 - \varepsilon_p^{Sol})(1 - \varepsilon_p^{Dis or}) m_p^N e_p^N] P - [(\mu_B^{Np} + m_p^N)] B \\ & + [(m_{Z1}^N + (1 a_{z1}) G_{Z1}^B \alpha_B + e_{Z1}^N (1 - \varepsilon_Z^{Sol}) ((1 - \varepsilon_Z^{Dis or}) + \varepsilon_Z^{Diss or}) J_{Z1} \\ & + [e_{Z2}^N (1 - \varepsilon_p^{Sol})(e_{Z2}^N (1 - \varepsilon_p^{Dis or}) + m_{Z2}^N J_{Z2} + \delta_p \varphi_n \quad 51 \end{aligned}$$

$\delta_p$  – Perdas estequiométricas de alimento na cadeia trófica, definido por:  
(stoichiometric food web losses);

$$\delta_p = (1 - g_{z2}^p) G_{z2}^p \alpha_{z2} + (1 - g_{z2}^p) G_{z2}^p \alpha_{z1} \quad 52$$

$\varphi_N$  – Fitoplâncton e microzooplâncton não assimilados.

$$\varphi_N = \mu_{Z2} (\alpha_x^p - \alpha_x^{Z2}) \quad 53$$

### Fósforo inorgânico

$$\begin{aligned} \frac{d\Phi^P}{dt} = & [f_{inorg}^{phy}] (e_{phy} r_{phy}) \alpha_{PC}^{phy} - \mu_{phy} \alpha_{PC}^{phy} Phy + \alpha_{PC}^{phy} J_{Phy} + [(f_{inor}^{z1} e_{z1} + \\ & r_{z1}) \alpha_{PC}^{z1}] Z_1 + [(f_{inor}^{z2} e_{z2} + r_{z2}) \alpha_{PC}^{z1}] Z_2. \quad 54 \end{aligned}$$

$f_{inor}^x$  - Fração de material orgânico dissolvido excretado por X,

$X \equiv Phy(\text{fitoplâncton}, Z_1, Z_2)$

$f_{inor}^x$  - Fração de PON disponível para mineralização;

$K_{dec}^{POP}$  - Taxa de decomposição de POP;

$K_{min}^{DOPnr}$  – Taxa de mineralização de DOPre;

### Fosforo orgânico particulado

$$\begin{aligned} \frac{d\Phi^{pop}}{dt} = & [(1 - f_{inorg}^{phy}) \cdot (1 - f_{inorg}^{phy}) (e_{phy} + r_{phy}) + m_{phy}] \alpha_{PC}^{phy} Phy \\ & + (1 - f_{inorg}^{z1}) (1 - f_{org}^{z2}) e_{z1} + m_{z2} + p^{z2}. \end{aligned}$$

$$\alpha_{PC}^{z1} Z_1 + (\delta_P^{z2} + \varphi_P^{z2})$$

$$Z_1 + (1 - f_{org}^z) \cdot (1 - f_{orgD}^z) e_{z1} + m_{z2} + p^{z2} \quad 55$$

$$\cdot \alpha_{PC}^{z1} Z_1 + (\delta_P^{z2} + \varphi_P^{z2}) Z_2$$

$$- (1 - f_{orgp}) k_{dec}^{pop} - f_{org} K_{dec}^{pop} \Phi^{pop}$$

$f_{orgD}^x$  - Fração de material orgânico dissolvido excretado por X;

$\alpha_{PC}^X$  - Rácio de P:C para os organismos X,  $X \equiv Phy, z_1 z_2$

### Fosforo orgânico dissolvido não refractário

$$\frac{d\Phi^{DOPnr}}{dt} = [(1 - f_{inorg}^{phy}) \cdot (1 - f_{inorg}^{phy})(e_{phy} + r_{phy}) + m_{phy}] \alpha_{PC}^{phy} Phy + (1 - f_{inorg}^{z1}) f_{orgD}^z e_{z1} \alpha_{PC}^{z1} Z_1 + (1 - f_{inorg}^{z2}) f_{orgD}^{z3} e_{z1} \alpha_{PC}^{z3} Z_2 - k_{min}^{DOPnr} \Phi^{DOPnr}. \quad 56$$

### Fosforo orgânico dissolvido refractário

$$\frac{d\Phi^{DOPre}}{dt} = (1 - f_{org}) K_{dec}^{POP} \Phi^{POP} - K_{min}^{DOPre} \Phi^{DOPre} \quad 57$$

Efeito da Temperatura

O efeito da temperatura  $\psi(T)$ , nos vários processos biológicos simulados pelo modelo ecológico segue o conceito de Thornton & Lessen (1978):

$$\psi(T) = K_A^{(T)} * K_B^{(T)}$$

Em que,

$$K_A^{(T)} = \frac{K_1 \cdot e^{\gamma_1 \cdot (T - T_{min})}}{1 + K_1 \cdot e^{\gamma_1 \cdot (T - T_{min})} - 1}$$

$$K_B^T = \frac{K_4 \cdot e^{\gamma_2 \cdot (T_{max} - T)}}{1 + K_4 \cdot e^{\gamma_2 \cdot (T_{max} - T)} - 1}$$

Com

$$\gamma_1 = \frac{\ln \frac{k(1 - k_2)}{k(1 - k_2)}}{T_{min}^{opt} - T_{min}}$$

$$\gamma_2 = \frac{\ln \frac{k(1 - k_2)}{k(1 - k_3)}}{T_{min}^{opt} - T_{max}}$$

$T_{max}^{opt}$  - Temperatura máxima para o intervalo óptimo de crescimento;

$T_{min}^{opt}$  - Temperatura mínima para o intervalo óptimo de crescimento;

$T_{min}$  - Temperatura mínima tolerável;

$T_{max}$  - Temperatura máxima tolerável.

As restantes constantes  $k_1$  ,  $k_2$  ,  $k_3$  , and  $k_4$ , são usadas para controlar a forma da curva da resposta do efeito de temperatura.

Dada a falta de conhecimento relativamente ao efeito da temperatura nos vários organismos considerados, estes valores são considerados iguais para todos os organismos simulados