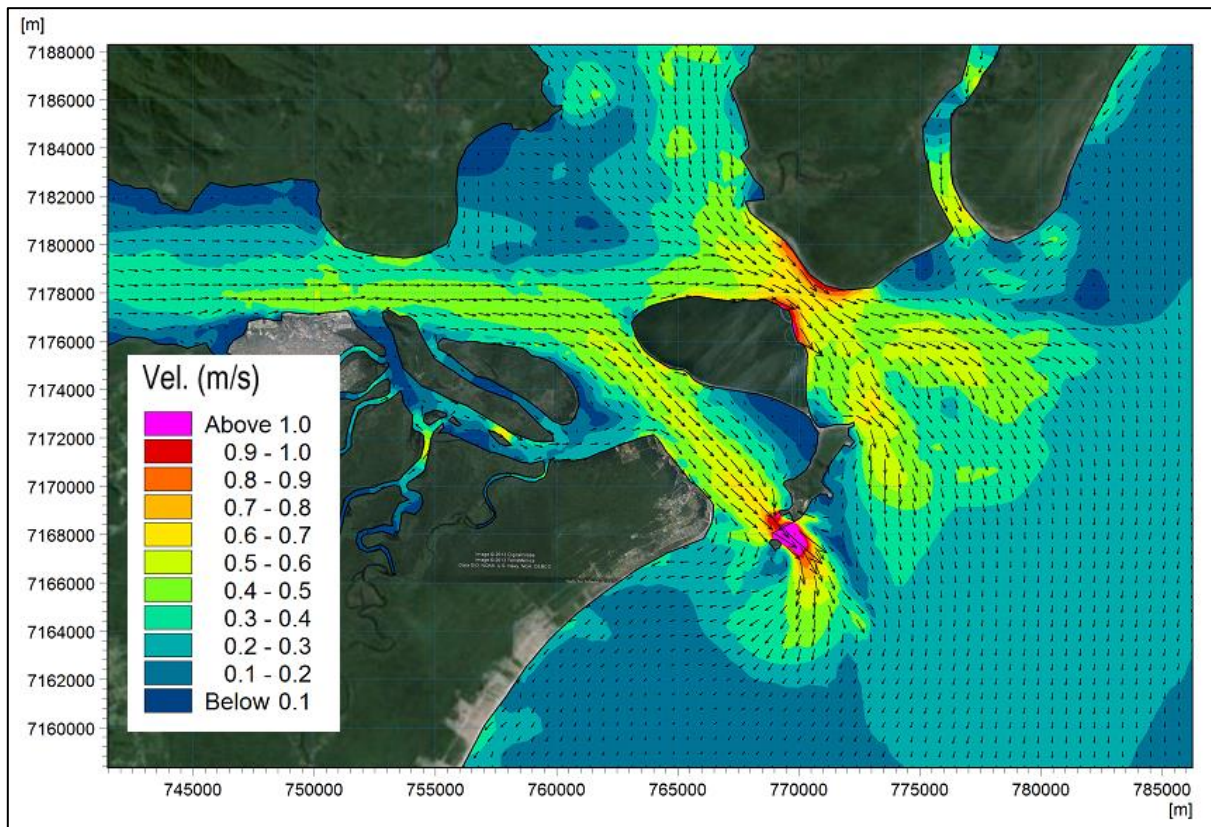




INPH : 007 / 2014

CÓDIGO: Paranaguá – 900/04

**ESTUDO DE SEDIMENTAÇÃO NO CANAL DE ACESSO
AO PORTO DE PARANAGUÁ – PR.**



INPH / SEP
Rio de Janeiro

FEVEREIRO / 2014



APRESENTAÇÃO

O Instituto Nacional de Pesquisas Hidroviárias – INPH, da Secretaria de Portos da Presidência da República, realizou estudos relativos ao projeto de dragagem do Porto de Paranaguá – PR, com a finalidade de analisar a acumulação de sedimentos no canal de acesso ao porto. Os estudos envolveram análises estatísticas de ondas, propagação de ondas até a costa, hidrodinâmica estuarina e costeira e taxas de assoreamento. O presente relatório apresenta os detalhes dos estudos realizados.

Atenciosamente,

Engº DOMENICO ACCETTA

Diretor do INPH



EQUIPE TÉCNICA

Coordenação Geral

Engº Domenico Accetta – Diretor do INPH

Engº Antonio Paulo dos Santos Pinto – Vice-Diretor do INPH

Equipe

Msc. Eng^a. Berenice Motta Vargas

Msc. Ocn. Rafael Paes Leme

Ocn. Reniel Dalbone

Msc. Ocn. Priscila Schilithz

Geo. Roberta Moreno

Msc. Ocn. Jesuéilton Ribeiro

Assistência técnica

Dr. Berry Elfrink – DHI Dinamarca



SUMÁRIO

| | | |
|--------|--|----|
| 1. | INTRODUÇÃO | 5 |
| 2. | PROJETO DE DRAGAGEM | 6 |
| 3. | CONDIÇÕES METEO-OCEÂNICAS | 10 |
| 3.1. | Ondas..... | 10 |
| 3.1.1. | Ondas na zona <i>offshore</i> | 10 |
| 3.1.2. | Ondas medidas | 12 |
| 3.2. | Vento..... | 13 |
| 3.3. | Maré | 13 |
| 4. | ONDAS EM ÁGUAS RASAS | 15 |
| 4.1. | Modelo de transformação de ondas..... | 15 |
| 4.2. | Calibração do modelo..... | 16 |
| 4.3. | Seleção de eventos de ondas..... | 18 |
| 4.4. | Modelo de ondas em águas rasas | 20 |
| 5. | HIDRODINÂMICA..... | 23 |
| 5.1. | Abordagem do modelo | 23 |
| 5.2. | Resultados das Modelagens Hidrodinâmicas | 23 |
| 6. | MODELAGEM DO TRANSPORTE DE SEDIMENTOS..... | 26 |
| 6.1. | Sedimentação no canal de acesso | 27 |
| 6.2. | Acumulação de material fino..... | 31 |
| 7. | CONCLUSÕES | 33 |
| 8. | REFERÊNCIAS | 34 |

ANEXO

DESCRIÇÃO DOS MODELOS MATEMÁTICOS

1. INTRODUÇÃO

O Instituto Nacional de Pesquisas hidroviárias (INPH), da Secretaria de Portos, elaborou um estudo para estimar as taxas de assoreamento no canal de acesso ao Porto de Paranaguá – PR. Essas análises complementam os estudos apresentados no Anteprojeto de Dragagem do Porto de Paranaguá (Relatório INPH 028/2013).

A área de estudo encontra-se localizada no litoral do Estado do Paraná, compreendendo a região costeira e o Complexo Estuarino de Paranaguá, conforme visualizado na Figura 1.1.

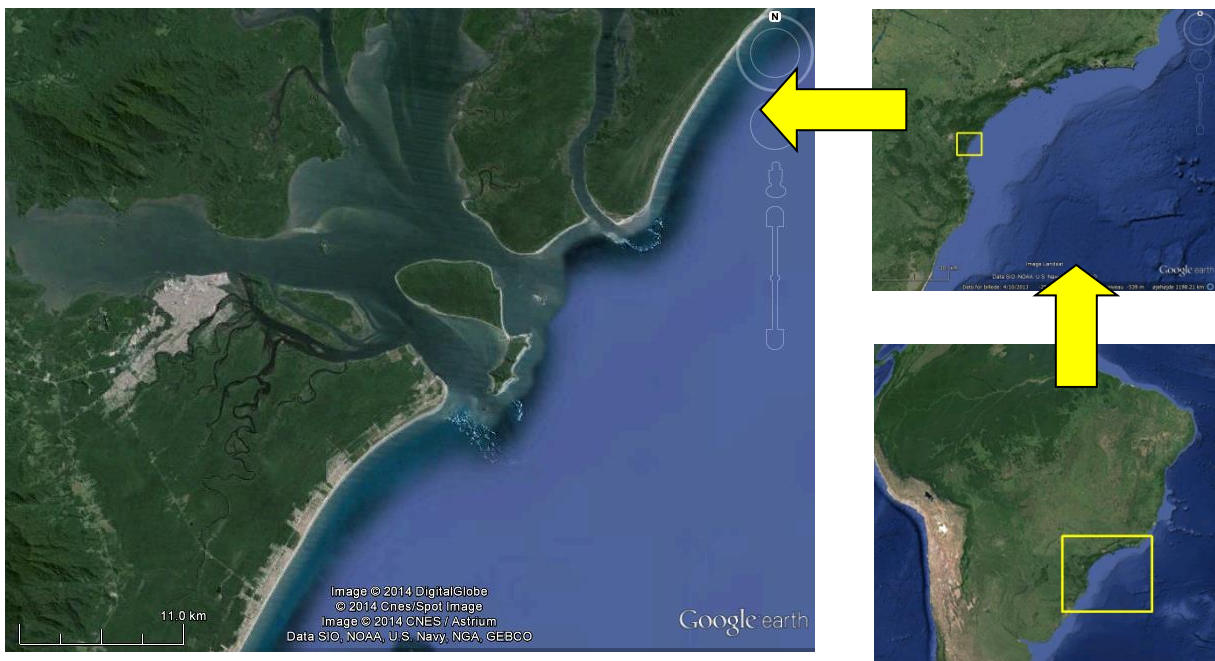


Figura 1.1 - Mapa de localização geográfica da área do empreendimento.

Neste estudo, foram analisadas as condições de ondas, correntes e os aspectos sedimentológicos possíveis de influenciar as variações nas taxas de assoreamento do canal de acesso ao porto. Como ferramenta, utilizou-se modelagem matemática de ondas, hidrodinâmica e de transporte de sedimentos.

2. PROJETO DE DRAGAGEM

A região a ser dragada para o acesso ao Porto de Paranaguá foi dividida em áreas. As subdivisões do Projeto Geométrico estão apresentadas na Figura 2.1.

O volume total a ser dragado é de cerca de 11.000.000 m³, conforme o Anteprojeto de Dragagem presente no Relatório do INPH 028/2013, com profundidades variando de 11m, no canal interno, a 16m, no canal externo.



Figura 2.1 - Arranjo geral

3. CONDIÇÕES METEO-OCEÂNICAS

Nesse capítulo, é apresentada a base de dados disponível relevante para o estudo da área de influência e entorno do empreendimento, abrangendo ondas, ventos, marés e correntes.

3.1. Ondas

3.1.1. Ondas na zona *offshore*

Os dados de ondas em águas profundas, utilizados neste estudo, foram obtidos do GROW (*Global Reanalysis of Ocean Waves*), programa de reanálise de dados pretéritos para geração de dados históricos de ondas, desenvolvido pela empresa americana de previsão meteorológica *Oceanweather Inc.* O GROW utiliza um modelo global de ondas capaz de gerar dados de alturas significativas, períodos de ondas, direções, dados espectrais e estatísticas, a partir de dados de ventos sobre a superfície marinha, a 10m de altitude, coletados por satélites da NOAA e por diversos centros de medições meteorológicas no mundo.

Apesar da extensa utilização dos dados gerados por este modelo global, em diversos estudos pelo Brasil e pelo Mundo, deve-se observar que são dados de ondas simuladas e não se originam de medições, devendo ser utilizados com critério.

Em geral, os dados de ondas profundas podem ser utilizados como condição de contorno de modelos de transformação de ondas até a região costeira, submetendo esses dados a uma calibração apropriada, através da comparação com dados de ondas medidos próximo a linha de costa.

Os dados de ondas cobriram o período de 1970 a 2011, e foram extraídos na coordenada geográfica de Lat. 26.875°S e Long. 47.500°W. A Figura 3.1 mostra a localização deste ponto. A rosa de ondas nesta posição está mostrada na Figura 3.2. Observa-se que as ondas de maiores alturas são provenientes da direção SSE.

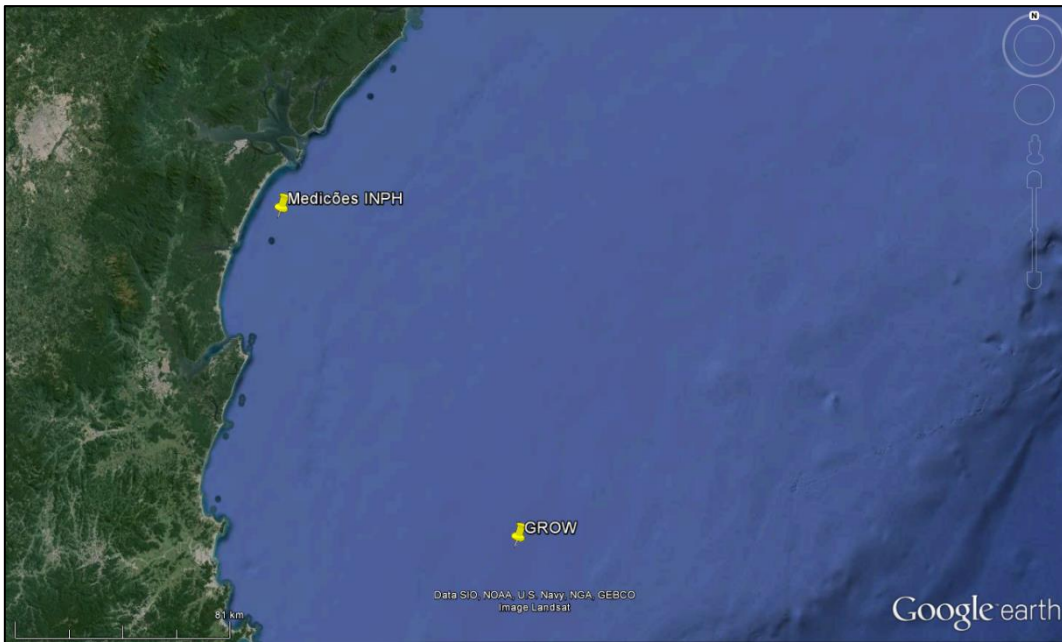


Figura 3.1- Localização dos dados de ondas

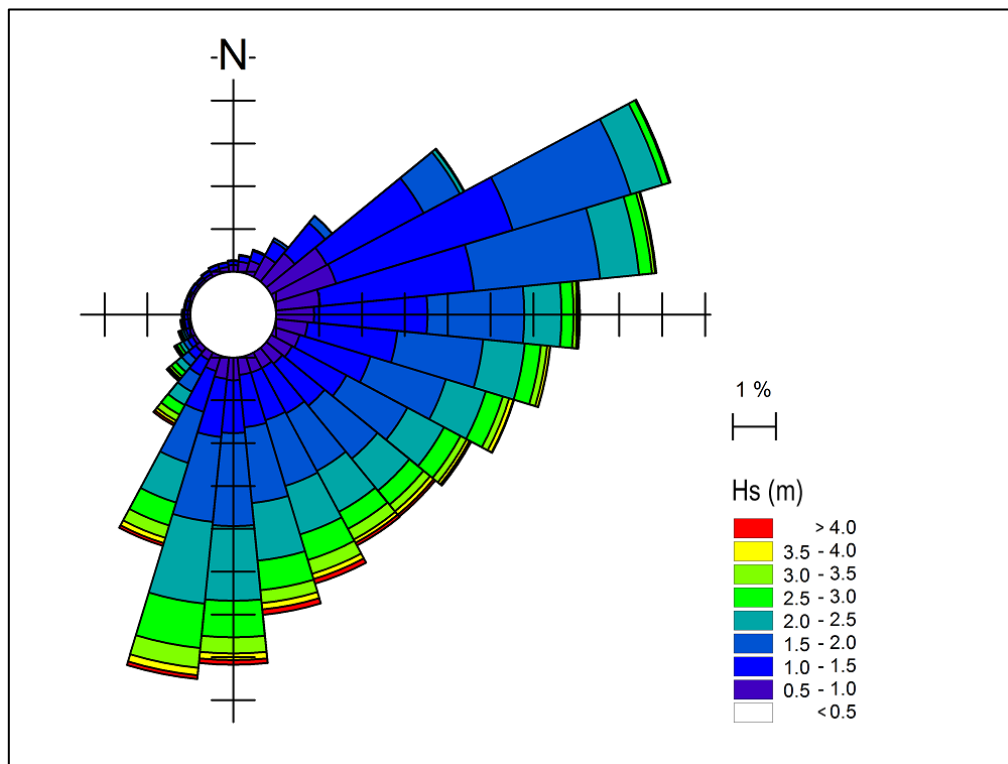


Figura 3.2- Rosa de ondas na área offshore.

3.1.2. Ondas medidas

Segundo acervo de dados de ondas presentes no INPH, conforme registrado nos relatórios INPH 34/1983 e 27/1985, uma campanha de medição de ondas foi realizada na região costeira próxima a Paranaguá, a partir de um ondógrafo do tipo *Waverider*.

Os dados de ondas foram medidos durante o período de 01/09/1982 a 31/08/1983, totalizando um ano de medições. Estas medições foram realizadas na posição de coordenada geográfica de Latitude 25° 46' 00" S e Longitude 048° 21' 00" W, em uma profundidade de cerca de 16 m. A posição das medições está apresentada na Figura 3.3.

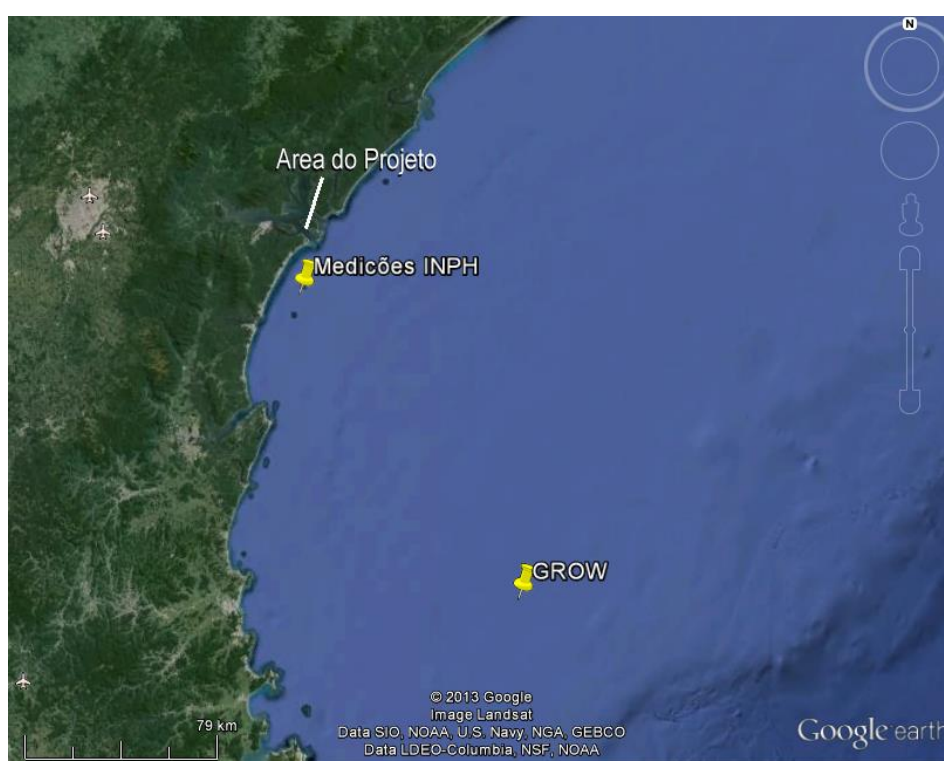


Figura 3.3- Posição das medições de ondas realizadas pelo INPH entre 1982 e 1983.

3.2. Vento

As condições de vento utilizadas neste estudo foram obtidas dos dados do GROW em águas profundas. A Figura 3.4 mostra a rosa de ventos gerada a partir destes dados, para o período de 1970 a 2011.

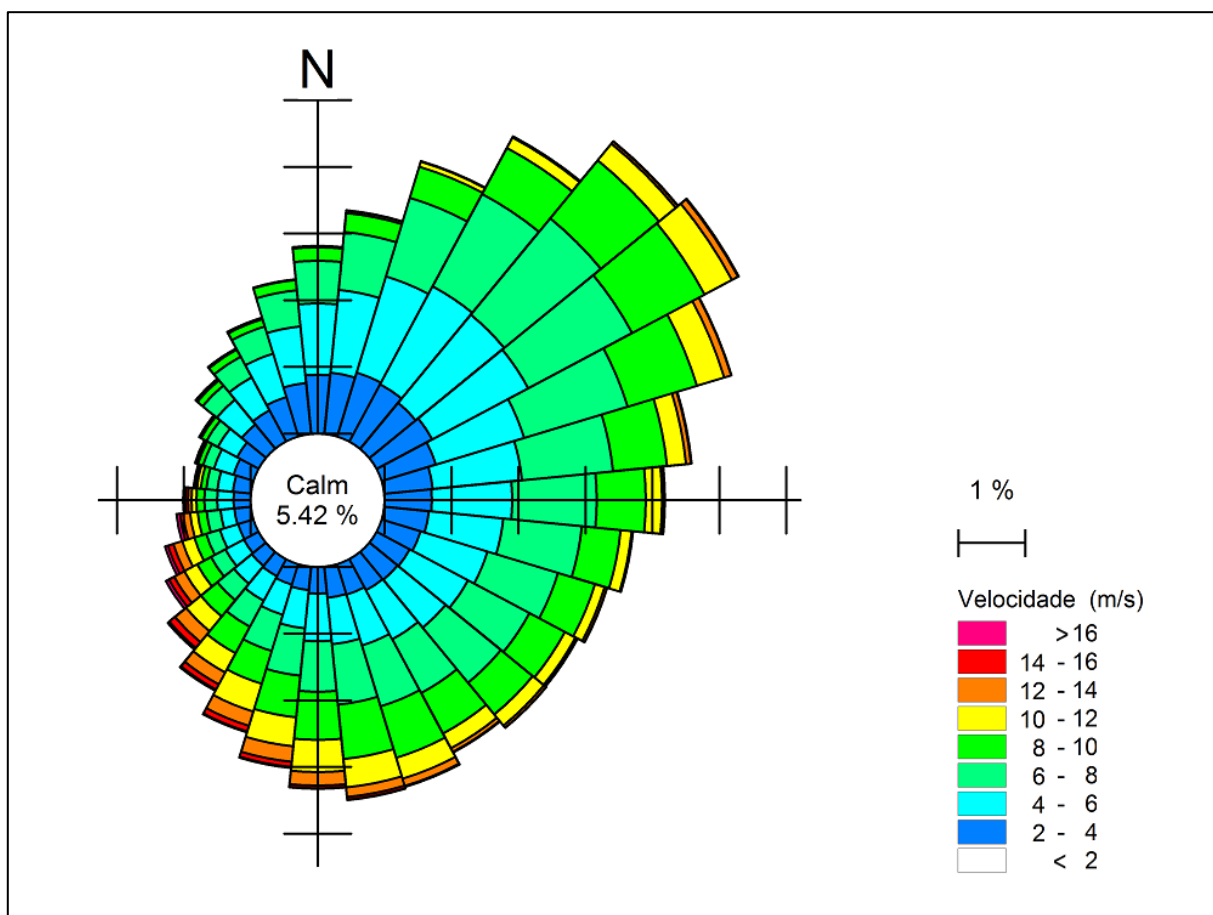


Figura 3.4- Rosa de ventos de 1970 a 2011, gerada a partir dos dados do GROW.

3.3. Maré

As elevações das marés foram calculadas a partir das constantes harmônicas publicadas pela Fundação de Estudos do Mar - FEMAR. A Figura 3.5 mostra um exemplo da variação do nível do mar calculada para o local.

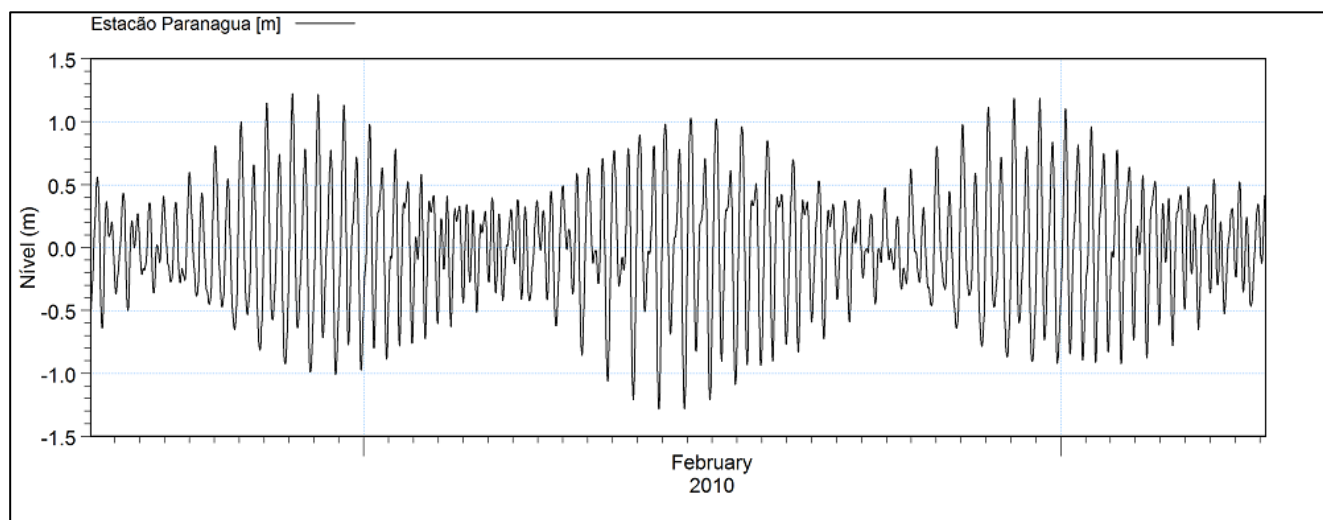


Figura 3.5 - Exemplo da variação da maré calculada a partir das constantes harmônicas para Paranaguá. (FONTE: FEMAR)

4. ONDAS EM ÁGUAS RASAS

A medição de ondas em Paranaguá, disponível para o estudo, cobre o período de apenas um ano, período relativamente curto quando se faz necessário calcular as estatísticas de ondas. Para aumentar o volume total de dados, e a confiabilidade na estatística de ondas da região, realizou-se um estudo de transformação das ondas do GROW de *offshore* até a região costeira.

O estudo de transformação foi realizado através de modelagem matemática, a partir do modelo espectral de ondas MIKE 21 SW. Ele representa o estado da arte na modelagem matemática das ondas em áreas costeiras e tem sido aplicado em numerosos estudos ao redor do mundo e no Brasil. O modelo inclui todos os mecanismos de transformação das ondas que são importantes para a aplicação atual, tais como refração, empinamento, difração, perda de energia pela quebra da onda e por atrito.

4.1. *Modelo de transformação de ondas*

A batimetria do modelo está apresentada na Figura 4.1. O domínio do modelo cobre uma área de aproximadamente 180 km x 250 km, suficientemente grande para incluir os efeitos em escala regional da batimetria. O modelo está baseado numa grade flexível, o que significa que uma resolução espacial relativamente mais grosseira pode ser empregada em águas profundas, ou em regiões de menor interesse no estudo, enquanto que uma grade mais detalhada é usada nas áreas de maior interesse.

A fronteira em águas profundas coincide com a localização dos dados do GROW. As componentes de vagas e ondulações, conforme obtidas nos dados do GROW, foram transformadas separadamente e integradas num local próximo a costa, para a obtenção das condições das ondas resultantes em águas rasas.

Durante a simulação de ondas, o nível d'água foi considerado constante, igual a 0,9 m. Esta aproximação é justificável pelo fato das variações das marés serem pequenas quando comparadas às profundidades da água presentes no domínio.

O espectro direcional foi resolvido utilizando-se 24 direções distintas. A série inteira de altura de onda, período e direção, fornecida pelos dados do GROW, foi resolvida no modelo.

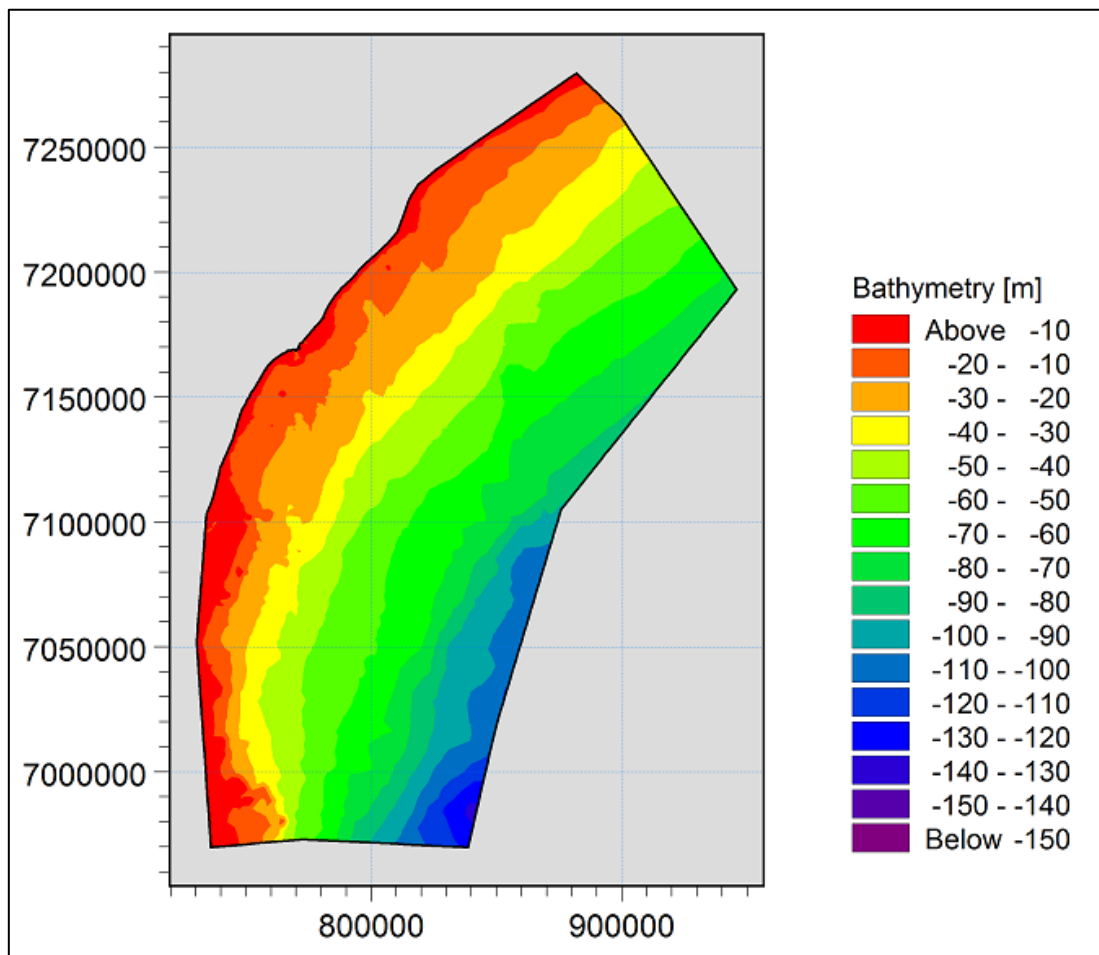


Figura 4.1: Batimetria do modelo para o estudo de transformação das ondas.

4.2. Calibração do modelo

O modelo foi calibrado a partir da comparação com os dados de campo coletados e analisados pelo INPH (Ref /1/ e Ref /2/).

Como os dados de ondas utilizados como condições de contorno também são gerados a partir de um modelo, GROW, onde algumas aproximações já foram incorporadas, são esperadas algumas discrepâncias entre a simulação e os dados medidos. Erros no GROW se refletirão em erros nos resultados do modelo de ondas costeiras.

As Figuras 4.2, 4.3 e 4.4 mostram as comparações entre os resultados do modelo e os dados medidos, para o mês de Agosto de 1983, período onde foram observadas as maiores alturas de ondas. Apesar de haver algumas variações, a simulação representa bem os dados obtidos na medição.

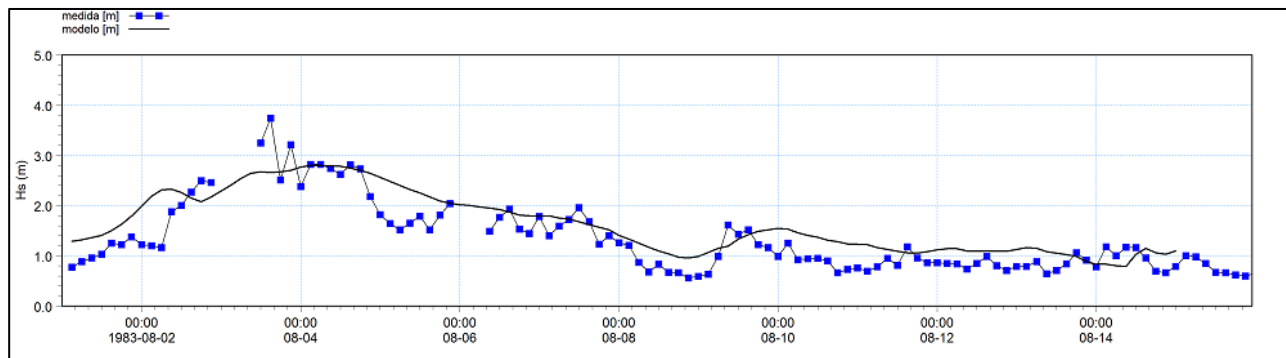


Figura 4.2 Comparação entre as ondas simuladas no modelo e as medições pelo INPH. Altura significativa de onda, H_s

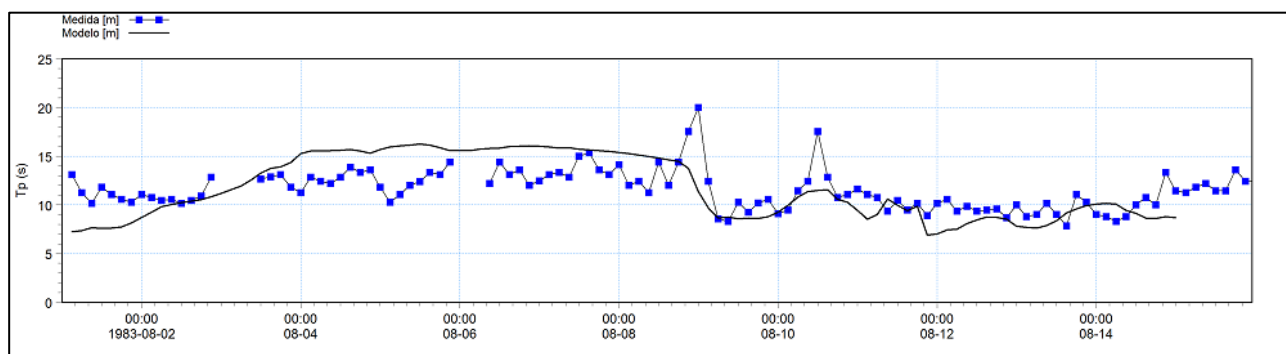


Figura 4.3 Comparação entre as ondas simuladas no modelo e as medições pelo INPH. Período de pico da onda, T_p

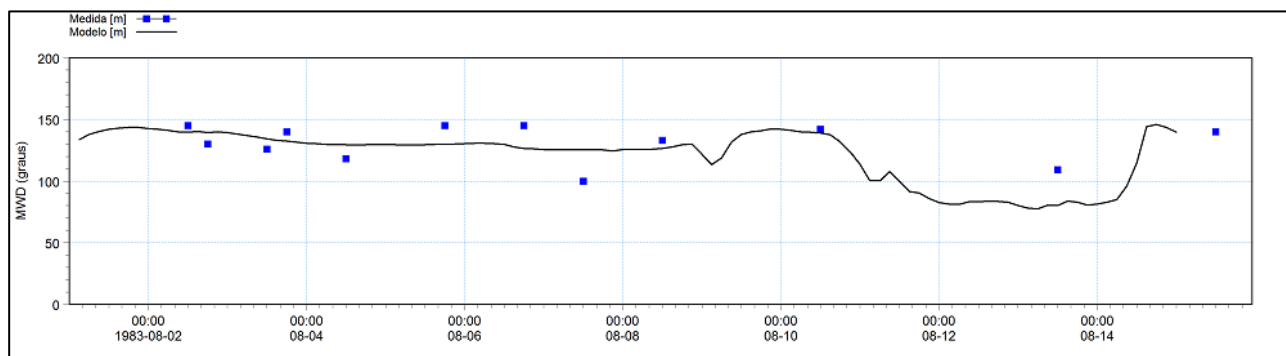


Figura 4.4 Comparação entre as ondas simuladas no modelo e as medições pelo INPH. Direção média de onda, MWD

A rosa de onda calculada perto da costa está apresentada na Figura 4.5. A rosa de ondas mostra que as ondas mais altas vêm de SE. A direção de onda mais frequente são E e SSE. Ondas de até 2m ocorrem frequentemente nesta localização.

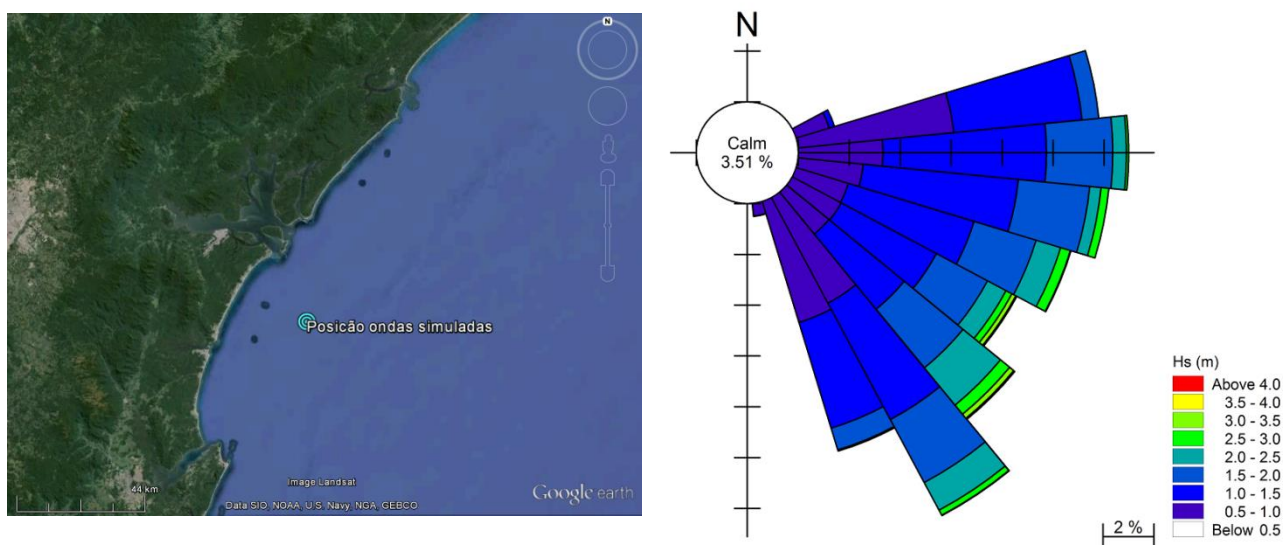


Figura 4.5 Rosa de ondas calculadas em frente a área do projeto, em profundidade de 20m.

4.3. Seleção de eventos de ondas

Alguns eventos representativos de ondas foram selecionados para o detalhamento dos estudos de modelagem matemática. O procedimento de seleção foi realizado de modo a permitir um evento representativo de ondas para vários intervalos pré-definidos de altura, período e direção de ondas. Foram selecionados 2 intervalos para a altura e período de onda e 3 intervalos para a direção. Para cada intervalo foram calculadas a velocidade e a direção de vento, conforme dados do GROW. Os intervalos analisados estão listados na Tabela 4.1

Tabela 4.1 Intervalos selecionados de parâmetros de ondas

| Parâmetro de onda | Classe 1 | Classe 2 | Classe 3 |
|-------------------|-----------|------------|-------------|
| Altura, Hs | 0 – 1m | >1m | - |
| Período, Tp | 0 – 7.25s | >7.25s | - |
| Direção, MWD | 0° - 90° | 90° - 115° | 115° - 240° |

Para cada intervalo foi calculado um valor médio de altura, período e direção de onda, a partir dos resultados das simulações de ondas, apresentados na seção anterior. Cada evento no clima anual de ondas foi ponderado de acordo com a sua contribuição para a energia total de onda em cada classe identificada:

$$H_R = \sqrt{\overline{H_S^2}} \quad (4.1)$$

$$T_R = \frac{\overline{TH_S^2}}{H_S^2} \quad (4.2)$$

$$\alpha_R = \frac{\overline{\alpha H_S^2}}{H_S^2} \quad (4.3)$$

No total, 12 eventos de vento foram selecionados, cada evento associado a uma combinação de altura, período e direção de ondas, com velocidade e direção de vento características. Os eventos selecionados estão listados na Tabela 4.2.

Para cada evento de onda selecionado foi calculada a probabilidade acumulada. Esta probabilidade é usada para calcular o transporte anual de sedimento como a soma ponderada de todos os eventos de ondas.

As simulações no modelo cobriram o período de um ciclo de maré. A variação do nível de água foi simulada conforme os dados obtidos das componentes de marés.

Tabela 4.2 – Ondas representativas selecionadas para a simulação de hidrodinâmica

| Cenário | Hs (m) | Tp (s) | MWD (graus) | Vw (m/s) | Wdir (graus) | Occ (%) | Score (%) | Classe Ondas | | |
|---------|-----------|-----------|----------------|-------------|-----------------|------------|--------------|---------------|----------------|--------------------|
| | | | | | | | | Altura (m) | Período (s) | Direção (graus) |
| 1 | 0.83 | 6.42 | 76.79 | 7.04 | 26.43 | 5.51 | 3.08 | 0 - 1 | <7.25 | 0 - 90 |
| 2 | 0.80 | 8.77 | 79.70 | 6.90 | 344.49 | 11.24 | 6.24 | 0 - 1 | ≥7.25 | |
| 3 | 1.17 | 6.74 | 81.46 | 8.35 | 55.63 | 2.67 | 4.14 | > 1 | <7.25 | |
| 4 | 1.37 | 8.63 | 84.10 | 8.49 | 42.81 | 7.10 | 14.59 | > 1 | ≥7.25 | |
| 5 | 0.87 | 6.40 | 99.33 | 6.73 | 82.71 | 1.03 | 0.78 | 0 - 1 | <7.25 | 90-115 |
| 6 | 0.82 | 10.73 | 100.91 | 7.15 | 6.30 | 7.23 | 4.52 | 0 - 1 | ≥7.25 | |
| 7 | 1.24 | 6.71 | 99.74 | 8.03 | 83.10 | 1.75 | 2.89 | > 1 | <7.25 | |
| 8 | 1.66 | 9.82 | 102.10 | 8.52 | 66.08 | 11.57 | 28.68 | > 1 | ≥7.25 | |
| 9 | 0.81 | 6.49 | 153.55 | 7.52 | 169.84 | 2.12 | 0.82 | 0 - 1 | <7.25 | 115-240 |
| 10 | 0.79 | 11.43 | 148.52 | 9.04 | 214.74 | 22.63 | 6.56 | 0 - 1 | ≥7.25 | |
| 11 | 1.23 | 6.82 | 141.59 | 8.54 | 135.93 | 1.94 | 1.40 | > 1 | <7.25 | |
| 12 | 1.63 | 11.04 | 139.18 | 9.61 | 152.43 | 25.23 | 26.3 | > 1 | ≥7.25 | |

100% 100%

4.4. Modelo de ondas em águas rasas

A partir dos 12 eventos selecionados, foram simuladas as condições de ondas até a costa em toda a área de estudo, também se utilizando o modelo matemático MIKE 21 SW.

Neste item, são analisadas as condições de ondas na área do projeto. As simulações do modelo incluem os efeitos combinados de ondas, vento e marés. Os resultados das simulações de ondas (os campos de *radiation stress*) foram utilizados como “forçantes” nas simulações de hidrodinâmica. Na fronteira do modelo, ao largo, foram impostos os níveis d’água calculados pelas constituintes de marés. As simulações no modelo cobriram um ciclo de maré de 14 dias.

A Figura 4.6 mostra o campo de ondas simulado para o cenário 4 da Tabela 4.2. As Figuras 4.7 e 4.8 mostram os campos de ondas para os cenários 8 e 12 da tabela 4.2. A presença do canal de acesso esta bem visível nas simulações.

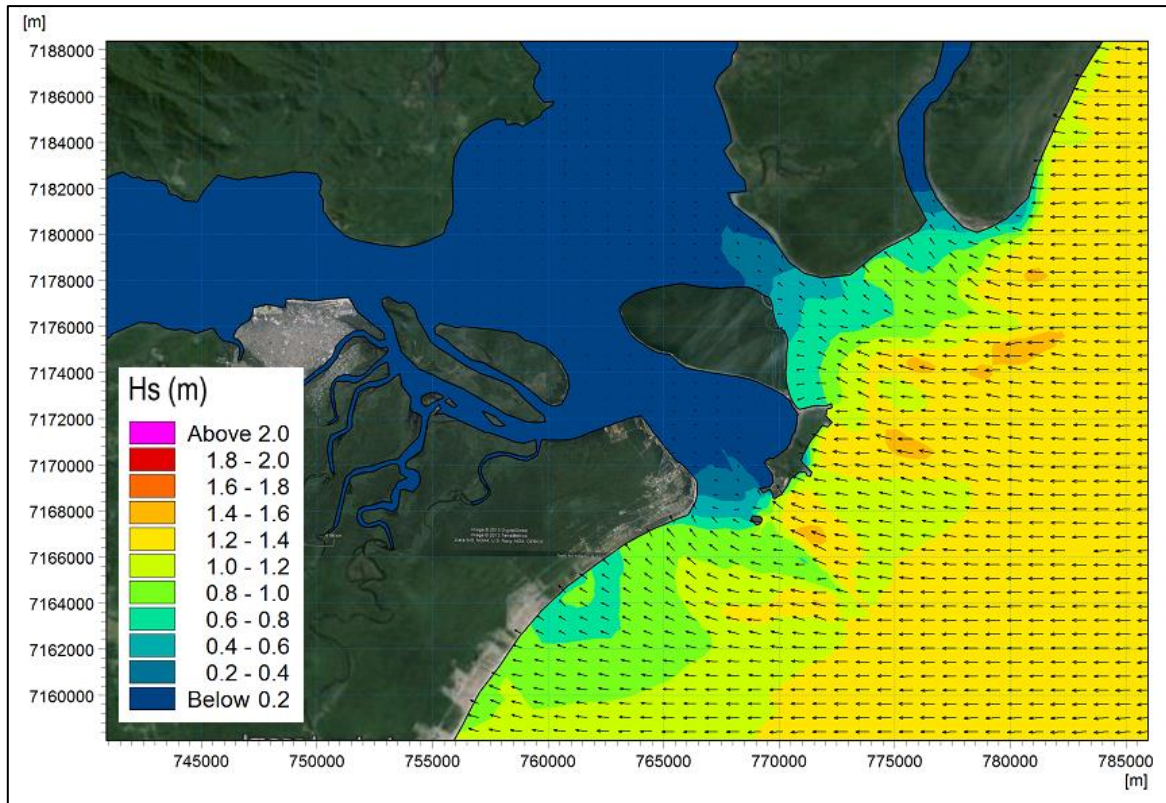


Figura 4.6 – Campo de ondas simulados (Cenário 4) Hs: 1,37m, Tp:8,63s, MWD: 84,1°N.

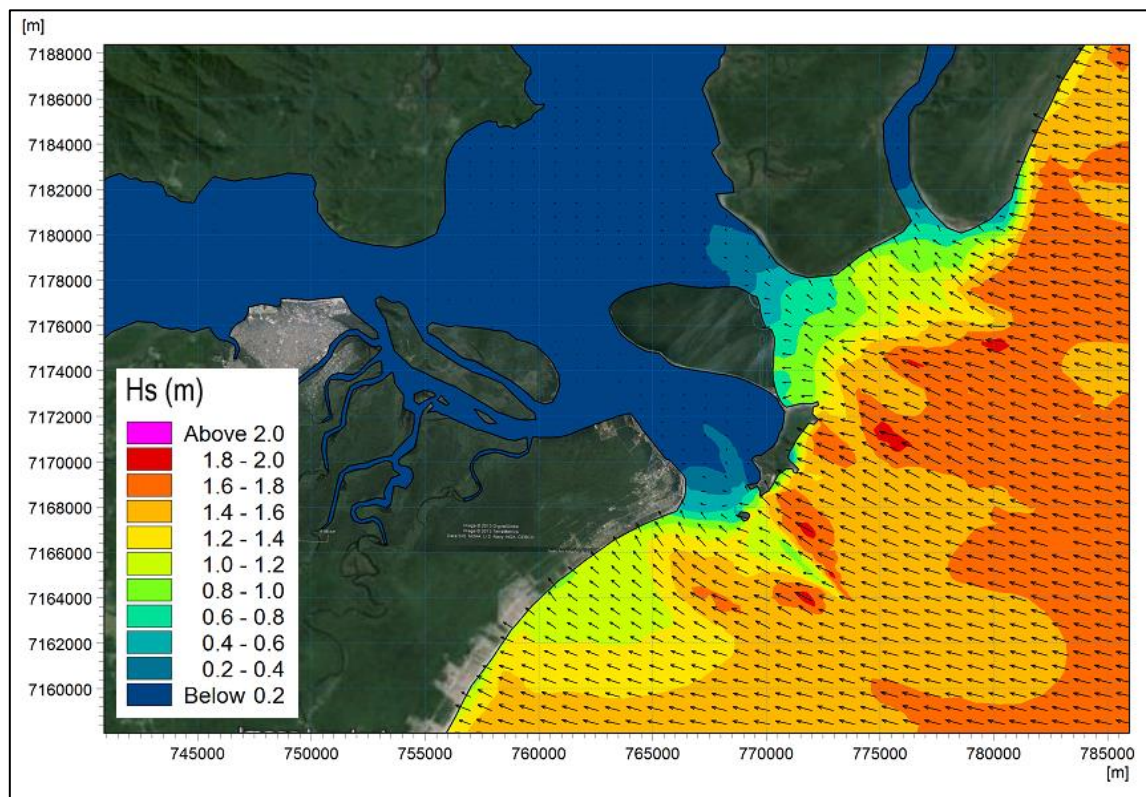


Figura 4.7 – Campo de ondas simulados (Cenário 8) Hs: 1,66m, Tp:9,82s, MWD: 102,1°N.

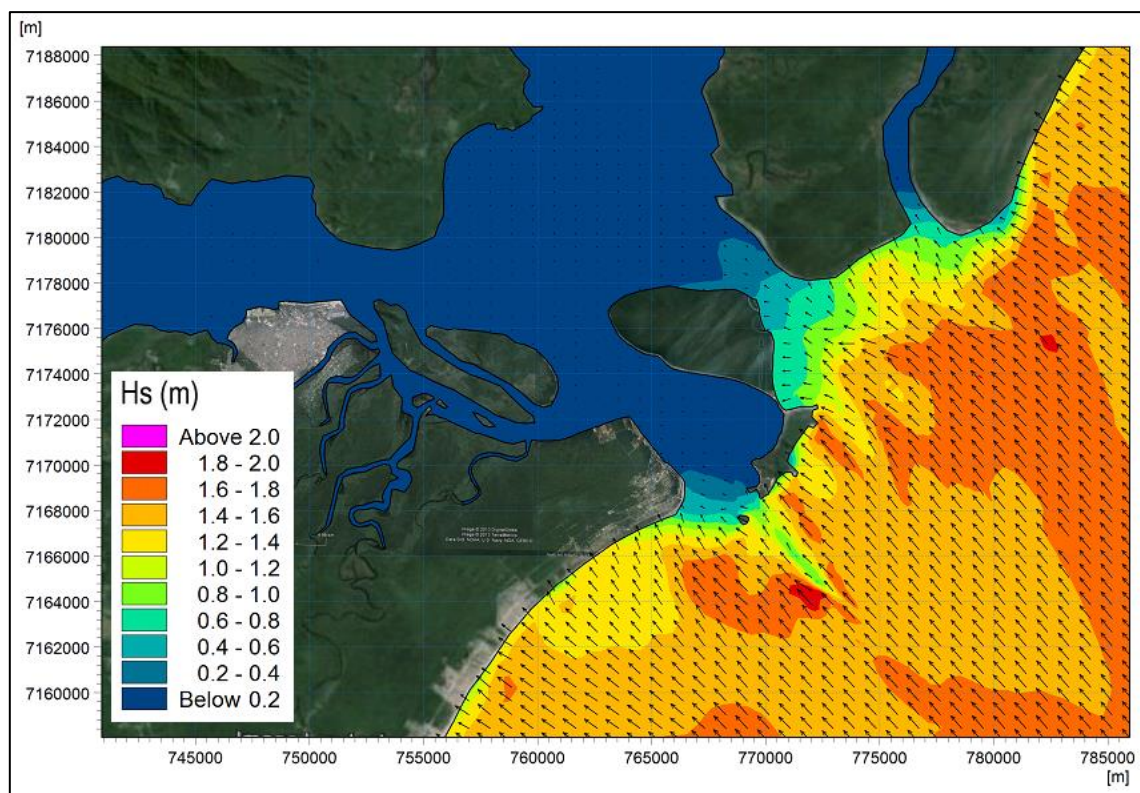


Figura 4.8 – Campo de ondas simulados (Cenário 12) H_s : 1,63m, T_p :11,04s MWD: 139,2°N.

5. HIDRODINÂMICA

5.1. Abordagem do modelo

A hidrodinâmica devido ao efeito combinado das marés, ventos e ondas foi simulada através do modelo hidrodinâmico do DHI, MIKE 21 HD FM. Este modelo é capaz de simular as variações de níveis d'água e de fluxos em estuários, baías e áreas costeiras. É possível calcular os fluxos variáveis em duas dimensões, em uma única camada (verticalmente homogênea) ou em diversas camadas estratificadas, e pode ser aplicado em um grande número de estudos ligados à Engenharia Costeira.

A partir dos dados batimétricos e das condições de contorno, o programa realiza os cálculos da simulação, fornecendo, como resultado, vários parâmetros hidrodinâmicos de importância, como por exemplo, os níveis da maré e a velocidade e direção das correntes em toda a área de simulação.

A malha flexível empregada no estudo permite utilizar melhor resolução especial nas áreas maior importância. Estendendo-se a área do modelo até distâncias mais afastadas da área de interesse, podem-se evitar os indesejáveis efeitos de fronteira. O modelo resolve no domínio do tempo as equações do escoamento integradas na vertical e é capaz de simular as correntes geradas pela ação combinada de maré, escoamento fluvial, ondas e vento, resolvendo os complexos padrões de circulação próximos à costa, causados pelas condições batimétricas não uniformes. As simulações foram realizadas na mesma grade numérica que as simulações de ondas.

5.2. Resultados das Modelagens Hidrodinâmicas

As simulações no modelo cobriram um ciclo de maré de 14 dias, incluindo 3 horas para a estabilização do modelo (*warm up*). A variação do nível de água foi simulada com base nas componentes harmônicas como apresentadas na seção 3.

As velocidades do escoamento são importantes para a acumulação de sedimento no canal. Fortes velocidades de correntes nas proximidades do canal aumentam a probabilidade de sedimentação em seu interior, o que é ainda mais intensificado na presença de ondas de grande energia, que causam agitação do sedimento no leito do mar

e facilitam seu transporte pelas correntes. As velocidades determinam o volume de sedimento que pode ser depositado no canal de acesso.

Para estudar o escoamento na área do canal dragado, foram executadas várias simulações no modelo, onde as ações de ondas, ventos e marés foram incluídas conforme detalhado nos eventos da Tabela 4.2.

A Figura 5.1 apresenta o campo de correntes típico para condições de maré vazante. O cenário de ondas simulado corresponde ao Evento 8, da Tabela 4.2. A Figura 5.2 apresenta o campo de correntes típico para condições de maré enchente. Os resultados do modelo indicam que as correntes geradas na área do canal atingem valores máximos de cerca de 1,2 m/s, na área rasa em frente à Ilha do Mel. Dentro do estuário, as correntes alcançam valores de até 0,6 m/s, e são mais fracas nas regiões mais internas.

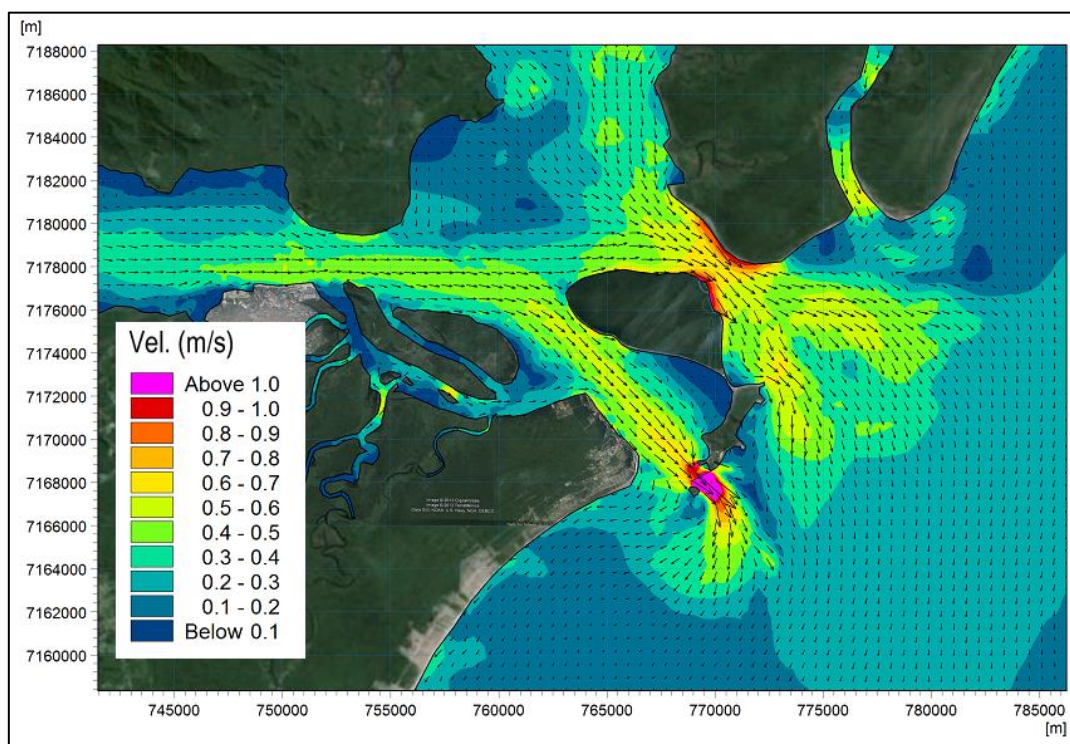


Figura 5.1: Campo de corrente simulado, Maré vazante - Cenário 8 na tabela 4.2.

$H_s=1.66m$, $T_p=9.82s$, $MWD=102.1$ – Vento: 8.52 m/s com direção $66.1^\circ N$.

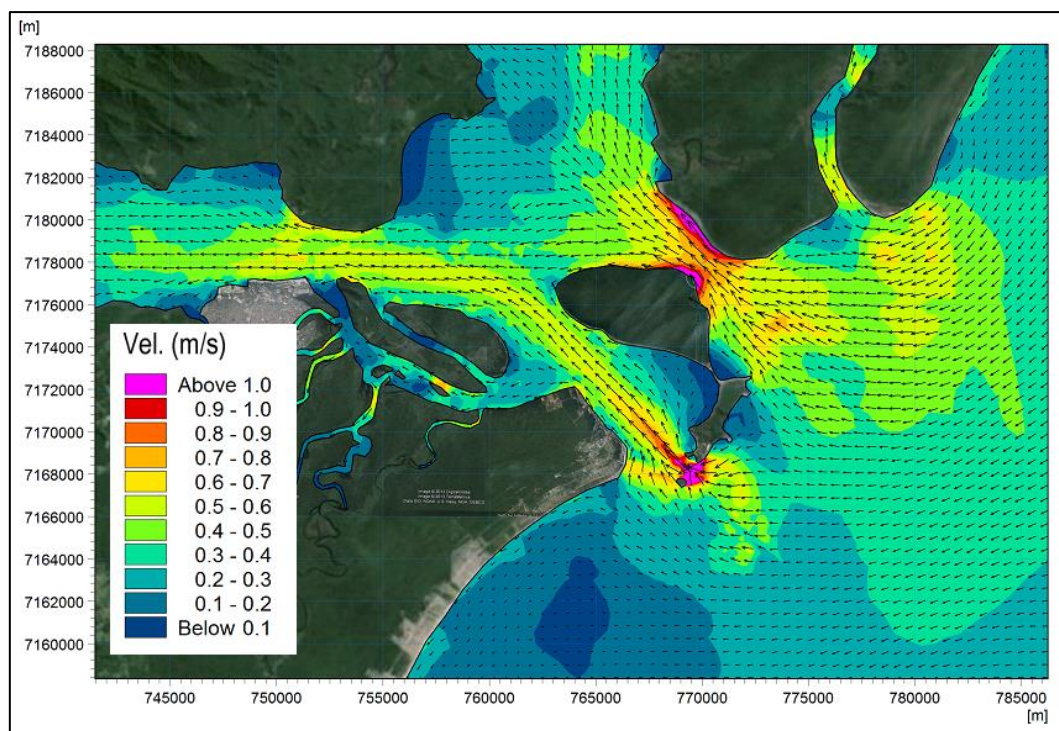


Figura 5.2: Campo de corrente simulado, Maré enchente - Cenário 8 na tabela 4.2.

$H_s=1.66m$, $T_p=9.82s$, $MWD=102.1$ – Vento: 8.52 m/s com direção 66.1° N .

6. MODELAGEM DO TRANSPORTE DE SEDIMENTOS

O vento e a maré geram correntes longitudinais e transversais ao canal, porém, devido as maiores profundidades, quando a corrente passa pelo canal, sua velocidade diminui. A capacidade das ondas de mobilizar sedimento e mantê-lo em suspensão também diminui. A queda na capacidade de transportar sedimento causa acumulação no canal de acesso. Para calcular esta acumulação foi realizada uma série de simulações de transporte de sedimentos, utilizando como condições de contorno os resultados das simulações de ondas e correntes apresentadas nas seções anteriores.

O transporte de sedimentos em recintos portuários e seus acessos pode ocorrer de 2 formas distintas: transporte por advecção e transporte por convecção.

O transporte por advecção é gerado pela ação local de ondas e correntes. As ondas agitam o sedimento no leito do mar e a corrente o transporta para o canal, acumulando-se no fundo. O sedimento acumulado nas áreas dragadas não podem ser transportados novamente, pois as forças das ondas e das correntes são mais fracas, devido à maior profundidade. Desta forma, a área dragada funciona como uma “armadilha” de sedimento.

Já o transporte por convecção inclui o sedimento fino, transportado em suspensão para dentro do estuário e para o mar. O sedimento fino tem uma velocidade de queda bastante pequena, de até 0,2 mm/s. O que faz com que o sedimento possa ser transportado até grandes distâncias antes de se depositar no leito marinho. As concentrações de sedimento fino não estão relacionadas com as forças locais de ondas e correntes no leito do mar. O sedimento não se acumula em áreas energéticas como a zona de arrebentação. Desta forma, a sedimentação de material fino é mais intensa na região interna do estuário e não desempenha um papel importante na área da barra.

Neste estudo, o transporte de sedimento pela advecção foi calculado a partir dos resultados das simulações de ondas e correntes, apresentados nas seções anteriores. Como não houve dados disponíveis de concentrações de sedimentos finos em suspensão, o transporte pela convecção foi apenas estimado, com base em outros estuários presentes ao longo da costa brasileira.

Os cálculos foram realizados através do modelo de transporte de sedimento MIKE 21 ST (*Sand Transport*). Este modelo possibilita calcular as taxas de transporte de sedimentos e as taxas iniciais de alterações morfológicas do fundo. Ele calcula as taxas de transporte de sedimentos considerando as correntes e campos de ondas simulados, considerando também os efeitos das características dos sedimentos, tais como distribuição granulométrica, velocidade de queda e densidade.

Sem a disponibilidade de dados sobre as características dos sedimentos na área, no estudo em modelo foi assumido que o fundo do mar está coberto por areia fina em todo o domínio modelado.

Para aumentar a precisão dos resultados apresentados neste estudo, é recomendado que se realize a coleta de dados de sedimentos de fundo e de concentrações de sedimentos finos em suspensão.

6.1. Sedimentação no canal de acesso

As correntes ao longo da costa causam acumulação de sedimento no canal de acesso, como ilustrado na Figura 6.1. A acumulação anual de sedimento no canal foi calculada como a soma ponderada de todos os eventos de ondas selecionados, como listado na Tabela 4.2.

As taxas de transporte de sedimentos foram integradas ao longo das margens limites do canal dragado. Nos cálculos, assumiu-se que uma vez que o sedimento seja capturado pelo canal, ele permanecerá preso no canal e não será removido por ondas e correntes. É uma hipótese conservativa, porém bem próxima do real, uma vez que a profundidade do canal é consideravelmente maior do que das áreas vizinhas.



Figura 6.1 – Balanço sedimentar – Aporte de sedimentos para o canal dragado.

Os resultados dos cálculos para cada área serão apresentados ao final do capítulo. A sedimentação anual de areia foi calculada como **2,75 Milhões m³/ano**. Os cálculos indicam que a maior parte (cerca de 90%) da sedimentação de areia, ocorre na área Alfa. Cerca de 9% da sedimentação anual de areia acontece na área Bravo1. Nas áreas mais internas do estuário, a sedimentação de areia se torna desprezível em comparação com a acumulação total.

A acumulação total de sedimentos no canal de acesso é apresentada nas Figuras 6.2 e 6.3. Os resultados mostram que o máximo de acumulação é de cerca de 4 m/ano, e acontece na área da barra do estuário. Esta área é muito rasa e é bastante exposta à ação de ondas. Os cálculos indicam que o estabelecimento da armadilha de sedimentos proposta (dragagem numa área com 50 m de largura ao lado sul do canal de acesso) não terá muito efeito, pois não está posicionada na área de maior sedimentação.

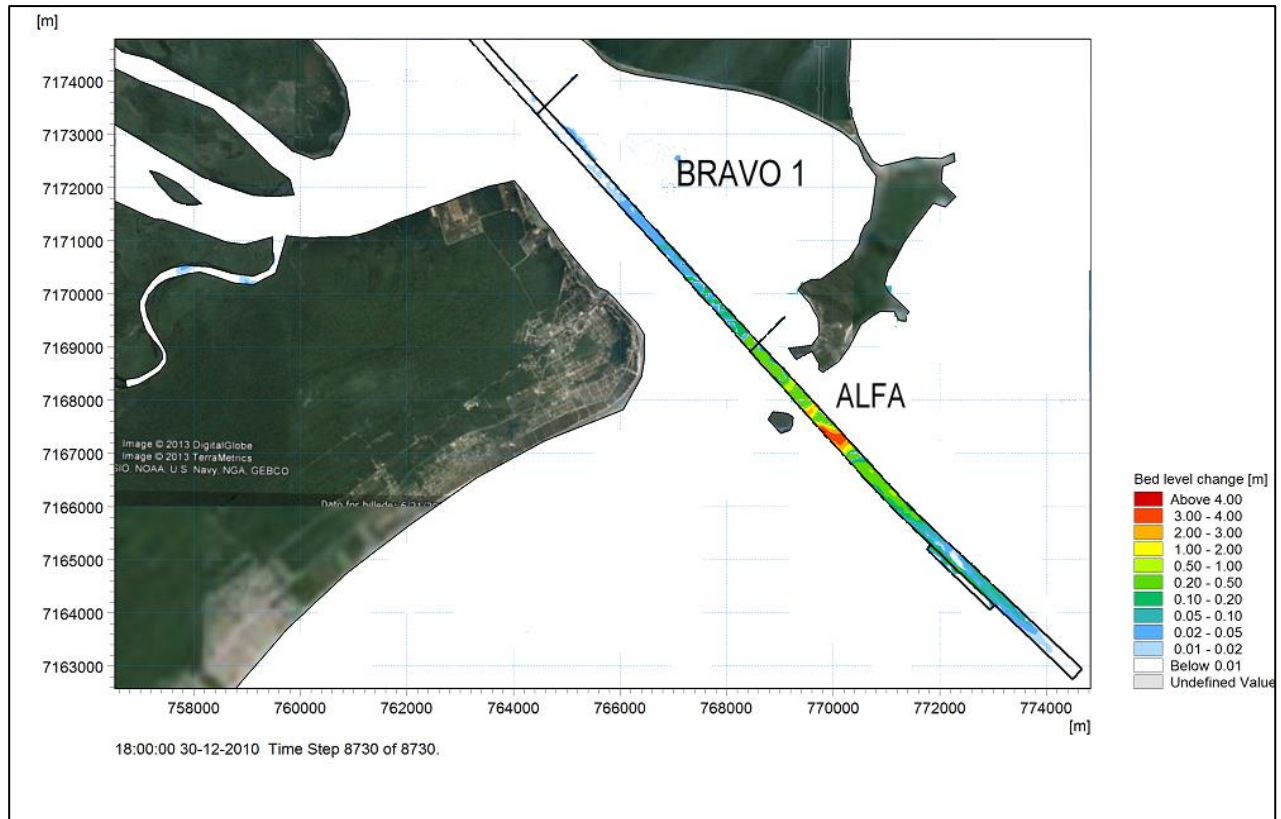


Figura 6.2 Acumulação anual de areia (Áreas Alfa e Bravo1).

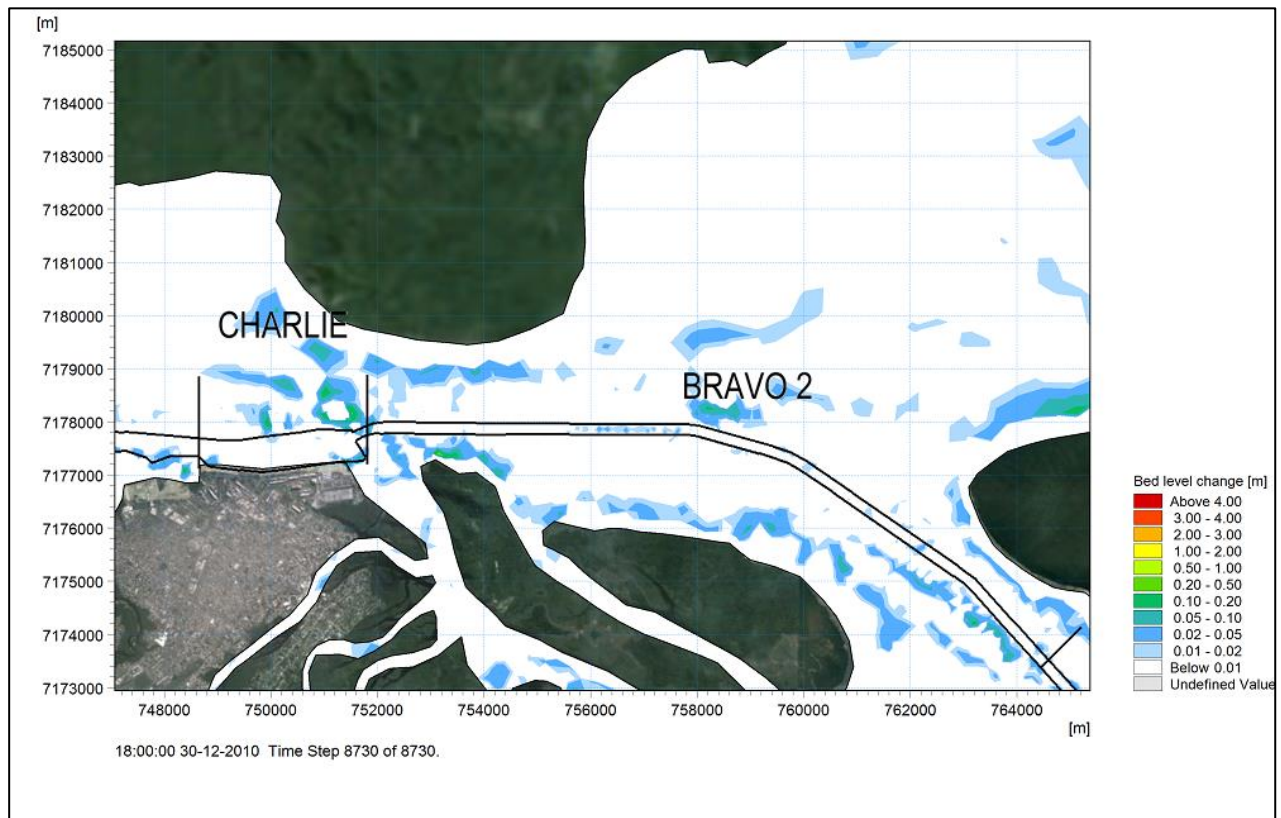


Figura 6.3 Acumulação anual de areia (Áreas Bravo2 e Charlie).

A distribuição da acumulação de sedimento na área Alfa, por evento de onda selecionado, está listada na Tabela 6.2. Os resultados mostram que 35% da sedimentação anual de areia acontece em situações de ondas menores que 1m. Os outros 65% ocorrem durante condições com ondas maiores que 1m. A maior parte da sedimentação anual, cerca de 75%, ocorre durante condições de ondas com períodos menores que 7 segundos. Finalmente, os resultados indicam que 46% da sedimentação ocorre durante condições de ondas das direções 115° - 240°. Ondas das direções 90°-115° causam cerca de 28% da sedimentação total, e 26% do total acontece durante condições de ondas das direções 0°-90.

Tabela 6.2 – Distribuição da sedimentação anual por evento - Area Alfa.

| Cenário | Dur (%) | Altura de ondas | Período de ondas | Direção de ondas | Acumulação anual |
|---------|---------|-----------------|------------------|------------------|------------------|
| 1 | 5.51 | 0 – 1m | 0 – 7.25s | 0° - 90° | 4.87 % |
| 2 | 11.24 | 0 – 1m | > 7.25s | | 8.43 % |
| 3 | 2.67 | > 1m | 0 – 7.25s | | 3.26 % |
| 4 | 7.10 | > 1m | > 7.25s | | 9.66 % |
| 5 | 1.03 | 0 – 1m | 0 – 7.25s | 90° – 115° | 0.99 % |
| 6 | 7.23 | 0 – 1m | > 7.25s | | 5.17 % |
| 7 | 1.75 | > 1m | 0 – 7.25s | | 2.17 % |
| 8 | 11.57 | > 1m | > 7.25s | | 19.63 % |
| 9 | 2.12 | 0 – 1m | 0 – 7.25s | 115° – 240° | 1.76 % |
| 10 | 22.63 | 0 – 1m | > 7.25s | | 14.13 % |
| 11 | 1.94 | > 1m | 0 – 7.25s | | 2.13 % |
| 12 | 25.23 | > 1 | > 7.25 | | 27.81 % |

6.2. Acumulação de material fino

No projeto, não houveram dados medidos de concentrações de sedimentos finos em suspensão. Para se conhecer ao menos a ordem de grandeza da proporção da sedimentação do material fino, em relação à sedimentação de areia, foi estimada a acumulação anual de sedimento fino pelo mecanismo de convecção. Assumindo que todo sedimento acumulado no canal não pode mais ser transportado para fora do canal (aproximação conservadora) a deposição anual do material fino pode ser grosseiramente estimada como:

$$\Delta z = \frac{\bar{C} w_s}{\delta_s}$$

Onde:

Δz = sedimentação (m/s);

\bar{C} = concentração média (kg/m³);

δ = densidade do material acumulado (kg/m³).

Algumas premissas foram assumidas neste cálculo de estimativa, como a concentração média de sedimento em suspensão de 30 mg/l, valor médio encontrado em literatura referente ao local de estudo (MACHADO *et al.*, 1997; LANA *et al.*, 2001). O valor da velocidade de queda utilizado nos cálculos foi de 0,0001 m/s, calculado pela Lei de Stokes para a granulometria de 0,01 mm. A densidade do material acumulado foi assumida como 1000 kg/m³, valor que corresponde à lama levemente consolidada.

Com os valores apresentados, estimou-se uma acumulação de cerca 10 cm/ano. Obviamente, esta é apenas uma indicação grosseira, que deve ser verificada por coleta e análise de dados de campo adicionais. Devido ao alto nível de agitação causada pelas ondas e correntes, não haverá grande sedimentação de material fino na área Alfa. Mesmo que diante de tantas inferências, os cálculos indicam que o problema de sedimentação na presente área é muito mais relacionado à sedimentação de areia na barra, do que com acumulação de material fino.

O volume de sedimento fino que se acumula no canal de acesso durante um ano pode ser estimado assumindo a acumulação média de 0.1 m/ano e considerando a área superficial do canal. Os resultados totais são apresentados na tabela 6.3.

Tabela 6.3 – Distribuição total da sedimentação anual

| Trecho | Área (m²) | Areia (m³/ano) | Lama (m³/ano) | Total (m³/ano) | Total (%) |
|------------------|---------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|----------------------|
| Alfa | 2.157.828 | 2.470.000 | 215.782 | 2.685.782 | 72.8 |
| Bravo 1 | 1.210.260 | 267.500 | 121.026 | 388.526 | 10.5 |
| Bravo 2 | 3.160.478 | 11.500 | 316.047 | 327.547 | 8.9 |
| Charlie 1 | 1.637.576 | 4.500 | 163.757 | 168.257 | 4.6 |
| Charlie 2 | 1.521.423 | 800 | 15.214 | 16.014 | 0.4 |
| Charlie 3 | 1.004.641 | 200 | 100.464 | 100.664 | 2.7 |
| Total | 10.692.206 | 2.754.500 | 932.290 | 3.686.790 | 100.0 |

7. CONCLUSÕES

- Foram analisadas séries temporais de dados das ondas oceânicas. Os dados cobriram o período 1970-2011.
- Um modelo matemático de transformação de ondas (MIKE 21 SW) foi montado e calibrado com dados de campo. O modelo foi aplicado para transformar as séries temporais de dados das ondas oceânicas até um local selecionado da costa.
- Perto da costa, numa profundidade de 20m, a altura significativa média de onda é de aproximadamente 2,0m. A altura de onda raramente excede 3,5m. O período de pico médio é 8-10 segundos e as direções predominantes de ondas são SE e SSE.
- As velocidades máximas no canal de acesso são na ordem de 0,8m/s. Na porção mais rasa da barra, as velocidades máximas atingem valores de até 1,2 m/s.
- A sedimentação de areia no canal de acesso, devido a ondas e correntes geradas pelo vento e maré, é cerca de 2,47 Milhões m³/ano na área Alfa e 267.000 m³/ano na área Bravo 1. Nas áreas mais internas dentro do estuário a sedimentação de areia é muito menor.
- A acumulação de material fino foi estimada de forma simplificada, sendo calculada como cerca de 10 cm/ano. Em termos volumétricos a acumulação do material fino foi estimada em cerca de 900.000 m³/ano, que é cerca de 25% do volume total.
- Recomenda-se que sejam realizadas campanhas de medições de dados de correntes, sedimentos em suspensão e granulometria no Complexo Estuarino, para melhor aferição do modelo matemático e possíveis ajustes.

8. REFERÊNCIAS

- INPH. 1985. Instituto Nacional de Pesquisas Hidroviárias. Medições de ondas em Paranaguá. Relatório INPH n.027/1985.
- INPH. 2013. Instituto Nacional de Pesquisas Hidroviárias. Anteprojeto de dragagem do Porto de Paranaguá (PR) – Canal de acesso, bacia de evolução e berço público. Relatório INPH n.028/2013.
- LANA, P.C., MARONE, E., LOPES, R.M., MACHADO, E.C., 2001. The subtropical estuarine complexo f Paranaguá Bay, Brazil. In: Sellinger, U., Kjerfve, P.ed.s. Ecological Studies, v.144 – Coastal Marine Ecosystems of Latin America. Berlin, Springer-Verlag Berlin Heidelberg p. 131-145.
- MACHADO, E.C. & DANIEL, C.B. & BRANDINI, N. & QUEIROZ, R.L.V. 1997. Temporal and spatial dynamics of nutrientes and particulate matter in Paranaguá Bay, PR, Brazil. *Nerítica*, Curitiba: UFPR, 11(1-2):17-36.



ANEXO

DESCRIÇÃO DOS MODELOS MATEMÁTICOS

➤ MIKE 21 Spectral Waves

O MIKE 21 SW simula o crescimento, decaimento e transformação de ondas geradas pelo vento (sea) e ondas de longo período (swell) em áreas oceânicas e costeiras. O modelo inclui uma formulação direcional paramétrica e uma formulação totalmente espectral (modelo de onda de terceira geração).

Para a formulação totalmente espectral o modelo inclui os seguintes fenômenos físicos: refração e empinamento devido a variações de profundidade, crescimento da onda pela ação de vento, interação não linear onda-onda (quádruplas e triplas), dissipação por “whitecapping”, dissipação devido ao atrito de fundo, dissipação devido à arrebentação da onda induzida pela profundidade, interação onda-corrente e efeito de variação dos níveis de água.

A discretização espacial é executada através do método de volumes finitos, centrado na célula, através de uma malha triangular não estruturada. As equações são resolvidas usando-se um método modificado de iterações de Newton-Raphson.

Os resultados fornecidos pelo modelo incluem os seguintes parâmetros de ondas:

- altura de onda (altura significativa e altura máxima);
- período de onda (de pico, médio, zero ascendente, de energia da onda);
- direção de onda (direção de pico e direção média);
- desvio padrão direcional;
- componentes vetoriais mostrando a altura significativa e a direção média da onda;
- tensões de radiação.

Usando a formulação totalmente espectral os parâmetros de onda podem ser obtidos para o espectro total, para a parte de vagas do espectro e a para a parte de ondulações do espectro.

Adicionalmente, informações espectrais podem ser obtidas sob a forma de espectros direcional-frequência em pontos selecionados, assim como espectros direcionais e espectros de frequência. Também podem ser obtidas informações espectrais em linhas ou em áreas selecionadas, para serem usadas em conexão com transferência de condições de contorno e condições iniciais (hot start), respectivamente.

A formulação direcional paramétrica está baseada em uma parametrização da equação de conservação da ação da onda. A parametrização é feita no domínio da frequência, introduzindo-se os momentos de ordem zero e de primeira ordem do espectro de ação da onda como variáveis dependentes, seguindo HOLTHUIJSEN *et al.* (1989).

A formulação totalmente espectral está baseada na equação de conservação da ação da onda, como descrito em KOMEN *et al.* (1994) e YOUNG (1999), onde o espectro direcional-frequência de ação da onda é a variável dependente:

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \nabla \cdot (\vec{v}N) = \frac{S}{\sigma} \quad (1)$$

Onde:

N = densidade de ação

∇ = densidade de energia

σ = frequência angular

t = tempo

v = velocidade de grupo das ondas

S = termo fonte

Onde S pode ser dado por:

$$S = S_{in} + S_{n1} + S_{ds} + S_{bat} + S_{surf} \quad (2)$$

Onde:

S_{in} = geração de energia pelo vento

S_{n1} = transferência de energia por interações não lineares entre ondas

S_{ds} = dissipação de energia por whitecapping

S_{bat} = dissipação por fricção com o fundo

S_{surf} = dissipação de energia pela quebra de onda



O crescimento da onda pelo vento é dominado pela equação:

$$S_{in}(f, \theta) = \max(\alpha, \gamma E(f, \theta)) \quad (3)$$

Onde:

f= frequência

γ = taxa de crescimento não linear

➤ **MIKE 21 Flow Model**

O modelo MIKE 21 FM resolve a variação dos níveis d'água e os fluxos instantâneos a partir da solução das Equações de Navier-Stokes, integradas na vertical (equação da conservação da quantidade de movimento nas duas dimensões horizontais e equação da continuidade), através do esquema de volumes finitos.

- Continuidade:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial h\bar{v}}{\partial y} = hS \quad (4)$$

- Conservação da Quantidade de Movimento em x:

$$\begin{aligned} \frac{\partial h\bar{u}}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{u}^2}{\partial x} + \frac{\partial h\bar{v}\bar{u}}{\partial y} = f\bar{v}h - gh\frac{\partial\eta}{\partial x} - \frac{h}{\rho_0}\frac{\partial p_a}{\partial x} - \frac{gh^2}{2\rho_0}\frac{\partial\rho}{\partial x} + \frac{\tau_{sx}}{\rho_0} - \frac{\tau_{bx}}{\rho_0} - \frac{1}{\rho_0}\left(\frac{\partial S_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{xy}}{\partial y}\right) + \\ \frac{\partial}{\partial x}(hT_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y}(hT_{xy}) + hu_sS \end{aligned} \quad (5)$$

- Conservação da Quantidade de Movimento em y:

$$\begin{aligned} \frac{\partial h\bar{v}}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{v}^2}{\partial y} + \frac{\partial h\bar{v}\bar{u}}{\partial x} = -f\bar{u}h - gh\frac{\partial\eta}{\partial y} - \frac{h}{\rho_0}\frac{\partial p_a}{\partial y} - \frac{gh^2}{2\rho_0}\frac{\partial\rho}{\partial y} + \frac{\tau_{sy}}{\rho_0} - \frac{\tau_{by}}{\rho_0} - \frac{1}{\rho_0}\left(\frac{\partial S_{yx}}{\partial x} + \right. \\ \left. \frac{\partial S_{yy}}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial x}(hT_{xy}) + \frac{\partial}{\partial y}(hT_{yy}) + hv_sS \end{aligned} \quad (6)$$

Onde:

t é o tempo, s;

x, y e z são as coordenadas cartesianas

η é a elevação da superfície;

d é a profundidade;

$h = d + \eta$ é a profundidade total;

$f = 2\Omega \sin \phi$ é o parâmetro de Coriolis;

Ω é a taxa de revolução angular;

ϕ é a latitude geográfica;

g é a aceleração da gravidade;

ρ é a densidade da água;

ρ_0 é a densidade de referência da água;

p_a é a pressão atmosférica;

S_{xx}, S_{xy}, S_{yx} e S_{yy} são componentes do tensor de radiação;

S é a magnitude da descarga devido às fontes pontuais;

τ_{sx} e τ_{sy} são as componentes da tensão de superfície do vento;

τ_{bx} e τ_{by} são as componentes da tensão do fundo;

T_{xx}, T_{xy} e T_{yy} são as tensões laterais; e

\bar{u} e \bar{v} são as velocidades médias na profundidade.

Os efeitos citados abaixo são assimilados no modelo:

- Termo convectivo e transversal da quantidade de movimento;
- Tensão de cisalhamento sobre o fundo;
- Tensão de cisalhamento do vento sobre a superfície da água;
- Gradientes de pressão barométrica;
- Tensões de radiação provenientes de campos de ondas;
- Força de Coriolis;
- Dispersão da quantidade de movimento (viscosidade turbulenta);
- Fontes e sumidouros (de massa e de quantidade de movimento);
- Evaporação / precipitação;
- Áreas que tanto podem ficar alagadas, quanto secas, durante a simulação.

Variáveis tais como a elevação da superfície, a velocidade e a direção das correntes e as componentes da velocidade nos eixos x e y podem ser obtidas a partir dos dados de saída básicos do programa.

Ao longo de contornos fechados (fronteiras terrestres) fluxos normais são forçados a zero para todas as variáveis. Para as equações de momentum isso leva à condição de contorno de total deslizamento nestas fronteiras.

As condições dos contornos abertos podem ser especificadas tanto em forma de descarga quanto de elevação da superfície para as equações hidrodinâmicas.

A integração no tempo é feita considerando a forma geral das equações:

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} = \mathbf{G}(\mathbf{U}) \quad (7)$$

Para as simulações 2D, existem dois métodos de integrações no tempo, tanto para as equações de águas rasas quanto para as equações de transporte: um método de baixa ordem e um método de alta ordem. O método utilizado foi o de baixa ordem, que é um método explícito de Euler de primeira ordem:

$$\mathbf{U}_{n+1} = \mathbf{U}_n + \Delta t \mathbf{G}(\mathbf{U}_n) \quad (8)$$

Onde Δt é o intervalo do passo de tempo.

O transporte de sedimentos é calculado como:

$$Q_t = q_b + q_s \quad (9)$$

Onde Q_t é o total do transporte de sedimentos, q_b o transporte junto ao fundo e q_s o transporte do sedimento em suspensão.

O transporte do sedimento em suspensão é calculado como o produto do fluxo de velocidades instantâneas pela concentração de sedimento instantânea:

$$q_s = \frac{1}{T} \int_0^T \int_{2d}^D (uc) dz dt \quad (10)$$

O cálculo do transporte junto ao fundo é feito pelo modelo de transporte de ENGELUND E FREDSOE (1976), onde o transporte junto ao fundo é calculado a partir do parâmetro de Shields. O transporte médio junto ao fundo q_b é dividido em q_{b1} e q_{b2} , da seguinte forma:

$$q_{b1} = \Phi_{b1} \cdot \sqrt{(s-1)gd_{50}^3} \quad (11)$$

$$q_{b2} = \Phi_{b2} \cdot \sqrt{(s-1)gd_{50}^3} \quad (12)$$

Em que Φ_{b1} e Φ_{b2} são dados por:

$$\Phi_{b1} = \frac{1}{T} \int_0^T \Phi_b(t) \cos(\phi(t)) dt \quad (13)$$

$$\Phi_{b2} = \frac{1}{T} \int_0^T \Phi_b(t) \sin(\phi(t)) dt \quad (14)$$

Sendo Φ_b igual a:

$$\Phi_b = 5p(\sqrt{\theta'} - 0.7\sqrt{\theta_c}) \quad (15)$$

Onde a concentração de fundo p é encontrada pela equação:

$$p = \left[1 + \left(\frac{\frac{\pi}{6}\beta}{\theta' - \theta_c} \right)^4 \right]^{-0.25} \quad (16)$$

O parâmetro de Shields θ' e o parâmetro crítico de Shields θ_c , para o caso geral em que o fluxo está num ângulo ψ para o declive β , são dados por:

$$\theta' = \frac{U_f^2}{(s-1)gd_{50}} \quad (17)$$

$$\theta_c = \theta_{c,0} \cdot \left(\frac{-\cos\Psi \sin\beta + \sqrt{\mu_s^2 \cos^2\beta - \sin^2\Psi \sin^2\beta}}{\mu_s} \right) \quad (18)$$

Onde:

$\phi(t)$ é a direção do fluxo instantâneo, graus

Φ_{b1} é a carga de fundo adimensional na direção média da corrente

Φ_{b2} é a carga de fundo adimensional normal à direção média da corrente

q_{b1} é a carga de fundo na direção média da corrente, m³

q_{b2} é a carga de fundo normal à direção média da corrente, m³

μ_s é um coeficiente de fricção estático ($\mu_s = \tan \phi_s$, $\phi_s = \text{ângulo de repouso}$)

O parâmetro chave para determinação das alterações no fundo é a taxa de alteração do fundo $\frac{\partial z}{\partial t}$ no centro da célula computacional. Esse parâmetro pode ser obtido de várias formas, mas em geral todos os métodos são baseados na equação de Exner (equação da continuidade do sedimento), que pode se escrita como:

$$-(1 - n) \frac{\partial z}{\partial t} = \frac{\partial S_x}{\partial x} + \frac{\partial S_y}{\partial y} - \Delta S \quad (19)$$

Onde:

n porosidade do fundo, m

z profundidade, m

t tempo, s

S_x carga total de transporte na direção x, m³

S_y carga total de transporte na direção y, m³

x,y coordenadas cartesianas horizontais ortogonais

ΔS Taxa fonte ou sumidouro de sedimento, em equilíbrio é zero, m³/s

Para a descrição de um transporte de sedimento em equilíbrio, o termo fonte/sumidouro deve ser zero. A descrição das taxas de transporte de sedimento para um modelo combinado de onda e corrente é sempre uma descrição em equilíbrio.