

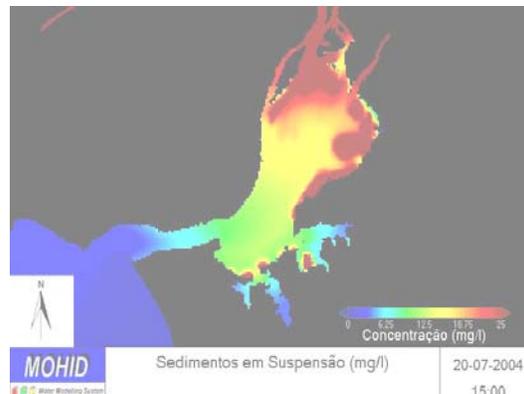


Instituto Superior Técnico

Licenciatura em Engenharia do
Ambiente

Trabalho Final de Curso

**INTEGRAÇÃO DE DETECÇÃO REMOTA,
DADOS *IN-SITU* E MODELOS NUMÉRICOS NO
ESTUDO DO TRANSPORTE DE SEDIMENTOS
COESIVOS NO ESTUÁRIO DO TEJO**



David Armando Costa Brito

Orientador: Doutor Ramiro Joaquim de Jesus Neves

Co-Orientador: Mestre Pedro Miguel Nogueira de Pina

Secção de Ambiente e Energia – Departamento de Engenharia Mecânica

Outubro de 2005

INTEGRAÇÃO DE DETECÇÃO REMOTA, DADOS *IN-SITU* E MODELOS NUMÉRICOS NO ESTUDO DO TRANSPORTE DE SEDIMENTOS COESIVOS NO ESTUÁRIO DO TEJO

Sumário

O Estuário do Tejo apresenta uma área de cerca de 370 km² no máximo de maré alta e 265 km² no mínimo de maré baixa; tem uma largura típica de 10-15km e 1/3 da sua superfície são zonas intertidais. O Fetch elevado e as profundidades baixas sugerem a importância que as ondas geradas localmente pelo vento poderão ter na mobilização e ressuspensão de sedimentos.

No Estuário do Tejo, a turvação sobrepõe-se aos nutrientes como factor limitante principal para a produção primária (INAG, 2002), o que pode tornar a ressuspensão devida às ondas um dos elementos-chave reguladores da produção biológica e da qualidade da água (pelo menos com importância local).

Pretende-se determinar com este estudo a influência que a componente de ondas tem na dinâmica de sedimentos no estuário e posteriormente na produção primária e mobilização de poluentes. Para tal foi desenvolvido um modelo de geração de ondas que a partir de dados de vento (intensidade e rumo) – em geral, facilmente acessíveis – permite simular os processos de ressuspensão ligados às ondas, com sensibilidade para o *Fetch* e para a profundidade.

Neste estudo verificou-se que: i) O modelo de ondas é capaz de descrever o processo de ressuspensão, que depende da direcção e intensidade do vento e, fundamentalmente, do nível de água. ii) A zona do Estuário do Tejo onde este processo é mais intenso foi identificada: zona intertidal do Samouco, Alcochete. iii) O processo de ressuspensão tem elevado peso na dinâmica de sedimentos, para curtas escalas temporais (dias ou horas), o que demonstra a necessidade de utilização da modelação na descrição do processo e na integração com campanhas de amostragem. iv) O modelo conseguiu representar a distribuição de concentrações de sedimentos em suspensão observadas nas imagens de satélite (para os momentos de ressuspensão) e os valores médios anuais dos dados de campo.

Palavras-chave: ondas, geração, *Fetch*, modelação, dados *in-situ*, detecção remota, sedimentos, qualidade da água, Tejo

Agradecimentos

O presente estudo foi desenvolvido no grupo de investigação MARETEC, na Secção de Ambiente e Energia do Departamento de Engenharia Mecânica.

Em primeiro lugar gostaria de agradecer ao Professor Ramiro Neves pelas condições de acolhimento, pelas sugestões de trabalho e pela revisão do presente texto.

Ao meu co-orientador, Eng.º Pedro Pina e ao Eng.º Luís Fernandes pela paciência, disponibilidade e saber, sem os quais este estudo não teria evoluído da mesma forma. O Pedro sempre teve as respostas para as minhas dúvidas e ideias para prosseguir o trabalho, o Luís permitiu a minha entrada no complexo mundo do MOHID e foi uma ajuda incansável na vida de um programador.

Aos mesmos 3 e aos restantes colegas da MARETEC, (dos dois pisos), que me proporcionaram um ambiente invejável de trabalho, principalmente os mais próximos.

Aos meus amigos de longa data e aos colegas de curso pelos bons e maus momentos e pela aprendizagem (principalmente fora do âmbito escolar) sem os quais me faltaria sempre qualquer coisa.

Para finalizar à minha família, principalmente pais e irmã que sempre estiveram próximos, apesar da distância.

Índice

1. Introdução	5
1.1. Problemas a resolver	5
1.2. Mecanismos de regulação da qualidade da água	7
1.3. Hipótese de Trabalho.....	9
1.4. Objectivos.....	10
1.5. Estado da arte em modelação de ondas.....	13
2. O Modelo de Geração de Ondas.....	17
2.0. Enquadramento na evolução do MOHID e no grupo MARETEC	17
2.1. Princípios do Modelo de Geração de Ondas.....	20
2.2. Equações	22
2.3. Acoplamento ao MOHID	26
2.4. Condições Iniciais e Condições Fronteira	26
2.5. Calibração / Validação	27
Oosterschelde	27
Estuário do Tejo	31
3. Resultados	34
3.1. Processos introduzidos pelo modelo de geração de Ondas.....	36
3.2. Comparação de resultados com dados <i>in-situ</i>	43
3.3. Comparação de resultados com imagens de satélite.....	48
4. Conclusões.....	53
5. Trabalho Futuro	59
Referências	59
Anexos.....	60

1. Introdução

O presente estudo enquadra-se na área de modelação ambiental de sistemas costeiros e pretende simular a geração de ondas por parte do vento no Estuário do Tejo. Mais concretamente, pretende-se verificar qual a influência das ondas geradas dentro do Estuário do Tejo na dinâmica de sedimentos e na regulação da qualidade da água.

Nos próximos capítulos é feito um enquadramento do estudo e evidenciado o papel da modelação das ondas numa perspectiva integrada de controlo da qualidade da água. São ainda apresentados a hipótese de trabalho, os objectivos propostos e o estado da arte em termos de modelação de ondas.

NOTA: Algumas das imagens apresentadas nos capítulos introdutórios têm apenas o objectivo de ilustrar o texto para facilitar a leitura e por não serem documentais não apresentam legenda.

1.1. Problemas a resolver

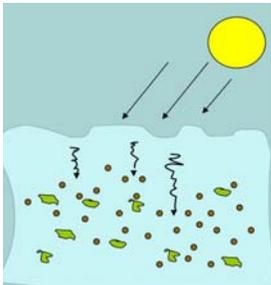
A Directiva Quadro da Água (DQA) veio integrar as directivas relacionadas com os recursos hídricos (e.g. Directiva Nitratos (91/676/CEE), Águas Residuais (91/271/CEE), Águas Balneares (76/160/CEE), etc.), e estabelecer os compromissos que os estados-membros devem respeitar nos programas de monitorização.

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

amplo que inclui o recurso a modelos como ferramenta integradora dos dados recolhidos.

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

Em grande parte dos sistemas costeiros, a **turvação** da água apresenta-se como um factor importante para a regulação da **qualidade da água**. A turvação sendo função da concentração de **matéria particulada** em suspensão tem como principal efeito interferir na penetração de luz na coluna de água, o que influencia a produção primária.



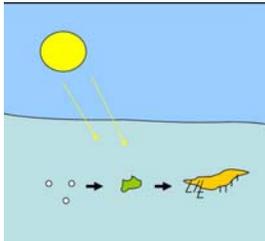
A quantidade de **matéria particulada** em suspensão é controlada não só pelos processos de erosão e deposição de sedimentos mas também pelos mecanismos de produção e consumo dos organismos planctónicos (e.g. fitoplâncton). Os sedimentos e o fitoplâncton absorvem ou dispersam a radiação incidente, afectando a extinção de luz na coluna de água.

No Estuário do Tejo a turvação, em vez dos nutrientes, é o principal factor limitante da produção primária (INAG, 2002), o que mostra a importância de compreender e quantificar o peso dos diferentes mecanismos de **regulação da turvação**. Estes mecanismos serão apresentados no ponto seguinte e aquele que ainda não está bem quantificado no Estuário do Tejo é o processo de ressuspensão de sedimentos pelas **ondas**. A tentativa de desenvolver esta componente motivou o presente estudo.

1.2. Mecanismos de regulação da qualidade da água

São, neste ponto, apresentados os dois factores que interferem na turvação, o **fitoplâncton** e os **sedimentos** e a sua relação com a qualidade da água.

A **produção primária** fitoplanctónica é a base energética dos sistemas aquáticos, alimentando os níveis tróficos superiores e constituindo a base da riqueza biológica de um ecossistema.



A intensidade luminosa, a temperatura, a concentração de nutrientes e a predação pelo zooplâncton, são os principais factores responsáveis pela variação de massa do fitoplâncton. A intensidade luminosa depende da turvação (na qual o fitoplâncton é também interveniente) e a concentração de nutrientes depende das cargas do sistema (directas ou indirectas) e dos processos de transporte e dos processos de fonte e sumidouro.

O fitoplâncton apresenta actividade fotossintética apenas durante o dia, constituindo assim uma fonte de oxigénio na coluna de água. Os sumidouros de oxigénio actuam durante o dia e noite e são resultado do processo de respiração do carbono existente na coluna de água: i) pelo fitoplâncton, ao oxidar os compostos formados na fotossíntese; ii) pelo zooplâncton, ao digerir o fitoplâncton, e assim por diante na cadeia trófica; iii) pelas bactérias, ao mineralizarem matéria orgânica (e.g. fitoplâncton morto).

A produção primária necessita sempre de nutrientes e numa situação de equilíbrio, as taxas de produção de oxigénio conseguem exceder as taxas de consumo.

No entanto, o enriquecimento antropogénico de nutrientes (e.g. proveniente de descargas de redes de saneamento ou da actividade agrícola), pode em determinadas

condições (e.g. quando não há limitação de luz), gerar um incremento exagerado na quantidade de fitoplâncton e outras algas (“bloom de algas”) na coluna de água.

O “bloom” exagerado de algas pode gerar duas situações: a **primeira** - à superfície (onde se acumulam as algas ao competirem pela luz disponível) - é o incremento da produção de oxigénio. A sobressaturação de oxigénio nesta faixa implica a perda deste



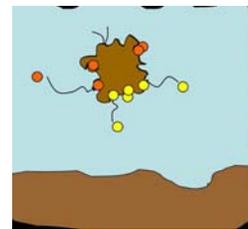
para a atmosfera (oxigénio não aproveitado).

A **segunda** situação gerada - abaixo da camada superficial e devida à elevada quantidade de carbono presente (maior massa de algas vivas e mortas) e de quem o respire (zooplâncton, microrganismos) - é um consumo de oxigénio muito elevado, que faz baixar o oxigénio

disponível e pode provocar a morte de organismos pelágicos e bentónicos. Esta situação normalmente é potenciada quando a coluna de água se apresenta estratificada pois a circulação de oxigénio da camada superficial para o fundo fica impedida.

Para além da morte de organismos, os acontecimentos de “blooms” de algas degradam a qualidade da água, devido ao excesso de excreções e de compostos tóxicos produzidos pelas algas que se desenvolvem nessas condições.

Os **sedimentos** apresentam um papel muito importante na regulação da qualidade da água em duas vertentes. Por um lado, os sedimentos em suspensão intervêm no aumento da turvação da água e por conseguinte na produção primária. Por outro, é na matéria particulada fina (fracção dos sedimentos em suspensão) que viajam adsorvidos contaminantes orgânicos e metais pesados. A deposição destes “flocos” no fundo indisponibiliza (pelo menos temporariamente) estes poluentes para o meio aquático. A ressuspensão dos sedimentos de fundo (e conseguinte passagem dos sedimentos de condições anaeróbicas



para aeróbicas), pode provocar a oxidação dos contaminantes e voltar a disponibilizá-los na coluna de água.

Os processos que regulam a dinâmica de **sedimentos** (que determinam os instantes em que ocorre erosão ou deposição) são as correntes e as **ondas**, por produzirem tensões no fundo. As correntes são influenciadas essencialmente pela maré e, no Estuário do Tejo, as ondas existentes são geradas localmente pelo **vento** (Freire, 1999).

O **vento** gera ondas e estas por sua vez, principalmente para profundidades baixas, podem produzir incrementos de tensão de corte do fundo suficientes para colocar os sedimentos em suspensão, o que poderia não ocorrer apenas com o efeito das correntes. A ressuspensão faz aumentar a concentração de sedimentos na coluna de água, com as consequências na limitação da produção primária e mobilização de poluentes discutidas anteriormente.

1.3. Hipótese de Trabalho

A hipótese formulada é baseada em 3 ideias principais:

- i) A dinâmica de sedimentos assume um papel importante na qualidade da água no Estuário do Tejo pela extinção de luz (Pina, 2001). A componente de ondas e a possível ressuspensão de sedimentos assume o mesmo papel mas o seu peso na dinâmica global não está bem quantificado;
- ii) O Estuário do Tejo apresenta ventos dominantes dos quadrantes Norte, o que origina comprimentos de Fetch¹ da ordem dos 10 – 20 km e ondas mais intensas em zonas intertidais da margem sul. Estes dois factores (Fetch elevado e profundidades

¹ - Comprimento de acção do vento – distância à superfície da água na direcção do vento. Ver capítulo 2 para uma melhor descrição do significado do Fetch.

baixas) favorecem a ressuspensão de sedimentos o que indicia a importância do efeito das ondas no Estuário do Tejo:

iii) A modelação integrada (em complemento com dados de campo e imagens de satélite) constitui uma valiosa ferramenta de apoio à gestão da qualidade da água.

Neste estudo foi considerada a hipótese que as ondas geradas localmente no Estuário do Tejo têm um peso importante na dinâmica de sedimentos, e por conseguinte, na produção primária e mobilização de poluentes. Neste sentido, a modelação das ondas permite quantificar esse peso e melhorar a simulação da extinção de luz na coluna de água do estuário.

1.4. Objectivos

O objectivo do presente estudo foi acoplar um modelo de geração de ondas ao sistema de modelação MOHID² e aplicá-lo ao Estuário do Tejo, de modo a perceber a importância das ondas na dinâmica de sedimentos deste estuário.

A integração de 3 tecnologias distintas (modelação, dados de campo e imagens de satélite) faz parte do objectivos do estudo por permitir validar os resultados por fontes com origens diferentes, aproveitando as principais vantagens de cada uma das tecnologias. A vantagem da integração é referida nos parágrafos seguintes.

As imagens de satélite e a **deteção remota** vieram revolucionar a captação de dados ao permitir obter dados de grandes áreas. No entanto, o facto de apenas ser representada a camada superficial da coluna de água e a frequência de captação das imagens ser da ordem dos dias, a variabilidade de alguns processos não consegue ser representada por

² - Sistema de modelação de corpos hídricos costeiros e interiores desenvolvido no grupo de investigação do Instituto Superior Técnico MARETEC – Centro de Ambiente e Tecnologias Marítimas.

este processo. Por exemplo o sensor MERIS da ESA capta imagens sobre o mesmo local com 3 dias de intervalo e depende bastante de condições meteorológicas favoráveis. Exemplo de uma imagem de satélite na Figura 1.

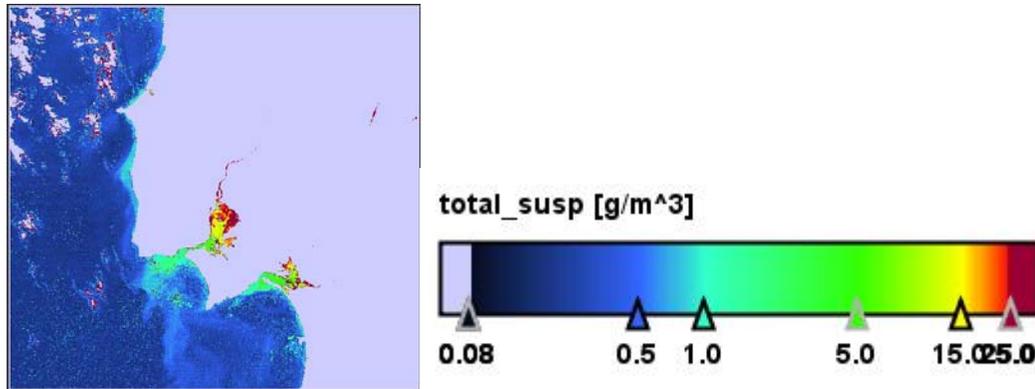
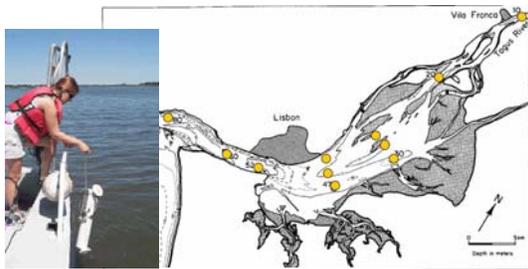


Figura 1 – Imagem de satélite do sensor MERIS para parte da costa ocidental portuguesa. É representada a distribuição de sedimentos em suspensão. Fonte: ESA.

Os **dados de campo** permitem obter informação acerca da coluna de água (amostras a



Fonte: Vale and Sundhve. (1987)

diferentes profundidades) mas devido aos elevados custos inerentes à sua recolha (custos de análise de amostras, de material, de recursos humanos), o número de pontos e a frequência de amostragem são baixos.

Os **modelos matemáticos** sobressaem neste panorama ao permitirem integrar os dois tipos de dados anteriores e preencher as falhas de informação. Os modelos apresentam passos temporais finos (ordem dos segundos), podendo representar fenómenos com elevada variabilidade e permitindo descrever os processos ao longo de toda a coluna de água.

Numa primeira fase e como parte integrante de programas de monitorização, os modelos permitem caracterizar a situação de referência num sistema. Numa segunda fase, alterando as condições fronteira (e.g. caudais afluentes e concentrações nas descargas) é possível fazer previsões de evolução da situação de referência, elaborando cenários (Figura 2). Os resultados dos cenários permitem associar custos económicos à degradação/promoção ambiental.

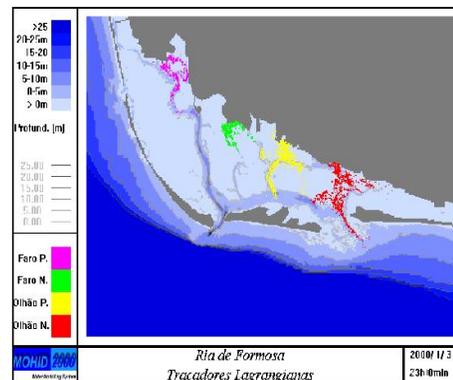


Figura 2 – Traçadores Lagrangianos na Ria Formosa simulando descargas pontuais. Fonte: MOHID.

Os modelos antes de poderem produzir resultados satisfatórios precisam de um conjunto de dados para poder calibrar os seus parâmetros e de outro conjunto para validar os resultados. Para além disso, o facto de serem representações simplificadas da realidade pode fazer com que o modelo e a realidade evoluam em direcções diversas. Mais uma vez, a monitorização e recolha de dados se torna importante para verificar e corrigir esta situação.

A utilização da modelação torna-se fundamental neste estudo por permitir descrever processos não estacionários como é o caso da ocorrência de ondas. A integração com dados de campo e de satélite permite proceder à calibração do modelo e validação dos resultados. O facto de as 3 tecnologias terem origens, pressupostos e limitações bem distintas faz com que a sobreposição de resultados permita distinguir erros/efeitos que ocorrem num mas não em dois processos ao mesmo tempo. De forma a aproveitar as vantagens das 3 tecnologias numa perspectiva de apoio à decisão, as capacidades sinópticas, analíticas e de previsão devem ser todas incluídas. Por outro lado, quando três fontes de informação distintas demonstram o mesmo tipo de dinâmica em determinado processo, a fiabilidade da análise fica confirmada.

1.5. Estado da arte em modelação de ondas

Importância do estudo das Ondas

No âmbito deste relatório, o estudo das ondas justifica-se pela sua interferência na dinâmica de sedimentos. A ressuspensão de sedimentos induzida pelas ondas afecta a extinção de luz na coluna de água que pode ter um peso importante na produtividade primária – processo regulador da qualidade da água e base energética do ecossistema estuarino.

Evolução das Teorias de Ondas

As ondas (ou a superfície da água) tal como as observamos na natureza, variam espacialmente nas 3 dimensões e ao longo do tempo o que as torna num fenómeno complexo de modelar.

A complexidade associada à descrição das ondas obrigou a que se fizessem simplificações e suposições para poder estudar o fenómeno, aparecendo historicamente, primeiro, as teorias de ondas regulares e depois teorias de ondas irregulares.

Ao falar-se de ondas regulares assume-se que a superfície da água pode ser descrita a 2 dimensões (variando apenas no eixo xz (x - direcção de propagação, z - vertical)) por uma função sinusoidal regular (altura, período e comprimento de onda constante). Nas teorias de ondas irregulares ondas sucessivas podem ter alturas e períodos diferentes (CEM, 2002). Ver Figura 3.

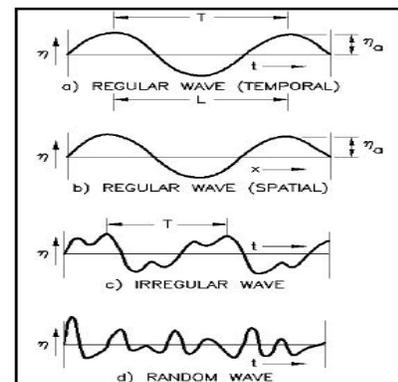


Figura 3 – Tipos de ondas Fonte: CEM (2002)

Dentro dos estudos de ondas regulares desenvolveram-se duas teorias: a teoria linear de ondas desenvolvida por Airy (1845) e a teoria não linear de ondas.

A teoria linear de ondas assume que a superfície de água é uma função sinusoidal perfeita e encontra aplicabilidade para zonas profundas e para ondas de baixa amplitude.

A teoria não linear explica o comportamento das ondas quando a amplitude é maior ou quando estas se aproximam de zonas menos profundas. Nestas situações a superfície desvia-se de uma sinusóide perfeita e o problema deixa de ser linear. Stokes (1847, 1880), Bretschneider (1960), Fenton (1985) são alguns dos autores que se destacam no desenvolvimento da teoria não linear de ondas.

A teoria “espectral” que é recentemente a mais utilizada nos muitos modelos de ondas, inclui-se na formulação de ondas irregulares e estabelece que a geração de ondas é melhor descrita como um fenómeno espectral. O conceito de espectro é baseado no trabalho de Fourier e permite representar uma superfície como a soma de senos e co-senos com diferentes frequências e orientados em todas as direcções (Figura 4). Esta aproximação é a que melhor consegue descrever a variabilidade espacial verificada na natureza. (CEM, 2002)

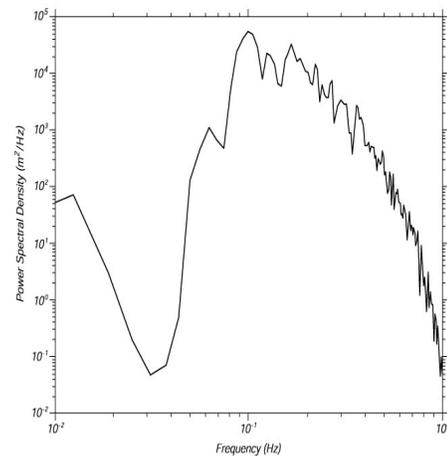


Figura 4 – Espectro de Onda: Densidade espectral (m^2/Hz) em função da frequência (Hz). Fonte: Stewart (2005).

Os estudos de Phillips (1958) e Miles (1957) sobre os processos de geração de ondas, principalmente as interacção do campo do vento com a superfície de água, e o estudo

de Pierson-Moskowitz (1964) sobre o espectro, criaram o caminho para o surgimento de modelos de ondas a que se chamaram os modelos de 1ª geração.

Os modelos de ondas de segunda geração (anos 70) desenvolveram-se a partir de estudos de Hasselmann et al., (1973) que após análise de dados do Joint North Sea Wave Project (JONSWAP) verificou que o espectro nunca se encontra completamente desenvolvido devido a interacções não lineares onda-onda. Estas interacções provocam a transferência de energia dentro do espectro. Um exemplo de um modelo de 2ª geração é o JONSWAP em que as referidas interacções onda-onda são introduzidas.

Os modelos actuais de terceira geração distinguem-se dos de 2ª pelo método de solução da interacção onda-onda, permitindo aos componentes (comprimentos de onda) propagar-se pela malha em várias direcções, crescendo com o vento ou decaindo com o tempo à medida que estabelecem interacções com as outras ondas. (Stewart, 1980).

Modelos difundidos actualmente

Alguns exemplos de modelos de 3ª geração são o WAM (Wave Model) e WW3 (Wave Watch 3), desenvolvidos na National Oceanic & Atmospheric Administration (NOAA) (WAMDIG 1988, Komen *et al.* 1994). O WW3 é um modelo global de ondas (é utilizado para fazer previsões em todo o globo) e pode ser utilizado para malhas até 10km e fora da zona costeira.

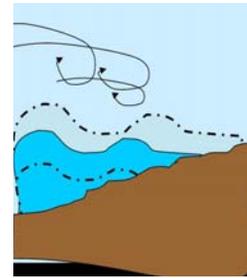
Outro modelo bastante difundido (o código também é “open source”) é o SWAN (Simulating Waves Nearshore) da Faculty of Civil Engineering and Geosciences, Delft University. Para além dos atributos em comum com o WW3 (como a geração da onda,

crescimento e decaimento desta devido ao vento, devida à fricção com o fundo ou a interacções entre ondas; fenómenos de difracção e refracção), apresenta ainda a propagação (e rebentamento) em zonas costeiras.

Um exemplo mais simples é o *STWAVE* (**ST**eady State spectral **WAVE**) da Coastal and Hydraulics Laboratory – US Army Engineer Research and Development Center. Este modelo simula a transformação das ondas (parâmetros de onda) desde a zona “off-shore” até as zonas junto à costa. É muito utilizado para estudar o comportamento das ondas na vizinhança de estruturas portuárias.

O Modelo utilizado neste estudo

O modelo utilizado permite estimar parâmetros de onda em função da profundidade e do Fetch (factores que foram considerados preponderantes tendo em conta a morfologia do Estuário do Tejo).



O Fetch é fundamental para calcular a geração de ondas sendo uma das componentes dos modelos descritos anteriormente. O modelo deste estudo não é um modelo completo de ondas pois não é considerada a refracção e difracção da onda e a discussão sobre esta limitação será feita no final.

O modelo utilizado será descrito no próximo ponto e posteriormente apresentados os resultados da sua aplicação para o Estuário do Tejo.

2. O Modelo de Geração de Ondas

O modelo de ondas é um “upgrade” ao sistema de modelação MOHID que pretende constituir uma ferramenta integradora dos 3 processos referidos anteriormente (modelos, dados de campo e detecção remota), com vista ao apoio à decisão em matéria de qualidade da água.

Neste capítulo será feita uma perspectiva histórica do enquadramento do estudo, é explicado o modelo de ondas, seus princípios, integração no MOHID e o processo de calibração.

2.0. Enquadramento na evolução do MOHID e no grupo MARETEC

A necessidade de desenvolvimento de ferramentas de modelação com capacidade para simular o comportamento de sistemas aquáticos, levou ao desenvolvimento do MOHID, em 1985. Por esta altura era um modelo de maré com 2 dimensões espaciais (Neves, 1985) tendo sido sucessivamente desenvolvido – integração da 3ª dimensão espacial, do método dos volumes finitos, etc. (Santos, 1995).

O modelo teve um grande desenvolvimento na sua componente hidrodinâmica (e.g. cálculo dos campos de velocidades e turbulência, fluxos e níveis de água), o que permitiu o acoplamento de um modelo de transporte a que se associaram as propriedades aquáticas (e.g. salinidade, temperatura, densidade, sólidos em suspensão). (Cancino e Neves, 1999).

A componente de qualidade da água foi desenvolvida gradualmente ao serem estudados diferentes processos: Miranda, (1999) introduziu a atenuação de luz pelo fitoplâncton; Pina, (2001) demonstrou a necessidade de considerar os sedimentos na extinção de luz; Saraiva, (2004) introduziu o papel das macro-algas na qualidade da água. O MOHID tornou-se assim uma ferramenta aplicável a quase todo o tipo de

corpos aquáticos e capaz de simular os principais factores ambientais influentes na qualidade da água, cimentando a posição do grupo MARETEC no apoio à gestão dos sistemas aquáticos.

A inclusão de um modelo de transporte de contaminantes, tendo em conta as fases dissolvida e adsorvida das propriedades (EUROSSAM, 2000) e a sua integração com um módulo de sedimentos (incluindo processos de consolidação e transporte de solutos - Fernandes, 2005) permitiu alargar ainda mais o âmbito de aplicação do MOHID.

A componente de ondas foi explorada no âmbito do estudo já referido de Pina, (2001). Este estudo introduziu o efeito das ondas na ressuspensão de sedimentos, utilizando a teoria linear de ondas para determinar a velocidade orbital (e consequente tensão de corte devida às ondas) junto ao fundo.

Este modelo foi o primeiro passo para o estudo do efeito das ondas no Estuário do Tejo e a altura e período de ondas eram dados de entrada constantes no tempo (valores para todo o estuário ou inicialização por caixas).

Este estudo mostrou que as ondas (introdução no modelo de valores de altura e período de onda típicos do estuário) tinham um efeito na ressuspensão e aumento das concentrações de sedimentos na coluna de água, transmitindo a sua influência para a extinção de luz e afectando a produção primária.

No entanto, a introdução de valores constantes de altura e período de onda não considerava o efeito do vento e da profundidade. Tornava-se fulcral verificar a evolução dos sedimentos em suspensão com a direcção e intensidade do vento e perceber se para zonas de baixa profundidade (alturas de onda mais pequenas), as tensões de corte geradas seriam suficientes (e em que condições) para ressuspender

sedimentos ou não. A tentativa de encontrar resposta a estas questões motivou o presente estudo.

MOHID Water actualmente

O sistema de modelação MOHID está escrito, com algumas excepções, em linguagem ANSI FORTRAN 95, numa programação orientada por objectos (Fernandes e Braunschweig, 2004). No MOHID Water (a componente de corpos de água do MOHID), existem 3 compartimentos: atmosfera, água e sedimento. A comunicação entre estes 3 compartimentos faz-se pelas interfaces. Cada módulo (e.g. Hydrodynamic, Waves, GOTM..., ver Figura 5) tem a sua informação encapsulada, ou seja, só as rotinas desse módulo podem alterar informação do módulo.

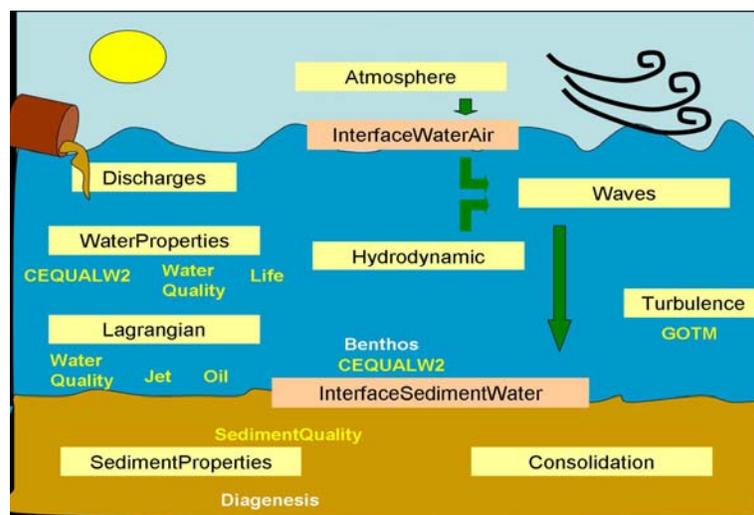


Figura 5 – Estrutura de Módulos do MOHID Water

A estrutura de módulos facilita o “up-grade” destes e a incorporação de novas formulações dentro dos módulos.

O módulo Waves (onde foi implementado o modelo de geração de ondas), foi criado para introduzir o efeito das ondas na ressuspensão de sedimentos e na extinção de luz (Pina, 2001). Este módulo recebe da interface com a atmosfera, os dados necessários

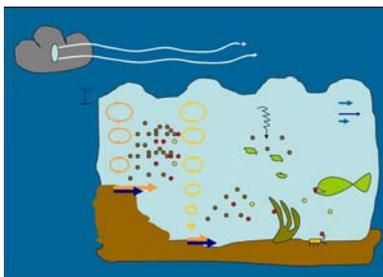
para o cálculo das tensões de radiação, altura, período e direcção da onda. Com a altura e período de onda é calculada a velocidade orbital no fundo (velocidade gerada pelas ondas).

O módulo InterfaceSedimentWater lê a velocidade orbital calculada no módulo Waves é utiliza-a para calcular a tensão de corte (força tangencial de fricção proporcional ao quadrado da velocidade orbital) no fundo devida às ondas. Esta tensão é somada à tensão de corte devida às correntes obtendo-se a tensão de corte resultante no fundo.

Se esta tensão resultante for superior à tensão crítica de erosão do fundo (τ_{CE}), então é originado um fluxo de sedimentos para a coluna de água; se for inferior à tensão crítica de deposição (τ_{CD}) origina um fluxo no sentido inverso, da coluna de água para o fundo. Entre estes dois valores admite-se que os dois processos ocorrem ao mesmo tempo e portanto o balanço é nulo.

2.1. Princípios do Modelo de Geração de Ondas

O vento gera tensões na interface água-atmosfera enrugando-a e produzindo ondas.



As ondas, por sua vez, geram movimentos orbitais (rotacionais) cuja intensidade decai com a profundidade. Estes movimentos ao atingirem o fundo geram fricções produzindo tensões de corte (devidas às ondas). Estas tensões de corte somadas às tensões de corte devidas às correntes, podem gerar tensões resultantes suficientes para ressuspender os sedimentos do fundo. A primeira parte deste processo, a geração de ondas, é o objecto deste estudo.

Pretendeu-se adaptar ao MOHID um modelo que a partir de dados de vento (facilmente acessíveis) calcule parâmetros de geração de ondas com sensibilidade para a profundidade, intensidade e direcção do vento.

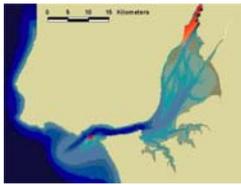


Figura 6 – Morfologia do Estuário do Tejo. Fonte: MOHID.

Devido à forma do canal de entrada do Estuário do Tejo (Figura 6), as ondas do oceano ficam impedidas de entrar no estuário e as ondas existentes têm origem local (Freire, 1999). Ou seja, não existe propagação de ondas do exterior para o interior do estuário que é uma das imposições do modelo.

O modelo restringe-se ainda à geração de ondas por parte do vento e não é contemplada a propagação (difracção, refracção, etc.) dentro da zona de estudo. No entanto, a propagação é tida em consideração implicitamente pelo *Fetch*.

Idealmente a área de estudo deve restringir-se às zonas sem influência de ondas do exterior e em que as distâncias de *Fetch* (nas direcções cardeais principais) não atinjam fronteiras abertas – devido à dificuldade de definição de condições fronteira para o *Fetch*.

Para cada instante, cada célula da malha apresenta a onda gerada em termos de altura de onda (em metros) e período da onda (em segundos) - ver Figura 7. Estes dois componentes são depois utilizados pelo MOHID para calcular a velocidade orbital no fundo e a consequente tensão de corte devida às ondas.

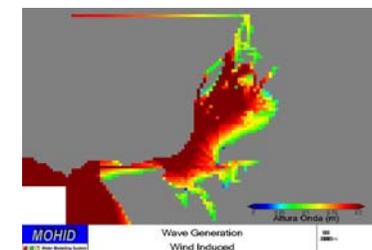


Figura 7 – Exemplo de resultados de altura de onda para o Estuário do Tejo.

2.2. Equações

2.2.1 – Cálculo da Altura e Período de onda significativos

As equações do modelo que relacionam a altura e período de onda com a profundidade, intensidade e direcção do vento são as utilizadas pelo modelo de qualidade da água CE-QUAL-W2 (Cole, 2003) e que foram desenvolvidas por Seymour, (1977) e Kang, (1982): Equação 1 e Equação 2.

Estas equações pretendem prever parâmetros da onda à saída da zona de geração. A duração do vento não é referida uma vez que é admitido que se atinge o estado de completo desenvolvimento das ondas.

Equação 1 – Altura de onda significativa (Kang, 1982; Seymour, 1977)

$$H_s = \frac{W^2}{g} 0.283 \tanh \left[0.53 \left(\frac{gH}{W^2} \right)^{0.75} \right] \tanh \left[\frac{0.0125 \left(\frac{gF}{W^2} \right)^{0.42}}{\tanh \left[0.53 \left(\frac{gH}{W^2} \right)^{0.75} \right]} \right]$$

Equação 2 – Período de onda significativo (Kang, 1982; Seymour, 1977)

$$T_s = \frac{2\pi W}{g} 1.2 \tanh \left[0.833 \left(\frac{gH}{W^2} \right)^{0.375} \right] \tanh \left[\frac{0.077 \left(\frac{gF}{W^2} \right)^{0.25}}{\tanh \left[0.833 \left(\frac{gH}{W^2} \right)^{0.375} \right]} \right]$$

W é o módulo da velocidade do vento em m/s, H a profundidade em metros, e F o *Fetch* em metros.

O *Fetch* é o comprimento de acção do vento e num determinado ponto pode ser visto como o comprimento da linha imaginária à superfície da água (na direcção do vento), que vai desde a zona onde se começa a fazer sentir o vento até esse ponto. A direcção do vento é assim utilizada para calcular o comprimento de acção do vento ou *Fetch*.

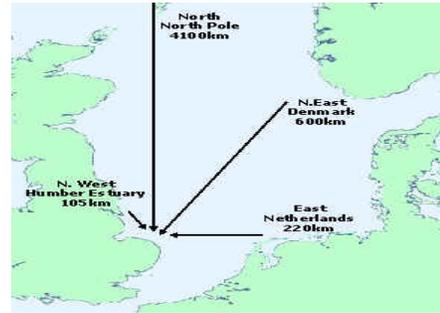
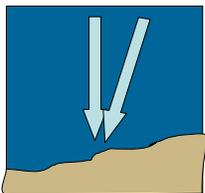


Figura 8 – Distâncias de Fetch no Mar do Norte. Fonte: JFK School

O módulo da velocidade do vento é uma entrada do modelo e a profundidade é calculada em cada instante e para cada célula, no módulo de hidrodinâmica do MOHID. O cálculo do *Fetch* é exemplificado no próximo ponto.

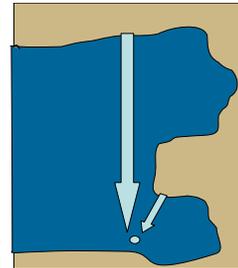
A função tangente hiperbólica na equação 1 e 2 (que rapidamente tende para o valor 1), pretende simular o efeito em que para profundidades elevadas, as ondas deixam de sentir o fundo e evitar que a altura e período de onda aumentem indefinidamente com o aumento do *Fetch*.

2.2.2 – Cálculo do *Fetch*



Para zonas em que o *Fetch* não é restringido (zonas de mar aberto por exemplo) existe um *Fetch* dominante e pequenas mudanças na direcção do vento não alteram significativamente o comprimento do *Fetch* ou a direcção da onda gerada.

No entanto, isto já não acontece para direcções do vento paralelas à costa e principalmente para lagos, baías ou estuários. Uma pequena variação no ângulo do vento pode originar diferenças significativas no comprimento de acção do vento (*Fetch*).



Nestas zonas não existe uma direcção predominante para o *Fetch*.

Torna-se pois necessário ter em conta a morfologia do local e para tal são consideradas várias direcções (para além da direcção do vento) e são dados pesos a cada uma das direcções – **Fetch Efectivo**. Isto de modo que para uma mesma direcção do vento, um ponto mais descoberto nas direcções próximas da direcção do vento, tenha um valor de *Fetch* mais elevado que um ponto com obstáculos de terra nalgumas dessas direcções.

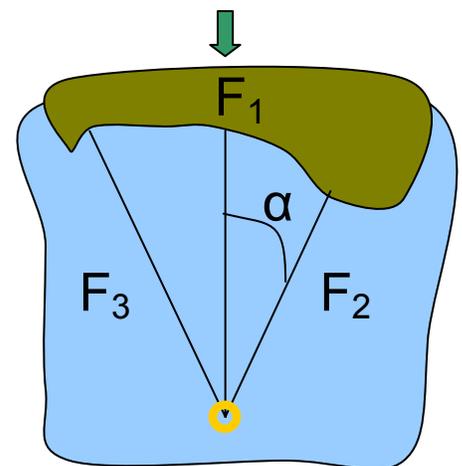
A equação mais geral para o *Fetch Efectivo* (F_e):

Equação 3 – Fetch Efectivo

$$F_e = \frac{\sum F_i \cdot \cos(\alpha_i)}{\sum \cos(\alpha_i)} \quad \text{Fonte: Rogala, 1997; Howes, 1997}$$

Em que: F_i = distância de **Fetch** na direcção i (m)

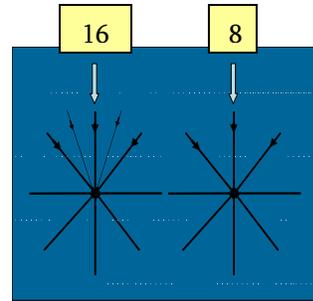
α_i = ângulo entre a direcção do vento e a direcção i ($^\circ$)



Na variante do modelo de geração de ondas do presente estudo, utilizam-se 3 ou 5 distâncias – **Equação 4** e **Equação 5** respectivamente – (consoante são escolhidas 8 ou 16 direcções cardeais pelo utilizador), *Fetch Efectivo Modificado* (F_m):

Equação 4 – Fetch efectivo modificado com 3 direcções

$$F_m = \frac{\cos(45^\circ).F_{45L} + \cos(0^\circ).F_o + \cos(45^\circ).F_{45R}}{\cos(45^\circ) + \cos(0^\circ) + \cos(45^\circ)}$$



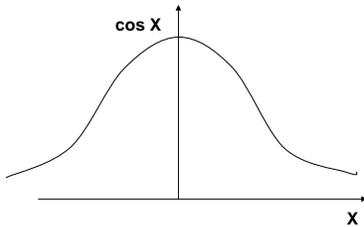
Equação 5 - Fetch efectivo modificado com 5 direcções

$$F_m = \frac{\cos(45^\circ).F_{45L} + \cos(22.5^\circ).F_{22.5L} + \cos(0^\circ).F_o + \cos(22.5^\circ).F_{22.5R} + \cos(45^\circ).F_{45R}}{\cos(45^\circ) + \cos(22.5^\circ) + \cos(0^\circ) + \cos(22.5^\circ) + \cos(45^\circ)}$$

Em que: F_{45L} e F_{22L} – distâncias até terra na direcção a 22,5° e 45° à esquerda da direcção do vento (m).

F_{45R} e F_{22R} – distâncias até terra na direcção a 22,5° e 45° à direita da direcção do vento (m).

F_0 = distância até terra na direcção do vento (m).



O peso dado a cada distância é baseado na função do co-seno, ou seja, peso igual a 1 para a direcção do vento e pesos cada vez menores quanto mais afastados forem os ângulos dessa direcção.

Para o cálculo do *Fetch* efectivo são portanto necessárias calcular distâncias para terra. Estas distâncias foram calculadas para o nível máximo de preia-mar no Estuário do Tejo para evitar a formação de “zonas de sombra” com menor valor de *Fetch* atrás de pequenas ilhas que se formam na vazante.

2.2.3 – Cálculo das distâncias para terra.

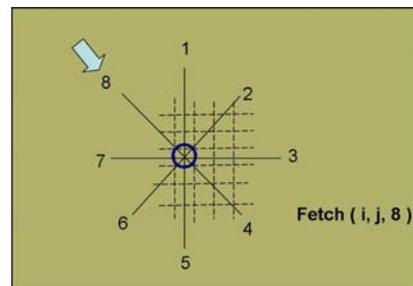
As distâncias são calculadas com um algoritmo que percorre a malha nas 8 ou 16 direcções até encontrar um ponto que seja terra ou o fim da malha.

2.3. Acoplamento ao MOHID

A forma de cálculo da altura e período de onda anteriores ao desenvolvimento deste estudo (em função unicamente da velocidade do vento) foi mantida. Numa simulação, a escolha da forma de cálculo é feita por uma palavra-chave no ficheiro de entrada das ondas. O número de direcções cardeais a utilizar (8 ou 16) também é introduzido por palavra-chave.

O esquema de funcionamento do novo modelo é o seguinte: antes de começar a simulação (fase de construção do MOHID), são calculadas as distâncias para terra para todas as células de água nas 8 ou 16 direcções cardeais. Estas distâncias são utilizadas para calcular o *Fetch* efectivo de cada célula, sempre para as 8 direcções cardeais principais. O *Fetch* é assim calculado apenas uma vez.

O *Fetch* efectivo é depois usado para calcular a altura e período de onda (pela Equação 1 e Equação 2 do presente relatório): para cada instante da simulação em cada célula é verificada qual o rumo do vento³, e assim o *Fetch* efectivo correspondente a essa direcção e a essa célula é lido na lista que foi guardada no início.



Para o cálculo da altura e período de onda é ainda necessário obter a profundidade das células para cada instante (lida no módulo Hydrodynamic) e a velocidade do vento³.

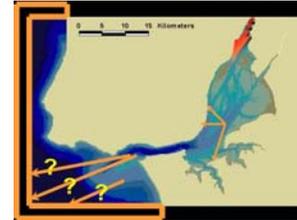
2.4. Condições Iniciais e Condições Fronteira

O modelo assume que as ondas existentes num ponto são função do *Fetch*, da profundidade e da velocidade do vento. Como a propagação não é simulada (está

³ Lido a partir do módulo InterfaceWaterAir que por sua vez leu o ficheiro de dados atmosféricos.

implícita no *Fetch*), não existe acumulação de energia e por conseguinte não há dependência no cálculo de uns instantes para os seguintes. Assim, não são necessárias condições iniciais para a altura e período de onda.

A ocorrência de fronteiras abertas deve ser limitada pois não existem dados para precisar distâncias de *Fetch* que atingem essas fronteiras do exterior. Uma área de estudo deve ser definida em que para todas as células dessa área, as distâncias de *Fetch* apenas atinjam terra (e não fronteiras abertas) nas 8 ou 16 direcções cardeais.



2.5. Calibração / Validação

Uma vez que para o Estuário do Tejo não existem dados de campo sistematizados de altura e período de onda, o modelo de ondas foi testado num estuário na Holanda (Oosterschelde) onde foram disponibilizadas medidas de campo.

A calibração do modelo será apresentada em duas partes. Na primeira serão apresentados resultados para o estuário na Holanda (Oosterschelde) e na segunda parte para o Estuário do Tejo.

Oosterschelde

O projecto de Investigação MaBenE (Managing Benthic Ecosystems) financiado pela União Europeia em que o grupo de investigação MARETEC é parceiro, permitiu o acesso aos dados de vento e aos resultados de altura e períodos de onda registados numa bóia para este estuário.

O estuário de Oosterschelde situa-se na zona sudoeste da Holanda e o seu limite de jusante é um dique de protecção. Apesar das comportas serem fechadas apenas em caso de tempestade e existir ligação com o mar do Norte, a propagação de ondas para o interior do estuário é limitada pelo dique.



Figura 9 – Localização do Estuário Oosterschelde

Dados

Foram utilizados os dados de vento (intensidade e rumo – Anexo II figura 10) da estação meteorológica Stavenisse e os resultados de altura e período de onda de uma bóia da localização Mussel (M1) – na Figura 10.

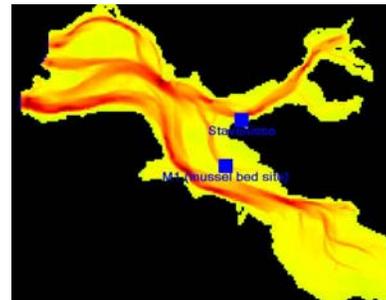


Figura 10 – Localização das estações utilizadas para as séries temporais

Foi feita uma simulação para o período em que existiam dados da bóia (Maio de 2004).. O modelo hidrodinâmico encontra-se implementado e validado para este estuário no âmbito do projecto MaBenE.

Mapas

É confirmada a sensibilidade do modelo para as variações de profundidade e os valores de altura de onda chegam a ultrapassar os 40cm quando ocorrem intensidades elevadas do vento (Figura 11).

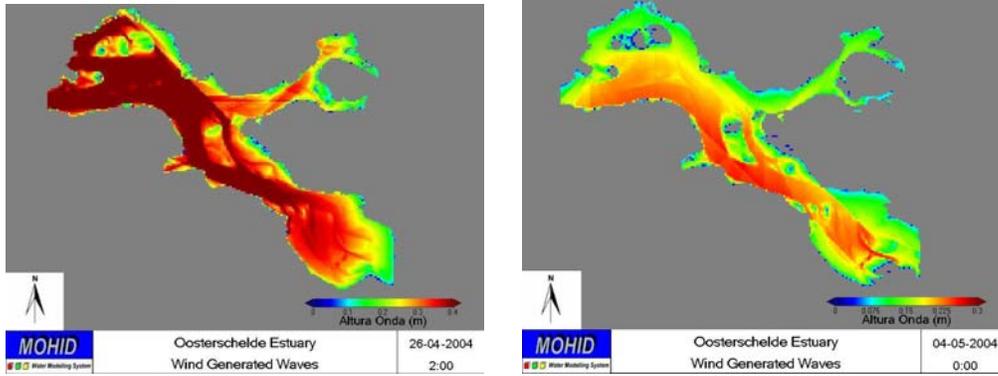


Figura 11 – Alturas de onda para dois instantes diferentes. A escala de cores é diferente nas duas figuras – 0-40 cm na primeira e 0-30cm na segunda.

Os resultados de período de onda, têm uma distribuição semelhante à distribuição de alturas e são apresentados exemplos no Anexo II, figura 9.

Séries Temporais

Foi definida na simulação uma série temporal com a mesma localização da bóia de forma a comparar resultados. O modelo foi parametrizado utilizando um factor multiplicativo de 0.6 na altura de onda ($Altura_Onda_Final = Altura_Onda_EquaçãoOriginal * 0.6$). Os resultados são mostrados na Figura 12.

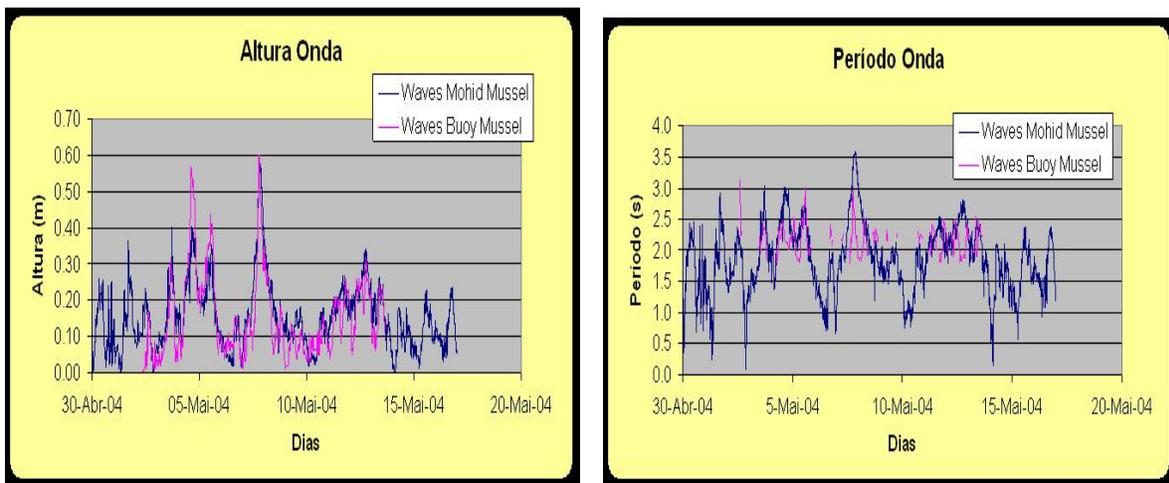


Figura 12 – Comparação dos resultados de altura e período de onda do modelo com as medições na Bóia na localização Mussel.

As medições de períodos de onda, correspondentes a alturas de onda inferiores a 10cm, foram retiradas pela entidade que cedeu os dados (provavelmente devido aos erros de medição associados).

A qualidade do ajuste dos resultados do modelo aos dados de campo foi testada pela correlação (coeficiente R^2) e pelo “goodness-to-fit” (cálculo do desvio do erro quadrático médio (Root Mean Squared Error (RMSE)) e do erro absoluto médio (Mean Absolute Error (MAE))). Ver no Anexo VII as equações destes parâmetros.

Tabela 1 – Parâmetros estatísticos do ajuste dos resultados do modelo aos dados da bóia

	R^2 (%)	Média dados Bóia (m ou s)	RMSE (m ou s)	MAE (m ou s)
Altura de Onda	69,97	0,16 m	<0.01 m	0.05 m
Período de Onda	0,02	2,18 s	0,02 s	0,20 s

Existe uma boa correlação entre as medidas da bóia e os resultados do modelo no que diz respeito à altura de onda e o erro absoluto médio representa apenas 30% do valor médio das alturas de onda medidas.

Quanto ao período de onda, a correlação não é tão boa, mas no entanto, os erros associados não atingem proporção elevada.

Os períodos de onda calculados pelo MOHID, correspondentes aos mesmos instantes dos picos mais elevados de altura de onda (que são os que têm maior efeito na ressuspensão de sedimentos), parecem ajustar-se bem aos valores medidos na bóia.

As correlações são mostradas no anexo II, figura 11 e 12.

Estuário do Tejo

Para o Estuário do Tejo a componente de ondas não está muito desenvolvida o que pode ser causa ou consequência da falta de dados. O único registo de medidas de campo de alturas e período de ondas foi encontrado num estudo do LNEC (Laboratório Nacional de Engenharia Civil) – Freire, (1999). Este estudo pretendia avaliar a capacidade das ondas geradas pelo vento de ressuspender e colocar em movimento areias em 3 praias da Margem Sul do Estuário do Tejo.

Freire, (1999) utilizou para o cálculo das alturas e períodos de onda um modelo conhecido com SMB (Sverdrup-Munk-Bretschneider) – que é um modelo com as mesmas bases do descrito no presente relatório. Foi ainda feita recolha de dados *in situ*. Os dados meteorológicos utilizados foram as séries temporais (1973-1985) da estação Lisboa-Portela (localização na Figura 13 com uma estrela).

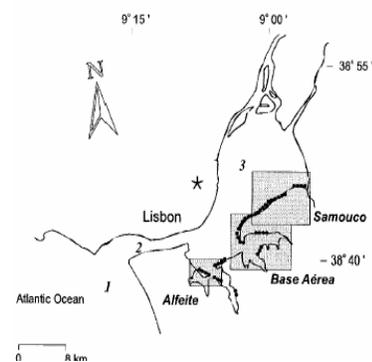


Figura 13 – Localização das zonas de estudo de Freire, (1999). Fonte: Freire (1999).

O estudo de Freire foi feito para 3 zonas (na figura anterior): Alfeite, Base Aérea e Samouco e foram utilizadas as direcções do vento com maior *Fetch* em cada zona.

Na Figura 14 é mostrado a comparação dos resultados do modelo do LNEC com os dados de campo (medidas no dia 17/6/97 na praia de Alfeite). Os resultados do modelo do LNEC apresentados são os valores de altura e período de onda para diferentes velocidades e direcções do vento nas 3 áreas de estudo.

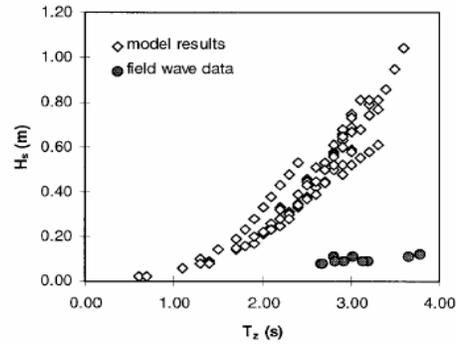


Figura 14 – Comparação de resultados do modelo SMB (LNEC) e de dados de campo. Altura de onda versus Período de onda. Fonte: (Freire, 1999)

Para comparação de resultados do MOHID com os do modelo do LNEC, foi feita uma simulação de 15 dias para a zona de Alfeite e utilizada a profundidade média no local (dada pela previsão de níveis). Na Figura 15 são mostrados os resultados de altura e período de onda do MOHID para velocidades do vento de 1 a 15m/s e para a direcção Norte e Nordeste.

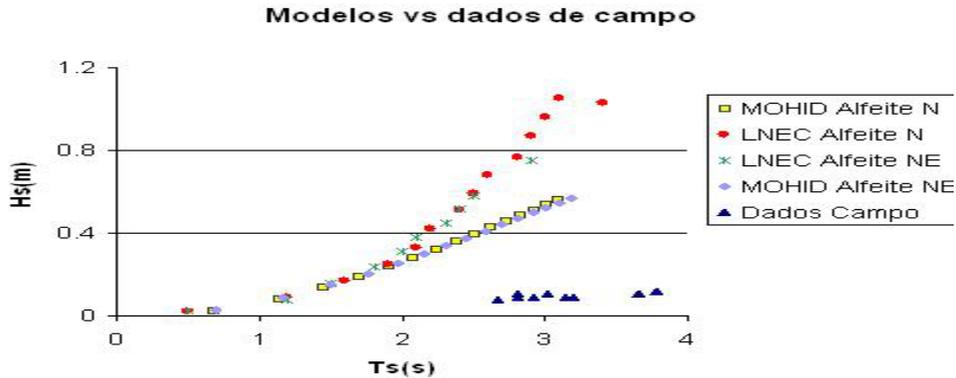


Figura 15 – Relação Altura de Onda – Período de Onda na simulação MOHID para a zona de Alfeite. Fonte dados LNEC: Freire (2003).

Pela Figura 15, os modelos parecem sobre-estimar os dados de campo e os resultados do MOHID parecem aproximar-se mais dos dados de campo do que os resultados do modelo do LNEC. No entanto é preciso relembrar que os dados de campo são de uma única campanha, submetida às condições desse dia.

Foi testado o comportamento do modelo de ondas introduzindo um parâmetro na altura de onda inferior à unidade ($\text{Altura_Onda_Final} = \text{Altura_Onda_EquaçãoOriginal} * \text{Parâmetro}$) e o resultado é o evidenciado na Figura 16 em que se apresenta o modelo sem a influência do parâmetro (ou parâmetro = 1) e com um parâmetro de 0.5.

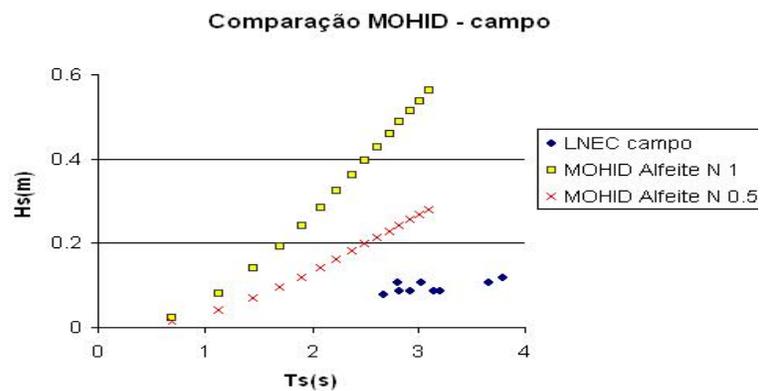


Figura 16 – Comparação de resultados para diferentes parâmetros de altura de onda com os dados de campo.

Conclusões

Os resultados do modelo de ondas acoplado ao MOHID parecem obter resultados muito semelhantes aos obtidos pelo modelo do LNEC.

Uma vez que os dados de campo disponíveis são de um único período de medição (as primeiras medições de ondas no Estuário do Tejo segundo Freire, 1999), não é possível proceder à calibração e validação do modelo de ondas para o Estuário do Tejo.

A estratégia seguida foi a de testar a sensibilidade dos resultados dos sedimentos à variação do parâmetro de altura de onda (parâmetro multiplicativo como já foi referido).

3. Resultados

Os resultados serão apresentados em 3 partes. Antes destas será feita uma pequena introdução sobre as bases do modelo integrado utilizado.

Na primeira parte serão mostrados os processos físicos que o modelo de ondas introduz. Na segunda e terceira parte tenta-se verificar se estes processos permitem uma melhor descrição da dinâmica de sedimentos por comparação com os dados disponíveis – dados de campo (na segunda parte deste capítulo) e imagens de satélite (terceira parte).

Como já foi referido, será feita uma análise de sensibilidade dos resultados do modelo à variação do parâmetro de altura de onda.

Bases do modelo (batimetria, hidrodinâmica e sedimentos)

Foi utilizada uma **batimetria** do Estuário do Tejo com uma malha regular de passo espacial variável (dentro do estuário 500x500m) (Figura 17). A coordenada vertical é do tipo sigma.

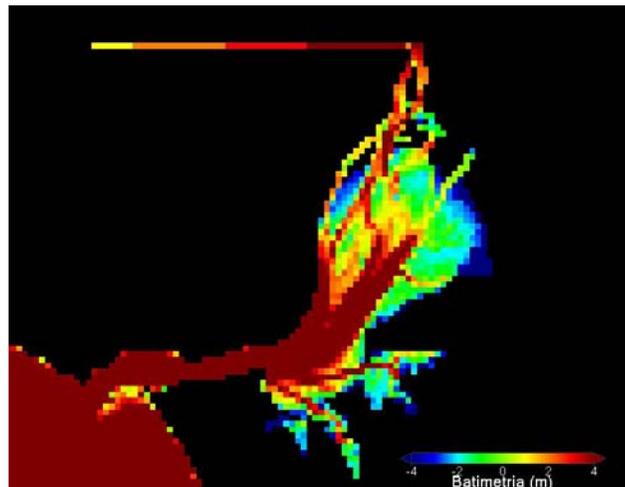


Figura 17 – Batimetria utilizada para o estudo. A azul as zonas de menor profundidade.

A componente **hidrodinâmica** está implementada e validada no estuário por trabalhos desenvolvidos no projecto do Modelo Operacional do Estuário do Tejo⁴ e em outras teses de mestrado e doutoramento como Leitão, (2003).

A dinâmica de **sedimentos** do estuário é simulada através de uma “fluff layer” ou camada de sedimentos coesivos que é erodida quando as tensões de corte no fundo são demasiado elevadas (originando um fluxo para a coluna de água) e que deposita quando as tensões são baixas (fluxo da coluna de água para o sedimento).

Foram feitas simulações com parâmetros constantes no tempo e espaço como a velocidade de queda, tensões de corte críticas de erosão e deposição e taxa de erosão.

Uma descrição mais aprofundada do modelo de sedimentos encontra-se no Anexo V.

Condições fronteira

A maré foi imposta na fronteira aberta (oceânica), baseada nas componentes harmónicas obtidas por um modelo de maré (Le Provost et al, 1998).

Foram considerados caudais constantes do rio Tejo de 290m³/s (média anual) e 39m³/s para o Sorraia. As descargas de sedimentos do rio Tejo e Sorraia foram de 80 mg/l.

Os efeitos baroclínicos não foram considerados e os dados de vento são utilizados como entrada do modelo de ondas (Ver dados de vento no Anexo I, figuras 1 e 2).

Condições iniciais

O modelo foi inicializado com matrizes de salinidade, concentrações de sedimento no fundo e na coluna de água, retirados do Modelo Operacional para o dia referente ao início da simulação.

⁴ O Modelo Operacional para o Tejo e Costa do Estoril desenvolvido na secção de Ambiente e Energia é um modelo que produz simulações em tempo real e previsões das condições atmosféricas e aquáticas numa área que abrange o Estuário do Tejo.

As simulações foram efectuadas executando primeiro um “warm-up” de 15 dias antes dos períodos de estudo, de modo a que a hidrodinâmica e os processos estabilizassem durante um ciclo completo de maré viva – maré morta.

3.1. Processos introduzidos pelo modelo de geração de Ondas

Pretende-se neste ponto mostrar as alterações que o modelo de ondas provoca na representação da dinâmica de sedimentos (em termos de tensões de corte no fundo, concentração de sedimentos em suspensão e no fundo) em relação ao cenário sem o modelo de ondas. Dois parâmetros na altura de onda são utilizados – 0.5 e 1.0 ($\text{Altura_Onda_Final} = \text{Parâmetro} * \text{Altura_Onda_EquaçãoOriginal}$). Para que a apresentação se torne mais clara serão apresentados os mapas dos resultados com parâmetro = 1 e no final da apresentação das séries temporais discute-se a comparação com o parâmetro = 0.5.

Mapas

Foi escolhido o dia 20 de Julho de 2004 para apresentar resultados por ter associado um acontecimento de ressuspensão de sedimentos intenso (no modelo), cujas causas serão discutidas adiante e por existir uma boa imagem de satélite para esse dia.

A distribuição das **alturas de onda** (Figura 18) mostra a ocorrência de um pico por volta das 15-16h da tarde. Estes picos de altura coincidem com os picos de velocidade do vento para este dia – vento Nordeste (ver Anexo I, figura 1).

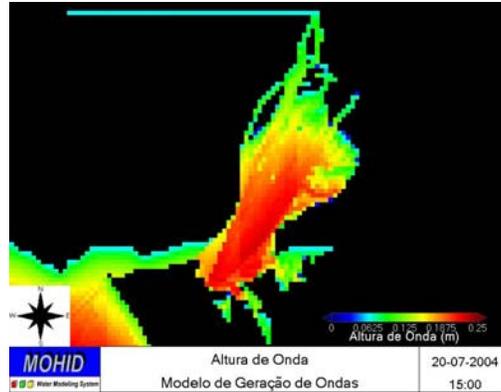


Figura 18 – Distribuição de alturas de onda para as 15h do dia 20/7/2004. A escala de cores está referida do zero aos 30cm. Instante próximo da preia-mar.

Este pico de alturas originou um incremento de tensões de corte no fundo em algumas zonas baixas (Figura 19). O incremento só é visível nestas zonas e apenas durante os picos de altura de onda (15-16h). Estas zonas coincidem com as zonas de ressuspensão que se verificam na Figura 20.

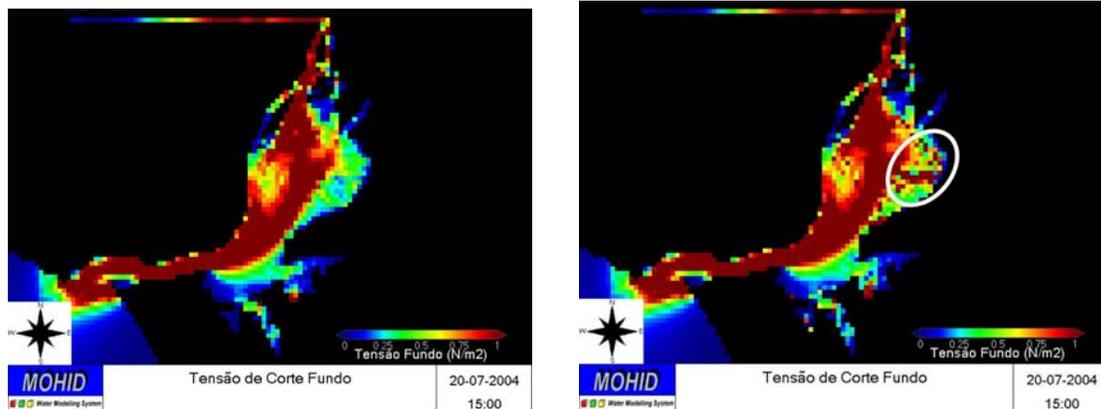


Figura 19 – Distribuição de tensões de corte no fundo para o instante das 15h do dia 20/7/2004. À esquerda a simulação sem ondas e à direita com ondas. A escala de cores está referida do zero ao 1 N/m²

Um aspecto a realçar é a importância da profundidade para a determinação ou não dos incrementos de tensão de corte no fundo devido às ondas. Assim, as zonas de maior

incremento não são directamente as zonas com maior altura de onda mas sim resultam de um compromisso entre altura de onda elevada e profundidades baixas – de modo a que os movimentos orbitais gerados pelas ondas atinjam o fundo com intensidade suficiente.

Um episódio de vento forte de curta duração só consegue produzir ressuspensão de sedimentos nas zonas baixas se o nível da coluna de água descer até um certo nível crítico durante esse acontecimento (que depende da altura e período de onda gerada). Esta complexidade e não estacionaridade de processos tornam necessária a utilização de modelos matemáticos para descrever a variabilidade do fenómeno.

A ressuspensão de sedimentos pode ocorrer se a resultante das tensões de corte no fundo (com uma componente devida às ondas) for superior à tensão de resistência do sedimento (tensão crítica de erosão). Isto acontece nesta simulação nos instantes por volta das 15-16h.

As concentrações de **sedimentos em suspensão** sofrem também um acréscimo nesta altura e diminuem gradualmente com o tempo. Na Figura 20, a “pluma” de sedimentos originada continuou visível algumas horas depois devido ao transporte e ao efeito contínuo do vento.

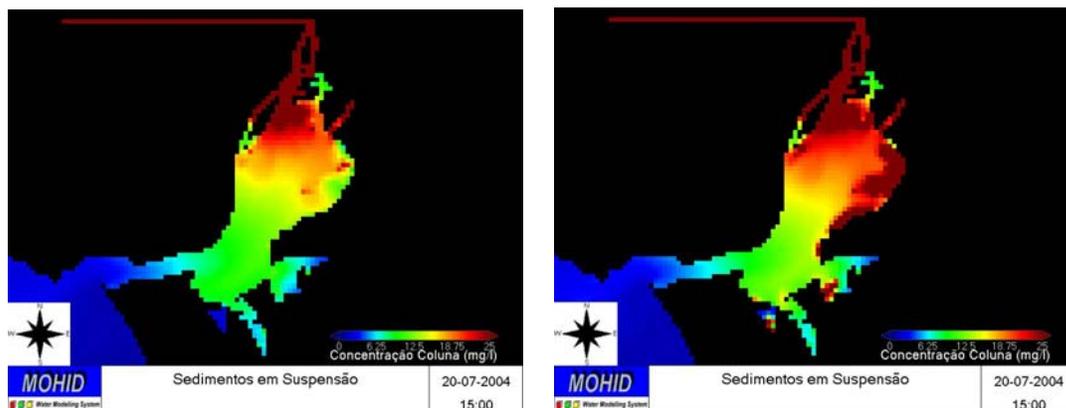


Figura 20 – Distribuição de concentrações em suspensão para o instante das 15h do dia 20/7/2004. À esquerda a simulação sem ondas e à direita com ondas. A escala de cores está referida do zero aos 25 mg/l.

Para a distribuição dos **sedimentos de fundo**, a simulação com ondas (em relação à simulação sem ondas), apresenta uma menor concentração na zona de baixa profundidade, junto a Alcochete (Figura 21). Isto acontece devido aos contínuos acontecimentos de ressuspensão que aí ocorrem.

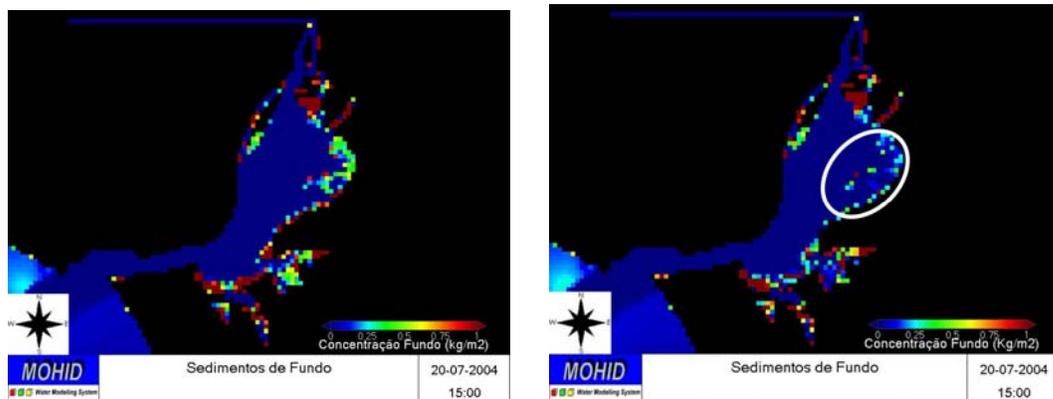


Figura 21 – Distribuição de tensões de corte no fundo para o instante das 15h do dia 20/7/2004. À esquerda a simulação sem ondas e à direita com ondas. A escala de cores está referida do zero ao 1 N/m².

Após o acontecimento de ressuspensão, os sedimentos que passaram para a coluna de água voltam a depositar nas zonas próximas (Figura 22).

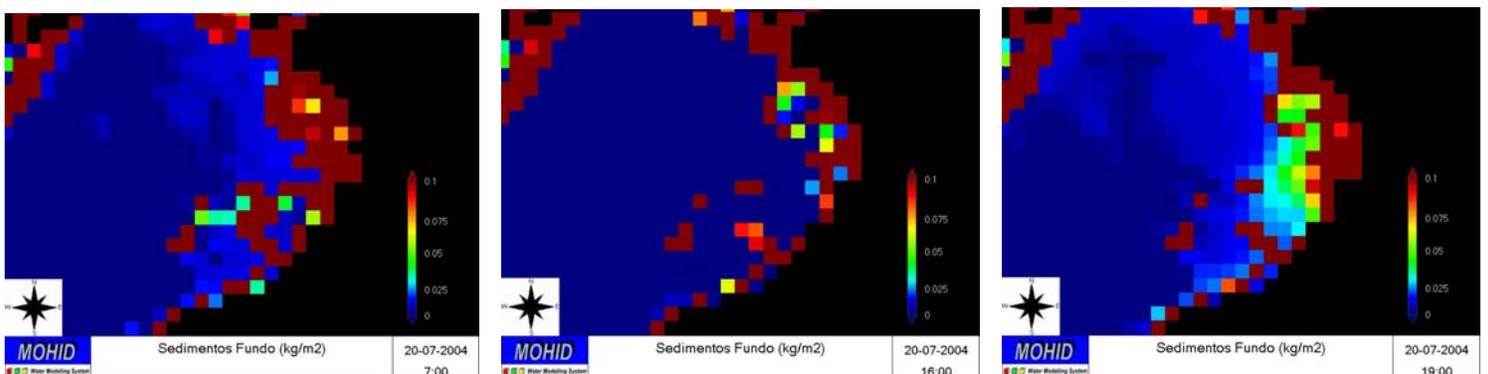


Figura 22 – Concentração de sedimentos do fundo na zona de ressuspensão antes do acontecimento de ressuspensão (esquerda), durante (meio) e depois (direita). Instantes próximos da preia-mar.

Séries Temporais

De forma a fazer um zoom a uma determinada zona e analisar com maior rigor a evolução temporal das propriedades, criaram-se séries temporais.

Das 13 estações criadas para gerar séries temporais foram escolhidas duas para apresentar resultados: uma numa zona de baixa profundidade (estação 13) e outra situada no canal principal (estação 1). Ver Figura 23.

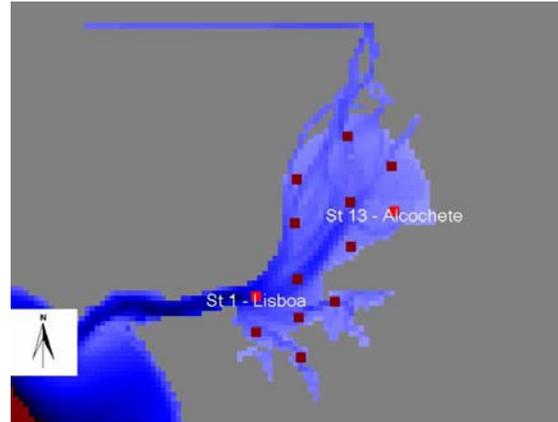


Figura 23 – Localização das estações utilizadas para as séries temporais

Para a estação 13 (situada na zona baixa, próxima da zona preferencial de ressuspensão) pode-se verificar pela Figura 25 e Figura 27, que as ondas produzem picos de tensão de corte no fundo que levam a episódios de ressuspensão que não ocorrem na simulação sem ondas.

Fica bem visível da Figura 24 até à Figura 27, a importância do nível para as ocorrências de ressuspensão: embora de 16 a 22 de Julho, as alturas de onda tenham picos de intensidade igual, apenas ocorreram 3 episódios de ressuspensão e com intensidades diferentes.

No Anexo III, da figura 17 à figura 20, são apresentado os resultados para a mesma estação noutra janela temporal (1 de Setembro a 12 de Outubro de 2004), em que dois acontecimentos com alturas de onda muito diferentes, o com menor altura de onda gera tensões de corte no fundo muito maiores pois o pico coincidiu com um nível de água inferior.

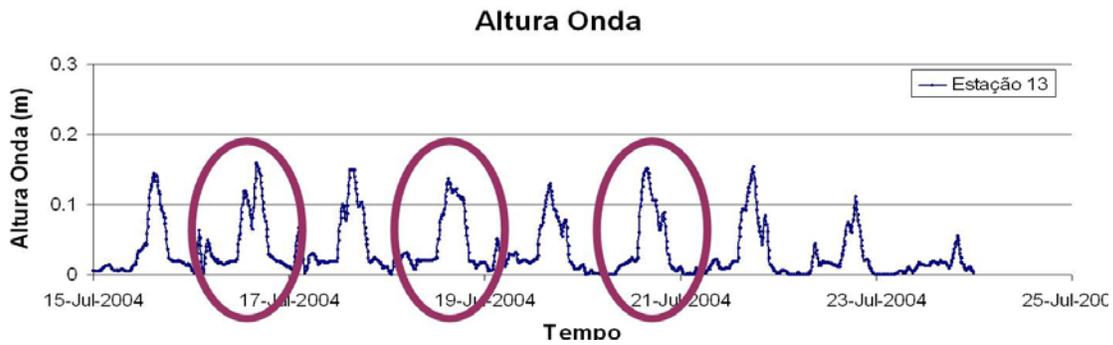


Figura 24 – Altura de Onda em função do tempo para a estação 13.

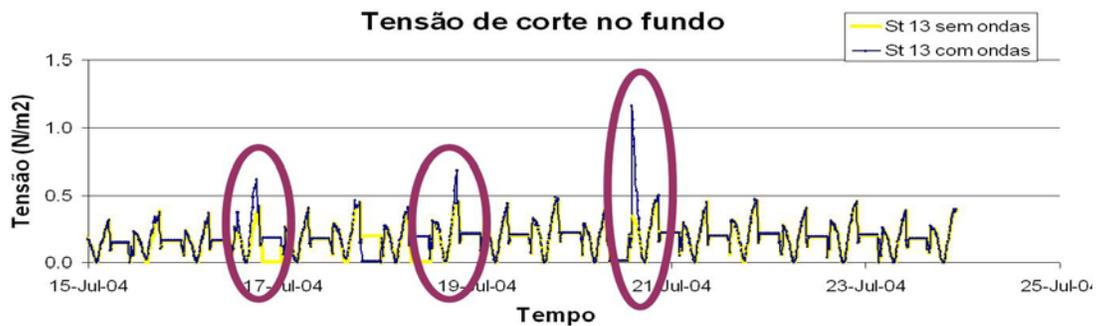


Figura 25 – Tensões de corte no fundo em função do tempo para a estação 13.

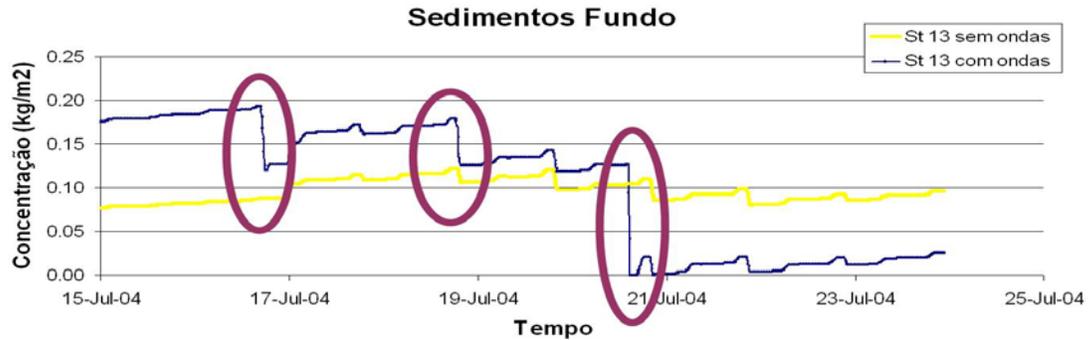


Figura 26 – Concentrações de sedimentos de fundo em função do tempo para a estação 13.

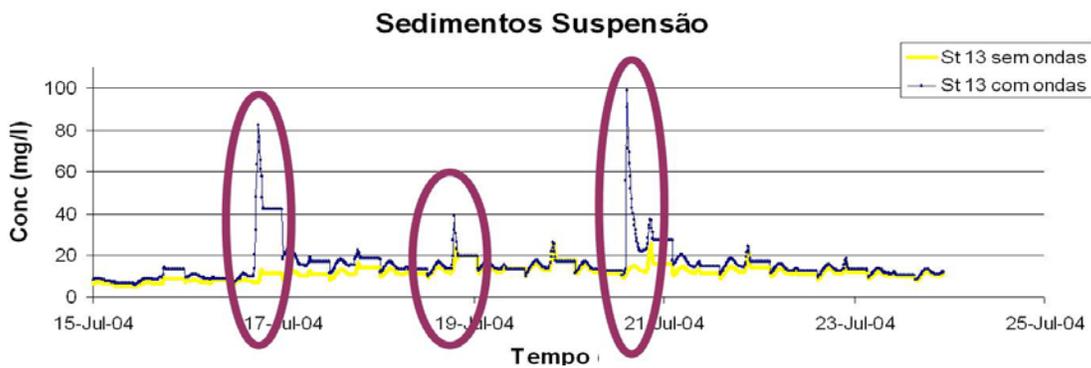


Figura 27 – Concentração de sedimentos em suspensão em função do tempo para a estação 13.

Para uma zona mais profunda (e.g. Estação 1 (ver Figura 23)), devido ao decaimento dos movimentos orbitais, estes atingem o fundo com menor intensidade e o acréscimo de tensões de corte (em relação à simulação sem ondas) é quase imperceptível. Assim, as diferenças nas concentrações de sedimentos na coluna de água e no fundo, entre a simulação com ondas e sem ondas, é muito pequena e devida ao transporte dos sedimentos das zonas de ressuspensão para o local (ver Anexo III, da figura 13 a figura 16).

A simulação apresentada da Figura 24 à Figura 27 compreende apenas um ciclo de maré viva-maré morta. Uma avaliação durante um período de simulação mais longo (de 1 de Setembro a 12 de Outubro) e para a mesma estação, mostra uma evolução sazonal em anti-fase, das concentrações de sedimentos em suspensão e de fundo, ou seja, quando os primeiros diminuem os segundos aumentam, devido à deposição. Ver Anexo III, da figura 19 à figura 20, para a série temporal da estação 13 durante este período de simulação.

Teste de sensibilidade

Ao comparar os resultados da simulação sem ondas com as simulações com ondas (com parâmetro = 0.5 e 1.0 na altura de onda) verifica-se pela análise dos mapas e de séries temporais o seguinte:

- Os resultados das simulações com o parâmetro 0.5 praticamente não se conseguem distinguir da simulação sem ondas (ver Figura 28).
- Os resultados das simulações com o parâmetro 1.0 foram descritos anteriormente.
- Foi ainda testado um parâmetro de 2.0 nas simulações e o resultado foi intensificar os picos de concentração em suspensão. No entanto, o desequilíbrio gerado (ao incrementar muito a erosão) causa a longo prazo picos de sedimentos em suspensão cada vez menos intensos porque a camada de fundo vai diminuindo. (ver Figura 29).

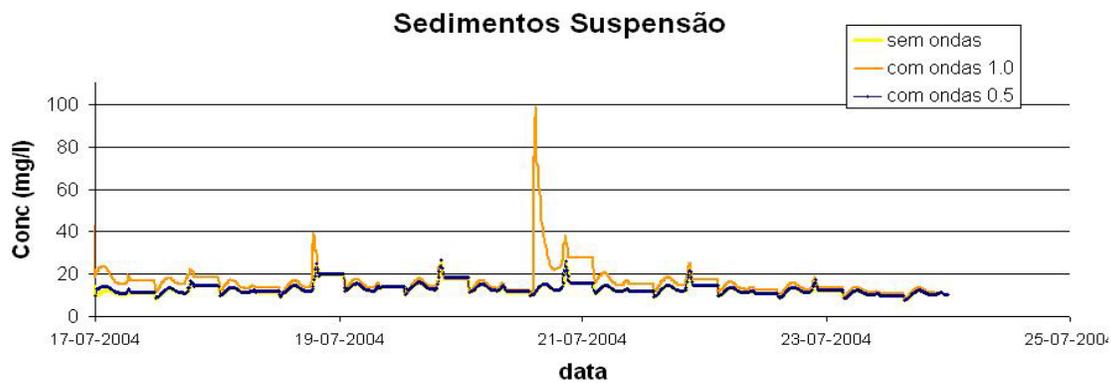


Figura 28 – Evolução das concentrações de sedimentos em suspensão na estação 13 para a simulação sem ondas e simulação com ondas com 2 parâmetros diferentes na altura de onda (0.5 e 1.0).

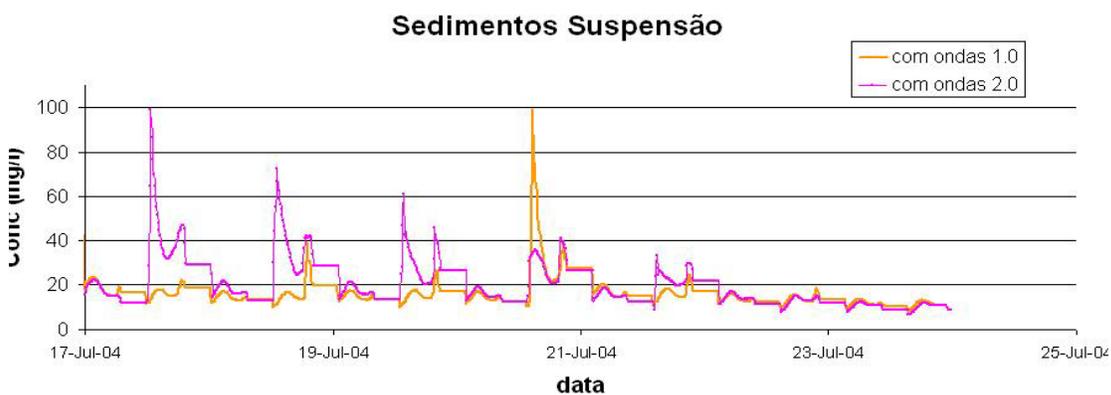


Figura 29 – Evolução das concentrações de sedimentos em suspensão na estação 13 para a simulação com ondas com 2 parâmetros diferentes na altura de onda (1.0 e 2.0).

Para validação (e possível futuro ajuste) do modelo de ondas foi feita uma comparação dos resultados com imagens de satélite e dados de campo.

3.2. Comparação de resultados com dados *in-situ*

Dados históricos de concentrações de sedimentos em suspensão no estuário foram utilizados para comparar com os resultados do modelo de ondas. Estes dados foram obtidos em 3 períodos distintos: o primeiro compreendendo o período de 1980 a 1983 (Comissão Nacional Ambiente – Martins e Dufner, 1982), o segundo de 1994 a 1998

(do Instituto Hidrográfico) e o último as campanhas da SimTejo de Fevereiro de 2004 a Abril de 2005.

Uma vez que os pontos de amostragem tinham localizações diferentes, os dados de campo foram separados por sectores no estuário, ou caixas (Figura 30). Assim, os pontos de amostragem que pertencem a uma determinada caixa contribuem para os valores médios dessa caixa. Os dados de 1980 a 1983 apresentavam valores elevados (em muitas estações o valor médio era superior a 300 mg/l – ver Anexo VIII, figura 27) pelo que foram eliminados 10% dos dados com os valores mais elevados (percentil 90).

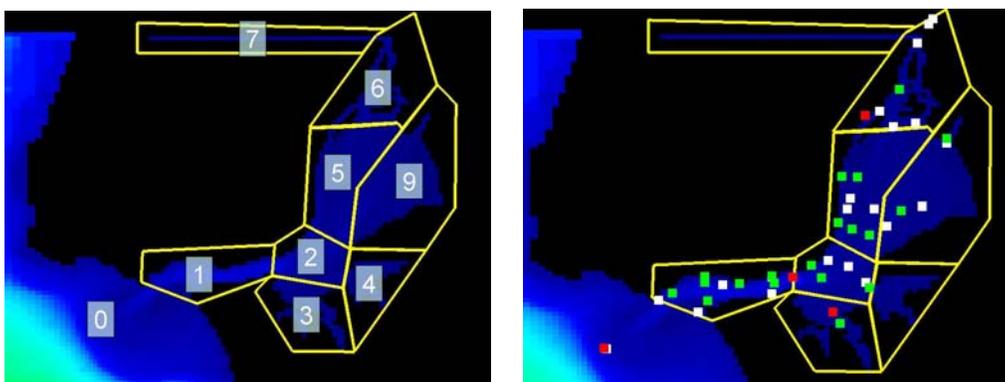


Figura 30 – Caixas utilizadas para o estudo dos dados de campo e distribuição dos pontos de amostragem: branco – 80 – 83; verde – SimTejo; vermelho – Instituto Hidrográfico.



Figura 31 – Comparação entre valores médios das concentrações de sedimentos em suspensão para as diferentes caixas para os dados de campo.

Como se pode verificar na Figura 31 os dados de 80-83 parecem demasiado elevados tendo em conta os dados mais recentes. Para além disso, o aumento de concentração da caixa número um para a caixa número zero (do canal de saída para o exterior do estuário) não parece consistente nestes dados.

Visto que nas caixas em que existem os dois conjuntos de dados mais recentes existe concordância e o andamento ao longo do estuário entre estes ser semelhante, a comparação dos resultados do modelo foi feita apenas com os dois conjuntos mais recentes (94-98 e 04-05).

Como estes dados são bastante dispersos temporalmente a melhor forma de os comparar com os resultados do modelo é fazer uma simulação longa e comparar os valores médios. Foi efectuada uma simulação para o ano de 2002 (o mês de Dezembro de 2001 serviu de “warm-up” ao modelo) visto este ano não ter falhas nas séries meteorológicas do vento do INAG (Instituto da Água).

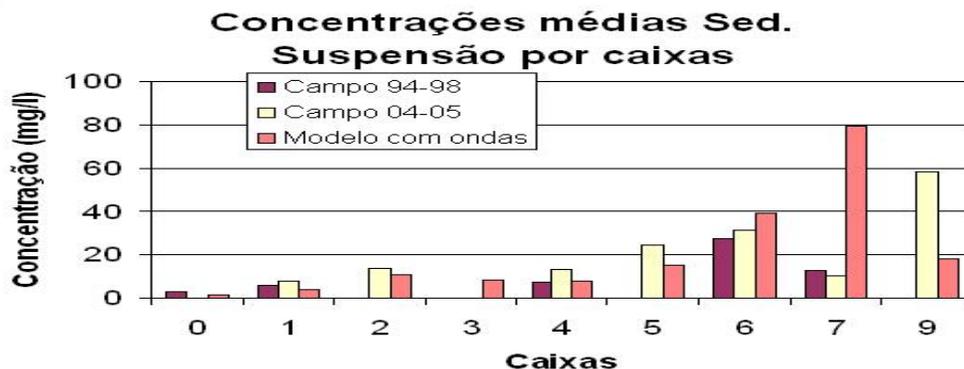


Figura 32 – Comparação entre os resultados do modelo e os dados de campo para os sedimentos em suspensão por caixas.

Os resultados da Figura 32 mostram que o modelo apresenta um bom ajuste para a maioria das caixas, excepto para a 7 e 9.

Na caixa 9 um dos factores que pode estar a causar a discrepância poderá ser a elevada variabilidade dos dados de campo nesta caixa (ver anexo VIII, figura 30). Isto acontece possivelmente devido às variações ao longo do ano no caudal e descarga de sedimentos do rio Sorraia (concentrações de sedimentos muito elevadas nos meses de Inverno e muito baixas nos meses de Verão, ver anexo VIII, figura 32); o modelo assumiu uma descarga constante de sedimentos em suspensão de 80 mg/l.

Na caixa 7, a caixa representativa do rio Tejo, a concentração média de sedimentos do modelo é praticamente o valor da descarga assumido para o rio Tejo (80 mg/l) uma vez que ao longo do rio praticamente não há deposição porque a salinidade é baixa; os dados de campo apresentam concentrações muito mais baixas. De notar que do rio Tejo para a zona superior do estuário (da caixa 7 para a caixa 6) as concentrações médias nos dados de campo aumentam, o que parece indiciar o efeito da salinidade (a matéria em suspensão dissolvida passa para a fase particulada) no aumento da concentração de sedimentos em suspensão. Para além disso os efeitos físicos (interacção entre maré e caudal do rio Tejo) promovem uma maior turbulência nesta zona gerando a zona de máxima turbidez que é demonstrada pelos dados e modelo (ver por exemplo Figura 37).

Vale and Sundbye (1987) concluíram o mesmo: que as variações de concentração de sedimentos em suspensão que se verificam no Estuário do Tejo são totalmente controladas por ciclos de maré viva/maré morta e que as descargas de sedimentos do Tejo são normalmente baixas. No entanto, há ocasionalmente episódios “tempestuosos” em que entra no estuário cerca de 90% da massa de sedimentos de um ano. A distribuição da zona de máxima turbidez foi também verificada neste estudo. Os dados de campo podem não ter captado os acontecimentos tempestuosos sendo os valores médios no rio Tejo baixos.

No entanto o modelo no futuro poderá passar a incluir estes acontecimentos bruscos introduzindo uma descarga variável ao longo do ano.



Figura 33 – Comparação entre os resultados do modelo com ondas e sem ondas para os sedimentos em suspensão.

Na Figura 33 é mostrada a diferença nas concentrações médias para as simulações com ondas e sem ondas. Esta diferença não é significativa para os valores médios. Isto acontece porque os incrementos de concentração gerados pelas ondas são acontecimentos muito pontuais. Na Figura 34, uma série temporal da estação 13 (a mesma da análise do ponto 3.1), podemos ver alguns picos de concentração que na simulação com ondas duplicam frequentemente os valores da simulação sem ondas, mas no valor médio da estação apenas o incrementa em 5mg/l.

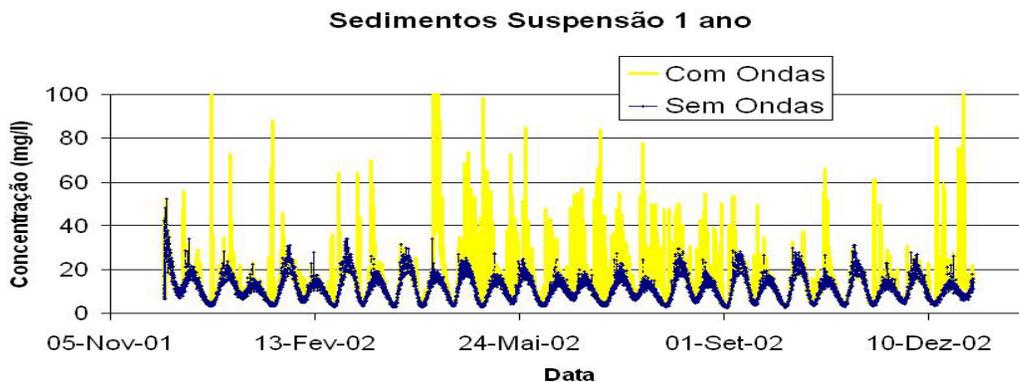


Figura 34 – Evolução temporal da concentração de sedimentos em suspensão para a estação 13 com o modelo com ondas e sem ondas.

Daqui se retira a importância de utilizar a modelação para simular os processos que interferem na qualidade da água. Um aumento de 5mg/l na média de sedimentos em suspensão pode ser interpretado como uma limitação de luz fraca “permanente”. No entanto, valores frequentes com mais de 50 mg/l devido ao vento (como ilustrado na Figura 34) já determinam limitações de luz frequentes, o que representa consequências muito diferentes na produção primária.

No anexo VIII são apresentadas as localizações dos pontos de amostragem dos dados de campo e a análise estatística.

3.3. Comparação de resultados com imagens de satélite

As imagens de satélite foram comparadas com os resultados obtidos por 2 vias: modelo com componente de ondas e sem a componente de ondas para perceber se a modelação das ondas estava a melhorar a descrição da distribuição instantânea dos sedimentos em suspensão.

Através de um protocolo entre o Instituto Superior Técnico e a ESA (Agência Espacial Europeia), foi possível obter imagens de satélite com concentrações de sedimentos em suspensão do sensor MERIS. Os instantes utilizados para comparação foram o de dia 20 de Julho, 18, 21 e 27 de Setembro e 1 e 4 de Outubro de 2004. Para o relatório apresenta-se o dia 20 de Julho (dia que já foi alvo de análise no ponto 3.1). No Anexo IV apresentam-se todas as imagens de satélite.

Mapas

Como foi referido neste relatório, a utilização das imagens de satélite deve ser feita tendo em conta as suas limitações.

O sensor do satélite recebe o sinal que sai da coluna de água e este último é influenciado quer pelos constituintes presentes quer pelo fundo. O fundo reflecte e

absorve radiação, alterando o sinal e assim os resultados que daí advêm. Numa zona como o estuário do Tejo, em que uma grande parte é constituída por zonas baixas, a utilização das imagens de satélite deve ser feita de forma cuidadosa.

Para compensar este problema, as imagens de satélite vêm acompanhadas de índices de confiança de modo a identificar as zonas e o factor que introduz interferência.

Por exemplo na Figura 35 (de dia 20 de Julho de 2004) as zonas a cinzento claro são zonas onde a reflectância pode ser negativa e as zonas transparentes indicam a presença de nuvens. Esta presença de nuvens faz a imagem com concentrações em suspensão da Figura 35 aparecer com falhas na zona em frente a Lisboa.

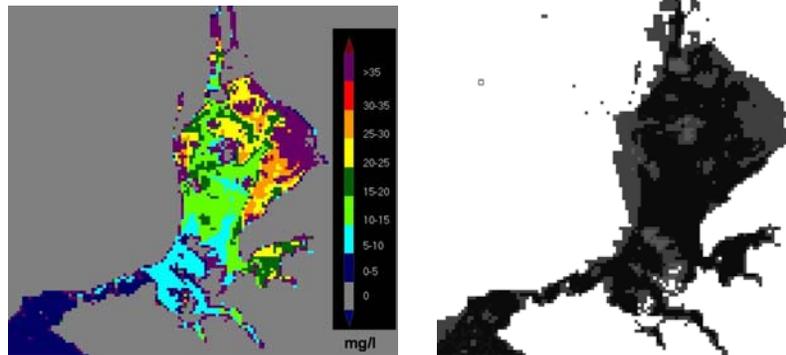


Figura 35 – Concentrações de sedimentos em suspensão na imagem de satélite do dia 20/7/04 (esquerda) e mapa do índice de confiança quanto à reflectância para o mesmo instante (direita).

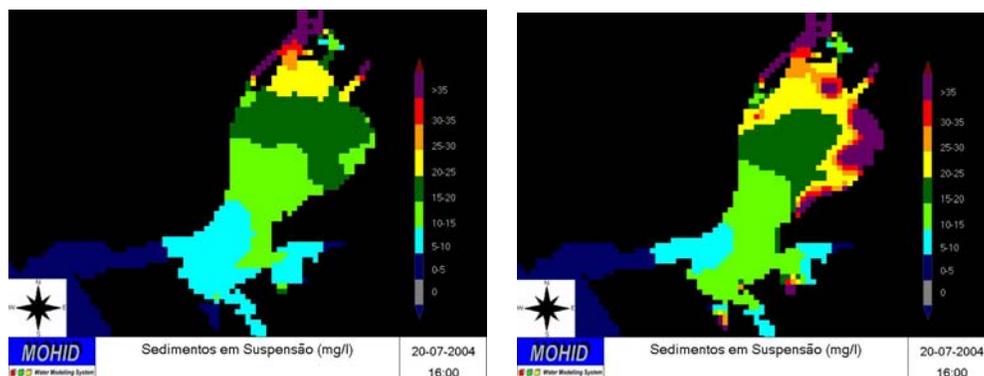


Figura 36 – Comparação entre os resultados do modelo sem ondas (à esquerda) e com ondas (à direita) para o dia 20/7/04 às 16h (próximo da hora da captação da imagem de satélite – entre as 14h e 15h). A legenda por classes é igual para as 2 imagens e para a Figura 35: de 0 a 35 mg/l, com classes de 5 em 5mg/l.

O modelo com ondas é o que melhor consegue representar o comportamento das concentrações na imagem de satélite – a decrescer não só ao longo do eixo longitudinal do estuário (Nordeste-Sudoeste) mas também das zonas baixas intertidais em direcção a esse eixo (Figura 35 e Figura 36).

Os modelos apresentam variações mais suaves de concentrações enquanto que na imagem de satélite, praticamente não existe uma das classes (verde-escuro - 15 a 20 mg/l) tendo uma distribuição muito relacionada com a profundidade.

Nos restantes instantes disponíveis para análise (3 em Setembro e 2 em Outubro), os acontecimentos intensos de ressuspensão do modelo não coincidiram com os instantes das imagens de satélite pelo que o ajuste do modelo de ondas aos dados deixa de ser tão evidente (Figura 37).

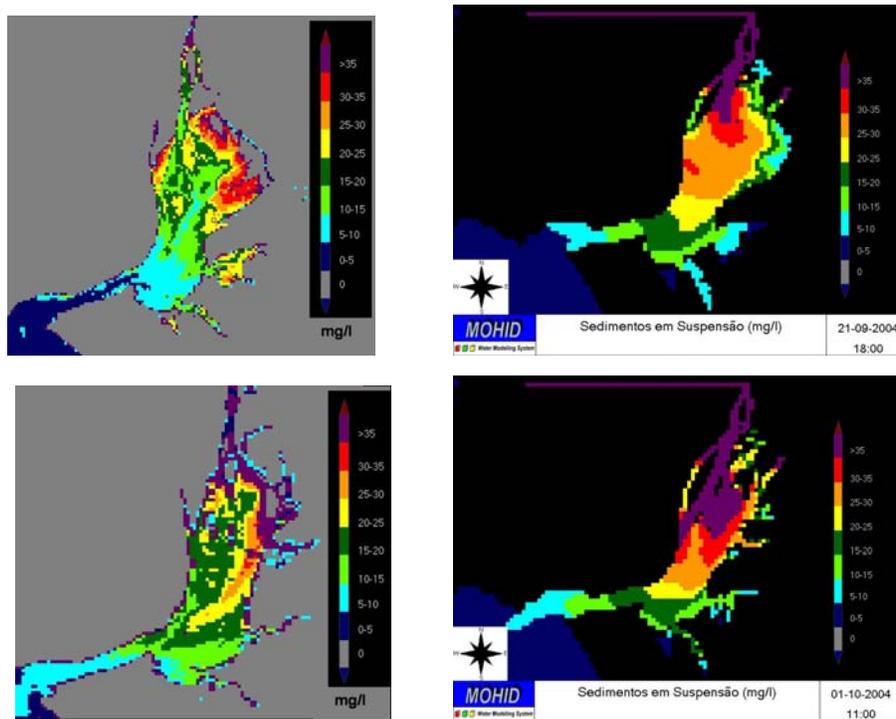


Figura 37 – Em cima, as concentrações de sedimentos em suspensão para o dia 21/9/04, em baixo para o dia 1/10/04. À esquerda estão as imagens de satélite e à direita os resultados do modelo.

Numa análise global das imagens de satélite (ver anexo IV), a ideia da distribuição de concentrações muito dependente da profundidade sai reforçada.

Uma ideia parece sobressair dessa análise: nas imagens de satélite captadas na enchente, a distribuição de concentrações parece ser sempre muito semelhante à da Figura 35, enquanto que em vazante, tipicamente aparece representada uma “língua” de concentrações mais elevadas ao longo do canal principal (Figura 38).

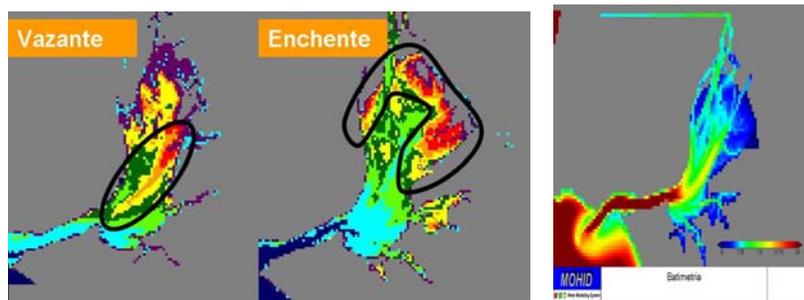


Figura 38 – Distribuições típicas dos sedimentos em suspensão para as imagens de satélite. Batimetria à direita.

A discrepância observada entre o modelo (com distribuições de concentrações mais suaves) e as imagens de satélite (com variações mais bruscas principalmente nas zonas baixas) parecia indicar ou interferências de fundo nas imagens ou a importância da difusão numérica nos modelos.

As duas hipóteses de interferência foram analisadas:

1) **interferências de fundo nas imagens de satélite** - Como já foi referido anteriormente, a interferência do fundo nas imagens de satélite pode ser identificada pela integração de vários índices de confiança que acompanham as imagens. Pela análise das imagens de satélite deste estudo e dos mapas dos índices que as acompanham, a relação entre concentrações mais elevadas e profundidades baixas mantém-se mesmo para zonas em que os índices não demonstram a presença de interferência (ver anexo IV, figura 21). Por outro lado, as zonas menos profundas, por

terem volumes de água menores que as zonas mais profundas, têm uma tendência natural para a ocorrência de concentrações mais elevadas (devido à menor diluição).

2) A **difusão numérica** é a difusão “criada” por se calcularem concentrações em malhas e esta é tanto maior quanto maior for a dimensão das células do modelo.

Para testar a hipótese que a difusão numérica poderia estar a espalhar demasiado os sedimentos e assim originar distribuições de concentrações demasiado suaves, foi criada uma nova batimetria com um passo espacial de 200x200m dentro do estuário (a anterior apresentava células de 500x500m) – ver Figura 39.

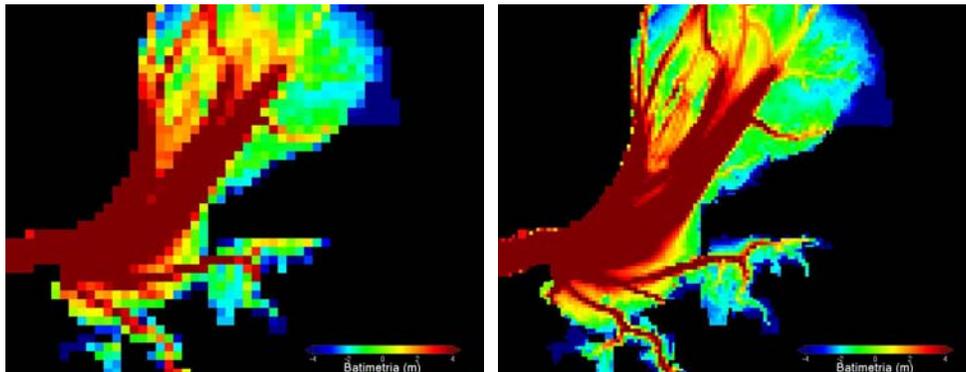


Figura 39 – Comparação entre a batimetria com células 500x500m (à esquerda) e a batimetria 200x200m (à direita).

Os resultados não sofreram praticamente alterações (ver anexo VIII, figura 23 e figura 23a) pelo que se concluiu que a difusão numérica não teria grande contributo para a discrepância entre modelo e imagens de satélite.

4. Conclusões

O modelo de geração de ondas mostrou que locais com elevadas distâncias de *Fetch* e onde ocorrem elevadas velocidades do vento, são propícios à ocorrência de fenómenos de ressuspensão de sedimentos devido à geração de ondas maiores. No entanto, concluiu-se que o factor mais importante é a profundidade do local devido ao decaimento da velocidade orbital. Zonas profundas não sentem o efeito das ondas por muito grandes que estas sejam. Do mesmo modo, zonas pouco profundas necessitam de ondas não muito grandes para colocar os sedimentos em suspensão.

Outro factor muito importante é a disponibilidade de sedimento no fundo para ressuspensão, ou seja, mesmo que todas as condições estejam criadas se não existirem sedimentos, ou o mais comum, o sedimento ser muito consolidado e as tensões de corte críticas de erosão demasiado elevadas, a ressuspensão não ocorre.

A zona em que estes fenómenos são mais intensos no Estuário do Tejo foi identificada – a zona intertidal do Samouco, em frente a Alcochete – sujeita a distâncias de *Fetch* da ordem dos 10-15km nos quadrantes Norte (vento dominante) e a profundidades baixas. Esta identificação permite definir acções futuras para desenvolvimento do modelo e para captação de dados.

A integração do modelo de ondas com um modelo de sedimentos mostrou que a componente de ondas responde aos acontecimentos críticos de vento e nível de água, produzindo picos de concentração de sedimentos em suspensão. Quando as condições deixam de existir, quer as concentrações de sedimentos em suspensão quer de sedimentos de fundo voltam aos valores do modelo sem a componente de ondas.

Ficou mostrado que no Estuário do Tejo, a geração de ondas pelo vento tem grande importância para a ressuspensão em pequenas escalas de tempo e em zonas bem

identificadas. Estes acontecimentos são “diluídos” no cálculo de médias anuais o que deve ser tido em conta ao utilizar valores médios pois não são representativos das variações instantâneas.

Na única imagem de satélite em que o instante de captação desta coincidiu com um fenómeno de ressuspensão do modelo, os resultados do modelo tiveram o melhor ajuste às imagens de satélite. A distribuição de concentrações de sedimentos em suspensão passou a apresentar um gradiente das zonas baixas para os canais mais profundos e não apenas do rio Tejo para a saída do estuário, ao longo do eixo deste (como acontece com as simulações sem ondas).

De uma forma global, o modelo de ondas integrado com o modelo de sedimentos obteve um ajuste qualitativo razoável aos dados (de campo e satélite) quanto à distribuição de sedimentos em suspensão no estuário. Uma análise quantitativa mais aprofundada será possível ao melhorar alguns dos aspectos do modelo que serão descritos no próximo capítulo.

A análise de sensibilidade dos resultados ao parâmetro da altura de onda mostrou a dependência existente entre a escolha dos parâmetros (incluindo o parâmetro do período de onda que não foi apresentado neste relatório) e a intensidade dos picos de concentração. A recolha de dados e calibração do modelo de ondas torna-se importante para prosseguir o estudo.

Este modelo provou ser uma ferramenta importante para a descrição do fenómeno de ressuspensão de sedimentos, para definir qualitativamente a importância do vento e da geração de ondas para este fenómeno, bem como para identificar as zonas onde o seu efeito é mais relevante.

5. Trabalho Futuro

Em termos de trabalho futuro, é necessário continuar a aprofundar a componente de ondas de forma a quantificar a sua influência na produção primária e na mobilização de poluentes.

A discrepância entre a distribuição espacial de concentrações em suspensão do modelo e das imagens de satélite pode estar relacionada com a falta de discretização vertical. O modelo 2D assume uma mistura completa na coluna de água o que sucede apenas em algumas circunstâncias. Assim, a implementação de um modelo 3D poderia permitir descrever os processos verticais de mistura e de estratificação da coluna de água, contribuindo para um perfil vertical mais realista. Nesta situação, as zonas menos profundas poderiam manter concentrações mais elevadas à superfície e nas mais profundas os sedimentos em suspensão poderiam depositar rapidamente e a concentração à superfície diminuiria, evidenciando os gradientes que as imagens de satélite demonstram. Assim, a utilização de um modelo 3D para o Estuário do Tejo seria o próximo passo para o desenvolvimento da simulação da dinâmica de sedimentos.

Como o Fetch introduz implicitamente a propagação de ondas no modelo e como a batimetria utilizada tem uma resolução de 500m (não são considerados muitos pormenores na variação do fundo), a utilização de um modelo de ondas mais complexo (com inclusão de propagação de onda como difracção e refracção) poderá ainda não ser justificável.

A obtenção de dados de campo de altura e período de onda será fundamental para calibrar o modelo e decidir sobre a necessidade ou não de um modelo mais complexo.

A utilização de descargas de sedimentos variáveis no rio Tejo e rio Sorraia (por exemplo dependendo do caudal), poderá fazer com que o modelo possa descrever acontecimentos pontuais de forma mais realística.

Referências

- AIRY, G. B. (1845) – *Tides and Waves*, Encyc. Metrop., Article 192, pp 241-396
- BRETSCHNEIDER, C. L. (1960) – *A theory for Waves of Finite Height*, Proc. 7th Coastal Engr. Conf., Vol 1, pp 146-183
- CANCINO, L.; NEVES, R. (1999) – *Hydrodynamic and sediment suspension modelling in estuarine systems, Part I: Description of the numerical models*, Journal of Marine Systems, 22, 105-116.
- CEM, (2002) – *The Coastal Engineering Manual*. Part II Chapter 1, 2 and 3
- CLOERN, J. E.; MAY, C. L.; KOSEFFI, J. R.; LUCAS, L.V.; SCHOELLHAMER, D. H. (2003) – *Effects of spatial and temporal variability of turbidity on phytoplankton blooms*, Marine Ecology Progress Series, Vol. 254: 111–128.
- COLE, T.M. and WELLS S. A. (2003). "*CE-QUAL-W2: A two-dimensional, laterally averaged, Hydrodynamic and Water Quality Model, Version 3.2*," Instruction Report EL-03-1, US Army Engineering and Research Development Center, Vicksburg, MS.
- de CLIPELLE, J. (1998) *Cohesive Sediment Transport in the Tagus Estuary*, Diplôme d'Etudes Approfondies Européen en Modélisation de L'Environnement.
- EUROSSAM (2000) – *Task 8 Modelling the Biogeochemical Processing of Arsenic by Salt Marshes, Final Report*, Institute of Marine Research, Biogeochemistry Group, Évora, Portugal.
- FENTON, J. D. (1985) – *A Fifth Order Stokes Theory for Steady Waves*, ASCE Jour. Waterw., Port, Coastal and Ocean Engr., Vol 11, pp 216-234.
- FERNANDES, L.; BRAUNSCHWEIG, F. (2004) – "*Mohid Framework Programmers Manual*"
- FERNANDES, L. (2005) – *Modelling of Arsenic Dynamics In The Tagus Estuary*, Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Ecologia, Gestão e Modelação dos Recursos Marinhos, Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior Técnico.
- FREIRE, P. (2003) – *Evolução Morfo-Sedimentar de Margens Estuarinas. Estuário do Tejo, Portugal*. Tese de Doutoramento apresentada à Universidade de Lisboa, LNEC, TPI 28, 380 pp.
- FREIRE, P.; ANDRADE, C. (1999) – "*Wind-induced sand transport in Tagus estuarine beaches*", Aquatic Ecology n° 33, Kluwer Academic Publishers.
- HASSELMANN, K.; BARNETT, T.P.; BOUWS, E.; CARLSON, H.; CARTWRIGHT; D.E. et al. (1973) – *Measurements of Wind-Wave Growth and Swell Decay During the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP)*, Deutsche Hydrograph, Zeit., Ergänzung-self Reihe, A 8(12).
- HOWES, D. (1997) – *British Columbia Estuary mapping Systems – Appendix A: Wave Exposure Calculation*, Ministry of Sustainable Resource Management, British Columbia U.S.A.

INAG (Instituto da Água) / MARETEC (2002) - Water Quality in Portuguese Estuaries: Tejo, Sado and Mondego, Lisbon

IOCCG (2000) - Remote Sensing of Ocean Colour in Coastal, and Other Optically-Complex, Waters. Sathyendranath, S. (ed.), Reports of the International Ocean-Colour Coordinating Group, No. 3, IOCCG, Dartmouth, Canada.

JFK School - www.jfk.herts.sch.uk/.../marine_processes.htm

KANG (1982) – referência não presente onde é citada – Cole, 2003

KOMEN, G. J.; CAVALERI, L.; DONELAN, M.; HASSELMANN K.; HASSELMANN, S; AND JANSSEN, P. A. E. M., (1994) - Dynamics and Modelling of Ocean Waves. Cambridge University Press, 532 pp.

KRONE, R.B. , (1962) - Flume studies of the transport in estuarine shoaling processes. Hydr. Eng. Lab., Univ. of Berkeley, California, USA.

LEITÃO, P. C. (2003) - Integração de Escalas e de Processos na Modelação no Ambiente Marinho - Dissertação para a obtenção do Grau de Doutor em Engenharia do Ambiente, IST Lisboa

LE PROVOST, C.; LYARD, F. ; MOLINES, J.M.; GENCO, M.L.; RABILLOUD, F. (1998) - A Hydrodynamic Ocean Tide Model Improved by assimilating a satellite altimeter derived dataset. J. Geophys. Res. Vol., 103 N. C3, 1998.

MARTINS, M. e DUFNER, M.J.L., (1982). Estudo da qualidade da água. Resultados referentes às observações sinópticas em 1980. Estudo Ambiental do Estuário do Tejo_(2ª série), nº 14. Comissão Nacional do Ambiente, Lisboa, pp.1-212.

MILES, J. W. (1957) – On the Generation of Surface Waves by Shear Flows, Journal of Fluid Mechanics, Vol 3, pp 185-204.

MOHID – www.mohid.com

NAIRN, R. B.; Willis, D. H. (2002) - Coastal Engineering Manual, Part III, Chapter III-5, Engineer Manual 1110-2-1100, U.S. Army Corps of Engineers, Washington, DC.

NEVES, R. J. J. (1985) - Étude Expérimentale et Modélisation des Circulations Transitoire et Résiduelle dans l'Estuaire du Sado. Ph. D. Thesis, Univ. Liège.

PARTHENIADES, E., (1965) - Erosion and deposition of cohesive soils. J. Hydr. Div., ASCE, 91, No. HY1 : 105-139.

PHILLIPS, O. M. (1958) – On the Generation of Waves by Turbulent Wind, Jour. Fluid Mech., Vol. 2, pp 417 - 445.

PIERSON, W. J., AND MOSKOWITZ, L. (1964) – A Proposed Spectral Form for Fully Developed Wind Seas Based in the Similarity Theory of S. A. Kitiagorodskii, J Geophys. Res., Vol 9, pp 5181-5190.

PINA, P., (2001) - *Integrated Approach to Study the Tagus Estuary Water Quality*, Dissertação para a obtenção do grau de Mestre em Ecologia, Gestão e Modelação de Recursos Marinhos, Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior Técnico.

PORTELA, L. (1996) - *Modelação Matemática de Processos Hidrodinâmicos e de Qualidade da Água no Estuário do Tejo*, Dissertação para obtenção do grau de Doutor em Engenharia do Ambiente, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa.

ROGALA, J.T. (1997) - *Estimating Fetch for Navigation Pools in the Upper Mississippi River Using a Geographic Information System*. United States Geological Survey -Project Status Report 97-08

SANTOS, A. J. (1995) - *Modelo Hidrodinâmico Tridimensional de Circulação Oceânica e Estuarina*, Dissertação para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Mecânica, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa.

SEYMOUR, R.J. (1977) - "*Estimating Wave Generation in Restricted Fetches*", J. ASME WW2, May 1977, pp251-263.

STEWART R.H. (1980) - *Ocean wave measurement techniques*. In *Air Sea Interaction, Instruments and Methods*. Edited by L. H. F. Dobson and R. Davis. 447-470. New York: Plenum Press.

STEWART R.H. (2005) - *Introduction to Physical Oceanography*-
http://oceanworld.tamu.edu/resources/ocng_textbook/contents.html

STOKES, G. G. (1847) - *On the Teory of Oscillatory Wave* Trans. Camb. Phil. Soc., Vol. 8, pp 441-455

STOKES, G. G. (1880) - *Math Phys papers*, Vol 1, Camb. Univ. Press.

VALE C.; SUNDBYE B. (1987) - *Suspended sediment fluctuations in the Tagus Estuary on semi-diurnal and fortnightly time scales*. Estuarine, Coastal and Shelf Science, No. 25, pp. 495 - 508.

van Rijn, L.C. (1989) - *Handbook - Sediment Transport by Currents and Waves*. Report H 461 June. Delft Hydraulics.

WAMDIG (1988) - *The WAM model - A third generation ocean wave prediction model*. *Journal of Physical Oceanography*, **18**, 1775-1810.

Anexos

Anexo I

São apresentados neste anexo os resultados do modelo de ondas aplicado ao estuário do Tejo.

Dados meteorológicos

Os dados de vento (intensidade e direcção) considerados foram os valores médios horários entre duas estações meteorológicas da rede INAG mais próximas do estuário: 21D/01 – Alcochete e 20C/01 – São Julião (assinaladas na Ilustração 1)

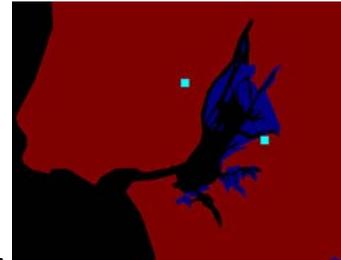


Ilustração 1 – Localização das estações meteorológicas.

São apresentados na Figura 40 e Figura 41 os dados de entrada (valores médios) e a proveniência. Apenas o mês de Julho aparece para facilitar a interpretação dos gráficos e por ser o mês de referência para o próximo ponto.

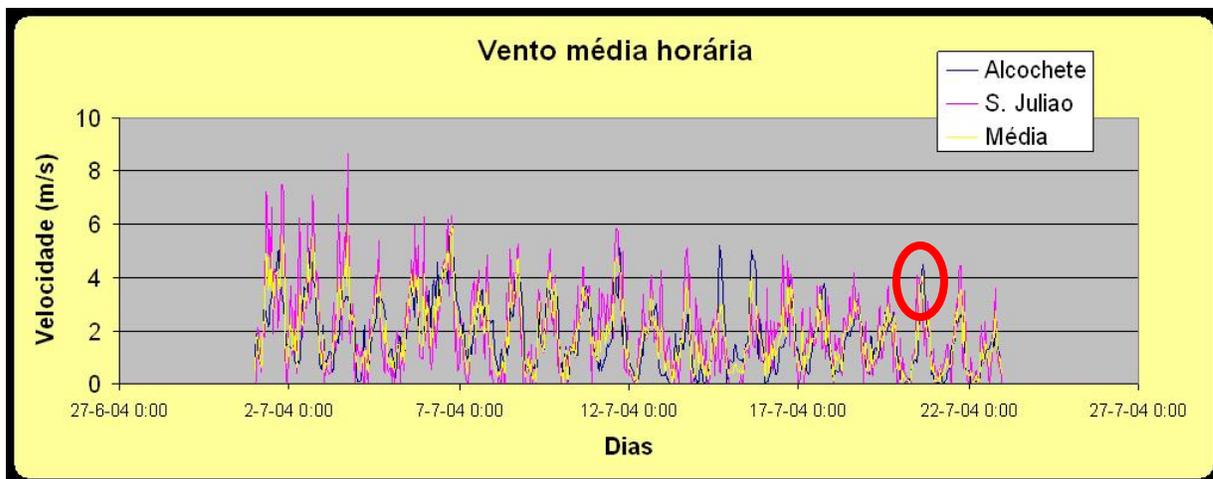


Figura 40 – Velocidade do vento utilizada no modelo: média dos valores das duas estações. É assinalado o pico do dia 20 de Julho de 2004 – 15h-16h.

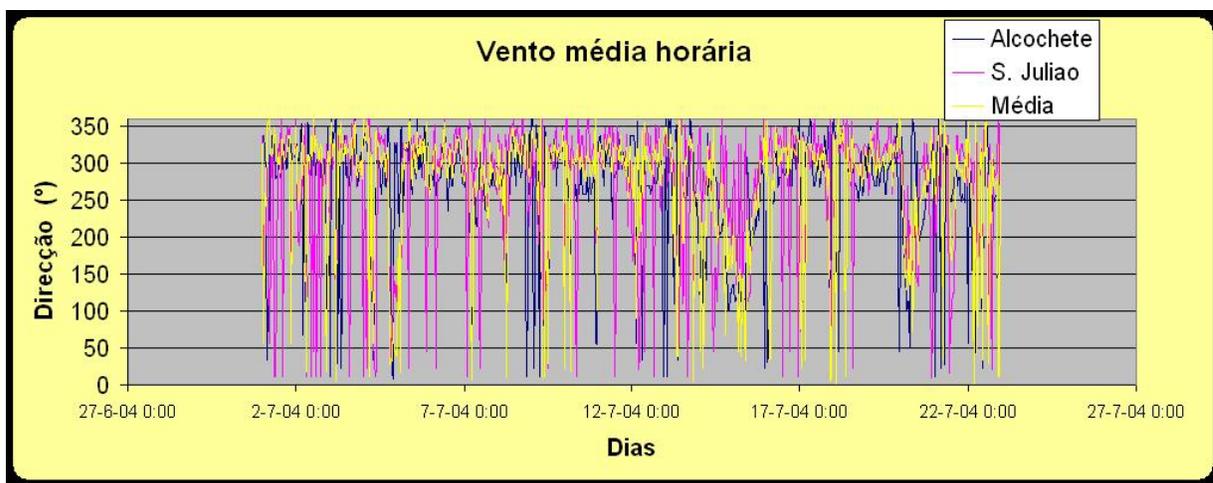


Figura 41 – Direcção do vento utilizada no modelo: média dos valores das duas estações

Verifica-se a predominância de ventos dos quadrantes norte (250 a 360°) com velocidade não muito elevadas (em geral não ultrapassa os 6 m/s).

Mapas

A distribuição da altura e período de onda no estuário mostra a capacidade de ajuste do modelo às variações de Fetch e de profundidade (ver relação com a batimetria).

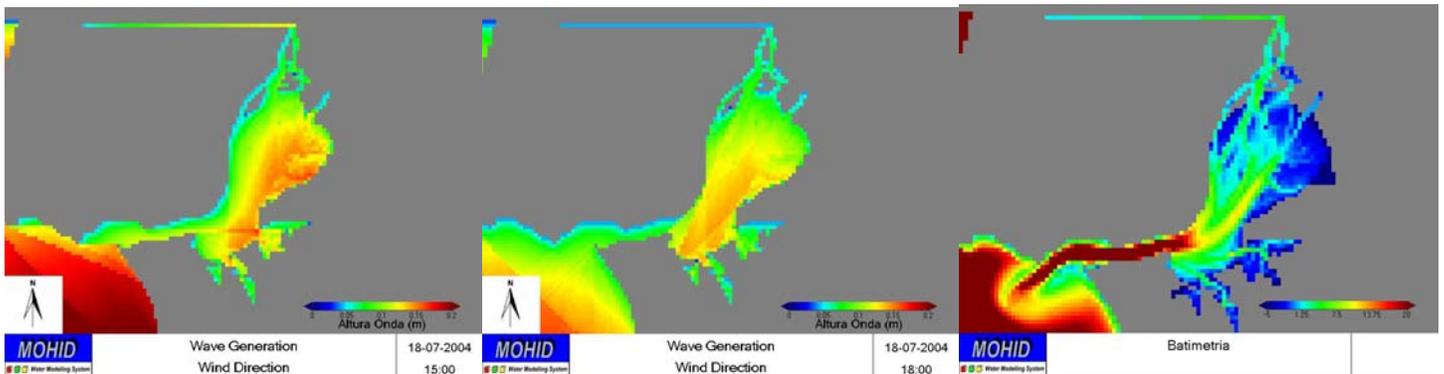


Figura 42 – Altura de onda com vento de Noroeste (à esquerda) e com vento de Nordeste (no meio). À direita, a batimetria do estuário.

Os períodos de onda seguem uma distribuição semelhante à das alturas e são apresentados exemplos na Figura 43.

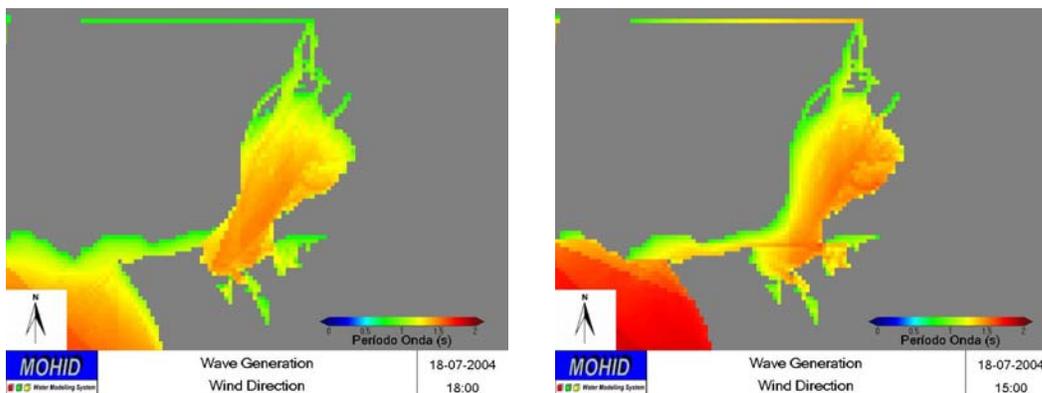


Figura 43 – Período de onda para dois instantes: primeiro com vento de Noroeste e segundo com vento de Nordeste.

Séries Temporais

Mostrada a variação espacial pretende-se verificar a evolução temporal da altura e período da onda.

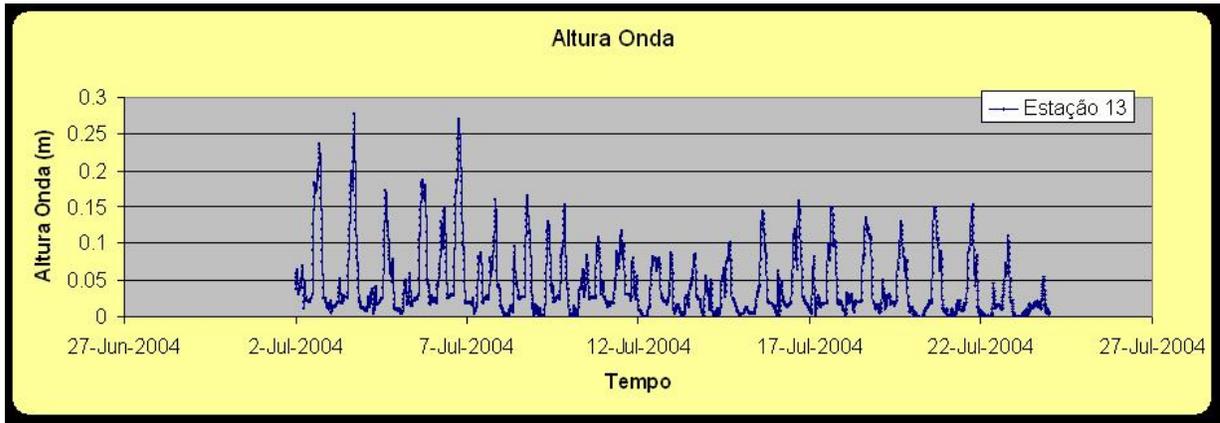


Figura 44 – Altura de Onda em função do tempo para a estação 13.

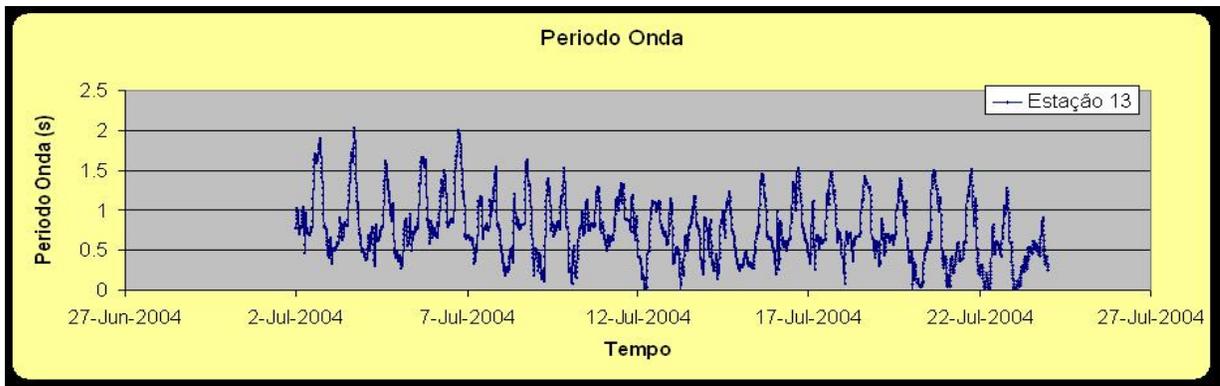


Figura 45 – Período de Onda em função do tempo para a estação 13.

Para a estação 1 os resultados têm um andamento semelhante mas apresentam uma variação mais regular. Ver Figura 46 e Figura 47.

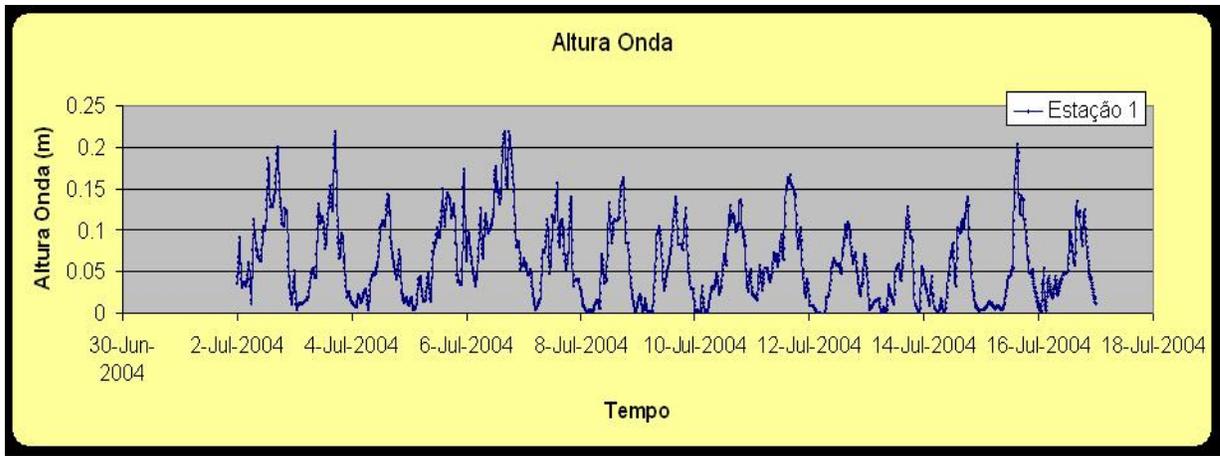


Figura 46 – Altura de Onda em função do tempo para a estação 1.

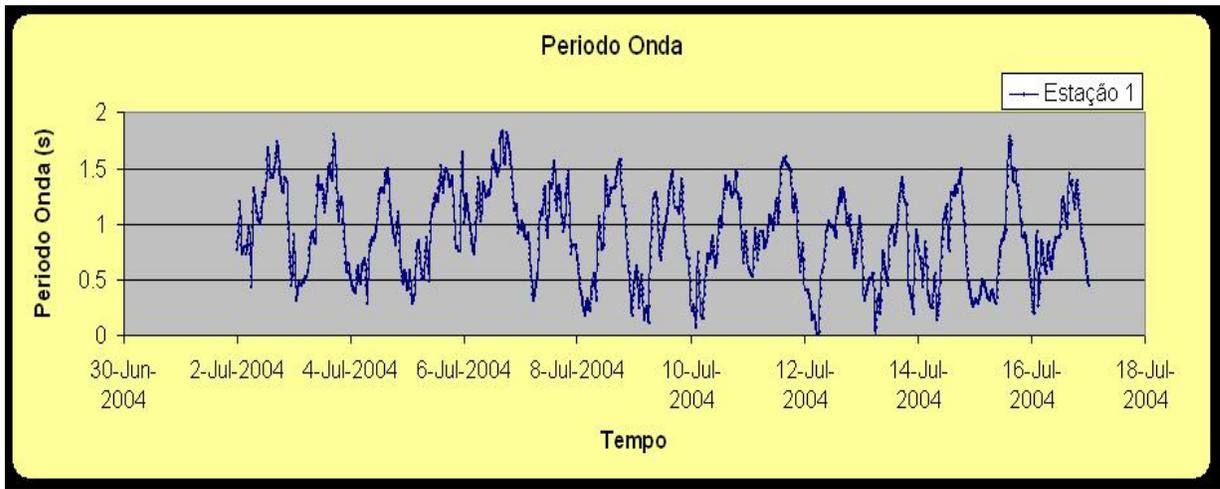


Figura 47 – Período de Onda em função do tempo para a estação 1.

Anexo II

São apresentados os resultados do modelo de ondas para o Estuário Oosterschelde na Holanda.

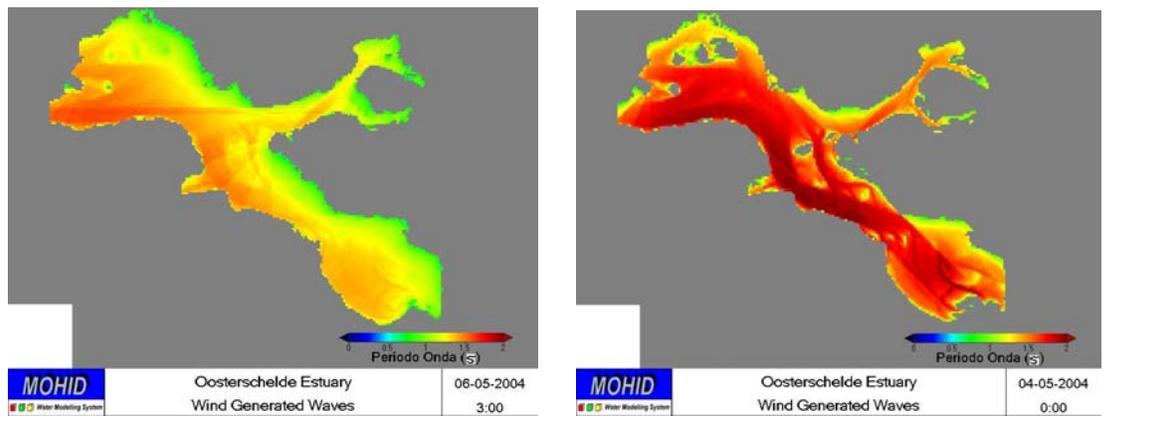


Figura 48 – Período de Onda para o Estuário Oosterschelde em dois instantes.

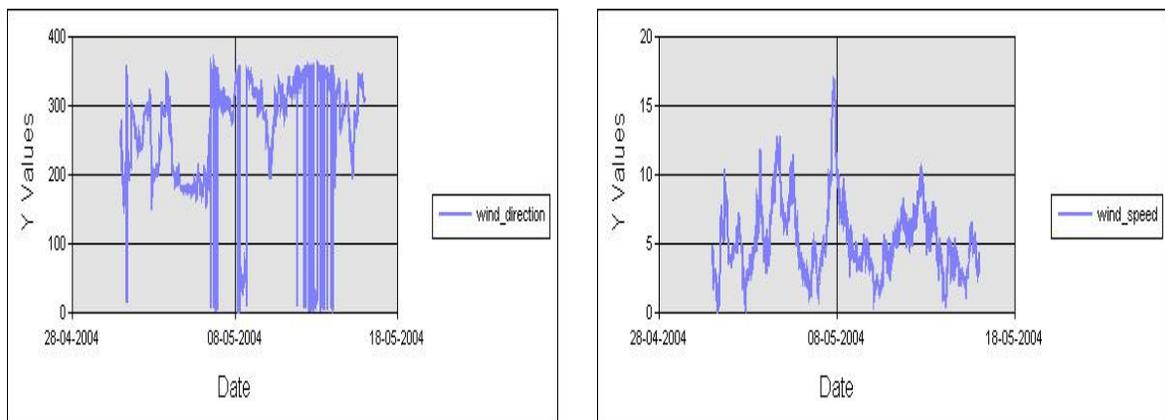


Figura 49 – Dados de velocidade e direcção do vento para a estação de Stavenisse no mês de Maio.

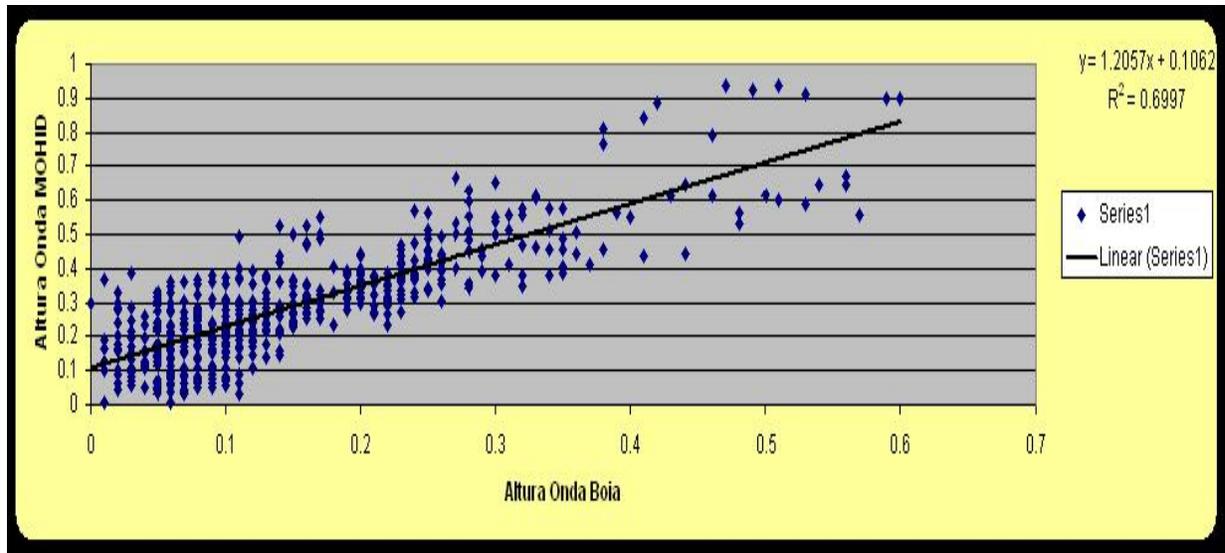


Figura 50 – Correlação entre altura de onda calculada pelo MOHID e a altura medida na bóia.

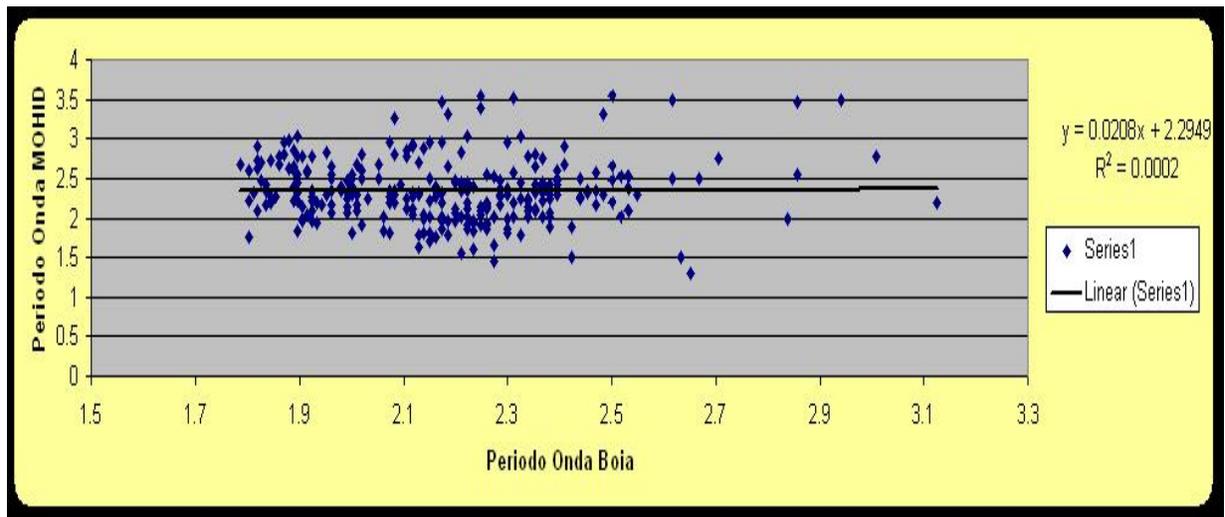


Figura 51 – Correlação entre período de onda calculada pelo MOHID e a período medido na bóia.

Anexo III – são apresentados os resultados da integração do modelo de ondas com a componente de sedimentos do MOHID.

Estação 1, Julho 2004

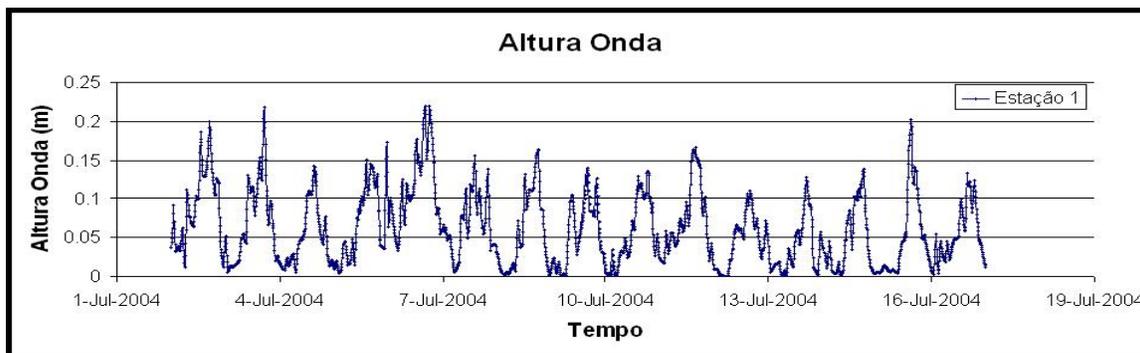


Figura 52 – Altura de Onda em função do tempo para a estação 1 durante o mês de Julho de 2004.

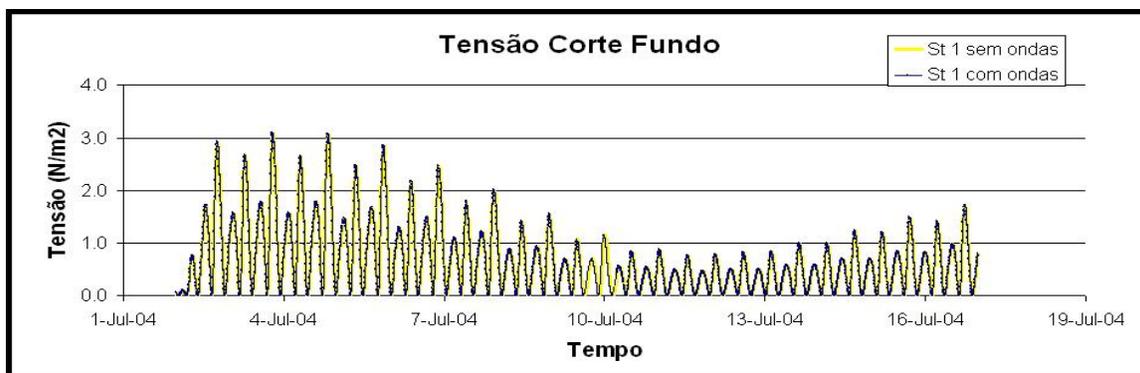


Figura 53 – Tensão de Corte no Fundo em função do tempo para a estação 1 durante o mês de Julho de 2004.

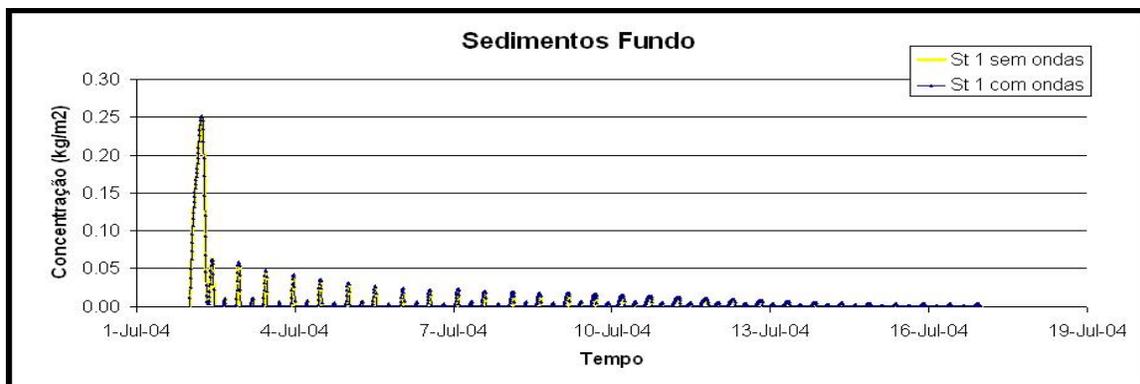


Figura 54 – Concentração de sedimentos do fundo em função do tempo para a estação 1 durante o mês de Julho de 2004.

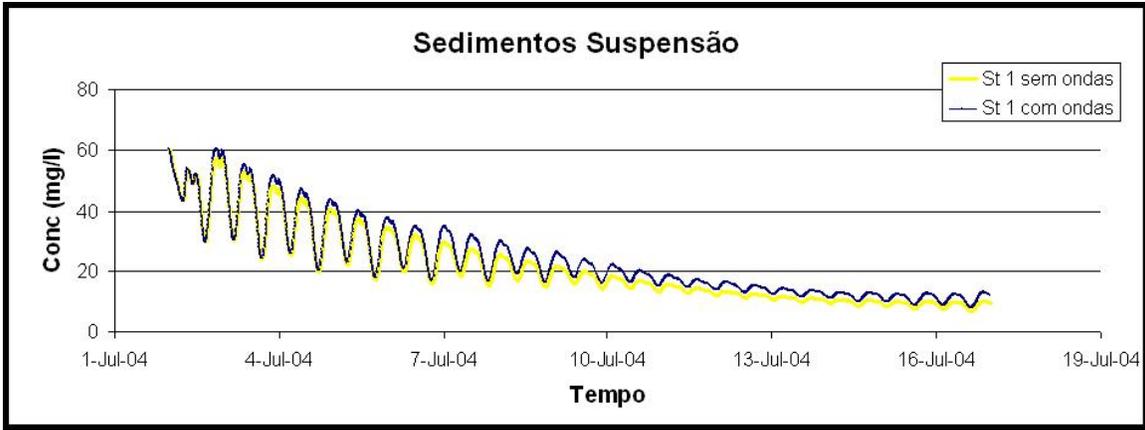


Figura 55 – Concentração de sedimentos em suspensão em função do tempo para a estação 1 no mês de Julho de 2004

Estação 13, Setembro 2004

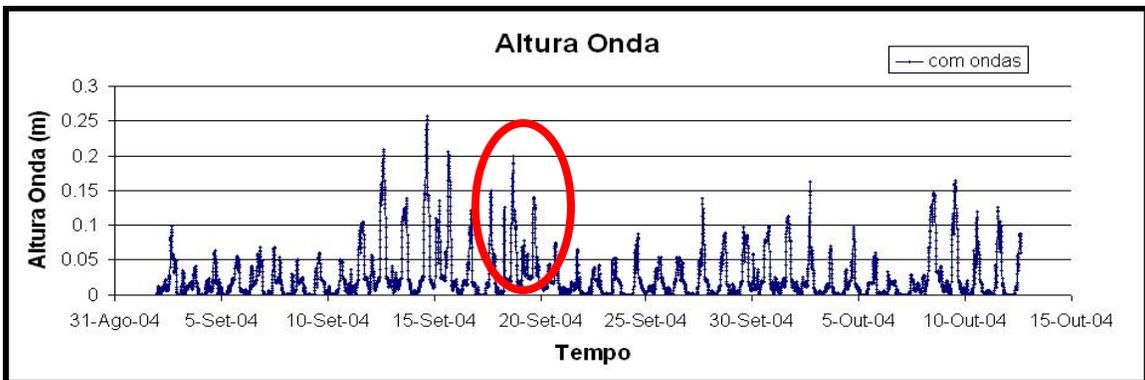


Figura 56 – Altura Onda em função do tempo para a estação 13 de 2 de Setembro a 12 de Outubro de 2004.

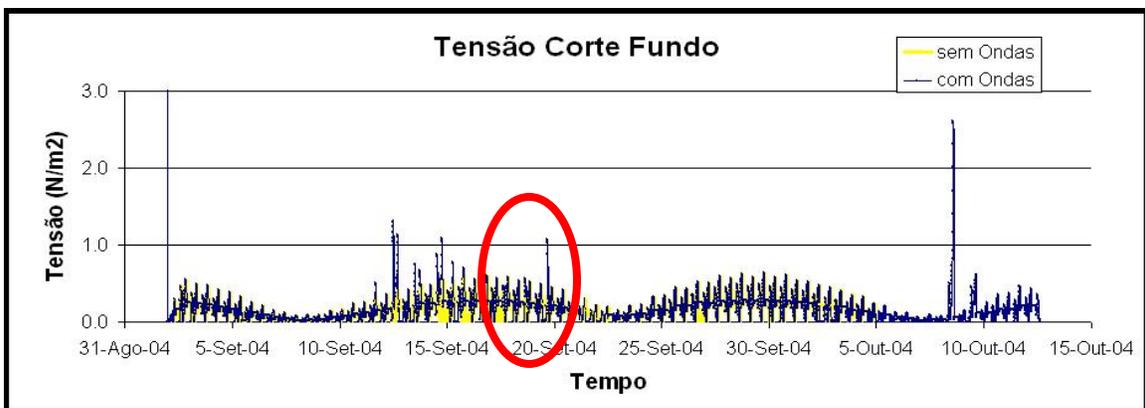


Figura 57 – Tensão de corte no fundo em função do tempo para a estação 13 de 2 de Setembro a 12 de Outubro de 2004.

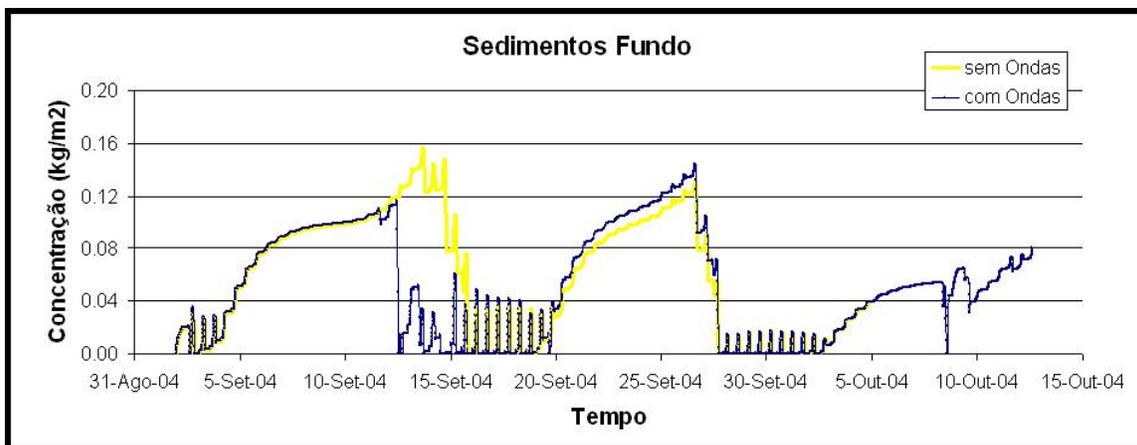


Figura 58 – Concentração de sedimentos de fundo em função do tempo para a estação 13 de 2 de Setembro a 12 de Outubro de 2004.

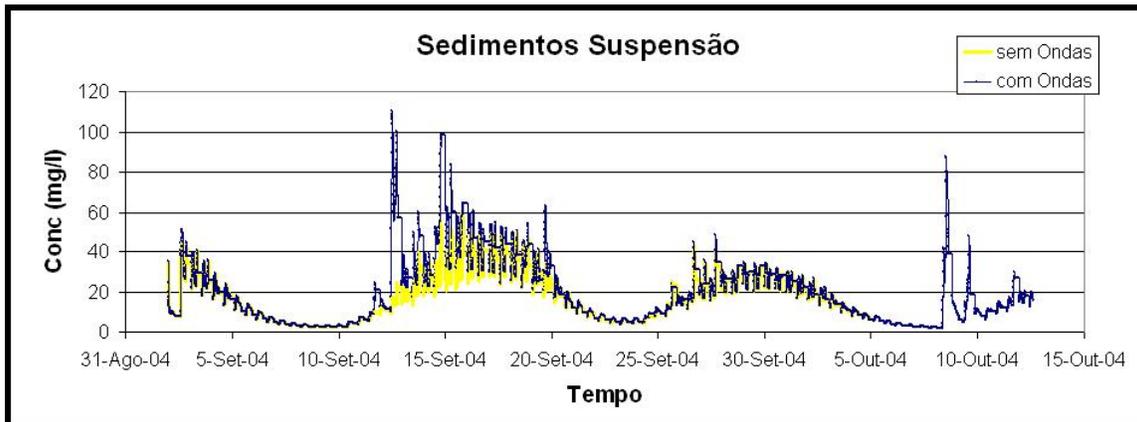


Figura 59 – Concentração de sedimentos em suspensão em função do tempo para a estação 13 de 2 de Setembro a 12 de Outubro de 2004.

Anexo IV

São apresentadas as imagens de satélite.

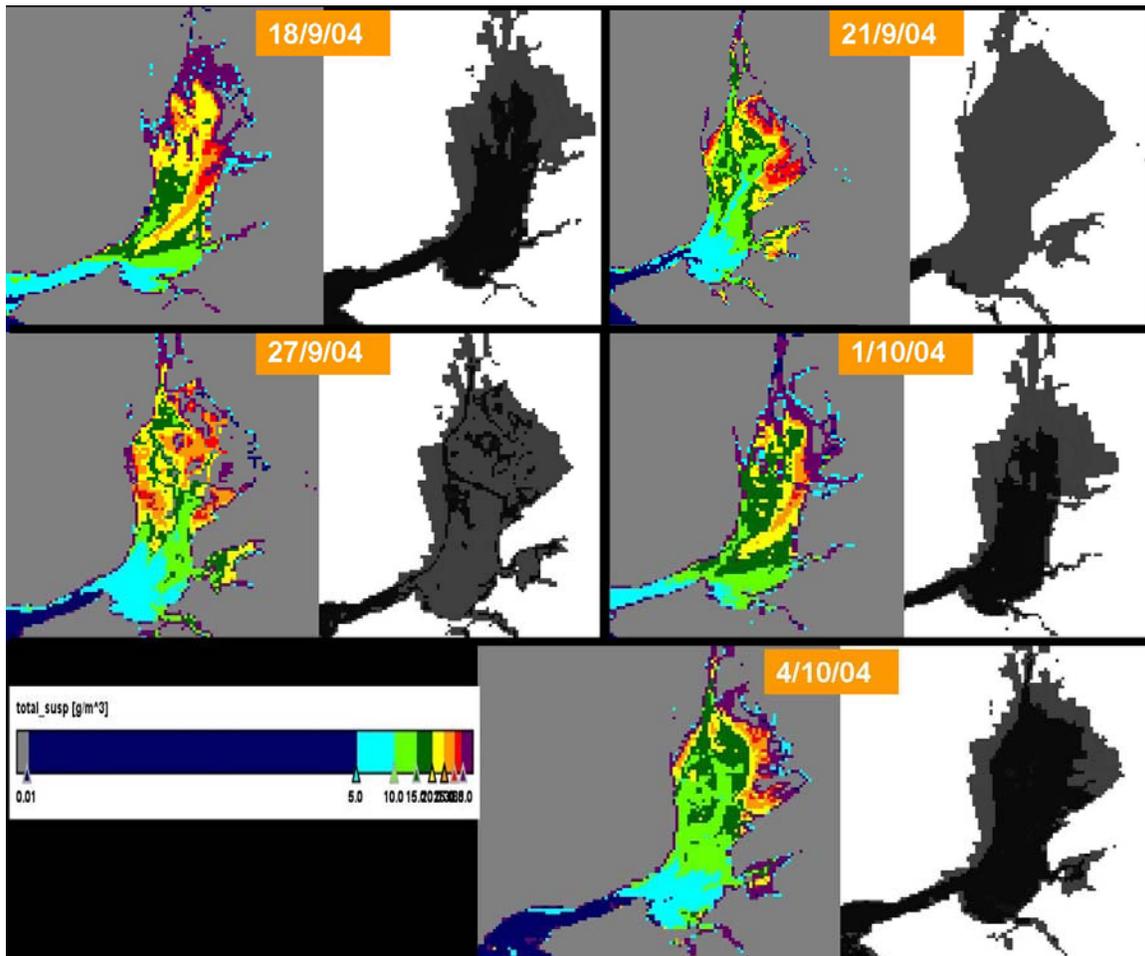


Figura 60 – Imagens de satélite com concentração de sedimentos em suspensão (à esquerda) para 5 instantes de 2004. A escala é classificada (de 5 em 5 mg/l) até 35mg/l. A imagem de 20 de Julho é apresentada no relatório.

Anexo V

O seguinte texto explica o funcionamento da dinâmica de sedimentos no MOHID e os processos presentes no módulo responsável pela camada superficial de sedimentos (InterfaceSedimentWater). In Fernandes, (2005) e Pina, (2001)

Os sedimentos presentes no fundo constituem a camada erodível de sedimentos. Os sedimentos finos geralmente ocorrem em zonas de deposição i.e. em zonas de baixa profundidade com correntes fracas, enquanto sedimentos mais grosseiros são encontrados em zonas mais profundas ou com correntes mais intensas. (de Clippele, 1998).

Modelação do transporte de sedimentos em suspensão

O modelo de transporte de sedimentos é utilizado, para o transporte da fase particulada associada aos sedimentos. Este modelo comporta os processos de floculação, sedimentação, deposição e erosão.

O transporte de sedimentos coesivos na coluna de água é calculado através da resolução da equação de advecção-difusão, semelhante à da fase particulada dos poluentes.

$$(1) \quad \frac{\partial(C_s)}{\partial t} + \frac{\partial(uC_s)}{\partial x} + \frac{\partial(vC_s)}{\partial y} + \frac{\partial((w + w_s)C_s)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x}(\epsilon_x \frac{\partial C_s}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\epsilon_y \frac{\partial C_s}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(\epsilon_z \frac{\partial C_s}{\partial z})$$

Em que C_s é a concentração de sedimentos. Esta equação admite que os sedimentos são conservativos e que apresentam um movimento relativo à coluna de água, descrito pela velocidade de queda. As condições fronteira são impostas pela definição de um fluxo no fundo, F_b [$\text{ML}^{-2}\text{T}^{-1}$], correspondente ao balanço entre a erosão, F_{ERO} [$\text{ML}^{-2}\text{T}^{-1}$], e a deposição F_{DEP} [$\text{ML}^{-2}\text{T}^{-1}$], e por um fluxo nulo na superfície livre, F_ξ [$\text{ML}^{-2}\text{T}^{-1}$].

$$(2) \quad N(z_b, t) = F_b = F_{ERO} - F_{DEP}$$

$$(3) \quad N(z_\xi, t) = F_\xi = 0$$

Módulo InterfaceSedimentWater

O modelo da interface água – fundo calcula as condições fronteira para o compartimento da coluna de água e dos sedimentos.

Assume-se que, quando a tensão de corte no fundo é inferior à tensão crítica de deposição, existe adição de massa ao fundo. Quando a tensão de corte no fundo é superior à tensão de corte crítica de erosão, massa sai do fundo (erosão) (Figura 61). Entre estes dois valores a erosão e deposição balançam-se mutuamente.

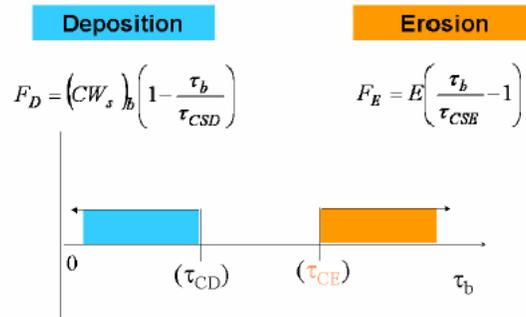


Figura 61 – Algoritmo de erosão e deposição

O algoritmo de cálculo utilizado para determinar o fluxo de deposição de sedimentos é o proposto por Krone, em 1962, que relaciona uma probabilidade de deposição de uma partícula com o fluxo de deposição F_{DEP} , para calcular a massa de sedimentos que se depositam M_D [ML^{-2}]:

$$(4) \begin{cases} \frac{dM_D}{dt} = (Cw_s)_B \left(1 - \frac{\tau}{\tau_D}\right) & se \quad \tau < \tau_D \\ \frac{dM_D}{dt} = 0 & se \quad \tau > \tau_D \end{cases}$$

em que τ é a tensão de corte junto ao fundo [$ML^{-1}T^{-2}$], τ_D [$ML^{-1}T^{-2}$] é a tensão de corte crítica de deposição, $_B$ significa ‘junto à interface coluna de água – sedimento’.

Tal como para a deposição, considera-se que a erosão acontece quando a tensão de corte junto ao fundo é superior a uma tensão de corte crítica de erosão. O algoritmo clássico para calcular o fluxo erosivo F_{ERO} , e a correspondente massa erodida por unidade de área num determinado período de tempo, M_E [ML^{-2}] é atribuído a Partheniades, em 1965:

$$(5) \begin{cases} \frac{dM_E}{dt} = E \left(\frac{\tau}{\tau_E} - 1 \right) & se \quad \tau > \tau_E \\ \frac{dM_E}{dt} = 0 & se \quad \tau < \tau_E \end{cases}$$

Onde τ é a tensão de corte junto ao fundo [$ML^{-1}T^{-2}$], τ_E é a tensão de corte crítica de erosão [$ML^{-1}T^{-2}$] e E uma constante de erosão [$ML^{-2}T^{-1}$], que depende das características físico-químicas dos sedimentos.

As tensões de corte críticas utilizadas nas simulações foram de $0.6N/m^2$ para a erosão e $0.3 N/m^2$ para a deposição (Pina, 2001). Para a taxa de erosão utilizou-se $0.00005 Kgm^{-2}s^{-1}$.

Quanto à velocidade de queda (do fluxo de deposição):

$$W_S = K_1 C^m \quad \text{for } C < C_{HS}$$

$$W_S = K_1 C_{HS}^m [1.0 - K_2 (C - C_{HS})]^{m_1} \quad \text{for } C > C_{HS}$$

onde W_S (ms^{-1}) é a velocidade de queda, C , a concentração em suspensão em que o HS refere-se à situação de “hindered settling” (4 kgm^{-3}). O coeficiente K_1 ($0.006 \text{ m}^4 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-1}$) e K_2 ($0.1 \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$) dependem da mineralogia dos sedimentos de fundo e os expoentes m (2.0) e m_1 (2.0) dependem do tamanho e forma da partícula. Estes parâmetros foram calibrados para o Estuário do Tejo por de Clippele, (1998).

Anexo VI

O seguinte texto pretende mostrar a formulação utilizada para a tensão de corte no fundo devido à componente das ondas. Enquanto que a tensão de corte é calculada no módulo `InterfaceSedimentWater`, os parâmetros de onda necessários a esse cálculo são gerados no módulo `Waves`.

Tensão Corte Fundo (componente devida às ondas) – Módulo

`InterfaceSedimentWater`

As ondas exercem fricção no fundo durante a propagação contribuindo para as tensões de corte no fundo. No módulo de ondas são calculados os parâmetros necessários ao cálculo da tensão no fundo devida às ondas. Esta tensão de corte relaciona-se com o coeficiente de fricção através de:

$$\tau_w = \frac{1}{2} \rho f_w U_s^2$$

Em que:

τ_w – Tensão de corte no fundo [N/m^2].

f_w – Coeficiente de fricção [adimensional].

U_δ – Velocidade instantânea do fluido mesmo acima da camada fronteira do fundo
[m/s]

ρ – Densidade do fluido [kg/m³]

O factor de fricção f_w assume-se constante durante o ciclo de onda e é determinado

por: $f_w = 2\tau_w / (\rho U_\delta^2)$.

A tensão de corte no fundo média no tempo (durante um ciclo de onda):

$$\hat{\tau}_w = \frac{1}{4} \rho f_w \hat{U}_\delta^2$$

Em regime turbulento Jonsson (1996 in van Rijn, 1989) propôs:

$$f_w = \exp \left[-6 + 5.2 \left(\frac{\hat{A}_\delta}{k_s} \right)^{-0.19} \right]$$

com $f_{w,\max} = 0.3$ para

$$\left(\frac{\hat{A}_\delta}{k_s} \right) \leq 1.57$$

onde k_s representa a rugosidade do fundo [m]

Parâmetros de Onda – Módulo Waves

Aplicando a teoria linear de ondas, o valor máximo da “orbital excursion” (\hat{A}_δ) e da velocidade orbital (\hat{U}_δ) no limite da camada fronteira da onda, pode ser expresso por:

$$\hat{A}_\delta = \frac{H}{\sinh(kh)}$$

$$\hat{U}_\delta = \hat{A}_\delta \varpi = \frac{H\Pi}{T \sinh(kh)}$$

Em que:

$\omega = 2\pi / T =$ Velocidade angular [rad/s]

$k = 2\pi / L =$ Número de Onda [rad/m]

$H =$ Altura de Onda [m]

$L = (gT^2 / 2\pi) \tanh(kh) =$ Comprimento de Onda [m]

$T =$ Período de onda [s]

$h =$ Profundidade de água [m]

A teoria de ondas linear é geralmente aplicada para determinar velocidades junto ao fundo. No caso de ondas simétricas (sinusoidais) de baixa amplitude em zonas profundas, esta teoria dá resultados correctos. Quando as ondas se aproximam de águas de baixa profundidade, estas são distorcidas levando a perfis de onda assimétricos o que tornaria necessária a utilização de teorias de onda de maior ordem. Surpreendentemente, comparações de velocidades medidas e calculadas de acordo com a teoria linear, mostram razoável concordância em águas pouco profundas.

Anexo VII

Apresentam-se os parâmetros estatísticos de avaliação do ajuste do modelo aos dados de campo.

1. Coeficiente de Correlação

$$\frac{\sum_{i=1}^n (p_i - \bar{p})(a_i - \bar{a})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (p_i - \bar{p})^2 \sum_{i=1}^n (a_i - \bar{a})^2}}$$

onde p_i são os valores previstos pelo modelo e \bar{p} a média desses valores. e a_i os valores medidos e \bar{a} a média desses valores.

2. Desvio do Erro Quadrático Médio (Root Mean Squared Error)

$$\sqrt{\frac{(a_1 - c_1)^2 + (a_2 - c_2)^2 + \dots + (a_n - c_n)^2}{n}}$$

onde $a_1 - a_n$ são os valores previstos pelo modelo e $c_1 - c_n$, os valores medidos.

3. Erro Absoluto Médio (Mean Absolute Error)

$$\frac{|a_1 - c_1| + |a_2 - c_2| + \dots + |a_n - c_n|}{n}$$

onde $a_1 - a_n$ são os valores previstos pelo modelo e $c_1 - c_n$, os valores medidos.

Anexo VIII

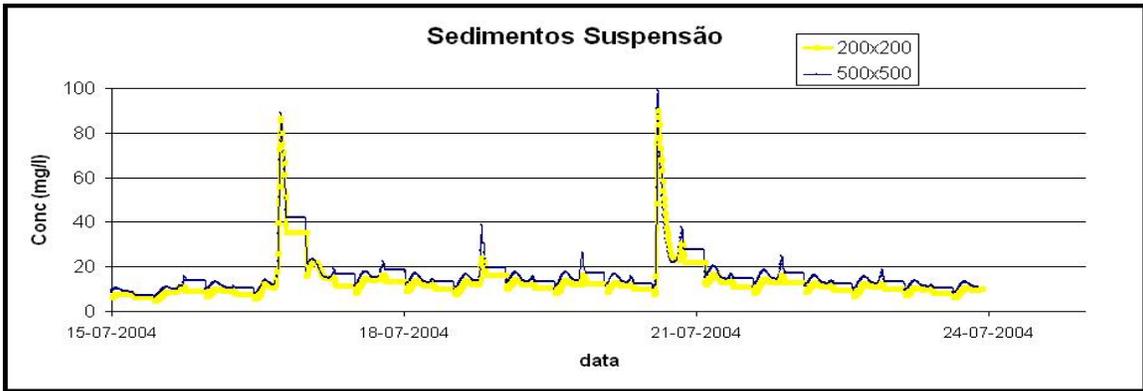


Figura 62 – Comparação de resultados de sedimentos em suspensão para a estação 13 no mês de Julho de 2004, utilizando duas batimetrias (a original com malha 500x500m e a nova com malha 200x200m).

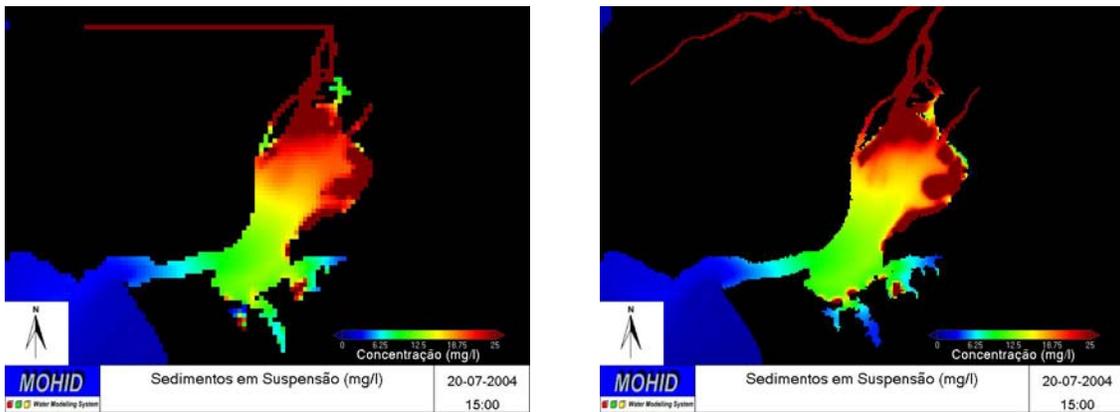


Figura 23a – Comparação de resultados de sedimentos em suspensão no dia 20 de Julho de 2004, utilizando duas batimetrias (a original com malha 500x500m à esquerda e a nova com malha 200x200m à direita).

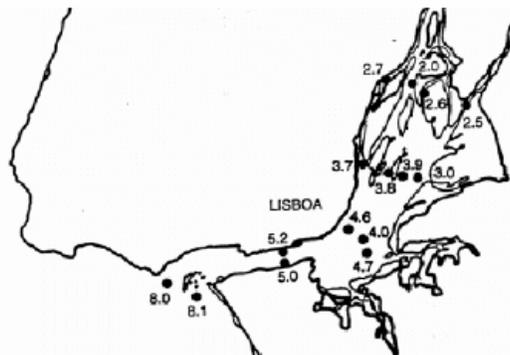


Figura 63 – Localização geográfica das estações de medição para os dados 80-83

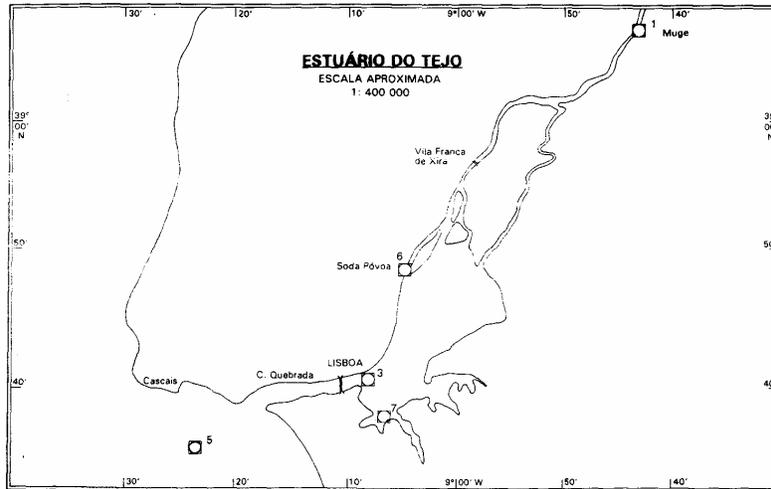


Figura 64 – Localização geográfica das estações de amostragem no estuário do Tejo dos dados de 1994-1998



Figura 65 – Localização geográfica das estações de amostragem no estuário do Tejo dos dados da SimTejo

Tabela 2 – Análise estatística das concentrações de sedimentos em suspensão dos 4 tipos de dados, média aritmética, desvio padrão e número de amostras. Média e desvio padrão em mg/l.

Caixa	80-83			Instituto Hidrográfico (94-98)			SIMTEJO (04-05)			modelo		
	média	desvio	n	média	desvio	n	média	desvio	n	n	média	Desvio*
0	72	24	54	3	3	25	n.d	n.d	n.d	8760	1.3	1.1
1	51	42	685	6	3	38	8	9	89	35040	4.1	3.3
2	69	47	695	n.d	n.d	n.d	14	13	44	26280	10.5	8.1
3	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	8760	8.3	5.9
4	n.d	n.d	n.d	7	3	11	13	7	12	17520	7.7	5.7
5	79	50	311	n.d	n.d	n.d	24	22	59	26280	15.3	12.5
6	64	38	545	27	11	20	31	35	12	35040	38.8	37.6
7	68	43	273	13	12	20	10	4	11	17520	79.6	79.6
9	101	87	438	n.d	n.d	n.d	58	81	24	43800	17.8	12.6
total			3001			114			251	219000		

* este desvio padrão foi calculado como a média dos desvios-padrão das estações de cada caixa.

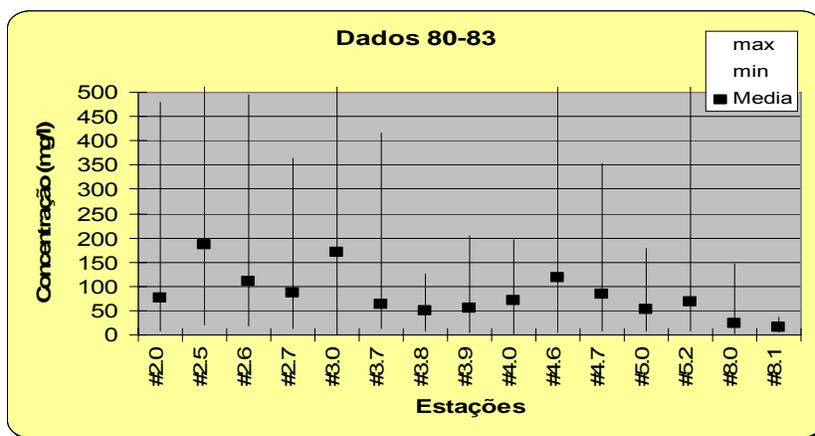


Figura 66– Valores médios máximos e mínimos para os dados de 1980-1983 para as estações originais. De notar que o eixo vertical foi quebrado nos 500 mg/l para que os valores médios fossem legíveis.

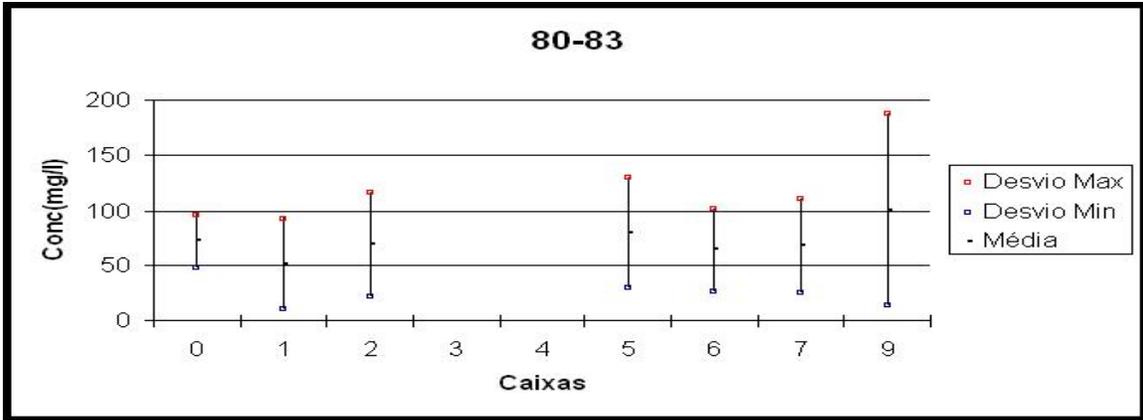


Figura 67 – Variabilidade dos dados de campo de 80-83 após tratamento, por caixas no estuário.

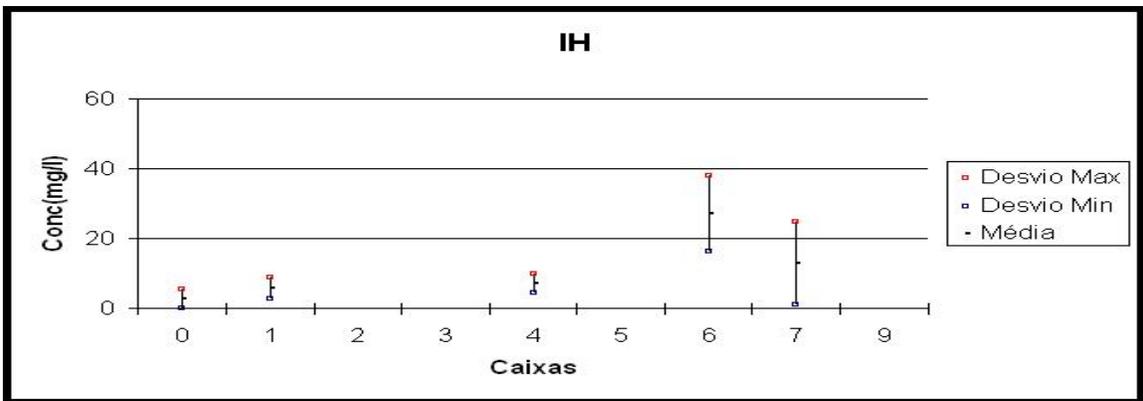


Figura 68 – Variabilidade dos dados de campo do Instituto Hidrográfico por caixas no estuário.

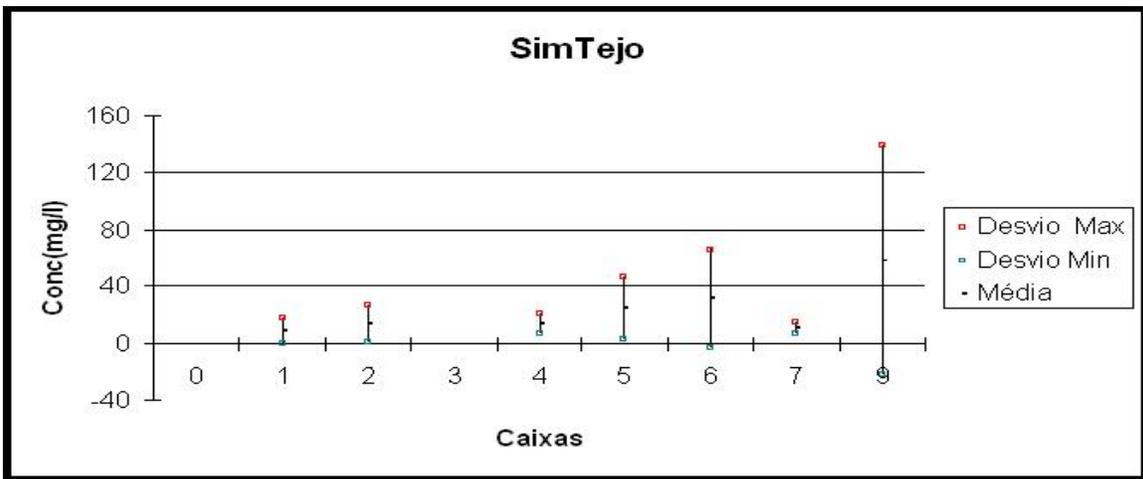


Figura 69 – Variabilidade dos dados de campo da SimTejo por caixas no estuário.

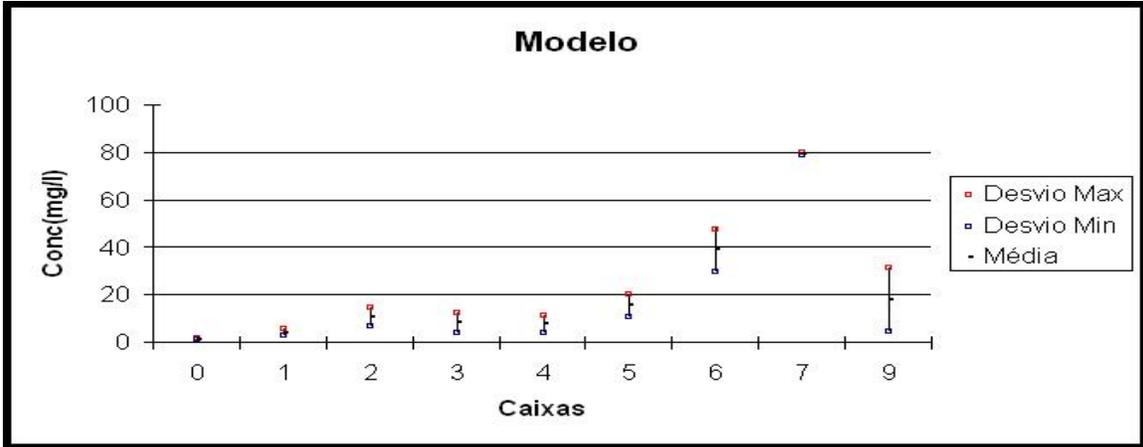


Figura 70 – Variabilidade dos dados do modelo por caixas no estuário.

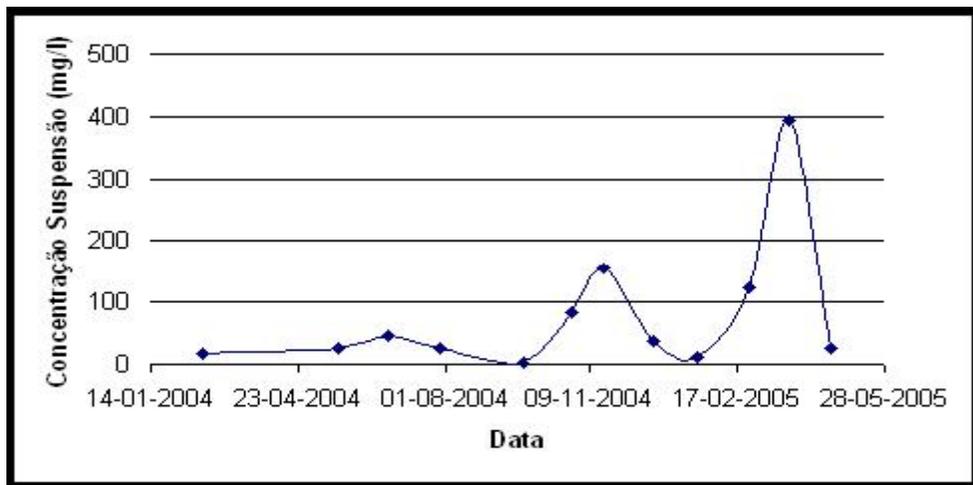


Figura 71 – Série Temporal de uma estação da SimTejo próxima do final do Rio Sorraia.