



Projecto Festa II
Relatório Intercalar

MARETEC - IST

Novembro 2001

ÍNDICE

1. Introdução	3
2. O sistema Mohid2000.....	3
2.1. Módulo Hidrodinâmico	4
2.2. Módulo Ecológico.....	7
2.3. Metodologia.....	9
2.4. Condições Fronteira.....	10
2.5. Descargas no Estuário.....	12
2.6. Cenários em estudo	14
2.7. Descarga do Rio Sorraia	15
2.8. Descarga do Rio Trancão.....	15
2.9. Descarga das Águas Residuais Domésticas.....	15
2.10. Resultados.....	17
3. Módulo do Fundo.....	21
3.1. Conceptualização e Estruturação	21
3.2. Evolução da interface coluna de água - sedimento	21
3.3. Modelação do compartimento sedimentar	22
3.4. Consolidação.....	23
3.5. Modelo de transporte no leito de sedimentos.....	26
3.6. Testes de verificação do funcionamento de processos isolados.....	29
4. Conclusões e Trabalho Futuro.....	33

1. Introdução

Os resultados obtidos no projecto Festa I que antecedeu o presente projecto consistiram na modelação da circulação hidrodinâmica no estuário do Tejo, a partir da qual se estabeleceu o transporte de sedimentos e a simulação dos processo de qualidade da água, sendo feita a quantificação dos fluxos mássicos dentro do estuário e com a plataforma costeira.

Evolução na qualidade da água

No caso da qualidade da água detectou-se a forte influência das condições de fronteira, nomeadamente do rio Tejo, indicando a necessidade de estudar mais detalhadamente este assunto. Este foi então o ponto de partida para o presente estudo, no qual se pretende testar a influência, directa ou indirecta, das condições de descarga sobre a produção primária de biomassa na zona do Estuário do Tejo, isto é, analisar de que forma condições como a variação sazonal da descarga do Rio Tejo, existência de descargas de efluentes de ETAR's, existência, ou não, de tratamento das águas residuais domésticas situadas na envolvente do estuário ou mesmo as condições hidrológicas, que variam para diferentes anos, podem afectar a qualidade da água no Estuário do Tejo. É finalidade, pois, tentar perceber até que ponto a sua variabilidade das descargas terá, ou não, influência em termos de qualidade da água no estuário.

Para além das ferramentas já desenvolvidas nomeadamente as caixas de integração que serviram para quantificar fluxos e concentrações médias das propriedades calculadas, foi desenvolvido, já no âmbito do projecto Festa II, uma nova ferramenta que permite analisar de forma integrada os balanços de fontes e poços em qualquer área do estuário, facilitando a análise de cenários.

Neste momento o trabalho encontra-se numa fase de testes e análise dos resultados obtidos aplicando como condição de fronteira a informação recolhida.

Evolução no modelo de transporte de sedimentos e fundo

No que diz respeito ao transporte de sedimentos na coluna de água o modelo não sofreu alterações significativas. Os principais avanços dizem respeito à interacção com o fundo. Encontra-se já em fase de testes um novo modulo que calcula os processos de consolidação do sedimento depositado no leito do estuário. Este modulo é o suporte físico para o transporte (advecção-difusão) das propriedades do modelo do mesmo modo que o modulo hidrodinâmico funciona para a coluna de água. Os processos de fontes e poços estão ainda incompletos estando apenas implementado o processo de adsorção-desorção.

2. O sistema Mohid2000

A ferramenta numérica utilizada no âmbito deste projecto é o Sistema *MOHID*. O desenvolvimento deste sistema iniciou-se na década de 80 (Neves, 1985), tendo vindo a ser objecto de sucessivos aperfeiçoamentos na sequência da respectiva aplicação a diferentes projectos científicos e tecnológicos.

Actualmente este sistema de modelação matemática pode ser classificado com um dos mais elaborados entre os sistemas existentes deste tipo, nomeadamente no que respeita às inovações na coordenada vertical e à programação robusta e fiável.

O sistema *MOHID* foi programado recorrendo a programação orientada por objectos, utilizando o *ANSI Fortran 95*. O sistema encontra-se dividido em diferentes módulos, podendo cada um deles ser entendido com um modelo específico, sendo no entanto o sistema composto por um único ficheiro executável.

2.1. Módulo Hidrodinâmico

O módulo hidrodinâmico do sistema Mohid resolve as equações primitivas do movimento no espaço tridimensional. A discretização espacial destas equações é feita utilizando uma técnica de volumes finitos a qual permite a utilização de um sistema de coordenadas verticais genérico. A discretização temporal é baseada na utilização de um esquema semi-implícito.

O modelo permite a consideração de condições de fronteira abertas ou fechadas. As condições de fronteira abertas podem ser do tipo nível imposto, radiativas ou um misto das duas.

A versatilidade do módulo hidrodinâmico permite que se proponha esta como a única ferramenta para simular o escoamento em todos os locais onde serão elaborados cenários de derrames independentemente da complexidade da respectiva geometria.

A circulação no estuário do Tejo é forçada essencialmente pela maré (semi-diurna). Na embocadura a amplitude média é de 2 metros, aumentando até 2.7 em situação de maré viva média. No interior do estuário a maré amplificada atinge os 3.5 metros.

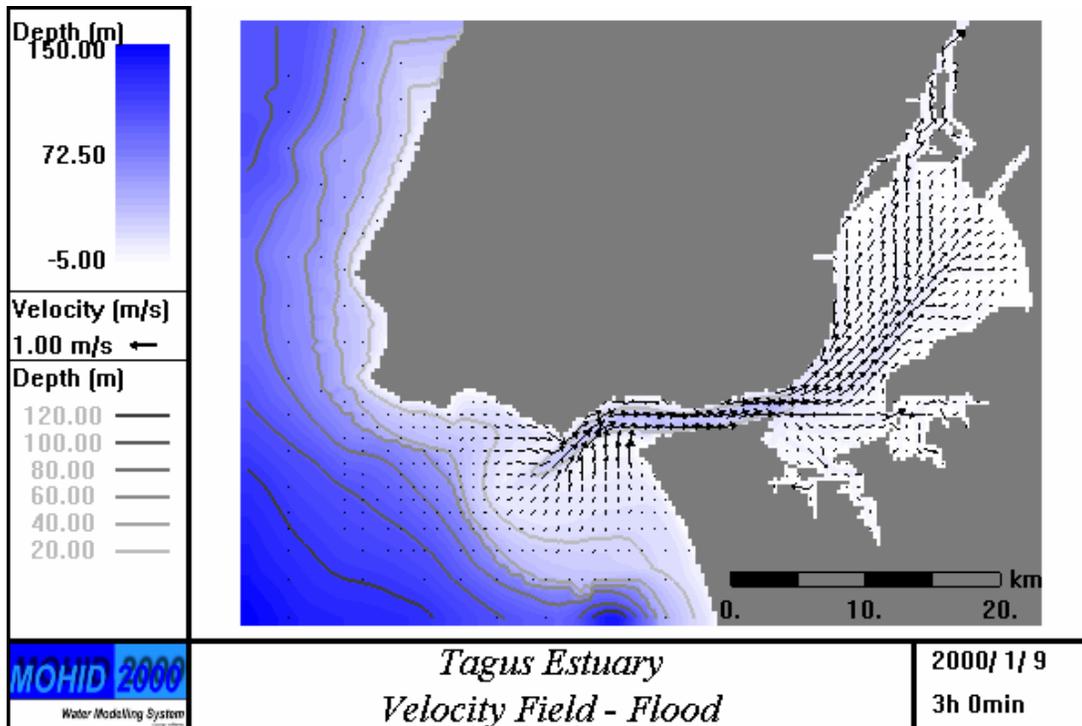


Figura 1: Distribuição de velocidades em enchente, numa maré média.

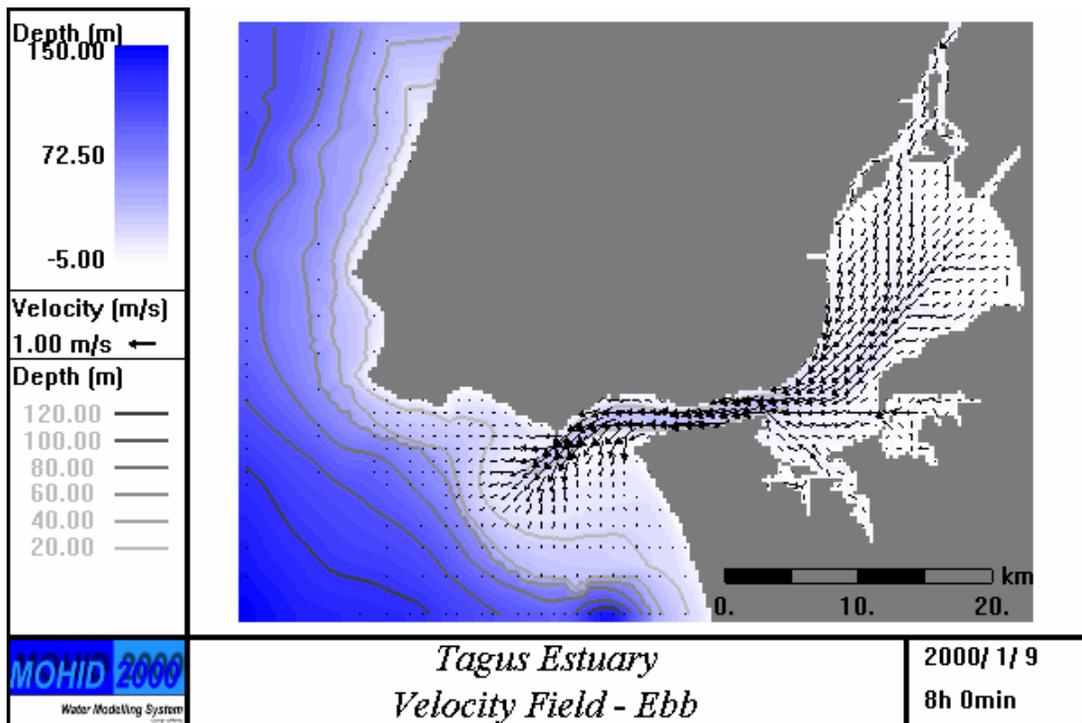


Figura 2: Distribuição de velocidades em vazante, numa maré média.

Velocidades típicas da ordem de 1 m/s. As velocidades máximas registam-se no “corredor”, podendo atingir os 2.5 m/s em maré viva, junto à embocadura. A Figura 1 mostra uma distribuição de velocidades em enchente e a Figura 2 em vazante, numa situação de maré média. As figuras mostram que as velocidades máximas registam-se no corredor. Em vazante é bem visível o jacto de saída do estuário.

Este jacto induz um vórtice anticiclónico depois da embocadura, na margem norte. Este vórtice determina a circulação residual nesta região - Figura 3. A circulação residual é intensa, com valores máximos nos extremos do corredor, onde os efeitos não-lineares são mais importantes.

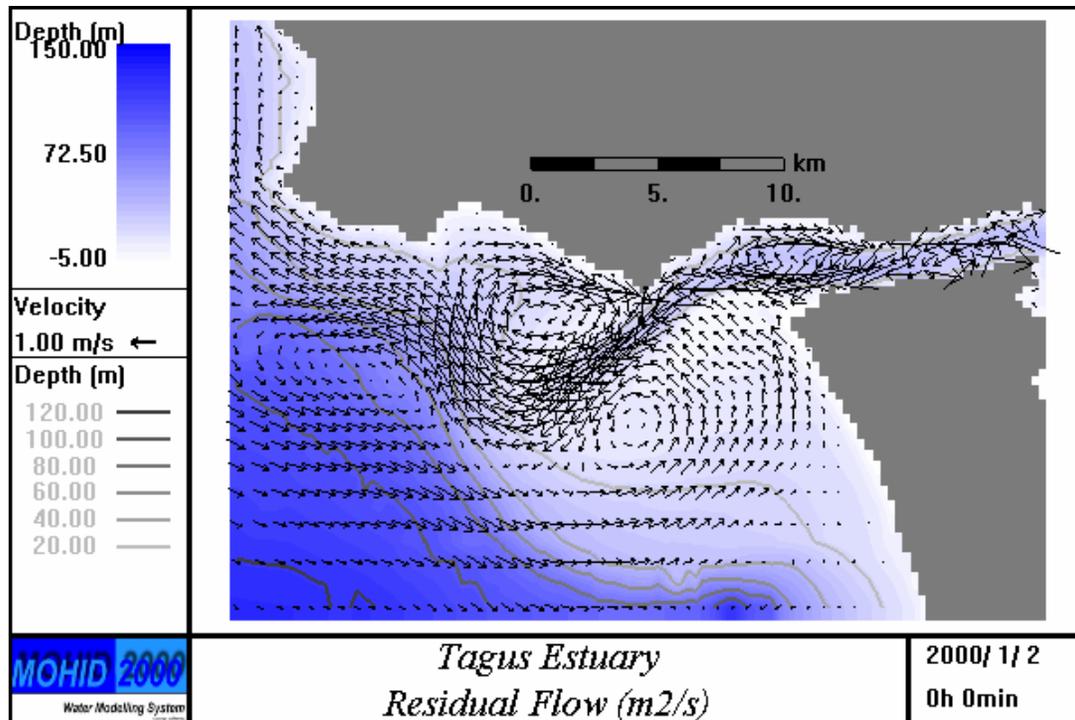


Figura 3: Circulação residual na embocadura do estuário do Tejo.

A Figura 3 representa os caudais residuais (velocidade vezes a profundidade). Esta propriedade representa efectivamente o deslocamento residual da massa de água, sendo a variação do módulo mais regular do que a da velocidade residual e por conseguinte mais fácil de representar graficamente. Um grande vórtice residual anti-ciclónico ocupa o extremo de jusante do corredor com velocidade no sentido do interior do estuário a norte e no sentido do mar a sul. No exterior do estuário pode ver-se o jacto de saída e dois vórtices adjacentes.

A água deixa o estuário pela parte sul do vórtice que ocupa a parte terminal do corredor do estuário, e entra no jacto exterior, o qual é formado pela água que deixa o estuário e pela água recirculada no exterior por acção dos dois vórtices adjacentes ao jacto, o qual é deflectido para oeste (efeito de Coriolis) formando uma corrente que contorna os Cabos Raso e da Roca e se dirige em seguida para norte.

O conjunto do jacto e dos dois vórtices residuais adjacentes é típico de estuários sujeitos a maré, com embocaduras estreitas (quando comparadas com a dimensão do estuário). A assinatura do jacto e dos vórtices residuais que lhe estão associados é facilmente identificável nas distribuições de salinidade .

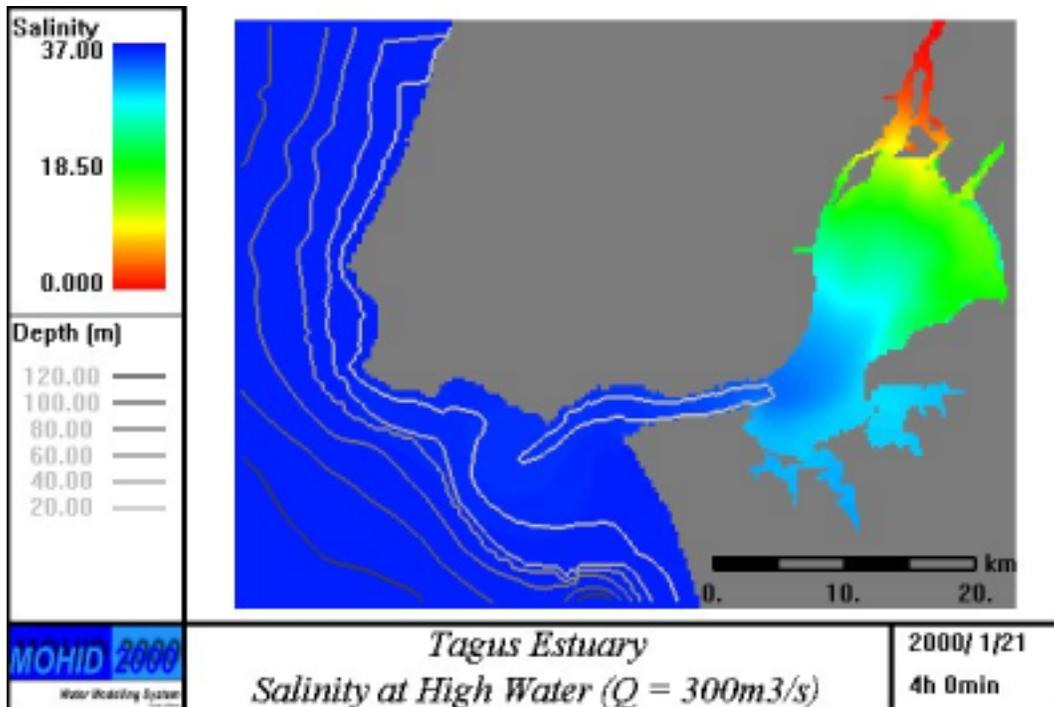


Figura 4 Salinidade no estuário do Tejo em maré cheia.

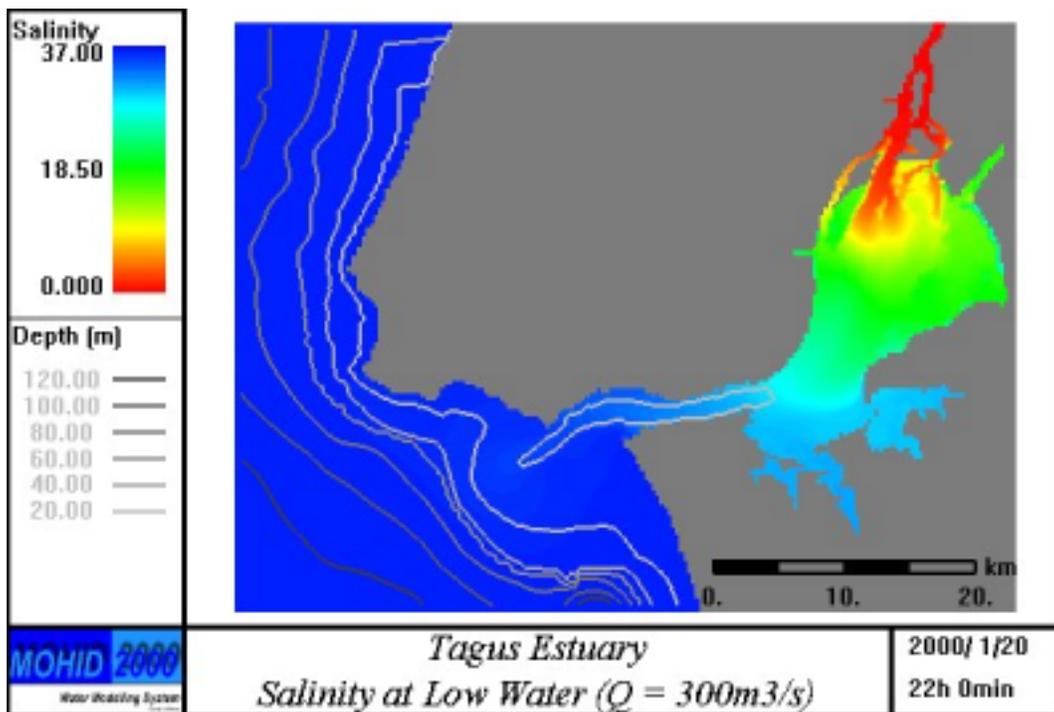


Figura 5 Salinidade no estuário do Tejo em maré vazia.

2.2. Módulo Ecológico

O módulo ecológico foi desenvolvido em termos de fontes e poços. Esta aproximação é conveniente de forma a fornecer a este tipo de modelo a flexibilidade desejável para poderem ser acoplados a sistemas de resolução Lagrangianos ou Eulerianos.

A simulação dos processos de qualidade da água é feita tendo em conta as seguintes considerações: os produtores autotróficos consomem nutrientes inorgânicos e dependem, quer da sua disponibilidade quer da luz solar como fonte de energia para a fotossíntese. O nitrato e a amónia são as formas de azoto inorgânico consumidas pelo fitoplâncton. As excreções dos produtores primários e secundários actuam como fonte no ciclo do azoto. Os produtores primários são consumidos pelos secundários e por sua vez são consumidos pelos níveis tróficos superiores.

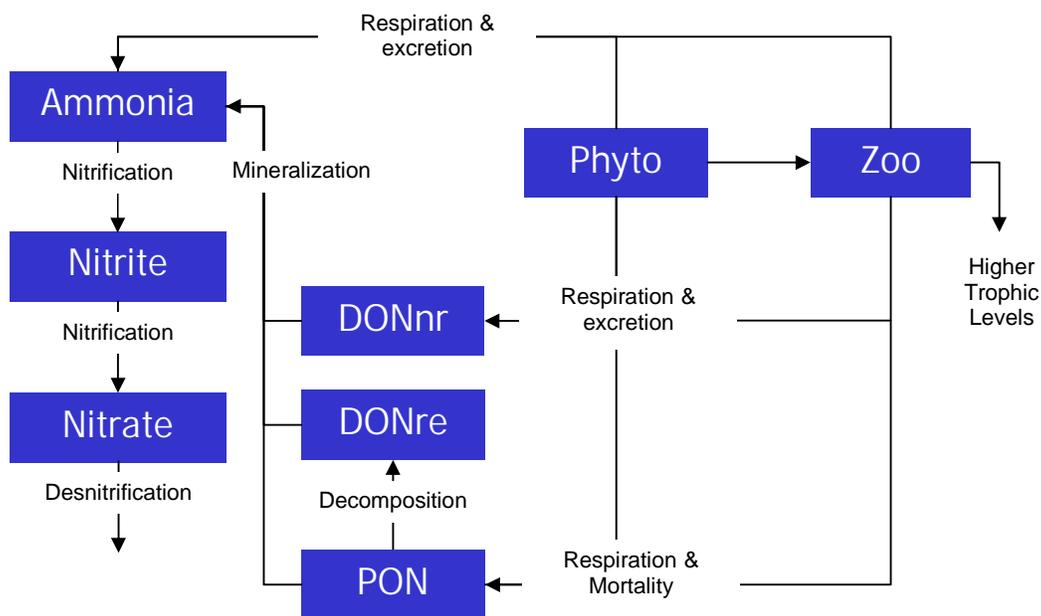


Figura 6 Modelo conceptual.

O mundo físico afecta os modelos ecológicos de várias maneiras: fornecendo a energia cinética, a energia calorífica e a radiação. As condições ambientais actuam como agentes de transporte através dos processos de adveccão-difusão, influenciando também as taxas dos processos químicos e biológicos.

A variação da concentração de uma propriedade (variável de estado) no tempo pode ser descrita por uma equação do tipo:

$$\frac{dC}{dt} = \text{Difusão turbulenta} + \text{Fontes} - \text{Poços}$$

O termo do lado esquerdo representa a derivada total da variável de estado C; consiste na variação local e na variação devido ao movimento da água que passa num determinado ponto de observação com a concentração C:

$$\frac{dC}{dt} = \frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} + w \frac{\partial C}{\partial z}$$

Onde u, v, w identificam as três componentes da velocidade, e são calculadas pelo modelo hidrodinâmico. Os termos associados à difusão podem ser parametrizados de acordo com vários modelos e são igualmente resolvidos pelo modelo hidrodinâmico. Os termos fonte e poço são influenciados pelos processos químicos, biológicos e verticais que afectam cada propriedade.

2.3. Metodologia

Para a aplicação do Sistema MOHID2000 ao Estuário do Tejo é utilizada uma malha constituída por 71 × 86 células, onde cada célula apresenta um tamanho real de 600 × 600 m². A malha utilizada neste estudo é descentrada, ou seja, as propriedades escalares são calculadas no centro da célula e as velocidades e fluxos são calculados nas suas faces. O uso de uma malha descentrada permite uma solução fisicamente realista e facilita a imposição das condições fronteira.

O tipo de formato utilizado para a visualização dos resultados do modelo depende da análise pretendida e, neste estudo, opta-se por aplicar o conceito de Caixas de Integração, já utilizadas em estudos anteriores, por se considerar que estas permitem uma mais adequada representação, facilitando a percepção dos processos envolvidos e consequências da sua aplicação. A aplicação deste conceito consiste em agrupar células, pertencentes a zonas específicas do estuário, quer pela sua localização quer pela sua função no ecossistema. Em cada uma destas áreas é calculada uma média da concentração da propriedade utilizando os valores calculados em cada célula. Desta forma, é possível, não só caracterizar cada área, como também definir os fluxos da propriedade entre caixas, o que, dependendo da análise, pode revelar-se uma ferramenta importante na compreensão da dinâmica do sistema.



Figura 7 Definição das caixas.

Neste projecto as caixas de integração ganharam uma nova funcionalidade ao permitir o cálculo das taxas de conversão entre propriedades do modelo ecológico. Ou seja todos os processos mediadores como o consumo de amónia pelo fito, a nitrificação, a desnitrificação, a mineralização, a predação do zooplâncton, a mortalidade, etc podem ser quantificados dentro de cada caixa. O exemplo seguinte mostra a relação Fitoplâncton – Amónia em duas caixas numa situação de Verão. O Fitoplâncton funciona como fonte de Amónia durante o período nocturno quando não se dá a fotossíntese e como poço de Amónia durante o dia devido ao consumo.

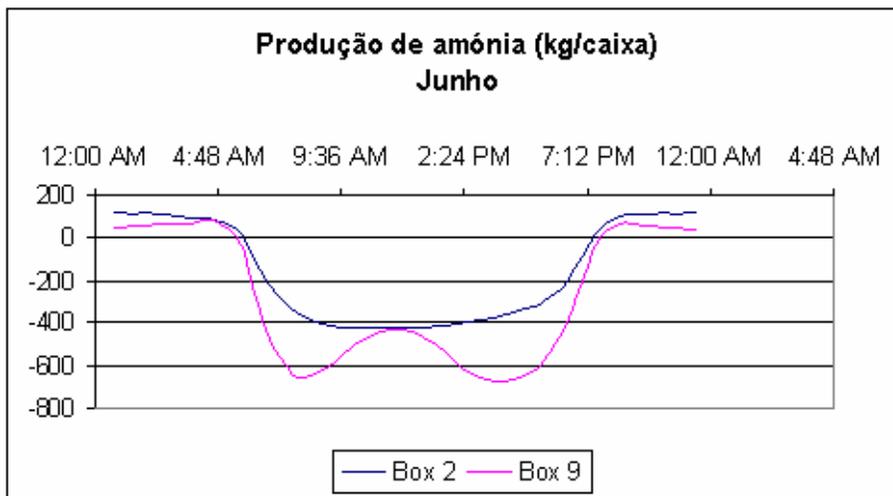


Figura 8 Produção de Amónia ao longo de 24 horas em Junho

2.4. Condições Fronteira

O modelo considera cinco tipos de fronteira do estuário: a superfície livre, o fundo, fronteiras laterais abertas, fronteiras laterais fechadas e as fronteiras móveis. Neste estudo considera-se que todas as fronteiras se encontram fechadas, ou seja, que o fluxo através delas é nulo, à excepção da fronteira

marítima, considerada uma fronteira lateral aberta. Significa que todas as trocas existentes entre a terra e o mar são assumidas como uma descarga. O Rio Tejo, o Rio Sorraia e o Rio Trancão funcionam, assim, como descargas localizadas em determinadas células da malha que constitui o estuário, tal como as descargas das Estações de Tratamento de Águas Residuais (ETAR's) localizadas nas imediações do estuário e cujos efluentes afluem ao estuário. Note-se que localizando-se as descargas em pontos próximos de terra, é possível que durante a maré vazia, algumas das células consideradas fiquem a descoberto. Nestes casos, a descarga é feita na célula de cálculo coberta mais próxima, sendo portanto variável ao longo do tempo. A quantificação destas descargas será objecto de análise específica no ponto seguinte deste trabalho. Relativamente à fronteira lateral aberta, o Oceano Atlântico, assume-se, neste estudo, possuindo as características, já consideradas em estudos anteriores (Pina,2001), as quais se apresentam no quadro seguinte,

Temperatura (°C)	18
Salinidade (psu)	36
Oxigénio Dissolvido (mg O ₂ / L)	8
Sedimentos (mg / L)	20
Fitoplâncton (mg C / L)	0,00003
Zooplâncton (mg C / L)	0,00003
Nitrato (mg N / L)	0,05
Nitrito (mg N / L)	0,01
Amónia (mg N / L)	0,02
PON (mg N / L)	0,01
DON _{nr} (mg N / L)	0,001
DON _{re} (mg N / L)	0
BOD (mg O ₂ / L)	2

2.5. Descargas no Estuário

A variabilidade das descargas é, de certa forma, significativa não só ao longo de um ano, mas também ao longo de anos diferentes, dependendo das condições climáticas que se fazem sentir em cada ano, pelo que se opta por analisar os resultados do modelo para quatro cenários distintos: Ano Médio, Ano Seco, Ano Húmido e Ano Realista. Considera-se neste estudo que apenas o Rio Tejo apresenta uma variação significativa ao longo do tempo, sendo as outras descargas constantes em todos os cenários ou simulações.

A quantificação das descargas é feita em termos de Caudal e de concentração de algumas propriedades de qualidade da água: *Fitoplâncton*, *Zooplâncton*, Nitrato (NO_3^-), Nitrito (NO_2^{2-}), Oxigénio Dissolvido, Sólidos Suspensos Totais, Temperatura, Amónia (NH_4^+) e as três formas de Azoto Orgânico, DONr, DONr e PON. Neste ponto do trabalho apresentam-se, sucintamente, as principais características destas descargas, acompanhadas de algumas considerações e cálculos de que resultam, excluindo as séries de valores correspondentes por se considerar excessivo.

2.5.1. Localização das Descargas

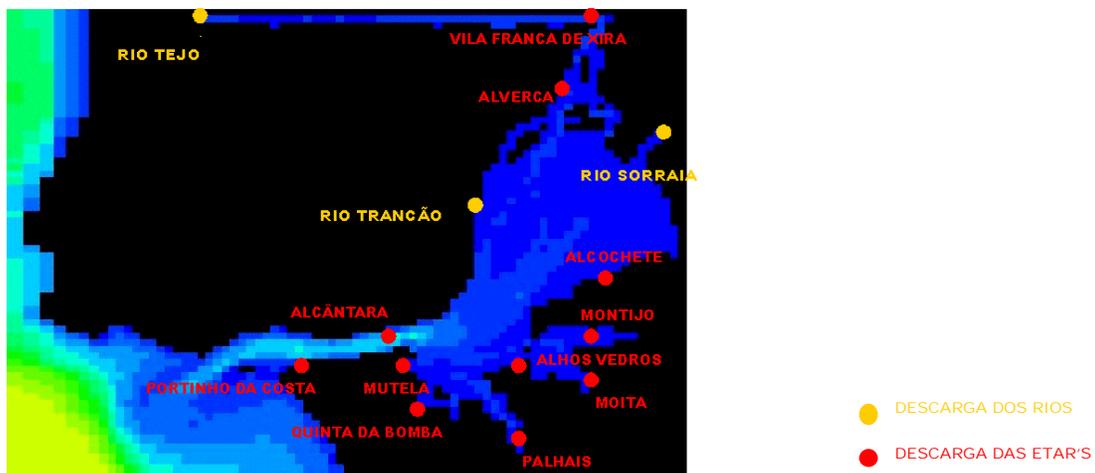


Figura 9 Localização das Descargas no Estuário do Tejo

2.5.2. Descarga do Rio Tejo

Considera-se que os valores de caudal e qualidade da água, registados na estação de Ómnias-Santarém, são os característicos da descarga do Rio Tejo no estuário, pelo que toda a análise se baseia nos valores encontrados nesta estação de amostragem. Os dados foram obtidos através do Instituto da Água, INAG. De entre os vários parâmetros registados na estação de amostragem apenas alguns se revelam úteis para a análise pretendida. É o caso do caudal e as concentrações de alguns parâmetros da qualidade da água: *Clorofila-a*, Nitrato, Nitrito, Oxigénio, Sólidos Suspensos Totais, Temperatura, Azoto Amoniacal e algumas formas de Azoto Orgânico. Os restantes parâmetros não são incluídos na análise ou por se considerar o seu efeito desprezável, como é o caso da salinidade, que se considera nula no Rio Tejo, ou por não se encontrarem no âmbito do projecto.

As características das descargas do Rio Tejo são o resultado do tratamento dos dados registados na estação de amostragem, a partir do que é possível seleccionar as séries de valores que se adequam aos cenários que se pretendem estudar.

2.6. Cenários em estudo

Do tratamento dos dados recolhidos na estação de amostragem, pode concluir-se que existe, para alguns dias do ano, uma variação de caudal bastante significativa, relativamente à correspondente média anual, pelo que à partida poderá esta variação ter alguma influência na qualidade da água no estuário. Também as propriedades da água variam ao longo do ano, não só como consequência da variação do caudal, pelo chamado efeito de diluição, mas também devido às diferentes formas de poluição que podem fazer-se sentir mais numa determinada estação do ano do que noutra. É o caso da poluição difusa, provocada pela lixiviação dos compostos constituintes dos adubos, utilizados na agricultura, que terá possivelmente um efeito mais intenso na estação da Primavera. Cada um dos cenários em causa é caracterizado por uma série temporal de valores, quer de caudal, quer de parâmetros de qualidade da água, incluindo as várias propriedades já referidas anteriormente. O quadro seguinte sintetiza as condições consideradas em cada cenário.

Cenários	Caudal	Qualidade da Água	Observações
I	Ano Médio	Ano Médio	Os valores resultam da média aritmética de todos os valores registados na estação.
II	Ano Seco (1981)	Ano Médio	1981 é considerado um ano seco; não existindo neste ano valores registados de qualidade da água, opta-se por considerar os valores médios.
III	Ano Húmido (1979)	Ano Médio	Considera-se que o ano de 1979 corresponde a um ano húmido; mais uma vez são utilizados os valores médios de qualidade da água por não existirem registos do ano de 1979.

IV	Ano Realista (1999)	Ano Realista (1999)	Por ser o ano com mais registos quer de caudal quer de qualidade da água, 1999 será analisado como sendo o cenário mais realista.

Quadro2 - Cenários em Análise

2.7. Descarga do Rio Sorraia

A descarga do Rio Sorraia é considerada como constante ao longo do ano pelo que se recorrem a valores médios, quer de caudal quer de qualidade da água, registados em determinadas Estações de Amostragem. No caso do Rio Sorraia opta-se por considerar a existência de dois “braços” principais do rio, nos quais se encontram as estações de S. Estevão e Coruche que registam a contribuição em termos de caudal de cada um destes braços. Os parâmetros da qualidade da água característicos do Rio Sorraia são obtidos recorrendo aos valores registados na estação de Porto Alto pertencente à Rede de Amostragem da qualidade da água gerida pela DGA. Estas considerações surgem pela não existência de uma única estação de amostragem com registos de caudais e de parâmetros da qualidade da água. Para algumas propriedades, a não existência de registos leva a que sejam aplicadas algumas considerações que têm por base valores típicos de proporções entre propriedades. A quantificação da descarga encontra-se no Anexo V.

2.8. Descarga do Rio Trancão

As características da descarga do Rio Trancão resultam das descargas existentes a montante da foz do mesmo, nomeadamente dos efluentes provenientes das estações de tratamento das águas residuais urbanas das populações envolventes. Na região do Rio Trancão existem três ETAR's: Beírolas, S.João da Talha e Frielas. Considera-se neste estudo que os valores registados na estação de amostragem da Ponte de Sacavém, pertencente à rede de amostragem de qualidade da água do INAG, são relativos à descarga do Rio Trancão na zona do estuário, incluindo desta forma os efluentes das três ETAR's mencionadas. Apenas para propriedades para as quais não existem registos, as concentrações correspondentes são determinadas recorrendo às características dos efluentes das ETAR's. À semelhança do que acontece com a descarga do Rio Sorraia, também a descarga do Rio Trancão é considerada constante ao longo do tempo.

2.9. Descarga das Águas Residuais Domésticas

Na envolvente ao Estuário do Tejo existe, como foi já referido, um número muito significativo de agregados populacionais. As águas residuais urbanas daí resultantes são, na sua maioria, descarregadas na zona do Estuário constituindo, junto com as descargas das indústrias localizadas em redor do estuário, as chamadas fontes pontuais de poluição. Neste estudo são objecto de análise apenas as descargas de origem doméstica, ou melhor, aquelas que são ou serão efluentes tratados de ETAR's Municipais. Na região envolvente do Estuário do Tejo existem 10 ETAR's em funcionamento e 6 em estado de projecto, o que perfaz um total de 16 ETAR's, cujos efluentes são, ou serão, directa ou indirectamente descarregados no estuário. Para uma das ETAR's projectadas, localizada na região de Coima, não se encontram disponíveis os dados base do projecto, pelo que o efluente desta estação não será considerado. Neste estudo assume-se, como aproximação, que estes efluentes são directamente descarregados no estuário, desprezando, deste modo, os possíveis processos a que estariam sujeitos até à sua descarga efectiva no estuário. Isto é, algumas das ETAR's consideradas descarregam o seu efluente tratado em pequenos rios ou ribeiras que afluem depois à zona do estuário. Nestes casos considera-se, como ponto de descarga, o local da foz do rio ou ribeira, desprezando o seu caudal, por se tratarem de pequenas linhas de água, frequentemente secas na estação de calor e sendo o caudal das ETAR's a sua principal componente. Esta consideração aplica-se a todas as ETAR's existentes na envolvente ao estuário, excepto para as ETAR's de Beirolas, S. João da Talha e Frielas, uma vez que estas descarregam o seu efluente no Rio Trancão, cujo caudal não pode ser desprezado. Desta forma, a análise do efluente relativo a estas ETAR's exclui-se deste ponto do trabalho, sendo objecto de estudo particular no ponto relativo à descarga do Rio Trancão. As descargas provenientes das estações já em funcionamento resultam da aplicação dos tratamentos que ocorrem na estação, enquanto que as descargas correspondentes às estações projectadas, mas ainda não construídas, são o resultado de extrapolações feitas tendo em conta a população que abastecem.

Tal como no caso da descarga do Rio Tejo, a caracterização da descarga proveniente das ETAR's é feita em termos de Caudal Médio Diário, constante para todos os dias do ano, em todas as simulações, e de alguns parâmetros da qualidade da água que incluem as concentrações de Nitrato, Nitrito, Carência Bioquímica de Oxigénio, Sólidos Suspensos Totais, Amónia e as três formas consideradas de Azoto Orgânico (Dissolvido Refractário e Não Refractário e Azoto Particulado). A variação de temperatura entre o efluente e a água do estuário não será muito significativa, pelo que não é considerada como propriedade de descarga.

Uma vez que os efluentes domésticos estão relativamente bem estudados, é possível encontrar na literatura vários relatórios e estudos que procuram caracterizar este tipo de efluentes, encontrando valores típicos de concentrações presentes no efluente, estabelecendo proporções entre os compostos e mesmo determinando valores típicos de capitações, ou seja, quantidades de compostos ou substâncias produzidas por habitante. Partindo dos valores típicos referenciados é possível, tendo por base a

população equivalente correspondente ao efluente e algumas considerações adicionais, determinar as concentrações aproximadas de todas as propriedades necessárias para caracterizar, ao nível deste estudo, o efluente bruto que chega às ETAR's, quando estas existem. Partindo das características dos efluentes brutos e sabendo o tipo de tratamento utilizado em cada ETAR é possível determinar as características do efluente tratado, ou seja, da descarga na zona do estuário.

Para algumas das ETAR's em estudo, é possível encontrar os dados base de projecto ou mesmo resultados de análises experimentais ao funcionamento da estação, que quantificam alguns dos parâmetros necessários a este estudo. A utilização destes valores é sempre privilegiada, de forma a tornar a quantificação da descarga aproximada da realidade, recorrendo aos valores típicos apenas quando os dados reais são insuficientes. No Anexo I são apresentados os valores característicos das descargas da ETAR's no Estuário do Tejo, e as considerações utilizadas para a sua determinação.

2.10. Resultados

Como já foi referido o trabalho encontra-se em fase de teste e análise pelo que os resultados são apenas preliminares. Assim optou-se por apresentar um conjunto de resultados que pretende exemplificar o tipo de análise que será levada a cabo logo que todas as simulações sejam realizadas e validadas.

2.10.1. Influência da Variação Sazonal da Descarga do Rio Tejo

Para detectar a possível influência da variação sazonal da descarga do Rio Tejo na produção de biomassa no interior do estuário, recorre-se à comparação entre duas simulações do modelo diferindo apenas no tipo de descarga do Rio Tejo (variável ou constante ao longo do ano), utilizando condições do Cenário I, Ano Médio.

2.10.2. Concentração das Propriedades

Em geral, as variações de concentração, das várias propriedades, entre as duas simulações não são muito significativas mas, a existir, são semelhantes em todas as caixas, isto é, fazem-se sentir da mesma forma em quase todo o estuário. As figuras que se seguem dizem respeito à variação sazonal das propriedades em análise, nas duas simulações, e permitem ter uma percepção das principais diferenças obtidas.

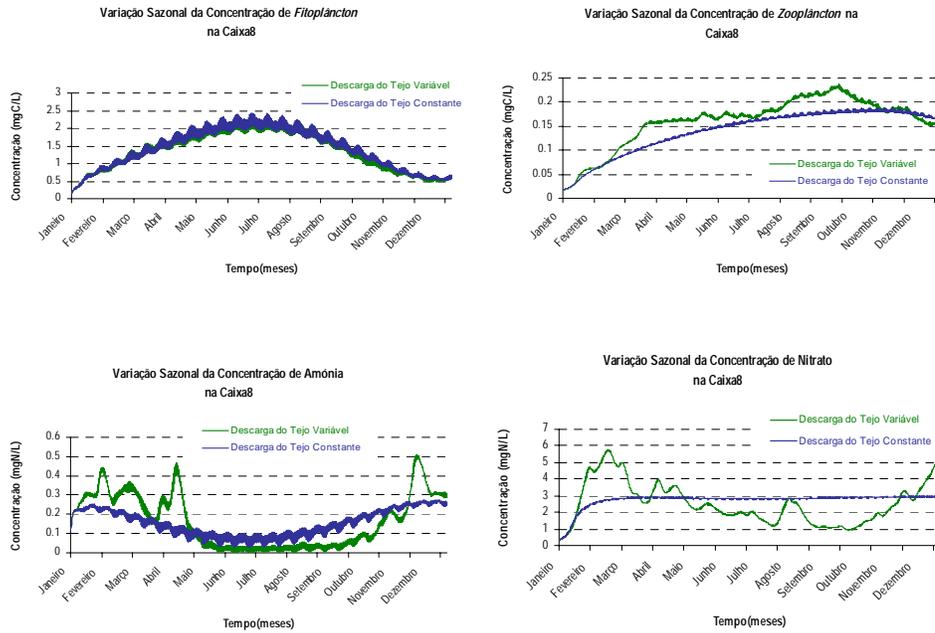


Figura 10 Variação Sazonal da Concentração para Descarga Variável e Constante

Pode dizer-se que as diferenças na variação sazonal da concentração de *Fitoplâncton*, entre as duas simulações, são pouco significativas. No entanto, no caso de uma descarga variável, o pico de Primavera atingido é um pouco menor, talvez explicado pelo maior crescimento do Zooplâncton. Relativamente às concentrações de nutrientes, é notória uma maior variabilidade com descarga variável. Com descargas constantes a diferença de concentrações de Amônia e Nitrato entre os meses de Verão e Inverno é menos acentuada sendo, no entanto, perceptível nos dois casos, o período de maior consumo, coincidente com o maior crescimento do *Fitoplâncton*. Em todas as caixas de integração a evolução ao longo do ano é similar embora com valores de concentração um pouco diferentes, dependendo das características da cada caixa.

Das propriedades em análise, o Nitrato será talvez aquela que revela variações mais significativas. É também a propriedade cuja variação é mais importante na descarga do Rio Tejo ao longo do ano. Na situação de descarga constante, a concentração de Nitrato oscila entre uma gama de valores relativamente baixa, ao passo que para uma descarga variável pode nos meses de Inverno atingir cerca de 10 mg N/L na caixa 6 (esta caixa é no fundo a primeira caixa do estuário a receber a descarga do Rio Tejo) e nos meses de Verão atingir valores muito baixos. Estas variações são de facto significativas e vão de encontro ao que seria de esperar mas, parecem não ter um efeito muito significativo sobre a variação de biomassa (*Fitoplâncton* e *Zooplâncton*) ao longo do tempo. Deve ainda referir-se que, as caixas mais

próximas do local de descarga do Rio Tejo, apresentam uma maior variabilidade das concentrações, provocada exactamente pela existência da descarga.

2.10.3. Fluxo das Propriedades entre Caixas

As variações de concentração anteriormente descritas vão agora fazer-se sentir na forma de fluxos entre caixas.

No caso de uma descarga constante a concentração de *Fitoplâncton* mostra uma ligeira subida, pelo que os fluxos apresentam também maiores valores, dependendo da localização das caixas. Pode no entanto referir-se que, o fluxo de entrada da descarga do Rio Tejo no estuário (6->7), que é no fundo a única diferença entre as simulações, parece ter uma diferença mínima entre uma e outra simulação. No entanto, os correspondentes fluxos de saída para o mar (0->1) são diferentes. Na situação de descarga variável existe uma maior exportação de biomassa o que sugere que a produção no interior do estuário é maior, não sendo no entanto diferenças muito significativas. As figuras seguintes permitem uma melhor visualização do balanço feito ao Estuário, destacando o total de entradas, via Rio Tejo, Sorraia, Trancão e ETAR's e saídas (Fluxo 0->1), para cada uma das propriedades.

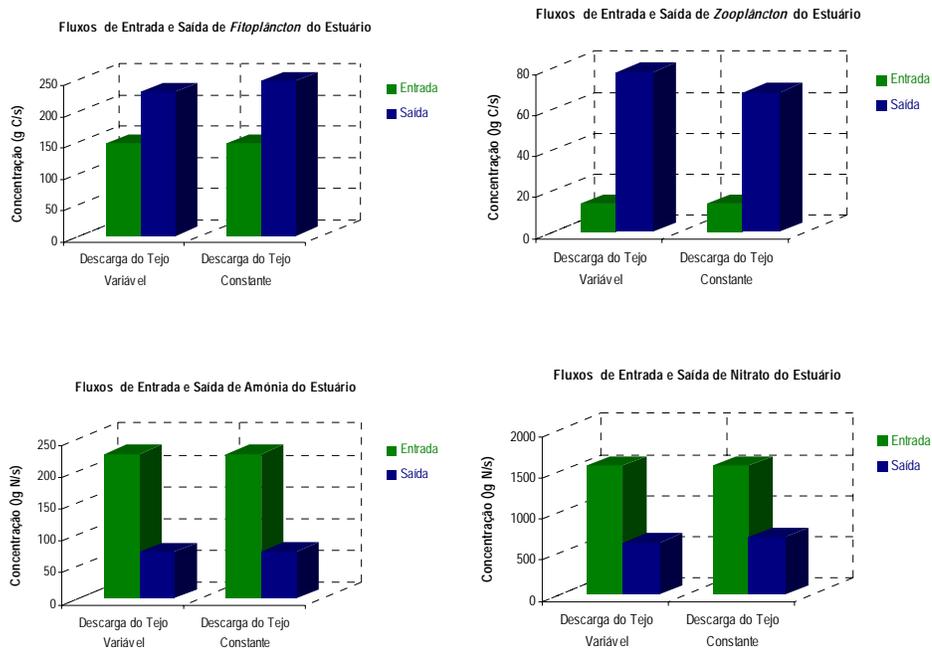


Figura 11 Balanço de Entrada e Saída do Estuário para Descarga Variável e Constante

Verifica-se uma significativa produção de biomassa no Estuário do Tejo, tanto de *Fitoplâncton* como de *Zooplâncton*, nas duas condições. Na situação de descarga variável parece existir uma menor produção de *Fitoplâncton* dentro do estuário, talvez influenciada pela maior produção de *Zoo*, já verificada na análise ao longo do ano. Quanto aos nutrientes existe em ambas as simulações um consumo quer de Amónia quer de Nitrato, sendo o deste último maior. Em termos do balanço à quantidade de Amónia as diferenças entre a consideração de uma descarga variável e constante são praticamente nulas e relativamente ao Nitrato apesar de não ser uma variação muito significativa no caso de uma descarga variável, apesar de o crescimento do *Fitoplâncton* ser um pouco menor existe maior consumo de nitrato. Sendo a quantidade de Amónia exportada a mesma, sugere que esta diminuição de Nitrato não terá sido provocada por uma diminuição no processo de Nitrificação pois teria no fluxo de Amónia alguma consequência. Deste modo, talvez, durante uma descarga variável, a desnitrificação (o único processo, além do consumo pelo *Fitoplâncton*, capaz de consumir este nutriente), se torne mais intensa diminuindo o fluxo de saída de Nitrato.

3. Módulo do Fundo

3.1. Conceptualização e Estruturação

A modelação dos processos que ocorrem no fundo do estuário assentam em grande parte na interpretação dos fenómenos ocorrentes na interface coluna de água – sedimento, pelo que a estrutura da separação entre estes dois meios assenta na criação de uma interface de ligação entre a coluna de água e os sedimentos, que na prática compila a informação relativa às trocas entre os dois compartimentos. Esta interface diz respeito a uma camada de sedimentos fina com um carácter transiente, dependente dos processos de erosão e deposição, numa escala temporal associada aos processos hidrodinâmicos e de transporte na coluna de água. A função separativa desta camada permite dissociar os processos que ocorrem no depósito sedimentar a uma escala mais lenta e a profundidades mais elevadas, “filtrando as altas frequências” da erosão e deposição, dando lugar à consolidação dos sedimentos. A fim de se conseguir este filtro, considera-se que esta camada apresenta uma elevada porosidade, pretendendo simular sedimentos recentemente depositados, podendo por isso se chamar de camada fofa (*fluf layer*), e que mantém essa propriedade constante ao longo do tempo. Considera-se assim que ao se depositarem, os sedimentos tomam a sua posição na estrutura da camada arrastando consigo material dissolvido, por forma a que a porosidade se mantenha constante. O processo de erosão é efectuado de forma semelhante: a ressuspensão de sedimentos implica igualmente o arrastamento de material dissolvido para a coluna de água.

3.2. Evolução da interface coluna de água - sedimento

O modelo de transporte de sedimentos calcula em cada passo temporal a massa de sedimentos, M_E [M], que é ressuspendida ou a massa de sedimentos, M_D [M], que se depositou. Tendo em conta que a porosidade da interface se mantém constante, a variação da sua espessura, Δh_{fluf} [L] é dada pela seguinte expressão:

$$(1) \quad \Delta h_{fluf} = \frac{M_D - M_E}{\rho_{fluf} \times \text{Área}}$$

em que ρ_{fluf} [ML⁻³] é a densidade da camada fofa (vista como um meio composto por sedimentos e água intersticial). Dada a possibilidade de esta camada ser erodida na sua totalidade em períodos de

velocidades de escoamento (enchente ou vazante) mais acentuados, considera-se que a camada mantém uma espessura mínima nessa eventualidade e enquanto não voltar a existir deposição.

De forma semelhante, evolui a fase particulada da propriedade que se pretende modelar. Por conveniência, e contrariamente à forma como usualmente se representam concentrações de propriedades, quer se encontrem na forma particulada quer na dissolvida, optou-se por estruturar o cálculo destas concentrações e da sua evolução, com base num volume de controlo de sedimento húmido, isto é: massa da propriedade por volume ocupado por sedimentos e água intersticial.

Assim, inicializando-se as concentrações, pode determinar-se a massa da propriedade (arsénio particulado) que se encontra na camada fofa e a evolução da mesma através da expressão:

$$(2) \quad M_{fluf} = C(As_p) \times h_{fluf} \times \acute{A}rea + M_D(As_p) - Ratio(As_p / Sed) \times M_E$$

em que $Ratio(As_p / Sed)$ é a razão mássica entre arsénio particulado e sedimento húmido obtida por:

$$(3) \quad Ratio(As_p / Sed) = \frac{M_{fluf}(As_p)}{h_{fluf} \times \rho_{fluf} \times \acute{A}rea}$$

Note-se que a deposição de arsénio particulado é obtida através do cálculo de um fluxo convectivo vertical por sua vez calculado com base na concentração de matéria particulada em suspensão junto ao fundo, como descrito no capítulo 2.3.3.

3.3. Modelação do compartimento sedimentar

A camada fofa, como referido, controla a separação entre o sistema dinâmico acima dela, com movimentos de maré, deposição e erosão de sedimentos, relativamente ao compartimento sedimentar abaixo, onde os processos ocorrem com uma escala temporal bastante mais elevada. Considera-se igualmente que os sedimentos se encontram sempre saturados em água.

O leito de sedimentos, em ambientes aquáticos, tem que ser interpretado obviamente nas suas duas componentes: o sedimento seco propriamente dito e a água intersticial que ocupa os espaços vazios entre os sedimentos. À semelhança do que acontece na coluna de água, as propriedades (do sedimento) encontram-se distribuídas nestes dois sistemas, de acordo com as condições ambientais específicas. De

forma a modelar o transporte da propriedade neste meio, é necessário compreender os parâmetros que implicam esse transporte de acordo com o “compartimento”, ou forma, em que a propriedade se encontra, bem como a transferência entre as duas fases, líquida e sólida.

A camada fofa, como referido, controla a separação entre o sistema dinâmico acima dela, com movimentos de maré, deposição e erosão de sedimentos, relativamente ao compartimento sedimentar abaixo. Para modelar o desfasamento de escalas temporais a integração no tempo dos fenómenos que ocorrem nos sedimentos é efectuada com passos de tempo superiores aos processos que dependem da hidrodinâmica.

Para este modelo interessam principalmente os processos que ocorrem nas primeiras dezenas de centímetros do leito de sedimentos, pelo que a maiores profundidades a ocorrência destes é suficientemente lenta para se poder considerar como uma fronteira fechada.

A importância de modelar a compactação dos sedimentos do fundo, prende-se com o facto de este fenómeno induzir a expulsão da água intersticial contida entre os sedimentos para a coluna de água. Considera-se neste modelo que a velocidade de consolidação do leito corresponde à velocidade da água no seio deste, com sinal contrário. Isto permite a criação de um campo de velocidades da água no fundo que, aplicado ao modelo de transporte e representando o termo advectivo, permitirá calcular o fluxo correspondente de propriedade dissolvida para a coluna de água. O transporte será calculado como sendo unidimensional e, obviamente, sobre o eixo vertical.

Para além do transporte advectivo, há que considerar ainda o termo difusivo do movimento vertical da água intersticial, bem como o transporte difusivo da fase particulada. A bioturbação é um mecanismo importante neste tipo de estudo, uma vez que pode aumentar a difusividade em algumas ordens de grandeza, devido à actividade de organismos (alimentação, deslocamento e abrigo) que habitam nas camadas superficiais dos sedimentos.

3.4. Consolidação

A modelação da consolidação dos sedimentos é efectuada através da divisão do leito abaixo da camada fofa em várias camadas e baseia-se na redução da porosidade de acordo com um determinado tempo de decaimento, no fim do qual o volume de vazios, preenchidos com água, será igual a um valor preestabelecido como característico de sedimentos consolidados. Note-se que a porosidade destas camadas é inferior à da camada fofa e diminui com a profundidade. Assim a variação da porosidade pode ser dada por:

$$(4) \quad \frac{\partial \phi}{\partial t} = \left(\frac{\phi_{\text{estacionário}} - \phi}{t_{\text{decaimento}}} \right)$$

em que, $\frac{\partial \phi}{\partial t}$ é a variação da porosidade ao longo do tempo, $\phi_{estacionário}$ é a porosidade nos sedimentos em condições estacionárias (sedimento consolidado) e $t_{decaimento}$ [T] o termo de decaimento para a consolidação.

Esta variação da porosidade é relativa à expulsão de água intersticial de uma determinada camada. Considerando-se que a velocidade com que essa água se desloca devido à consolidação é igual à velocidade de compactação da camada, mas com sinal contrário, e tendo em conta que a porosidade é dada pelo volume de água existente num volume de controlo constituído por sedimento e água, temos que, para uma área da célula de controlo constante, a variação da porosidade é obtida por:

$$(5) \quad \frac{\partial \phi}{\partial t} = \frac{\partial \left(\frac{h_a}{h_a + h_{sed}} \right)}{\partial t}$$

em que h_a é altura de água [L] presente numa camada, h_{sed} é altura de sedimento seco [L] na mesma camada. Estas duas alturas somadas correspondem à espessura da camada, h [L] e podem ser obtidas através do conhecimento da porosidade da camada.

Assim, derivando a expressão 27, (Anexo 3), obtém-se que a velocidade de consolidação da camada é igual à variação da altura de água na camada ao longo do tempo:

$$(6) \quad \frac{\partial h_a}{\partial t} = \frac{(h_a + h_{sed})^2}{h_{sed}} \left[\frac{\phi_{estacionário} - \phi}{t_{decaimento}} \right]$$

Aplicando esta variação a um referencial com origem na face inferior de uma determinada camada, tem-se que a velocidade de consolidação $u(k_i)$ [LT⁻¹] da face superior é obtida pelo seguinte algoritmo:

$$(7) \quad u(k_i)^{t+\Delta t} = \frac{(h(k_{i-1})^t)^2}{h_{sed}^t} \left[\frac{\phi_{estacionário} - \phi(k_{i-1})^t}{t_{decaimento}} \right]$$

sendo relativa à camada k_{i-1} compreendida entre as faces k_i e k_{i-1} .

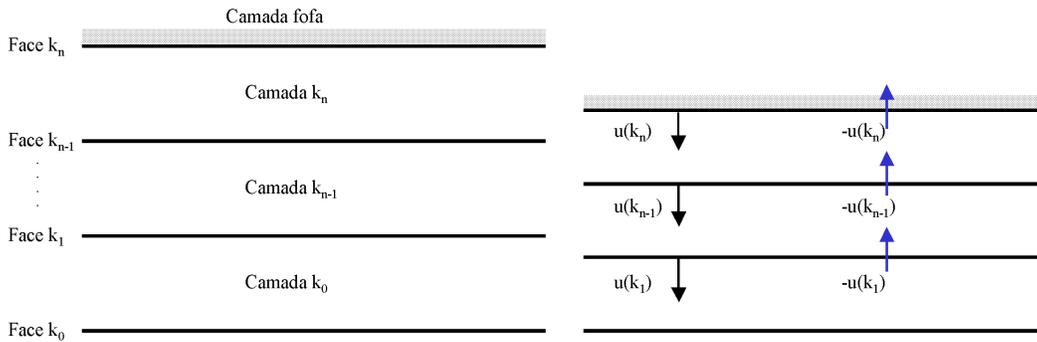


Figura 3 – Esquema da divisão do leito sedimentar em camadas e do processo de consolidação
(u = velocidade de consolidação)

Como referido anteriormente, a deposição e a erosão de sedimentos na camada fofa é um processo bastante mais rápido que a consolidação. No entanto, em zonas do estuário onde haja balanço de deposição de sedimentos positivo, é natural que estes, por sobreposição com sedimentos recentemente depositados, consolidem. A modelação deste processo assenta na transferência de sedimento seco da camada fofa para a camada abaixo, com base na integração com um passo temporal elevado da ordem do período entre a baixa-mar e a preia-mar. Considera-se assim que a quantidade de sedimentos que consolida é igual a uma percentagem do total (T_c) existente na camada fofa, resultante do balanço de deposição/erosão numa determinada célula, quando esse balanço for positivo em termos de deposição. Pretende-se simular assim que, no passo de integração, em média, os sedimentos estiveram cobertos por outros recentemente depositados. Assim o depósito recente substitui na camada fofa o depósito mais antigo que consolida, sendo este transferido para a camada inferior que apresenta uma porosidade mais reduzida. Torna-se então necessário corrigir a velocidade de consolidação da face superior (k_n), sendo n o número de camadas, devido à transferência de sedimentos da camada fofa para a camada inferior. À semelhança do considerado no processo de deposição, os sedimentos transferidos para a camada inferior, tomam a porosidade desta, resultando daí um termo de retardação da velocidade de consolidação da camada k_n , quantificado da seguinte forma:

$$(8) \quad u(k_n)^{t+\Delta t} = u(k_n)^t + \frac{\text{Consolidação}}{(1 - \phi(k_{n-1})^t) \times \Delta t}$$

em que,

$$(9) \text{ Consolidação} = h_{sed}^{t+\Delta t} \times T_c (\%)$$

Obtidas as velocidades de consolidação de cada camada, calcula-se a espessura das mesmas da seguinte forma:

$$(10) h(k_{i-1})^{t+\Delta t} = h(k_{i-1})^t + \Delta t \times u(k_i)$$

Como visto este algoritmo para o cálculo da velocidade assenta no decaimento da porosidade. No entanto, verificou-se que na resolução das equações de evolução da porosidade e da velocidade em paralelo surgiam inconsistências numéricas (Anexo 3), pelo que se optou por impor o cálculo da porosidade numa determinada camada a partir da relação entre espessura total (eq.32) e espessura de sedimento seco (constante).

$$(11) \phi(k_i)^{t+\Delta t} = \frac{h(k_i)^{t+\Delta t} - h_{sed}(k_i)^{t+\Delta t}}{h(k_i)^{t+\Delta t}}$$

3.5. Modelo de transporte no leito de sedimentos

O modelo de transporte no fundo é distinto relativamente à fase em que a propriedade se encontra. A fase dissolvida na água intersticial é transportada segundo uma componente advectiva, dada pelo campo de velocidades da água criado pela consolidação, e segundo uma componente difusiva, dependente dos gradientes de concentração, que pode eventualmente ser afectada pela bioturbação. O transporte da fase particulada adsorvida nos sedimentos depende essencialmente dos processos de difusão destes, potenciados pela bioturbação, e talvez de forma mais importante pelo equilíbrio químico com a fase dissolvida.

3.5.1. Fase particulada

Como referido o transporte da fase particulada no leito é efectuado por difusão, considerando-se que este é apenas relevante no eixo vertical e pode ser interpretado da seguinte forma:

$$(12) \frac{\partial A s_p}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[D_z \frac{\partial A s_p}{\partial z} \right] + (F - P)$$

onde As_p é a razão de massa de arsénio particulado por massa de sedimento seco, D_z é a difusividade [L^2T^{-1}] nos sedimentos, que depende da bioturbação, como será visto mais adiante, $(F - P)$ diz respeito à partição entre a fase particulada e dissolvida, que se processa de forma semelhante à na coluna de água, considerando um coeficiente de partição apropriado. (Nota: O algoritmo implementado para modelar a transferência entre as fases particulada e dissolvida é diferente do implementado na coluna de água, uma vez que se utilizam passos de integração muito elevados, a solução numérica instabiliza, tendo-se aplicado um algoritmo semi-implícito por forma a resolver essa instabilidade – Anexo 4).

As trocas da fase particulada entre o fundo e a coluna de água são condicionadas pelo balanço de erosão e deposição de sedimentos sendo controladas pela camada fofa ($z = z_0$).

$$(13) N(z_0, t) = F(As_p)_b = F(As_p)_{DEP} - F(As_p)_{ERO}$$

em que $F(As_p)_{ERO}$ e $F(As_p)_{DEP}$ são os fluxos de arsénio particulado [MT^{-1}] relativos aos fluxos de sedimentos erodidos, F_{ERO} [$ML^{-2}T^{-1}$], e depositados, F_{DEP} [$ML^{-2}T^{-1}$], respectivamente. As concentrações de arsénio particulado na camada da coluna de água junto ao fundo e na camada superficial do leito de sedimentos são actualizadas tendo em conta o balanço destes fluxos.

Relativamente ao processo de consolidação da camada fofa, aquando da transferência de sedimentos para a camada abaixo existe igualmente transferência de arsénio particulado, de forma concordante, dada pela razão $Ratio(As_p / Sed)$.

3.5.2. Fase dissolvida

No que diz respeito à fase dissolvida, o seu transporte no leito de sedimentos é feito de acordo com o escoamento da água intersticial no meio poroso:

$$(14) \frac{\partial As_D}{\partial t} + w \frac{\partial As_D}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left[D_{wz} \frac{\partial As_D}{\partial z} \right] + (F - P)$$

em que As_D é a concentração [ML^{-3}] de arsénio dissolvido por unidade de volume de água intersticial; w é a velocidade vertical da água intersticial [LT^{-1}], dada pelo campo de velocidades calculado

a partir da consolidação do leito; D_{wz} é a difusividade [L^2T^{-1}] da água nos sedimentos, que depende igualmente da bioturbação; $(F - P)$ diz respeito ao equilíbrio da distribuição entre as duas fases no leito de sedimentos.

Relativamente aos fluxos entre a coluna de água e o fundo, estes, como referido, podem ter origem em três processos diferentes: advecção, difusão e erosão (eq. 13). Em termos de modelação, impõem-se que na camada fofa, na sua função exclusiva de transferência entre os sedimentos e a coluna de água, não existe partição entre a fase dissolvida e particulada e que a concentração de fase dissolvida é semelhante à da coluna de água. Esta consideração permite assumir que os fluxos de fase dissolvida entre os dois sistemas efectuados na face k_n , na divisória entre a camadas mais rígidas e a camada fofa, sejam directamente ligados à coluna de água.

Assim temos como condição fronteira que:

$$(15) [As_d]_{z=0,t} = [As_d]_{b,t}$$

em que, b significa na 'junto à interface sedimento-água'.

3.5.3. Bioturbação

Para se incluir este efeito no modelo, calcula-se a cada instante, para cada célula de cálculo, a profundidade, $P(k_i)$ [L] à qual se encontra o centro de cada célula de cálculo, tendo em conta a espessura de cada camada.

$$(16) P(k_i) = P(k_i) + h(k_{i+1}) \quad , \text{ com } h(k_{n+1}) = 0$$

Podem assim calcular-se as difusividades verticais em cada célula, D_{wz} e D_z [L^2T^{-1}], como sendo, respectivamente, a resultante da difusividade da água no leito dos sedimentos, D_0 [L^2T^{-1}], com a difusividade devida à actividade de organismos bentónicos, $D_{bioturbação}$ [L^2T^{-1}], no caso da fase dissolvida e no caso da fase particulada igual à difusividade de bioturbação na zona de influência definida em termos de profundidade, $z_{bioturbação}$ [L], normalmente entre os 5-15 cm.

$$(17) \begin{cases} D_{wz} = D_0 & , z > z_{bioturba\c{c}ao} \\ D_{wz} = D_0 + D_{bioturba\c{c}ao} & , z \leq z_{bioturba\c{c}ao} \end{cases}$$

$$(18) \begin{cases} D_z = 0 & , z > z_{bioturba\c{c}ao} \\ D_z = D_{bioturba\c{c}ao} & , z \leq z_{bioturba\c{c}ao} \end{cases}$$

3.6. Testes de verifica\c{c}ao do funcionamento de processos isolados

3.6.1. Distribuic\c{c}ao entre fases

A distribuic\c{c}ao entre a fase particulada e dissolvida \c{e} controlada essencialmente pelo coeficiente de parti\c{c}ao k_d , que relaciona as concentra\c{c}oes de equil\c{b}rio das duas fases, e pela taxa de transfer\c{e}ncia, k_{DP} , a parametriza\c{c}ao usada diz respeito \c{a} propriedade Ars\c{e}nio. O valor do coeficiente de parti\c{c}ao do ars\c{e}nio foi mantido constante, apresentando na coluna de \c{a}gua frac\c{c}oes de dissolvido de 70% e 30% de particulado. Quanto \c{a} taxa de transfer\c{e}ncia, esta, basicamente diz respeito ao tempo que se leva para atingir o equil\c{b}rio entre as duas fases, tornando-se por isso um par\c{a}metro dif\c{i}cil de quantificar. Verifica-se que, na coluna de \c{a}gua, onde o transporte advectivo apresenta grande import\c{a}ncia para a evoluic\c{c}ao temporal das propriedades num determinado volume de controlo, para uma taxa de transfer\c{e}ncia $k_{DP} = 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ o equil\c{b}rio atinge-se rapidamente, inicializando-se as concentra\c{c}oes com valores semelhantes, e o sistema reage igualmente de forma r\c{a}pida a varia\c{c}oes bruscas de concentra\c{c}ao de qualquer uma das fases. Isso \c{e} vis\c{i}vel, pois, neste caso, sendo as maiores varia\c{c}oes devidas \c{a} deposi\c{c}ao e eros\c{a}o de ars\c{e}nio particulado ¹, a curva de concentra\c{c}ao de ars\c{e}nio dissolvido acompanha o andamento da curva de concentra\c{c}ao de ars\c{e}nio particulado. Com uma taxa inferior, 10^{-5} s^{-1} , nota-se que o equil\c{b}rio n\c{a}o chega a ser atingido, pois a concentra\c{c}ao da fase dissolvida apresenta varia\c{c}oes menores, exactamente por ter um tempo de resposta ao aumento ou diminuic\c{a}o da fase particulada bastante reduzido.

¹ Note-se que as curvas (Figura 12 – Influ\c{e}ncia da taxa de transfer\c{e}ncia na distribuic\c{c}ao entre fases) oscilam com um per\c{i}odo de 12 horas, aproximadamente o intervalo de tempo entre duas enchentes ou vazantes, sendo que estes resultados s\c{a}o referentes a uma zona de car\c{a}cter transiente em termos de eros\c{a}o e deposi\c{c}ao.

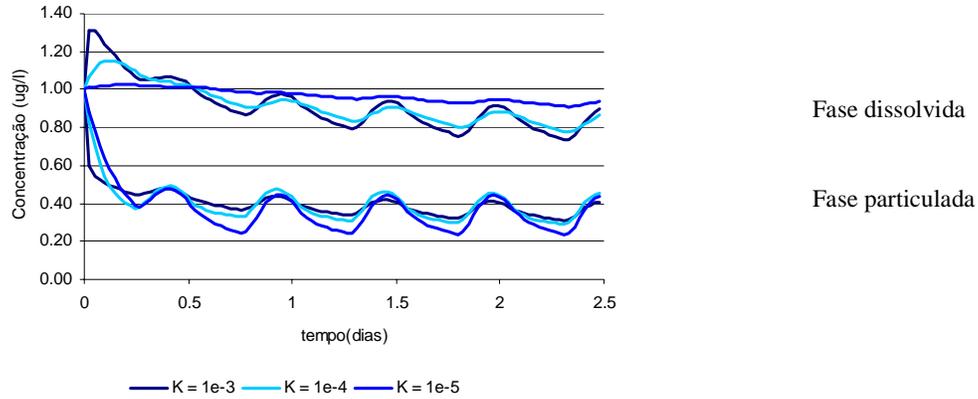


Figura 12 – Influência da taxa de transferência na distribuição entre fases

No gráfico seguinte pode observar-se exactamente o desvio do valor de coeficiente de partição imposto constante com os valores instantâneos da relação entre as duas fases. Mais uma vez é visível que quanto maior a taxa de transferência, menor é o desvio ao equilíbrio imposto.

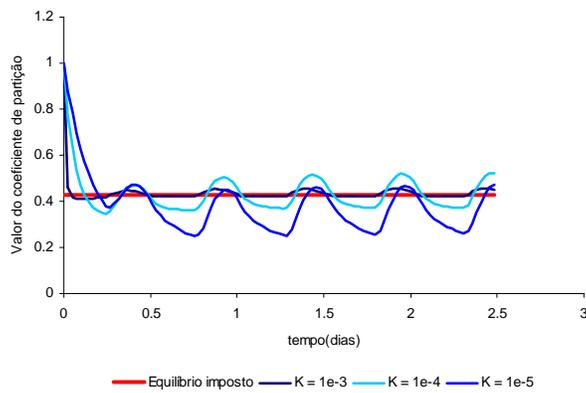


Figura 13 – Análise ao tempo de resposta da partição entre fases

3.6.2. Consolidação

O modelo de consolidação implementado é constituído por dois processos distintos, respectivamente referentes ao depósito recente e aos sedimentos cobertos. No primeiro caso, tendo em conta que os processos de erosão e deposição são integrados num passo relativamente curto, considera-se que existe consolidação quando o balanço no passo mais elevado, com que são integrados os processos nos sedimentos, é positivo em termos de deposição. Isto garante que em termos médios a camada fofa esteve coberta por sedimentos recentemente depositados, o que fez com que ela consolidasse, na forma de transferência de sedimentos para a camada imediatamente abaixo, que apresenta maior valor de porosidade. Esta transferência é feita na forma de uma percentagem de sedimentos da camada fofa, T_c ,

que no fundo é a sua taxa de consolidação, existindo apenas quando a massa de sedimentos que se depositou forçou os sedimentos já depositados a compactarem. Verifica-se naturalmente que, quanto maior a percentagem de consolidação, mais rapidamente a camada diminui de espessura.

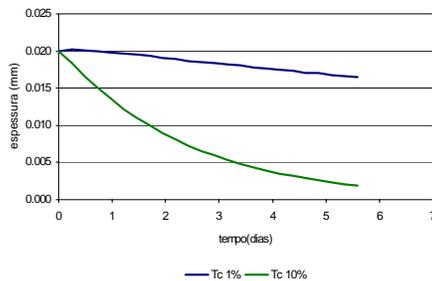


Figura 14 – Variação da espessura da camada fofa numa situação de deposição utilizando diferentes taxas de consolidação

A consolidação da camada fofa implica a transferência de sedimentos contaminados que aí se depositaram, para a camada inferior. No gráfico² abaixo à direita, referente a esta última, pode ver-se essa transferência pelo aumento da concentração de arsénio particulado, tanto maior quanto maior a percentagem de consolidação, que “arrasta” mais sedimentos contaminados. No gráfico da esquerda, relativo à camada fofa, observa-se a deposição de sedimentos contaminados, daí o aumento da concentração.

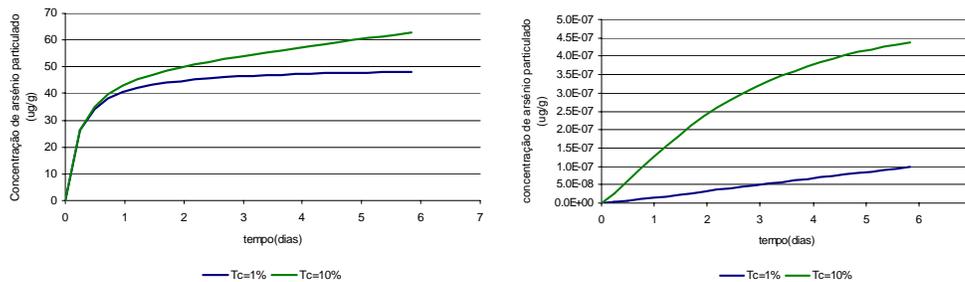


Figura 15 – Variação das concentrações de arsénio particulado na camada fofa e na camada imediatamente abaixo utilizando diferentes taxas de consolidação para uma situação de elevada deposição

Os parâmetros que controlam a evolução da porosidade nas camadas inferiores são para além das condições iniciais, o tempo de decaimento e a porosidade estacionária, considerada como relativa aos sedimentos consolidados.

² A simulação referente figuras foi efectuada num ‘tanque’, sem movimento de água, para que condições de deposição acentuada pudessem ser recriadas. A concentração inicial de arsénio particulado é nula por forma a verificar-se quer a deposição de sedimentos contaminados como a transferência da camada fofa para a camada inferior.

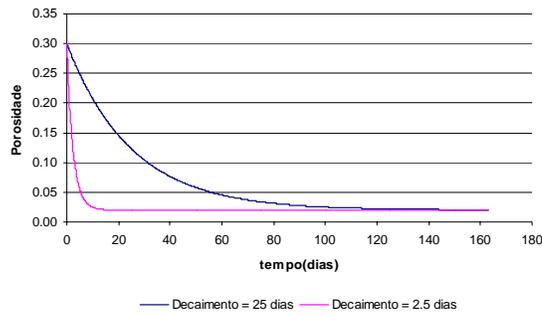


Figura 16 – Evolução da porosidade de uma camada para dois tempos de decaimento distintos

Quanto mais elevado o tempo de decaimento mais lenta é a compactação dos sedimentos. Este parâmetro é fundamental no controlo dos fluxos advectivos da água intersticial no leito de sedimentos, uma vez que atingindo-se a situação estacionária ou de consolidação final, o transporte da água intersticial irá unicamente efectuar-se por mecanismos difusivos.

3.6.3. Transporte de fase dissolvida na água intersticial

Para aferir o funcionamento do transporte difusivo da fase dissolvida associada às águas intersticiais, isolou-se o processo impondo como condições iniciais porosidade constante e uma taxa de transferência entre a fase dissolvida e particulada nula. Estas considerações eliminam respectivamente a componente advectiva do transporte, calculada a partir do decaimento da porosidade, bem como quaisquer trocas com a fase sólida. Para simular o gradiente de concentrações que constitui a força motriz do transporte difusivo, impôs-se uma concentração inicial nos sedimentos de 0.5 mg/l e nula na coluna de água, onde também não foi imposto igualmente qualquer tipo de forçamento do movimento da água. A difusividade foi imposta a $10^{-6} \text{ cm}^2\text{s}^{-1}$. A partição entre fase dissolvida e particulada foi igualmente cancelada.

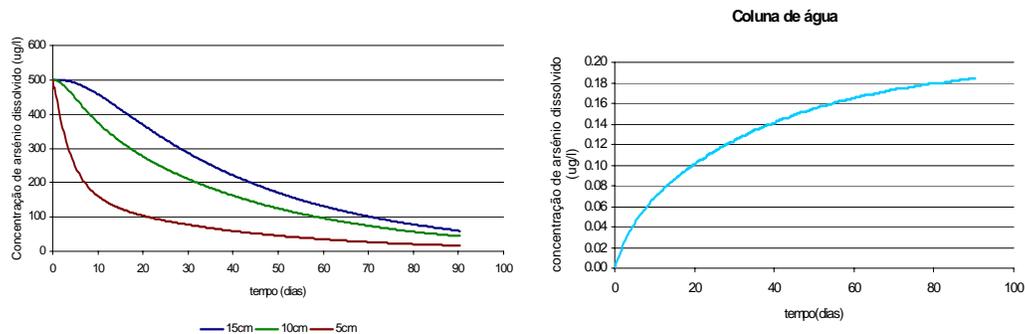


Figura 17– Transporte difusivo de arsénio dissolvido na água intersticial dos sedimentos

Os resultados são satisfatórios uma vez que, isolada difusão, as concentrações evoluem para um equilíbrio entre os sedimentos e a coluna de água. Note-se mais uma vez que o isolamento deste processo visa a verificação do seu funcionamento qualitativamente, o que é visivelmente conseguido.

A evolução dos perfis verticais de concentração abaixo permite visualizar os fluxos difusivos dos sedimentos para a coluna de água. Note-se que o facto de o declive dos perfis ser menos acentuado nos instantes (dias) iniciais é um bom indicador desses fluxos pois o gradiente de concentrações é maior entre a camada menos profunda e a água sobrenadante, diminuindo ao longo do tempo à medida que se atinge um equilíbrio entre os dois sistemas.

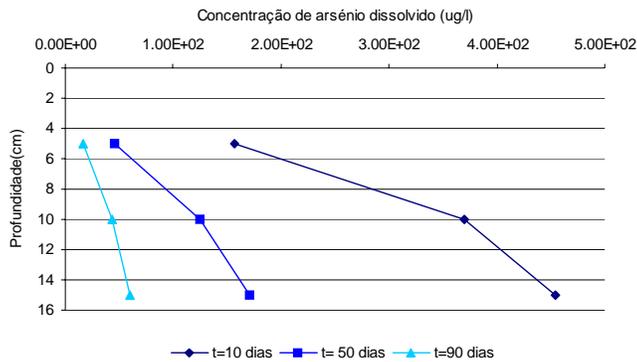


Figura 18 –Perfis verticais de concentração de arsénio dissolvido na água intersticial dos sedimentos devido ao transporte difusivo

4. Conclusões e Trabalho Futuro

O trabalho está a evoluir de forma satisfatória dentro dos objectivos definidos. No que diz respeito à hidrodinâmica, os resultados já se encontram numa fase final sendo pouco provável que venham a sofrer alterações até ao fim. Em relação aos resultados da qualidade da água todo o trabalho que diz respeito à definição das condições de fronteira foi já realizado estando neste momento a decorrer a fase de testes e simulações do modelo que precede a fase de análise de resultados. Em relação ao módulo do fundo, trata-se um modelo ainda em fase de desenvolvimento razão pela qual os resultados são apenas preliminares, no entanto consideramos que a fase crítica de desenvolvimento já foi ultrapassada razão pela qual a sua implementação no estuário do Tejo será feita a muito curto prazo.