



INSTITUTO SUPERIOR TÉCNICO  
Universidade Técnica de Lisboa

# **Balanço de nutrientes na plataforma continental ao largo da Região de Aveiro**

**João Luís Lopes Da Cruz de Barros Sobrinho**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em

**Engenharia do Ambiente**

## **Júri**

Presidente do Júri: Professor Doutor José Manuel de Saldanha Gonçalves Matos

Orientador: Professor Doutor Ramiro Joaquim de Jesus Neves

Co-Orientador: Doutor Marcos Duarte Mateus

Vogal: Doutora Ana Maria Domingos Nobre

**Junho 2012**



## **Agradecimentos**

No decurso deste trabalho, destacam-se muitas pessoas que, de uma forma ou de outra, contribuíram para a sua concretização e às quais gostaria de agradecer:

Em primeiro lugar, ao Prof. Dr. Ramiro Neves, do Departamento de Mecânica do Instituto Superior Técnico pela orientação prestada, pelos ensinamentos e discussões sobre o tema da modelação, e pelo apoio e optimismo constantes nestes últimos 6 meses. Quero também agradecer ao Guillaume, por toda a ajuda e paciência na implementação e resolução dos constantes erros que iam aparecendo na implementação do modelo, especialmente por me ter ensinado a trabalhar com a principal ferramenta usada nesta dissertação, o MOHID studio.

Ao Francisco, pela ajuda na construção da nova batimetria melhorada do modelo PCOMS-BIO e por todo o trabalho que teve para me fornecer os dados essenciais para o forçamento do meu modelo.

A toda a equipa da MARETEC – Instituto Superior Técnico, pela ajuda directa ou indirecta e pela constante disponibilidade e amizade demonstrada ao longo deste trabalho.

A todos os meus amigos pelo apoio e boa disposição que me deram ao longo deste trabalho, especialmente à Marta pela enorme paciência, apoio e carinho no decorrer deste trabalho, que parecia não ter fim.

Finalmente, aos meus pais, pelo apoio em todos os níveis, e pelos incentivos e motivação constantes durante a concretização deste trabalho, e ao longo dos últimos cinco anos do curso.

Parte deste trabalho foi realizado no âmbito do Projecto DyEPlume - PTDC/MAR/107939/2008 com o apoio financeiro da Fundação para a Ciência e a Tecnologia no âmbito do III Quadro Comunitário de Apoio.



## Resumo

A zona costeira de Portugal é bastante produtiva, devido especialmente a eventos de afloramento costeiro nos meses de primavera/verão, ou *upwelling* que provoca um aumento considerável de nutrientes na plataforma continental. Este aumento, que ocorre nos meses de primavera e verão, aliado à maior intensidade solar registada no mesmo período, é responsável pelo aumento de produtores primários junto à costa.

Neste trabalho é estudada a importância em termos de tendências, de três fontes de nutrientes para a concentração de nitratos e fitoplâncton na plataforma continental ao largo da região de Aveiro. As três fontes consideradas consistem no oceano, na Ria de Aveiro e no emissário submarino de São Jacinto, sendo que o último descarrega afluentes, a cerca de 3 km da costa, de três ETARs (Norte, Sul e S. Jacinto) e da Portucel, que sofrem actualmente um tratamento secundário.

Foi para isso usado um modelo 3D ecológico e hidrodinâmico (MOHID) encaixado num modelo regional para a costa portuguesa (PCOMS-BIO) e que simulou os ciclos biogeoquímicos do azoto e fósforo, um grupo de produtores primários, o fitoplâncton e um grupo de consumidores primários, o zooplâncton. Os resultados obtidos sem o modelo estar validado sugerem que a descarga da Ria de Aveiro representa entre 0.25 e 900% (este último perto da foz) da concentração de nitrato e entre 2.5 e 43% da concentração de fitoplâncton. Já a contribuição do emissário submarino, relativamente à descarga da Ria de Aveiro, apenas ultrapassa 1% na zona em que a descarga é efectuada.

**Palavras-Chave:** MOHID, modelação ecológica, qualidade da água, Aveiro, emissário submarino.

## Abstract

The coastal area of Portugal is very productive, especially owing to the coastal upwelling during the spring/summer months, which causes a significant increase in nutrients on the continental platform. This increase, which occurs in spring and summer, linked to the greater sun exposure registered in the same period, is responsible for the increase of primary producers near the coast.

This work examines the importance of three sources of nutrients for the concentration of nitrates and phytoplankton on the continental shelf off the region of Aveiro, which are the ocean, the Ria de Aveiro, and the São Jacinto submarine outfall, the latter discharging water from the three WWTPs (North, South and S. Jacinto), and from Portucel, which currently undergo a secondary treatment about 2 km from the coast.

A 3D ecological and hydrodynamic model (MOHID) was built for this process, embedded in a regional model for the Portuguese coast (PCOMS-BIO), which simulated the biogeochemical cycles of nitrogen and phosphorus, a group of primary producers, phytoplankton, and a group of primary consumers, zooplankton. The results obtained suggest that the discharge from the Ria de Aveiro represent between 0.25 and 900% (the latter near the mouth of the river) of the nitrate concentration, and between 2.5 and 43% of the phytoplankton concentration. On the other hand, the contribution of the submarine outfall, in the case of the Ria de Aveiro discharge, is only 1% higher in the area in which the discharge takes place.

**Key-words:** MOHID, ecological modelling, water quality, Aveiro, submarine outfall.

# Índice

1. Introdução.....	1
1.1. Descrição do problema.....	1
1.2. Objectivos.....	2
1.3. Metodologia geral.....	2
2. Descrição do local de estudo.....	5
2.1. Ria de Aveiro.....	5
2.1.1. Caracterização espacial e hidrodinâmica.....	6
2.1.2. Carga de nutrientes afluyente.....	6
2.2. Zona Costeira.....	7
2.2.1. Hidrodinâmica.....	7
2.2.2. Nutrientes e oxigénio.....	9
2.3. Emissário Submarino de São Jacinto.....	11
2.3.1. Caracterização do emissário.....	12
2.3.2. Caudais e cargas descarregadas pelo emissário.....	13
3. O modelo hidrodinâmico.....	15
3.1. Equações do modelo.....	15
3.2. Condições iniciais e de fronteira.....	18
3.3. Parametrização do modelo.....	19
3.4. Implementação do modelo.....	19
3.4.1. Batimetria.....	19
3.4.2. Dados de fluxos e forçamento.....	22
3.4.3. Validação do modelo hidrodinâmico.....	24
4. Modelo ecológico.....	27
4.1. Equações do modelo.....	27
4.2. Parametrização do modelo.....	29
5. Resultados e Discussão.....	33
5.1. Validação do modelo ecológico.....	33
5.2. Correção da Hidrodinâmica.....	35
5.3. Cenários - hidrodinâmica.....	37
5.4. Cenários – Fluxos de água e nutrientes.....	41
5.5. Cenários – Séries temporais.....	44
6. Conclusões.....	51
Bibliografia.....	53
Anexos.....	57
Anexo I - Metodologia de cálculo dos <i>inputs</i> de nutrientes e fluxos de caixas.....	59
Emissário Submarino.....	59

Fluxos de massa entre caixas .....	67
Anexo II - Descrição do modelo ecológico. ....	69
Parametrização .....	69
Anexo III - Equações do modelo ecológico .....	75



## Índice de Figuras

Figura 1: Representação das caixas usadas para o estudo dos fluxos de nutrientes (a vermelho) e a localização dos pontos usados nas séries temporais para as concentrações dos nutrientes (a preto).....	3
Figura 2: Localização do local de estudo com destaque para as 3 fontes de nutrientes (Oceano, Ria de Aveiro e o emissário submarino de S. Jacinto). .....	5
Figura 3: Carga afluyente de amónia (ton/ano) à esquerda e de nitrato (ton/ano) à direita Fonte: (INAG, 2003).....	7
Figura 4: Carga fluente de DON (ton/ano) à esquerda e de PON (ton/ano) à direita. Fonte: (INAG, 2003).....	8
Figura 5: Esquema do processo de afloramento costeiro. Fonte: (Cordell Bank National Marine Sanctuary.) .....	9
Figura 6: Representação das concentrações de nitrato e fitoplâncton (na forma de clorofila), verificadas no oceano pelo modelo operacional para a costa portuguesa (BIO-PCOMS), e que força o modelo local construído para este trabalho. ....	10
Figura 7: Perfil de nutrientes no oceano. Fonte: (NODC) .....	10
Figura 8: Perfil de oxigénio no oceano. Fonte: (NODC) .....	11
Figura 9: Esquema do sistema de saneamento de Aveiro. Fonte: (SIMRIA) .....	12
Figura 10: localização do emissário submarino de São Jacinto.....	12
Figura 11: Contribuição relativa de caudal das ETARs e da Portucel.....	14
Figura 12: Contribuição relativa de azoto total de cada ETAR. ....	14
Figura 13: Contribuição relativa de fósforo total de cada ETAR. ....	14
Figura 14: Representação esquemática do algoritmo de cálculo das velocidades segundo Abbott (Abbott, et al., 1973).....	15
Figura 15: Batimetria da janela do modelo regional PCOMS-BIO de origem com dados do SRTM. ....	20
Figura 16: Batimetria do modelo local encaixada na batimetria do modelo regional PCOMS-BIO original, com dados do SRTM. ....	20
Figura 17: Batimetria da janela do modelo regional PCOMS-BIO corrigida com os dados do EMODnet.....	21
Figura 18: Batimetria do modelo local corrigida com os dados do EMODnet.....	21
Figura 19: localização das descargas da Ria de Aveiro e do emissário submarino de S. Jacinto (a preto).....	23
Figura 20: Mapa 2D da temperatura à superfície para 31/03/2011, obtido pelo modelo. ....	25
Figura 21: Mapa 2D da temperatura à superfície captado por satélite para 31/03/2011. ....	26
Figura 22: Esquema da dinâmica de nutrientes associados à qualidade da água. ....	28
Figura 23: Dinâmica do fitoplâncton assumido pelo modelo ecológico. ....	29
Figura 24: Mapa 2D da concentração de fitoplâncton à superfície para 31/03/2011, obtido pelo modelo.....	34

Figura 25: Mapa 2D da concentração de fitoplâncton à superfície para 31/03/2011, captado por satélite.....	34
Figura 26: Mapas da temperatura, a 17 de Março, originado pelo forçamento do PCOMS-BIO: corrigido com dados do EMODnet (à esquerda); original com dados do SRTM30 (à direita). ...	35
Figura 27: Mapa da salinidade, a 17 de Março, originado pelo forçamento do PCOMS-BIO: corrigido com dados do EMODnet (à esquerda); original com dados do SRTM30 (à direita). ...	36
Figura 28: Módulo da velocidade, a 10 de Março, resultado do forçamento do PCOMS-BIO: corrigido com dados do EMODnet (à esquerda); original com dados do SRTM30 (à direita). ...	36
Figura 29: Mapa do módulo da velocidade, a 10 de Março, fornecido pelo PCOMS-BIO: corrigido com dados do EMODnet (à esquerda); original com dados do SRTM30 (à direita). ...	37
Figura 30: Afloramento costeiro reproduzido pelo modelo hidrodinâmico assim como a localização do corte vertical (à esquerda e a preto).....	38
Figura 31: Corte vertical da concentração de nitrato para o caso da descarga da Ria no dia 20 de Março às 04h, feita na camada XZ a meio do domínio (recta a preto), aproximadamente na mesma latitude que a célula da descarga da Ria de Aveiro. ....	38
Figura 32: Corte vertical da concentração de nitrato para o caso da descarga da Ria no dia 10 de Abril às 06h, feita na camada XZ a meio do domínio, aproximadamente na mesma latitude que a célula da descarga da Ria de Aveiro.....	39
Figura 33: Mapa 2D da salinidade (esquerda) e da temperatura (direita) à superfície para o caso da introdução da descarga da Ria de Aveiro. ....	39
Figura 34: Mapa de velocidades com a descarga da Ria de Aveiro (esquerda) e sem descargas (direita), a 8 de Abril.....	40
Figura 35: Relação entre a velocidade e direcção do vento, e a direcção dos fluxos de água no sentido Sul-Norte. ....	41
Figura 36: Fluxos de água ( $10^6\text{m}^3/1$ mês) entre as caixas de integração implementadas: sem descargas (à esquerda); com a descarga da Ria de Aveiro (à direita). ....	42
Figura 37: Fluxos de nitrato (ton/1mês) entre as caixas de integração implementadas: sem descargas (à esquerda); com a descarga da Ria de Aveiro (à direita). ....	42
Figura 38: Fluxos de fitoplâncton (Ton/1 mês) entre as caixas de integração implementadas: sem descargas (à esquerda); com a descarga da Ria de Aveiro (à direita).....	43
Figura 39: Comparação entre as séries temporais dos vários cenários obtidas para a célula na fronteira Norte. Cenário 1 – sem descargas; cenário 2 – descarga da Ria de Aveiro; cenário 3 – todas as descargas. ....	45
Figura 40: Comparação entre as séries temporais dos vários cenários obtidas para a célula na fronteira Oeste. Cenário 1 – sem descargas; cenário 2 – descarga da Ria de Aveiro; cenário 3 – todas as descargas. ....	46
Figura 41: Comparação entre as séries temporais dos vários cenários obtidas para a célula em que é feita a descarga do emissário. Cenário 1 – sem descargas; cenário 2 – descarga da Ria de Aveiro; cenário 3 – todas as descargas. ....	47
Figura 42: Comparação entre as séries temporais dos vários cenários obtidas para a célula na fronteira Norte. Cenário 1 – sem descargas; cenário 2 – descarga da Ria de Aveiro; cenário 3 – todas as descargas. ....	48

Figura 43: Comparação entre as séries temporais dos vários cenários obtidas para a célula na fronteira Oeste. Cenário 1 – sem descargas; cenário 2 – descarga da Ria de Aveiro; cenário 3 – todas as descargas. ....	48
Figura 44: Comparação entre as séries temporais dos vários cenários obtidas para a célula em que é feita a descarga do emissário. Cenário 1 – sem descargas; cenário 2 – descarga da Ria de Aveiro; cenário 3 – todas as descargas. ....	49
Figura 45: Taxas de transformação das várias formas de azoto em NO <sub>3</sub> e percentagens de perda associadas ao tratamento primário. ....	63

## Índice de tabelas

Tabela 1: Características do difusor. ....	13
Tabela 2: Geometria 3D implementada para o modelo, especificando as espessuras das camadas cartesianas e sigma. ....	22
Tabela 3: Caudais médios mensais do Emissário submarino.....	24
Tabela 4: Concentração de nutrientes no emissário submarino. ....	24
Tabela 5: Parametrização do modelo ecológico.....	30
Tabela 6: Carga de nutrientes à entrada da ETAR Norte. ....	60
Tabela 7: Carga de nutrientes à entrada da ETAR Sul. ....	60
Tabela 8: Carga de nutrientes à entrada da ETAR de S. Jacinto. ....	61
Tabela 9: Discriminação das várias formas de azoto nas águas residuais (com base em (Metcalf & Eddy, 2003)).....	62
Tabela 10: Discriminação das várias formas de fósforo nas águas residuais (com base em (Metcalf & Eddy, 2003)).....	62
Tabela 11: Fração das várias formas de azoto após tratamento, usadas para o cenário 1. ....	63
Tabela 12: Fração das várias formas de fósforo após tratamento, usadas para o cenário 1. ...	63
Tabela 13: Concentrações médias mensais obtidas para a ETAR SUL. ....	64
Tabela 14: Concentrações médias mensais obtidas para a ETAR NORTE.....	64
Tabela 15: Concentrações médias mensais obtidas para a ETAR de S. Jacinto. ....	65
Tabela 16: Factor de multiplicação para as diferentes formas de azoto e fósforo assumidas para a descarga da PORTUCEL. ....	65
Tabela 17: Massa mensal afluyente ao emissário, das propriedades presentes no efluente da PORTUCEL. ....	66
Tabela 18: Caudais médios mensais efluentes das 3 ETARs e da PORTUCEL.....	66
Tabela 19: Concentrações dos vários nutrientes descarregados pelo emissário de S. Jacinto. 67	
Tabela 20: Parâmetros e respectivos valores usados incluídos no modelo ecológico.....	69

## **Lista de abreviaturas**

AID – Alternating direction implicit.

EMODnet – European Marine Observation and Data Network.

ETAR - Estação de tratamento de águas residuais.

FORTTRAN - Mathematical formula translating system.

GEBCO- General bathymetric chart of the oceans.

GOTM – General ocean turbulence model.

HDF - Hierarchical data format.

IH - instituto hidrográfico.

INAG – Instituto Nacional da Água.

IST – Instituto Superior Técnico.

MM5 – Mesoscale Model.

MOHID - Modelo hidrodinâmico.

NODC – National Oceanographic Data Center.

PCOMS – Portuguese Coast Operational Modelling system.

PCOMS-BIO- Portuguese Coast Operational Modelling system with an ecological model incorporated.

SIMRIA - Sistema Municipal da Ria de Aveiro.

SRTM30 – *Shuttle Radar Topography Mission*.



# 1. Introdução

A zona costeira portuguesa, tal como outras zonas de afloramento costeiro, é muito interessante não só do ponto de vista hidrodinâmico como ecológico, onde a produtividade biológica é muito superior em relação ao oceano aberto, tornando estas zonas particularmente importantes na economia das regiões que delas usufruem. São ainda as zonas em que os processos hidrodinâmicos são mais intensos, devido às perturbações no talude continental e às correntes submarinas que se deslocam em direcção ao pólo norte (Coelho, et al., 1998).

Em termos de nutrientes, o oceano profundo pode ser considerado uma fonte inesgotável. No entanto, estes estão praticamente inacessíveis aos produtores primários, uma vez que se encontram em concentrações extremamente baixas, excepto em profundidades muito superiores àquela a que a luz consegue atingir.

A elevada quantidade de nutrientes que aparece na primavera e no início do verão nestas zonas, é explicada pelo transporte nutrientes do fundo do oceano para as camadas superficiais, através do processo de afloramento costeiro (*upwelling*), e das contribuições dos rios que nelas desaguam. Quando estes nutrientes chegam à zona fótica são consumidos pelos produtores primários. Afloramentos costeiros ocorrem especialmente durante os meses de primavera e início de verão, por influência dos ventos dominantes, que juntamente com uma maior intensidade solar fazem com que os produtores cresçam a uma velocidade superior durante este período, comparativamente com os restantes meses.

## 1.1. Descrição do problema

No local de estudo existem três fontes de nutrientes que afluem ao meio receptor: 1) o oceano pelos eventos de afloramento costeiro; 2) a pluma da Ria de Aveiro (estuário do rio Vouga); 3) o emissário submarino de S. Jacinto que descarrega as águas tratadas das ETARs Norte, Sul e de S. Jacinto, e da Portucel.

Existe a possibilidade do meio receptor poder beneficiar da actual descarga do emissário uma vez que este contribui para o aumento da produção primária e, conseqüentemente, para as espécies de peixes existentes na costa (que constituem uma fonte de alimentação bastante vasta para a população humana). No entanto, também existe a possibilidade de os nutrientes descarregados pelo emissário serem transportados para zonas costeiras mais a Norte, onde são finalmente consumidos, podendo assim criar problemas de qualidade da água longe do local da descarga.

O problema em questão é saber se é necessário melhorar a qualidade da água descarregada pelas ETARs Norte, Sul e de S. Jacinto, e pela Portucel, que pode influenciar o estado trófico actual das águas costeiras de Aveiro. Actualmente, as águas descarregadas por estas ETARs são sujeitas a um tratamento secundário que oxida a matéria orgânica, convertendo-a em

azoto e fósforo minerais, tendo sido proposta a aplicação de um tratamento terciário, que consiste na remoção de azoto e fósforo minerais, às águas descarregadas de modo a melhorar a sua qualidade e diminuir o impacto do emissário submarino no meio receptor.

Uma vez que a introdução do tratamento terciário tem custos associados elevados, é necessário avaliar o impacto actual e futuro destas águas no meio receptor, com especial ênfase para o estado trófico. De modo a estudar este impacto antes e depois da introdução do novo tratamento (terciário), sem este estar ainda implementado na actualidade, é necessário recorrer à modelação e às suas capacidades de previsão, o melhor possível, do estado trófico do meio receptor depois de melhorada a qualidade da água descarregada.

## **1.2. Objectivos**

O objectivo principal deste trabalho é a quantificação dos nutrientes (em particular do nitrato) provenientes do oceano, da Ria de Aveiro e do emissário submarino de S. Jacinto que recebe as águas das ETARs Norte, Sul e S. Jacinto, e da PORTUCEL. Associado a este objectivo está o estudo do impacto da introdução do nível de tratamento terciário efectuado nas ETARs, de modo a poder apresentar um parecer científico relativamente à eficácia desta medida na qualidade das águas costeiras da Região de Aveiro.

O presente trabalho tem também como objectivo a aprendizagem dos fenómenos físico-químicos e ecológicos característicos de uma zona costeira condicionada por processos de afloramento costeiro e descargas de água doce, assim como o funcionamento do modelo numérico que os simula.

## **1.3. Metodologia geral**

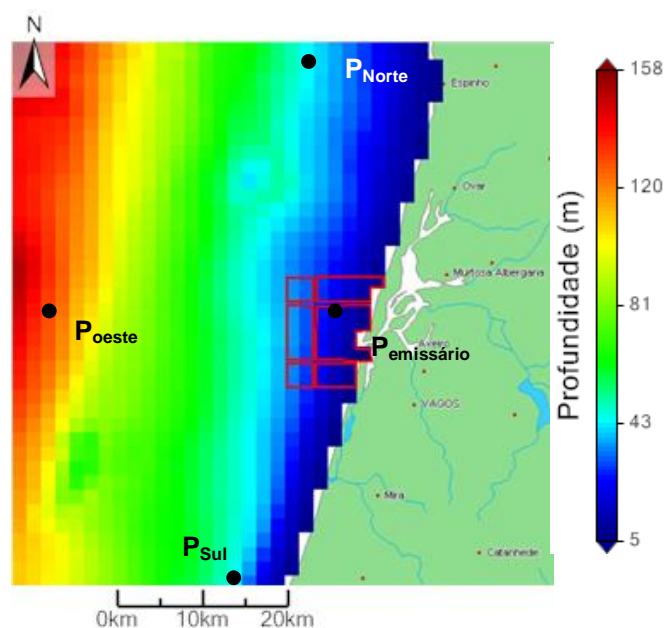
A metodologia usada para atingir os objectivos estabelecidos consistiu na implementação de um modelo numérico 3D ecológico e hidrodinâmico (MOHID Water Modelling System) que permite simular os processos físicos, associados às massas de água, e ecológicos, como as produções primária e secundária, e ciclos do azoto, do fósforo e do oxigénio. A implementação do modelo começou pela construção da batimetria, seguida da obtenção de dados meteorológicos para o local de estudo, de dados de fluxos associados ao oceano, à Ria de Aveiro e ao emissário submarino de São Jacinto, assim como os fluxos de nutrientes associados a estas fontes.

Os dados relativos aos fluxos de água do oceano, e às suas propriedades, foram fornecidos por um modelo regional operacional 3D (PCOMS-BIO) da costa portuguesa exterior a este trabalho, enquanto os dados relativos à Ria de Aveiro foram fornecidos por um modelo operacional 2D implementado para a Ria, também feito à parte deste trabalho. Os dados relativos ao emissário submarino de São Jacinto foram fornecidos pela SIMRIA. Uma vez que estes se tratavam de dados relativos às águas à entrada da ETAR, foi necessária a sua manipulação de modo a obter valores relativos à qualidade à saída dos tratamentos. Para além



disso, tratava-se de dados de concentração de azoto total ( $N_{total}$ ) e fósforo total ( $P_{total}$ ) sem qualquer discriminação relativamente às várias formas existentes destes elementos. A metodologia adoptada para a obtenção dos valores destas concentrações pode ser consultada no anexo I.

O passo seguinte consistiu na implementação do modelo 3D, incluindo as condições de fronteira, iniciais e malha, assim como as formulações a serem usadas nos cálculos hidrodinâmicos e ecológicos. Por último, foi feita a implementação de caixas de integração 2D e séries temporais para as propriedades simuladas, sendo apresentadas neste trabalho apenas o nitrato e o fitoplâncton, em áreas específicas da zona de estudo.



**Figura 1:** Representação das caixas usadas para o estudo dos fluxos de nutrientes (a vermelho) e a localização dos pontos usados nas séries temporais para as concentrações dos nutrientes (a preto).

Seguidamente, procedeu-se à construção de três cenários diferentes que permitem quantificar as contribuições das três fontes referidas acima. Assim, o primeiro cenário apenas incluiu a contribuição do oceano, o segundo as contribuições da Ria de Aveiro e do oceano e o terceiro considerou todas as contribuições (oceano, Ria de Aveiro e emissário submarino de S. Jacinto).

Após a validação do modelo ecológico foram discutidos os vários cenários em termos de fluxos de água, nutrientes, fitoplâncton e zooplâncton, e de concentração de nutrientes, de modo a determinar as contribuições relativas das 3 fontes para a qualidade da água.

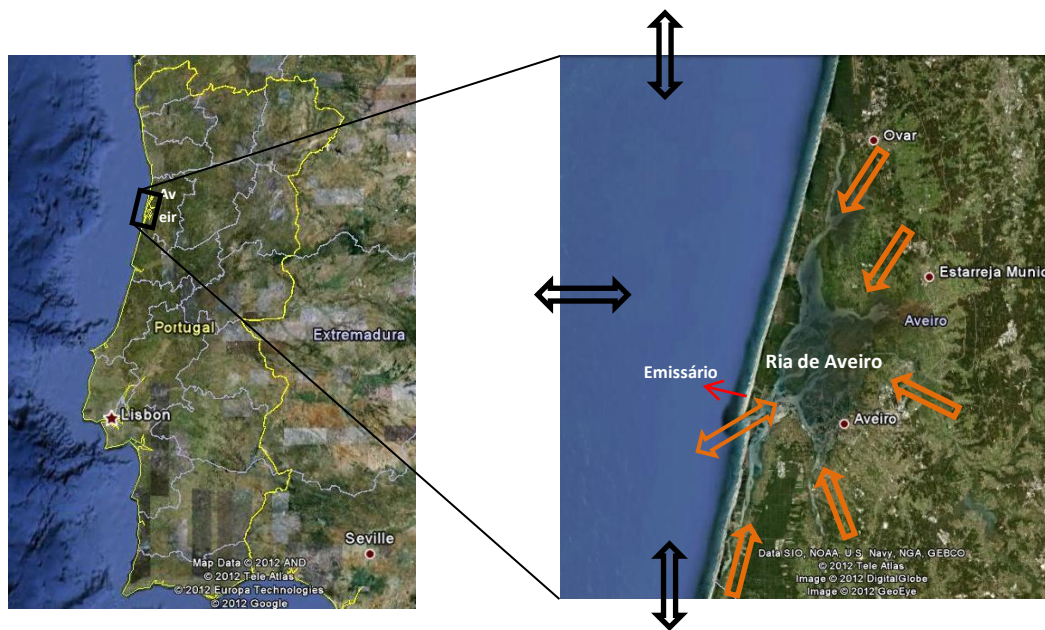


## 2. Descrição do local de estudo

A Região Costeira Portuguesa é caracterizada por uma plataforma continental com larguras na ordem dos 30 quilómetros onde a hidrodinâmica é influenciada pelo vento, maré, gradientes de densidade (responsáveis pela corrente do talude continental) e pelas plumas dos estuários ao longo da costa. O escoamento gerado por estes agentes é condicionado pela rotação da terra (efeito de coriolis) e gera gradientes de nível que acabam por condicionar as correntes.

O local de estudo situa-se na plataforma continental ao largo da região de Aveiro, na costa ocidental de Portugal, entre as latitudes 40 e 41<sup>o</sup>, entre os rios Mondego e Douro. No contexto do presente trabalho, existem três fontes principais de nutrientes: o oceano, a Ria de Aveiro (nome atribuído ao estuário do Rio Vouga) e o emissário submarino de São Jacinto. Estas estão representadas na figura 2 bem como as cinco principais fontes afluentes à Ria de Aveiro: os rios Caster, Antuã, Vouga, Boco e os canais de Mira, enumerados de Norte para Sul.

Em termos climáticos, o local em estudo está localizado na zona norte do centro de altas pressões subtropical do hemisfério norte e o clima depende fortemente da localização do anticiclone dos Açores (Lopes, et al., 2009).



**Figura 2:** Localização do local de estudo com destaque para as 3 fontes de nutrientes (Oceano, Ria de Aveiro e o emissário submarino de S. Jacinto).

Uma caracterização da hidrodinâmica local, assim como os regimes de vento e dinâmica de nutrientes é apresentada na secção 2.2.

### 2.1. Ria de Aveiro

Nesta secção, é feita a descrição da Ria de Aveiro como fonte de nutrientes para o local de estudo, incluindo a caracterização da hidrodinâmica na barra e a carga de nutrientes proveniente dos rios que deságuam na Ria.

### **2.1.1. Caracterização espacial e hidrodinâmica**

A Ria de Aveiro é um estuário caracterizado por um conjunto de canais interligados e constituído por salinas e lamaçais, proporcionado pelas baixas profundidades na ordem dos 1-7 metros e com ligação ao oceano por um canal artificial que chega a atingir 20 metros na entrada da lagoa, conseguida através de operações contínuas de dragagem (Dias, et al., 2000), permitindo, assim, a circulação de embarcações de maior dimensão. (Araújo, et al., 2008)

Os principais afluentes à Ria de Aveiro desaguam no oceano através do Canal do Espinheiro cuja profundidade média no eixo longitudinal é de aproximadamente 10 metros e com uma largura na embocadura de 350 metros (Saraiva, 2005; Dias, et al., 2000; Barrosa, 1985). O Rio Vouga é a fonte de água doce mais importante, representando cerca de 2/3 de todo o caudal afluente à Ria (Vaz, et al., 2007).

Uma vez que a soma dos caudais destes rios é baixa, em média  $55 \text{ m}^3/\text{s}$  (Dias, et al., 1999), em comparação com os fluxos associados à maré, a sua importância em termos de salinidade é relativamente baixa. Esta influência foi também estudada por (Dias, et al., 2003) que concluiu que a afluência de água doce durante um ciclo de maré é de cerca de  $8 \times 10^6 \text{ m}^3$ , em comparação com  $70 \times 10^6 \text{ m}^3$  do oceano, o que faz com que a hidrodinâmica seja condicionada quase exclusivamente pela maré.

A salinidade registada na entrada do estuário é, mesmo para os casos de elevado caudal de água doce, de 20 psu na superfície e 32 no fundo. Nos casos em que o caudal de água doce é muito baixo gera-se uma frente salina e térmica que se dirige para montante ao longo dos ciclos de maré, até à embocadura dos rios (Dias, et al., 2000), onde se registam salinidades entre 36 e 37 psu (Vaz, et al., 2005). No caso do Canal do Espinheiro, devido a estas variações dos fluxos, registam-se casos de estratificação e homogeneidade vertical em condições de caudal de rio alto e baixo, respectivamente. (Vaz, et al., 2005).

### **2.1.2. Carga de nutrientes afluente**

Os rios são um factor determinante da qualidade da água, uma vez que são responsáveis pelo transporte de nutrientes, sedimentos e contaminantes, essenciais à produção primária. A carga de nutrientes é proveniente especialmente de actividades antropogénicas, em particular da agricultura, actividades pecuárias e de descargas de águas residuais a montante. Segundo (Silva, et al., 2000) as cargas de nutrientes são de, aproximadamente, 5800 ton/ano de azoto e de 490 ton/ano de fósforo totais quando ainda não existia o emissário submarino. Já o valor apresentado pelo INAG (INAG, 2003) é de aproximadamente 3600 ton/ano para o azoto (os dados relativos aos fosfatos não são apresentados). A separação entre as diferentes origens e formas é apresentada na Figura 3 e Figura 4.

Em relação ao fósforo, existe apenas outra fonte que dá uma estimativa das cargas anuais afluentes à ria, sendo essa quantidade de 779 Ton/ano em 2000, calculada através de campanhas de medições de caudal e concentrações das várias formas deste elemento (Silva, et al., 2002).

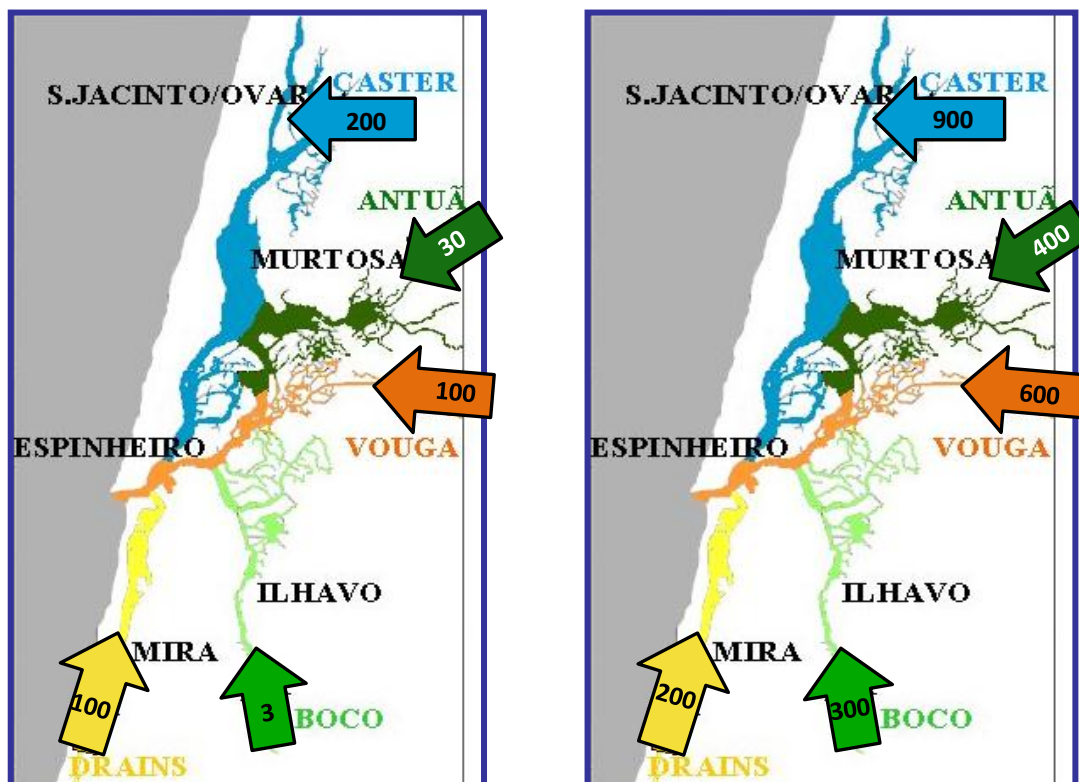


Figura 3: Carga afluente de amónia (ton/ano) à esquerda e de nitrato (ton/ano) à direita Fonte: (INAG, 2003)

## 2.2. Zona Costeira

Neste capítulo, é feita uma descrição do oceano em termos dos processos hidrodinâmicos característicos da zona. É também descrita a zona em termos de nutrientes afluentes e o seu papel na produção primária.

### 2.2.1. Hidrodinâmica

A transição do oceano aberto para a plataforma continental é feita por um declive muito acentuado na batimetria, passando de cerca de 5 quilómetros no oceano para 200 m de profundidade na plataforma continental em menos de 10 quilómetros, mantendo, depois, um declive suave até terra.

Os processos físicos mais relevantes para a zona costeira consistem na maré, no vento e nos gradientes de densidade, responsáveis pelas correntes ao longo do talude continental (Lopes, et al., 2009).

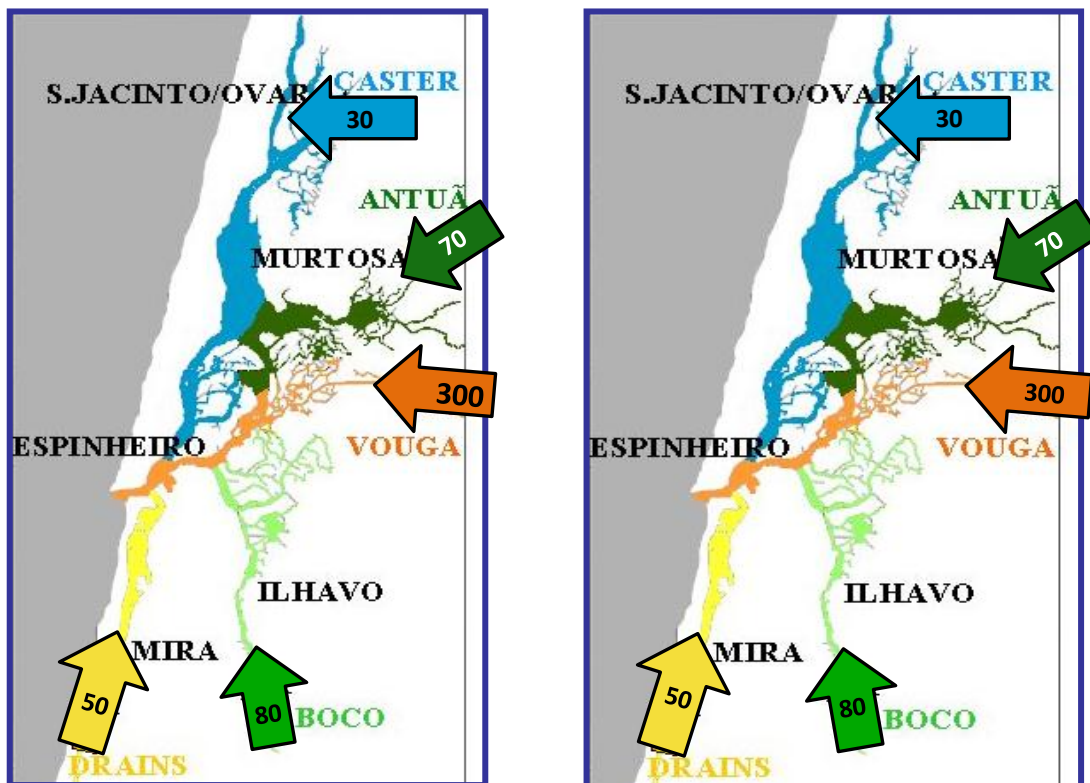


Figura 4: Carga fluente de DON (ton/ano) à esquerda e de PON (ton/ano) à direita. Fonte: (INAG, 2003)

O vento influencia o escoamento induzindo uma velocidade superficial na água devido à tensão de corte na superfície livre da água. Esta força induzida na superfície é inversamente proporcional à profundidade, produzindo velocidades maiores na superfície tornando-se assim mais importante em zonas costeiras menos profundas como é o caso da costa portuguesa. Uma vez que a densidade do ar é 1000 vezes menor que a da água, o efeito do vento por unidade de área só é mais pronunciado para extensões de água maiores, e menos importante para o caso de estuários e lagoas costeiras de pequenas dimensões.

No caso da costa portuguesa, para além da variabilidade diária associada à variação das temperaturas da água e do solo, o vento apresenta uma direcção dominante de Norte durante o verão e de Sul durante o inverno.

Já a maré, forçamento periódico com ciclos semidiurnos, cria diferenças de nível impulsoras do escoamento, sendo especialmente importantes nos estuários e lagoas por serem sistemas com apenas uma ligação ao oceano.

O gradiente de salinidade entre o equador e o pólo norte, gerado por um balanço precipitação/evaporação maior no equador em comparação com os pólos, torna a salinidade maior nestes últimos. Assim, como a água no equador é menos densa, o volume e o nível da água é maior, gerando um escoamento permanente de Sul.

Em situação de vento Sul, mais frequente na costa portuguesa nos períodos de inverno, o forçamento conjunto do vento, da densidade e das descargas de água doce ao longo da costa gera velocidades superficiais de maior intensidade para Norte. Em situação de vento Norte, característica dos meses de Primavera/Verão, o gradiente de densidade não é suficiente para manter um escoamento superficial para norte e este acaba por mudar de direcção para sul.

Quando o escoamento se dá para sul, a força de coriolis faz com que a água à superfície se desloque da costa para o oceano (transporte de Ekman), provocando uma ascensão de água mais fria e densa do fundo, ou ressurgência junto ao talude continental (ver esquema simplificado de evento de afloramento costeiro – *upwelling* - na Figura 5), responsável pelo aparecimento de temperaturas mais baixas à superfície.

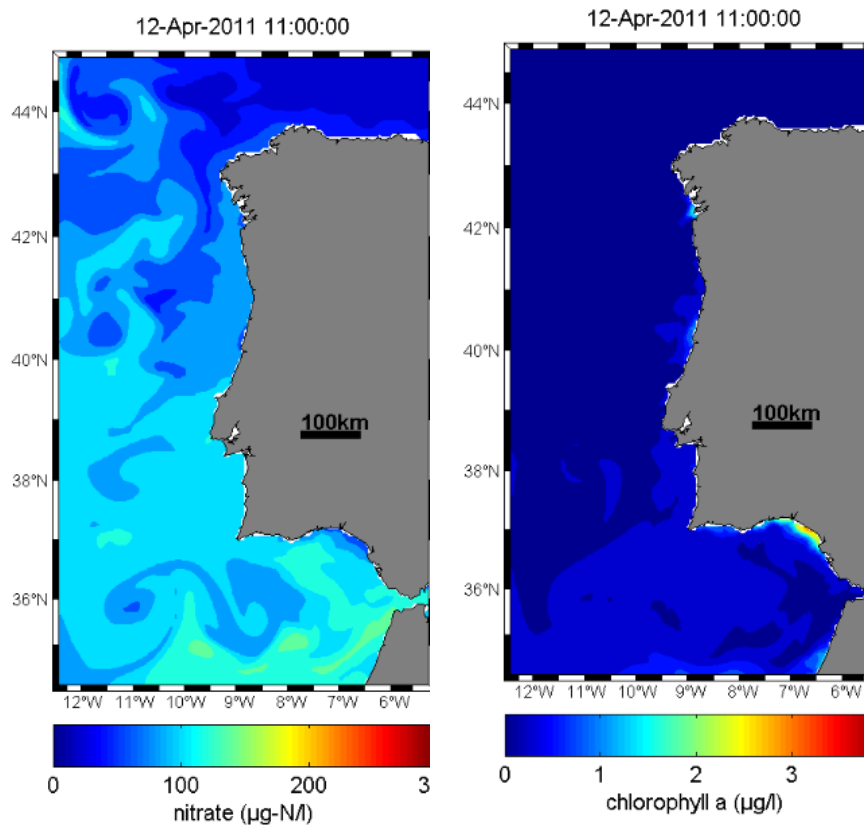


Figura 5: Esquema do processo de afloramento costeiro. Fonte: (Cordell Bank National Marine Sanctuary.)

### 2.2.2. Nutrientes e oxigénio

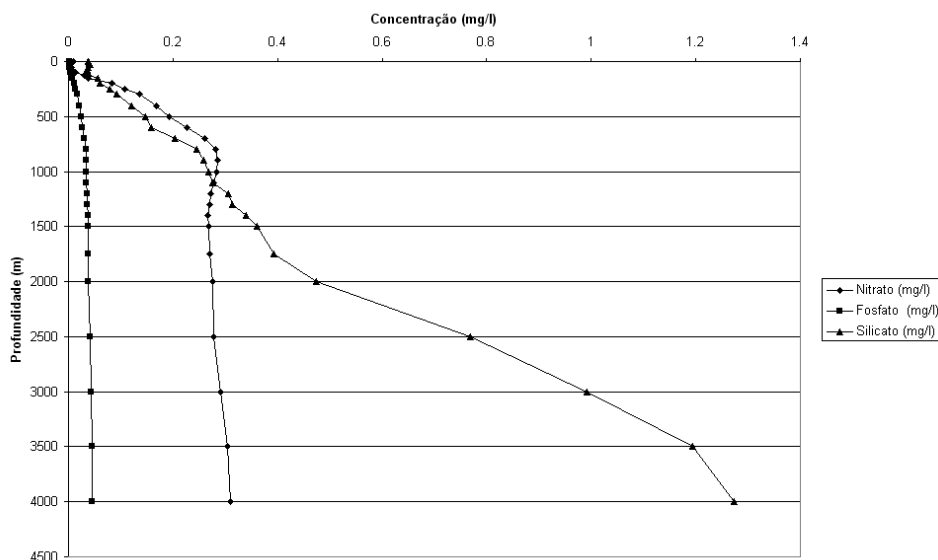
O perfil vertical do oceano em termos da concentração de nutrientes e de oxigénio é apresentado na Figura 7 e na Figura 8, respectivamente, em que se pode observar que a zona fótica, camada superficial da coluna de água até à qual a luz solar consegue penetrar, que no oceano pode atingir 200 metros de profundidade. É também possível observar que os nutrientes à superfície são escassos nesta zona, podendo no entanto ser encontrados em maiores concentrações no fundo do oceano, onde se depositam. Esta falta de nutrientes na superfície é a principal razão da baixa produção primária em oceano aberto.

No entanto, a ocorrência de eventos de afloramento costeiro em situações de vento Norte (Tilstone, et al., 1994; Lopes, et al., 2009), resultam na afluência de nutrientes à zona de estudo. Para além disso verifica-se a ocorrência de descargas mais intensas de nutrientes provenientes da Ria de Aveiro durante o inverno (quando a ressurgência é mínima por o vento ser mais fraco e proveniente do Sul e as descargas dos rios são máximas) bem como de descargas artificiais como é o caso do emissário submarino de São Jacinto.



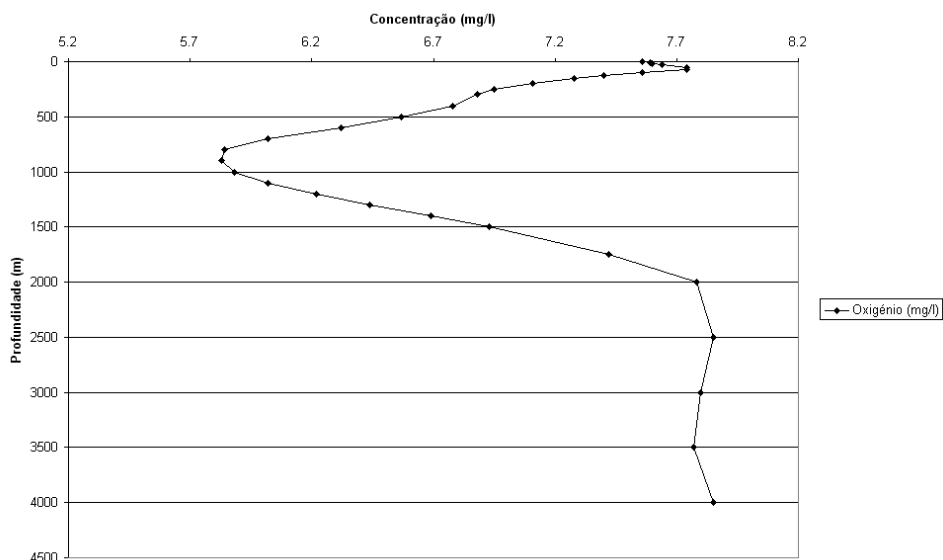
**Figura 6:** Representação das concentrações de nitrato e fitoplâncton (na forma de clorofila), verificadas no oceano pelo modelo operacional para a costa portuguesa (BIO-PCOMS), e que força o modelo local construído para este trabalho.

Estes fenómenos são essenciais à produção primária, e conseqüente cadeia alimentar, e o seu estudo é fundamental de modo a poder prever aumentos ou diminuições de produtividade primária (e conseqüentemente de espécies pescadas) e até crescimentos acelerados de algas tóxicas (Tilstone, et al., 1994), nomeadamente para o ser humano, que podem eventualmente atingir zonas balneares.



**Figura 7:** Perfil de nutrientes no oceano. Fonte: (NODC)





**Figura 8:** Perfil de oxigênio no oceano. Fonte: (NODC)

O oxigênio apresenta concentrações elevadas à superfície devido à fotossíntese, diminuindo consideravelmente a partir do final da zona fótica devido à oxidação da matéria orgânica morta pelas bactérias. A concentração deste elemento volta a aumentar para valores perto dos encontrados na superfície o que mostra que a partir de uma certa profundidade as bactérias não têm praticamente actividade aeróbia.

Em geral, junto à costa as concentrações de oxigênio dissolvido tendem a ser maiores devido à fotossíntese, com maior impacto nos meses de primavera/verão, altura em que se registam mais eventos de afloramento costeiro (Lopes, et al., 2009).

A grande maioria dos nutrientes afluentes à zona de estudo a partir do oceano provém destes eventos de afloramento costeiro, em que as águas frias e ricas em nutrientes são transportados para a superfície, sendo depois transportados até a costa por difusão e advecção.

### 2.3. Emissário Submarino de São Jacinto

O emissário submarino de São Jacinto foi construído com o objectivo de retirar da Ria de Aveiro as descargas provenientes das ETARs e da PORTUCEL, reduzindo assim os níveis de poluição e impacto no ecossistema da Ria do qual depende a economia e população locais, assim como toda a comunidade biótica existente (Saraiva, 2005).

O emissário faz parte de um sistema de saneamento que recolhe os efluentes das ETARs Norte, Sul e São Jacinto, e o efluente da PORTUCEL.

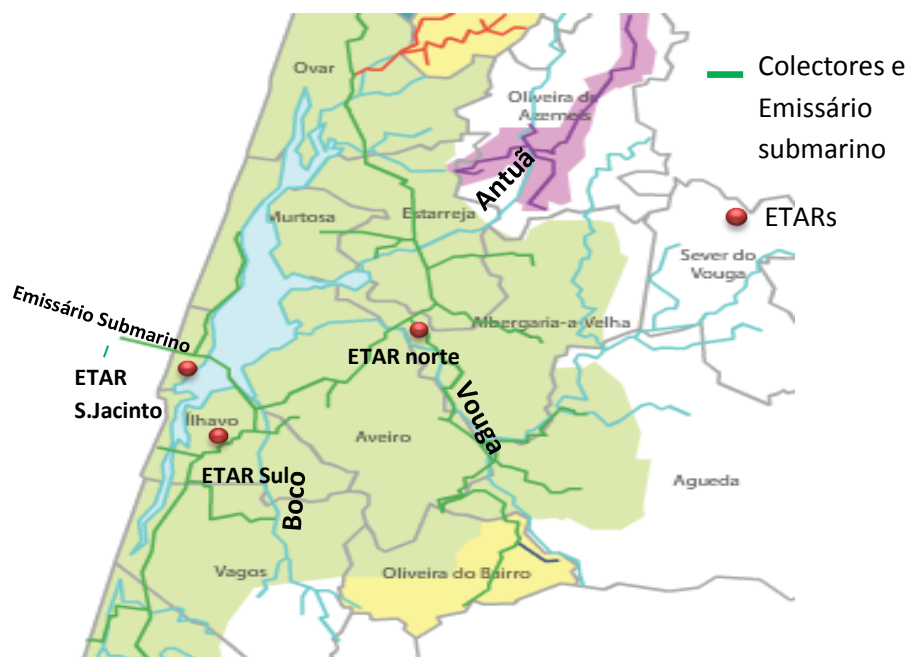


Figura 9: Esquema do sistema de saneamento de Aveiro. Fonte: (SIMRIA)

### 2.3.1. Caracterização do emissário

O emissário submarino descarrega as águas provenientes das três ETARs mencionadas e da PORTUCEL a cerca de 3.3 quilómetros perpendicularmente à costa e o difusor está localizado nos últimos 300 metros, como se pode verificar na Figura 10.



Figura 10: localização do emissário submarino de São Jacinto.

O difusor do emissário submarino de São Jacinto é constituído por um conjunto de 40 orifícios difusores, mas apenas cerca de 20 estão em funcionamento, 10 com um ângulo vertical de 30°

e os restantes com um ângulo de 150°. O resumo da descrição do difusor é apresentado na Tabela 1.

**Tabela 1:** Características do difusor.

Comprimento do difusor (m)	332	
Orientação (°) *	290	
Número de orifícios difusores total	40	
Número de orifícios difusores em funcionamento	Ângulo horizontal 200° (*) e vertical de 150°	10
	Ângulo horizontal de 20° (*) e vertical de 30°	10
	Total	20

\*A orientação do difusor e ângulos horizontais são apresentados em relação ao Norte geográfico.

### **2.3.2. Caudais e cargas descarregadas pelo emissário**

Em termos de nutrientes, são incluídos na descarga do emissário: amónia (NH<sub>4</sub>), nitrato (NO<sub>3</sub>), fósforo inorgânico na forma de orto-fosfatos (PO<sub>4</sub>), azoto orgânico dissolvido refractário (DONre), azoto particulado, fósforo orgânico dissolvido refractário (DONre), e fósforo particulado.

Os caudais e cargas anuais em termos relativos, para o ano 2010 são apresentados nas figuras 10, 11 e 12, sendo que não foram fornecidos dados referentes a 2011.

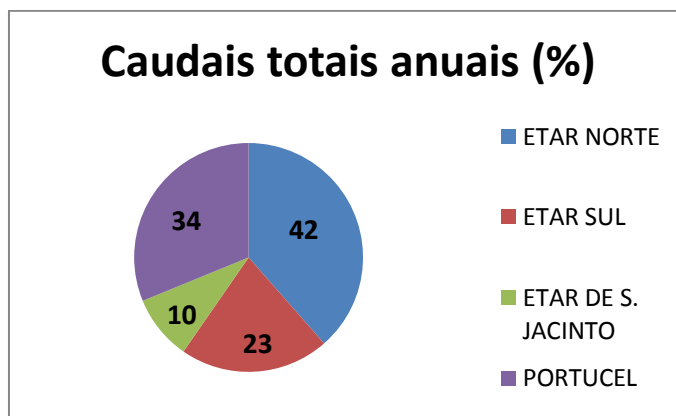


Figura 11: Contribuição relativa de caudal das ETARs e da Portucel.

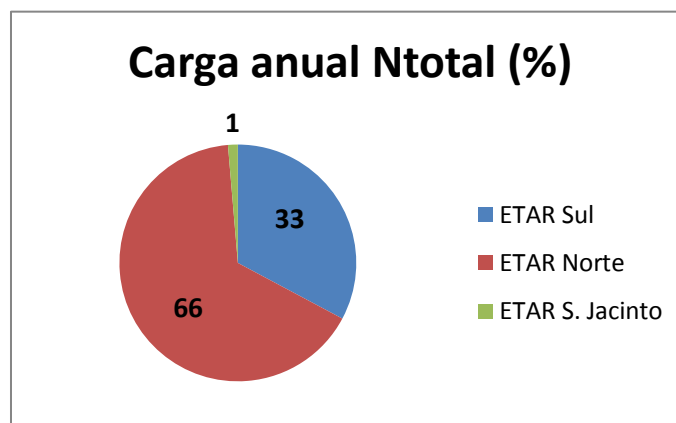


Figura 12: Contribuição relativa de azoto total de cada ETAR.

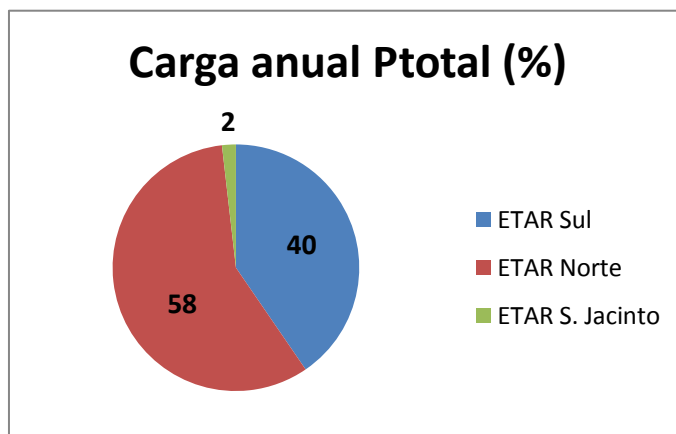


Figura 13: Contribuição relativa de fósforo total de cada ETAR.

A carga estimada de nutrientes para o emissário foi de 844 ton/ano de azoto total e 61.5 ton/ano de fósforo total para o ano de 2010, sendo que a forma principal de azoto verificada é o nitrato ( $\text{NO}_3$ ) e para o fósforo, o fosfato ( $\text{PO}_4$ ).

### 3. O modelo hidrodinâmico

O modelo usado neste trabalho foi o modelo Mohid water 3D hidrodinâmico e ecológico, que desde a sua construção, foi aplicado a variados locais sujeitos a diferentes condições: (Vaz, et al., 2005); (Trancoso, et al., 2005) (Coelho, et al., 1998).

Este modelo é constituído por um conjunto de módulos interligados entre si usando uma orientação por objectos em FORTRAN 95, e cada módulo é responsável pela gestão de uma parte da informação, constituindo um total de 40 módulos desenvolvidos ao longo de 3 décadas de trabalho de investigação.

O modelo é particularmente útil para este trabalho por ter a capacidade de criar modelos encaixados em que os resultados do modelo regional PCOMS-BIO são usados como condições de fronteira, nomeadamente as velocidades, o nível da água e as propriedades da água. Na secção seguinte será feita uma descrição mais detalhada do modelo usado.

#### 3.1. Equações do modelo

Neste capítulo são descritas as equações base do modelo, não só para a circulação da água como para a evolução espacial e temporal das propriedades transportadas pela água.

O modelo MOHID calcula as velocidades, o nível e as propriedades segundo uma malha de Arakawa C em volumes finitos, em que o nível e as propriedades da água são calculados no centro das células e as velocidades nas faces de cada célula.

Para o cálculo das velocidades o modelo usa uma discretização segundo (Abbott, et al., 1973) que consiste num esquema de 4 equações com dois níveis temporais, em que cada iteração divide-se em dois meios passos temporais, permitindo, implicitamente, o cálculo das 3 componentes da velocidade. O esquema é apresentado na Figura 14 onde u, v, w representam os vectores das velocidades nas direcções x, y, z, respectivamente, S e T representam a salinidade e a temperatura, respectivamente, e  $\eta$  representa o nível da água.

$$\begin{aligned} & \eta^{t+1/2}(u^{t+1}, u^t, v^{t+1/2}, v^{t-1/2}) \rightarrow \\ & w^{*t+1/2} \xrightarrow{\text{Actualização Da Geometria}} w^{t+1/2} \rightarrow S^{t+1/2}, T^{t+1/2} \rightarrow \\ & \eta^{t+1}(u^t, u^{t+1}, v^{t+3/2}, v^{t+1/2}) \rightarrow u^{t+3/2} \rightarrow \\ & w^{*t+1} \xrightarrow{\text{Actualização Da Geometria}} w^{t+1} \rightarrow S^{t+1}, T^{t+1} \end{aligned}$$

**Figura 14:** Representação esquemática do algoritmo de cálculo das velocidades segundo Abbott (Abbott, et al., 1973).

Em que  $u$ ,  $v$ ,  $w$  representam os vectores das velocidades nas direcções  $x$ ,  $y$ ,  $z$ ,  $S$  e  $T$  representam a salinidade e a temperatura, respectivamente, e  $\eta$  representa o nível da água.

Para o cálculo das velocidades o modelo assume 3 aproximações principais para além do equilíbrio hidrodinâmico: a incompressibilidade da água e as aproximações de Boussinesq e Reynolds. Todas as equações usadas pelo modelo foram derivadas destas aproximações.

Usa também uma formulação de volumes finitos para discretizar as equações, aplicando cada equação macroscopicamente a cada volume de controlo, sendo este determinado pela malha e geometria implementadas para o domínio de estudo.

As equações para o cálculo das velocidades horizontais médias são calculadas, em primeiro lugar, por meio das equações cartesianas 1 e 2, onde  $u$ ,  $v$  e  $w$  representam as componentes  $x$ ,  $y$  e  $z$  da velocidade,  $f$  é o parâmetro de coriolis,  $\nu_H$  e  $\nu_t$  as viscosidades turbulentas horizontal e vertical,  $\nu$  é a viscosidade cinemática e  $p$  a pressão. O modelo calcula a variação da velocidade ao longo do tempo igualando esta ao somatório dos transportes advectivos com a força de coriolis, o gradiente de pressão e a difusão turbulenta.

$$\begin{aligned} \frac{du}{dt} = & -\frac{\partial(uu)}{\partial x} - \frac{\partial(uv)}{\partial y} - \frac{\partial(uw)}{\partial z} + fv - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial y} \\ & + \frac{\partial\left((\nu_H + \nu) \frac{\partial u}{\partial x}\right)}{\partial x} + \frac{\partial\left((\nu_H + \nu) \frac{\partial u}{\partial y}\right)}{\partial y} + \frac{\partial\left((\nu_t + \nu) \frac{\partial u}{\partial z}\right)}{\partial z} \end{aligned} \quad \text{Equação 1}$$

$$\begin{aligned} \frac{dv}{dt} = & -\frac{\partial(vu)}{\partial x} - \frac{\partial(vv)}{\partial y} - \frac{\partial(vw)}{\partial z} - fu - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial y} \\ & + \frac{\partial\left((\nu_H + \nu) \frac{\partial v}{\partial x}\right)}{\partial x} + \frac{\partial\left((\nu_H + \nu) \frac{\partial v}{\partial y}\right)}{\partial y} + \frac{\partial_z\left((\nu_t + \nu) \frac{\partial v}{\partial z}\right)}{\partial z} \end{aligned} \quad \text{Equação 2}$$

Para a discretização temporal da velocidade é utilizado um algoritmo semi-implícito (ADI - *Alternating Direction Implicit*) que calcula alternadamente uma das componentes da velocidade horizontal implicitamente enquanto a outra é calculada explicitamente. A equação resultante é depois resolvida usando um algoritmo de Thomas.

A utilização de um método implícito tem a grande vantagem de tornar o modelo bastante estável, sem comprometer os resultados, e com um ganho considerável de tempo de simulação, já que permite o uso de um passo temporal maior.

Após a determinação das velocidades horizontais, é calculada a velocidade através da equação da continuidade (ver Equação 3). A equação para a superfície livre é obtida

integrando a equação da continuidade ao longo da coluna de água segundo a Equação 4, onde  $\eta$  é a elevação da superfície livre e  $h$  a profundidade.

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad \text{Equação 3}$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} = -\frac{\partial \int_{-h}^{\eta} u dz}{\partial x} - \frac{\partial \int_{-h}^{\eta} v dz}{\partial y} \quad \text{Equação 4}$$

É assumida a aproximação hidrostática para a determinação da pressão, segundo a Equação 5, onde  $g$  representa a aceleração da gravidade e  $\rho$  a densidade da água. O modelo calcula a pressão integrando a Equação 5 desde a superfície livre até à profundidade pretendida, sendo a equação final dependente da pressão atmosférica, da elevação da superfície livre, da profundidade e da densidade na profundidade para a qual a pressão é calculada (ver Equação 6, onde  $\rho_0$  representa a densidade de referência e  $\rho'$  o desvio da densidade relativamente à densidade de referência, sendo a densidade calculada com base na temperatura e salinidade da água).

$$\frac{\partial p}{\partial z} + g\rho = 0 \quad \text{Equação 5}$$

$$p(z) = p_{atm} + g\rho_0(\eta - z) + g \int_z \eta \rho' dz \quad \text{Equação 6}$$

O fluxo difusivo à superfície é imposto exclusivamente pela tensão de corte exercida pelo vento, segundo a Equação 7, sendo que a tensão de corte do vento é calculada com base na Equação 8, onde  $C_D$  representa o coeficiente de arrastamento que depende da velocidade do vento,  $\rho$  é a densidade do ar e  $W$  a velocidade do vento calculada a 10 metros da superfície da água.

$$v \frac{\partial \overline{\mathbf{V}_H}}{\partial z} \Big|_{surface} = \overline{\boldsymbol{\tau}_w} \quad \text{Equação 7}$$

$$\overline{\boldsymbol{\tau}_w} = C_D \rho_a \overline{\mathbf{W}} \Big| \overline{\mathbf{W}} \Big| \quad \text{Equação 8}$$

O modelo hidrodinâmico é responsável pelos transportes advectivo e difusivo, pelas descargas de água no meio receptor, fluxo de sedimentos, trocas de calor e oxigénio com a atmosfera, sedimentação de substâncias particuladas e pelos balanços de massa das várias propriedades simuladas. Os outputs deste módulo são depois usados pelo modelo ecológico.

O transporte de uma propriedade A da água devido aos fenómenos de difusão e advecção é calculado pela Equação 9, em que u, v e w representam as velocidades segundo x, y e z,  $v'_H$  e  $v'_i$  as difusidades de eddy horizontais e verticais, e  $v'_A$  a difusidade molecular. Esta equação está na forma lagrangeana. No entanto, no presente trabalho foi usada a formulação eulariana, cuja diferença em relação à formulação lagrangeana consiste apenas na resolução da Equação 9, obtendo-se a Equação 10. Os primeiros 3 termos da direita desta equação representam o transporte por advecção e os 3 últimos, o transporte difusivo. A evolução temporal da propriedade A está dependente do balanço entre transporte advectivo, mistura turbulenta e fontes e poços que a propriedade simulada possa ter.

$$\frac{dA}{dt} = \frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial(uA)}{\partial x} + \frac{\partial(vA)}{\partial y} + \frac{\partial(wA)}{\partial z} =$$

$$\frac{\partial\left(v'_H \frac{\partial A}{\partial x}\right)}{\partial x} + \frac{\partial\left(v'_H \frac{\partial A}{\partial y}\right)}{\partial y} + \frac{\partial\left((v'_i + v'_A) \frac{\partial A}{\partial z}\right)}{\partial z}$$

Equação 9

$$\frac{dA}{dt} = -\frac{\partial(uA)}{\partial x} - \frac{\partial(vA)}{\partial y} - \frac{\partial(wA)}{\partial z} +$$

$$\frac{\partial\left(v'_H \frac{\partial A}{\partial x}\right)}{\partial x} + \frac{\partial\left(v'_H \frac{\partial A}{\partial y}\right)}{\partial y} + \frac{\partial\left((v'_i + v'_A) \frac{\partial A}{\partial z}\right)}{\partial z}$$

Equação 10

### 3.2. 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.

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 é admitir um valor uniforme. Neste caso, a solução do modelo só se torna independente da condição inicial depois de percorrido um tempo bastante superior ao tempo de residência (Leitão, 2003).

### **3.3. Parametrização do modelo**

Os parâmetros associados à hidrodinâmica são a rugosidade no fundo e as viscosidades horizontais e verticais. Relativamente à rugosidade, foi assumido um valor de  $0.025 \text{ m}^2/\text{s}$ . A viscosidade horizontal turbulenta é função da maior dimensão do domínio, da latitude e do passo espacial implementado, e o valor usado foi de  $12 \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ . A viscosidade vertical faz parte da parametrização do modelo GOTM (General Ocean Turbulence Model).

### **3.4. Implementação do modelo**

Neste capítulo, é feita a descrição da implementação do modelo, que inclui a construção da batimetria e a implementação das descargas e dos forçamentos atmosférico e hidrodinâmico.

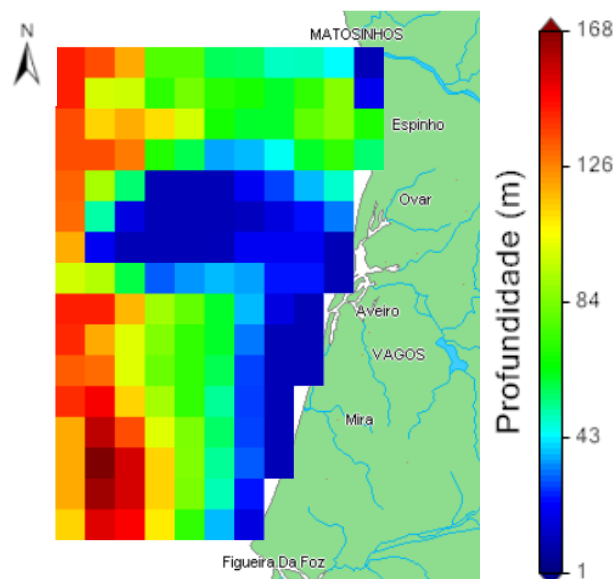
#### **3.4.1. Batimetria**

Sendo a batimetria o factor que mais influencia a circulação de água e das propriedades simuladas no domínio, foi dada uma atenção especial à mesma, já que mais de metade dos problemas associados aos modelos provém da batimetria.

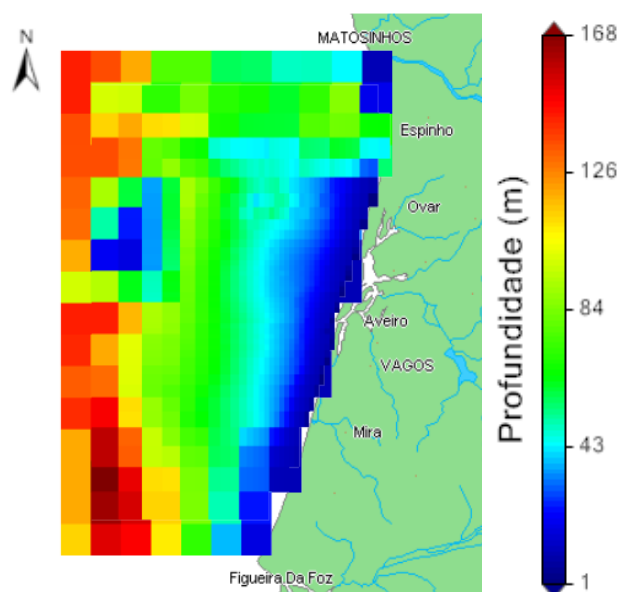
A batimetria é constituída por 3 partes: os pontos batimétricos (que devem ter a menor resolução possível), a malha que depende do objectivo do estudo, e a linha de costa que serve de fronteira fechada.

Neste trabalho foram construídas duas batimetrias, uma encaixada na outra. A primeira foi a batimetria do modelo PCOMS (modelo regional) e a segunda a batimetria do modelo local que calcula os fluxos de nutrientes na costa. A batimetria do modelo PCOMS foi reconstruída uma vez que já estava implementada. No entanto, apresentada uma precisão inferior à necessária para o modelo em desenvolvimento, tendo em consideração informações disponíveis para a zona. A linha de costa foi construída utilizando a ferramenta Google Earth como base.

A batimetria local sofreu várias alterações no decorrer deste trabalho devido a problemas com a fronteira com o modelo regional e com os resultados gerados. Em baixo são apresentadas a batimetria inicial do modelo regional correspondente ao local de estudo, e o encaixe com a batimetria local inicial (ver Figura 15 e Figura 16).



**Figura 15:** Batimetria da janela do modelo regional PCOMS-BIO de origem com dados do SRTM.

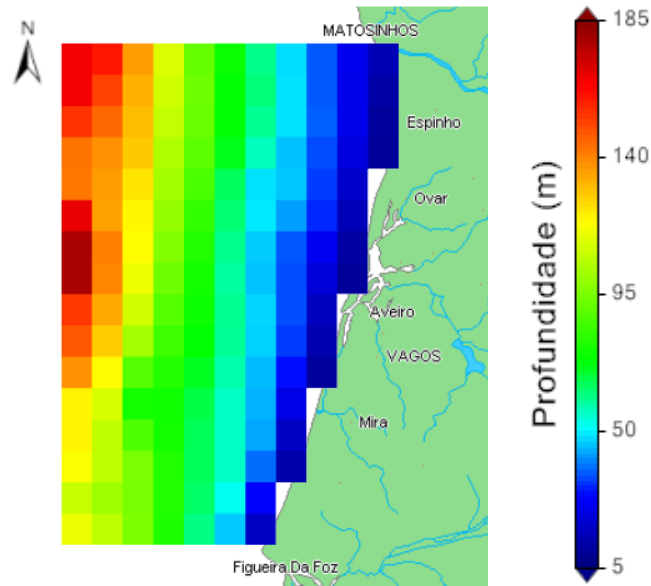


**Figura 16:** Batimetria do modelo local encaixada na batimetria do modelo regional PCOMS-BIO original, com dados do SRTM.

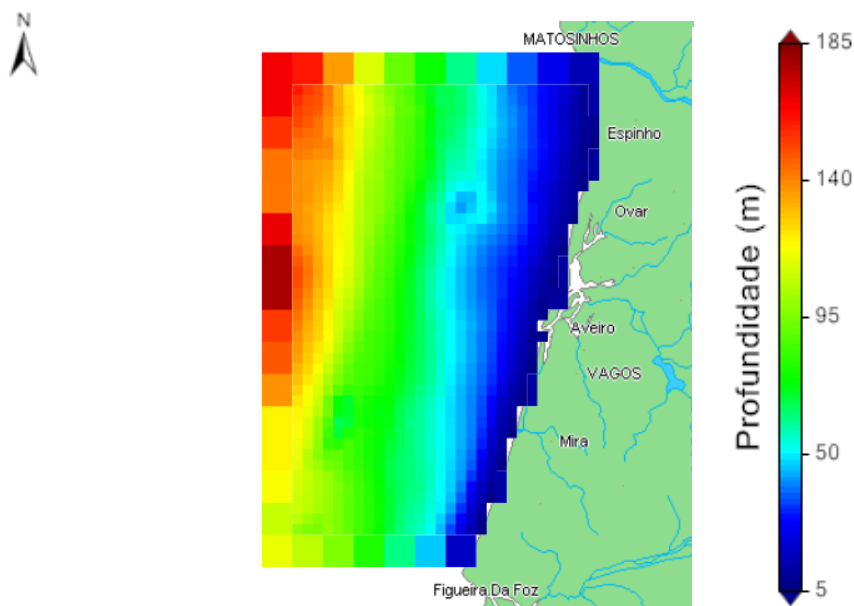
A batimetria do modelo local foi construída com uma malha variável com um passo espacial de 1 quilómetro nas proximidades da Ria de Aveiro e de 4 quilómetros na fronteira aberta.

Após terem sido analisados os pontos batimétricos existentes na zona, cujas fontes incluem as bases de dados SRTM30, GEBCO, Instituto Hidrográfico da Marinha Portuguesa (IH) e finalmente a base de dados EMODnet, e tendo em conta os resultados para a circulação da água no domínio, concluiu-se que era necessário proceder-se à alteração das batimetrias.

Assim, ambas as batimetrias foram construídas com base na mesma fonte de dados batimétricos interpolados, a EMODnet, que possui dados com uma resolução de cerca de 300 metros (melhor resolução disponível). As malhas usadas para o modelo PCOMS-BIO e para o modelo local têm uma resolução de 6x6km e 2x2 km cada célula, e 11x16 e 30x42 células, respectivamente (Figura 17 e Figura 18).



**Figura 17:** Batimetria da janela do modelo regional PCOMS-BIO corrigida com os dados do EMODnet.



**Figura 18:** Batimetria do modelo local corrigida com os dados do EMODnet.

O espaçamento de uma célula mostrado na figura deve-se ao facto de o modelo calcular as velocidades com base nas células adjacentes, e no caso da fronteira aberta, precisa das velocidades exteriores que têm de ser fornecidas pelo modelo regional. Em termos de camadas verticais, foram usadas as mesmas que estão implementadas para o PCOMS-BIO, ou seja, 7 camadas sigma à superfície e 19 camadas cartesianas cujos valores são apresentados na Tabela 2.

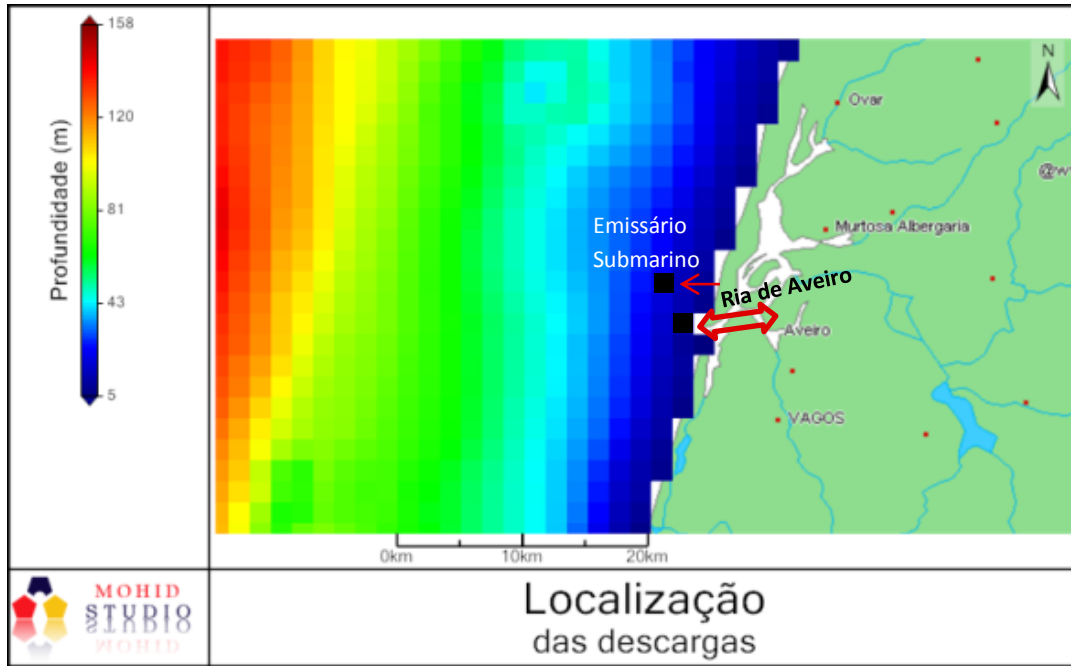
**Tabela 2:** Geometria 3D implementada para o modelo, especificando as espessuras das camadas cartesianas e sigma.

<b>Cartesianas</b>	<b>Sigma</b>
Espessura (m)	Espessura (m)
1.78	0.95
1.89	1.13
2.23	1.13
2.46	1.22
2.91	1.30
3.29	1.48
3.94	1.48
4.52	
5.46	
6.36	
7.70	
9.08	
11.01	
13.08	
15.87	
18.93	
22.95	
27.42	
33.13	

### **3.4.2. Dados de fluxos e forçamento**

As descargas da Ria de Aveiro e do emissário submarino de S. Jacinto foram implementadas como descargas pontuais no espaço e contínuas no tempo. A descarga do emissário submarino foi feita a 12 metros de profundidade enquanto a descarga da ria foi feita à superfície, sendo a localização de ambas apresentada na Figura 19.

Uma vez que as descargas são feitas em células e não num ponto específico, o modelo calcula as novas concentrações das propriedades que vão sendo descarregadas com base no volume da célula (I,J,K) onde é feita a descarga.



**Figura 19:** localização das descargas da Ria de Aveiro e do emissário submarino de S. Jacinto (a preto).

Os dados relativos aos fluxos e às cargas de nutrientes, fitoplâncton e zooplâncton provenientes da Ria são fornecidos numa base horária pelo modelo 2D implementado para a mesma, e os dados relativos aos nutrientes provenientes do emissário submarino foram estimados com base nos dados fornecidos pela SIMRIA para as cargas afluentes às ETARs e em estimativas de eficiências de tratamento presentes em (Metcalf & Eddy, 2003). Contudo, é possível alterar estes valores no modelo e obter os resultados associados, e para um futuro trabalho poderão ser usados valores medidos à saída do emissário para uma melhor representação da realidade.

Os nutrientes provenientes da PORTUCEL tiveram de ser estimados devido à indisponibilidade de dados. Para o cálculo das concentrações destes nutrientes foi considerado a carga de nutrientes proveniente da PORTUCEL é cerca de 40% da totalidade da carga proveniente das ETARs, sendo as concentrações à saída do emissário calculadas segundo:

$$C_A^i(\text{final}) = \frac{\sum_{j=1}^3 (C_A^j \times V^j + M_A^{\text{PORTUCEL}})}{V_{\text{total}}} \quad \text{Equação 11}$$

Em que  $C_A^i(\text{final})$  representa a concentração à saída do emissário, da propriedade A no mês  $i$ ,  $j=1, 2, 3$  representa as ETARs Norte, Sul e S. Jacinto e  $M_A^{\text{PORTUCEL}}$  a massa da propriedade A mensal afluente ao emissário. Foi também considerado que os únicos nutrientes provenientes da PORTUCEL consistem em DONre, DOPre, nitrato ( $\text{NO}_3$ ) e fósforo inorgânico ( $\text{PO}_4$ ).

Os dados do emissário são valores médios mensais para o ano de 2010, em que é assumido que a variação temporal é pouco relevante. Na realidade, e como as ETARs recebem águas das chuvas é normal que se observem variações anuais dos caudais e das concentrações médios dependendo da intensidade das chuvas. Os valores utilizados são apresentados na Tabela 3 e na Tabela 4.

**Tabela 3:** Caudais médios mensais do emissário submarino.

	<b>ETAR NORTE</b> <b>(10<sup>3</sup> m<sup>3</sup>)</b>	<b>ETAR SUL</b> <b>(10<sup>3</sup> m<sup>3</sup>)</b>	<b>ETAR DE S. JACINTO</b> <b>(10<sup>3</sup> m<sup>3</sup>)</b>	<b>PORTUGEL</b> <b>(10<sup>3</sup> m<sup>3</sup>)</b>	<b>TOTAL</b> <b>(10<sup>3</sup> m<sup>3</sup>)</b>
<b>JAN</b>	1610	802	53	995	3460
<b>FEV</b>	1527	683	40	774	3024
<b>MAR</b>	1327	681	29	927	2964
<b>ABR</b>	1279	673	28	919	2898
<b>MAI</b>	1008	566	17	929	2520
<b>JUN</b>	722	524	18	827	2092
<b>JUL</b>	819	524	21	879	2242
<b>AGO</b>	748	488	27	876	2139
<b>SET</b>	351	315	16	868	1551
<b>OUT</b>	953	540	18	776	2286
<b>NOV</b>	1189	584	14	963	2750
<b>DEZ</b>	1639	785	36	1019	3479
<b>TOTAL</b>	13171	7166	316	10751	31404

A atmosfera foi forçada por um modelo meteorológico operacional, o modelo MM5, que fornece os dados atmosféricos com uma resolução de 9km, cujos dados foram interpolados para a malha do domínio do local de estudo, sendo que os dados fornecidos são: velocidade e direcção do vento, radiação solar, temperatura do ar, humidade relativa e pressão atmosférica ao nível da água.

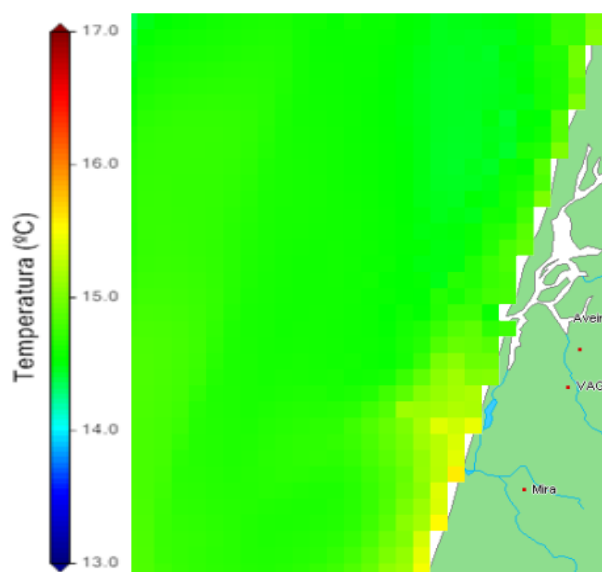
### **3.4.3. Validação do modelo hidrodinâmico**

A validação do modelo hidrodinâmico consiste na comparação das velocidades ou dos níveis (ou ambos), da salinidade e da temperatura com dados medidos *in situ*, sendo muito usados os marégrafos, e caso os resultados obtidos pelo modelo representem bem a realidade, não só em termos de tendências como de valores absolutos, então o modelo é considerado válido.

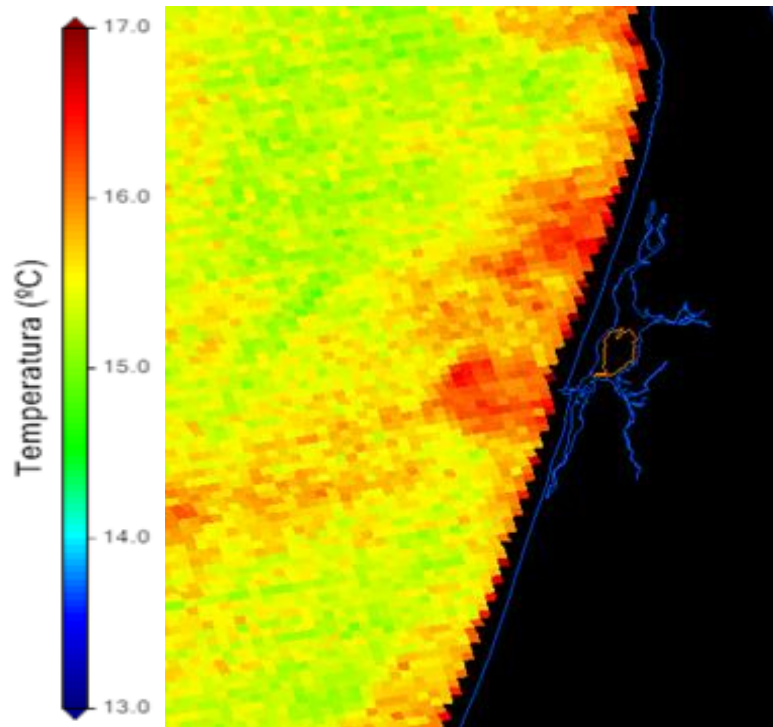
**Tabela 4:** Concentração de nutrientes no emissário submarino.

	<b>N-NH4 (mg/l)</b>	<b>N-NO3 (mg/l)</b>	<b>PON (mg/l)</b>	<b>DONr (mg/l)</b>	<b>PO<sub>4</sub> (mg/l)</b>	<b>POP (mg/l)</b>	<b>DOPre (mg/l)</b>
<b>JAN</b>	1.95	10.67	4.68	8.46	1.27	0.13	0.46
<b>FEV</b>	3.00	16.42	7.21	13.03	1.91	0.20	0.70
<b>MAR</b>	2.32	12.67	5.56	10.05	1.52	0.16	0.55
<b>ABR</b>	2.83	15.47	6.79	12.28	1.69	0.18	0.62
<b>MAI</b>	3.65	19.98	8.77	15.85	2.00	0.21	0.73
<b>JUN</b>	3.78	20.66	9.07	16.40	1.59	0.17	0.58
<b>JUL</b>	3.67	20.06	8.81	15.92	2.35	0.25	0.86
<b>AGO</b>	3.87	21.21	9.31	16.83	2.74	0.29	1.00
<b>SET</b>	1.70	9.33	4.10	7.40	1.53	0.16	0.56
<b>OUT</b>	2.18	11.94	5.24	9.47	1.70	0.18	0.62
<b>NOV</b>	2.15	11.78	5.17	9.35	1.96	0.21	0.72
<b>DEZ</b>	2.94	16.08	7.06	12.76	2.01	0.21	0.74

Foram encontrados alguns dados destas propriedades para os anos de 2001, 2003 e 2004, mas nenhum para o período simulado neste trabalho, e por isso não foi feita uma validação correcta do modelo. No entanto foram comparados os mapas 2D de temperatura à superfície obtidos pelo modelo, com imagens de satélite fornecidas pela NASA, e cujos resultados são apresentados na Figura 20 e na Figura 21. Nestes resultados verifica-se uma diferença média de 1°C na temperatura da água, mas necessário ter em conta que a temperatura apresentada para o caso do modelo é a média na camada superficial, cuja altura é de 1 metro.



**Figura 20:** Mapa 2D da temperatura à superfície para 31/03/2011, obtido pelo modelo.



**Figura 21:** Mapa 2D da temperatura à superfície captado por satélite para 31/03/2011.

Assim, o resultado obtido pelo modelo para a temperatura não tem de estar incorrecto, mas simplesmente não é comparável directamente. No entanto, e sabendo que a temperatura da água à superfície é mais elevada, é razoável considerar que os resultados da temperatura obtidos pelo modelo não sejam tão diferentes da imagem de satélite como é apresentado nestas imagens.



## 4. Modelo ecológico

O modelo ecológico utiliza a informação proveniente do modelo hidrodinâmico, nomeadamente os fluxos das várias formas de azoto e fósforo e a concentração de oxigénio, para simular a dinâmica destes ciclos biogeoquímicos e dos produtores primários e secundários, permitindo, assim, estudar a evolução da qualidade da água espacialmente e ao longo do tempo. O modelo responsável por estes balanços é um modelo 0D ecológico que pode ser usado pelos módulos de transporte euleriano e lagrangeano e que simula os processos de transformação química e biológica das várias propriedades da água associadas ao modelo, como por exemplo os ciclos biogeoquímicos do azoto, do fósforo e do oxigénio.

Neste capítulo é feita uma descrição breve do modelo ecológico e as suas principais equações, a parametrização usada para o estudo do problema enunciado no primeiro capítulo, e é ainda apresentada uma secção referente à validação do modelo, que por falta de dados mais adequados foi feita com base em imagens de satélite da concentração de clorofila-a.

### 4.1. Equações do modelo

Este modelo foi criado tendo por base uma filosofia de fontes e poços, ou seja, com base num balanço de massa das várias formas de azoto e fósforo, oxigénio, fitoplâncton e zooplâncton.

Em termos do ciclo de azoto o modelo inclui o nitrato ( $\text{NO}_3$ ), o nitrito ( $\text{NO}_2$ ) e a amónia ( $\text{NH}_4$ ) como formas inorgânicas, enquanto o azoto orgânico é dividido nas formas de azoto orgânico particulado (PON), azoto orgânico dissolvido refractário (DONr) azoto orgânico dissolvido não refractário (DONnr).

A diferença entre estas duas últimas formas consiste no tempo que demoram a ser mineralizadas, sendo que a forma não refractária é 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. A Figura 22 representa um esquema dos processos biogeoquímicos simulados, sendo que neste trabalho não foram simuladas as bactérias.

As formas de fósforo simuladas 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 ( $\text{PO}_4$ ).

No caso da Figura 22, o ciclo do fósforo está incluído nas formas de azoto apresentadas como por exemplo: PON/P representa as formas de azoto orgânico particulado e fósforo orgânico particulado.

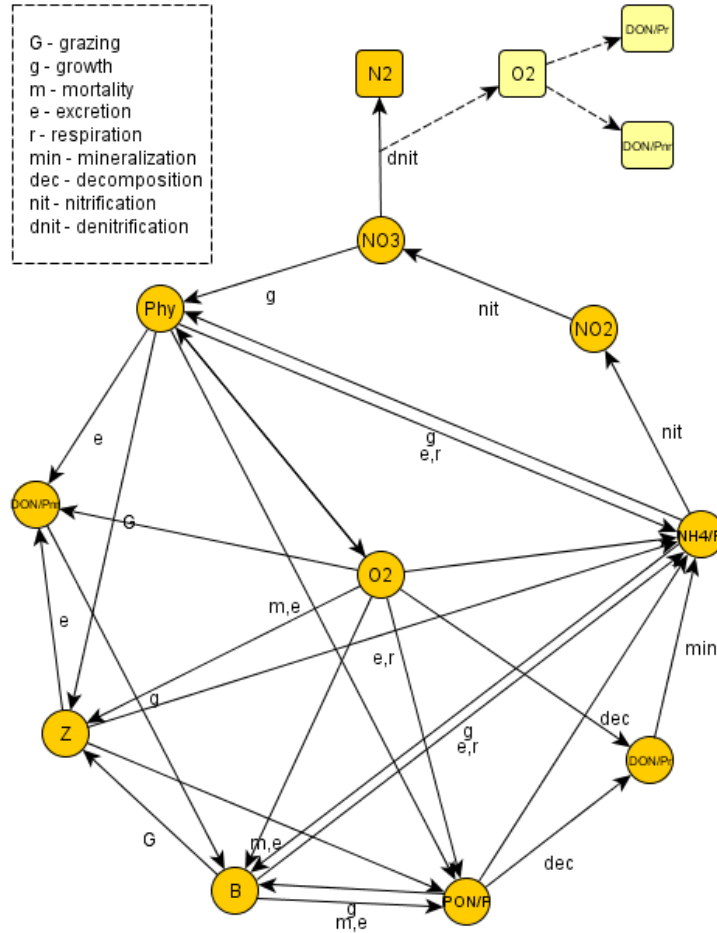


Figura 22: Esquema da dinâmica de nutrientes associados à qualidade da água.

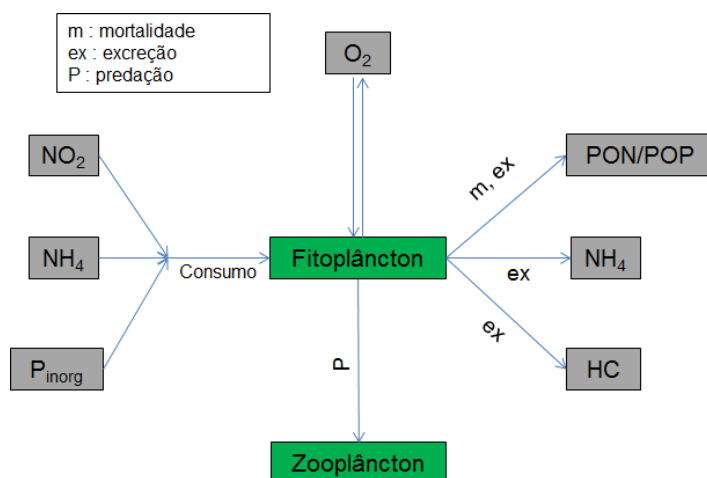
As equações desta dinâmica são apresentadas no Anexo II, sendo neste capítulo apresentada apenas a equação de balanço de massa do fitoplâncton que é a propriedade mais importante a nível de demonstração de resultados.

$$\frac{d\Phi_{Phy}}{dt} = (\mu_{Phy} - r_{Phy} - ex_{Phy} - m_{Phy})\Phi_{Phy} - G \quad \text{Equação 12}$$

Sendo  $\mu_{Phy}$  a taxa de crescimento,  $r_{Phy}$  a taxa de respiração,  $ex_{Phy}$  a taxa de excreção,  $m_{Phy}$  a taxa de mortalidade,  $\Phi_{Phy}$  a concentração de fitoplâncton e  $G$  a predação. Como mostra a Equação 12, e como foi apresentado na Figura 22, e de acordo com a formulação do modelo ecológico, a concentração de fitoplâncton aumenta devido ao seu crescimento, e diminui através da respiração celular, da excreção, da mortalidade e finalmente pela predação por zooplâncton. Esta equação será descrita em detalhe no anexo II.

Do ponto de vista dos nutrientes e oxigênio, o fitoplâncton consome nutrientes inorgânicos como amônia, nitrato, fósforo inorgânico e pela mortalidade e excreção produz, respectivamente, azoto e fósforo particulados, e amônia e hidratos de carbono. Durante o dia

faz fotorrespiração produzindo oxigênio e durante a noite faz respiração celular consumindo oxigênio para produzir energia (Figura 23).



**Figura 23:** Dinâmica do fitoplâncton assumido pelo modelo ecológico.

O modelo considera como factores limitantes do crescimento do fitoplâncton a ausência de luz e alimento, que para o fitoplâncton consiste em nitrato e amónia. É ainda definido um factor de preferência para estes nutrientes, que depende das concentrações da cada um deles e das suas concentrações de semi-saturação para o fitoplâncton.

## 4.2. Parametrização do modelo

Na parametrização do modelo ecológico é necessário, em primeiro lugar, definir as variáveis simuladas de entre as possíveis, de acordo com os objectivos pretendidos com este trabalho.

Assim, e para manter a coerência das propriedades simuladas, foram utilizadas as mesmas variáveis que são simuladas no modelo regional. Estas consistem nas concentrações das várias formas de azoto e de fósforo, fitoplâncton, zooplâncton e oxigénio, sendo que as bactérias, a sílica, os ciliados, e as diatomáceas, por não serem simuladas no modelo regional não foram incluídas.

Os parâmetros associados ao modelo ecológico assim como os valores utilizados para cada um destes são apresentados na Tabela 5 e foram adaptados do guia do módulo de qualidade da água do sistema MOHID ([www.mohid.com](http://www.mohid.com)) e a partir de outros trabalhos (Pina, 2001; Portela, 1996; EPA, 1985).

**Tabela 5:** Parametrização do modelo ecológico.

<b>Valor</b>	<b>Descrição</b>	<b>Unidades</b>
<b>Fitoplâncton</b>		
1.5	Taxa de crescimento máximo	d <sup>-1</sup>
0.0175	Constante de respiração endógena	d <sup>-1</sup>
0.125	Fracção da fotossíntese que é oxidada por fotorrespiração	adim
0.07	Constante de excreção	adim
0.05	Taxa de mortalidade máxima	d <sup>-1</sup>
0.3	Constante de semi-saturação da mortalidade	mgC l <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup>
0.04	Constante de semi-saturação de azoto	mgN/l
0.001	Constante de semi-saturação de fósforo	mgP/l
121	Intensidade óptima para a fotossíntese	W/m <sup>2</sup>
<b>Zooplâncton</b>		
0.25	Taxa de crescimento máxima	d <sup>-1</sup>
10	Constante de ivlev	l/mgC
0.0045	Concentração mínima de fitoplâncton para predação	mg/l
0.02	Taxa de excreção	d <sup>-1</sup>
1.0305	Constante para a curva de excreção	adim
0	Constante para a curva de mortalidade	adim
0	Taxa de mortalidade mínima	d <sup>-1</sup>
0.04	Taxa de mortalidade máxima	d <sup>-1</sup>
0.85	Constante de semi-saturação para a predação	mgC/l
<b>Azoto</b>		
0.06	Taxa de nitrificação de referência	d <sup>-1</sup>
2	Constante de semi-saturação da nitrificação	mgO <sup>2</sup> /l
0.1	Constante de semi-saturação da desnitrificação	mgO <sup>2</sup> /l
1.08	Coefficiente de temperatura da nitrificação	adim
0.1	Taxa de referência da mineralização de DONnr	d <sup>-1</sup>
1.02	Coefficiente de temperatura associado à mineralização de DONnr	adim

<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> /mgN
2.06	Rácio O/C do fosfato	mgO <sub>2</sub> /mgP
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
0.18	Rácio O/C na respiração do azoto orgânico	mgN/mgC
0.024	Rácio O/C na respiração do fósforo orgânico	mgP/mgC
10e-5	Concentração mínima de O <sub>2</sub> para crescimento	mgO <sub>2</sub> /l
<b>Microzooplâncton</b>		
0.0045	Concentração mínima de fitoplâncton para haver predação	mgC/l
0.0045	Concentração mínima de presas para haver predação	mgC/l
0.02	Taxa de respiração à temperatura de referência	d <sup>-1</sup>
0.02	Taxa de excreção	d <sup>-1</sup>
1.03505	Constante para a curva de excreção	adim
0	Constante para a curva de mortalidade	adim
0	Taxa mínima de mortalidade	d <sup>-1</sup>
0.044	Taxa máxima de mortalidade	d <sup>-1</sup>
0.85	Constante de semi-saturação para predação	mgC/l
1.0	Taxa máxima de ingestão	d <sup>-1</sup>



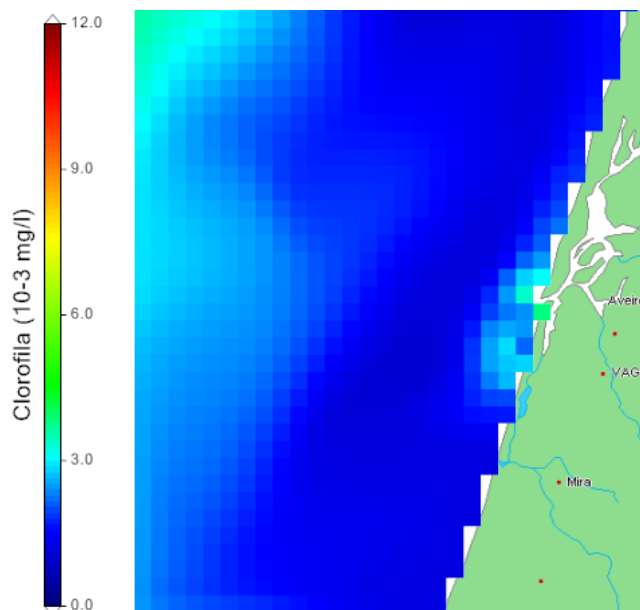
## **5. Resultados e Discussão**

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos pelo modelo criado no âmbito deste trabalho, e é feita a discussão dos mesmos tendo em conta os objectivos definidos no início deste documento.

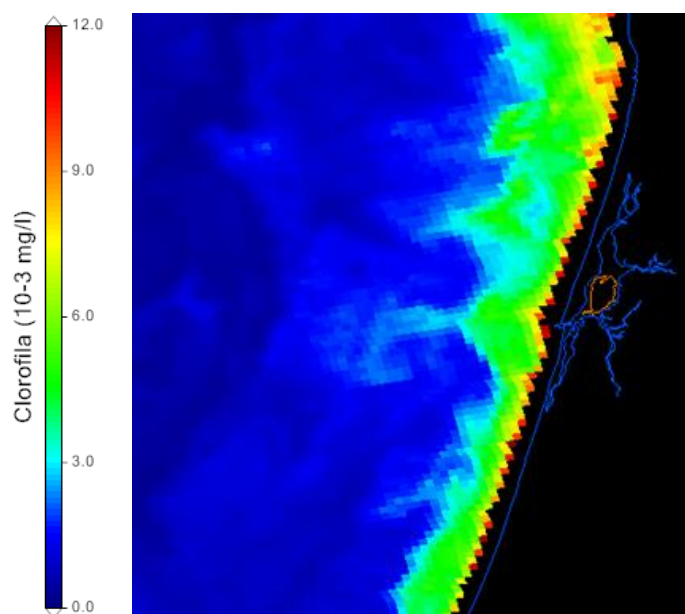
### **5.1. Validação do modelo ecológico**

Nesta secção é apresentada a comparação dos mapas 2D da concentração de fitoplâncton à superfície obtida pelo modelo, com imagens de satélite da concentração de clorofila, tendo sido considerado um rácio fitoplâncton/clorofila-a de 60 (mgC/mg Clorofila-a) (Portela, 1996), mas este valor pode variar entre 20 e 100 dependendo das espécies de fitoplâncton, (Mateus, et al., 2012; Kramer, et al., 1994). A comparação dos mapas 2D é apresentada na Figura 24 e na Figura 25.

Para uma melhor validação do modelo seriam precisas várias medições feitas ao longo do domínio de estudo, mas tal como no caso da hidrodinâmica não foram encontrados dados relativos ao período simulado pelo modelo. Assim a única comparação possível é a comparação dos resultados obtidos no cenário 3 (descarga da Ria de Aveiro e emissário submarino, com imagens de satélite da NASA para alguns dias, sendo aqui apresentada apenas uma data. A escala de cores das imagens de satélite para a clorofila é de 0 a 12  $\mu\text{g}$  de clorofila/l, e por isso a escala de cores fornecida pelo modelo foi dividida por 60mgC/mg clorofila-a, e multiplicada por 1000 de modo a obter a mesma escala que a fornecida pelo satélite.



**Figura 24:** Mapa 2D da concentração de fitoplâncton à superfície para 31/03/2011, obtido pelo modelo.



**Figura 25:** Mapa 2D da concentração de fitoplâncton à superfície para 31/03/2011, captado por satélite.

Estas imagens mostram que os resultados obtidos pelo modelo local, criado para este trabalho ainda não representam bem a realidade, pelo menos para este dia. Contudo, é preciso ter em consideração que tanto o modelo local como o modelo regional que o força não só em termos de hidrodinâmica como ecológicos, estão nesta altura na fase de estabilização, tendo ainda simulado um período de apenas 2 meses. No entanto é possível verificar a influência da Ria de Aveiro no aumento da concentração de fitoplâncton perto da foz, pelo menos no que toca a este instante. Ainda assim, sem o modelo ter estabilizado (o ideal era fazer uma simulação de 1 ano) não é possível fazer uma comparação adequada, mas pode ainda ser usado para estimar os fluxos de água e nutrientes assim como avaliar influência da Ria de Aveiro e do

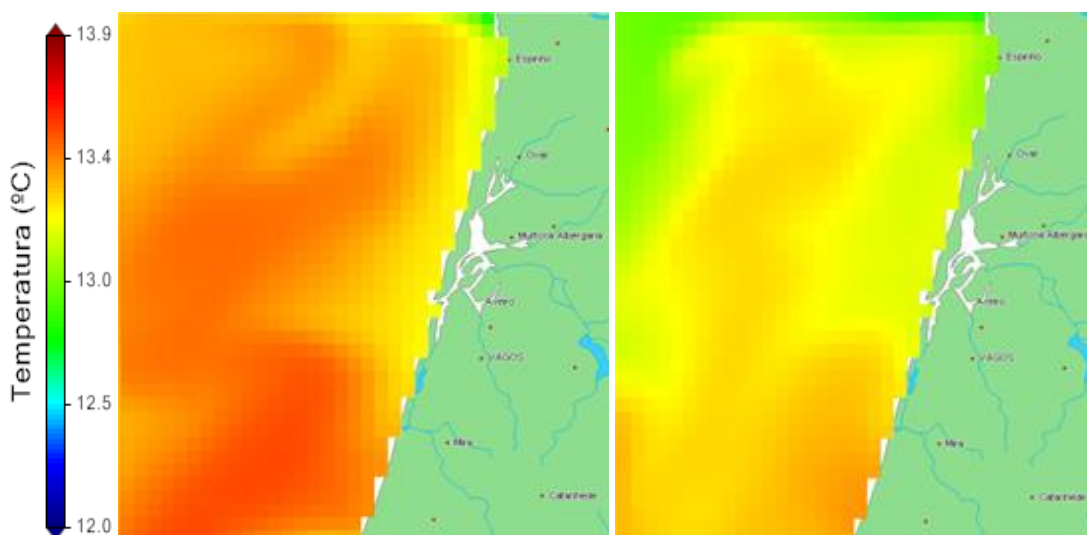


emissário submarino de São Jacinto nas concentrações de nutrientes como o nitrato ( $\text{NO}_3$ ) e de fitoplâncton e até onde se verifica essa influência.

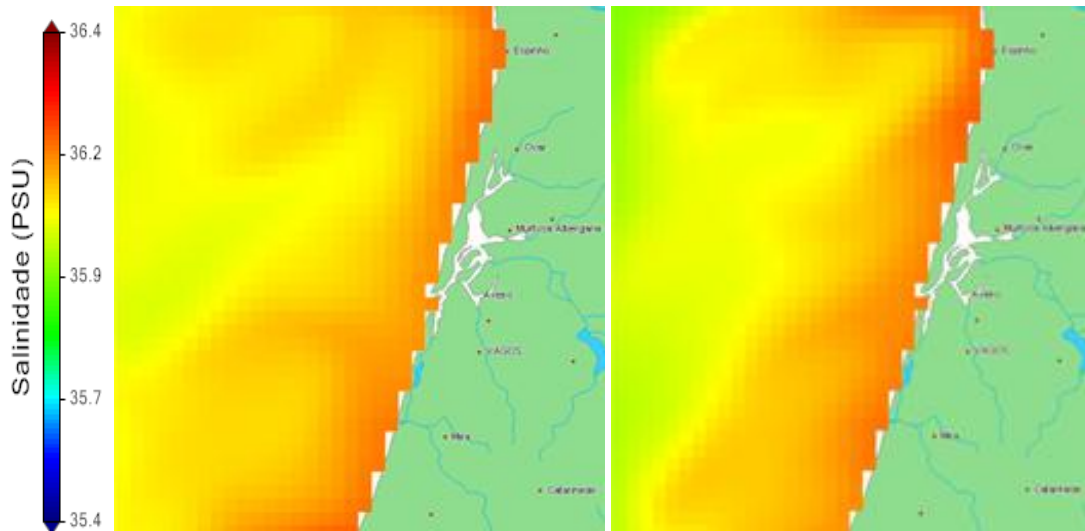
## 5.2. Correção da Hidrodinâmica

Neste trabalho foram usadas duas batimetrias do modelo PCOMS-BIO, o qual força o modelo criado para estudar o problema em questão, sendo que a primeira e original foi construída com base em dados batimétricos do SRTM30 e a segunda com base no EMODnet. Nesta secção são então apresentados e discutidos os resultados da hidrodinâmica resultante da utilização de cada uma destas batimetrias, sendo que os resultados apresentados consistem em mapas 2D e 3D de salinidade, temperatura e módulo da velocidade.

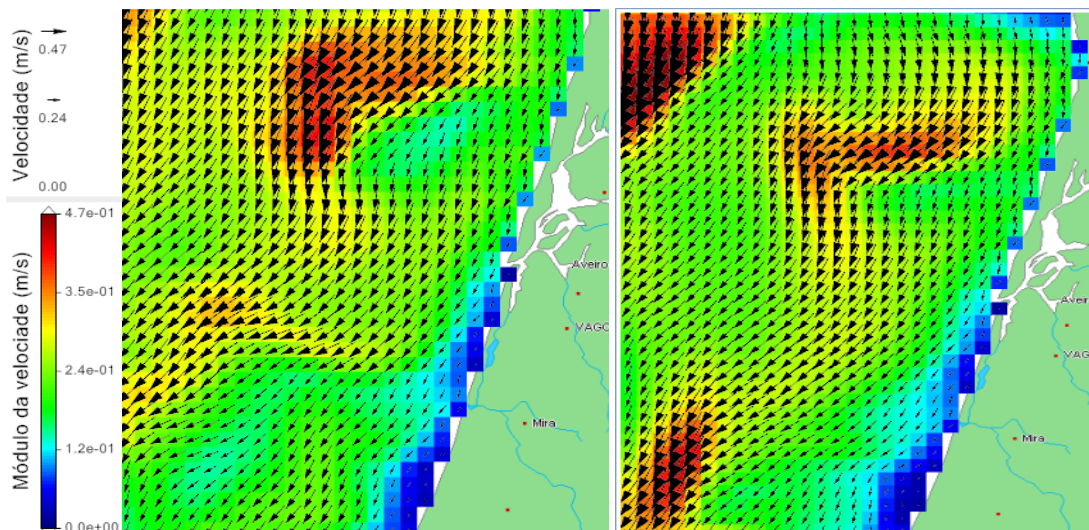
Para efeitos de comparação foi simulado o mesmo período para cada uma das batimetrias, de 22 de Janeiro a 12 de Abril, sendo os resultados apresentados para a temperatura e para a salinidade referentes a 17 de Março e o módulo da velocidade, 10 de Março. Os casos aqui apresentados não são representativos do período simulado, servindo apenas para realçar a importância da batimetria nos processos hidrodinâmicos.



**Figura 26:** Mapas da temperatura, a 17 de Março, originado pelo forçamento do PCOMS-BIO: corrigido com dados do EMODnet (à esquerda); original com dados do SRTM30 (à direita).



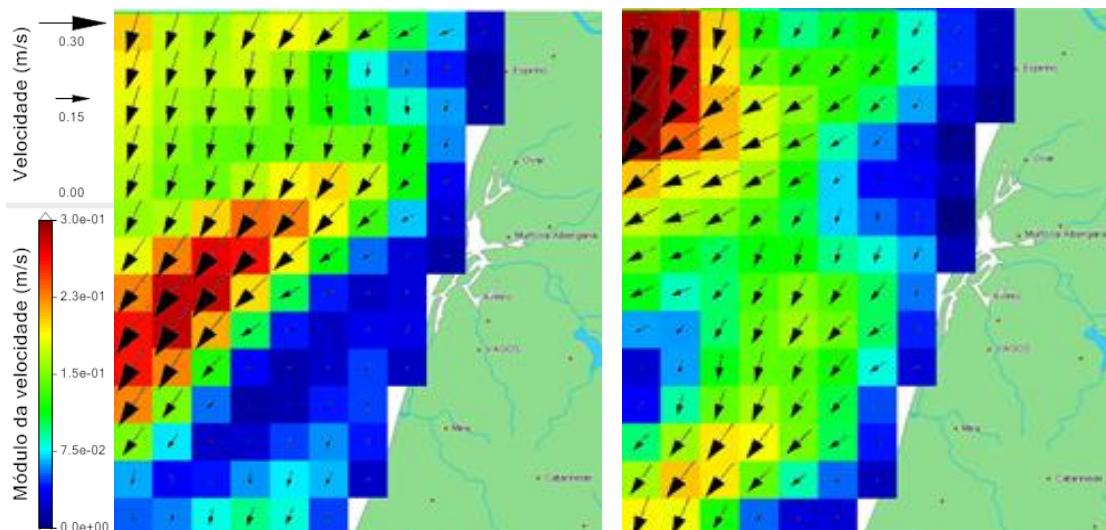
**Figura 27:** Mapa da salinidade, a 17 de Março, originado pelo forçamento do PCOMS-BIO: corrigido com dados do EMODnet (à esquerda); original com dados do SRTM30 (à direita).



**Figura 28:** Módulo da velocidade, a 10 de Março, resultado do forçamento do PCOMS-BIO: corrigido com dados do EMODnet (à esquerda); original com dados do SRTM30 (à direita).

Como se pode observar nas figuras acima, quando o modelo é forçado pelo PCOMS-BIO corrigido, os campos de temperatura (Figura 26) e salinidade (Figura 27) alteram-se consideravelmente, especialmente no caso da temperatura.

Quanto ao campo de velocidades, este é mais suave no caso do forçamento pelo PCOMS-BIO corrigido, mais visível nas zonas em que as velocidades obtidas com o forçamento do PCOMS-BIO original são maiores (Figura 28). Esta diferença é explicada pela discrepância entre os dados de velocidade fornecidos pelo PCOMS-BIO original e o corrigido com dados do EMODnet (Figura 29). Em ambos os casos é também possível observar a influência da força de coriolis na direcção da corrente, que se dirige para norte com uma pequena inclinação para o oceano aberto.



**Figura 29:** Mapa do módulo da velocidade, a 10 de Março, fornecido pelo PCOMS-BIO: corrigido com dados do EMODnet (à esquerda); original com dados do SRTM30 (à direita).

Estes resultados comprovam que corrigir a batimetria do modelo PCOMS-BIO foi uma opção boa e também necessária, uma vez que os resultados obtidos serão, muito provavelmente, de melhor qualidade, não só em termos de hidrodinâmica como ecológicos, mesmo não tendo sido validado.

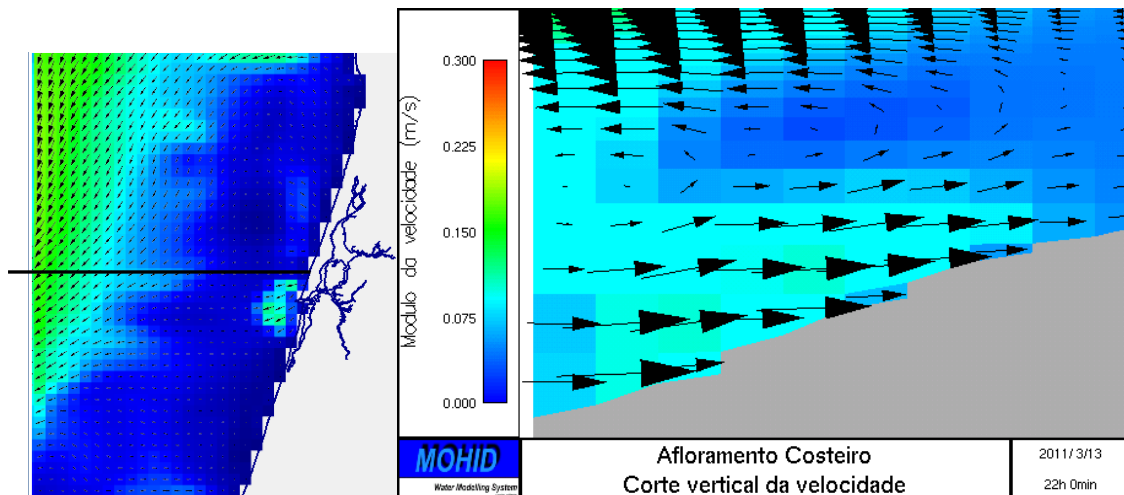
### 5.3. Cenários - hidrodinâmica

Nesta secção são apresentados e discutidos os resultados dos 3 cenários implementados para a quantificação das várias fontes de nutrientes afluentes ao local de estudo, em que o cenário 1 representa a simulação do modelo apenas com o oceano como fonte de nutrientes, o cenário 2 considera as fontes oceano e da Ria de Aveiro, e o cenário 3 o oceano, a Ria de Aveiro e o emissário submarino de São Jacinto.

Para cada cenário são apresentados os resultados dos mapas de salinidade, temperatura e módulo da velocidade, assim como as comparações entre os vários cenários com o intuito de mostrar a influência de cada fonte na hidrodinâmica e na produção primária ao longo da costa.

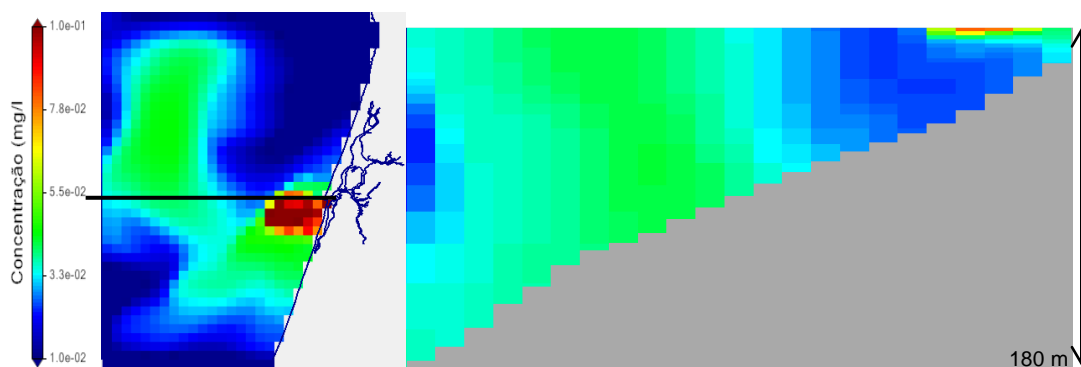
O primeiro cenário, em que a única fonte de água e nutrientes é o oceano, serve como cenário de referência para os cenários seguintes, já que a única diferença para os restantes é a introdução das descargas da Ria de Aveiro e do emissário submarino de S. Jacinto, e serve também para quantificar os fluxos na direcção Norte-Sul e na direcção Este-Oeste originados pelo oceano.

Neste primeiro cenário foram ainda verificados eventos de *upwelling* como mostra a Figura 30, apresentada em baixo, mas apenas em algumas situações e zonas específicas, sendo este corte referente à fatia XZ do meio do domínio.

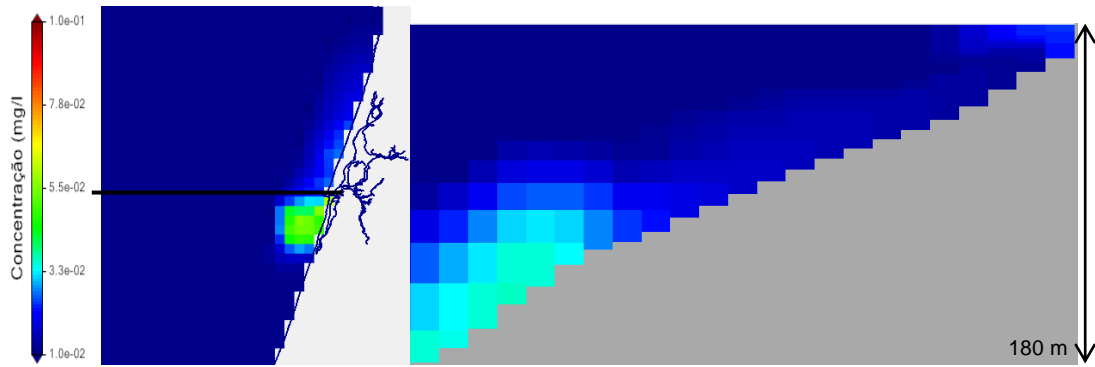


**Figura 30:** Afloramento costeiro reproduzido pelo modelo hidrodinâmico assim como a localização do corte vertical (à esquerda e a preto).

Em termos de nutrientes este afloramento em específico não trouxe 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 duas datas apresentadas, e 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 Abril, a concentração de nitrato chega a um mínimo. Nas figuras apresentadas abaixo é possível observar o efeito da descarga da Ria de Aveiro, em que os nutrientes são transportados à superfície, em direcção a Sul e a Norte, consoante o vento e as correntes dominantes (neste caso o vento dominante é de Norte).



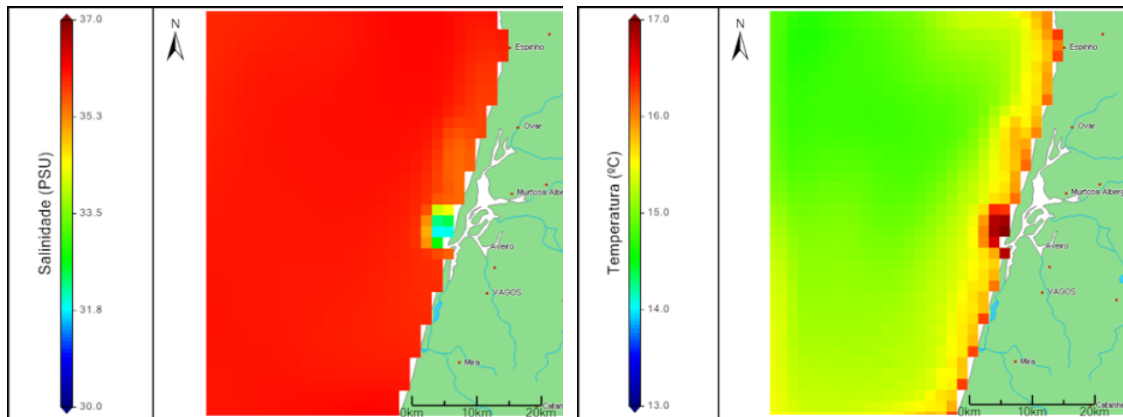
**Figura 31:** Corte vertical da concentração de nitrato para o caso da descarga da Ria no dia 20 de Março às 04h, feita na camada XZ a meio do domínio (recta a preto), aproximadamente na mesma latitude que a célula da descarga da Ria de Aveiro.



**Figura 32:** Corte vertical da concentração de nitrato para o caso da descarga da Ria no dia 10 de Abril às 06h, feita na camada XZ a meio do domínio, aproximadamente na mesma latitude que a célula da descarga da Ria de Aveiro.

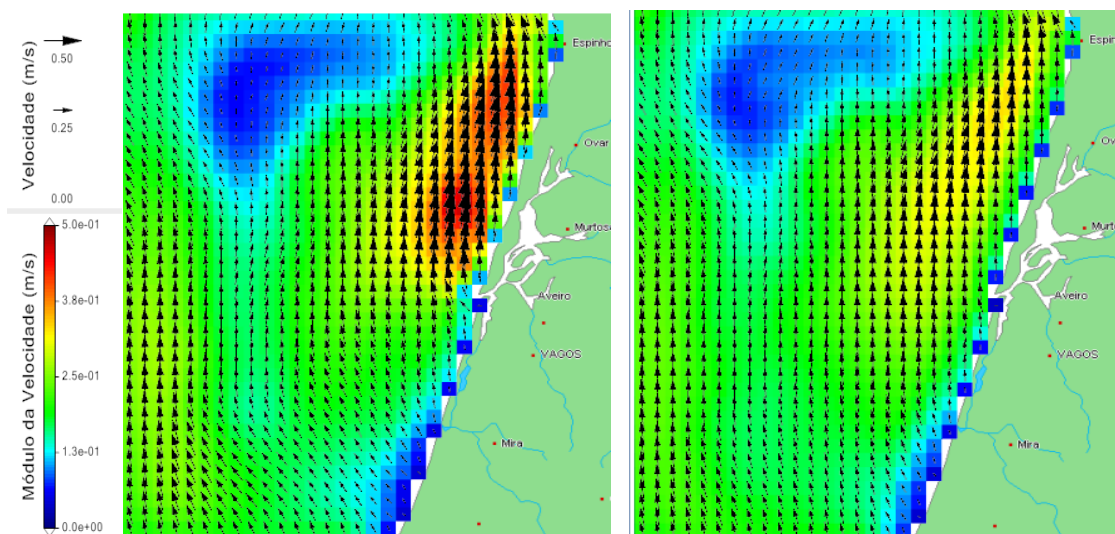
Em seguida são apresentadas as comparações entre o cenário 1 e 2 para os mapas 2D da temperatura e salinidade à superfície, em que se pode verificar uma alteração das correntes perto da entrada da Ria, que se estende até à fronteira aberta a Norte, perdendo influência gradualmente até ser difícil detectar diferenças na salinidade.

A adição da descarga da Ria de Aveiro implica um reforço extra nas correntes para norte e abrandamento das correntes para sul, pois a água descarregada tem uma salinidade menor e aumenta ligeiramente o gradiente de densidade que se verifica em geral do equador para os pólos. Este fenómeno pode ser observado nas figuras abaixo, em que se pode observar a pluma originada pela descarga da Ria de Aveiro, relativamente ao dia 8 de Abril de 2011.



**Figura 33:** Mapa 2D da salinidade (esquerda) e da temperatura (direita) à superfície para o caso da introdução da descarga da Ria de Aveiro.

Nas figuras abaixo são apresentados os mapas do módulo da velocidade resultante da adição da descarga da Ria de Aveiro, e é feita a comparação com o resultado obtido no cenário 1.



**Figura 34:** Mapa de velocidades com a descarga da Ria de Aveiro (esquerda) e sem descargas (direita), a 8 de Abril.

Como se pode observar nestas figuras os fluxos para Norte são intensificados na presença da descarga da Ria de Aveiro representando em alguns casos uma diferença de 0.2 m/s. No entanto também se pode verificar que a descarga da Ria afecta principalmente a zona costeira, uma vez que as velocidades perto da fronteira Oeste são quase idênticas. Em instantes em que o fluxo de água se dava de Norte para Sul verificou-se a mesma intensificação das velocidades e por isso não foram incluídas instantes relativos a esse caso específico.

Em seguida é apresentada a comparação da série temporal do vento associada ao período considerado com a série temporal do fluxo na direcção Norte-Sul, para analisar a influência do vento na direcção das correntes (Figura 35). A comparação é feita com os resultados obtidos para o cenário 2 por ser mais representativo da realidade, particularmente em relação às velocidades e fluxos calculados pelo modelo 3D. Esta relação será mostrada mais adiante nas figuras 41 e 42.

A Figura 35 mostra que há uma correlação positiva entre a componente  $y$  da velocidade do vento, que é o vector no sentido Norte-Sul, e a direcção e intensidade dos fluxos de água no mesmo sentido, verificando-se uma tendência igual nas duas curvas. Esta correlação verifica-se em todo o período representado no gráfico, o que significa que durante este período o vento foi um factor importante no volume de água (e seus nutrientes) transportado ao longo da costa.

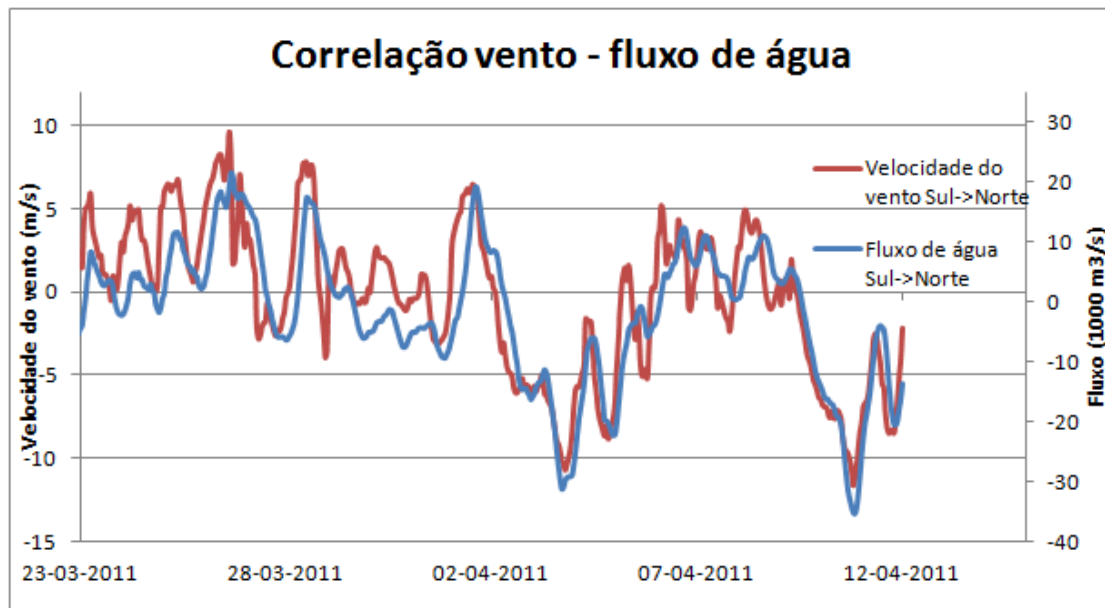


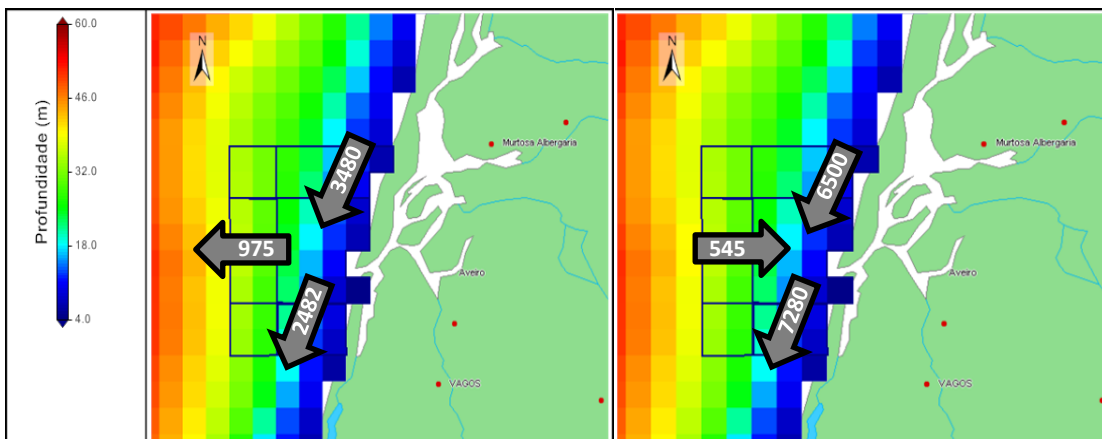
Figura 35: Relação entre a velocidade e direcção do vento, e a direcção dos fluxos de água no sentido Sul-Norte.

#### 5.4. Cenários – Fluxos de água e nutrientes

Nesta secção são apresentados e discutidos os resultados obtidos para os fluxos de água e nutrientes relativamente aos 3 cenários considerados neste trabalho, e para um período de um mês, de 12 de Março a 12 de Abril de 2011. Não foram usados resultados mais antigos por o modelo precisar de algum tempo para estabilizar, e não foi considerado um período maior por motivos de tempo. Contudo o estudo continuará mesmo depois de terminada a dissertação.

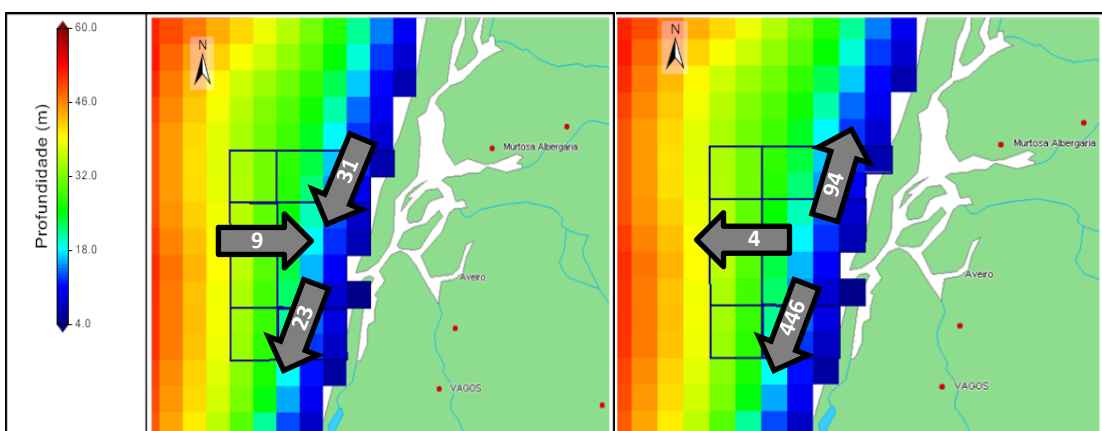
Os resultados apresentados foram obtidos usando os valores médios horários fornecidos pelo modelo, e depois multiplicados pelo número de segundos do período considerado e dividido por  $10^6$ , para converter em toneladas/mês e  $10^6$  m<sup>3</sup>/mês. Em termos de apresentação são apenas mostrados os fluxos residuais entre as 3 caixas de integração mais próximas da costa, por estas serem as caixas mais importantes para demonstrar os efeitos de cada uma das fontes consideradas e para responder aos objectivos deste trabalho.

Em seguida, e para estudar o efeito da descarga da Ria de Aveiro nos fluxos de água, nitrato e fitoplâncton entre as caixas de integração implementadas, são apresentados os valores obtidos pelo modelo implementado para a zona de estudo, começando com a comparação directa entre o cenário 1 e o cenário 2, em que é introduzida a descarga da Ria de Aveiro.



**Figura 36:** Fluxos de água ( $10^6 \text{m}^3/1 \text{mês}$ ) entre as caixas de integração implementadas: sem descargas (à esquerda); com a descarga da Ria de Aveiro (à direita).

Observando a figura acima pode-se verificar que os fluxos de água após a introdução da descarga da Ria de Aveiro alteram-se significativamente, passando de  $3500 \times 10^6 \text{m}^3/1 \text{mês}$  para mais de o dobro no sentido Norte-Sul, e invertendo o sentido do transporte de água de Costa-Oceano para Oceano-Costa, o que vem reforçar a importância desta descarga na zona de estudo relativamente ao transporte de água e nutrientes para Norte e ao longo da costa. A discrepância entre valores é explicada pelo facto de a água entrar e sair constantemente do sistema, a cada ciclo de maré, aumentando substancialmente a quantidade de água em jogo.

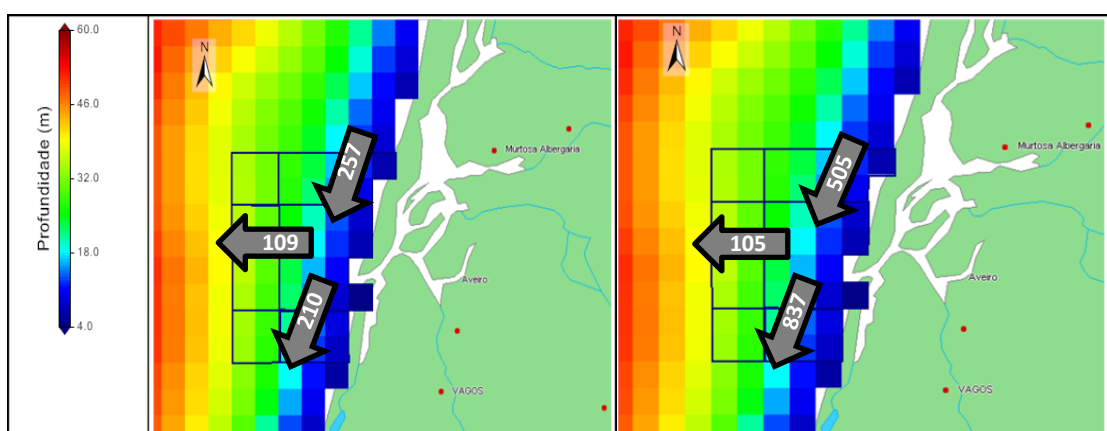


**Figura 37:** Fluxos de nitrato (ton/1mês) entre as caixas de integração implementadas: sem descargas (à esquerda); com a descarga da Ria de Aveiro (à direita).

As figuras apresentadas acima são referentes aos fluxos de nitrato durante um mês, para os cenários 1 e 2, em que se pode verificar que a descarga da Ria de Aveiro é bastante importante no que toca à quantidade de nutrientes presente ao longo da costa e perto da zona da descarga (ter em atenção que as figuras apresentadas estão ampliadas e mostram apenas uma pequena parte do domínio do modelo usado neste trabalho). Para avaliar melhor a influência desta fonte foram também implementadas as séries temporais descritas na metodologia, que permitirão verificar até onde se estende a influência das descargas da Ria e do emissário submarino.



Os fluxos apresentados na Figura 37 mostram também que a quantidade de nutrientes proveniente da Ria é suficientemente grande para inverter o fluxo registado no cenário 1, o que significa que de cada vez que o fluxo de água se dá para norte, é mais rica em nutrientes do que quando se desloca para Sul, ou seja, o contributo do oceano nesta zona é baixo quando comparado com o da Ria. Este resultado contraria, no entanto, o resultado obtido para os fluxos de água entre as caixas para o caso da descarga da Ria (Figura 36), em que o fluxo de água se dá no sentido contrário, o que também é explicado pela maior quantidade de nutrientes proveniente da Ria, relativamente ao oceano, e para a zona da foz. Há também que considerar que o nitrato se encontra, em geral, em maior quantidade no fundo onde as correntes são mais fracas e, por vezes com direcções diferentes, gerando fluxos de nitrato com tendências diferentes dos de água.



**Figura 38:** Fluxos de fitoplâncton (Ton/1 mês) entre as caixas de integração implementadas: sem descargas (à esquerda); com a descarga da Ria de Aveiro (à direita).

Como se pode observar nas figuras acima, e tal como o caso do nitrato, há uma intensificação dos fluxos de fitoplâncton aquando da implementação da descarga da Ria de Aveiro, sendo as quantidades envolvidas neste cenário superiores em relação ao cenário 1 (sem descargas). No entanto o fluxo de fitoplâncton da costa para Oeste quase não se altera, o que pode querer dizer que o fitoplâncton, por estar mais à superfície, não é arrastado para o interior da Ria por esta fronteira mas pelo que vem de Norte. Ao contrário do fluxo de nitrato, o fluxo de fitoplâncton vai sempre de Norte para Sul, o que sugere uma forte influência do vento no escoamento à superfície.

Os resultados relativos ao cenário 3 (introdução das descargas da Ria de Aveiro e do emissário submarino), não foram introduzidos por não trazerem informação nova e por serem muito semelhantes aos do cenário 2 (descarga da Ria de Aveiro).

Estes resultados são apresentados na tabela resumo abaixo juntamente com os resultados obtidos para os restantes cenários, e referem-se às trocas entre a caixa de integração central e as caixas directamente a Sul e a Norte.

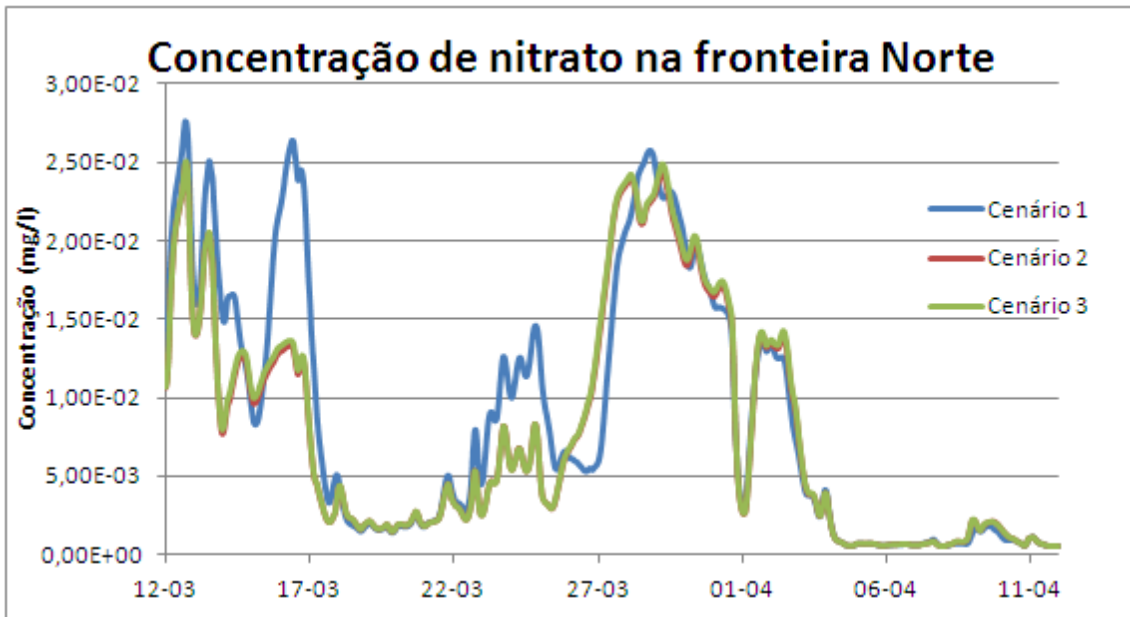
**Tabela 6:** Fluxos entre as caixas de integração consideradas. Cenário1: Sem descargas; Cenário2: Ria de Aveiro; Cenário 3: Ria de Aveiro e emissário submarino.

Sentido do fluxo	Propriedade	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3
Centro → Norte	Água ( $10^6$ m <sup>3</sup> /mês)	-3483	-6505	-6484
	Nitrato (ton/mês)	-31	94	110
	Fitoplâncton (ton/mês)	-257	-505	-514
Centro → Oeste	Água ( $10^6$ m <sup>3</sup> /mês)	975	-545	-572
	Nitrato (ton/mês)	-9	4	17
	Fitoplâncton (tonC/mês)	109	105	107
Centro → Sul	Água ( $10^6$ m <sup>3</sup> /mês)	2482	7279	7302
	Nitrato (ton/mês)	23	446	468
	Fitoplâncton (ton/mês)	210	837	848

Os resultados apresentados na tabela acima sugerem que o papel do emissário submarino nos fluxos de água e nutrientes é baixo, mas com alguma expressão no fluxo da costa para Oeste, em parte devido à proximidade da célula de descarga com as fronteiras Norte e Oeste da caixa de integração central, sendo que para as restantes direcções a sua importância não ultrapassa os 17% no caso do nitrato e 2% no caso do fitoplâncton.

## 5.5. Cenários – Séries temporais

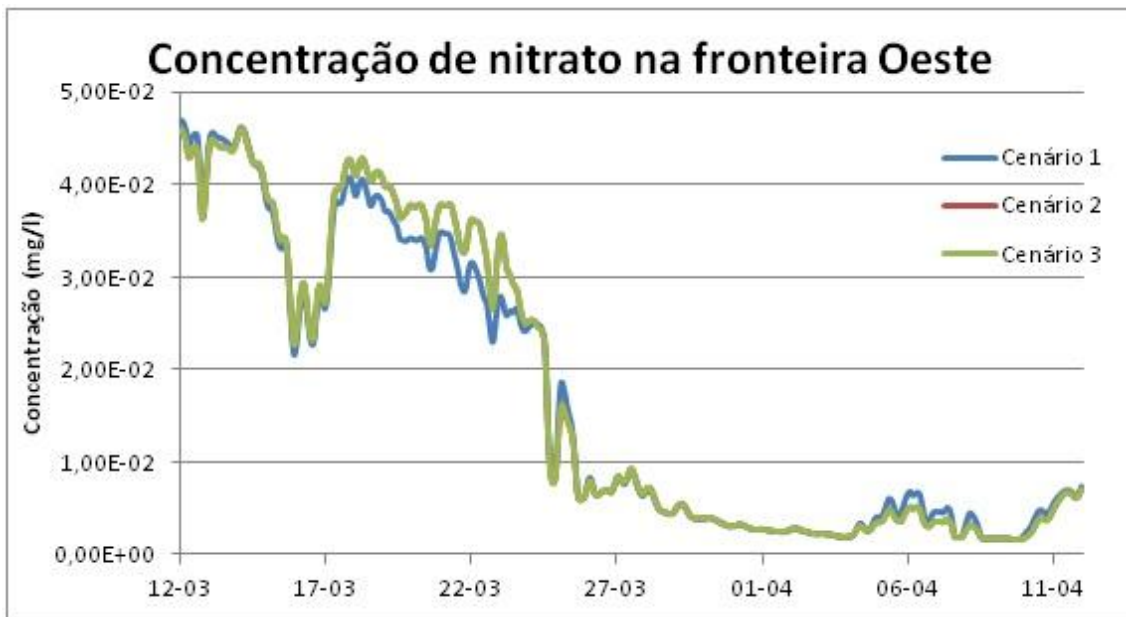
Nesta secção são apresentados os resultados obtidos pelo modelo para as séries temporais das células à superfície do domínio situadas nas fronteiras Norte e Oeste, e para a célula do domínio onde é feita a descarga do emissário submarino de São Jacinto. Não é apresentada a série temporal localizada na fronteira Sul visto que o resultado não mostra informação que já não seja mostrada nas restantes séries temporais. Os resultados mostram que os cenários 2 (descarga da Ria de Aveiro) e 3 (descarga da Ria mais descarga do emissário submarino) são quase idênticos em termos de concentrações de nitrato e fitoplâncton nas 3 fronteiras consideradas.



**Figura 39:** Comparação entre as séries temporais dos vários cenários obtidas para a célula na fronteira Norte. Cenário 1 – sem descargas; cenário 2 – descarga da Ria de Aveiro; cenário 3 – todas as descargas.

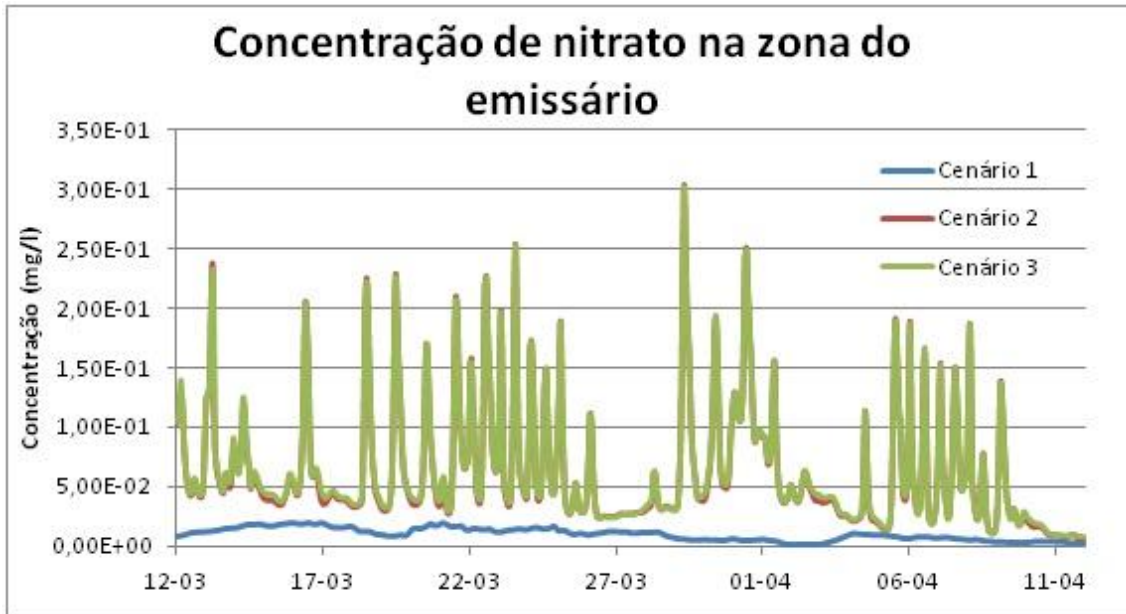
Como se pode verificar na figura acima, a concentração de nitrato na fronteira Norte é fortemente influenciada pelo que vem do oceano, apesar da descarga da Ria de Aveiro provocar uma redução da concentração em algumas alturas, como se pode verificar para o dia 17 de Março em que a concentração passa para metade. A diferença é explicada pela concentração de fitoplâncton na fronteira Norte (Figura 40), 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, o emissário submarino contribui com máximo de 3.7% para a concentração de nitrato, quando comparado com o cenário 2 (descarga da Ria de Aveiro), cuja importância atinge um máximo de 126%. Em termos de valores médios, a Ria de Aveiro diminui em 4.5% a concentração de nitrato em relação ao cenário 1 e o emissário representa -0.5%, quando comparado com o cenário 2 (descarga da Ria).



**Figura 40:** Comparação entre as séries temporais dos vários cenários obtidas para a célula na fronteira Oeste. Cenário 1 – sem descargas; cenário 2 – descarga da Ria de Aveiro; cenário 3 – todas as descargas.

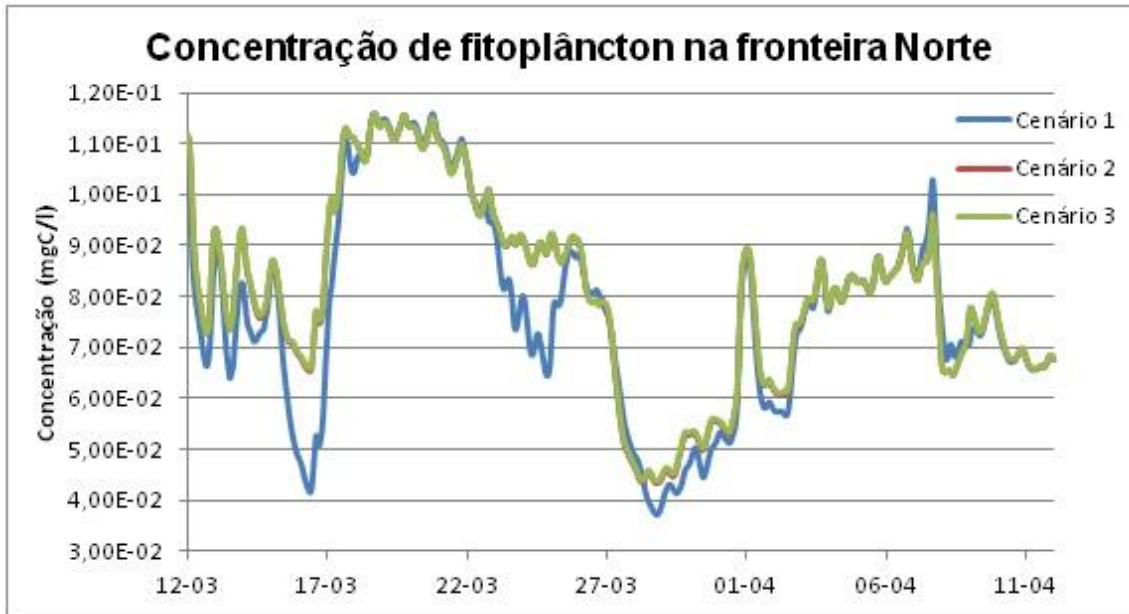
Na fronteira Oeste (Figura 40), as séries temporais mostram que as descargas da Ria de Aveiro e do emissário submarino pouco alteram a concentração de nitrato ao longo do período simulado, sendo a diferença máxima registada de 25% quando é introduzida a descarga da Ria, e de 0.6% aquando da introdução do emissário submarino. Em termos de valores médios, estas contribuições alteram-se para 1.3 e 0.02% respectivamente para a Ria de Aveiro e emissário submarino. É também de notar a diminuição da concentração de nitrato, resultado do aumento rápido de fitoplâncton na mesma altura.



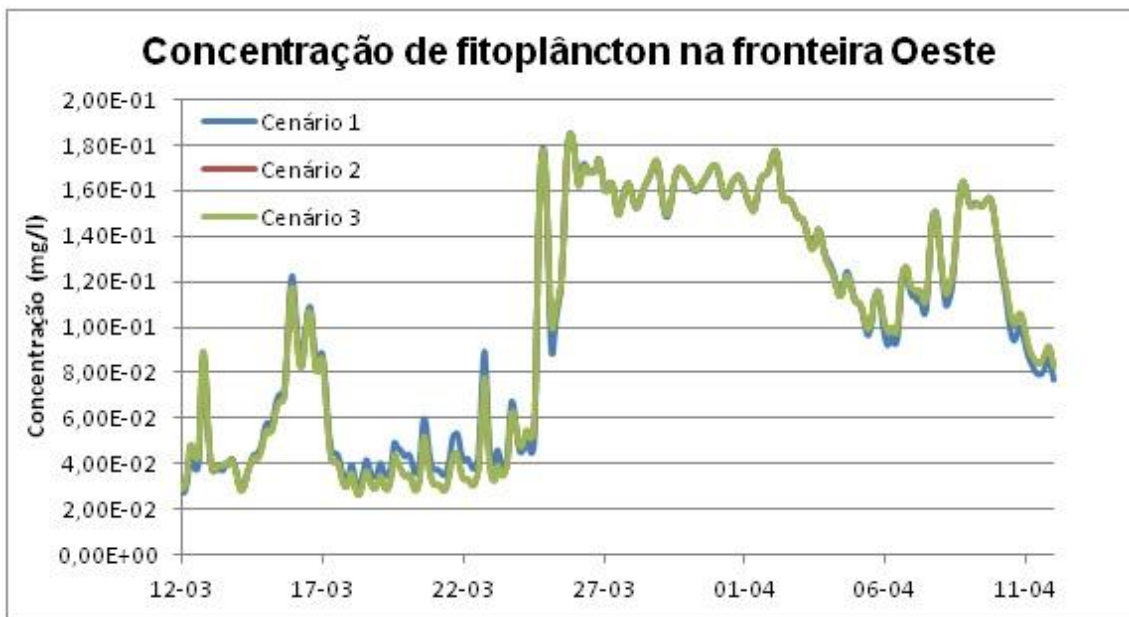
**Figura 41:** Comparação entre as séries temporais dos vários cenários obtidas para a célula em que é feita a descarga do emissário. Cenário 1 – sem descargas; cenário 2 – descarga da Ria de Aveiro; cenário 3 – todas as descargas.

Relativamente ao local de descarga do emissário submarino e perto da descarga da Ria de Aveiro (Figura 41, as séries temporais mostram uma situação muito diferente das registadas nas fronteiras do domínio. Neste caso a influência da Ria de Aveiro é consideravelmente mais importante, chegando a representar um aumento de 8.6 vezes em relação ao cenário 1 (sem descargas). Quanto à descarga do emissário submarino, a sua introdução é responsável por um aumento máximo de 48% em relação ao cenário 2 (Ria de Aveiro), e uma média de 6% relativamente ao período simulado.

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 42 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 Ria de Aveiro representa um aumento máximo na concentração de fitoplâncton de 56% e uma média de 6%, enquanto o emissário é apenas responsável por um aumento de, no máximo, 1%, quando comparado com o cenário 2 (descarga da Ria de Aveiro).

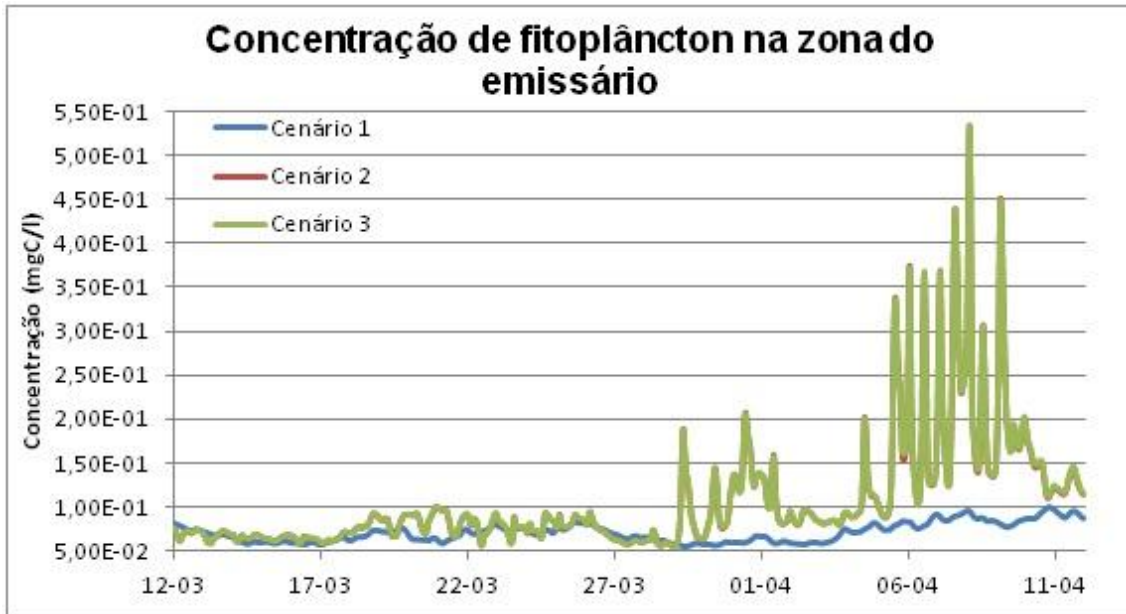


**Figura 42:** Comparação entre as séries temporais dos vários cenários obtidas para a célula na fronteira Norte. Cenário 1 – sem descargas; cenário 2 – descarga da Ria de Aveiro; cenário 3 – todas as descargas.



**Figura 43:** Comparação entre as séries temporais dos vários cenários obtidas para a célula na fronteira Oeste. Cenário 1 – sem descargas; cenário 2 – descarga da Ria de Aveiro; cenário 3 – todas as descargas.

Como se pode verificar na Figura 43, os resultados obtidos para a concentração do fitoplâncton apresentam uma diferença muito pequena entre os vários cenários, o que sugere que a influência tanto a Ria de Aveiro como o emissário submarino de São Jacinto, não se estende até esta fronteira e a produção primária é condicionada exclusivamente pelo que vem do oceano.



**Figura 44:** Comparação entre as séries temporais dos vários cenários obtidas para a célula em que é feita a descarga do emissário. Cenário 1 – sem descargas; cenário 2 – descarga da Ria de Aveiro; cenário 3 – todas as descargas.

A Figura 44 acima mostra a mesma tendência observada na série temporal do nitrato, ou seja, a curva do cenário 3 acompanha bem a curva do cenário 2, e ambas apresentam valores mais elevados que os verificados na situação em que não há descargas, como seria de esperar. Contudo, só a partir do final do mês de Março é que a diferença de concentrações começa a aumentar entre o cenário 1 (sem descargas) e os restantes cenários, o que sugere que só nesta altura é que o factor limitante da intensidade de luz solar deixa de ser condicionante. Mais uma vez a influência do emissário não ultrapassa 1%, quando comparado com as fontes conjuntas do oceano e da Ria de Aveiro.





## 6. Conclusões

A costa portuguesa, tal como todas as zonas costeiras viradas a Este, é uma zona de estudo extremamente interessante do ponto de vista hidrodinâmico e, por consequência, ecológico. A existência dos fenómenos de afloramento costeiro acarreta algumas complicações para a construção de modelos numéricos que têm de os poder reproduzir com precisão, mas o esforço é recompensado e através destes modelos é possível observar a dinâmica de toda a costa, incluindo os chamados *blooms* de produtores primários quando chega a primavera, originados pelo transporte de nutrientes do fundo do oceano para as camadas superficiais. À medida que os nutrientes são consumidos, a população de produtores diminui para concentrações mínimas durante grande parte do verão e do inverno como se hibernassem à espera de novo alimento aquando da primavera seguinte.

As descargas artificiais têm um papel relativamente importante nesta dinâmica, particularmente perto da costa e podem em alguns casos originar pequenos *blooms* de algas perto das zonas balneares, que em geral são inofensivas mas que podem ser perigosas caso sejam algas tóxicas. É nesse âmbito que se insere este trabalho, onde foi estudada a influência das descargas artificiais e naturais no ecossistema da costa portuguesa, mais concretamente na região de Aveiro, onde desagua, entre outros, o rio Vouga, e onde é feita uma descarga artificial no oceano por meio de um emissário submarino.

O objectivo principal deste trabalho foi, assim, o de quantificar as contribuições de nutrientes provenientes de cada uma das fontes existentes, que consistem no oceano, na Ria de Aveiro e no emissário submarino de São Jacinto. Associado a este objectivo está o estudo da introdução do nível de tratamento terciário nas 3 ETARs que descarregam no oceano através do emissário submarino, sendo estas as ETARs Norte, Sul e de São Jacinto. Este novo nível de tratamento tem custos associados e que poderão ser infundados. Outros objectivos passaram pelo estudo dos processos hidrodinâmicos e do nível trófico actual associados ao local de estudo, e também a aquisição de conhecimentos na área da modelação de ecossistemas marinhos complexos, usando uma abordagem prática para entender melhor como funcionam os processos até agora ensinados apenas em termos teóricos.

Foi assim usado um modelo numérico 3D (MOHID *water system*), para responder a estas perguntas, em que foram implementadas caixas de integração 2D perto da zona das descargas da Ria de Aveiro e do emissário submarino, e ainda quatro séries temporais, das quais três situadas nas fronteiras Norte, Sul e Oeste, e a última, na célula do modelo em que é feita a descarga do emissário submarino.

Os resultados obtidos pelo modelo ecológico e hidrodinâmico, relativamente aos fluxos entre caixas de integração implementadas para a zona próxima de ambas as descargas sugerem que apenas a Ria de Aveiro exerce uma influência importante nas correntes oceânicas perto da costa. Em termos de nutrientes e fitoplâncton a influência da Ria de Aveiro perto da foz é muito

grande, como seria de esperar, considerando as quantidades destas propriedades afluentes à mesma, pelos rios que a alimentam.

Contudo, os resultados obtidos para as séries temporais nas fronteiras Norte, Sul e Oeste mostram que a influência das descargas da Ria de Aveiro e do emissário submarino de São Jacinto quase não se fazem sentir nestes locais, em especial a descarga do emissário submarino, que contribui, no máximo, com 6% para a concentração obtida nas fronteiras.

De facto, todos os resultados apontam para que actualmente a descarga do emissário submarino de São Jacinto é até benéfico para a produção primária, contribuindo (apesar de em pequenas quantidades) com alimento para espécies de peixes pescadas na região. Mais ainda, a introdução de um novo tratamento terciário significaria um custo energético e financeiro que não traria diferenças significativas para a dinâmica de nutrientes e fitoplâncton verificada na zona de estudo.

No decorrer deste trabalho houve muitos percalços e problemas até obter uma implementação correcta do modelo, mas os problemas principais tiveram origem na batimetria, que antes de ser corrigida causava problemas na circulação de água no domínio do modelo, tendo sido corrigida a tempo de apresentar este trabalho. Outra dificuldade encontrada foi a validação do modelo hidrodinâmico e do modelo ecológico, uma vez que não foram encontrados ou fornecidos dados de nível da água, correntes e concentrações de propriedades da água como a os nitratos e o fitoplâncton que foi apenas comparado com imagens de satélite.

Apesar destas dificuldades o modelo *MOHID water modelling system* permitiu chegar a conclusões firmes e sistemáticas revelando a sua capacidade de simular os processos hidrodinâmicos característicos de uma zona costeira, nomeadamente os fenómenos de afloramento costeiro, extremamente importantes para a produção primária na região, mesmo tendo em consideração o facto de os modelos usados não terem tido tempo de estabilizar, e o modelo local não ter sido validado. Finalmente, este trabalho continuará no âmbito de um projecto de cooperação entre o Maretec, a universidade de Aveiro e a SIMRIA (projecto *dyepilume*), em que será feita a validação do modelo local e estudada a pluma originada pelo emissário, em termos de matéria dissolvida refractária que pode causar mais problemas que os nitratos, já que é mais difícil transformar os primeiros em moléculas mais simples.

## Bibliografia

- Abbott, M.B., Damsgaard, A. e Rodenhuis, G.S. 1973.** System 21, Jupiter, a design system for two dimensional nearly horizontal flows. *J. Hyd. Res.* 1, 1973, pp. 1-28.
- Araújo, I.B., Dias, J.M. e Pugh, D.T. 2008.** Model simulations of tidal changes in a coastal lagoon, the Ria de Aveiro (Portugal). *Continental Shelf Research.* 2008, Vol. 28, pp. 1010-1025.
- Arawaka, A e Lamb, V. 1977.** Computational design of the basic dynamical processes of the UCLA general circulation model. *Monthly Weather Review.* 125, 1977, pp. 2293–2315.
- ARH centro. 2001.** *PLANO DE BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO VOUGA.* 2001.
- Arino, O. e Rudnicki, R. 2004.** Phytoplankton dynamics. *C. R. Biologies.* 2004, Vol. 327.
- Barrosa, J. 1985.** *Breve Caracterização da Ria de Aveiro.* Câmara Municipal de Aveiro, Aveiro : Jornadas da Ria de Aveiro, Volume II, 1985. pp. 9-14.
- Coelho, H. S., et al. 1998.** The slope current along the western European margin: A numerical investigation. *BOLETÍN INSTITUTO ESPAÑOL DE OCEANOGRAFÍA.* 15, 1998, pp. 61-72.
- Coelho, H.S., et al. 2002.** A model for ocean circulation on the Iberian coast. *Journal of Marine Systems.* 32, 2002, pp. 153– 179.
- Cordell Bank National Marine Sanctuary.** [Online]  
<http://cordellbank.noaa.gov/environment/seasons.html>.
- Dias, J. M., Lopes, J. F. e Dekeyser, I. 2000.** Tidal Propagation in Ria de Aveiro Lagoon, Portugal. *Phys. Chem. Earth.* 2000, Vol. 25, pp. 369-374.
- . **1999.** Hydrological characterization of Ria de Aveiro, in early summer. *Oceanologica Acta.* 22, 1999, pp. 473-485.
- . **2003.** A numerical system to study the transport properties in the Ria de Aveiro lagoon. *Ocean Dynamics.* 2003, Vol. 53, pp. 220-231.
- EPA. 1985.** *Rates, Constants, and Kinetics Formulations in Surface Water Quality Modeling, 2nd ed.* United States Environmental Protection Agency. 1985. Relatório EPA/600/3-85/040, 454pp.
- Fontes, Cláudia Lindim. 2010.** *Modelling of Water Quality in the Alqueva Reservoir, Portugal.* Escola de Engenharia, Universidade do Minho. 2010. PhD.
- INAG. 2003.** *Qualidade da Água em Estuários Portugueses, Volume V.* 2003.
- J.M., Dias e J.F., Lopes. 2006.** Implementation and assessment of hydrodynamic, salt and heat transport models: The case of Ria de Aveiro Lagoon (Portugal). *Environmental Modelling & Software.* 2006, Vol. 21, pp. 1-15.
- Kramer, K. J. M., Brockmann, U. H. e Warwick, R. A. 1994.** *Tidal estuaries: manual of sampling and analytical procedures.* 1994. published for the European Commission by A.BALKEMA/ROTTERDAM/BROOKFIELD, 304pp.
- Leitão, P. 2003.** *Integração de Escalas e de processos na Modelação do Ambiente Marinho.* Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa. Lisboa : s.n., 2003. Tese de Doutoramento.

**Lopes, C.B., et al. 2007.** Assessment of spatial environmental quality status in Ria de Aveiro (Portugal). *SCIENTIA MARINA*. 2007, pp. 293-304.

**Lopes, José Fortes, et al. 2009.** Modelling the temperature and the phytoplankton distributions at the Aveiro near coastal zone, Portugal. *ecological modelling*. 2009, Vol. 220, pp. 940-961.

**Malhadas, Maria Madalena dos Santos. 2008.** *Modelação do impacto de emissários submarinos em zonas costeiras – caso da foz do arelho –*. Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa. 2008. MSC.

**Mateus, M., et al. 2012.** Is it relevant to explicitly parameterize chlorophyll synthesis in marine ecological models? *Journal of Marine Systems*. 94, 2012, pp. 23-33.

**Metcalfe & Eddy. 2003.** *Wastewater Engineering: Treatment and Reuse*. s.l. : McGraw-Hill, 2003.

*Modelação da hidrodinâmica da Ilha da Madeira.* **Campuzano, F, et al. 2009.** Funchal, Madeira, Portugal : s.n., 2009. 6ªs Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária, JPECP.

**Moita, M.T. 2001.** *Estrutura, Variabilidade e Dinâmica do Fitoplâncton na Costa de Portugal Continental*. Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa. 2001. PhD.

#### **NODC.**

**Oliveira, Paulo B., et al. 2009.** Surface temperature, chlorophyll and advection patterns during a summer upwelling event off central Portugal. *Continental Shelf Research*. 2009, Vol. 29, pp. 759-774.

**Peliz, Á., et al. 2002.** Fronts, jets, and counter-f lows in the Western Iberian upwelling system. *Journal of Marine Systems*. 2002, Vol. 35, pp. 61-77.

**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. 1996.** *Modelação matemática de processos hidrodinâmicos e de qualidade da água no estuário do Tejo*. Instituto Superior Técnico. Universidade Técnica de Lisboa, Portugal. 1996. Tese de Doutoramento. Engenharia do Ambiente.

**Ribeiroa, Ana C., Peliz, A. e Santos, A. M. P. 2005.** A study of the response of chlorophyll-a biomass to a winter upwelling event off Western Iberia using SeaWiFS and in situ data. *Journal of Marine Systems*. 2005, Vol. 53, pp. 87-107.

**Rodrigues, M., et al.** Three-dimensional modeling of the lower trophic levels in the Ria de Aveiro (Portugal). *Ecological Modelling*. Vol. 220, pp. 1274–1290.

**Saraiva, Ana Sofia. 2005.** *Modelação ecológica da Ria de Aveiro: o papel das microalgas*. Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa. 2005. Msc.

**Silva, J. F., Duck, R. W., Anderson, J. M., McManus, J., Monk, J. G. C. 2001.** Airborne Observations of Frontal Systems in the Inlet Channel of the Ria de Aveiro, Portugal. *Phys.Chem. Earth (B)*. 9, 2001, Vol. 26, pp. 713 – 719.

**Silva, J.F, et al. 2000.** grupo.us.es/ciberico/archivos\_acrobat/porto1j.figueiredo.pdf. grupo.us.es. [Online] 2000.

**Silva, J.Figueiredo., et al. 2002.** Evaluation of the nutrient inputs to a coastal lagoon: the case of the Ria de Aveiro, Portugal. *Hydrobiologia*. 2002, Vol. 475/476, pp. 379–385.

**SIMRIA.** hidroprojecto. SIMRIA. [Online]  
[http://www.hidroprojecto.pt/referencias.php?id=36&id\\_pai=10&id\\_ref=9](http://www.hidroprojecto.pt/referencias.php?id=36&id_pai=10&id_ref=9).

**Tilstone, G. H., Figueiras, F. G e Fraga, F. 1994.** Upwelling-downwelling sequences in the generation of red tides in a coastal upwelling system. *MARINE ECOLOGY PROGRESS SERIES*. 1994, Vol. 112, pp. 241-253.

**Trancoso, A.R., et al. 2005.** Modelling macroalgae using a 3D hydrodynamic-ecological model in a shallow, temperate estuary. *Ecological Modelling*. 187, 2005, pp. 232–246.

**Vaz, N., et al. 2005.** Horizontal patterns of water temperature and salinity in an estuarine tidal. *Ocean Dynamics*. 2005, Vol. 55, pp. 416-425.

**Vaz, N., Leitão, P.C. e Dias, J.M. 2007.** Channel-ocean exchange driven by tides and river flow: Espinheiro Channel(Portugal). *Journal of Coastal Research*. 2007, Vol. 50, pp. 1000-1004.

**Vaz, Nuno e Miguel, Dias João. 2008.** Hydrographic characterization of an estuarine tidal channel. *Journal of Marine Systems*. 2008, Vol. 70, pp. 168-181.

**Vaz, Nuno, Dias, João Miguel e Leitão, Paulo Chambel. 2009.** Three-dimensional modelling of a tidal channel: The Espinheiro Channel(Portugal). *Continental Shelf Research*. 2009, Vol. 29, pp. 29-41.

**Verelst, Nathalie. 2008.** *Variability of water fluxes off Portugal derived from an operational model*. Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa; Université de Liège. 2008. Msc .



## **Anexos**

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





## **Anexo I - Metodologia de cálculo dos *inputs* de nutrientes e fluxos de caixas.**

Neste anexo será feita a descrição do método de cálculo que originou os resultados gráficos relativos aos fluxos entre as caixas criadas, assim como a forma como foram calculadas as várias concentrações dos nutrientes provenientes das ETARs Norte, Sul e São Jacinto e da PORTUCEL.

### **Emissário Submarino**

Os dados dos nutrientes fornecidos pela SIMRIA consistiram em concentrações de  $N_{total}$  e  $P_{total}$  medidas à entrada das 3 ETARs, 4 vezes por mês ao longo do ano de 2010, sendo essas concentrações apresentadas em Tabela 7, Tabela 8 e Tabela 9.

Tabela 7: Carga de nutrientes à entrada da ETAR Norte.

Mês	Dia	Ntotal	Ptotal
		mg/l	mg/l
<b>VLE</b>		<b>15.0</b>	<b>10.0</b>
Janeiro	5	36.8	3.86
	11	17.54	1.18
	18	28.4	0.986
	25	25.6	0.842
Fevereiro	3	40.4	4.07
	10	49	2.33
	17	45.8	2.12
	24	28.4	2.61
Março	3	21.0	<2
	10	37.4	2.1
	17	47.4	<2
	24	34.0	<2
	31	39.2	2.66
Abril	7	42.2	3.29
	12	41.2	<2
	19	47	2.32
	28	45	2.1
Maio	3	48	<2
	10	50.6	<2
	17	64.6	<2
	24	68.6	5.19
Junho	2	115.2	1.47
	7	68.0	<2
	14	54.0	<2
	21	54.6	<2
	28	62.0	2.23
Julho	5	60.2	2.86
	12	55.8	<2
	19	64.6	3.08
	26	51.6	4.04
Agosto	9	78.2	4.85
	16	68.8	5.8
	23	52.2	4.6
	30	38.6	5.0
Setembro	6	39.2	<2
	13	28.2	6.61
	20	33.2	4.53
	27	18.3	5.68
Outubro	4	27.8	2.11
	11	24.4	<2
	18	39.4	3.5
	25	37.4	2.5
Novembro	3	37.6	5.16
	8	25.4	4.6
	15	23.8	<2
	22	23.8	<2
Dezembro	6	20.2	<2
	13	37.8	<2
	20	47.6	2.4
	27	49.8	<2

Tabela 8: Carga de nutrientes à entrada da ETAR Sul.

Mês	Dia	Ntotal	Ptotal
		mg/l	mg/l
<b>VLE</b>		<b>15.0</b>	<b>10.0</b>
Janeiro	4	21.4	2.5
	11	30.4	3.12
	18	24.6	2.03
	25	18.8	1.07
Fevereiro	3	36.8	3.18
	10	36.4	2.22
	17	31.0	2.06
	24	26.0	2.55
Março	3	32.6	3.42
	10	23.6	2.25
	17	22.6	2.28
	24	21.4	2.87
	31	22	2.46
Abril	5	27.4	2.78
	12	34	3.08
	19	18.86	<2
	28	42	4.00
Maio	3	48.4	2.82
	10	46.6	2.97
	17	46.6	5.62
	24	54.8	5.64
Junho	2	38.6	3.84
	7	40.9	3.27
	14	23.4	<2
	21	41.7	2.93
	28	70.8	7.23
Julho	5	56	8.84
	12	61.6	6.28
	19	41.8	2.36
	26	61	5.12
Agosto	2	57	1.71
	9	71	3.74
	16	70.6	6.91
	23	65	5.75
Setembro	6	58.4	3.36
	13	43.6	<2
	20	49.8	<2
	27	16.1	<2
Outubro	4	16.6	<2
	11	12.5	<2
	18	37.2	4.28
	25	51.2	3.51
Novembro	3	26	<2
	8	48.8	3.86
	15	31.6	2.44
	22	37.4	2.62
	29	48	<2
Dezembro	6	28	2.77
	13	58.2	12.6
	20	38.4	<2
	27	37	<2

**Tabela 9:** Carga de nutrientes à entrada da ETAR de S. Jacinto.

Mês	Dia	Ntotal	Ptotal
		mg/l	mg/l
<b>VLE</b>		<b>15</b>	<b>10</b>
Janeiro	4	15.86	1.82
	11	24.6	1.69
	18	17.3	1.71
	25	15.04	1.9
Fevereiro	3	22.8	2.17
	8	23.8	2.59
	15	23.6	2.33
	22	25	2.57
Março	1	18.52	2.35
	8	42.4	<2
	15	16.84	<2
	22	19.7	2.17
	29	13.36	<2
Abril	5	20.4	<2
	12	22	2.06
	19	27.8	2.47
	28	31.8	2.42
Maio	3	32.4	3.96
	10	36.4	3.06
	17	40.6	3.24
	24	42.8	3.52
Junho	2	50.4	3.81
	7	55.5	4.42
	14	47.6	4.25
	21	44.2	4.1
	28	46.3	4.53
Julho	5	49.8	5.33
	12	53.2	5.33
	19	54.4	6.11
	26	73	5.81
Setembro	6	74.8	6.1
	13	81	7.11
	20	106	7.97
	27	56.6	5.82
Outubro	4	24.4	5.79
	11	31.8	4.52
	18	22.8	4.64
	25	33.8	4.63
Novembro	3	33.2	4.43
	8	42.2	4.69
	15	45.2	4.96
	22	45	4.32
	29	48	4.64
Dezembro	6	45.8	4.4
	13	22.2	2.28
	20	27.2	2.99
	27	31.6	2.74

Uma vez que estes valores não especificam as concentrações das várias formas de azoto e fósforo, foram feitas estimativas com base em Metcalf & Eddy (Metcalf & Eddy, 2003), e tendo em consideração o objectivo máximo do tratamento secundário (presente nas 3 ETARs) que é a oxidação da matéria orgânica. É evidente que as estimativas representam isso mesmo, e é preciso ter em conta que cada ETAR é um caso específico que usa um tipo específico de

tratamento secundário e está sujeito a condições diferentes das restantes produzindo níveis de eficácia diferentes ao longo do tempo e de ETAR para ETAR.

As percentagens de cada forma de azoto e fósforo são apresentados nas tabelas seguintes e têm em conta uma composição média das águas residuais antes de serem tratadas.

**Tabela 10:** Descriminação das várias formas de azoto nas águas residuais (com base em (Metcalf & Eddy, 2003)).

<b>Ntotal (%)</b>					
<b>NH<sub>4</sub> (18%)</b>	<b>Inorgânico (29%)</b>		<b>Orgânico (53%)</b>		
	NO <sub>3</sub> (60%)	NO <sub>2</sub> (40%)	Particulado (50%)	DON (50%)	
				Refractário (15%)	N-refractário (35%)
18	17.4	11.6	26.5	7.95	18.55

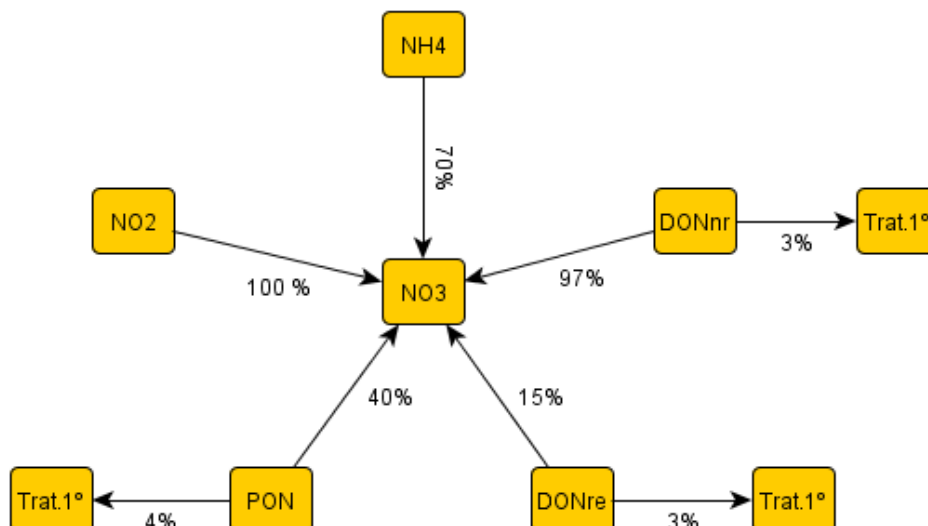
**Tabela 11:** Descriminação das várias formas de fósforo nas águas residuais (com base em (Metcalf & Eddy, 2003)).

<b>Ptotal (%)</b>			
<b>PO<sub>4</sub> (67%)</b>	<b>Orgânico (33%)</b>		
	Particulado (30%)	DOP (70%)	
		Refractário (30%)	n-refractário (70%)
67	9.9	6.93	16.17

A partir desta informação foram considerados dois cenários: no primeiro foi considerado o tratamento secundário actual e no segundo é o tratamento terciário das águas provenientes das ETARs e da PORTUCEL, ou seja, é apenas descarregado caudal desprovido de nutrientes.

Os valores das várias concentrações usadas no cenário 1 foram calculados com base nos valores apresentados na Tabela 10 e na Tabela 11 e pela multiplicação dos valores obtidos na Tabela 12 e Tabela 13 pela média dos valores medidos mensais, fornecidos pela SIMRIA.

Os factores de remoção/transformação das várias formas de azoto e fósforo são explicados e apresentados, respectivamente, na Figura 45 e na Tabela 12 e Tabela 13. Os resultados finais são apresentados na Tabela 20.



**Figura 45:** Taxas de transformação das várias formas de azoto em NO<sub>3</sub> e percentagens de perda associadas ao tratamento primário.

Neste esquema todas as percentagens associadas a NO<sub>3</sub> representam a transformação (em termos de massa de N) para NO<sub>3</sub>, das restantes formas de azoto. As perdas associadas à retenção no tratamento primário estão assinaladas nas ligações às caixas “Trat.1º”.

**Tabela 12:** Fracção das várias formas de azoto após tratamento, usadas para o cenário 1.

Ntotal					
NH <sub>4</sub> (%)	Inorgânico		Orgânico		
	NO <sub>3</sub> (%)	NO <sub>2</sub> (%)	Particulado (%)	DON	
				Refractário (%)	n-refractário (%)
5.5	72.4	0	15.5	6.6	0

**Tabela 13:** Fracção das várias formas de fósforo após tratamento, usadas para o cenário 1.

Ptotal			
PO <sub>4</sub> (%)	Orgânico		
	Particulado (%)	DOP	
		Refractário (%)	n-refractário (%)
67	9.9	6.93	16.17

Para obter as concentrações finais que seriam usadas na descarga foi preciso ainda considerar a descarga da PORTUCEL, que por não terem sido disponibilizados dados, teve de ser também estimada. Esta estimativa consistiu no pressuposto de que a massa total de nutrientes, proveniente da PORTUCEL representa 40% de toda a massa de nutrientes provenientes das 3 ETARs.

As concentrações foram então calculadas segundo a equação:

$$C_A^i(\text{final}) = \frac{\sum_{j=1}^3 (C_A^{j,i} \times V^{j,i} + M_B^{\text{PORTUCEL},i})}{V^i \text{total}} \quad \text{Equação 13}$$

Em que  $C_A^i(\text{final})$  representa a concentração à saída do emissário, da propriedade A no mês  $i$ ,  $j=1, 2, 3$  representa as ETARs Norte, Sul e S. Jacinto e  $M_B^{\text{PORTUCEL},i}$  a massa média mensal da propriedade B, afluyente ao emissário, sendo B =(DONre, DOPre, NO<sub>3</sub> e PO<sub>4</sub>)

Os valores de  $C_A^{j,i}$ ,  $V^{j,i}$  são apresentados em seguida.

**Tabela 14:** Concentrações médias mensais obtidas para a ETAR SUL.

Concentrações (mg/l)	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
N-NH <sub>4</sub>	1.3	1.8	1.3	1.7	2.7	2.4	3.0	3.6	2.3	1.6	2.1	2.2
N-NO <sub>3</sub>	17.2	23.6	17.7	22.1	35.5	31.2	39.9	47.7	30.4	21.3	27.8	29.2
Nparticulado	3.7	5.0	3.8	4.7	7.6	6.7	8.5	10.2	6.5	4.5	5.9	6.3
DONre	1.6	2.2	1.6	2.0	3.3	2.9	3.7	4.4	2.8	2.0	2.5	2.7
PO <sub>4</sub>	1.87	2.15	2.28	2.54	3.66	3.31	4.85	3.88	2.01	2.53	2.22	4.15
Pparticulado	0.18	0.21	0.22	0.25	0.36	0.33	0.48	0.38	0.2	0.25	0.22	0.41
DOPr	0.13	0.14	0.15	0.17	0.25	0.22	0.32	0.26	0.13	0.17	0.15	0.28

**Tabela 15:** Concentrações médias mensais obtidas para a ETAR NORTE.

Concentrações (mg/l)	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
N-NH <sub>4</sub>	1.5	2.2	2.0	2.4	3.2	3.9	3.2	3.3	1.6	1.8	1.5	2.1
N-NO <sub>3</sub>	19.6	29.6	25.9	31.7	42.0	51.2	42.0	43.0	21.5	23.3	20.0	28.1
Nparticulado	4.2	6.3	5.5	6.8	9.0	11.0	9.0	9.2	4.6	5.0	4.3	6.0
DONre	1.8	2.7	2.4	2.9	3.9	4.7	3.9	4.0	2.0	2.1	1.8	2.6
PO <sub>4</sub>	1.5	2.4	1.8	2.1	2.4	1.7	2.6	4.3	4.0	2.2	2.9	1.8
Pparticulado	0.1	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.3	0.4	0.4	0.2	0.3	0.2
DOPr	0.1	0.2	0.1	0.1	0.2	0.1	0.2	0.3	0.3	0.1	0.2	0.1

**Tabela 16:** Concentrações médias mensais obtidas para a ETAR de S. Jacinto.

Concentrações (mg/l)	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
<b>N-NH4</b>	1.0	1.3	1.2	1.4	2.1	2.7	3.2	3.3	4.4	1.5	2.3	1.7
<b>N-NO3</b>	13.2	17.2	16.0	18.5	27.5	35.3	41.7	43.4	57.6	20.4	30.9	22.9
<b>Nparticulado</b>	2.8	3.7	3.4	3.9	5.9	7.6	8.9	9.3	12.3	4.4	6.6	4.9
<b>DONre</b>	1.2	1.6	1.5	1.7	2.5	3.2	3.8	4.0	5.3	1.9	2.8	2.1
<b>Inorg</b>	1.5	2.1	1.8	1.9	3.0	3.6	4.8	5.1	5.8	4.2	4.0	2.7
<b>Particulado</b>	0.2	0.2	0.2	0.2	0.3	0.4	0.5	0.5	0.6	0.4	0.4	0.3
<b>DOPr</b>	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	0.3	0.3	0.4	0.3	0.3	0.2

A massa das propriedades incluídas neste trabalho para o que vem da PORTUCEL (NO<sub>3</sub>, PO<sub>4</sub>, DONre, DOPre) foi calculada por:

$$M_B^{PORTUCEL,i} = \left( \sum_{j=1}^3 C_A^{j,i} \times V^{j,i} \right) \times 0.4 \times f \quad \text{Equação 14}$$

Em que  $f$  representa o factor de multiplicação para as diferentes formas de azoto e fósforo. Os valores deste factor são apresentados na tabela em baixo.

**Tabela 17:** Factor de multiplicação para as diferentes formas de azoto e fósforo assumidas para a descarga da PORTUCEL.

	Azoto		Fósforo	
	DONr	NO <sub>3</sub>	DOPr	PO <sub>4</sub>
$f$	0.7	0.3	0.7	0.3

Os valores de  $M_B^{PORTUCEL,i}$  são apresentados na tabela 17 e os valores de caudal médio mensal para cada ETAR e para a PORTUCEL,  $V^{j,i}$ , são apresentados na tabela 18.

**Tabela 18:** Massa mensal afluyente ao emissário, das propriedades presentes no efluente da PORTUCEL.

	<b>DONre (ton)</b>	<b>NO<sub>3</sub> (ton)</b>	<b>DOPr (ton)</b>	<b>PO<sub>4</sub> (ton)</b>
<b>JAN</b>	17.82	7.64	1.29	0.55
<b>FEV</b>	23.98	10.28	1.70	0.73
<b>MAR</b>	18.14	7.77	1.32	0.57
<b>ABR</b>	21.65	9.28	1.44	0.62
<b>MAI</b>	24.31	10.42	1.48	0.63
<b>JUN</b>	20.88	8.95	0.98	0.42
<b>JUL</b>	21.73	9.31	1.55	0.66
<b>AGO</b>	21.91	9.39	1.72	0.74
<b>SET</b>	6.99	3.00	0.70	0.30
<b>OUT</b>	13.18	5.65	1.14	0.49
<b>NOV</b>	15.65	6.71	1.58	0.68
<b>DEZ</b>	27.03	11.58	2.06	0.88

**Tabela 19:** Caudais médios mensais efluentes das 3 ETARs e da PORTUCEL.

	<b>ETAR NORTE (10<sup>3</sup> m<sup>3</sup>)</b>	<b>ETAR SUL (10<sup>3</sup> m<sup>3</sup>)</b>	<b>ETAR DE S. JACINTO (10<sup>3</sup> m<sup>3</sup>)</b>	<b>PORTUCEL (10<sup>3</sup> m<sup>3</sup>)</b>	<b>TOTAL (10<sup>3</sup> m<sup>3</sup>)</b>
<b>JAN</b>	1610	802	53	995	3460
<b>FEV</b>	1527	683	40	774	3024
<b>MAR</b>	1327	681	29	927	2964
<b>ABR</b>	1279	673	28	919	2898
<b>MAI</b>	1008	566	17	929	2520
<b>JUN</b>	722	524	18	827	2092
<b>JUL</b>	819	524	21	879	2242
<b>AGO</b>	748	488	27	876	2139
<b>SET</b>	351	315	16	868	1551
<b>OUT</b>	953	540	18	776	2286
<b>NOV</b>	1189	584	14	963	2750
<b>DEZ</b>	1639	785	36	1019	3479
<b>TOTAL</b>	13171	7166	316	10751	31404

Com estes dados foram então calculados os valores finais das concentrações das várias propriedades da água descarregada no emissário, usando para tal a Equação 13, o qual podem ser consultados na tabela seguinte:



**Tabela 20:** Concentrações dos vários nutrientes descarregados pelo emissário de S. Jacinto.

	<b>N-NH4 (mg/l)</b>	<b>N-NO3 (mg/l)</b>	<b>PON (mg/l)</b>	<b>DONr (mg/l)</b>	<b>PO<sub>4</sub> (mg/l)</b>	<b>POP (mg/l)</b>	<b>DOPre (mg/l)</b>
<b>JAN</b>	1.01	15.53	2.85	6.38	1.30	0.11	0.45
<b>FEV</b>	1.55	23.90	4.38	9.81	1.96	0.17	0.68
<b>MAR</b>	1.20	18.45	3.38	7.57	1.56	0.14	0.54
<b>ABR</b>	1.46	22.52	4.13	9.25	1.74	0.15	0.60
<b>MAI</b>	1.89	29.08	5.33	11.94	2.05	0.18	0.71
<b>JUN</b>	1.95	30.09	5.52	12.35	1.64	0.14	0.56
<b>JUL</b>	1.90	29.21	5.36	11.99	2.41	0.21	0.83
<b>AGO</b>	2.00	30.88	5.66	12.68	2.81	0.24	0.97
<b>SET</b>	0.88	13.58	2.49	5.58	1.58	0.14	0.54
<b>OUT</b>	1.13	17.38	3.19	7.14	1.75	0.15	0.60
<b>NOV</b>	1.11	17.15	3.15	7.04	2.01	0.17	0.69
<b>DEZ</b>	1.52	23.42	4.30	9.61	2.07	0.18	0.71

### Fluxos de massa entre caixas

Nesta secção é apresentada a metodologia de cálculo associada aos fluxos de massa das várias formas de nutrientes apresentadas no capítulo dos resultados e discussão.

O modelo MOHID calcula os fluxos de massa médios horários das várias propriedades da água simuladas ( $Q_{mA}^h$ ) usando a Equação 15 para cada célula de uma caixa que esteja em contacto com células da caixa adjacente.

$$Q_{mA}^h = C_A * Q \quad \text{Equação 15}$$

Em que  $C_A$  representa a concentração da propriedade A na célula de fronteira com a caixa adjacente, e  $Q$  o fluxo. O modelo calcula este caudal mássico a cada 240 segundos, que foi o espaçamento temporal definido para este modelo, e retorna os valores médios horários, definido pelo utilizador. Esses valores foram depois transpostos para o excell para serem calculados os fluxos médios mensais entre duas caixas adjacentes, usando a equação:

$$Q_{mA} = \sum (Q_{mA}^h * 3600/1000) \quad \text{Equação 16}$$



## Anexo II - Descrição do modelo ecológico.

Neste anexo são apresentados os principais pressupostos e considerações assumidas na construção do modelo ecológico do sistema MOHID, assim como a descrição das equações e parâmetros utilizados para descrever os processos biogeoquímicos. Mais detalhes acerca da estrutura e organização do Sistema MOHID poderão ser encontrados em [www.mohid.com](http://www.mohid.com).

Em termos gerais o modelo ecológico considera que os produtores primários (fitoplâncton) consomem nutrientes inorgânicos e dependem da sua disponibilidade, bem como da quantidade de luz incidente para sustentar o seu crescimento, através da fotossíntese.

É assumido que tanto o fósforo como o azoto podem ser limitadores do crescimento destes seres, assim como a intensidade de luz solar, e que o azoto e o fósforo estão presentes nas formas: nitrato ( $\text{NO}_3$ ), o nitrito ( $\text{NO}_2$ ) e a amónia ( $\text{NH}_4$ ) como formas inorgânicas de azoto, azoto orgânico particulado (PON), azoto orgânico dissolvido refractário (DONr) e azoto orgânico dissolvido não refractário (DONnr) para as formas orgânicas de azoto; fósforo particulado (POP), fósforo dissolvido refractário (DOPre) e fósforo dissolvido não refractário (DOPnr) para as formas orgânicas de fósforo e orto-fosfato ( $\text{PO}_4$ ) para a forma inorgânica de fósforo.

É também assumido que o fitoplâncton consome apenas amónia e nitrato, sendo utilizado um factor de preferência para estes nutrientes, e é assumido também que os consumidores (zooplâncton) consomem apenas o fitoplâncton, já que não foram incluídos neste trabalho os grupos das bactérias e das diatomáceas por estes não serem modelados pelo modelo regional PCOMS.

As equações e parâmetros usados para descrever estes processos são apresentados no capítulo seguinte.

### Parametrização

Neste capítulo será feita a descrição das equações modeladas pelo modelo ecológico assim como os vários parâmetros e respectivos valores nelas incluídos. Estes valores foram na sua grande maioria adaptados de (Pina, 2001), (EPA, 1985), (Portela, 1996).

Tabela 21: Parâmetros e respectivos valores usados incluídos no modelo ecológico.

Palavra-chave	Valor	Descrição	Unidades
<b>Fitoplâncton</b>			
GROWMAXF	1.5	Taxa de crescimento máximo	$\text{d}^{-1}$
FENDREPC	0.0175	Constante de respiração endógena	$\text{d}^{-1}$
PHOTORES	0.125	Fracção da fotossíntese que é oxidada por fotorrespiração	adim

EXCRCONS	0.07	Constante de excreção	adim
FMORTMAX	0.05	Taxa de mortalidade máxima	d <sup>-1</sup>
FMORTCON	0.3	Constante de semi-saturação da mortalidade	mgC l <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup>
ASS_EFIC	0.7	Eficiência de assimilação	adim
NSATCONS	0.065	Constante de semi-saturação de azoto	mgN/l
PSATCONS	0.002	Constante de semi-saturação de fósforo	mgP/l
PHOTOIN	121	Intensidade óptima para a fotossíntese	W/m <sup>2</sup>
TOPTFMIN	27	Temperatura mínima para o intervalo óptimo de crescimento	°C
TOPTFMAX	29	Temperatura máxima para o intervalo óptimo de crescimento	°C
TFMIN	15	Temperatura mínima tolerável	°C
TFMAX	42	Temperatura máxima tolerável	°C
TFCONST1	0.05	Constantes de controlo da forma da curva de resposta do efeito da temperatura	adim
TFCONST2	0.98		
TFCONST3	0.98		
TFCONST4	0.02		
FRATIONC	0.18	Rácio N/C	mgN/mgC
FRATIOPC	0.024	Rácio P/C	mgP/mgC
FSOLEXCR	0.4	Fracção de material inorgânico solúvel excretado	adim
FDISSDON	0.5	Fracção de material orgânico dissolvido excretado	adim
PLANK_OC_RA	2.6	Rácio O/C na respiração	mgO <sub>2</sub> /mgC
<b>Zooplâncton</b>			
GROWMAXZ	0.25	Taxa de crescimento máxima	d <sup>-1</sup>
ZRATIONC	0.15	Rácio N/C	mgN/mgC
ZRATIOPC	0.024	Rácio P/C	mgP/mgC
ZSOLEXCR	0.25	Fracção de material inorgânico solúvel excretado pelo zooplâncton	adim
ZDISSDON	0.25	Fracção de material orgânico dissolvido excretado pelo zooplâncton	adim
TOPTZMIN	27	Temperatura mínima para o intervalo óptimo de crescimento	°C

TOPTZMAX	29	Temperatura máxima para o intervalo óptimo de crescimento	°C
TZMIN	15	Temperatura mínima tolerável	°C
TZMAX	42	Temperatura máxima tolerável	°C
TZCONST1	0.05	Constantes de controlo da forma da curva de resposta do efeito da temperatura	adim
TZCONST2	0.98		
TZCONST3	0.98		
TZCONST4	0.02		
ZREFRESP	0.02	Taxa de consumo de carbono por respiração e mortalidade natural	d <sup>-1</sup>
IVLEVCON	10	Constante de ivlev	l/mgC
ZPREDMOR	0.0077	Taxa de predação por níveis tróficos superiores	d <sup>-1</sup>
ZOOPREYMIN	0.0045	Concentração mínima de presas para predação	mg/l
GRAZCILMIN	0.0045	Concentração mínima de microzooplâncton para predação	mg/l
GRAZFITOMIN	0.0045	Concentração mínima de fitoplâncton para predação	mg/l
ZEXCFAC	0.02	Taxa de excreção	d <sup>-1</sup>
ZEXCCONS	1.0305	Constante para a curva de excreção	adim
MORTZCOEF	0	Constante para a curva de mortalidade	adim
MINMORTZ	0	Taxa de mortalidade mínima	d <sup>-1</sup>
MAXMORTZ	0.04	Taxa de mortalidade máxima	d <sup>-1</sup>
INGCONSZ	0.85	Constante de semi-saturação para a predação	mgC/l
ZOEFFCAPHY	0.8	Eficiência de captura de fitoplâncton	adim
ZOEFFCAPCIL	0.2	Eficiência de captura de microzooplâncton	admin
ZINGMAX	2	Taxa de ingestão máxima	d <sup>-1</sup>
ZOPHYASS	0.8	Coeficiente de assimilação de fitoplâncton	adim
ZOCILASS	0.8	Coeficiente de assimilação de microzooplâncton	adim
PHYRATING	0.5	Fracção de fitoplâncton na ingestão	adim
CILRATINGZO	0.5	Fracção de microfítolâncton na ingestão	adim
<b>Azoto</b>			
NOPREF	0.1	Taxa de referência de decomposição de PON	d <sup>-1</sup>
NOPCOEF	1.02	Coeficiente de temperatura associado à decomposição	adim

		de PON	
NMINR	0.01	Taxa de referência da mineralização de DONre	d <sup>-1</sup>
TMINR	1.02	Coeficiente de temperatura associado à mineralização de DONre	admin
NITRREF	0.06	Taxa de nitrificação de referência	d <sup>-1</sup>
NITSATCO	2	Constante de semi-saturação da nitrificação	mgO <sub>2</sub> /l
DENSATCO	0.1	Constante de semi-saturação da desnitrificação	mgO <sub>2</sub> /l
TNITCOEF	1.08	Coeficiente de temperatura da nitrificação	adim
DENITREF	0.125	Taxa de desnitrificação de referência	d <sup>-1</sup>
TDENCOEF	1.046	Coeficiente de temperatura da desnitrificação	adim
NMINENR	0.1	Taxa de referência da mineralização de DONnr	d <sup>-1</sup>
TMINNR	1.02	Coeficiente de temperatura associado à mineralização de DONnr	admin
<b>Fósforo</b>			
PPARTMIN	0.2	Taxa de decomposição de POP	d <sup>-1</sup>
TPPARTMINCOEF	1.08	Coeficiente de temperatura	adim
PMINR	0.03	Taxa de referência de mineralização de DOPre	d <sup>-1</sup>
PMINRCOEF	1.064	Coeficiente de temperatura	adim
PMINNR	0.1	Taxa de referência de mineralização de DOPnr	d <sup>-1</sup>
PMINNRCOEF	1.064	Coeficiente de temperatura	adim
FREGSATC	1	Taxa de semi-saturação da regeneração de nutrientes	mgC/l
PHDECOMP	0.7	PON disponível para mineralização	adim
<b>Oxigênio</b>			
OCRATIO	2.67	Rácio O/C do CO <sub>2</sub>	mgO <sub>2</sub> /mgC
PHOTOSOC	2.67	Rácio O/C da fotossíntese	mgO <sub>2</sub> /mgC
NITONRAT	3.43	Rácio O/C do nitrato	mgO <sub>2</sub> /mgN
PHOSOPRAT	2.06	Rácio O/C do fosfato	mg <sub>2</sub> /mgP
PLANK_OC_RAT	2.67	Rácio O/C na respiração do fitoplâncton	mg <sub>2</sub> /mgC
ZOCRATIO	2.67	Rácio O/C na respiração do mesozooplâncton	mgO <sub>2</sub> /mgC
CILOCRATIO	2.67	Rácio O/C na respiração do microzooplâncton	mgO <sub>2</sub> /mgC
OMRATONC	0.18	Rácio O/C na respiração do azoto orgânico	mgN/mgC

OMRATIOPC	0.024	Rácio O/C na respiração do fósforo orgânico	mgP/mgC
MINOXYGEN	10e-5	Concentração mínima de O <sub>2</sub> para crescimento	mgO <sub>2</sub> /l
CRATIONC	0.16	Rácio N/C do mesozoplâncton	mg N/mgC
CRATIOPC	0.024	Rácio P/C do mesozoplâncton	mg P/mgC
CILGRAZPHYMIN	0.0045	Concentração mínima de fitoplâncton para haver predação	mgC/l
CILPREYMIN	0.0045	Concentração mínima de presas para haver predação	mgC/l
CREFRESP	0.02	Taxa de respiração a temperatura de referência	d <sup>-1</sup>
CEXCFCAC	0.02	Taxa de excreção	d <sup>-1</sup>
CEXCCONS	1.03505	Constante para a curva de excreção	adim
MORTCICOEF	0	Constante para a curva de mortalidade	adim
MINMORTCI	0	Taxa mínima de mortalidade	d <sup>-1</sup>
MAXMORTCI	0.044	Taxa máxima de mortalidade	d <sup>-1</sup>
INGCONSC	0.85	Constante de semi-saturação para predação	mgC/l
CILEFFCAPPHY	0.5	Eficiência de captura de fitoplâncton	adim
CINGMAX	1.0	Taxa máxima de ingestão	d <sup>-1</sup>
CILPHYASS	0.5	Coeficiente de assimilação de fitoplâncton	adim
PHYINGCIL	0.5	Fracção de fitoplâncton na ingestão	adim





## Anexo III - Equações do modelo ecológico

### Fitoplâncton

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

$$\frac{dP}{dt} = (\mu_p - r_p - e_p - m_p) \cdot P - (G_{Z_2}^P \cdot Z_2) \quad \text{Equação 17}$$

$\mu_p$  - 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;

$G_{Z_2}^P$  - Mortalidade devida à predação pelo mesozoplâncton.

A taxa de crescimento do fitoplâncton é dada por:

$$\mu_p = \mu_p^{\max} \cdot \Psi(T)_p \cdot \Psi(L)_p \cdot \text{Min}[\Psi(N)_p, \Psi(P)_p] \quad \text{Equação 18}$$

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

$\Psi(T)_p$ ,  $\Psi(L)_p$ ,  $\Psi(N)_p$  e  $\Psi(P)_p$  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:

$$\Psi(N)_p = \frac{N_{inorg}}{K_N^P + N_{inorg}} \quad \text{Equação 19}$$

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

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

$$\Psi(P)_p = \frac{P_{inorg}}{K_p^P + P_{inorg}} \quad \text{Equação 20}$$

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

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

Factor de limitação da luz:

$$\Psi(L)_P = \frac{I(z)}{I_s} \cdot e^{\left(1 - \frac{I(z)}{I_s}\right)} \quad \text{Equação 21}$$

Em que:

$$I(z) = I_0 \cdot e^{(-K_d \cdot z)} \quad \text{Equação 22}$$

$I_s$  - 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):

$$K_d = 0,04 + 0,0088 \cdot Ch + 0,54 \cdot Ch^{2/3} \quad \text{Equação 23}$$

$Ch$  - 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:

$$r_e = K_r^P \cdot e^{0,069T} \quad \text{Equação 24}$$

$K_r^P$  - Constante de respiração endógena;

$T$  - Temperatura.

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

$$r_p = K_p^P \cdot \mu_P \quad \text{Equação 25}$$

$K_p^P$  - Fracção da fotossíntese que é oxidada por fotorrespiração.

Assim, a taxa de respiração é definida da forma:

$$r^P = r_e + r_p \quad \text{Equação 26}$$

A taxa de excreção é dada por:

$$e_p = K_e^P \cdot \mu_p \cdot (1 - \Psi(L)) \quad \text{Equação 27}$$

$K_e^P$  - Constante de excreção.

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

$$m_e = m_{max}^{Tref} \cdot \frac{\frac{P}{\mu_p}}{K_m^P + \frac{P}{\mu_p}} \quad \text{Equação 28}$$

$m_{max}^{Tref}$  - 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 ( $\alpha_{N:C}^P$ ) e ( $\alpha_{P:C}^P$ ) da forma:

$$m_p^N = m_p \cdot \alpha_{N:C}^P \quad \text{Equação 29}$$

$$m_p^P = m_p \cdot \alpha_{P:C}^P \quad \text{Equação 30}$$

### Zooplâncton

A variação temporal da biomassa de microzooplâncton é igual a:

$$\frac{dZ_1}{dt} = (\mu_{Z_1} - e_{Z_1} - m_{Z_1}) \cdot Z_1 - G_{Z_2}^{Z_1} \cdot Z_2 \quad \text{Equação 31}$$

$\mu_{Z_1}$  - Taxa de crescimento bruto;

$G_{Z_2}^{Z_1}$  - Taxa de predação por mesozooplâncton;

$m_{Z_1}$  - Taxa de mortalidade;

$e_{Z_1}$  - Taxa de excreção.

A taxa de crescimento bruto do microzooplâncton é definida por:

$$\mu_{Z1} = a_Z \cdot G_{Z1}^B \quad \text{Equação 32}$$

$a_{Z1}$  - Coeficiente de assimilação de bactérias pelo microzooplâncton;

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

A predação das bactérias pelo microzooplâncton é dada por:

$$G_{Z1}^B = g_{Z1}^{max} \cdot \Psi_{Z1}^B \cdot \Psi(T) \quad \text{Equação 33}$$

$g_{Z1}^{max}$  - 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 ( $\Psi_{pred}^{prey} = 0$ ).

$$\Psi_{Z1}^B = \frac{c_{Z1}^B \cdot B - s_{Z1}^{Bmin}}{K_{Z1} + (c_{Z1}^B \cdot B - s_{Z1}^{Bmin})} \quad \text{Equação 34}$$

$$\text{se } c_{Z1}^B \cdot B - s_{Z1}^{Bmin} > 0$$

$c_{Z1}^B$  - 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:

$$\frac{dZ_2}{dt} = (\mu_{Z2} - e_{Z2} - m_{Z2})Z_2 \quad \text{Equação 35}$$

$\mu_{Z2}$  - Taxa de crescimento bruto;

$m_{Z2}$  - Taxa de mortalidade;

$e_{Z2}$  - Taxa de excreção.

$$\mu_{Z2} = g_{Z2}^P \cdot G_{Z2}^P + g_{Z2}^{Z1} \cdot G_{Z2}^{Z1} \quad \text{Equação 36}$$

$g_{Z2}^P$  - Coeficiente de assimilação de fitoplâncton pelo mesozooplâncton;

$g_{Z2}^{Z1}$  - Coeficiente de assimilação de microzooplâncton pelo mesozooplâncton;

$G_{Z2}^P$  - Predação de fitoplâncton;

$G_{Z2}^{Z1}$  - Predação de microzooplâncton.

$$G_{Z2}^P = \rho_P \cdot I_{max} \cdot \Psi_{Z2}^P \cdot \Psi(T) \quad \text{Equação 37}$$

$$G_{Z2}^{Z1} = (1 - \rho_P) \cdot (I_{max} - G_{Z2}^P) \cdot \Psi_{Z2}^{Z1} \cdot \Psi(T) \quad \text{Equação 38}$$

$\rho_P$  - Proporção de fitoplâncton na ingestão do mesozooplâncton;

$I_{max}$  - Taxa máxima de ingestão;

$\Psi_{Z2}^P$  - Factor de limitação por falta de fitoplâncton;

$\Psi_{Z2}^{Z1}$  - Factor de limitação por falta de microzooplâncton.

Estes factores limitantes são definidos por:

$$\Psi_{Z2}^P = \frac{c_{Z2}^P \cdot P - s_{Z2}^{Pmin}}{K_{Z2}^P + (c_{Z2}^P \cdot P - s_{Z2}^{Pmin})} \quad \text{Equação 39}$$

$$\Psi_{Z2}^{Z1} = \frac{c_{Z2}^{Z1} \cdot P - s_{Z2}^{Z1min}}{K_{Z2}^{Z1} + (c_{Z2}^{Z1} \cdot P - s_{Z2}^{Z1min})} \quad \text{Equação 40}$$

$c_{Z2}^P$  - Eficiência de captura de fitoplâncton;

$s_{Z2}^{Pmin}$  - Limiar de concentração de fitoplâncton abaixo da qual deixa de haver predação;

$K_{Z2}^P$  - Constante de semi-saturação para a ingestão de fitoplâncton;

$c_{Z2}^{Z1}$  - Eficiência de captura de microzooplâncton;

$s_{Z2}^{Z1min}$  - Limiar de concentração de microzooplâncton abaixo da qual deixa de haver predação;

$K_{Z2}^{Z1}$  - Constante de semi-saturação para a ingestão de microzooplâncton.

A taxa de mortalidade do Zooplâncton  $m_x$  está directamente relacionada com a concentração das presas  $F_x$ . Abaixo de um certo limiar de concentração de presas ( $F_x^{min}$ ), a mortalidade é alta e constante  $m_x^{max}$ , uma vez que é assumido que a mortalidade do zooplâncton está ligada à falta de alimento. Assim, a mortalidade é calculada da forma:

$$m_x = \frac{a_x^m}{F_x} + m_x^0, \text{ se } F_x > F_x^{min} \quad \text{Equação 41}$$

$$m_x = m_x^{max}, \text{ se } F_x \leq F_x^{min} \quad \text{Equação 42}$$

$a_x^m$  - Factor de forma da curva de mortalidade;

$m_{0x}$  - Taxa de mortalidade mínima.

Cada grupo de zooplâncton tem os seus próprios valores de  $F_x$ ,  $F_x^{min}$ ,  $m_x^{max}$ , e  $m_x^0$ .  $F_x$  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 ( $\alpha_x^P$ ).

$$m_x^N = m_x \cdot \alpha_x^N \quad \text{Equação 43}$$

$$m_x^P = m_x \cdot \alpha_x^P \quad \text{Equação 44}$$

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

$$e_x = (a_x \cdot b_x)^T \quad \text{Equação 45}$$

$a_x$  - 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 ( $\alpha_X^P$ )

$$e_X^N = e_X^r \cdot \alpha_X^N \quad \text{Equação 46}$$

$$e_X^P = e_X^r \cdot \alpha_X^P \quad \text{Equação 47}$$

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:

$$r_X = \rho_X \cdot \Psi(T) \quad \text{Equação 48}$$

### Dinâmica de nutrientes

Taxa de nitrificação:

$$K_{nit} = K_{nit}^{ref} \cdot T_{nit}^{(T-20.0)} \cdot \frac{[O_2]}{K_{nit}^{sat} + [O_2]} \quad \text{Equação 49}$$

$K_{nit}^{ref}$  - 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:

$$K_{dnit} = K_{dnit}^{ref} \cdot T_{dnit}^{(T-20.0)} \cdot \frac{K_{dnit}^{sat}}{K_{dnit}^{sat} + [O_2]} \quad \text{Equação 50}$$

$K_{dnit}^{ref}$  - 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):

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

Equação 51

$K_{dec}^{ref}$  - 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:

$$K_{min}^{Ndr} = K_{min}^{ref} \cdot T_{min}^{(T-20.0)} \cdot \frac{P}{K_r^P + P}$$

Equação 52

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

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

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

Taxa de mineralização do azoto orgânico dissolvido não refractário DONnr:

$$K_{min}^{Ndnr} = K_{min}^{ref} \cdot T_{min}^{(T-20.0)} \cdot \frac{P}{K_r^P + P}$$

Equação 53

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

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

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

Taxa de mineralização do fósforo orgânico dissolvido não refractário DOPnr:

$$K_{min}^{Pdnr} = K_{min}^{ref} \cdot T_{min}^{(T-20.0)} \cdot \frac{P}{K_r^P + P}$$

Equação 54

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

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

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

Taxa de mineralização do fósforo orgânico dissolvido refractário DOPre:



$$K_{\min}^{Pdr} = K_{\min}^{ref} \cdot T_{\min}^{(T-20,0)} \cdot \frac{P}{K_r^P + P}$$

Equação 55

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

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

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

### Nitrato ( $NO_3^-$ )

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

Equação 56

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

$$\Phi_{N_2} = \frac{[N_1][N_2]}{(K_N^P + [N_1])(K_N^P + [N_2])} + \frac{K_N^P \cdot [N_2]}{([N_1] + [N_2])(K_N^P + [N_1])}$$

Equação 57

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

### Nitrito ( $NO_2^-$ )

$$\frac{dN_{1-2}}{dt} = \underbrace{K_{nit} \cdot N_2}_{Amónia} - K_{nit} \cdot N_{1-2}$$

Equação 58

### Amónia ( $NH_4^+$ )

$$\frac{dN_2}{dt} = \underbrace{\left[ \left( e_P^N \cdot \varepsilon_P^{Soln} \right) - \left( \Phi_{N_2} \cdot \mu_P \cdot \alpha_P \right) \right] P}_{Phytoplâncton} + \underbrace{\left[ \left( e_B \cdot \alpha_B \right) - \mu_B^{N_2} \right] B}_{Bactérias} + \underbrace{\left( e_{Z1}^N \cdot \varepsilon_Z^{Soln} \right) Z_1}_{Microzooplâncton} + \underbrace{\left( e_{Z2}^N \cdot \varepsilon_Z^{Soln} \right) Z_2}_{Mesozooplâncton} + \underbrace{K_{\min}^{Ndr} \cdot N_{dr}}_{DONr} + \underbrace{\left( K_{dec}^{Np} \cdot \phi_P \right) N_p}_{PON} - K_{nit} \cdot N_2$$

Equação 59

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

$\varepsilon_P^{Soln}$  - Fração de inorgânicos dissolvidos excretados pelo fitoplâncton;

$\varepsilon_Z^{Soln}$  - Fração de material inorgânico solúvel excretado pelo zooplâncton;

$\phi_P$  - PON disponível para mineralização em amónia.

### Azoto orgânico dissolvido não refractário (DONnr)

$$\frac{dN_{dnr}}{dt} = \underbrace{\left[ (1 - \varepsilon_P^{SolIn}) e_P^N \cdot \varepsilon_P^{DisOr} \right]}_{\text{Phytoplâncton}} P - \underbrace{(\mu_B^{Ndnr})}_{\text{Bactérias}} B + \underbrace{\left[ e_{Z1}^N (1 - \varepsilon_Z^{SolIn}) \varepsilon_Z^{DissOr} \right]}_{\text{Microzooplâncton}} Z_1 + \underbrace{\left[ e_{Z2}^N (1 - \varepsilon_Z^{SolIn}) \varepsilon_Z^{DissOr} \right]}_{\text{Meso zooplâncton}} Z_2 \quad \text{Equação 60}$$

$\varepsilon_P^{DisOr}$  - Fração de orgânicos dissolvidos excretados pelo fitoplâncton;

$\varepsilon_Z^{DissOr}$  - Fração de orgânicos dissolvidos excretados pelo zooplâncton.

### Azoto orgânico dissolvido refractário (DONr)

$$\frac{dN_{dr}}{dt} = \underbrace{K_{dec}^{Np} (1 - \phi_P)}_{\text{PON}} N_P - K_{\min}^{Ndr} N_{dr} \quad \text{Equação 61}$$

### Azoto Orgânico particulado (PON)

$$\begin{aligned} \frac{dN_P}{dt} = & \underbrace{\left[ e_P^N (1 - \varepsilon_P^{SolIn}) (1 - \varepsilon_P^{DisOr}) + m_P^N \right]}_{\text{Phytoplâncton}} P - \underbrace{(\mu_B^{Np} + m_B^N)}_{\text{Bactérias}} B + \\ & \underbrace{\left[ m_{Z1}^N + (1 - a_{Z1}) G_{Z1}^B \alpha_B + e_{Z1}^N (1 - \varepsilon_Z^{SolIn}) (1 - \varepsilon_Z^{DissOr}) \right]}_{\text{Microzooplâncton}} Z_1 + \\ & \underbrace{\left[ e_{Z2}^N (1 - \varepsilon_Z^{SolIn}) (1 - \varepsilon_Z^{DissOr}) + m_{Z2}^N \right]}_{\text{Meso zooplâncton}} Z_2 + \delta_P + \varphi_N - \\ & \underbrace{K_{dec}^{Np} (1 - \phi_P)}_{\text{DONr}} N_P + \underbrace{K_{dec}^{Np} (\phi_P)}_{\text{Amónia}} N_P \end{aligned} \quad \text{Equação 62}$$

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

$$\delta_P = (1 - g_{Z2}^P) G_{Z2}^P \alpha_{Z2} + (1 - g_{Z2}^{Z1}) G_{Z2}^{Z1} \alpha_{Z1} \quad \text{Equação 63}$$

$\varphi_N$  - Fitoplâncton e microzooplâncton não assimilados.

$$\varphi_N = \mu_{Z2} (\alpha_X^P - \alpha_X^{Z2}) \quad \text{Equação 64}$$

## Fósforo inorgânico

$$\frac{d\Phi^{IP}}{dt} = \underbrace{\left[ f_{inorg}^{Phy} (e_{Phy} + r_{Phy}) \alpha_{P:C}^{Phy} - \mu_{Phy} \alpha_{P:C}^{Phy} \right] Phy}_{fitoplâncton} +$$

$$\underbrace{\left[ (f_{inorg}^{Z_1} e_{Z_1} + r_{Z_1}) \alpha_{P:C}^{Z_1} \right] Z_1}_{microzooplâncton} + \underbrace{\left[ (f_{inorg}^{Z_2} e_{Z_2} + r_{Z_2}) \alpha_{P:C}^{Z_2} \right] Z_2}_{mesozooplâncton}$$

$$+ \underbrace{K_{min}^{DOPre} \Phi^{DOPre}}_{DOPre} + \underbrace{K_{min}^{DOPnr} \Phi^{DOPnr}}_{DOPnr} + \underbrace{f_{orgP} K_{dec}^{POP} \Phi^{POP}}_{POP}$$

Equação 65

$f_{inorg}^X$  - Fracção de material orgânico dissolvido excretado por X,

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

$f_{orgP}$  - Fracção de PON disponível para mineralização;

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

$K_{min}^{DOPre}$  - Taxa de mineralização de DOPre;

$K_{min}^{DOPnr}$  - Taxa de mineralização de DOPnr.

## Fósforo orgânico particulado

$$\frac{d\Phi^{POP}}{dt} = \underbrace{\left[ (1 - f_{inorg}^{Phy})(1 - f_{orgD}^{Phy})(e_{Phy} + r_{Phy}) + m_{phy} \right] \alpha_{P:C}^{Phy} \cdot Phy}_{Fitoplâncton} +$$

$$\underbrace{\left[ (1 - f_{inorg}^{Z_1})(1 - f_{orgD}^{Z_1})e_{Z_1} + m_{Z_1} \right] \alpha_{P:C}^{Z_1} \cdot Z_1 + (\delta_p^{Z_1} + \phi_p^{Z_1}) Z_1}_{microzooplâncton}$$

$$+ \underbrace{\left[ (1 - f_{inorg}^{Z_2})(1 - f_{orgD}^{Z_2})e_{Z_2} + m_{Z_2} + p^{Z_2} \right] \alpha_{P:C}^{Z_2} \cdot Z_2 + (\delta_p^{Z_2} + \phi_p^{Z_2}) Z_2}_{mesozooplâncton} -$$

$$(1 - f_{orgP}) K_{dec}^{POP} \Phi^{POP} - \underbrace{f_{orgP} K_{dec}^{POP} \Phi^{POP}}_{IP}$$

Equação 66

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

$\alpha_{P:C}^X$  - Rácio de P:C para os organismos X,  $X \equiv Phy, Z_1, Z_2$

### Fósforo orgânico dissolvido não refractário

$$\frac{d\Phi^{DOPnr}}{dt} = \underbrace{(1 - f_{inorg}^{Phy}) f_{orgD}^{Phy} (e_{Phy} + r_{Phy}) \alpha_{P:C}^{Phy} \cdot Phy}_{fitoplâncton} + \underbrace{(1 - f_{inorg}^{Z_1}) f_{orgD}^{Z_1} \cdot e_{Z_1} \cdot \alpha_{P:C}^{Z_1} Z_1}_{microzooplâncton} + \underbrace{(1 - f_{inorg}^{Z_2}) f_{orgD}^{Z_2} \cdot e_{Z_2} \cdot \alpha_{P:C}^{Z_2} Z_2}_{mesozooplâncton} - \underbrace{K_{min}^{DOPnr} \Phi^{DOPnr}}_{IP}$$

Equação 67

### Fósforo orgânico dissolvido refractário

$$\frac{d\Phi^{DOPre}}{dt} = \underbrace{(1 - f_{orgP}) K_{dec}^{POP} \Phi^{POP}}_{POP} - \underbrace{K_{min}^{DOPre} \Phi^{DOPre}}_{IP}$$

Equação 68

### Efeito da temperatura

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

$$\Psi(T) = k_A^{(T)} * k_B^{(T)}$$

Equação 69

Em que,

$$k_A^{(T)} = \frac{k_1 \cdot e^{\gamma_1 \cdot (T - T_{min})}}{1 + k_1 \cdot (e^{\gamma_1 \cdot (T - T_{min})} - 1)}$$

Equação 70

$$k_B^{(T)} = \frac{k_4 \cdot e^{\lambda_2 \cdot (T_{max} - T)}}{1 + k_4 \cdot (e^{\lambda_2 \cdot (T_{max} - T)} - 1)}$$

Equação 71

com,

$$\gamma_1 = \frac{\ln \frac{k_2(1 - k_1)}{k_1(1 - k_2)}}{T_{min}^{opt} - T_{min}}$$

Equação 72

$$\gamma_2 = \frac{\ln \frac{k_3(1 - k_4)}{k_4(1 - k_3)}}{T_{max} - T_{max}^{opt}}$$

Equação 73

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

$T_{max}^{opt}$  - Temperatura máxima 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.