

## MODELAÇÃO MATEMÁTICA DA DEPOSIÇÃO DE DRAGADOS NA ZONA COSTEIRA DO ESTADO DE SÃO PAULO - BRASIL

*José Chambel Leitão<sup>(1)</sup>; Adélio Silva<sup>(2)</sup>; Pedro Ferreira<sup>(3)</sup>*

**Resumo** - A deposição de sedimentos provenientes de dragagens no Porto de Santos no Brasil (o maior porto da América Latina) tem vindo a ser efectuada desde sempre em diferentes locais na zona costeira exterior ao Estuário de Santos. Os locais actuais de lançamentos dos dragados são a cerca de 22 m de profundidade e em costa aberta, próximo da estância balnear de Guarujá, uma das mais importantes do Estado de S. Paulo.

Desde 1998 que são feitas campanhas de medidas sistemáticas que, para além de fornecerem dados fundamentais para a compreensão do sistema, suportaram a implementação de um sistema de modelação matemática com o objectivo de definir qual o local mais adequado para o lançamento dos sedimentos dragados. As campanhas de medidas basearam-se na utilização de equipamentos de medição de correntes, níveis, vento, temperatura e salinidade, e compreenderam períodos extensos (vários meses) em vários locais.

A modelação matemática foi efectuada com o sistema MOHID tendo sido simulada a hidrodinâmica induzida pelo vento e pela maré. O transporte dos sedimentos foi simulado com o módulo de transporte lagrangeano tendo permitido caracterizar as parcelas de sedimentos que ficam em suspensão no acto da deposição e dos sedimentos transportados junto ao fundo.

Nesta comunicação é posta em evidência a metodologia utilizada para a modelação matemática, tendo em conta a análise do vasto conjunto de medidas existentes, os resultados da calibração do sistema de modelos e as principais conclusões alcançadas.

**Palavras-chave** – Deposição de dragados; Hidrodinâmica; Modelação; Transporte lagrangeano; Sedimentos; Zona costeira; Santos

---

<sup>(1)</sup> Engenheiro Civil, Doutorado em Engenharia Mecânica - [jcleitao.hidromod@taguspark.pt](mailto:jcleitao.hidromod@taguspark.pt)

<sup>(2)</sup> Engenheiro Civil, Doutorado em Engenharia Mecânica - [asilva.hidromod@taguspark.pt](mailto:asilva.hidromod@taguspark.pt)

<sup>(3)</sup> Finalista de Eng. Mecânica - [pferreira.hidromod@taguspark.pt](mailto:pferreira.hidromod@taguspark.pt)

## **1 - INTRODUÇÃO**

A dragagem de sedimentos nas zonas navegáveis de todos os portos do mundo, com problemas de assoreamentos, é um problema muito importante do ponto de vista ambiental e económico. Estes sedimentos estão muitas vezes contaminados o que implica que devem existir cuidados quanto ao impacte ambiental provocado na sua deposição. Desde a década de 70 que vêm sendo elaborados estudos sedimentológicos e de transporte da zona em causa, incluindo o de locais apropriados para o depósito do lodo dragado no canal de navegação do Porto de Santos. Citam-se como exemplo os trabalhos apresentados em INPH (1974), CBTN (1974), AGUDO *et al.* (1976) SONDOTÉCNICA (1977) e BANDEIRA *et al.* (1981). Estes trabalhos permitem ter uma perspectiva de todo o funcionamento hidrodinâmico e sedimentológico da zona de interesse para este estudo.

Nesta comunicação descrevem-se os aspectos mais importantes das campanhas de medidas e da modelação matemática efectuadas recentemente. No que se refere às medidas, foi dada especial atenção à medição em simultâneo dos principais agentes forçadores da hidrodinâmica e do transporte do lodo na área costeira exterior à Baía de Santos, tendo em vista o estabelecimento e calibração dos modelos matemáticos e a melhor caracterização do sistema.

## **2 - MEDIDAS DE CORRENTES**

### **2.1 - Introdução**

As campanhas de medidas de correntes efectuadas tiveram por base a utilização de dois correntómetros do tipo ADCP. Estes correntómetros permitiram medir a intensidade e direcção da corrente em simultâneo a várias profundidades. Estes equipamentos foram colocados no fundo em períodos de Verão e Inverno, tendo sido obtidos conjuntos de vários meses de medidas nalguns pontos, e noutros de algumas semanas.

Foram também efectuadas algumas campanhas de medidas de temperatura e salinidade, tendo a análise da estrutura vertical de densidade mostrado existir alguma estratificação. Assim, a maior parte das análises às medidas dos ADCP's foram feitas para duas camadas: até aos 10 metros de profundidade e dos 11 metros até ao fundo.

### **2.2 - Direcção**

Na Figura 1, onde se representa a probabilidade de ocorrência em função da direcção, podem observar-se as diferenças existentes entre as duas campanhas efectuadas, uma no Verão e outra no Inverno. Na camada 1 nota-se a predominância da direcção ENE, quer no Inverno quer no Verão, embora no Inverno esta predominância seja menos marcada, e nota-se um maior número de ocorrências para a direcção WSW nas medições de inverno. Na camada 2 o comportamento é muito semelhante para a direcção ENE, no entanto existe uma modificação nas medidas de inverno, mais rodadas para W.

### **2.3 - Velocidade**

A velocidade média mais elevada ocorre segundo as direcções preferenciais, sendo o valor máximo atingido para a direcção ENE durante o Inverno com cerca de 35 cm/s para as duas camadas (veja-se a Figura 2). As direcções ENE-E são aquelas em que a velocidade média é mais elevada. O valor mínimo é, cerca de, 5 cm/s existe em torno das direcções N e S. Isto deve-se a que nestas direcções o escoamento é devido principalmente à acção da maré.

Com excepção de poucas direcções, a velocidade média é superior no Inverno, atingindo uma diferença de 10 cm/s nas direcções E e W, na camada 2. Na camada 1 as maiores diferenças são atingidas na direcção ENE e WSW, com, cerca de, 5 cm/s.

Verifica-se ainda que existe uma probabilidade maior de ocorrência de velocidades superiores a 50 cm/s no Inverno que no Verão. Este aspecto tem importância na mobilização de sedimentos de fundo na zona do Bota Fora.

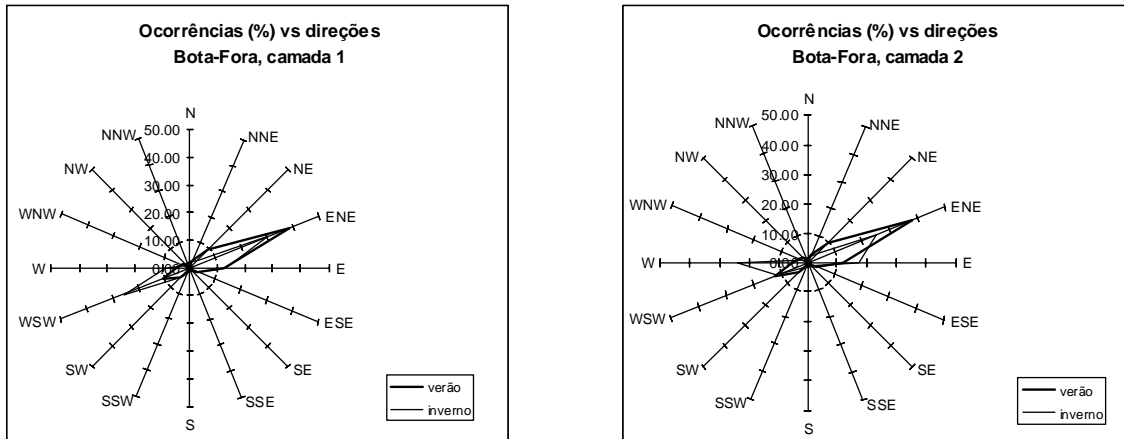


Figura 1 - Correntes, Bota Fora. Comparação entre as ocorrências da velocidade por rumos, nas duas camadas - Ago. a Out. 1999 e Dez. 1998 a Fev. 1999

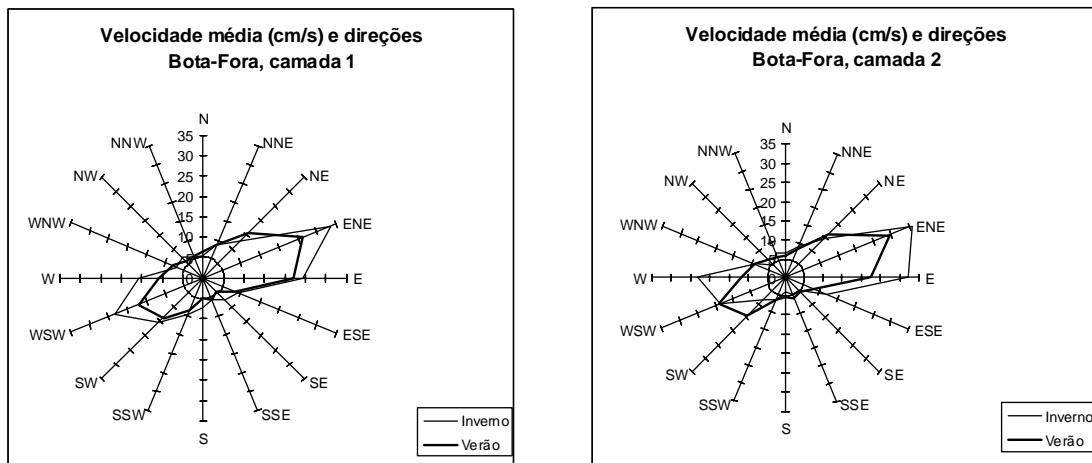


Figura 2 - Correntes, Bota Fora. Comparação entre a velocidade média por rumos, nas duas camadas - Ago. a Out. 1999 e Dez. 1998 a Fev. 1999

### 3 - MODELO CONCEPTUAL

A estrutura hidrodinâmica da zona litoral da Baixada Santista não parece ter alterações significativas entre o Inverno e o Verão. Assim, julga-se poder afirmar que, durante todo o ano, a hidrodinâmica litoral da Baixada Santista, na zona compreendida entre as profundidades de 25 a 30 m e a costa (excluindo a Baía de Santos), é a soma dos seguintes efeitos:

- Corrente com intensidade de 30 a 100 cm/s e direcção nordeste forçada pelos ventos do quadrante SW a SSE;

- Corrente com intensidade de 30 a 80 cm/s e direcção sudoeste forçada pelos ventos do quadrante SE a NE;
- Corrente com intensidade de 5 a 15 cm/s e direcção de nordeste induzida pelo gradiente de pressão baroclínico de uma frente de densidade local;
- Circulação da maré gerando correntes com intensidade inferior a 10 cm/s e direcções variáveis.

Acresce a este modelo a grande homogeneidade na vertical das correntes na zona circundante dos possíveis locais para descarte de lodo e nas zonas mais próximas da costa.

## **4 - MODELAÇÃO HIDRODINÂMICA**

### **4.1 - Considerações gerais**

A presente aplicação da modelação hidrodinâmica e de transporte à zona costeira da Baixada Santista baseou-se no sistema MOHID. O sistema de modelos MOHID, originalmente desenvolvido no Instituto Superior Técnico, compreende um conjunto de módulos capazes de, para além da hidrodinâmica, simular fenómenos de dispersão (abordagens lagrangeana e euleriana), qualidade da água e transporte de sedimentos (coesivos e não coesivos). Todos estes módulos apresentam a particularidade de poderem ser utilizados integrados nos códigos MOHID2D ou MOHID3D ou trabalharem isoladamente, utilizando neste caso valores de correntes fornecidos por ficheiros externos.

### **4.2 - Módulo hidrodinâmico bidimensional - MOHID2D**

MOHID2D é um modelo hidrodinâmico bidimensional, integrado na vertical. Embora se trate de um modelo 2D permite a consideração simultânea de ramos 1D para a simulação de escoamentos em rios por exemplo. Este modelo resolve as equações para águas pouco profundas (*shallow water equations*), usando um algoritmo semi - implícito, baseado em diferenças finitas, e permite a simulação de escoamentos produzidos por diferentes agentes forçadores como sejam a maré, o vento ou as ondas produzidas pelo vento (veja-se NEVES, 1985).

### **4.3 - Módulo de transporte lagrangeano**

O módulo de transporte lagrangeano do sistema do modelos MOHID tem diversas aplicações, possibilitando a simulação do movimento de traçadores com determinadas propriedades, com base num campo de velocidades calculado com os módulos hidrodinâmicos 2D ou 3D.

Os traçadores podem ser utilizados para simular os mais diversos tipos de fenómenos como sejam, por exemplo, a dispersão de efluentes, o deslocamento de manchas de resultantes de acidentes, a qualidade da água, fenómenos ecológicos com simulação em grandes caixas, etc.

O módulo de transporte lagrangeano apresenta-se como uma ferramenta privilegiada de integração em estudos de processos multi-disciplinares com objectivo de compreender fenómenos que tenham uma vertente hidrodinâmica, química e biológica. Mais detalhes sobre este modelo podem consultar-se em LEITÃO (1997).

### **4.4 - Aplicações na zona de Santos**

O módulo MOHID2D já tinha sido aplicado anteriormente numa zona mais restrita da Baixada Santista, abrangendo apenas a zona estuarina e simulando apenas o efeito da maré

(BERZIN *et al*, 1997 e BERZIN *et al*, 1999). Na presente aplicação foi utilizado um esquema de modelos encaixados de forma a simular as correntes produzidas pelo vento a uma escala regional e a impor condições de fronteira realistas num modelo local. Todas as simulações de transporte foram posteriormente efectuadas no modelo local.

#### 4.5 - Batimetrias

Para o modelo geral construiu-se uma malha de cálculo abrangendo a quase totalidade da costa do estado de S. Paulo (Figura 3). Esta malha de cálculo tem malha de passo espacial variável, entre 500 e 4000 m, e um total de 20 664 pontos de cálculo.

O modelo local tem um passo espacial variável entre 100 e 450 m e um total de 48755 pontos de cálculo. A batimetria deste modelo local apresenta-se na Figura 4.

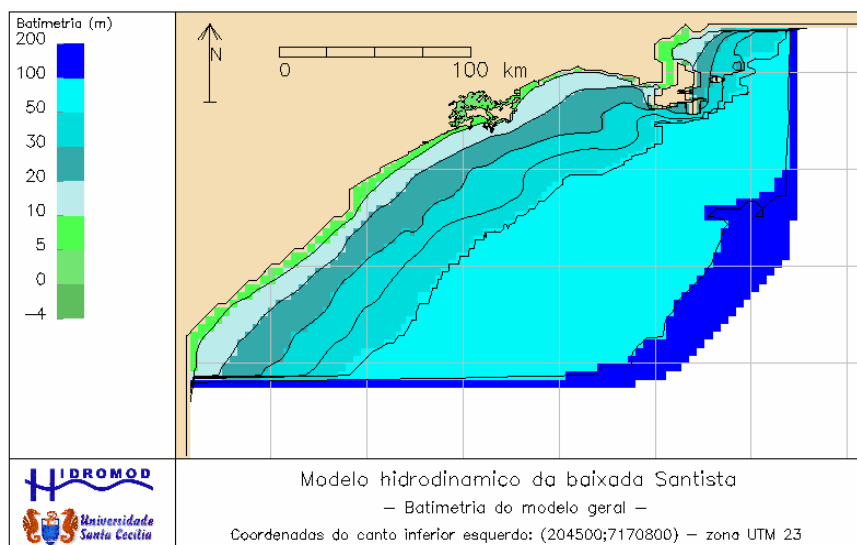


Figura 3 - Batimetria do modelo geral - Cananéia a Ubatuba

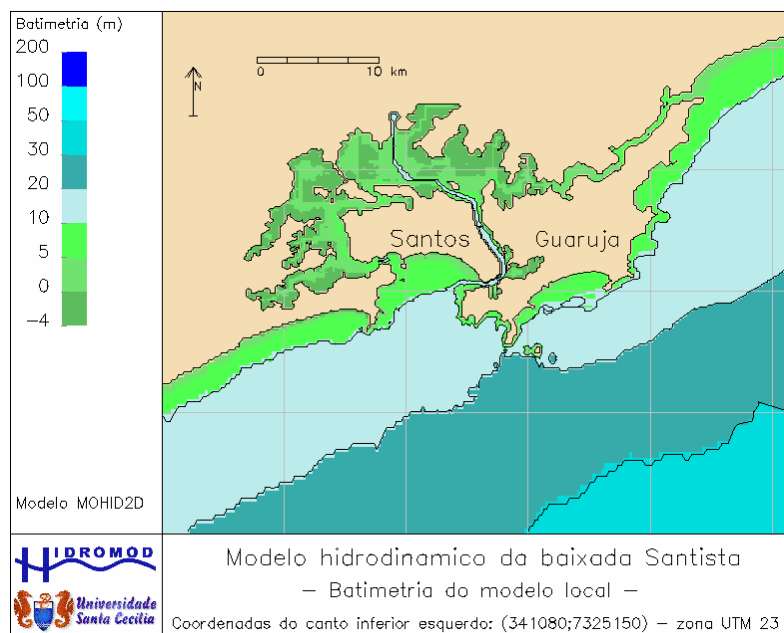


Figura 4 - Batimetria do modelo local

## **4.6 - Estratégia de modelação**

De acordo com o modelo conceptual definido em anteriormente, a estratégia de modelação adoptada foi a de garantir que eram simulados os aspectos mais importantes e para os quais existiam dados quer para forçar o modelo quer para o calibrar.

Assim, optou-se por uma modelação barotrópica (não incluindo os efeitos de variação da densidade) e bidimensional. A primeira opção deve-se a que o forçamento hidrodinâmico induzido pela variação de densidades é muito menos importante que o forçamento pelo vento e pela maré, na zona do estudo. Os erros que a sua não consideração introduzem terão a ver principalmente com a fase da inversão das correntes e com a corrente que se estabelece em condições de calmaria.

A opção de modelação bidimensional, com o módulo MOHID2D do sistema MOHID, deve-se a que o escoamento apresenta grande homogeneidade na zona do estudo. Embora este aspecto não seja correcto em toda a área abrangida no modelo geral ele é muito aproximado no modelo local, que é o mais importante. A rapidez de cálculo foi outro dos aspectos importantes na opção pela modelação bidimensional quer no modelo geral quer no modelo local.

Assumiu-se o vento constante no espaço mas variável no tempo e utilizaram-se séries temporais medidas em ilhas nas proximidades de Santos para forçar o modelo.

Utilizaram-se medidas de níveis na Laje da Conceição (ilha próxima de Santos) e na Baía de Santos para gerar um conjunto de constantes harmónicas de maré a aplicar na fronteira do modelo geral. Estas constantes foram determinadas de modo a gerarem naqueles dois locais variações de níveis de maré idênticos aos medidos com origem astronómica.

O modelo geral apresentará forçosamente erros devido à consideração de um nível constante em toda a fronteira. No entanto, o mais importante no forçamento da maré é que o nível de maré na zona do modelo local seja aproximada do nível medido e que as correntes geradas por algum desequilíbrio nas condições de fronteira sejam suficientemente afastados do modelo local para não afectarem os resultados.

## **4.7 - Calibração do modelo**

### **4.7.1 - Correntes**

Como a modelação está baseada na utilização de um modelo geral e de um modelo local, ou sub-modelo, um dos aspectos a verificar é se os dois apresentam resultados semelhantes nas zonas de cálculo sobrepostas. Isto mesmo pode ser confirmado comparando a Figura 5 com a Figura 6, para o caso de correntes com direcção preferencial nordeste. Para o caso de correntes com direcção preferencial sudoeste obtêm-se também resultados semelhantes. Para o forçamento utilizaram-se as medidas de vento na Ilha da Moela (próxima da Baía de Santos) dado serem estas as mais fiáveis.

A título de exemplo apresentam-se as comparações, para o local previsto para a deposição do lodo dragado no estuário (local referido como Bota-Fora), entre as medidas de correntes, filtradas para as duas camadas referidas anteriormente, e os resultados do modelo (cf. Figura 7 e Figura 8), podendo afirmar-se que, de forma geral os resultados do modelo representam a tendência das medidas. Nas Figuras relativas às componentes de velocidades nota-se que a nuvem de pontos de resultados se sobrepõe a nuvem de pontos das medidas revelando uma grande concordância para a direcção e intensidade das correntes.

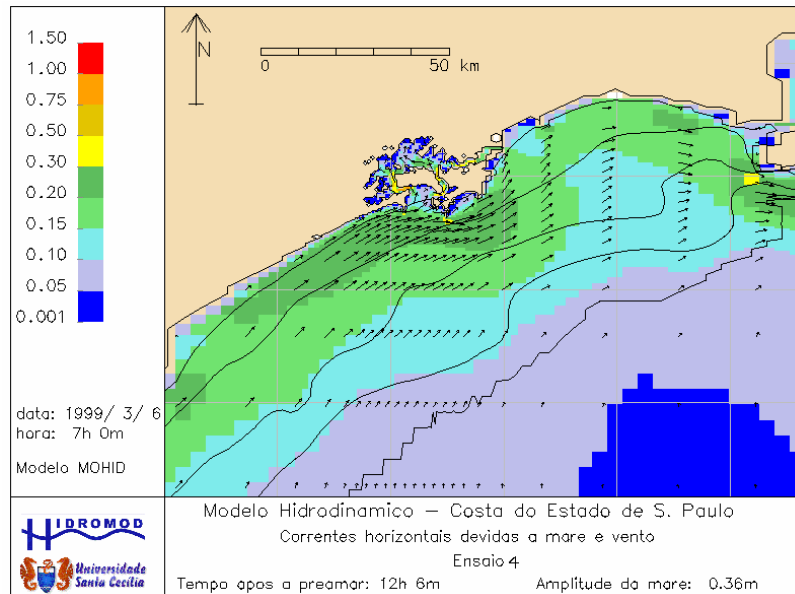


Figura 5 - Correntes no modelo geral – correntes de SW para NE

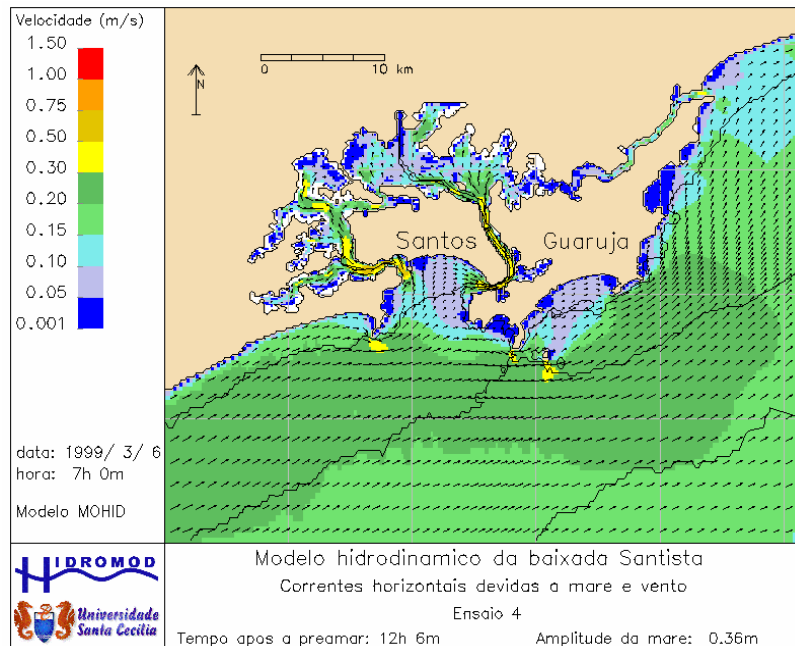


Figura 6 - Correntes no modelo local – correntes de SW para NE

Na Figura 7, podem observar-se algumas diferenças na direcção que podem ser explicadas pelo facto de representarem situações de calma ou com o vento proveniente de terra. O facto de se recorrer a condições de vento constante no espaço, pode ter como consequência uma representação deficiente das reais condições meteorológicas quando considerada a totalidade o domínio de cálculo.

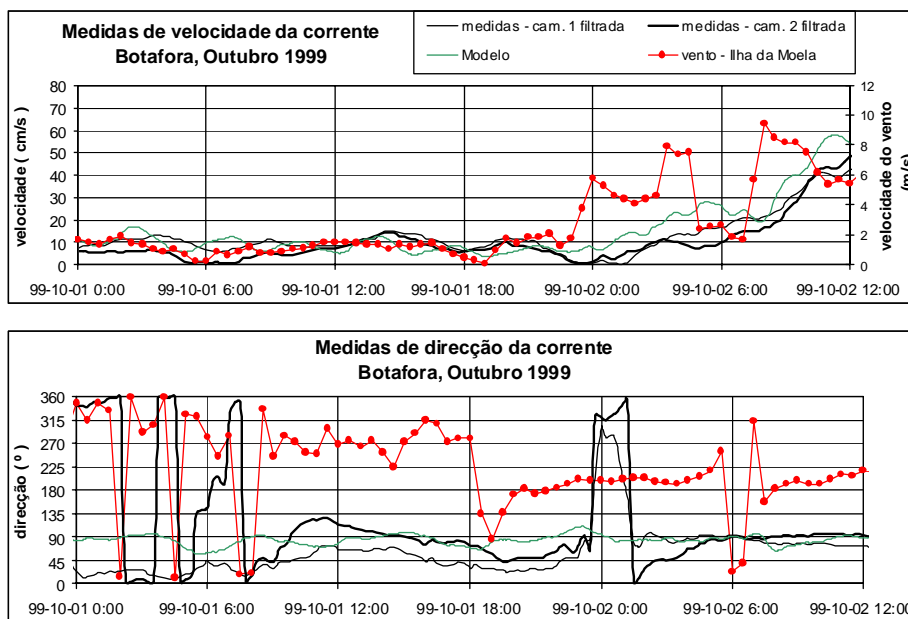


Figura 7 - Comparação de resultados do modelo com medidas no Bota-fora, 1 Out. a 2 Out. de 1999 com vento da Ilha das Cabras

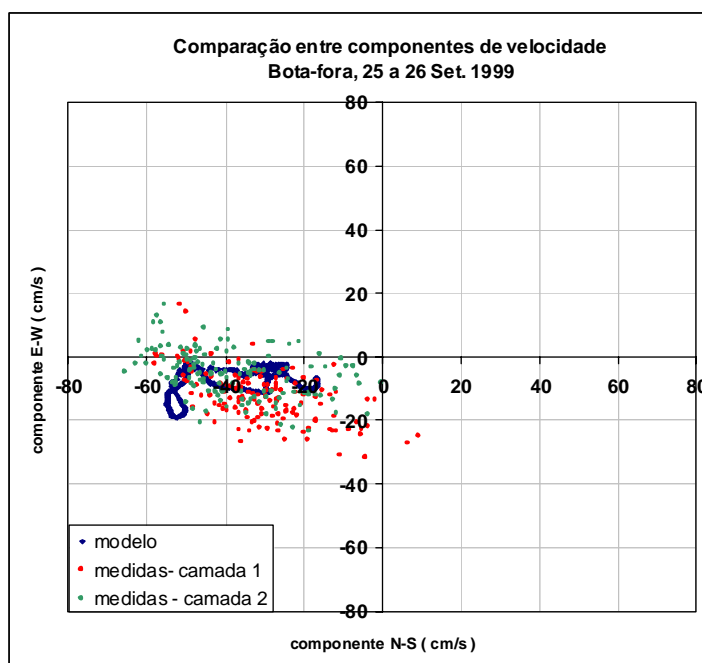


Figura 8 - Comparação entre componentes de velocidade de corrente medidas e resultantes do modelo. Bota-Fora, 25 a 26 Setembro de 1999

#### 4.7.2 - Traçadores radioativos

A companhia Brasileira de Tecnologia Nuclear realizou diversas medidas de dispersão de traçadores radioativos na região do Estuário de Santos, em colaboração com o Instituto de Pesquisas Hidroviárias do departamento Nacional de Portos e Vias Navegáveis e com o Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (AGUDO *et al.*, 1976, BANDEIRA *et al.*, 1981 e CBTN, 1974). Com essas medidas pretendeu-se estudar duas áreas de despejo para o material dragado da região do porto.



Os dados obtidos no âmbito de duas das campanhas de medidas, uma a sul da Ponta de Itaipu e outra a sul da Ponta da Munduba destas campanhas foram comparados com resultados do modelo MOHID.

Na altura dos lançamentos, os valores de velocidade instantânea situavam-se, em ambos os casos, no intervalo 0.15 e 0.3 m/s. O vento local não está descrito no relatório das medidas pelo que se assumiu um vento a actuar directamente nos traçadores consistente com o deslocamento medido dos traçadores.

Na Figura 9 e na Figura 10 apresentam-se os resultados da comparação entre as medidas e os resultados obtidos. Como se pode observar pela sobreposição das duas manchas, medidas e resultados, os resultados estão bastante próximos dos dados obtidos pelas medições. Verificou-se nestas comparações que a utilização de um perfil vertical linear para as velocidades horizontais era o que conduzia a resultados mais próximos dos medidos.

A forma das manchas obtidas pelas medidas, provavelmente, deve-se à forma como foi feita a injeção, aliado a um campo variável de velocidades de vento. No modelo foi usado um campo de velocidades constante devido à falta de informação sobre a sua evolução. A deslocação dos traçadores simulados mostra que a orientação da nuvem e velocidade de deslocação estão bastante próximas das obtidas pelas medições.

Os resultados obtidos para a comparação de correntes e para a comparação com as medidas de deslocamento dos traçadores radioativos mostram a capacidade do modelo hidrodinâmico e de transporte para reproduzir as medidas. Com as medidas obtidas sabe-se quais os valores característicos do local. Por outro lado, com os resultados aqui apresentados verifica-se que o modelo é capaz de reproduzir aqueles valores.

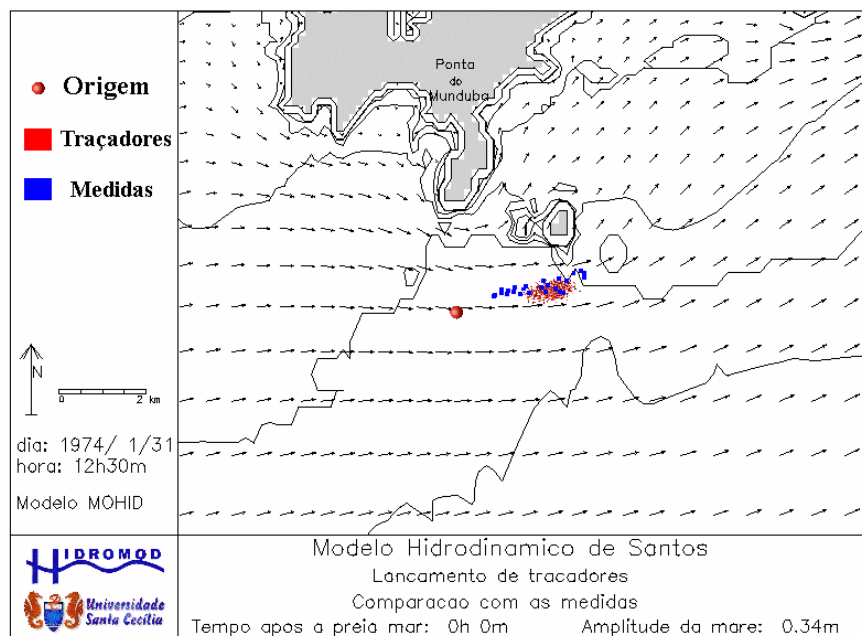


Figura 9 – Comparação entre as medidas e os resultados do modelo, ponta do Munduba, 12:30h dia 31 de janeiro de 1974

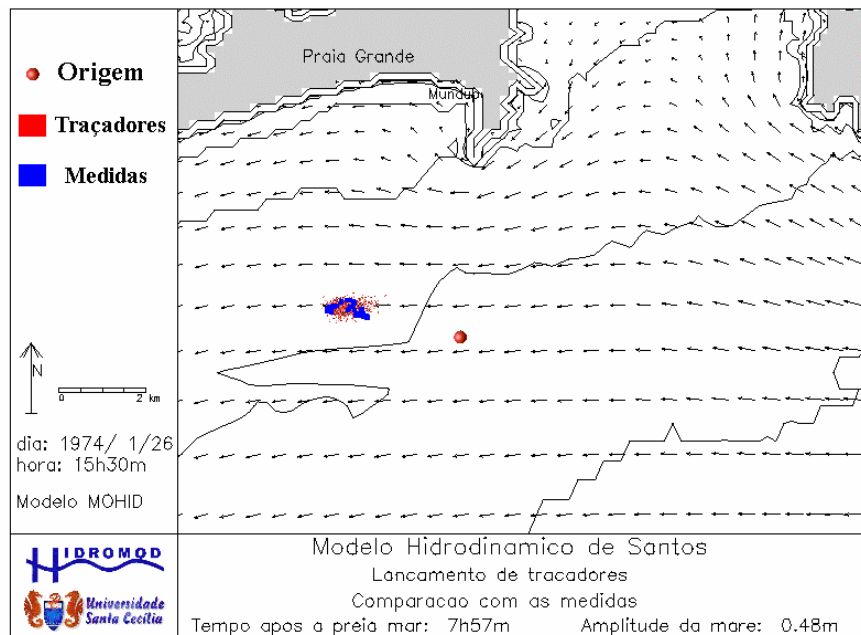


Figura 10 - Comparação entre as medidas e os resultados do modelo, ponta de Itaipu, 15:30h dia 26 de janeiro 1974

## 5 - DEPOSIÇÃO DE LODO DRAGADO

### 5.1 - Descrição dos processos

O lodo depositado no mar tem dois tipos de comportamento em função de diversos aspectos relacionados com as características do lodo e com o processo de compactação durante o transporte: A maior parte do lodo deverá depositar-se no fundo logo no acto do despejo e uma parte do lodo fica suspensão. A relação entre a parcela que se deposita e a que fica em suspensão é variável sendo as duas parcelas objecto de estudo nas secções que se seguem.

O lodo que se deposita no fundo será ressuspense na coluna de água em situações de velocidades da corrente elevadas. Quanto maior for a velocidade das correntes maior volume de sedimentos que entra em suspensão e é transportado para mais longe do local original. As velocidades instantâneas no fundo, na zona em estudo, são devidas às correntes geradas pelo vento e pela maré e ainda às velocidades orbitais das ondas de vento que se propagam no local.

#### 5.1.1 - Velocidade de queda

No “Estudo do comportamento dos sedimentos de fundo na Baía de Santos entre Junho/80 e Junho/81” (BANDEIRA, *et al.*, 1981), apresentam-se estimativas das velocidades de queda para os sedimentos. Estas velocidades foram obtidas para diversas amostras recolhidas na Baía de Santos e são em regra superiores a 0.1 mm/s. Neste estudo, utilizou-se a velocidade de queda de 0.1 mm/s na generalidade das simulações, tendo ainda sido testado num dos cenários uma velocidade de 0.05 mm/s. Caso as velocidades de queda para o lodo a descartar sejam superiores, a área de dispersão do lodo de fundo e do lodo em suspensão será menor.

### 5.1.2 - Tensão crítica de erosão e de deposição

Embora seja possível afirmar que os sedimentos são continuamente depositados e removidos do fundo, a maior parte dos modelos (incluindo o deste trabalho) consideram que os dois processos não ocorrem simultaneamente. Nestes modelos, assume-se que, quando a tensão de corte no fundo é inferior a um valor crítico de deposição, as partículas sedimentam e quando a tensão de corte no fundo é superior que um valor mínimo, a que chamaremos tensão crítica de erosão, as partículas são erodidas ficando novamente em suspensão.

As tensões críticas de erosão e deposição são habitualmente distintas para cada local e cada tipo de sedimentos. Os valores encontrados na bibliografia para a tensão de corte crítica de deposição são entre 0.04 e 0.2 Pa. Para a tensão de corte crítica de erosão encontram-se valores de 0.08 a 0.5 Pa. Neste trabalho foram utilizados valores de 0.1 e 0.2 Pa, para as tensões críticas de deposição, e de 0.3 e 0.4 para as tensões críticas de erosão.

### 5.2 - Lodo do fundo

Os cenários de simulação definidos para a dispersão de lodo do fundo representam situações extremas que foram medidas no local. Na Figura 11 e na Figura 12 apresentam-se as condições de correntes e níveis dos ensaios efectuados, que são referidos como ensaios 1 e 2. Estas situações de correntes e níveis foram seleccionadas por representarem condições típicas na zona e que provocam condições de dispersão do lodo com direcções opostas.

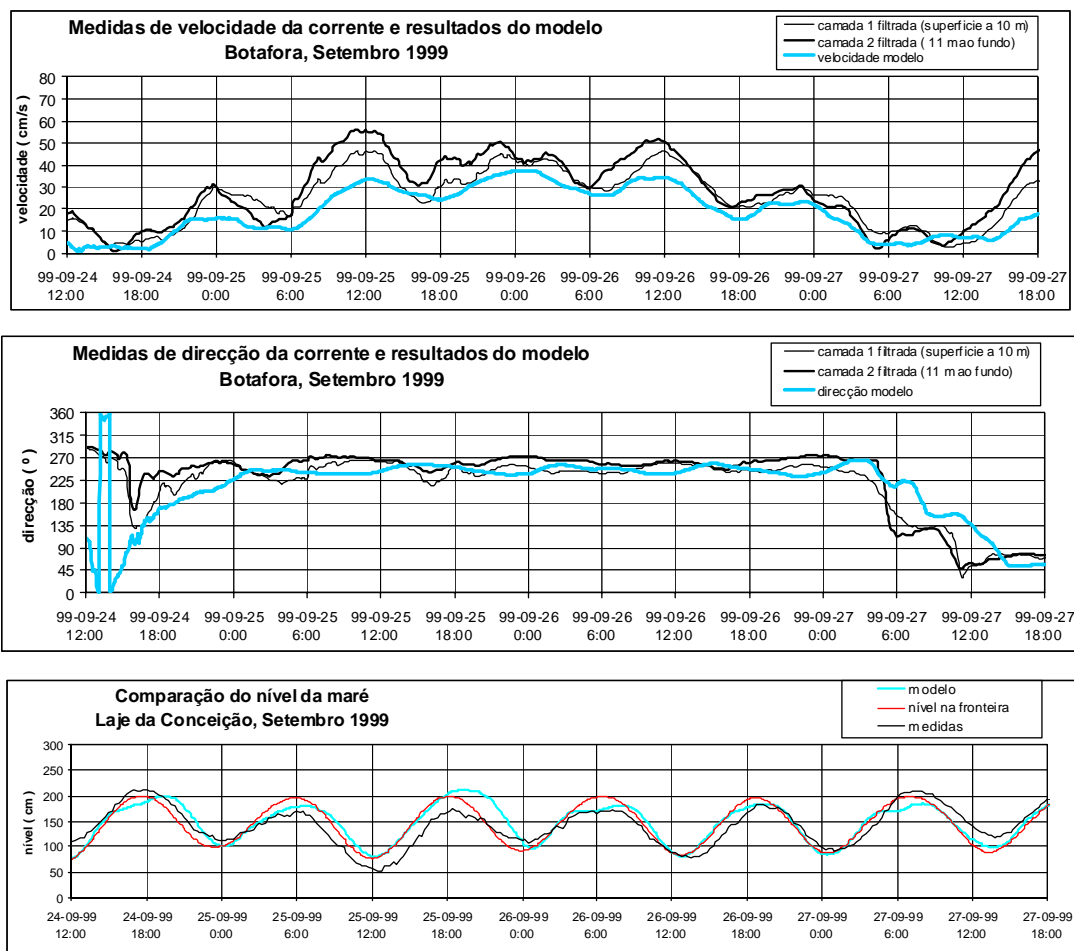


Figura 11 – Velocidades, direcções e níveis para o período simulado no ensaio 1

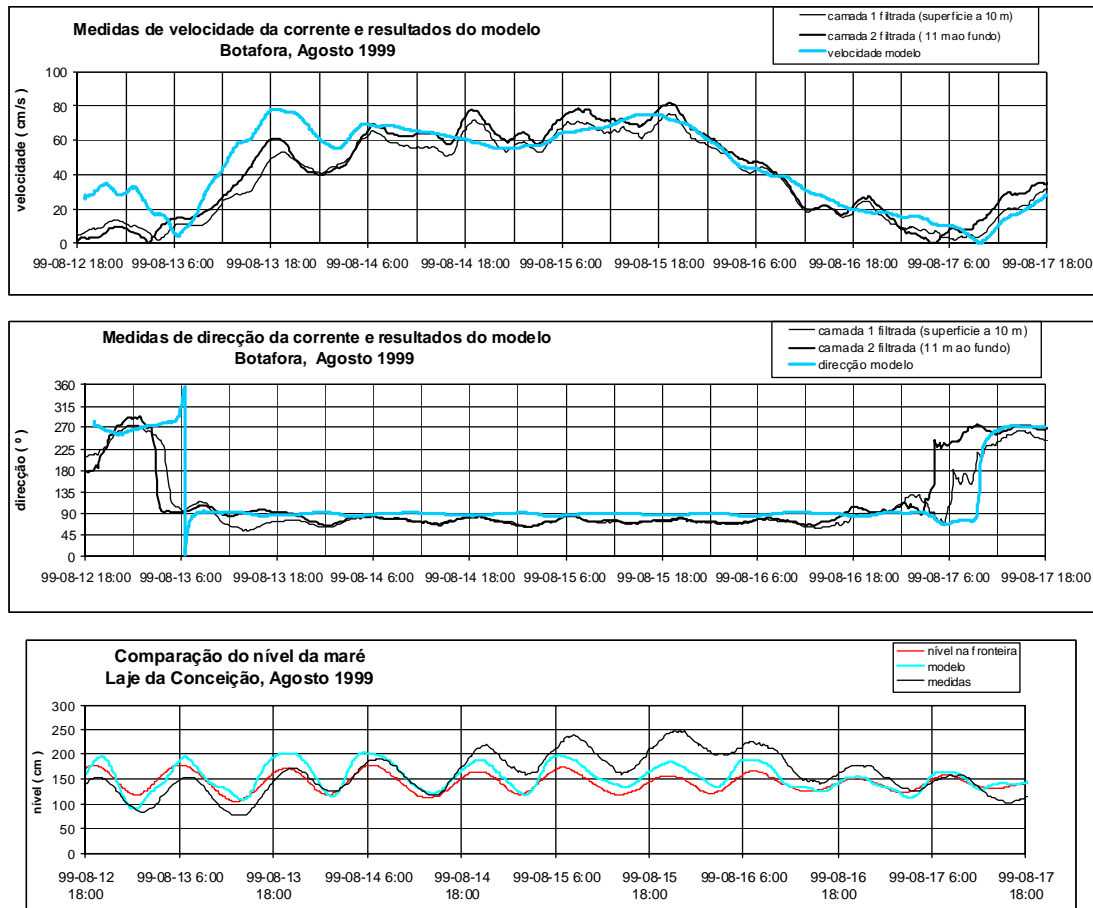


Figura 12 – Velocidades, direcções e níveis para o período simulado no ensaio 2

Nestes ensaios de dispersão do lodo de fundo, foi utilizado um perfil vertical de velocidades constante, sendo a velocidade horizontal igual na superfície e no fundo. Esta hipótese induz maior dispersão do que a de considerar uma velocidade no fundo menor que a da superfície. Nas campanhas de medidas foram detectadas diversas situações em que estas velocidades eram muito semelhantes.

No início da simulação o lodo do fundo é colocado em suspensão na coluna de água, muito próximo do fundo, e posteriormente vai-se dispersando em suspensão ou depositando em função da velocidade da corrente e de acordo com o método atrás descrito. Em termos numéricos este processo é simulado com traçadores lagrangeanos que são colocados em suspensão junto ao fundo do fundo à taxa de 150 traçadores por hora.

Verificou-se que nos casos em que a tensão crítica de deposição é maior a área de dispersão dos sedimentos será menor. Por outro lado, para uma tensão crítica de erosão maior também a dispersão será menor já que a erosão dos sedimentos de fundo se dá para velocidades de corrente maiores. Apresentam-se na Figura 13 e na Figura 14 resultados para o ensaio 1 e para dois dos oito locais de deposição de lodo simulados. Estas simulações foram obtidas para tensões críticas de deposição e de erosão de 0.1 e 0.3 Pa, respectivamente. A velocidade de queda utilizada foi de 0.1 mm/s. Os resultados apresentados são obtidos para o final do período de simulação representado na Figura 11.

Os resultados obtidos para a zona de deposição de traçadores resultante do ensaio 2 apresentam-se na Figura 15 e na Figura 16, para duas das oito origens simuladas. Estes

resultados foram obtidos com os mesmos parâmetros de simulação do ensaio 1 e são obtidos no final do período de simulação representado na Figura 12.

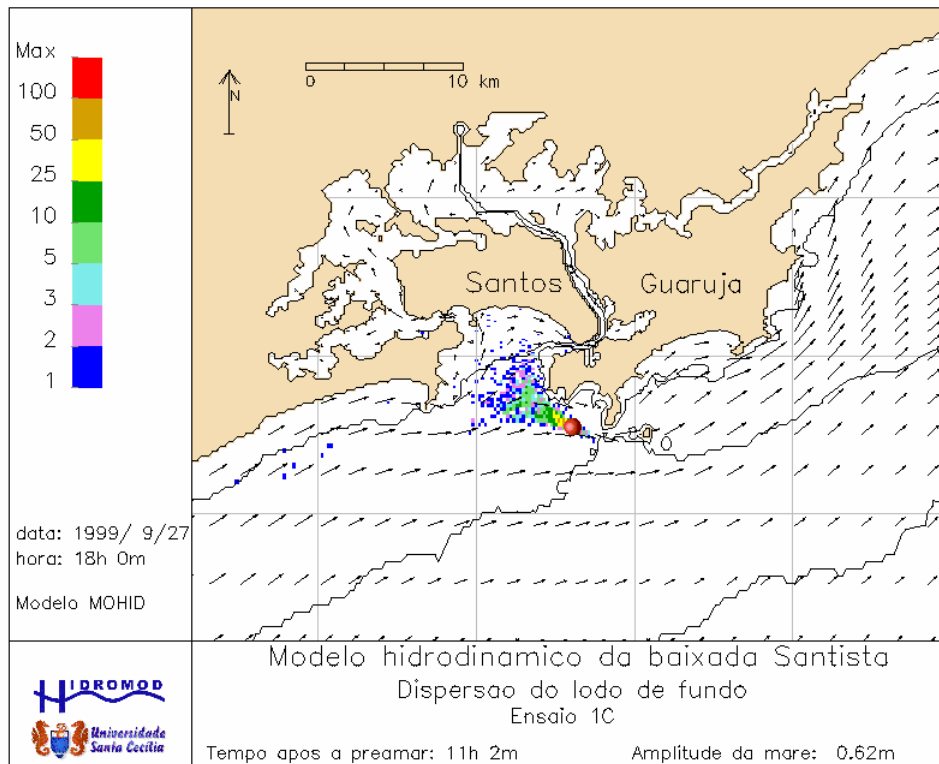


Figura 13 – Traçadores depositados no fundo – Ensaio 1, origem 1

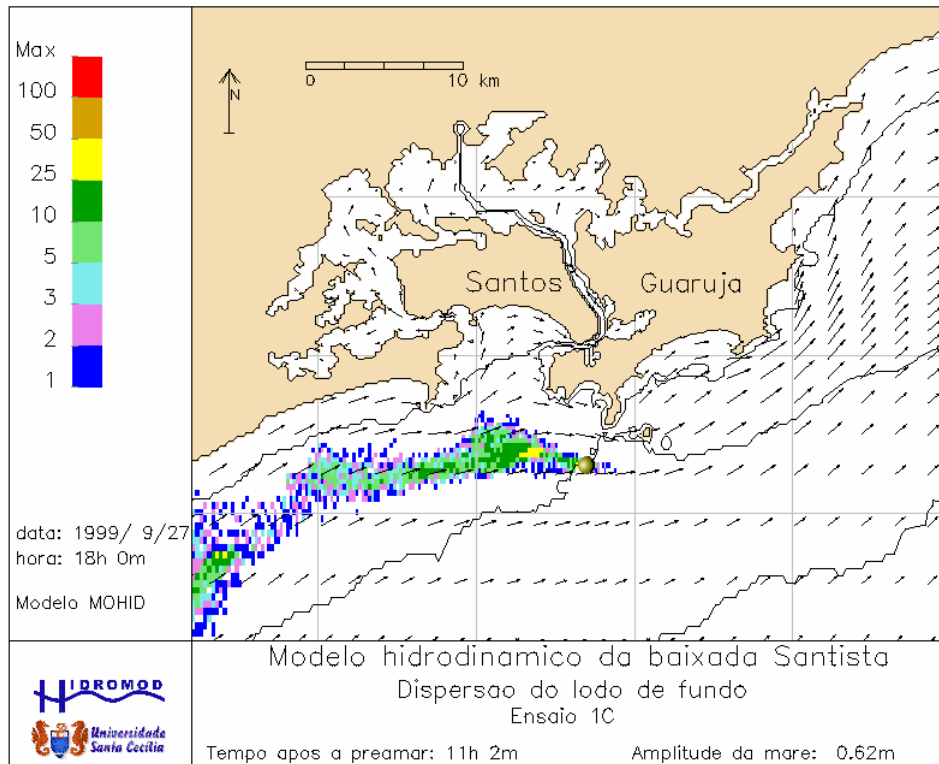


Figura 14 – Traçadores depositados no fundo – Ensaio 1, origem 5

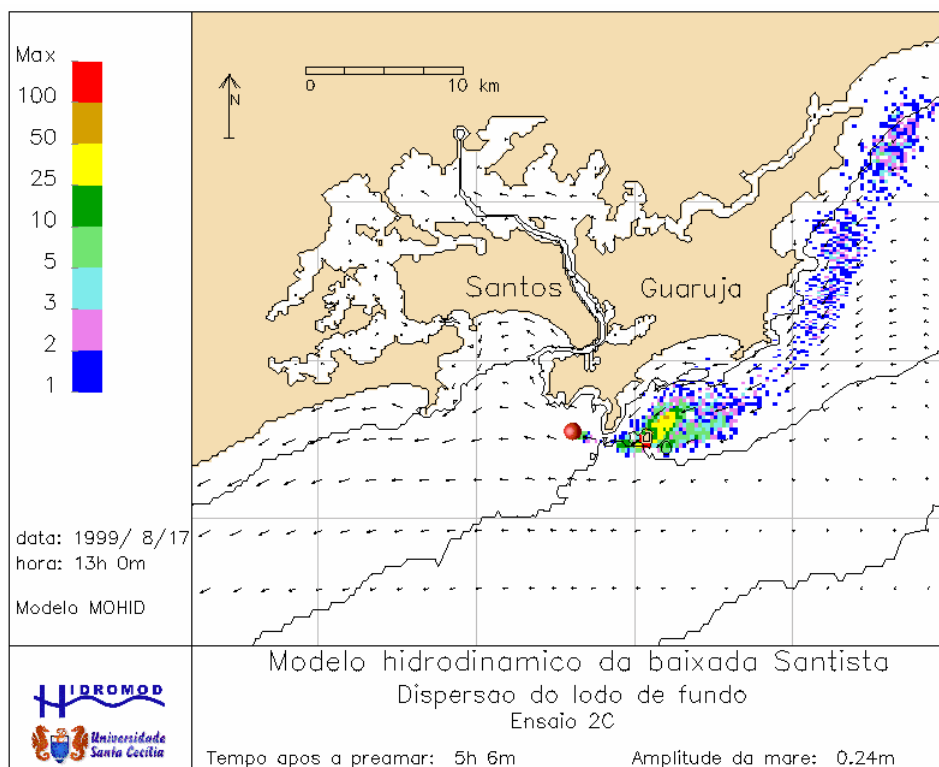


Figura 15 – Traçadores depositados no fundo – Ensaio 2, origem 1

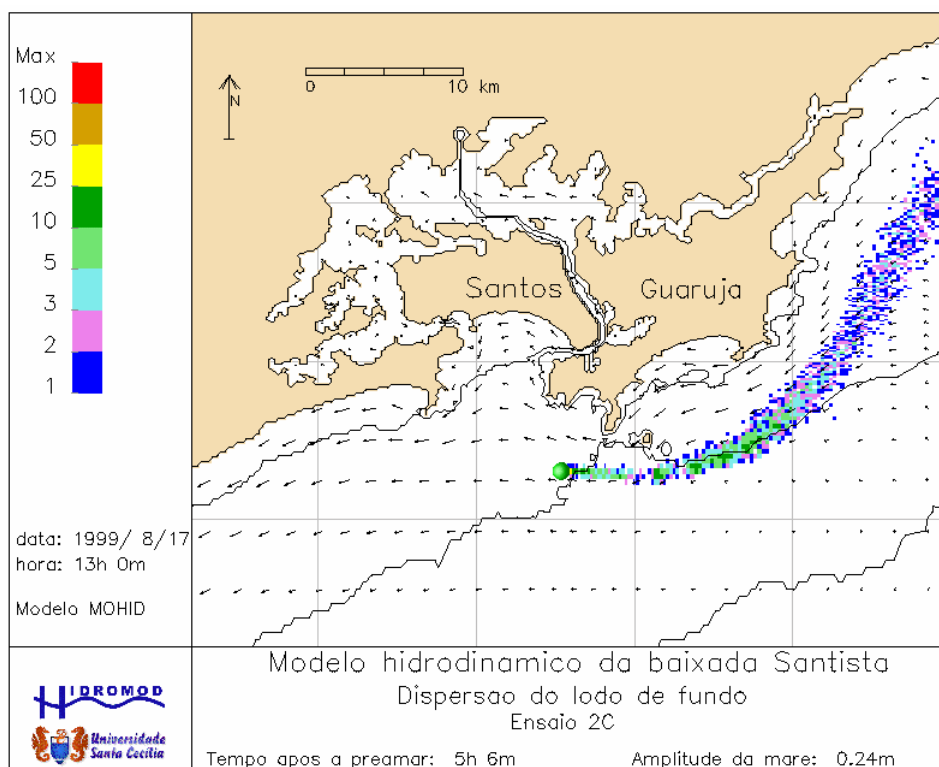


Figura 16 – Traçadores depositados no fundo – Ensaio 2, origem 3

A escala de cores apresentada nesta simulação refere-se ao número de traçadores depositados em cada célula de cálculo durante o tempo da simulação, tendo sido lançados cerca de 11 000 traçadores no ensaio 1 e de 18 000 traçadores no ensaio 2, para cada origem

simulada. Deve considerar-se que as células onde se depositam traçadores permitem delimitar a zona de influência do lodo de fundo do local de descarte. Este é o resultado mais importante deste ensaio. Por outro lado, o aumento do número de traçadores que se deposita em cada célula bem como a densidade de células onde houve deposição permitem visualizar as zonas para onde será mais provável a dispersão do lodo de fundo.

### 5.3 - Lodo em suspensão

Para a determinação da zona de dispersão do lodo que fica em suspensão no acto da deposição, foram efectuados ensaios para as duas direcções das correntes mais frequentes na zona do bota fora, e para as velocidades médias que ocorrem nessas duas direcções.

A modelação com traçadores lagrangeanos, utilizada para simular o processo de dispersão e deposição da parcela que fica em suspensão no ato do descarte, utilizou uma tensão de corte crítica de deposição de 0.1 Pa, uma tensão de corte crítica de erosão de 0.3 Pa e uma velocidade de queda de 0.1 mm/s. Foram também testados nestes ensaios perfis verticais linear e logarítmico da velocidade horizontal. O primeiro tem implícitas diferenças maiores das velocidades entre a superfície e o fundo, pelo que conduziu a uma dispersão maior da nuvem de lodo em suspensão. Os resultados que se apresentam foram calculados com este perfil porque se obtiveram zonas atingidas pelo lodo depositado mais extensas. Na Figura 17 apresenta-se um exemplo dos resultados obtidos para uma simulação com duração de 24h.

Verificou-se nos ensaios efectuados que as situações hidrodinâmicas que poderão induzir maiores deslocamentos do lodo em suspensão para a zona da costa serão sempre as de menores velocidades das correntes na direcção paralela à costa.

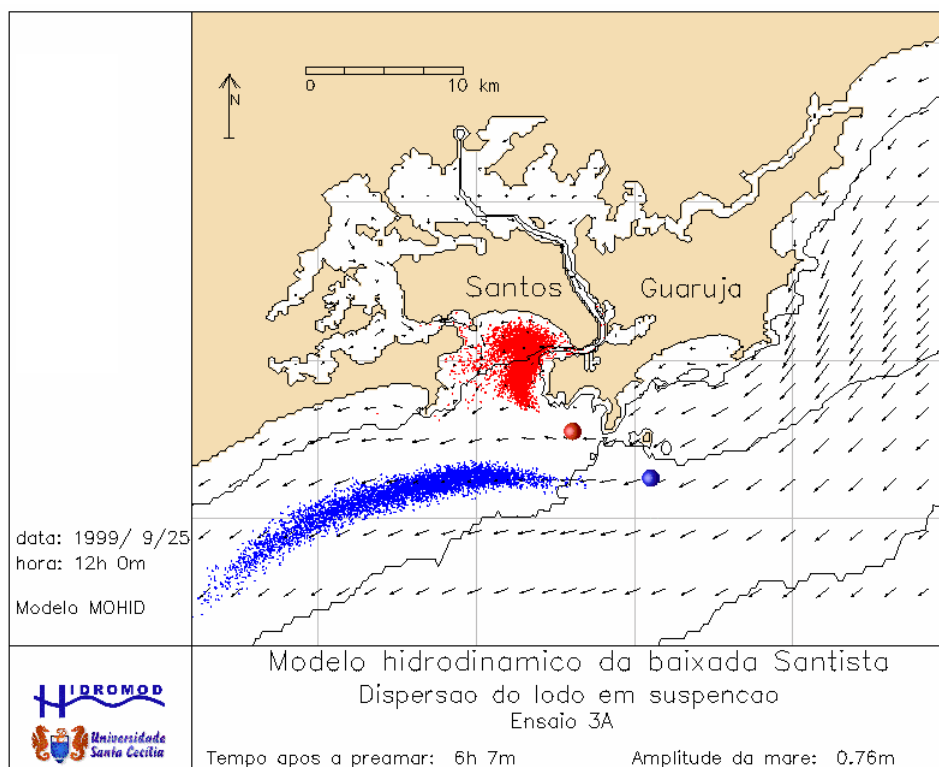


Figura 17 – Localização da mancha de traçadores simulando a dispersão de lodo em suspensão, 24 h após o depósito do lodo – ensaio 3, origens 1 e 2

## **6 - CONCLUSÕES**

### **6.1 - Campanhas de medidas**

As campanhas de medidas obtidas permitiram ter uma visão nova e muito aprofundada da estrutura hidrodinâmica da zona costeira da Baixada Santista, e em particular da zona utilizada para a deposição do lodo dragado no canal de navegação do Porto de Santos. Estão descritos neste artigo os aspectos mais importantes na hidrodinâmica da faixa entre a costa e os 30 m de profundidade - por ordem decrescente de importância: o vento, a maré e a densidade. Verificou-se que o regime de correntes no Inverno é semelhante ao do Verão, embora a velocidade das correntes marítimas seja superior. Detectaram-se situações em que as correntes, na batimétrica dos 20 m, podem ser superiores a 50 cm/s (1 nó) durante vários dias seguidos. Verificou-se nas medidas de Inverno e de Verão uma grande homogeneidade na vertical nos vectores das correntes.

### **6.2 - Dispersão do lodo de fundo**

O lodo que se deposita no fundo, habitualmente a parcela mais significativa do volume depositado, vai sendo dispersado pela acção conjugada das correntes marítimas e das ondas. Procurou-se avaliar neste estudo a zona de dispersão utilizando um modelo de transporte lagrangeano. Para cada local de depósito apresentou-se uma zona de possível dispersão do lodo de fundo. Assumiram-se algumas hipóteses desfavoráveis em termos do transporte de forma a obter a envolvente da zona de dispersão. As simulações efectuadas duraram vários dias com velocidades de correntes nas duas direcções mais significativas no local do Bota-Fora. Verificou-se que o lodo de fundo será disperso por áreas muito extensas e apenas para um dos locais testados essas áreas são próximas da costa.

### **6.3 - Dispersão do lodo em suspensão**

A dispersão da parcela do lodo que permanece em suspensão imediatamente após a deposição foi simulada de forma semelhante à do lodo de fundo. Neste caso, no entanto, o lançamento dos traçadores numéricos é feito em “nuvem” e próximo da superfície. Verificou-se que as zonas para onde as nuvens de lodo são transportadas e onde o lodo tem condições para se depositar são na maior parte do tempo semelhantes às zonas de dispersão do lodo de fundo.

## **REFERÊNCIAS**

- AGUDO, E. G., SANCHEZ, W., SANTOS, J. L., MERIGHI JR., A. & ALBUQUERQUE, A. M. (1976) - *Estudos de difusão turbulenta na costa do Guarujá, São Paulo, por meio de técnicas radioisotópicas*. São Paulo, Brasil, Instituto de Energia Atômica.
- BANDEIRA, J. V., BOMTEMPO, V. L., AUN, P. E., MINARDI, P. S. L. & PINTO, A. M. F. (1981) - *Estudo do comportamento dos sedimentos de fundo na Baía de Santos entre Junho/80 e Junho/81*. Nuclebrás, Divisão de Engenharia Ambiental, CDTN.
- BERZIN, G., LEITÃO, J. C. & NEVES, R. J. J. (1999) - *Modelação hidrodinâmica; uma ferramenta para a gestão de áreas costeiras: o caso do Estuário e Baía de Santos*. XIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Belo Horizonte, Brasil, ABRH.
- BERZIN, G., NEVES, R. J. J. & LEITÃO, J. C. (1997) - *Modelação matemática no Estuário de Santos e sua importância no controle da poluição por águas residuárias*, 19o Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, Foz do Iguaçu, Brasil, ABES.



- CBTN (1974) - *Relatório final sobre viabilidade de novas áreas de dragagem na região de Santos*. Companhia Brasileira de Tecnologia Nuclear, Instituto de Pesquisas Radioativas, Laboratório de Radioisótopos.
- INPH (1974) - *Campanha de medições na Baía de Santos*. Instituto Nacional de Pesquisas Hidroviárias, Divisão de Estudos e Levantamentos.
- LEITÃO, P. C. (1997) - *Modelo de dispersão lagrangeano tridimensional*. Dissertação para a obtenção do grau de Mestre em Ecologia, Gestão e Modelação dos Recursos Marinhos, Lisboa, Instituto Superior Técnico.
- MESQUITA, A. R.(1997) - *Marés, Circulação e Nível do Mar na Costa Sudeste do Brasil*. Instituto Oceanográfico, São, Paulo, Brasil, Universidade de São Paulo.
- NEVES, R. J. J. (1985) - *Étude expérimentale et modélisation mathématique des circulations transitoire et résiduelle dans l'Estuaire du Sado*. PhD Thesis, Université de Liège, Belgique.
- SONDOTÉCNICA (1977) - *Comportamento hidráulico e sedimentológico do Estuário Santista*.