



COPPE/UFRJ

ATENUAÇÃO DE ONDAS SUPERFICIAIS DE GRAVIDADE SOBRE FUNDOS
LAMOSOS: ESTUDO DE CASO DA PRAIA DO CASSINO, RS

Saulo Meirelles Nunes da Rocha

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Oceânica, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Oceânica.

Orientador: Susana Beatriz Vinzon

Rio de Janeiro
Setembro de 2010

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

ATENUAÇÃO DE ONDAS SUPERFICIAIS DE GRAVIDADE SOBRE FUNDOS
LAMOSOS: ESTUDO DE CASO DA PRAIA DO CASSINO, RS

Saulo Meirelles Nunes da Rocha

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO
ALBERTO LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE
ENGENHARIA (COPPE) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE
JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A
OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA
OCEÂNICA.

Examinada por:

Prof. Susana Beatriz Vinzon, D.Sc.

Prof. Carlos Eduardo Parente Ribeiro, D.Sc.

Prof. Lauro Julio Calliari, D.Sc.

Prof. Afonso de Moraes Paiva, Ph.D.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL
SETEMBRO DE 2010

Meirelles Nunes da Rocha, Saulo

Atenuação de ondas superficiais de gravidade sobre fundos lamosos: estudo de caso da Praia do Cassino, RS/Saulo Meirelles Nunes da Rocha. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2010.

XVIII, 102 p.: il.; 29,7cm.

Orientador: Susana Beatriz Vinzon

Dissertação (mestrado) – UFRJ/COPPE/Programa de Engenharia Oceânica, 2010.

Referências Bibliográficas: p. 90 – 96.

1. Ondas superficiais de gravidade. 2. Lama fluida. 3. Sedimentos coesivos. I. Vinzon, Susana Beatriz. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Oceânica. III. Título.

*À minha mãe, Maria Helena,
pelo dom da vida e pelo amparo
ao longo desses anos e ao amigo
Leonardo Dardengo (in
memoriam) pelos bons
momentos.*

Agradecimentos

À Prof. Susana Vinzon pela amizade, orientação e pelos ensinamentos sobre o assunto. Agradeço também pela compreensão demonstrada aos meus longos períodos de ausência e por acreditar na finalização deste trabalho.

Ao Prof. Carlos Eduardo Parente por fornecer o código da técnica DAAT e por se mostrar sempre disponível (e entusiasmado) para discutir sobre o tratamento dos dados de ondas. Obrigado por permitir minha entrada no Olimpo!

Ao Prof. Lauro Calliari pelo enorme apoio durante os trabalhos de campo e pelas discussões sobre o assunto.

Ao Prof. Afonso Paiva por aceitar em participar como integrante da banca de defesa.

Aos colegas do LDSC, em especial, ao Marcos Gallo por ensinar pacientemente a usar os instrumentos de medição.

Aos amigos Fabio Nascimento (Fabeyonce) e Thiago Leão (Billy Boy) pela imensa colaboração durante o planejamento e a execução dos trabalhos de campo. Agradeço também pelos divertidos momentos durante os períodos de folga.

À equipe do LOG/FURG pela ajuda durante os levantamentos de campo, em especial, ao Rafael Guedes (Vesgão), por todo apoio nas diversas etapas desse trabalho e, também, pela amizade.

Aos colegas de turma do mestrado, principalmente, ao Ricardo pelas discussões sobre ondas e pela ajuda com o Grads.

Ao meu camarada Guilherme Mill (Milim) pela ajuda imensurável durante a etapa final deste trabalho. Decerto sem suas revisões em tempo real e discussões sobre o assunto este trabalho não terminaria. Agradeço também pelo suporte logístico durante as 3 semanas de reclusão!

À Marise por ser mãe de todos os alunos e por suas palavras incentivadoras.

Ao Wouter Kranenburg pelas incansáveis discussões sobre o SWAN durante sua estada no Brasil.

A minha família, em especial, minha mãe, meu irmão Felipe e minha avó Alice, pelo amor zeloso e apoio incondicional. Aos meus sobrinhos (e afilhados), Giovanna e Pedro, pela alegria.

À Camila pelo companheirismo e por apresentar as belezas e as peculiaridades

que o Cassino oferece, as quais me estimularam a terminar este trabalho.

Aos meus amigos de fé Palito, Victor e Fred pelos bons momentos ao longo desses anos.

Aos "feras" Jano e Rafael Soutelino e, também, ao Felipe Marques pelas intermitentes ajudas com o Linux, Latex e Matlab (não necessariamente nessa ordem)!

À Petrobras pela concessão das folgas para terminar este trabalho.

Ao CNPq pelo suporte financeiro durante os primeiros 18 meses de curso.

Aos desenvolvedores do pacote COPPET_EX. Parabéns pela iniciativa!

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

ATENUAÇÃO DE ONDAS SUPERFICIAIS DE GRAVIDADE SOBRE FUNDOS
LAMOSOS: ESTUDO DE CASO DA PRAIA DO CASSINO, RS

Saulo Meirelles Nunes da Rocha

Setembro/2010

Orientador: Susana Beatriz Vinzon

Programa: Engenharia Oceânica

A praia do Cassino, RS, é conhecida pela presença de extensos bolsões de lama na plataforma interna adjacente à Laguna dos Patos. No presente estudo é investigada a atenuação das ondas quando propagadas sobre fundo lamoso por meio de dados coletados *in situ* e pela aplicação da modelagem numérica. Com auxílio de uma técnica de análise espectral observou-se que a atenuação das ondas ocorre de forma diferenciada para faixas pré-definidas de períodos de onda. Medições de campo revelaram que a alta variabilidade da estrutura espacial do depósito de lama possui estreita relação com a dissipação das ondas induzidas pela lama fluida, que, conforme definido neste trabalho, possui densidades variando entre 1080 e 1250 $g.l^{-1}$. Os resultados mostraram que as ondas com períodos entre 3,75 e 6,25 s experimentam a maior atenuação por conta da interação com o fundo lamoso.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

OCEAN WAVE ATTENUATION OVER MUDDY BOTTOM: CASE STUDY AT
CASSINO BEACH, RS, BRAZIL

Saulo Meirelles Nunes da Rocha

September/2010

Advisor: Susana Beatriz Vinzon

Department: Ocean Engineering

Extensive mud deposits are found offshore Cassino Beach, RS, Brazil. The wave damping over muddy bottom is studied using field measurements and a numerical wave model. By applying a technique of spectral analysis we showed that the wave attenuation occurs differently for predetermined wave periods bands. Field measurements revealed that the high variability of the spatial structure of the deposit of mud has a close relationship with the dissipation of wave-induced fluid mud. The results showed that short waves (from 3,75 to 6,25 s) undergone the greatest damping by interacting with fluid mud.

Sumário

Lista de Figuras	xi
Lista de Tabelas	xviii
1 Introdução	1
1.1 Contextualização	1
1.2 Problemática do estudo	3
1.3 Motivação e objetivos	5
2 Fundamentos Teóricos	6
2.1 Propriedades dos sedimentos coesivos	6
2.1.1 Propriedades reológicas da lama	7
2.1.2 Características da lama fluida	8
2.2 Princípios da modelagem matemática da atenuação das ondas	9
2.2.1 Modelos de duas camadas de dissipação viscosa	10
3 Área de Estudo	17
3.1 A Praia do Cassino, RS: aspectos gerais	17
3.2 Características dos depósitos lamíticos ao largo da praia do Cassino	21
4 Conjunto de Dados	27
4.1 A campanha oceanográfica de 2005	28
4.1.1 Processamento dos dados de ondas	30
4.2 A campanha oceanográfica de 2007	36
4.2.1 Estrutura vertical de densidade do depósito	38
4.3 A campanha oceanográfica de 2008	41
5 Análise da Dissipação de Energia das Ondas por Faixas de Frequências	46
5.1 Princípios da técnica DAAT	47
5.2 Aplicação da DAAT	47
5.3 Considerações sobre os resultados obtidos com a DAAT	67

5.4	Modelagem numérica da dissipação viscosa	71
5.4.1	Simulações realizadas com o SWAN	72
6	Estudo da atenuação das ondas por meio de dados coletados <i>In Situ</i>	75
6.1	Análise da variabilidade do perfil vertical de densidade da lama e sua influência na atenuação das ondas	76
6.2	Considerações Finais	82
7	Considerações Finais	86
7.1	Sumário e conclusões	86
7.2	Recomendações para trabalhos futuros	88
	Referências Bibliográficas	90
A	Descrição da implementação do modelo de dissipação viscosa no modelo de ondas SWAN	97
B	Condições de contorno e batimetria utilizados como entrada no SWAN	100

Lista de Figuras

2.1	Esquema ilustrativo do modelo de duas camadas de dissipação viscosa.	10
2.2	$(k^2/\omega^2) H_{w0}g$ em função de $H_{m0}\sqrt{\omega/2\nu}$. $(k^2/\omega^2) H_{w0}g$ representa a taxa entre a velocidade de fase da onda superficial e a velocidade de fase complexa da onda interna na interface água-sedimento. $H_{m0}\sqrt{\omega/2\nu}$ representa a espessura da camada limite dada pela espessura da camada de lama fluida.	15
3.1	Apresentação da área de estudo, com destaque ao Balneário do Cassino, RS.	18
3.2	Perfil (E-W) ilustrativo dos sistemas deposicionais da Planície Costeira do Rio Grande do Sul. Modificado de TOMAZELLI e VILLWOCK [59].	18
3.3	Pluma costeira da Laguna dos Patos.	22
3.4	Características do depósito lamítico ao largo da praia do Cassino, RS.	23
3.5	Mosaico georreferenciado da vista aérea da Praia do Cassino. Percebe-se claramente a inexistência da zona de surfe na região central da imagem. Gentilmente cedido pelo Laboratório de Oceanografia Geológica da FURG - LOG/FURG.	25
3.6	Impactos gerados pela deposição de lama na Praia do Cassino.	26
4.1	Localização das estações (marcada pelos símbolos em cruz) aonde foram fundeados os equipamentos de medição de ondas durante a campanha oceanográfica de 2005.	28
4.2	Comparação entre os dados de vento da Estação Meteorológica No. 83995 e a estação meteorológica da Praticagem da Barra de Rio Grande.	30
4.3	Controle de qualidade dos dados do ondógrafo e construção dos espectros. Notar a diferença de escala entre os eixos y dos gráficos entre os dias 28/05 e 16/06.	32

4.4	Painel superior: segmento da série da série temporal bruta da pressão e das componentes u (leste) e v (norte). Painel inferior: função de coerência entre a pressão e as componentes de velocidade (C_{pu} e C_{pv}). No dia 28/05/2005 tem-se as condições de mar mais branda de todo período, enquanto no dia 16/06/2005, foram observados os mais severos estados de mar.	34
4.5	Controle de qualidade dos dados do perfilador de corrente e construção dos espectros. Notar a diferença de escala entre os eixos y dos gráficos entre os dias 28/05 e 16/06.	35
4.6	Série temporal dos parâmetros de ondas e velocidade do vento adquiridos durante a Campanha de 2005 (Waverider - WDR; Aquadopp - ADP). A área hachurada indica o período de condições de mar mais severas. Os parâmetros apresentados são: altura significativa (H_s), direção principal (Dir), período de pico (T_p) e espalhamento direcional (Spr).	37
4.7	Carta do campo de vento e de pressão obtido da reanálise II do NCEP/NCAR para o período de estado de mar mais severo.	38
4.8	Localização das estações (marcada pelos símbolos em vermelho) aonde foram levantadas as informações sobre o depósito durante a campanha oceanográfica de 2007. À direita dos pontos seguem a numeração das estações e as datas em que foram coletados os dados. Os símbolos em preto marcam os fundeios dos equipamentos de medição de ondas da campanha anterior.	39
4.9	Levantamento das informações sobre o depósito de lama fluida durante a campanha de 2007.	40
4.10	Exemplo do tratamento dos dados gerados com o densímetro. À esquerda, a curva suavizada após as correções aplicadas. À direita, o perfil dos dados brutos, mostrando o registro da subida do equipamento. O perfil foi realizado no dia 31/10/2007 na estação #04.	41
4.11	Comparação entre a determinação da densidade da lama usando densímetro e em laboratório a partir dos testemunhos. Os resultados sugerem uma tendência de similaridade entre os métodos aplicados, os quais apresentaram correlação significativa em todas as estações exceto na #05.	42
4.12	Esquema da estratégia amostral da campanha de 2008, exibindo a aquisição simultânea de dados com os equipamentos utilizados, os quais, da esquerda para a direita, são: o perfilador acústico de corrente, o correntômetro e o densímetro.	42
4.13	Levantamento de dados durante a campanha de 2008.	43

4.14	Comparação entre um segmento das séries de pressão (no fundo) e de AST medidos pelo AWAC na estação #10 à 18 m de profundidade. Notar a menor amplitude do sinal de pressão.	44
5.1	Representação gráfica da DAAT (PLEDS), mostrando a evolução temporal dos espectros direcionais de cada faixa de frequências dos dados extraídos das medições de ondas efetuada pelo Waverider (25 m) durante maio de 2005. As barras verticais indicam a intensidade e direção do vento.	49
5.2	Representação gráfica da DAAT (PLEDS), mostrando a evolução temporal dos espectros direcionais de cada faixa de frequências dos dados extraídos das medições de ondas efetuada pelo Waverider (25 m) durante junho de 2005. As barras verticais indicam a intensidade e direção do vento.	50
5.3	Representação gráfica da DAAT (PLEDS), mostrando a evolução temporal dos espectros direcionais de cada faixa de frequências dos dados extraídos das medições de ondas efetuada pelo Aquadopp (8 m) durante maio de 2005. As barras verticais indicam a intensidade e direção do vento.	51
5.4	Representação gráfica da DAAT (PLEDS), mostrando a evolução temporal dos espectros direcionais de cada faixa de frequências dos dados extraídos das medições de ondas efetuada pelo Aquadopp (8 m) durante junho de 2005. As barras verticais indicam a intensidade e direção do vento.	52
5.5	Rosa dos ventos (direção principal x período de pico) e histograma de Hs obtidos com os dados de ondas da campanha de 2005. A presença do mapa ilustra a posição das estações e a respectiva diferença de profundidade entre as mesmas (à esquerda: Aquadopp; à direita: Waverider).	53
5.6	(a) Comparação do comportamento da evolução dos espectros direcionais das séries do Waverider (WDR) e do Aquadopp (AQD) para faixa 1 para o mês de maio. As cores representam os espectros dos registros de cada equipamento (Waverider em amarelo e Aquadopp em vermelho).	54
5.7	(b) Comparação do comportamento da evolução dos espectros direcionais das séries do Waverider (WDR) e do Aquadopp (AQD) para faixa 1 para o mês de junho. As cores representam os espectros dos registros de cada equipamento (Waverider em amarelo e Aquadopp em vermelho).	55

5.8	(c) Comparação da evolução temporal dos espectros de energia da faixa 1 entre o Waverider (WDR) e o Aquadopp (AQD) para a série completa.	56
5.9	(a) Comparação do comportamento da evolução dos espectros direcionais das séries do Waverider (WDR) e do Aquadopp (AQD) para faixa 2 para o mês de maio. As cores representam os espectros dos registros de cada equipamento (Waverider em amarelo e Aquadopp em vermelho).	57
5.10	(b) Comparação do comportamento da evolução dos espectros direcionais das séries do Waverider (WDR) e do Aquadopp (AQD) para faixa 2 para o mês de junho. As cores representam os espectros dos registros de cada equipamento (Waverider em amarelo e Aquadopp em vermelho).	58
5.11	(c) Comparação da evolução temporal dos espectros de energia da faixa 2 entre o Waverider (WDR) e o Aquadopp (AQD) para a série completa.	59
5.12	(a) Comparação do comportamento da evolução dos espectros direcionais das séries do Waverider (WDR) e do Aquadopp (AQD) para faixa 3 para o mês de maio. As cores representam os espectros dos registros de cada equipamento (Waverider em amarelo e Aquadopp em vermelho).	60
5.13	(b) Comparação do comportamento da evolução dos espectros direcionais das séries do Waverider (WDR) e do Aquadopp (AQD) para faixa 3 para o mês de junho. As cores representam os espectros dos registros de cada equipamento (Waverider em amarelo e Aquadopp em vermelho).	61
5.14	(c) Comparação da evolução temporal dos espectros de energia da faixa 3 entre o Waverider (WDR) e o Aquadopp (AQD) para a série completa.	62
5.15	(a) Comparação do comportamento da evolução dos espectros direcionais das séries do Waverider (WDR) e do Aquadopp (AQD) para faixa 4 para o mês de maio. As cores representam os espectros dos registros de cada equipamento (Waverider em amarelo e Aquadopp em vermelho).	63
5.16	(b) Comparação do comportamento da evolução dos espectros direcionais das séries do Waverider (WDR) e do Aquadopp (AQD) para faixa 4 para o mês de junho. As cores representam os espectros dos registros de cada equipamento (Waverider em amarelo e Aquadopp em vermelho).	64

5.17 (c) Comparação da evolução temporal dos espectros de energia da faixa 4 entre o Waverider (WDR) e o Aquadopp (AQD) para a série completa.	65
5.18 Evolução temporal dos espectros de densidade de energia para cada uma das faixas de frequências computadas pela DAAT tanto para a série do Waverider (painel inferior) quanto para a do Aquadopp (painel superior). Notar a diferença entre as escalas do eixo y dos gráficos.	65
5.19 Comparação entre os espectros unidirecionais para os dias de estado de mar mais brando (29/05) e mais severo (16/06). Notar a diferença entre as escalas do eixo y dos gráficos.	66
5.20 Série temporal da taxa do decaimento da altura de onda calculada pelo logaritmo da razão entre os valores de H_s do Waverider e do Aquadopp de cada banda de frequência. $H_s = \sqrt{E}$, sendo E , a densidade de energia de cada registro das faixas.	67
5.21 Variação do número de onda imaginário k_i (GADE [19]) para diferentes valores de ν , H_{m0} e T . A profundidade H_{w0} é de 8 m e a densidade da lama ρ_m é igual à 1310 g.l^{-1} . O eixo das abscissas é dado pelo parâmetro adimensional $\sqrt{\sigma/2\nu H_m}$ que representa a espessura da camada de lama e o eixo das ordenadas é representado pelo número de onda imaginário adimensional $(\Im(k)/\sigma\sqrt{H_m g})$. A área hachurada define o limite de aplicação do modelo.	68
5.22 Painel superior: série temporal de altura significativa dos dados medidos pelo Aquadopp (AQD) e pelo Waverider (WDR). Painel inferior: taxa de dissipação Ds da altura significativa das ondas ao longo da série.	69
5.23 Fluxo de energia ao longo do espectro em águas rasas. Adaptado de HOLTHUIJSEN [22]. As setas hachuradas indicam a saída de energia do sistema por encapelamento, fricção e dissipação viscosa. As setas em branco significam entrada de energia pela ação dos ventos e migração de energia através das componentes de frequência mediante as interações não lineares triplas e quádruplas. As setas pretas ilustram as possíveis transformações dos espectros.	70
5.24 Gráfico de dispersão comparando as alturas significativas das diferentes simulações. $S02 \times S01$ compara o termo MUD contra o FRIC. $S02 \times S03$ compara o termo TRIad contra o FRIC. $S02 \times S04$ compara os termos QUAD, WINDG, WCAP contra o FRIC.	73

6.1	Variação do perfil de densidade do sedimento obtidos nos dias 09 (linha preta) e 11/04/2008 (linha cinza). As estações de coleta são, da esquerda para direita: #01, #05 e #07.	76
6.2	Diagrama triangular de Shepard para as amostras de sedimento coletadas durante a campanha de 2008. Notar a predominância da fração silte-argila. Na legenda são exibidas as estações. Os índices <i>a</i> e <i>b</i> representam o número de repetições em que foram coletadas amostras nas respectivas estações.	77
6.3	Perfil batimétrico (linha preta) sobreposto pelos valores máximos da espessura da camada de lama estimada pelo densímetro (linha cinza), juntamente com os valores de Hs medidos para cada dia de coleta. Os símbolos quadrados são referentes ao dia 09/04, os círculos ao dia 10/04 e os triângulos ao dia 11/04. A distância entre as estações é de aproximadamente 1,5 km. O segmento de reta em vermelho indica a extrapolação do perfil e não deve ser considerado. Notar exagero vertical da figura.	78
6.4	Painel superior: comparação dos espectros de densidade de energia extraídos das medições de ondas com AWAC (#10) e com Vector (#01, #05 e #07) para o dia 09/04. Painel inferior: perfil vertical de densidade do sedimento obtidos em concomitância com as medições de ondas nas estações #01, #05 e #07. A faixa de lama fluida é indicada pela linha vermelha. As estações de coleta são, da esquerda para direita: #01, #05 e #07. São apresentados os valores de Hs e os horários das medições.	80
6.5	Painel superior: comparação dos espectros de densidade de energia extraídos das medições de ondas com AWAC (#10) e com Vector (#005, #02, #03, #04 e #06) para o dia 10/04. Painel inferior: perfil vertical de densidade do sedimento obtidos em concomitância com as medições de ondas nas estações #005, #02, #03, #04 e #06. A faixa de lama fluida é indicada pela linha vermelha. As estações de coleta são, da esquerda para direita: #005, #02, #03, #04 e #06. São apresentados os valores de Hs e os horários das medições.	82

6.6	Painel superior: comparação dos espectros de densidade de energia extraídos das medições de ondas com AWAC (#10) e com Vector (#03, #05 e #07) para o dia 11/04. Painel inferior: perfil vertical de densidade do sedimento obtidos em concomitância com as medições de ondas nas estações #03, #05 e #07. A faixa de lama fluida é indicada pela linha vermelha. As estações de coleta são, da esquerda para direita: #03, #05 e #07. São apresentados os valores de Hs e os horários das medições.	83
6.7	Segmento da série temporal do registro de pressão medido na estação #005 no dia 10/04.	84
B.1	Batimetria do domínio computacional e a máscara da camada de lama utilizada nas simulações em 2D. O retângulo em vermelho representa o domínio do aninhamento.	101
B.2	Esquema ilustrativo do domínio computacional SWAN, exibindo a extensão dos segmentos das fronteiras (leste e sul) por onde os espectros do Waverider entraram (condição inicial). Notar que o espectro entra por toda a fronteira leste.	102

Lista de Tabelas

2.1	Definição dos parâmetros.	11
3.1	Resumo das Normais Climatológicas Provisórias da Estação Meteorológica, No.83995, entre 1991 a 2000. Fonte: REBOITA [47].	20
4.1	Distribuição dos sedimentos por classe de tamanho.	45
5.1	Estatística básica da série temporal dos espectros de densidade de energia referentes à ambos os equipamentos (WDR: Waverider; AQD: Aquadopp). min.: mínimo; máx.: máximo; média: média aritmética; desv. pad.: desvio padrão.	62
5.2	Principais variáveis (des)ativadas nas diferentes rodadas com o SWAN. MUD = ativa a opção de dissipação por lama; WINDG = ativa a opção de crescimento das ondas pelo vento; QUAD = ativa as interações não lineares quadrúplas; WCAP = ativa a dissipação de energia por encapelamento; TRIad = ativa as interações não lineares triplas; FRIC = ativa a opção de dissipação por atrito com o fundo.	72
6.1	Apresentação dos resultados das medições de onda e espessura da camada de lama fluida para cada estação de coleta, bem como a relação entre os valores de Hs medidos nas estações mais rasas ($H_{s_{in}}$) com Hs medido na estação #10 ($H_{s_{out}}$).	78

Capítulo 1

Introdução

1.1 Contextualização

Diversas regiões costeiras e estuarinas de todo mundo apresentam substratos caracterizados pela presença preponderante de sedimentos coesivos, frequentemente referidos como lama [13, 15, 25, 31]. Embora comumente desconsiderados sob a perspectiva da hidrodinâmica costeira, os depósitos lamíticos são encontrados em uma grande variedade de ambientes litorâneos, distribuindo-se desde o Ártico até os trópicos [21, 70].

Não raro, a influência de tais depósitos na morfodinâmica desses ambientes ocorre de forma bastante acentuada, pelo fato da lama possuir propriedades específicas e processos de transportes particulares, por exemplo, a floculação, o assentamento, a deposição, a consolidação, a erosão, a liquefação e a fluidificação [13], que ocorrem de maneira diferenciada quando comparados aos demais tipos de depósitos sedimentares. Diante dessas singularidades, as matrizes minerais dos sedimentos coesivos, em muitos casos, formam associações com outras entidades químicas, como metais pesados, fertilizantes e pesticidas, o que facilita a troca de poluentes entre o substrato lamoso e o meio aquático, podendo oferecer riscos às atividades antropogênicas e ao meio ambiente [13, 51, 61].

Além disso, o contínuo acúmulo de lama em portos e canais que, habitualmente, se torna um problema para a navegação, requer uma atividade de dragagem demasiado onerosa. Ainda, em eventos de rápida sedimentação, pode acontecer o soterramento de comunidades bentônicas, causando impactos ecológicos [13, 31]. Por outro lado, a presença de bancos de lama em ambientes costeiros não só serve de abrigo natural contra a ação de ondas [15, 19, 21], como também para aprisionar nutrientes e, adicionalmente, funcionar como berçário de espécies marinhas de importância econômica [17].

GADE [19] relatou que, durante períodos de condições de mar severas ao largo

da costa da Lousiana no Golfo de México, os barcos de pesca abrigavam-se em águas localizadas sobre um conhecido sítio de lama chamado de *Mud Hole*. Estudos posteriores também objetivaram compreender a interação das ondas de gravidade com fundos lamosos na costa da Lousiana, como HSIAO e SHEMDIN [23], SHEREMET e STONE [52], WELLS e ROBERTS [71].

Outras regiões do mundo também foram objeto de estudo no que concerne à dinâmica dos sedimentos coesivos e sua relação com a hidrodinâmica local. WINTERWERP *et al.* [74] aplicaram um modelo numérico de ondas de terceira geração para prever a atenuação das ondas quando viajam sobre os depósitos lamíticos na plataforma continental interna da Guiana. Os resultados mostraram um decréscimo relativo de 50% da altura significativa (H_s) quando o trem de ondas alcançava o depósito de lama fluida. Embora os resultados de H_s computados tenham apresentado boa concordância com observações de campo, os autores reiteram a importância de levantamentos de dados adicionais que contemplem variações espaço-temporais do espectro de ondas, da espessura e extensão do depósito de lama fluida, bem como de suas propriedades reológicas, de modo a validar o modelo numérico.

SOLTANPOUR *et al.* [54], por meio da modelagem física e numérica, buscaram compreender o amortecimento da energia das ondas quando propagadas sobre os bancos de lama do Golfo Pérsico. Os experimentos conduzidos pelos autores mostraram que dois modelos reológicos distintos tiveram desempenhos semelhantes na simulação da atenuação das ondas sobre o substrato fluido.

Na costa sudoeste da Índia, MATHEW *et al.* [30], realizaram medições simultâneas de ondas ao longo de duas estações de coleta perpendiculares à linha de costa. Os autores tentaram associar a dinâmica da formação, manutenção e dissipação do banco de lama à ação das ondas de gravidade. Nos períodos de ausência dos depósitos de lama, foi observado uma dissipação na ordem de 25% da energia das ondas. Após a formação do banco de lama, os autores verificaram que a altura das ondas era atenuada em 75 – 85% ao se propagarem por uma distância de 1,1 km.

ELGAR e RAUBENHEIMER [15], na costa da Lousiana, fazendo uso da modelagem numérica e de dados coletados *in situ*, verificaram que a energia das ondas de mais baixa frequência é dissipada ao interagir com o fundo lamoso, entretanto, a atenuação das ondas em alta frequência nem sempre está associada ao tipo de fundo, podendo ter relação com as interações não lineares onda-onda. O amortecimento de energia ao longo de todo o espectro de ondas também foi confirmado por SHEREMET e STONE [52].

No Brasil, a praia do Cassino, RS, é conhecida pela presença de extensos bolsões de lama na plataforma interna adjacente à Laguna dos Patos que, em dadas circunstâncias, migram até o pós-praia. Tamanho evento, de caráter singular na costa brasileira, desperta a atenção de cientistas e curiosos e tem sido alvo de es-

tudos. Dentre os trabalhos pioneiros estão os de VILLWOCK e MARTINS [65] e MARTINS *et al.* [29], que investigaram a origem e os mecanismos de formação do depósito lamítico e, ainda, associaram sua ocorrência no prisma praial à ação de ondas de tempestade. CALLIARI *et al.* [6] observaram a completa inexistência da arrebenção em alguns trechos da praia do Cassino após um período de ressaca. A expressiva atenuação da energia das ondas seria imputada à migração do depósito desde a ante-praia até a face de praia, como resultado do ataque das ondas.

Inserido nesse contexto, vê-se uma crescente preocupação de alguns segmentos da sociedade com respeito ao gerenciamento das áreas costeiras marcadas pela predominância de bancos lamíticos, resultando na concepção de diversos projetos de pesquisa nos últimos 20 anos, muitos dos quais concentram esforços para o entendimento do complexo comportamento dos sedimentos coesivos sob regimes hidrodinâmicos variados [13, 17, 21, 31, 32].

1.2 Problemática do estudo

O conjunto de questões tocantes à compreensão da interação dos depósitos lamíticos com a hidrodinâmica costeira, em especial, com as ondas superficiais de gravidade, revela, apesar dos avanços, a necessidade de um conhecimento integrado entre a reologia do sedimento e os mecanismos que regem a propagação e a dissipação das ondas [15, 52]. HOLLAND *et al.* [21] chamam atenção para o reduzido número de publicações tratando da importância deste assunto.

Para a compreensão da interação das ondas superficiais com os depósitos de lama fluida, são indispensáveis levantamentos de campo. SHEREMET e STONE [52] advertem sobre a grande complexidade do emprego de instrumentos de medição em regiões cuja composição textural predominante é representada por depósitos lamíticos, o que explica, em parte, a escassez de dados neste tipo de ambiente. Algumas destas dificuldades têm estimulado o desenvolvimento de diferentes técnicas de medição e de modelagem numérica, as quais ainda precisam ser aprimoradas.

O planejamento adequado da estratégia amostral adotada é fundamental para o sucesso da execução de campo. Para o estudo da atenuação de ondas quando propagadas sobre fundos lamosos, usualmente, executam-se medições simultâneas dos principais parâmetros de onda em duas estações com profundidades distintas ao longo de uma radial perpendicular à linha de costa (e.g., ROGERS e HOLLAND [50], SOLTANPOUR *et al.* [53], TATAVARTI *et al.* [56], WINTERWERP *et al.* [74]). A ideia é que a estação em profundidades maiores se localize além do fundo lamoso. Desta forma seria possível observar a evolução das ondas ao longo do transecto até alcançar o depósito de lama.

Já SHEREMET e STONE [52] optaram por adotar outra estratégia de medição,

de forma que as duas estações de coleta se situassem sob a mesma linha isobatimétrica em águas mais rasas, sendo uma sobre um sítio arenoso e outra em um banco de lama. De acordo com esses autores, ambas as locações estavam sob o mesmo regime de ondas. A vantagem dessa configuração seria poder comparar o comportamento dos espectros de ondas nos dois depósitos sedimentares distintos (arenoso e lamoso) e, assim, saber a contribuição efetiva da atenuação de energia induzida pela lama fluida (dissipação viscosa) em oposição à dissipação no fundo tipicamente de areia.

Em concomitância à medição de ondas, são indispensáveis informações detalhadas sobre as características do depósito sedimentar no que tange a sua reologia. Depósitos de lama fluida são altamente dinâmicos, em função das forças hidrodinâmicas, o que os confere uma alta variabilidade espaço-temporal. Frequentemente são determinadas a espessura, a densidade e a viscosidade do depósito. Ensaio geotécnicos e outras medições diretas (e.g., testemunho) e indiretas (e.g., ecossonda de dupla frequência) também fornecem minúcias valiosas sobre o sedimento e seu comportamento.

Modelos numéricos têm sido propostos para simular a dissipação de energia das ondas superficiais de gravidade quando estas interagem com o fundo lamoso. JAIN e MEHTA [24] discutem o domínio de aplicação de modelos reológicos usados para estimar a atenuação das ondas. No mencionado estudo, é comparado o desempenho de modelos conhecidos como viscoso, viscoelástico e poroelástico, cujas abordagens físicas variam com a reologia do solo marinho. Os autores concluíram que a complexidade inerente à modelagem da dissipação da energia das ondas em ambientes costeiros com fundos lamosos, seria consequência de um conhecimento fragmentado sobre a descrição do comportamento constitutivo dos sedimentos, o que reforça a necessidade de informações prévias das características do depósito.

Defronte do exposto, percebe-se algumas lacunas no entendimento da interação das ondas superficiais com os depósitos lamíticos. Uma das razões para isso é a já mencionada carência de dados de ondas e de levantamentos geológicos coletados simultaneamente, o que forneceria elementos para o melhor entendimento da relação de retroalimentação entre as ondas e o depósito de lama fluida. Além disso, poucos estudos abordam como a atenuação de energia das ondas ocorre em termos do espectro de energia. Os trabalhos de SHEREMET e STONE [52] e ELGAR e RAUBENHEIMER [15] foram os primeiros expor a questão da dissipação das ondas mais curtas, porém o assunto ainda traz muitas discussões, conforme comentou S. Elgar (comunicação pessoal). Todas essas questões serão tratadas com mais detalhes nos capítulos subsequentes do presente estudo.

No Capítulo 3 é descrita a área de estudo, a Praia do Cassino, com ênfase nas características dos depósitos de lama, bem como no regime hidrodinâmico local. As campanhas oceanográficas efetuadas e o processamento dos dados levantados são

pormenorizados no Capítulo 4, aonde expõem-se os procedimentos sobre o controle de qualidade dos dados e o planejamento amostral escolhido. Os resultados alcançados são discutidos nos Capítulos 5 e 6, os quais abordam o assunto da atenuação das ondas sobre fundos lamosos utilizando diferentes ferramentas de análise e, também, conjuntos de dados distintos. Por fim, o sumário e a discussão das informações geradas encontram-se no Capítulo 7.

1.3 Motivação e objetivos

A motivação do presente estudo reside no fato da relevância deste assunto contrastar com as incertezas ainda existentes e a escassez de informações integradas entre as características do depósito e o regime hidrodinâmico. Tendo em vista as dúvidas levantadas, o cerne do atual trabalho é colaborar para a compreensão da atenuação das ondas sobre fundos lamosos cujos objetivos específicos são:

- investigar a dissipação de energia das ondas superficiais por banda de frequência, propondo como ferramenta uma técnica de análise direcional de ondas;
- analisar como os mecanismos de dissipação viscosa de energia das ondas se comparam a outros processos dissipativos e às transferências de energia ao longo do espectro de ondas;
- coligir informações sobre a variabilidade da estrutura vertical de densidade do depósito de lama e suas implicações na dissipação de energia das ondas;
- compartilhar as estratégias adotadas e as lições aprendidas nas campanhas de campo realizadas para perfazer o conjunto de dados deste estudo.

Capítulo 2

Fundamentos Teóricos

Este capítulo trará uma breve revisão dos conceitos elementares relacionados aos sedimentos coesivos. Ademais, será apresentado, de forma sucinta, o ferramental matemático da modelagem numérica das transformações das ondas quando interagem com a lama fluida.

2.1 Propriedades dos sedimentos coesivos

O termo sedimento coesivo está geralmente associado a um tipo de material viscoso, lamoso, fétido e, por vezes, gasoso. A palavra "coesivo" exprime o comportamento dúctil quando o sedimento é remodelado. Em verdade, todos os sedimentos coesivos consistem de sólidos orgânicos e minerais de dimensões granulares [73].

No ambiente marinho, os sedimentos coesivos, ou lama, são formados por uma mistura de argila, silte, areia fina, material orgânico, água e, em algumas ocasiões, gás [13]. O comportamento destes grãos varia no tempo e no espaço em razão do volume de sedimento disponível, das condições meteo-oceanográficas, da atividade biológica, entre outros [73]. O caráter de coesão resulta, principalmente, da presença de diferentes minerais argilosos no depósito, os quais compreendem a composição primária destes sedimentos [51, 57].

Os argilo-minerais constituem a fração mais fina dos solos, geralmente com dimensão inferior a $2\ \mu\text{m}$ e, no ambiente marinho, são oriundos da desagregação de minerais como a caulinita, illita, esmectita e clorita. Não só o reduzido tamanho dos grãos, mas principalmente, a constituição mineralógica, faz com as argilas tenham um comportamento extremamente diferenciado em relação aos grãos de silte e areia [46].

O tamanho e a forma achatada das partículas de argila produzem uma superfície de contato específica de forma que a distribuição da carga elétrica exerça uma significativa força eletro-química na presença de água [46, 73]. A presença de matéria orgânica pode também influenciar substancialmente as características da lama, pelo

fato de algumas substâncias orgânicas atuarem como material de ligação, reforçando a atração entre as partículas [13].

No caso da lama fluida com baixo teor de conteúdo orgânico, os grãos de argila tipicamente compreendem 50–70 % de sólidos e os siltes ocupam posição secundária. Em ambientes mais energéticos, partículas maiores (na fração de areia fina) são ocasionalmente transportadas até a mistura fluida, no entanto, representam uma pequena porcentagem por conta do rápido assentamento [32].

2.1.1 Propriedades reológicas da lama

A ciência da reologia estuda a deformação e o comportamento mecânico do fluido quando induzido por uma força externa. A reação da maioria dos materiais a aplicação de cargas pode ser matematicamente caracterizada pelas equações constitutivas.

A lama pode exibir propriedades pseudoplásticas, viscoplásticas e/ou viscoelásticas as quais dependem da composição argilo-mineralógica e das condições hidrodinâmicas locais [32]. A dificuldade de estabelecer correlações entre os grãos argilas por meios de índices empíricos, surge da diversidade de comportamentos apresentados por estes sedimentos em situações distintas [46].

Em geral, a lama liquefeita em baixas concentrações pode ser considerada como um fluido Newtoniano com viscosidades maiores do que a da água. A viscosidade, por sua vez, é fortemente dependente das interações entre as partículas. Em adição, o comportamento em meio aquoso dessas partículas, possuidoras de superfícies específicas tão particulares, é muito diferenciado e, nesse caso, a lama liquefeita pode ser tratada como um fluido.

A equação constitutiva para um fluido Newtoniano ou viscoso relaciona, linearmente, uma tensão aplicada T a uma taxa de deformação D , conforme a seguir:

$$T'_{ij} = 2\mu D'_{ij}, \quad (2.1)$$

onde

$$D_{ij} = \frac{1}{2} \left\{ \frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right\}. \quad (2.2)$$

Sendo T e D a tensão e a taxa de deformação, respectivamente; i, j são os índices que indicam os eixos de coordenadas; v_i é a velocidade na direção x_i ; e μ a viscosidade dinâmica.

A Equação 2.1 é a definição matemática de um fluido e, também, é conhecida

como Lei de Newton da viscosidade. Esta afirma que, um fluido se deforma continuamente enquanto uma tensão de cisalhamento (*shear stress*) atuar sobre o mesmo. A viscosidade μ é a propriedade associada à resistência que o fluido oferece a deformação por cisalhamento. Nota-se na Equação 2.1 que, quando a viscosidade é constante, T e D apresentam um relação linear, típica dos fluidos Newtonianos. Para os fluidos não-Newtonianos, como os pseudoplásticos, viscoplásticos e plásticos, a viscosidade é função de D estabelecendo uma relação não-linear entre T e D [20, 73].

2.1.2 Características da lama fluida

A lama fluida pode ser entendida como uma solução aquosa com alta concentração (igual ou superior ao ponto de geleificação) de sedimentos finos, os quais têm sua sedimentação impedida pela proximidade entre os grãos e flocos. Estes são incapazes de formar matrizes de ligação fortes o suficiente para eliminar seu potencial de mobilidade, exibindo um comportamento não-Newtoniano (principalmente em grandes concentrações) [31]. A espessura da camada fluida do depósito pode variar de poucos decímetros a metros e sua densidade normalmente varia entre 1080 e 1200 $g.l^{-1}$, podendo alcançar valores ainda superiores.

O termo liquefação às vezes é utilizado como sinônimo de fluidificação, contudo, existe uma distinção entre os dois fenômenos. O primeiro ocorre quando o pacote sedimentar saturado colapsa devido a uma tensão externa, fazendo com que os grãos permaneçam temporariamente em suspensão no fluido intersticial. Por fim, a condição inicial é restabelecida em um curto período de tempo. O outro mecanismo acontece quando a velocidade vertical do fluido nos poros excede a velocidade de sedimentação das partículas e a mistura água-sedimento se comporta como um fluido. Nesse caso, existe um suprimento externo de água no pacote sedimentar [13, 31].

A fluidificação da lama consolidada pela ação das ondas ocorre quando a matriz do solo é destruída pelo aumento excessivo da poro-pressão (pressão atuante no fluido que se encontra no espaço poroso). Inicialmente, pequenas deformações elásticas são geradas por tensões cíclicas resultantes da passagem das ondas. A partir do momento em que estas tensões sobrepõem a resistência do fundo em se deformar, ocorrem falhas internas que permitem a infiltração de água nos poros, a qual exerce uma força de arrasto sobre os agregados de sedimentos, que se separam até que um equilíbrio seja atingido. Então, o sedimento fica em suspensão no meio fluido cuja viscosidade é ordens de grandeza superior a da água. Esse processo ocorre numa pequena escala de tempo, da ordem de dezenas de segundos a poucos minutos [31, 74]. A interface, muitas vezes bem marcada, entre a lama fluida e o compartimento água é conhecida como lutoclina.

A passagem das ondas superficiais de gravidade sobre o banco de lama fluida é capaz de gerar ondas internas na interface entre a água e o sedimento (lutoclina). As ondas internas também interagem com as ondas superficiais, dissipando sua energia de forma significativa numa relação de retroalimentação intensa.

2.2 Princípios da modelagem matemática da atenuação das ondas

O primeiro estudo conhecido sobre o amortecimento das ondas na presença de lama fluida foi conduzido por GADE [19] em 1958, que tratou os compartimentos água e lama fluida como um fluido bifásico. Em outras palavras, significa um sistema de duas camadas, no qual a camada superior consiste de água (invíscida) e a camada inferior de lama com alta viscosidade.

Nos estudos de modelagem numérica de ondas superficiais em ambientes arenosos, é habitual assumir que a batimetria não altera suas características na escala da evolução das transformações das ondas, salvo raras exceções em eventos de alta energia. Em contraste, os sedimentos coesivos (principalmente, silte e argila) respondem rapidamente às forçantes do escoamento, resultando em um forte acoplamento entre o sedimento e os processos hidrodinâmicos [52].

As equações constitutivas que descrevem as características mecânicas dos sedimentos coesivos são amplamente utilizadas para investigar a interação entre as ondas superficiais e o depósito lamítico. Basicamente, cinco modelos reológicos são empregados com intuito de caracterizar as propriedades mecânicas, citadas anteriormente, para diferentes propósitos.

A primeira categoria de modelos considera as ondas se propagando sobre um fundo elástico ideal. A influência da água intersticial do sedimento é incorporada aos modelos classificados como poroelásticos. Ambos podem ser aplicados para estimar o início da liquefação pela ação das ondas. A utilização do primeiro é limitada a fundos de sedimentos coesivos altamente consolidados. Já o segundo pode ser empregados em fundos não-consolidados com uma fina camada de lama. Todavia, nenhum deles incorpora a dissipação de energia das ondas, conseqüentemente, a atenuação não pode ser reproduzida [13].

Baseado nas características da lama no seu estado fluido, faz-se distinção ainda entre os modelos viscoplásticos, viscoelásticos e viscosos [13]. O grupo dos viscoplásticos não são apropriados para modelar a resposta do fundo lamoso à ação das ondas. A explicação reside no fato do fundo lamoso se comportar mais como um material viscoelástico quando sob o efeito de tensões oscilatórias oriundas da passagem das ondas. Assim sendo, os modelos viscoelásticos representariam melhor as

propriedades reológicas da lama fluida, não fosse a complexidade inerente à determinação de uma série parâmetros não lineares correspondentes à reologia do depósito. Não obstante as simplificações impostas aos modelos viscosos (ver seção 2.1.1), a dissipação de energia das ondas induzida pela lama fluida pode ser representada por essa classe de modelos [13, 27, 74].

2.2.1 Modelos de duas camadas de dissipação viscosa

Os modelos de dissipação viscosa são regidos pela Lei de Newton da viscosidade e são tratados como um sistema de duas camadas, na qual um fluido viscoso de grande densidade (no caso, lama fluida) é sobreposto por um fluido de viscosidade nula ou consideravelmente menor (normalmente, água).

A seguir será apresentado o desenvolvimento matemático do modelo proposto por GADE [19], cuja abordagem foi pioneira neste tipo de estudo, sendo aplicada, posteriormente, em outros modelos (como apresentado no Capítulo 5). A representação genérica do esquema do modelo de duas camadas é vista na Figura 2.1.

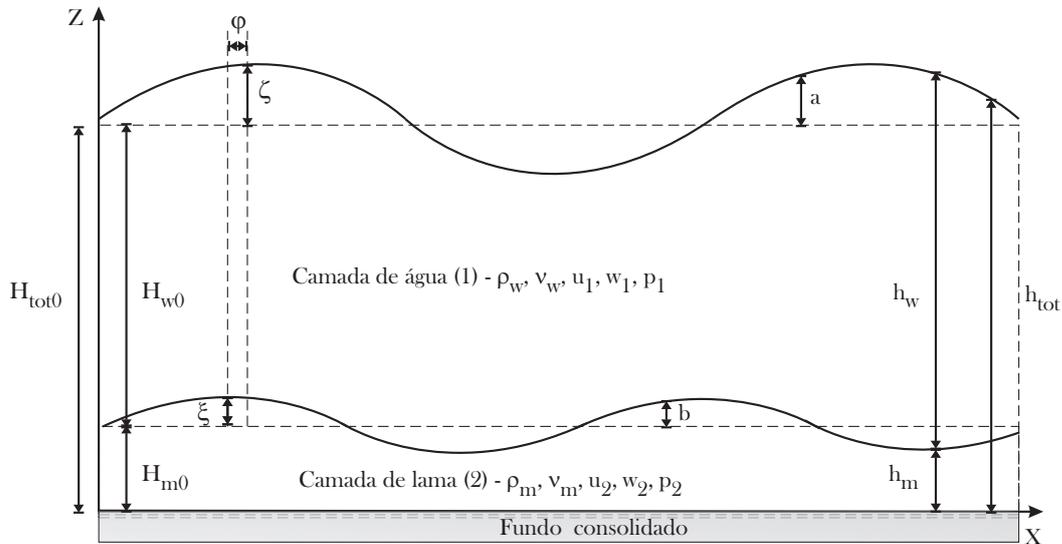


Figura 2.1: Esquema ilustrativo do modelo de duas camadas de dissipação viscosa.

A definição das notações usadas na Figura 2.1 é dada na Tabela 2.2.1 a seguir. Este trabalho adotará a convenção desses símbolos como padrão para o desenvolvimento matemático do modelo de viscosidade (seguindo o padrão usado por KRANENBURG [27]).

GADE [19] investigou experimental e teoricamente os efeitos de um fundo viscoso e impermeável sobre as ondas superficiais em águas rasas. Estudos posteriores propuseram soluções mais elaboradas, considerando, por exemplo, a viscosidade da

Tabela 2.1: Definição dos parâmetros.

Símbolo	$f(par.)$	Descrição	Unidade
H_{w0}	<i>cte.</i>	Profundidade da camada de água em relação ao nível médio	m
H_{m0}	<i>cte.</i>	Profundidade da camada de lama em relação ao nível médio	m
H_{tot0}	<i>cte.</i>	Profundidade total em relação ao nível médio	m
h_w	$f(x, t)$	Profundidade da camada de água	m
h_m	$f(x, t)$	Profundidade da camada de lama	m
h_{tot}	$f(x, t)$	Profundidade total	m
a	<i>cte.</i>	Amplitude da onda superficial	m
ζ	$f(x, t)$	Deslocamento da superfície livre	m
b	<i>cte.</i>	Amplitude da onda interna	m
ξ	$f(x, t)$	Deslocamento da interface água-lama	m
φ	<i>cte.</i>	Diferença de fase entre a onda superficial e a interna	rad
ρ_w	<i>cte.</i>	Densidade da água	$kg.m^{-3}$
ρ_m	<i>cte.</i>	Densidade da lama	$kg.m^{-3}$
ν_w	<i>cte.</i>	Viscosidade cinemática da água	$m^2.s^{-1}$
ν_m	<i>cte.</i>	Viscosidade cinemática da lama	$m^2.s^{-1}$
u	$f(x, z, t)$	Componente horizontal da velocidade na direção x	$m.s^{-1}$
w	$f(x, z, t)$	Componente vertical da velocidade na direção z	$m.s^{-1}$
p	$f(x, z, t)$	Pressão	$N.m^{-2}$

água ou estendendo o domínio do modelo para águas relativamente mais profundas (e.g., DARLRYMPLE e LIU [10], DE WIT [13], JIANG e ZHAO [25], NG [36]).

A fim de definir o conjunto de equações governantes, são impostas simplificações de maneira a viabilizar as manipulações matemáticas. De uma forma geral, para a representação do modelo de duas camadas de dissipação viscosa, assume-se que:

- as ondas são planas e tem forma senoidal;
- a viscosidade é constante em ambas camadas;
- ambos os fluidos são incompressíveis ($\rho = cte.$);
- a lama fluida se comporta como um fluido Newtoniano;
- nenhuma perturbação na camada superior está associada a forças de cisalhamento;
- os movimentos em ambos os fluidos são incapazes de divergir;
- as variações de pressão na superfície livre são desprezadas;
- a amplitude da onda superficial é considerada pequena em relação à profundidade;
- não ocorrem misturas na interface água-lama;

- a camada inferior tem profundidade finita e repousa sobre um fundo plano, rígido, imóvel e impermeável;
- as acelerações verticais são desprezadas;
- a corrente média é nula;
- ambas as camadas são horizontalmente infinitas;
- os fluxos geostróficos e a curvatura da Terra são ignorados.

GADE [19] ainda considera apenas perturbações periódicas, ou seja, aquelas as quais a altura da onda varia periodicamente dado um ponto fixo, no entanto, decai com a distância na direção de propagação tal que a distribuição da altura da onda seja estacionária.

O sistema é descrito pelas equações da continuidade e da quantidade de movimento linearizada para cada estrato i ($i = 1, 2$), como se segue:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x} + \frac{\partial w_i}{\partial z} = 0, \quad (2.3)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{1}{\rho_i} \frac{\partial p_i}{\partial x} - \nu_{x,i} \frac{\partial^2 u_i}{\partial x^2} - \nu_{z,i} \frac{\partial^2 u_i}{\partial z^2} = 0, \quad (2.4)$$

$$\frac{\partial w_i}{\partial t} + \frac{1}{\rho_i} \frac{\partial p_i}{\partial z} - \nu_{x,i} \frac{\partial^2 w_i}{\partial x^2} - \nu_{z,i} \frac{\partial^2 w_i}{\partial z^2} = -g. \quad (2.5)$$

A aceleração da gravidade é representada por g . A pressão p é denotada por, basicamente, três termos, sendo:

$$p_i = \underbrace{-\rho_i g z}_I + \underbrace{\rho_i \frac{\partial \phi}{\partial t}}_{II} - \underbrace{\frac{1}{2} \rho_i (u^2 + w^2)}_{III}, \quad (2.6)$$

onde p é a pressão total; e ϕ é o potencial de velocidade, em que $u = -\partial\phi/\partial x$ e $w = -\partial\phi/\partial z$.

Os termos I , II e III da Equação 2.6 são, respectivamente, a pressão hidrostática, a pressão devido à passagem da onda (pressão dinâmica) e a pressão associada à energia cinética local.

Os deslocamentos da superfície livre¹ e da lutoclina com referência ao nível médio

¹Por conveniência, a representação do deslocamento das superfícies é dada por notação complexa, por exemplo, $\zeta = a \cos(kx - \omega t) = \Re a e^{i(kx - \omega t)}$, isto é, $\cos x = \Re\{e^{ix}\}$. O símbolo \Re , que representa a parte real, é costumariamente suprimido.

são expressos como:

$$\zeta(x, t) = ae^{i(kx - \omega t)}, \quad (2.7)$$

$$\xi(x, t) = \xi_0 e^{i(kx - \omega t)} = be^{i\varphi} e^{i(kx - \omega t)}, \quad (2.8)$$

sendo $i = \sqrt{-1}$; k é o número de onda complexo dado por $k = k_r + ik_i$; o deslocamento da interface ξ_0 é complexo, pois conta com a diferença de fase entre as ondas superficiais e internas.

Com o propósito de se obter uma solução que se aplique ao problema investigado, faz-se necessário estabelecer um domínio e condições de contorno que expressem, em termos matemáticos, situações físicas onde se selecione uma única solução para a equação governante, como se segue.

Em $z = 0$, a fronteira é rígida, imóvel e impenetrável, sendo:

$$u_2(x, 0, t) = 0, \quad (2.9)$$

$$w_2(x, 0, t) = 0. \quad (2.10)$$

Na interface água-lama, $z = h_m$, as condições de contorno impõem que as velocidades e as tensões normais e tangenciais devem ser contínuas (condições cinemática e dinâmica, respectivamente). Além disso, não há transporte de fluido através da lutoclina.

$$u_2(x, h_m, t) = u_1(x, h_m, t), \quad (2.11)$$

$$w_2(x, h_m, t) = w_1(x, h_m, t), \quad (2.12)$$

$$w_2(x, h_m, t) = \frac{D\xi(x, t)}{Dt}, \quad (2.13)$$

$$\sigma_{zz2}(x, h_m, t) = \sigma_{zz1}(x, h_m, t), \quad (2.14)$$

$$\tau_{xz2}(x, h_m, t) = \tau_{xz1}(x, h_m, t), \quad (2.15)$$

onde σ_{ij} e τ_{ij} significam as tensões normais e tangenciais, respectivamente. Os índices i e j indicam, nesta ordem, a direção da força normal (no caso, x e z) e a direção da superfície na qual a força está sendo projetada (plano z).

A condição de contorno cinemática na superfície livre, $z = h_{tot}$, análogo à condição anterior, assegura que a velocidade vertical da superfície é igual à velocidade vertical do fluido. Já a condição dinâmica estabelece que as tensões são nulas.

$$w_1(x, h_{tot}, t) = \frac{D\zeta(x, t)}{Dt}, \quad (2.16)$$

$$\sigma_{zz1}(x, h_{tot}, t) = 0, \quad (2.17)$$

$$\tau_{xz1}(x, h_{tot}, t) = 0. \quad (2.18)$$

De posse do conjunto de equações (equação diferencial e suas condições de contorno), GADE [19] derivou uma relação de dispersão por substituição, assumindo uma solução harmônica para cada variável que é separável no tempo e na direção x .

$$k = \pm\omega \left\{ \frac{\left(1 + \Gamma \frac{H_{m0}}{H_{w0}}\right) \pm \sqrt{\left(1 + \Gamma \frac{H_{m0}}{H_{w0}}\right)^2 - 4\gamma\Gamma \frac{H_{m0}}{H_{w0}}}}{2\gamma g \Gamma H_{m0}} \right\}^{-\frac{1}{2}}, \quad (2.19)$$

sendo

$$\begin{aligned} \Gamma &= 1 - \frac{\tanh(mH_{m0})}{mH_{m0}}, \\ m &= (1 - i)\sqrt{\frac{\omega}{2\nu}}, \\ \gamma &= \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2}. \end{aligned}$$

A Equação 2.19 fornece uma expressão explícita para o número de onda k , podendo assim ser calculado analiticamente. A representação gráfica dos resultados é dada pelos argumentos real e imaginário do número de onda normalizado em função da espessura normalizada da camada de lama. Os parâmetros adimensionais definidos são:

$$\Re \left(\frac{k^2}{\omega^2} H_{w0} g \right),$$

$$\Im \left(\frac{k^2}{\omega^2} H_{w0} g \right),$$

$$H_{m0} \sqrt{\frac{\omega}{2\nu}}.$$

Este artifício matemático permite uma visualização gráfica intuitiva dos valores de $\Re(k)$ e $\Im(k)$, conforme visto adiante. Os valores adotados por GADE [19] para ω , ν , H_{w0} e γ foram, respectivamente, $2\pi/8 \text{ Hz}$, $5 \text{ ft}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ($0,464 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$), 4 ft (1.22 m) e $0,4287$.

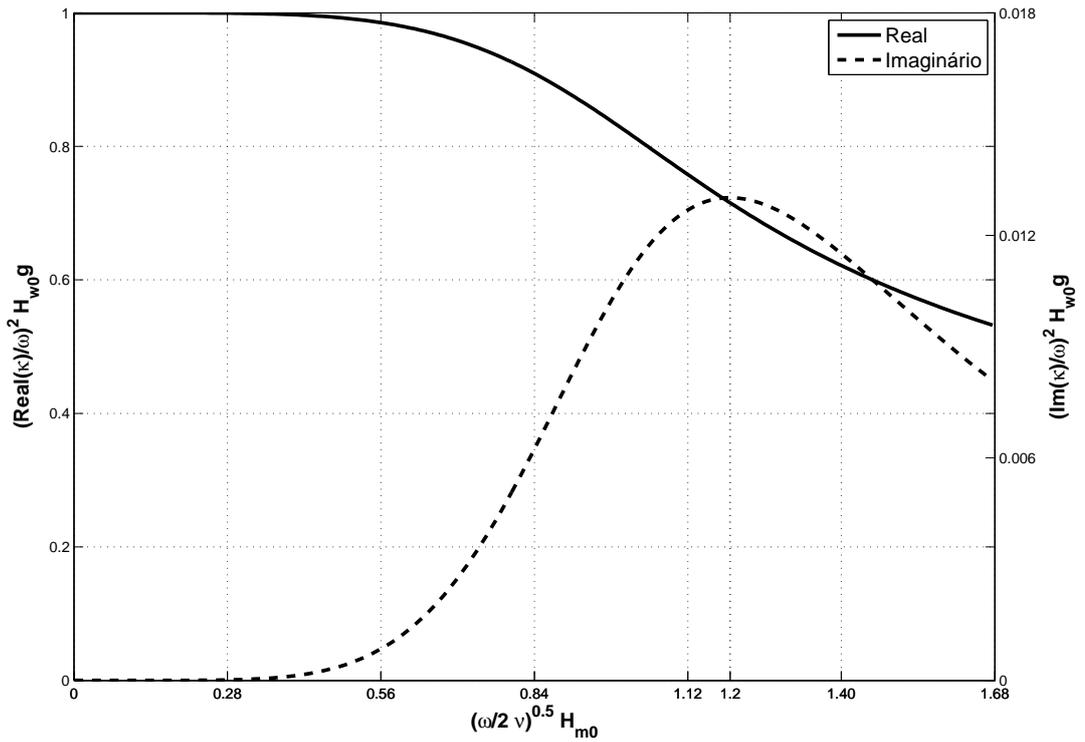


Figura 2.2: $(k^2/\omega^2) H_{w0} g$ em função de $H_{m0} \sqrt{\omega/2\nu}$. $(k^2/\omega^2) H_{w0} g$ representa a taxa entre a velocidade de fase da onda superficial e a velocidade de fase complexa da onda interna na interface água-sedimento. $H_{m0} \sqrt{\omega/2\nu}$ representa a espessura da camada limite dada pela espessura da camada de lama fluida.

Na Figura 2.2, $(k^2/\omega^2) H_{w0} g$ é o quadrado da taxa entre a velocidade de fase da onda superficial e a velocidade de fase complexa da onda interna. $\sqrt{\omega/2\nu}$ representa

a espessura da camada limite. Quando a parte real de k se aproxima da unidade, significa que a espessura da camada de lama avizinha-se de zero. Nesta situação, o argumento imaginário do número de onda tende a ser nulo, uma vez que indica o decaimento da amplitude da onda (isto é, a atenuação de energia em função da lama tende a ser mínima). Como explicado anteriormente, o modelo desenvolvido por GADE [19] é limitado à águas rasas, o que restringe sua aplicação para casos onde $H'/L \leq 1/20$. O referido autor define H' como profundidade efetiva, que quer dizer, a profundidade da camada de água a qual é equivalente ao comprimento L da onda superficial quando propagada sobre um fundo rígido. Esse limite pode ser exposto em termos da espessura normalizada da camada de lama, tal que $H_{m0}\sqrt{\omega/2\nu} \leq 1,6815$, definindo o domínio de aplicação do modelo.

GADE [19] observou um decaimento exponencial da altura das ondas ao longo da distância de propagação até que $\mathfrak{I}(k)$ se tornasse constante. Em conformidade com a Figura 2.2, a taxa de decaimento máxima ocorre quando $H_{m0}\sqrt{\omega/2\nu} = 1,2$.

Capítulo 3

Área de Estudo

Neste capítulo será caracterizada a área de estudo com enfoque nos objetos de interesse para o presente trabalho. O critério de escolha da locação atendeu ao escopo de Projeto Cassino, um estudo de campo multidisciplinar com principal objetivo de investigar a atenuação das ondas sobre fundos lamosos [21, 67]. Desta maneira, levou-se em conta tanto a heterogeneidade do ambiente sedimentar, como o registro de casos de atenuação de ondas sobre depósitos lamíticos em áreas próximas a sítios arenosos. Tal condição permitiria a observação do comportamento das ondas, não só sobre os bolsões de lama, como também sobre a vizinhança arenosa, servindo como área de controle.

3.1 A Praia do Cassino, RS: aspectos gerais

O balneário do Cassino, situado no município de Rio Grande, RS, compreende a porção norte de uma faixa litorânea de 220 *km* (Figura 3.1), que se estende do molhe oeste da Barra do Rio Grande (ao norte) até a Barra do Chuí (ao sul). Sua formação está vinculada aos eventos paleogeográficos da Planície Costeira do Rio Grande do Sul.

Conforme TOMAZELLI *et al.* [60], os depósitos costeiros aflorantes desta planície acumularam-se basicamente em dois sistemas deposicionais específicos: um sistema de leques aluviais desenvolvido ao longo da parte interna da planície costeira; e quatro distintos sistemas deposicionais transgressivos-regressivos do tipo laguna-barreira (ilustrados na Figura 3.2). Inserido nesse cenário, a atual configuração morfológica da praia do Cassino tem relação intrínscica aos processos geológicos associados ao desenvolvimento do mais recente sistema deposicional laguna-barreira, a Barreira IV. As areias praias da Barreira IV são, em grande parte, quartzosas, de granulação fina a muito fina. Estes sedimentos juntamente com cascalhos bioclásticos apresentam-se como importantes constituintes dos depósitos da praia atual, do trecho localizado entre Rio Grande e Chuí [59].

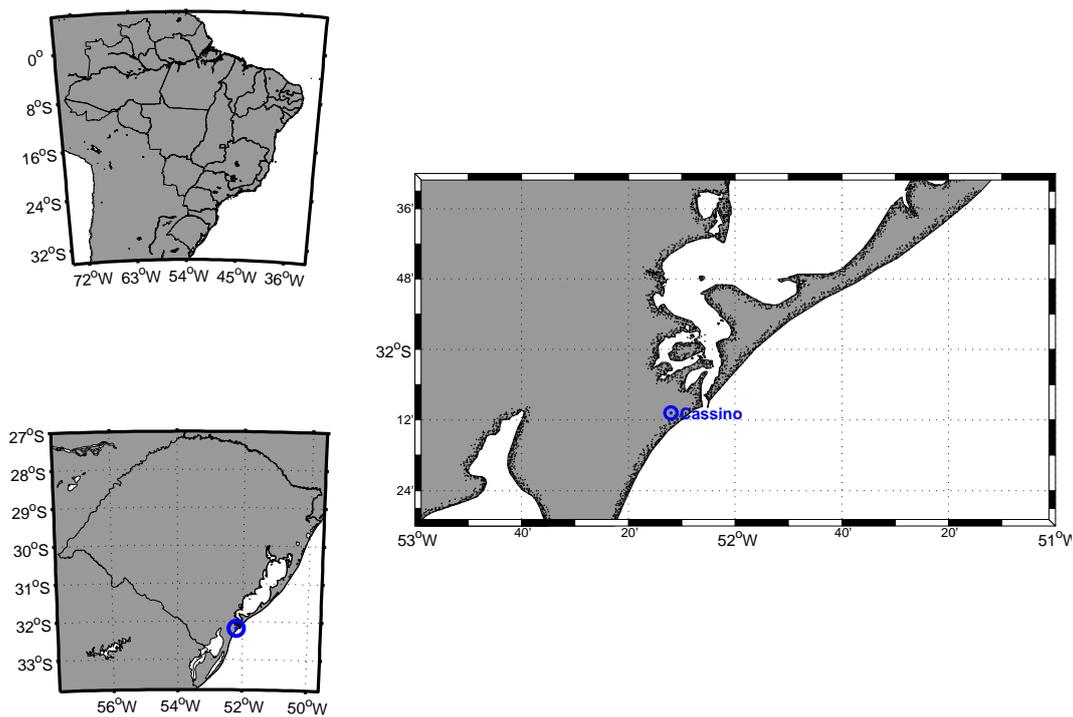


Figura 3.1: Apresentação da área de estudo, com destaque ao Balneário do Cassino, RS.

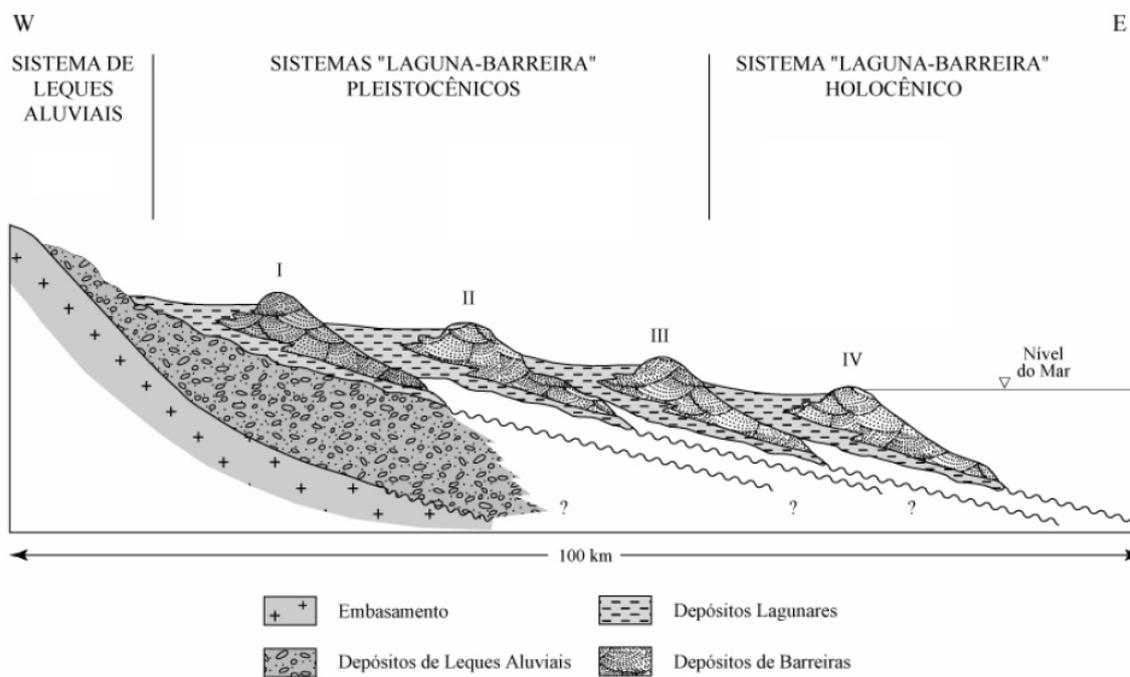


Figura 3.2: Perfil (E-W) ilustrativo dos sistemas deposicionais da Planície Costeira do Rio Grande do Sul. Modificado de TOMAZELLI e VILLWOCK [59].

CALLIARI e FACHIN [5] analisaram a granulometria dos sedimentos superficiais e subsuperficiais da Plataforma Continental do Rio Grande do Sul e verificaram uma expressiva contribuição da Laguna dos Patos (Figura 3.1) no suprimento de sedimentos finos (areia muito fina, silte e argila) para a plataforma interna. O sedimento erodido das áreas fontes é transportado por rios até o corpo d'água receptor (Laguna dos Patos), cuja função sedimentológica é a mistura e diluição dos sedimentos fluviais, os quais são aprisionados e armazenados, principalmente nas frações de silte e argila [5, 59].

A exportação de sedimentos da Laguna dos Patos para a área costeira adjacente tem estreita relação com o regime de ventos da região. A planície litorânea do Rio Grande do Sul é dominada, em escala sinótica, por um regime bimodal de ventos associado, basicamente, ao Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul (ASAS) e ao Anticiclone Polar Marítimo (alta polar) [37, 38]. Ambos os centros de alta pressão intervêm de modo importante no quadro de circulação atmosférica da região Sul [63]. NIMER [38] elucida que durante todo o ano, nas regiões temperadas do Brasil, sopram ventos de NE oriundos do ASAS e, além disso, os anticiclones polares (representados pela alta polar), periodicamente invadem o continente sul-americano com ventos de W a SW, que, frequentemente, atingem o território brasileiro com direções de S a SE.

REBOITA [47] determinou as Normais Climatológicas Provisórias¹ das séries temporais do banco de dados meteorológicos da Estação Meteorológica de Rio Grande, no período de 1991 a 2000. A autora constatou que a direção nordeste é a predominante em todos os meses exceto no mês de maio, em que predomina o vento de direção sudoeste. Na Tabela 3.1 são apresentados os resultados obtidos por REBOITA [47] dos principais parâmetros meteorológicos.

No estudo de VINZON *et al.* [68] sobre a formação dos bancos de lama na região contígua à desembocadura da Laguna dos Patos, foi evidenciado que a taxa de suprimento de sedimentos finos para a plataforma interna é fortemente governada por variações das forçantes atmosféricas, que, por conseguinte, exercem importante ação sobre as oscilações no nível médio do mar, as quais têm relação direta com a vazão do estuário. Por outro lado, a contribuição do regime de maré (entenda-se maré astronômica) nas variações do nível do mar tem papel secundário na taxa de vazão da laguna [35] e, conseqüentemente, na exportação de sedimentos finos para a região costeira. Conforme VELLOZO e ALVES [64], que analisaram séries de amplitudes de maré retiradas do Catálogo de Estações Maregráficas Brasileiras, a maré na costa sul do Rio Grande do Sul é classificada como de micromaré (i.e.,

¹O Comitê Meteorológico Internacional definiu, em 1872, que para o cálculo das médias dos dados meteorológicos são necessários um série histórica de 30 anos. Como muitas estações meteorológicas ainda não possuem séries longas de dados, foi recomendado, em 1989, o cálculo das normais com séries de 10 anos de dados, sendo chamadas de Normais Climatológicas Provisórias.

Tabela 3.1: Resumo das Normais Climatológicas Provisórias da Estação Meteorológica, No.83995, entre 1991 a 2000. Fonte: REBOITA [47].

Variável	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Ano
Pressão Atmosférica (mb)	1011,1	1012,9	1013,8	1014,3	1016,7	1016,8	1018,7	1018,9	1017,7	1015,7	1013,1	1010,7	1015,0
Temperatura Máxima (°C)	27,16	26,89	26,4	23,54	20,42	17,2	16,16	18,00	18,8	21,27	23,78	26,52	22,18
Temperatura Mínima (°C)	19,68	18,77	18,58	15,75	12,46	9,53	8,87	10,28	11,67	14,51	16,43	18,72	14,6
Umidade Relativa (%)	82,26	82,42	83,2	84,69	86,84	87,47	87,28	86,38	84,41	84,08	81,26	80,63	84,24
Precipitação (mm)	85,31	112,73	93,79	123,49	102,95	117,78	147,68	109,93	101,59	112,75	98,16	93,85	1.300,01
Intensidade Média do Vento (m/s)	1,85	1,57	1	0,16	0,31	0,35	0,22	0,42	1,21	1,78	1,53	1,29	0,85
Direção Média do Vento (°)	82(E)	91(E)	87(E)	111(E)	191(S)	280(W)	246(SO)	103(E)	93(E)	84(E)	82(E)	84(E)	89(E)
Média da Intensidade da Velocidade do Vento (m/s)	3,87	3,68	3,24	3,26	2,62	2,8	3,12	3,22	3,95	4,28	4,13	3,75	3,49
1° Direção Predominante do Vento	NE	NE	NE	NE	SO	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE
2° Direção Predominante do Vento	SE	SE	SE	SO	NE	SO	SO	SO	SO	SE	SE	SE	SE

amplitudes menores que 2 m) com padrões misto e diurno.

A dinâmica dos sedimentos coesivos também é influenciada pela passagem das ondas superficiais, as quais modificam a camada limite e promovem tensões cíclicas junto ao fundo (conhecidas como tensão de radiação) [73]. MOTTA [35] faz menção aos primeiros levantamentos de dados de ondas realizados na costa do Rio Grande do Sul. O autor coligiu informações oriundas do *Atlas of sea and swell charts* para o Atlântico Sul, bem como, dados de um ano de medição de ondas efetuada ao largo de Tramandaí, RS. Em sua análise, MOTTA [35] inteirou que os marulhos (*swell*) que atingem a costa de Rio Grande provêm sobretudo de SE, possuindo maior competência para o transporte de sedimentos, enquanto que as vagas (*seas*) são procedentes de ENE em decorrência da atuação do vento local.

Mais recentemente, COLI [9] investigou o regime de ondas na região costeira adjacente aos molhes da Laguna dos Patos, utilizando dois conjunto de dados distintos: um oriundo de um ondógrafo direcional; e outro de observações visuais obtidas de navios de oportunidade. Por meio de ferramentas estatísticas, o autor definiu a onda característica da região como tendo altura significativa entre $1,0$ e $1,5\text{ m}$ e período entre 5 e 6 s . Sob um aspecto sazonal, as ondas do quadrante leste foram mais frequentes durante o verão e a primavera. Já durante os meses de inverno e outono as ondas mais frequentes eram provenientes do quadrante sul. COLI [9] concluiu ainda, que, durante todo o ano, a direção mais frequente das ondas foi de SE, consoante com o trabalho de MOTTA [35].

3.2 Características dos depósitos lamíticos ao largo da praia do Cassino

Conforme visto na seção 3.1, a Laguna dos Patos se apresenta como uma potencial fonte de sedimentos finos para a plataforma interna adjacente, onde extensos depósitos de lama são encontrados, recobrando o fundo predominantemente arenoso. Cogita-se que os depósitos de sedimentos finos são tanto oriundos do transporte de grandes quantidades de sedimentos em suspensão da bacia de drenagem da Laguna dos Patos, quanto dos efeitos antropogênicos associados às atividades de dragagem no canal do estuário e, também, ao desmatamento relacionado ao uso desordenado da terra às margens da Laguna [7].

Períodos de alta pluviosidade combinados ao regime de ventos do quadrante N favorecem a exportação de sedimentos, os quais são transportados sob a forma de uma pluma costeira (Figura 3.3) responsável pela formação de vastos lençóis de lama próximos à costa (conhecidos como Fácies Patos) [5]. Nesse cenário, o escoamento de vazante é aumentado pelo estreitamento do canal, o que potencializa a turbulência

e, por conseguinte, a mistura de sedimentos. O jato d'água na desembocadura do estuário (carreando um enorme volume de sedimento) interage com as correntes de deriva induzidas pelos ventos de N-NE, o que explica a acumulação preferencial de sedimentos finos ao sul dos molhes [5, 68], como é visto na Figura 3.3(a).



(a) Imagem Landsat da pluma de material em suspensão da Laguna dos Patos em situação de vazante com ventos do quadrante norte. Gentilmente cedida por Lauro Calliari.

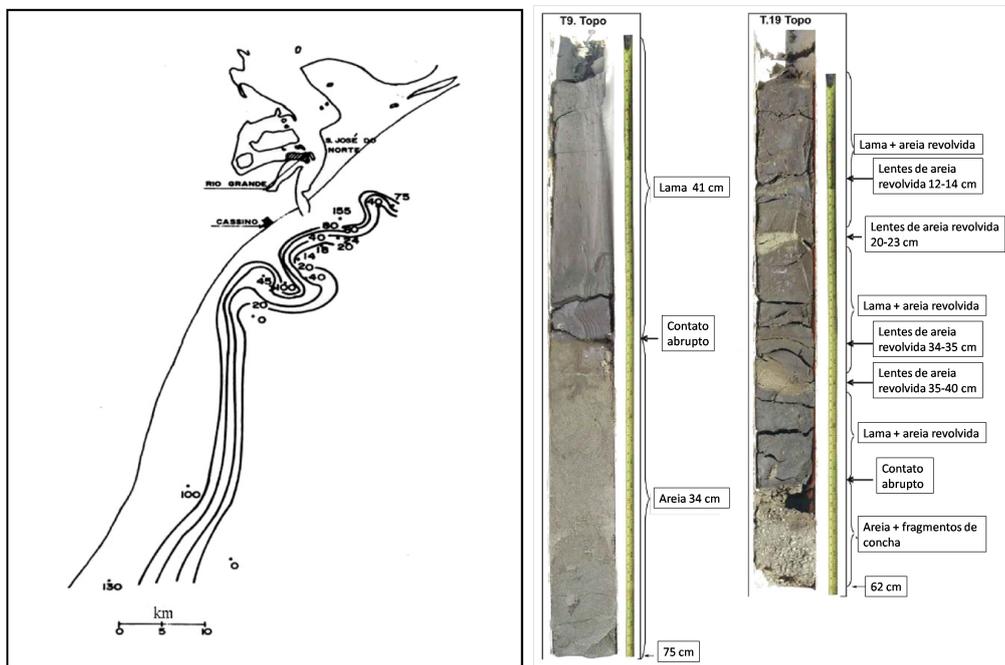
(b) Imagem MODIS desta área costeira adjacente à desembocadura da Laguna dos Patos. Gentilmente cedida por Leonardo Dardengo.

Figura 3.3: Pluma costeira da Laguna dos Patos.

A deposição do material transportado para a plataforma interna é controlada pela taxa de suprimento de sedimentos e pela hidrodinâmica costeira (e.g., corrente litorânea e ondas), os quais atuam em conjunto, governando eventos de consolidação e erosão. Com isso, a formação do depósito lamítico depende de períodos de condições brandas de mar, que propiciem o assentamento e posterior consolidação do material em suspensão. Por outro lado, a erosão do depósito está associada às ocorrências de tempestade de curta duração, gerando ondas (e correntes) com energia suficiente para fluidificar o sedimento outrora compactado. CALLIARI e FACHIN [5] descrevem os mecanismos de transporte, deposição, consolidação e ressuspensão da lama na Praia do Cassino (conteúdo também abordado resumidamente na seção 2.1).

A caracterização dos bancos de lama ao largo da Praia do Cassino foi relatada em diversos trabalhos. CALLIARI e FACHIN [5], confeccionaram um mapa de isópacas de lama superficial a partir de amostragens de sedimentos e, também, por meio de padrões de sonar de varredura lateral (Figura 3.4(a)). De posse dessas informações, os autores detectaram espessuras de lama de até $0,80\text{ m}$, com máximos localizados entre as isóbatas de 14 m e 20 m . A extensão do depósito pode atingir até 28 km de norte a sul.

Posteriormente, no estudo de CALLIARI *et al.* [6], foram mapeadas espessuras de lama de até $1,90\text{ m}$ em uma área de 8 km (ao largo) por 3 km (ao longo da costa). Na ocasião, os autores observaram que a presença de lama fluida aumentava rumo à costa, muito embora, o mapa de isópacas indicava um maior volume de lama (compactada) na região ao largo da praia do Cassino. Testemunhos coletados a menos de 7 m de profundidade apresentaram um conteúdo de 93% de lama (47% de argila e 46% de silte) e 7% de areia com densidades média de 1240 g.l^{-1} . Nas amostragem em profundidades superiores à 10 m , laminações de areia com até 10 cm obstruíam a sequência de lama, sugerindo que a deposição de lama ocorre em eventos alternados em função das condições meteo-oceanográficas locais. A análise granulométrica de um testemunho coletado à $11,5\text{ m}$ mostrou que 95% dos grãos compreendiam a fração argila e silte, porém com densidades médias de 1430 g.l^{-1} , demonstrando um maior grau de compactação que a porção mais rasa do depósito. CALLIARI *et al.* [7] reúnem resultados de amostragens com testemunhos coletados em diferentes profundidades do sítio de lama. Os testemunhos obtidos nas áreas mais rasas apresentaram maior teor de lama fluida sobreposta a uma camada de areia, enquanto que aqueles coletados em águas relativamente mais profundas, exibiram maior compactação com lentes de areia com diferentes espessuras (Figura 3.4(b)).



(a) Mapa de isópacas de lama total (fluida e (b) Seção transversal dos testemunhos co-
consolidada). Fonte: CALLIARI e FACHIN letados à 6 e 14 m de profundidade, da
[5]. esquerda para direita, respectivamente.
Modificado de CALLIARI *et al.* [7]

Figura 3.4: Características do depósito lamítico ao largo da praia do Cassino, RS.

Os limites mais atuais dos bancos de lama variam entre 6 e 25 *m* de profundidade com depocentro localizado a 9 *km* ao sul da desembocadura da Laguna do Patos, na isóbata de 15 *m*, conforme exposto por CALLIARI *et al.* [7]. A posição do depocentro seria reflexo da rotação da pluma costeira no sentido horário, resultado da sua desaceleração ao sul dos molhes (visto na Figura 3.3(a)). Os autores reforçam, ainda, que os limites do depósito dependem majoritariamente da interação entre o suprimento de lama e a capacidade erosiva do escoamento junto ao fundo, no qual, em águas mais rasas, é dominada pelas ações das ondulações e das correntes induzidas pelos ventos.

Parâmetros geotécnicos da lama do depósito ao largo da Praia do Cassino, obtidos por DIAS e ALVES [14], mostraram que o material analisado é altamente plástico e compressível, com baixa resistência ao cisalhamento. Segundo os autores, tais características estão vinculadas a uma alta viscosidade da fração fina do sedimento. DIAS e ALVES [14] ainda averiguaram, por meio de análises geotécnicas, que algumas porções mais ao largo do banco de lama estavam em processo de consolidação, principalmente, devido à pressão adicional exercida pela presença de areia. REED *et al.* [48] encontraram uma taxa de sedimentação de 25 *mm.ano*⁻¹ na porção sul do depósito e, nas proximidades do depocentro, os autores registraram uma acumulação de até 50 *mm.ano*⁻¹. A rápida acumulação de sedimentos e a ação dinâmica das ondas têm importante função em manter a baixa resistência à aplicação de tensões.

Assim como explanado na seção 2.1.2, as tensões aplicadas junto ao fundo em decorrência da passagem das ondas levam, em determinados casos, a fluidificação da lama. Esta, na forma fluida, pode escoar por gravidade para regiões mais profundas, ou mesmo, ser transportada em direção à costa, por advecção, sob intensa ação de ondas [33].

Episódios de deposição de lama na praia do Cassino ocorrem com razoável assiduidade [29, 65]. Desde 1972 foram verificados pelo menos 25 eventos, sendo o primeiro registro datado de 1901 [3, 6], todos acarretando transtornos à região. CALLIARI *et al.* [6] caracterizaram o depósito de lama após sua ocorrência na face de praia. Os autores associaram a migração da lama para o estirâncio à tempestades sucedidas durante o meses de março e maio de 1998. Naquela circunstância, observou-se um aumento da espessura da lama fluida em direção à costa e a ausência da zona de arrebenção, identificando uma região de acentuada atenuação das ondas. Na Figura 3.5 é apresentado um mosaico de aerofotografias da Praia do Cassino, no qual observa-se nitidamente um enfraquecimento da zona de surfe (marcada pelos padrões de cor branca na imagem) até seu completo desaparecimento por uma faixa de cerca de 0,5 *km* em razão da migração do depósito de lama para águas mais rasas.

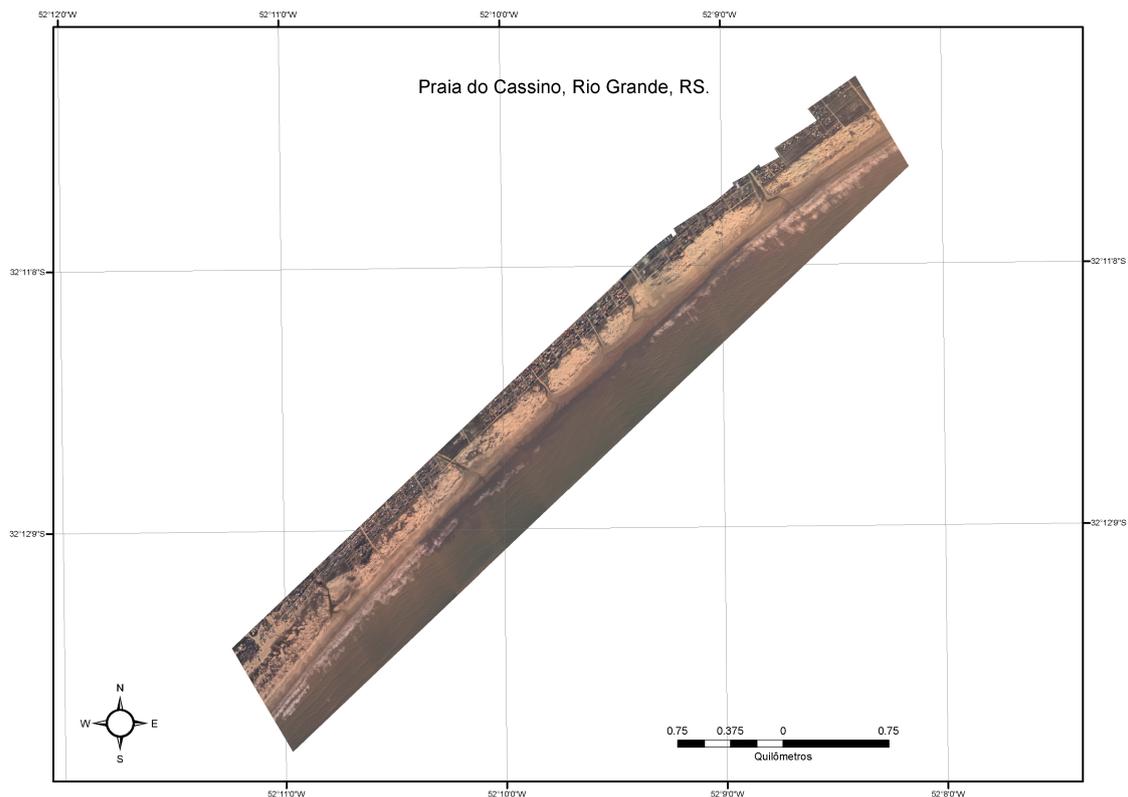


Figura 3.5: Mosaico georreferenciado da vista aérea da Praia do Cassino. Percebe-se claramente a inexistência da zona de surfe na região central da imagem. Gentilmente cedido pelo Laboratório de Oceanografia Geológica da FURG - LOG/FURG.

Uma síntese recente abordando os processos de deposição da lama na Praia do Cassino é apresentada por CALLIARI [4]. O autor ressalta que o aumento das atividades antropogênicas no estuário da Laguna dos Patos (e.g., dragagem) amplificam os processos naturais de deposição de sedimentos finos na face de praia, contrariando a proposição de VILLWOCK e MARTINS [65], que afirmaram ser um processo unicamente natural.

CALLIARI *et al.* [6] destacaram os impactos gerados pela cobertura de lama sobre a zona subaérea da praia arenosa no Cassino. Dentre os principais estão o soterramento de comunidades bentônicas; o enfraquecimento do turismo e a redução das atividades de recreação, principalmente, durante o verão; o aumento do risco da prática de esportes náuticos, como exemplo, os casos em que surfistas ficaram aprisionados no bolsão de lama; e os problemas relacionados ao uso do espaço da praia, uma vez que, existe um intenso tráfego de veículos na mesma. Exemplos genéricos dos impactos ocasionados pela presença da lama são exibidos na Figura 3.6, onde também são apresentados registros do último evento de deposição de lama na praia em abril de 2009.



(a) Coleta de amostras do depósito lamítico durante o evento de deposição na praia em fevereiro de 2008. Cortesia do LOG/FURG. (b) Carro resgatado em meio à lama. Fonte: CALLIARI *et al.* [6]



(c) Exemplos de moluscos parcialmente cobertos pela lama já retrabalhada juntamente com bolas de argila, evidências típicas do retorno da ação hidrodinâmica. Fonte: Saulo Meirelles. (d) Cenário da Praia do Cassino após o episódio de deposição de abril de 2009 com destaque para a ausência da zona de surfe. Fonte: Saulo Meirelles.

Figura 3.6: Impactos gerados pela deposição de lama na Praia do Cassino.

Capítulo 4

Conjunto de Dados

A coletânea de dados apresentada no capítulo 4 é oriunda do Projeto Cassino, um experimento multidisciplinar que envolveu diversas instituições nacionais e internacionais [67]. O projeto previa levantar um volume considerável de informações *in situ*, abrangendo aspectos hidrodinâmicos e sedimentológicos da Praia do Cassino com o objetivo de aprimorar o entendimento sobre o comportamento das ondas e o transporte de sedimentos em zonas costeiras marcadas pela presença significativa de sedimentos coesivos.

A concepção do Projeto Cassino ocorreu em 2005, cuja escolha da locação foi estimulada pelo número de registros de eventos em que o banco de lama migrou para a praia arenosa. A ideia era caracterizar quantitativamente a atenuação das ondas quando propagadas sobre o fundo de lama fluida e avaliar as transformações das ondas ao viajarem sobre ambientes sedimentares heterogêneos. Para tanto, foram realizados três curtos cruzeiros oceanográficos onde realizaram-se medições dos parâmetros das ondas e também levantamentos de informações sobre as características e a reologia do depósito lamítico típico da região. Uma série de outros dados foram adquiridos, porém de relevância secundária para o presente trabalho. Detalhes sobre a abordagem científica do experimento como um todo podem ser obtidos em HOLLAND *et al.* [21].

Adiante serão descritos cada uma das campanhas realizadas, salientando a aquisição de dados de interesse para este estudo. A primeira e maior das campanhas oceanográficas ocorreu entre maio e junho de 2005, na qual foi obtida uma série temporal de 45 dias de dados de ondas, além do mapeamento do ambiente sedimentar do depósito. O segundo experimento de campo aconteceu em novembro de 2007 com o intuito de compreender a dinâmica da estrutura vertical de densidade do depósito de lama. Finalmente em abril de 2008, realizou-se a última campanha, em que foram adquiridas informações simultâneas sobre o regime de ondas e as características da lama fluida.

4.1 A campanha oceanográfica de 2005

De modo a quantificar as transformações sofridas pelas ondas desde sua passagem pela Plataforma Continental interna até próximo à zona de arrebenção, foram realizadas medições simultâneas de ondas em duas profundidades distintas. Ambas as estações de medição alinhavam-se ao longo de uma seção imaginária perpendicular à linha de costa com extensão de aproximadamente 35 km em frente ao balneário Querência, no Cassino (Figura 4.1).

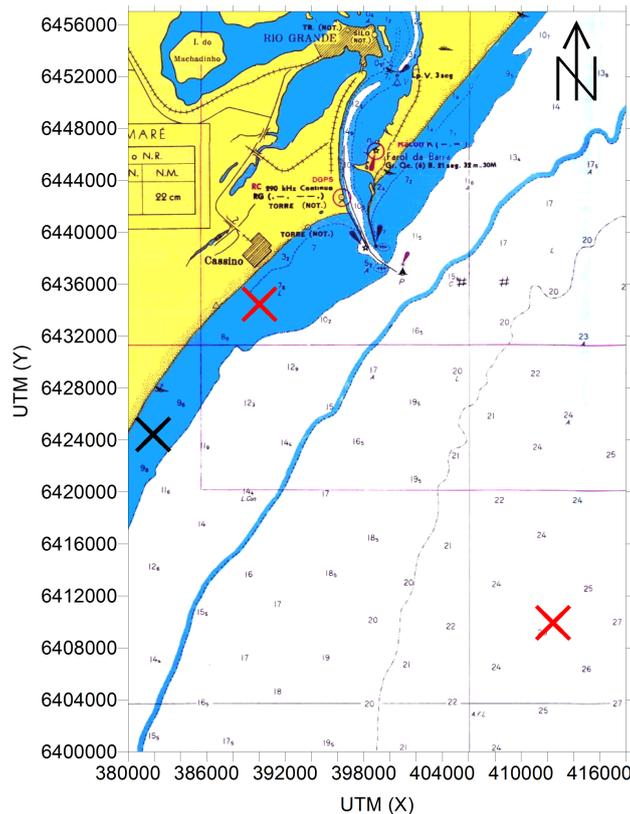


Figura 4.1: Localização das estações (marcada pelos símbolos em cruz) aonde foram fundeados os equipamentos de medição de ondas durante a campanha oceanográfica de 2005.

Na profundidade de 25 m , caracterizada pelo fundo predominantemente arenoso, foi instalada uma bóia direcional de medição de ondas (*Directional Waverider Buoy Datawell*). Este ondógrafo direcional possui sensores (acelerômetros) que medem a aceleração dos deslocamentos do nível d'água nos eixos x , y e z . Com isso, a elevação do nível médio pode ser obtida pela dupla integração do sinal de aceleração em z . A partir das medições das inclinações em x e y (*pitch* e *roll*) em conjunto com as informações fornecidas pela bússola interna do equipamento, podem-se determinar as direções N-S e E-W. O ondógrafo realizava medições e as transmitia via rádio para um receptor em terra, a cada meia hora, os dados brutos das três séries temporais, fornecendo também alguns dos principais parâmetros estatísticos,

por exemplo, altura significativa de onda (Hs), parâmetros direcionais, período de zero-ascendentes (Tz) e outros [12].

Em aproximadamente 9 m de profundidade, em meio ao depósito de lama, foi instalado, a 0,30 m do fundo, um perfilador acústico de correntes, modelo Aquadopp da Nortek [39]. Este instrumento é capaz de medir os principais parâmetros das ondas pelo método PUV, no qual é possível extrair o espectro de densidade de energia das ondas usando a série de pressão produzida pela passagem das ondas (pressão dinâmica) e, ainda, obter a direção das mesmas calculando os espectros cruzados entre as componentes de velocidade u e v (por isso o nome PUV). O equipamento foi configurado para medir ondas a uma taxa de amostragem de 2 Hz durante, aproximadamente, 34 min (≈ 2048 s) ininterruptos dentro de um intervalo de 3 h completas durante o mesmo período de aquisição do ondógrafo.

É pertinente comentar que, na tentativa de comparar o comportamento das ondas quando viajam tanto sobre um banco de lama quanto sobre um sítio arenoso, foi fundeado um terceiro instrumento ao sul do transecto original, indicado na Figura 4.1, em que a composição granulométrica da área era tipicamente arenosa. Lamentavelmente, o equipamento foi perdido devido às adversidades ambientais encontradas durante a campanha. Essa estratégia amostral, proposta por SHEREMET e STONE [52], auxiliaria na compreensão da dissipação de ondas curtas.

Ainda na primeira etapa desta campanha, antes das medições de ondas, foi efetuado o mapeamento superficial e sub-superficial dos depósitos lamíticos por meio de levantamentos ecobatimétricos (em dupla frequência, 50 e 200 Hz) e sísmicos e, também, por amostragens geológicas. Entretanto, as informações sobre o banco de lama de importância para o presente trabalho foram retiradas de CALLIARI *et al.* [7] e de ROGERS e HOLLAND [50], dispensando o tratamento dos dados gerados durante a citada campanha.

Os dados de vento para o período foram obtidos tanto da Estação Meteorológica de Rio Grande, No. 83995, mantida pelo INMET, quanto da estação meteorológica da Praticagem da Barra de Rio Grande. Os dados da primeira foram gentilmente cedidos pelo Laboratório de Meteorologia da FURG (<http://www.meteorologia.furg.br/>), enquanto, os dados da Praticagem foram fornecido pelo LOG/FURG. Mediante comparação visual, os parâmetros de vento da Praticagem mostram-se mais adequados, porque, a série de dados estava completa e com menos ruídos (Figura 4.2). De modo complementar, foram obtidos os campos de vento e pressão fornecidos pelo NCEP/NCAR com intuito de analisar a atuação dos ventos na região em escala sinótica.

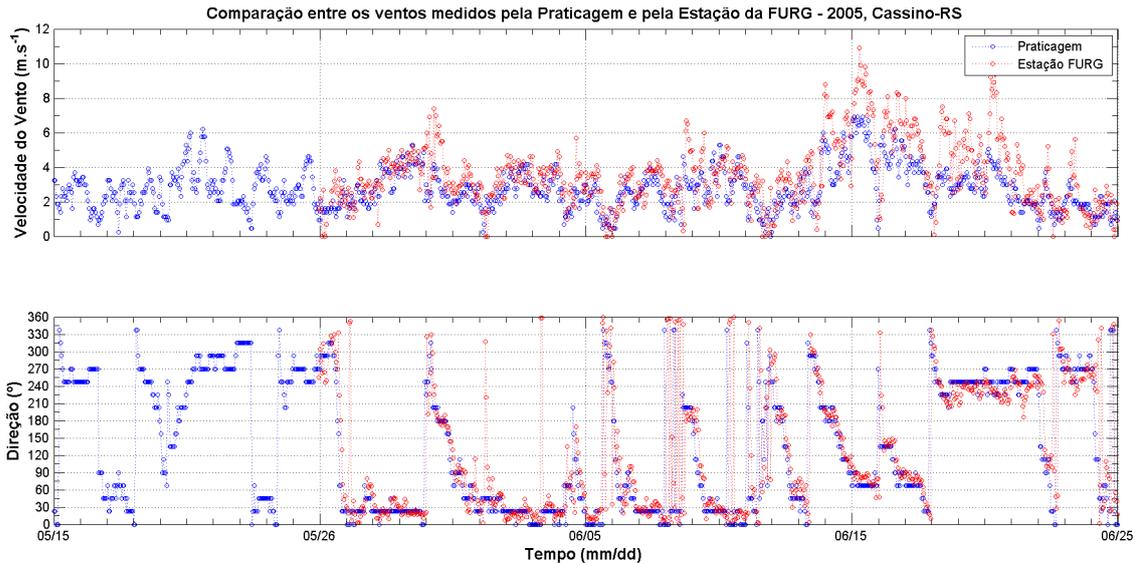


Figura 4.2: Comparação entre os dados de vento da Estação Meteorológica No. 83995 e a estação meteorológica da Praticagem da Barra de Rio Grande.

4.1.1 Processamento dos dados de ondas

O processamento dos dados de ondas adquiridos durante a campanha de 2005 foi direcionado para dois propósitos: o primeiro foi para a aplicação de uma técnica espectral de análise direcional de ondas para avaliar a atenuação das ondas por banda de frequência; e o segundo para servir como dados de entrada do domínio do modelo numérico empregado com a finalidade de avaliar a contribuição dos termos dissipativos de fricção e da atenuação induzida pela lama fluida separadamente.

Dados do ondógrafo direcional

O período de aquisição de dados se estendeu de 15/05/2005 à 26/06/2005, compreendendo cerca de 42,5 dias. A cada hora cheia, o ondógrafo registrava 1800 s (30 min) das séries de elevação da superfície (η) e das duas inclinações ortogonais (η_x e η_y) à uma taxa de amostragem de 1,28 Hz, produzindo um arquivo de dados brutos com 2303 pontos. Os dados transmitidos pela bóia passam por um pré-processamento interno, o qual codifica o registro de acordo com a qualidade da medição. Assim, para efeito de análise da confiabilidade dos dados, foram selecionados apenas os arquivos dos registros classificados como "correto".

Em seguida foram gerados os espectros de densidade de energia das ondas $S(f)$, a partir das séries de elevação η , e os espectros de distribuição direcional $D(\theta)$, pelo cálculo da correlação cruzada entre os deslocamentos η , η_x e η_y (Figura 4.3). Todos os espectros foram construídos por meio de técnicas espectrais convencionais, em que o registro de 2303 foi dividido em 32 segmentos com 64 pontos (64 graus de liberdade), conforme descrito por PARENTE [43]. Essa análise admite que as

propriedades estatísticas da amostra se conservam no tempo (processo ergódico), permitindo deduzir os parâmetros estatísticos do processo e reduzir ou cancelar suas características variantes (ruídos) [42, 43].

Para identificar alguma possível fonte de ruído, foi computada a função de coerência mediante o cálculo da correlação cruzada entre η e η_x (Cuz) e entre η e η_y (Cvz), conforme apresentado na Figura 4.3(a). Desta forma, pôde-se estabelecer as frequências de corte, definindo o intervalo $0,05 < f < 0,30 \text{ Hz}$ como o de melhor correlação. O intervalo de confiança de 95 %, visto nos espectros das Figuras 4.5(a) e 4.3(c) (linhas tracejadas), permitiu verificar o compromisso estatístico da estimativa de modo a obter uma resolução espectral aceitável (ver HOLTHUIJSEN [22]).

Os dados do ondógrafo também serviram como entrada para o modelo numérico utilizado neste estudo, tal que a construção dos espectros, desta vez, foi realizada com o programa de pós-processamento do fabricante, o *W@ves21*. O programa calcula os espectros usando os métodos de Fourier, conforme explanado em DATAWELL BV [11]. Foram gerados 712 arquivos contendo os espectros de ondas $S(f)$, de distribuição direcional $D(\theta)$ e de espalhamento direcional.

Dados do perfilador acústico de correntes

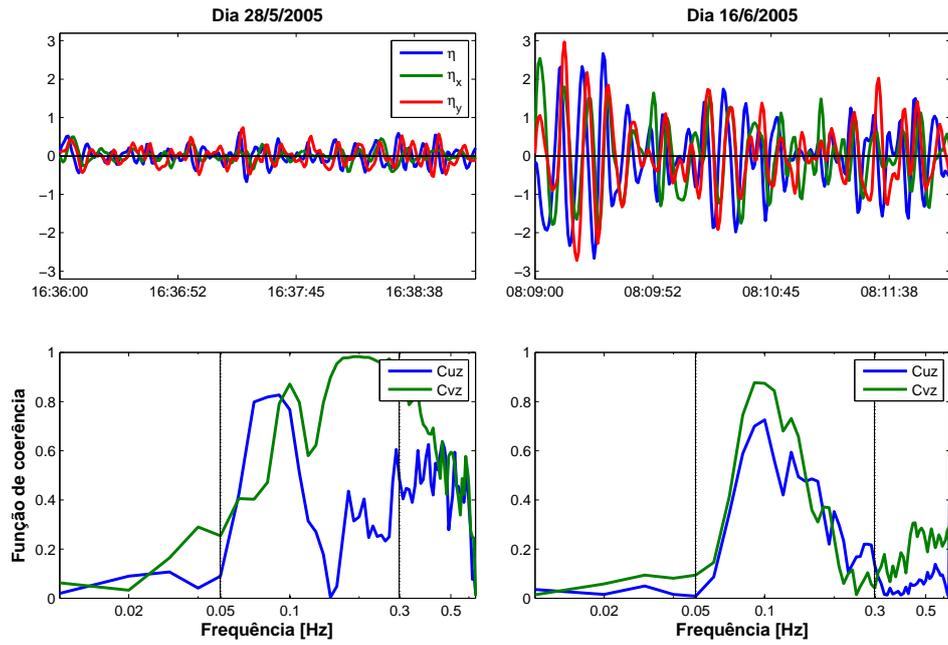
O correntômetro, instalado sobre a camada de lama, adquiriu dados de 15/05/2005 até 25/06/2005, simultaneamente ao ondógrafo. Foram selecionadas as séries de pressão p e das componentes horizontais da velocidade (u e v) dos arquivos brutos extraídos, que continham, no mínimo, 2048 pontos. Posteriormente, foram computados os espectros de densidade de energia $S(f)$ e de distribuição direcional $D(\theta)$ pelo emprego da técnica PUV, que escalona os espectros de pressão e de direção, medidos em profundidade, para a superfície.

BISHOP e DONELAN [2] afirmam que o fator de correção, oriundo da Teoria Linear de Ondas (ver MEIRELLES e VIOLANTE-CARVALHO [34]), é apropriado para compensar a série de pressão (dinâmica) em profundidade, podendo alcançar até $\pm 5\%$ de exatidão. O sinal da pressão é atenuado por conta da diminuição do movimento orbital das ondas com a profundidade, acarretando ruídos indesejáveis. O fator de correção à resposta da pressão é dado por uma função de transferência $H_p(f)$ que converte o espectro do sinal de pressão $S_p(f)$ no espectro de elevação da superfície $S(f)$, como exemplificado no esquema abaixo:

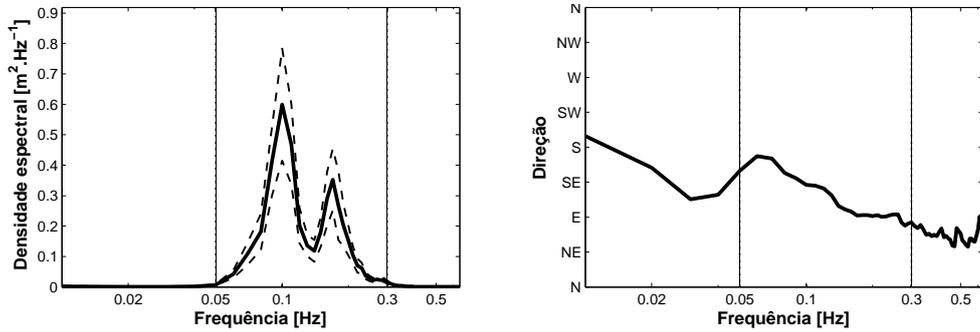
$$S_p(f) \rightarrow \boxed{H_p(f)} \rightarrow S(f)$$

Matematicamente o espectro de densidade de energia na superfície é calculado conforme a seguir:

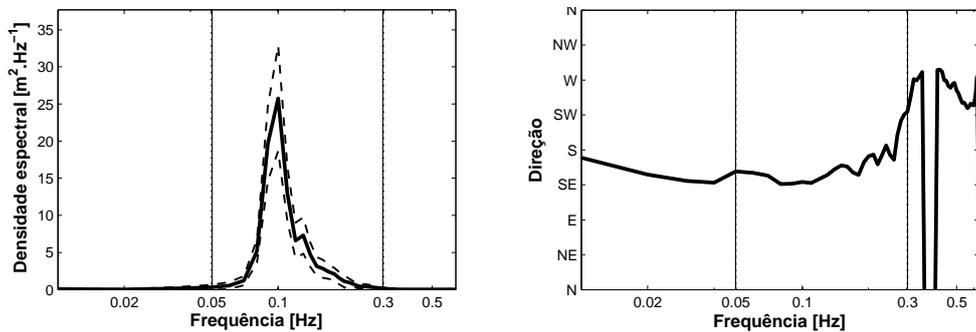
$$S(f) = \frac{S_p(f)}{H_p(f)^2}. \quad (4.1)$$



(a) Pannel superior: segmento da série temporal bruta dos deslocamentos vertical (η) e horizontais (η_x e η_y). Pannel inferior: função de coerência entre os deslocamentos vertical e horizontais (C_{uz} e C_{vz}). No dia 28/05/2005 tem-se as condições de mar mais branda de todo período, enquanto no dia 16/06/2005, foram observados os mais severos estados de mar.



(b) Espectros de energia e de direção referentes ao dia 28/05/2005.



(c) Espectros de energia e de direção referentes ao dia 16/06/2005.

Figura 4.3: Controle de qualidade dos dados do ondógrafo e construção dos espectros. Notar a diferença de escala entre os eixos y dos gráficos entre os dias 28/05 e 16/06.

Sendo:

$$H_p(f) = \frac{\cosh k(h_w + z)}{\cosh kh_w}. \quad (4.2)$$

Neste caso z indica a posição do sensor de pressão na coluna d'água. Procedimento análogo foi realizado para as séries das componentes u e v de forma que a função de transferência $H_h(f)$ é escrita por:

$$H_h(f) = \frac{\sinh k(h_w + z)}{\cosh kh_w}. \quad (4.3)$$

Com as relações obtidas nas Equações 4.1, 4.2 e 4.3 obtêm-se os espectros de elevação e de direção na superfície. O valor de $1/H_p(f)^2$, que multiplica o sinal da pressão, cresce exponencialmente, fazendo com que a alta frequência do espectro na superfície apresente valores espúrios (o mesmo raciocínio se aplica para as séries dos deslocamentos horizontais). Por meio da visualização gráfica das funções de transferência e de coerência, o intervalo de frequência $0,05 < f < 0,30 Hz$ foi estabelecido como o de melhor correlação (Figuras 4.4, 4.5).

A intensidade do sinal varia em função do período das ondas, assim, em alta frequência, ocorre sua acentuada redução. Isto é indicado pela função de coerência entre os registros de p e u e de p e v para os dias 28/05 e 16/06 (Figura 4.4). Nota-se que acima de $0,3 Hz$ a função assume valores aleatórios, atestando que a partir dessa frequência o sensor de pressão do instrumento, instalado à $0,30 m$ do fundo, era incapaz de medir as oscilações de pressão devida à passagem das ondas. O mesmo comportamento é observado na função de transferência, razão pela qual o espectro na superfície atinge valores que tendem ao infinito em altas frequências (Figura 4.5).

As medições de ondas do perfilador de corrente também foram utilizadas para fins de comparação com os resultados computados pelo modelo numérico. Neste caso, os parâmetros foram calculados pelo programa computacional do próprio fabricante, o *QuickWave*. O programa aplica técnicas espectrais convencionais para a análise PUV e calcula os principais parâmetros estatísticos, como, altura significativa (H_s), período de zero-ascendente (T_z), etc (ver tutorial disponível em <http://www.nortekusa.com/>). Ao todo foram gerados 324 espectros de elevação e de direção correspondentes ao período de aquisição.

Após o processamento das informações levantadas na Campanha de 2005, foram confeccionados os gráficos das séries temporais dos principais parâmetros de ondas

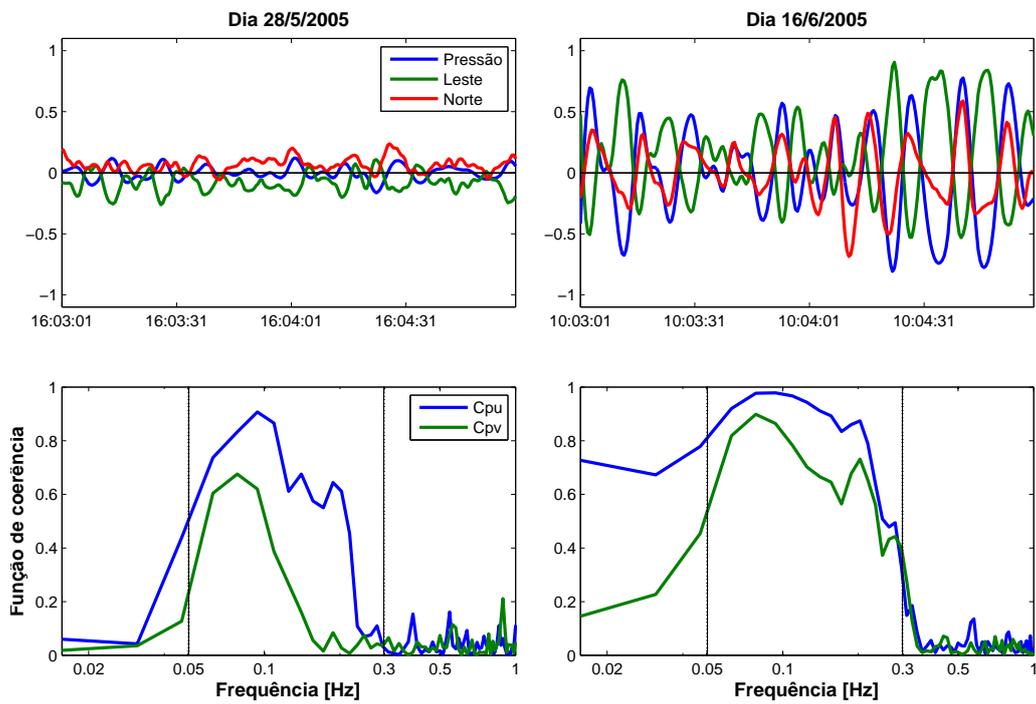
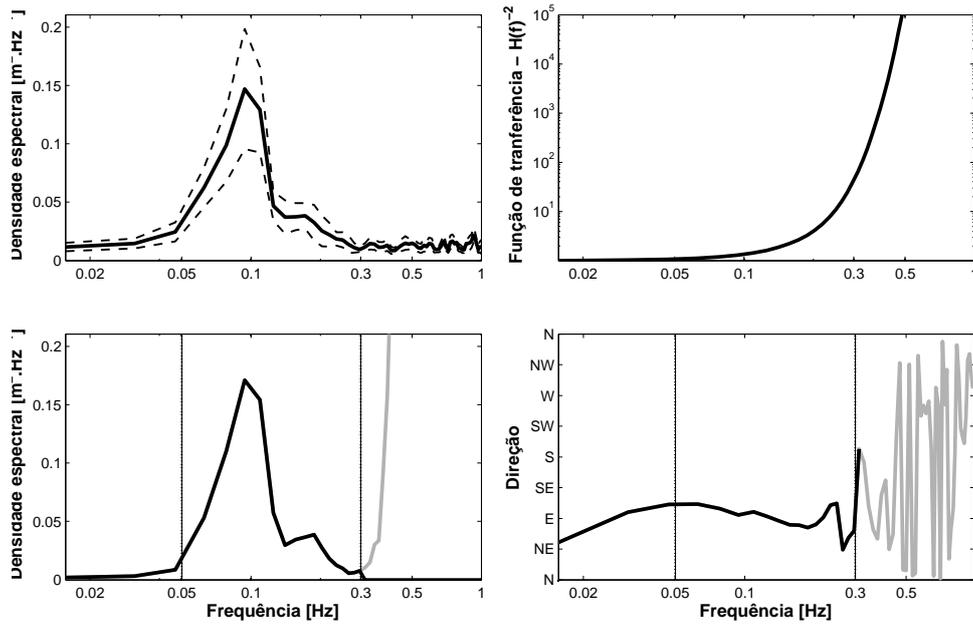
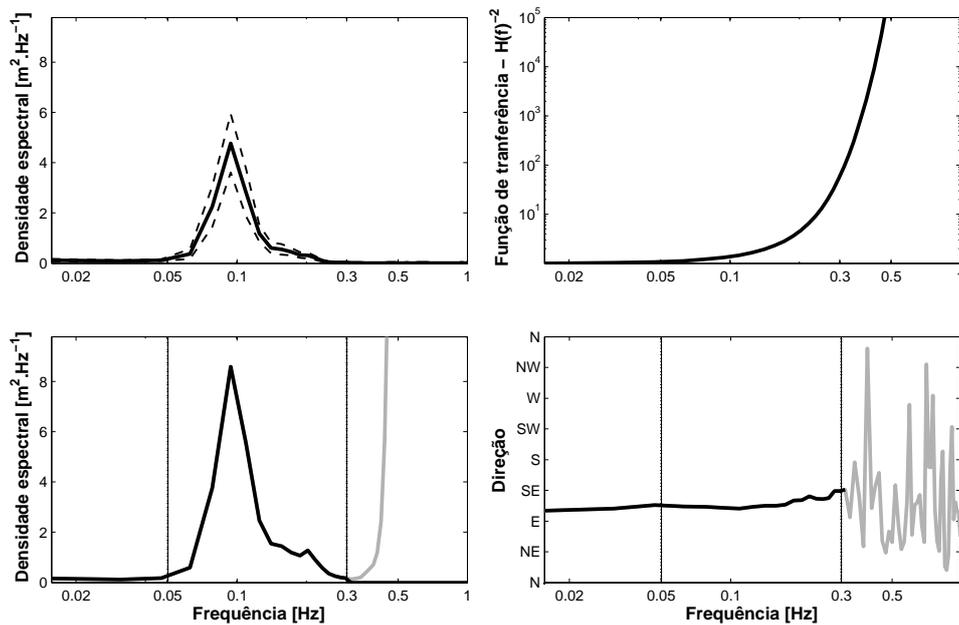


Figura 4.4: Painel superior: segmento da série da série temporal bruta da pressão e das componentes u (leste) e v (norte). Painel inferior: função de coerência entre a pressão e as componentes de velocidade (C_{pu} e C_{pv}). No dia 28/05/2005 tem-se as condições de mar mais branda de todo período, enquanto no dia 16/06/2005, foram observados os mais severos estados de mar.



(a) Pannel superior: o espectro de pressão no fundo (à esquerda) é multiplicado pelo inverso do quadrado da função de transferência (à direita). Pannel inferior: espectros de densidade de energia e de direção das ondas corrigidos para a superfície referentes ao dia 28/05/2005. Notar que o espectro corrigido atinge valores irrealis quando $f > 0,3 \text{ Hz}$ em razão da multiplicação por $H(f)^{-2}$.



(b) Pannel superior: o espectro de pressão no fundo (à esquerda) é multiplicado pelo inverso do quadrado da função de transferência (à direita). Pannel inferior: espectros de densidade de energia e de direção das ondas corrigidos para a superfície referentes ao dia 16/06/2005. Notar que o espectro corrigido atinge valores irrealis quando $f > 0,3 \text{ Hz}$ em razão da multiplicação por $H(f)^{-2}$.

Figura 4.5: Controle de qualidade dos dados do perfilador de corrente e construção dos espectros. Notar a diferença de escala entre os eixos y dos gráficos entre os dias 28/05 e 16/06.

medidos por ambos os equipamentos (Waverider e Aquadopp), juntamente com o conjunto de dados de velocidade do vento. A reunião desses dados em um mesmo gráfico, possibilitou a análise visual, no domínio do tempo, do regime de ondas durante o período de aquisição, o qual será discutida adiante (Figura 4.6).

A área hachurada da Figura 4.6 indica o período de condições de mar mais severas. Para identificar a origem dessa ondulação, foram geradas as cartas do campo de vento e de pressão superficiais, vistas na Figura 4.7.

A pista de vento que gerou a ondulação origina-se de um anticlone extratropical, que surge da alta polar (ver seção 3.1), se intensifica e permanece estacionário desde do dia 15 até se dissipar por volta do dia 17/06.

4.2 A campanha oceanográfica de 2007

O requerimento de informações sobre a variabilidade da lutoclina ao longo do transecto mostrado na Figura 4.1 estimulou o planejamento de uma segunda campanha oceanográfica na Praia do Cassino. Para tal finalidade, foram levantados dados sobre o depósito, em um total de 10 estações de coleta (Figura 4.8).

Durante este experimento, realizado entre 29/10 a 03/11/2007, foram coletados testemunhos de aproximadamente 2 m de comprimento, por meio de mergulho autônomo, nas estações #01, #03 e #05 (Figura 4.9(a)). Cada tubo de acrílico apresentava uma sequência de pequenos orifícios, do topo à base, espaçados de 5 cm, por onde foram coletadas cautelosamente sub-amostras de sedimentos, com o uso de seringas, e acondicionadas em recipientes apropriados a fim de se preservar o conteúdo de água de cada camada. Posteriormente, a densidade de cada sub-amostra foi determinada em laboratório.

Em paralelo, a densidade do sedimento foi obtida com emprego de um densímetro, instrumento desenvolvido pela *STEMA Survey Services*, que é lançado preso a um cabo do bordo da embarcação, traçando o perfil de densidade ao longo da coluna d'água até penetrar no sedimento (Figura 4.9(b)). De acordo com o fabricante, as diferenças de frequência ressonante de onde o equipamento é inserido, dependentes da reologia do meio, são percebidas por uma espécie de diapasão em forma de garfo (*vibrating-fork*), que converte o sinal elétrico em valores de densidade. O densímetro, durante seu lançamento, consegue atravessar eficientemente a camada superficial do sedimento do fundo ao mesmo tempo em que um sensor de pressão registra a profundidade [55]. Os dados medidos são visualizadas em tempo real, permitindo o controle da qualidade dos resultados em campo, o que foi imprescindível, visto a forte influência da ação das ondas na resposta do equipamento.

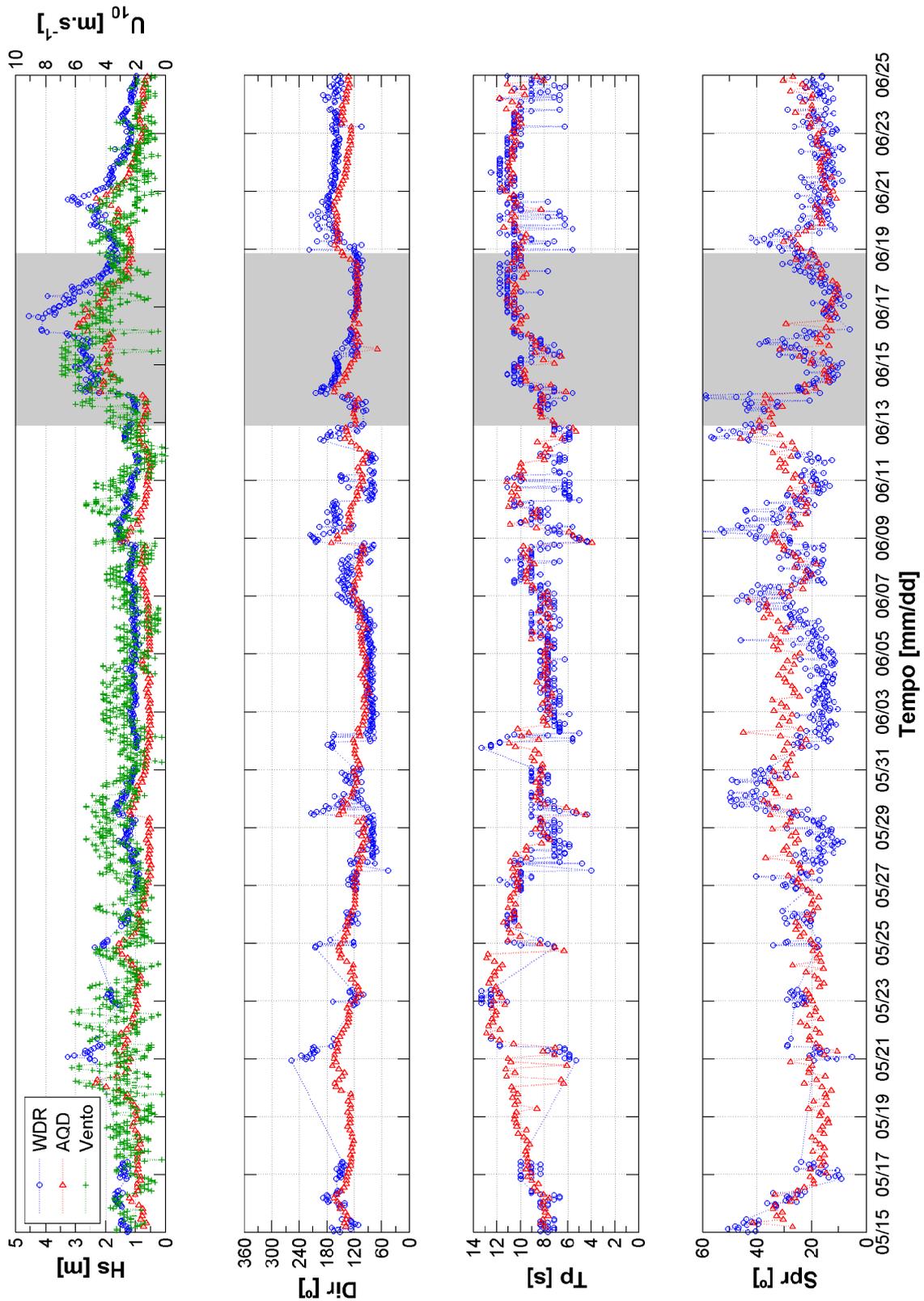


Figura 4.6: Série temporal dos parâmetros de ondas e velocidade do vento adquiridos durante a Campanha de 2005 (Waverider - WDR; Aquadopp - ADP). A área hachurada indica o período de condições de mar mais severas. Os parâmetros apresentados são: altura significativa (H_s), direção principal (Dir), período de pico (T_p) e espalhamento direcional (Spr).

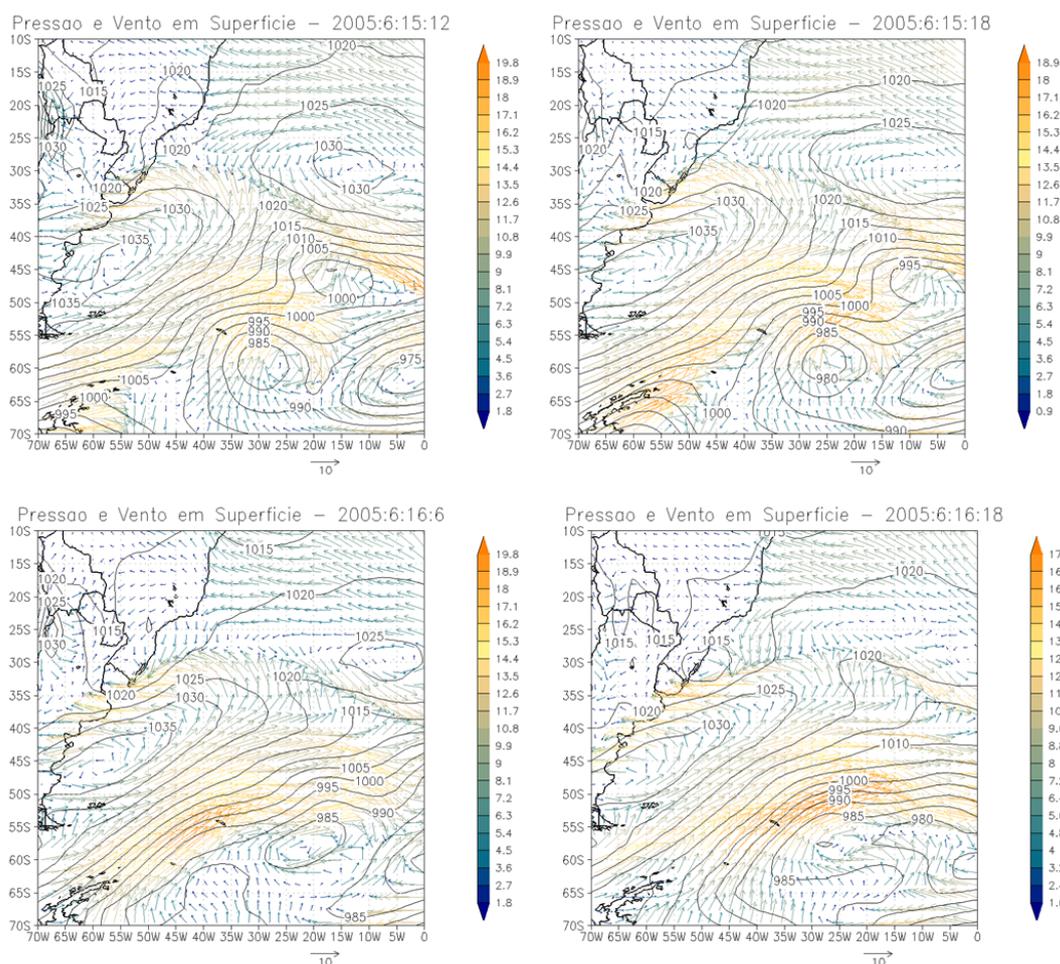


Figura 4.7: Carta do campo de vento e de pressão obtido da reanálise II do NCEP/NCAR para o período de estado de mar mais severo.

4.2.1 Estrutura vertical de densidade do depósito

As informações levantadas nesta campanha sobre a estrutura vertical de densidade da lama serviram para integrar o banco de dados das características do depósito já existentes. A determinação da densidade *in situ* e em laboratório foi orientada para avaliar o desempenho do densímetro.

Determinação da densidade em laboratório

Em laboratório a densidade das sub-amostras do testemunho foi determinada analiticamente aplicando uma relação entre o peso seco e o peso úmido de cada réplica. As sub-amostras, inicialmente preservadas, foram pesadas em balança de precisão (0,0001 g). Em seguida, o sedimento foi levado à estufa à 105 °C até atingir peso constante e, então, realizou-se nova pesagem. Logo depois foi determinada a densidade (ρ_{sed}) da amostra pela seguinte expressão (adaptada de WINTERWERP

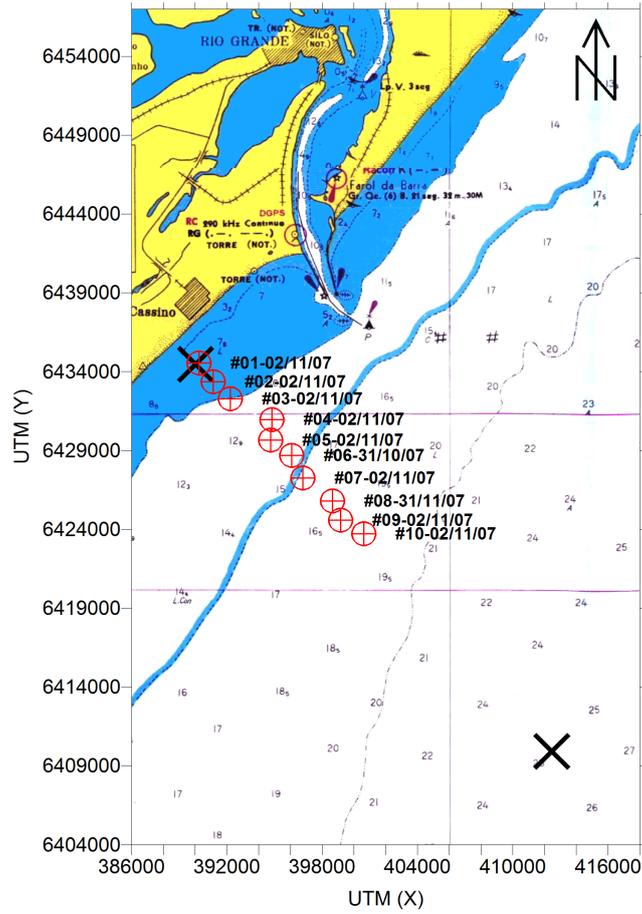


Figura 4.8: Localização das estações (marcada pelos símbolos em vermelho) aonde foram levantadas as informações sobre o depósito durante a campanha oceanográfica de 2007. À direita dos pontos seguem a numeração das estações e as datas em que foram coletados os dados. Os símbolos em preto marcam os fundeios dos equipamentos de medição de ondas da campanha anterior.

e VAN KESTEREN [73]):

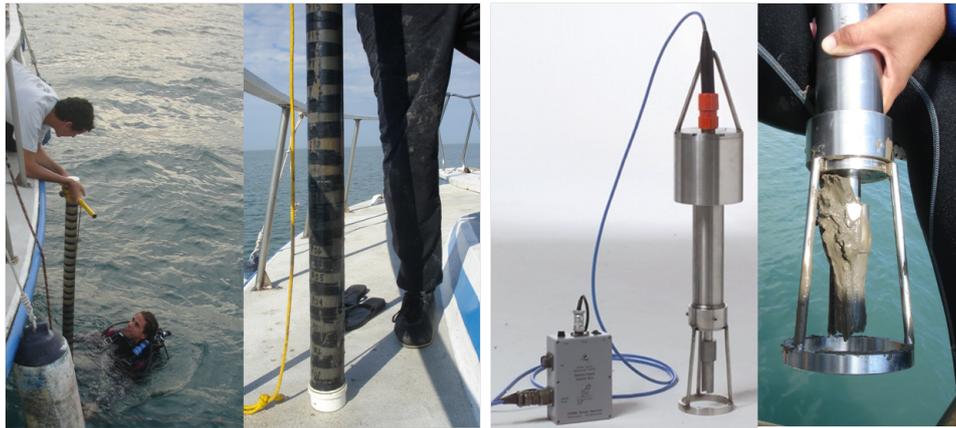
$$\rho_{sed} = C + \left(1 - \frac{C}{\rho_{quartzo}}\right) \rho_w, \quad (4.4)$$

onde $\rho_{quartzo} = 2650 \text{ kg.m}^{-3}$, ρ_w é a densidade da água, que foi medida pelo densímetro e a concentração, C , é dada por:

$$C = \frac{\rho_{quartzo}}{1 + \left(\frac{\rho_{quartzo}}{\rho_w W}\right)}, \quad (4.5)$$

sendo o conteúdo de água, W , escrito como se segue:

$$W = \frac{(\text{Peso total} - \text{Peso seco})}{\text{Peso seco}}.$$



(a) Amostragem de testemunhos coletados por mergulho autônomo. Fonte: Fábio Nascimento. (b) Detalhe do densímetro utilizado. Fontes: www.stema-survey.com e Saulo Meirelles.

Figura 4.9: Levantamento das informações sobre o depósito de lama fluida durante a campanha de 2007.

Determinação *in situ* da densidade

A densidade da lama no campo foi obtida com auxílio do densímetro. Em cada uma das estações de coleta foram realizados pelo menos 3 lançamentos, dos quais foram selecionado aqueles que apresentaram menos interferências de agentes externos nos dados. A velocidade de queda do instrumento muito superior a $1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ e o balanço da embarcação por conta da agitação marítima eram potenciais fontes de ruídos.

De modo a sanar estes inconvenientes, os dados foram pré-processados pelo programa do equipamento, em que os perfis de densidade foram suavizados por meio de média móvel. O programa também corrige a diferença de $0,50\text{ m}$ de altura entre os sensores de pressão e de densidade e, além disso, separa apenas os dados registrados durante a descida do equipamento (vide Figura 4.10).

Os resultados de ambas as análises foram comparados inicialmente pela observação gráfica, na qual pôde-se estabelecer uma profundidade de referência para as duas técnicas utilizadas. O parâmetro para equivaler as profundidades baseou-se na mudança abrupta do perfil de densidade que define a lutoclina. Assim, a profundidade da lutoclina foi considerada a mesma nos resultados dos métodos, posto que o testemunho não possuía referência altimétrica. Além disso, foi realizada uma análise de correlação linear entre os perfis obtidos pelo testemunho e pelo densímetro em cada estação, como apresentado na Figura 4.11.

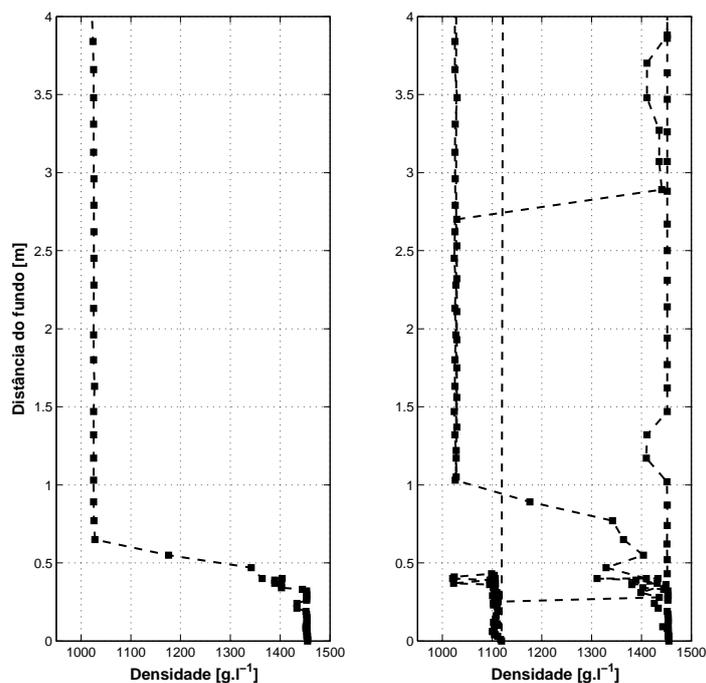


Figura 4.10: Exemplo do tratamento dos dados gerados com o densímetro. À esquerda, a curva suavizada após as correções aplicadas. À direita, o perfil dos dados brutos, mostrando o registro da subida do equipamento. O perfil foi realizado no dia 31/10/2007 na estação #04.

4.3 A campanha oceanográfica de 2008

A última etapa de campo do presente trabalho foi motivada pela necessidade de coletar dados de ondas simultâneos a levantamentos da estrutura vertical do depósito de lama. Para este propósito, a estratégia adotada, dentro da malha amostral da campanha anterior (Figura 4.8), incluiu medição de ondas em modo contínuo na estação #10, localizada na extremidade de maior profundidade do transecto. Em concomitância, nas estações mais rasas, foi determinado o perfil vertical de densidade da camada de lama ao mesmo tempo em que um equipamento realizava medições de ondas. O croqui da execução de campo é apresentado na Figura 4.12.

O período de coleta compreendeu de 09/04 a 11/04/2008, sendo toda atividade de campo realizada a bordo da lancha oceanográfica LARUS pertencente à frota da FURG. Durante cada pernada foi fundeado na estação #10, à aproximadamente 18 m de profundidade, um perfilador acústico de corrente, conhecido como AWAC (*Acoustic Wave and Current meter*), fabricado pela Nortek. O instrumento foi ajustado para medir ondas continuamente por cerca de 34 min (≈ 2048 s) a cada intervalo de 1 h, com taxa de amostragem de 1 Hz. Este equipamento mede três quantidades independentes que podem ser usadas para estimar os parâmetros das ondas, as quais são: a pressão, as velocidades orbitais e a diferença (abrupta) de im-

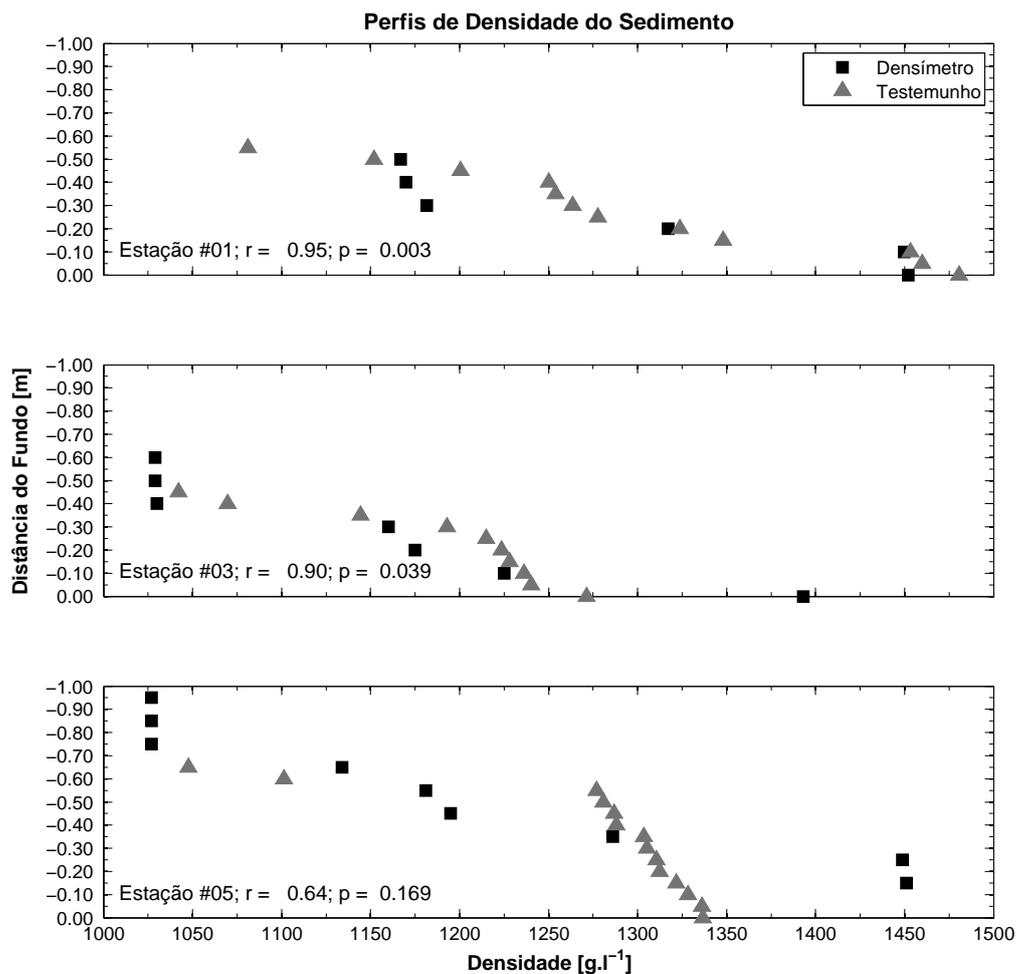


Figura 4.11: Comparação entre a determinação da densidade da lama usando densímetro e em laboratório a partir dos testemunhos. Os resultados sugerem uma tendência de similaridade entre os métodos aplicados, os quais apresentaram correlação significativa em todas as estações exceto na #05.

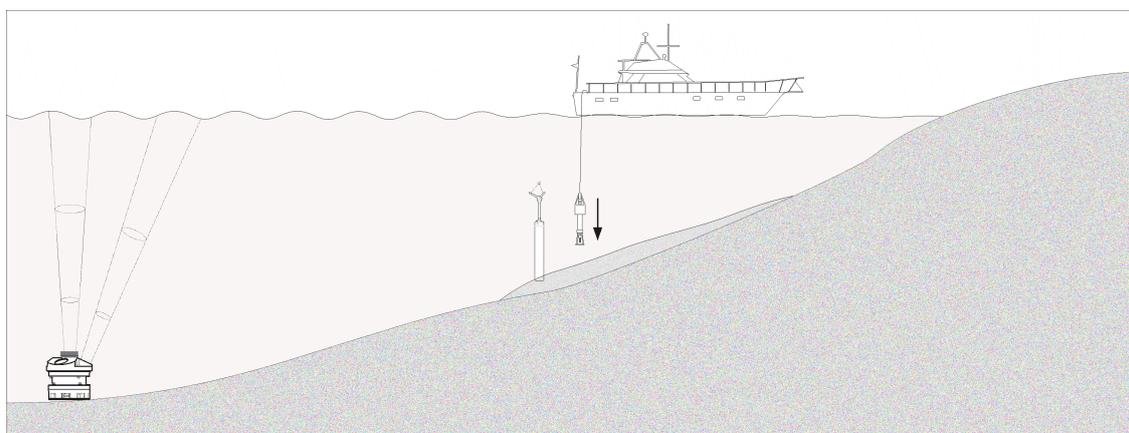


Figura 4.12: Esquema da estratégia amostral da campanha de 2008, exibindo a aquisição simultânea de dados com os equipamentos utilizados, os quais, da esquerda para a direita, são: o perfilador acústico de corrente, o correntômetro e o densímetro.

pedância acústica entre a interface ar-água [40] (Figura 4.13(b)), técnica de medição chamada de AST (*Acoustic Surface Tracking*).

Nas demais estações do transecto foram determinados os perfis de densidade do depósito empregando o densímetro (Figura 4.9(b)), assim como exposto na seção 4.2.1 e, além disso, foram realizados fundeios assistidos para medição de ondas, fazendo uso de um correntômetro, modelo Vector Current Meter, também fabricado pela Nortek. Este instrumento foi configurado para medir ondas por 34 *min* ininterruptos à uma taxa de aquisição de 2 *Hz*, criando um registro com 4098 pontos (Figura 4.13(b)) [41]. Ademais, amostras de sedimentos do fundo foram obtidas com um amostrador do tipo Van Veen, como exemplo visto na Figura 4.13(a).



(a) Amostragem de sedimentos com o Van Veen. Fonte: Fábio Nascimento. (b) Detalhe dos equipamentos usados para medir ondas (à esquerda: AWAC; à direita: Vector). Fonte: Fábio Nascimento.

Figura 4.13: Levantamento de dados durante a campanha de 2008.

Processamento dos dados de ondas

O tratamento dos dados de ondas da campanha de 2008 obedeceu às mesmas técnicas espectrais mencionadas na seção 4.1.1, salvo alguns detalhes particulares de cada instrumento utilizado. Por exemplo, o perfilador acústico de corrente pode utilizar um método, batizado de SUV, para extrair os principais parâmetros das ondas. Análogo à análise PUV, porém o espectro de elevação baseia-se na série de AST, prescindindo do uso da função de transferência para a superfície [44]. Desta forma o espectro estimado pela técnica SUV não sofre da perda de informações em alta frequência, ao contrário da PUV. Esta opção mostrou-se interessante, dado que o perfilador acústico foi fundeado à 18 *m* de profundidade (estação #10), o que poderia provocar a atenuação do sinal de pressão durante a passagem de ondas mais curtas (Figura 4.14). PEDERSEN *et al.* [45] encontraram boa concordância, principalmente nas altas frequências, entre os dados medidos por um ondógrafo do

tipo Waverider com os dados do AWAC, fazendo uso da série de AST. Já os dados de ondas extraídos do correntômetro foram submetidos à análise PUV convencional.

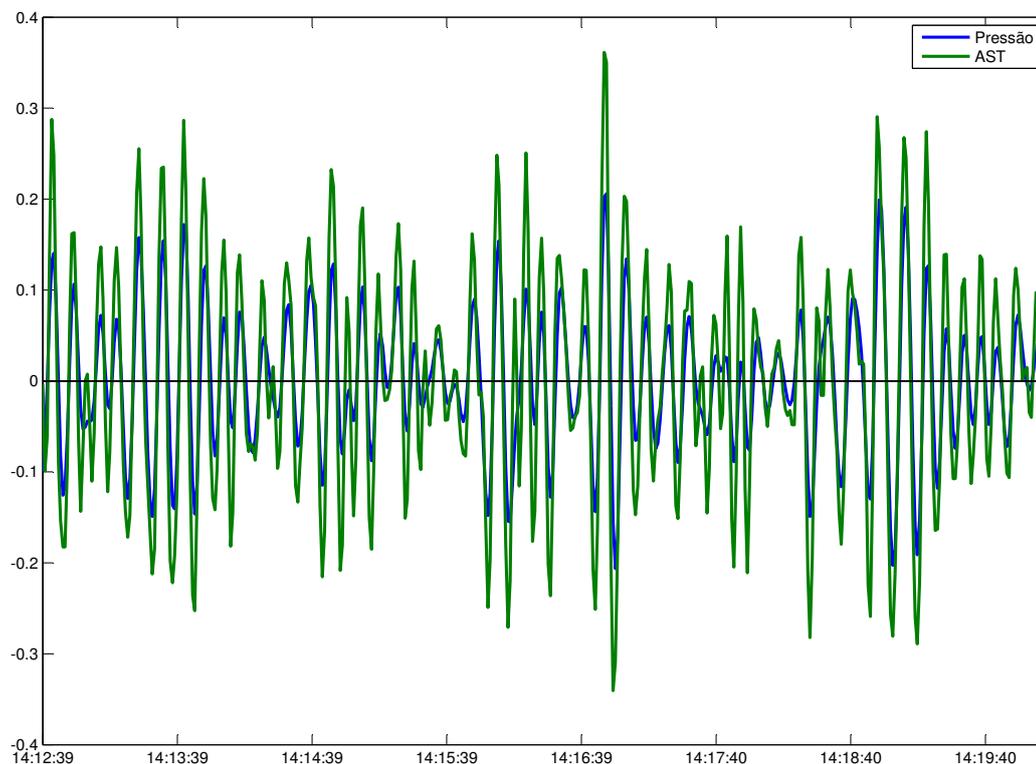


Figura 4.14: Comparação entre um segmento das séries de pressão (no fundo) e de AST medidos pelo AWAC na estação #10 à 18 m de profundidade. Notar a menor amplitude do sinal de pressão.

Após a consistências dos dados de ondas, foram selecionados os registros provenientes tanto o perfilador acústico como do correntômetro, os quais foram adquiridos no mesmo instante de tempo. Diante disto, pôde-se perceber as transformações experimentadas pelos espectros de ondas ao longo do transecto, com embasamento nas informações sobre as características do banco de lama.

Processamento dos dados geológicos

O procedimento para o tratamento dos dados do densímetro foi o mesmo seguido na seção 4.2.1. As amostras coletadas com o busca fundo foram submetidas à análise granulométrica padrão, tendo em vista à diversidade faciológica dos sedimentos superficiais e sua influência na formação de lama fluida.

As amostras de sedimento, imediatamente após a coleta, passaram por um exame tátil-visual (com registro fotográfico). Já em laboratório (LOG/FURG), a análise granulométrica foi dividida em duas fases: peneiramento e pipetagem (ou sedimentação). As malhas das peneiras, durante a primeira etapa, compreenderam o intervalo entre $0,5 \leq \phi \leq 4$ (de areia grossa à argila) com incremento de $1/4 \phi$. Para a por-

ção mais fina, empregou-se a técnica da pipetagem ($\phi > 4$), fundamentada na Lei de Stokes (ver FOLK [16] para maiores detalhes sobre análises em sedimentologia).

O tratamento estatístico da análise foi realizado no programa de código aberto SysGran [8]. Dentre os parâmetros calculados, o presente estudo deteve-se nas frações granulométricas (percentual de cascalho, areia, silte e argila), apresentados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1: Distribuição dos sedimentos por classe de tamanho.

Estação de coleta	Data da coleta	% Areia	% Silte	% Argila
#01a	09/04	—	67,00	33,00
#05a	09/04	20,46	48,95	30,60
#07a	09/04	74,66	21,73	3,61
#02a	10/04	—	40,76	59,24
#03a	10/04	—	54,70	45,30
#04a	10/04	—	41,78	58,22
#06a	10/04	8,34	32,76	58,40
#005	10/04	7,83	35,15	57,02
#01b	11/04	—	29,18	70,82
#03b	11/04	—	54,23	45,77
#05b	11/04	—	55,85	44,15
#07b	11/04	—	45,48	54,52

Capítulo 5

Análise da Dissipação de Energia das Ondas por Faixas de Frequências

Nesta etapa do trabalho será investigado como o amortecimento das ondas acontece por bandas de frequências. SHEREMET e STONE [52] observaram uma significativa atenuação das ondas curtas ($f > 0,2 Hz$), as quais interagiriam fracamente com o fundo lamoso. Posteriormente, ELGAR e RAUBENHEIMER [15] atribuíram a atenuação de energia nas altas frequências às interações não lineares onda-onda típicas de águas intermediárias e rasas.

KRANENBURG [27], por meio de modelagem numérica, ressaltou a dificuldade de se determinar a frequência do espectro de ondas que sofre maior decréscimo de energia em razão da dissipação devido ao fundo lamoso. Tal dificuldade seria oriunda da variabilidade das propriedades do depósito que influenciam diretamente no amortecimento de energia das ondas, por exemplo, a densidade e a viscosidade e, também, a espessura da camada de lama. Este capítulo avaliará a atenuação das ondas utilizando como ferramenta uma técnica de análise espectral, conhecida como DAAT (acrônimo em inglês para *Directional Analysis with Adaptive Techniques*), desenvolvida por PARENTE [43], que calcula o espectro direcional de energia por diferentes bandas de frequências ao longo do tempo.

Resultados da modelagem computacional serão apresentados ao final do capítulo. A ideia do emprego do modelo numérico na presente investigação é estimar a contribuição do termo de dissipação viscosa em oposição aos demais processos comuns de águas intermediárias, como, as interações não lineares e a fricção junto ao fundo.

5.1 Princípios da técnica DAAT

O cerne da DAAT é detectar, ao longo da série temporal original, a ocorrência de uma condição estável do mar em direção e computar seu respectivo valor de espectro, obtendo (reconstruindo) uma distribuição direcional de energia dividida por faixas predefinidas de períodos de onda. A filosofia desta técnica visa aprimorar a resolução espacial, em detrimento do sacrifício da resolução em frequência, na análise de dados direcionais de ondas, em que as aplicações, até então, eram direcionadas para a caracterização de estados de mar, como visto em VIOLANTE-CARVALHO [69]. BARREIRA [1] estendeu a aplicação da DAAT ao usá-la com dados medidos com perfilador acústico de corrente.

A vantagem da DAAT é sua capacidade de detectar situações de mar com ondas advindas de diferentes direções, ainda que em uma mesma frequência. A característica adaptativa da DAAT permite a seleção de faixas de períodos de ondas de modo a representar da melhor forma o estado de mar de dada região. O grande benefício, para o presente estudo, é avaliar a dissipação da energia das ondas para as faixas predeterminadas, cada qual representando um estado de mar distinto.

A DAAT é baseada na promediação de segmentos previamente selecionados do registro das medições, podendo ocorrer a sobreposição de segmentos ou não. O alisamento por médias tem por fim diminuir a variância do espectro de maneira a reduzir os ruídos oriundos tanto do sistema de medição quanto de processos naturais como a mistura de mares de diferentes direções.

A representação gráfica da DAAT exhibe a evolução temporal do espectro direcional e é chamada de PLEDS (acrônimo em inglês para *PLotting the Evolution of Directional Spectrum*). O PLEDS pode ser alterado para modificar a resolução temporal e, também, para disponibilizar mais de uma direção em determinada frequência. Além disso, é possível inserir dados de ventos no PLEDS, tornando mais rica a interpretação de um dado estado de mar. Detalhes sobre a DAAT e o PLEDS são apresentados por PARENTE [43].

5.2 Aplicação da DAAT

Dentro do escopo do presente estudo, a DAAT foi aplicada com intuito de entender a evolução temporal das transformações dos espectros direcionais, para cada faixa de frequência, quando propagados sobre substrato lamoso, a partir das medições dos dados de ondas da campanha de 2005 (seção 4.1). Trata-se de uma prática inédita do uso da DAAT, desta vez, orientada para o estudo da atenuação das ondas induzida pela interação com o fundo de lama fluida, e não para a caracterização de estados de mar, como usual.

Para tanto, algumas adaptações foram realizadas no código da DAAT, principalmente, para o cálculo do espectro direcional dos dados medidos com o perfilador acústico (Aquadopp). Como já explicado na seção 4.1.1, os espectros extraídos dessas medições foram computados a partir da técnica PUV, a qual foi inserida na formulação da DAAT. Não foram necessárias modificações significativas para os dados do ondógrafo (Waverider).

Nas Figuras 5.1, 5.2, 5.3 e 5.4 são apresentadas as evoluções temporais dos espectros direcionais dos dados medidos pelo Waverider e pelo Aquadopp referentes aos meses de maio e junho. O tempo, dado em dias do mês, é representado no eixo das ordenadas. A direção verdadeira, em graus, está representada no eixo das abscissas. Cada espaçamento entre as linhas horizontais equivalem à $0,1 m^2$ da densidade de energia das ondas e as cores correspondem às faixas de frequências preestabelecidas, sendo:

Faixas	Intervalo de frequência (período)
1	0,05 a 0,09 Hz (18,7 a 11,3 s)
2	0,09 a 0,12 Hz (11,3 a 8,05 s)
3	0,12 a 0,16 Hz (8,05 a 6,25 s)
4	0,16 a 0,26 Hz (6,25 a 3,75 s)
5	0,26 a 0,37 Hz (3,75 a 2,67 s)

Em primeira análise, percebe-se, pela escala de cores, que distribuição de energia entre as faixas de frequências dos registros do Waverider é mais homogênea em oposição àquelas do Aquadopp. Neste último, há uma concentração predominante de energia na faixa 1 (Figuras 5.3 e 5.4), sugerindo uma atenuação nas frequências relativamente mais altas. Os espaços sem valores do espectro significam, ou falha durante as medições, ou que o registro não passou no controle de qualidade (ver seção 4.1.1).

Outra observação interessante diz respeito à direção das ondas, as quais mudaram de orientação, tendendo para leste conforme viajavam para águas mais rasas (Figuras 5.1, 5.2, 5.3 e 5.4). A mudança de direção das ondas, cujas cristas tendem a ficar paralelas à linha de costa, é explicada pelo fenômeno da refração. A inserção dos ventos nos gráficos também auxiliou na identificação do mar local. Nota-se, nos espectros das medições do Waverider, que a faixa 5 acompanha mais a direção dos ventos em comparação com as outras faixas.

Adicionalmente, foram gerados os histogramas de altura significativa e a rosa dos ventos (direção principal x período de pico) para as séries de dados do Waverider e do Aquadopp, o que permitiu auxiliar na interpretação dos resultados da DAAT (Figura 5.5).

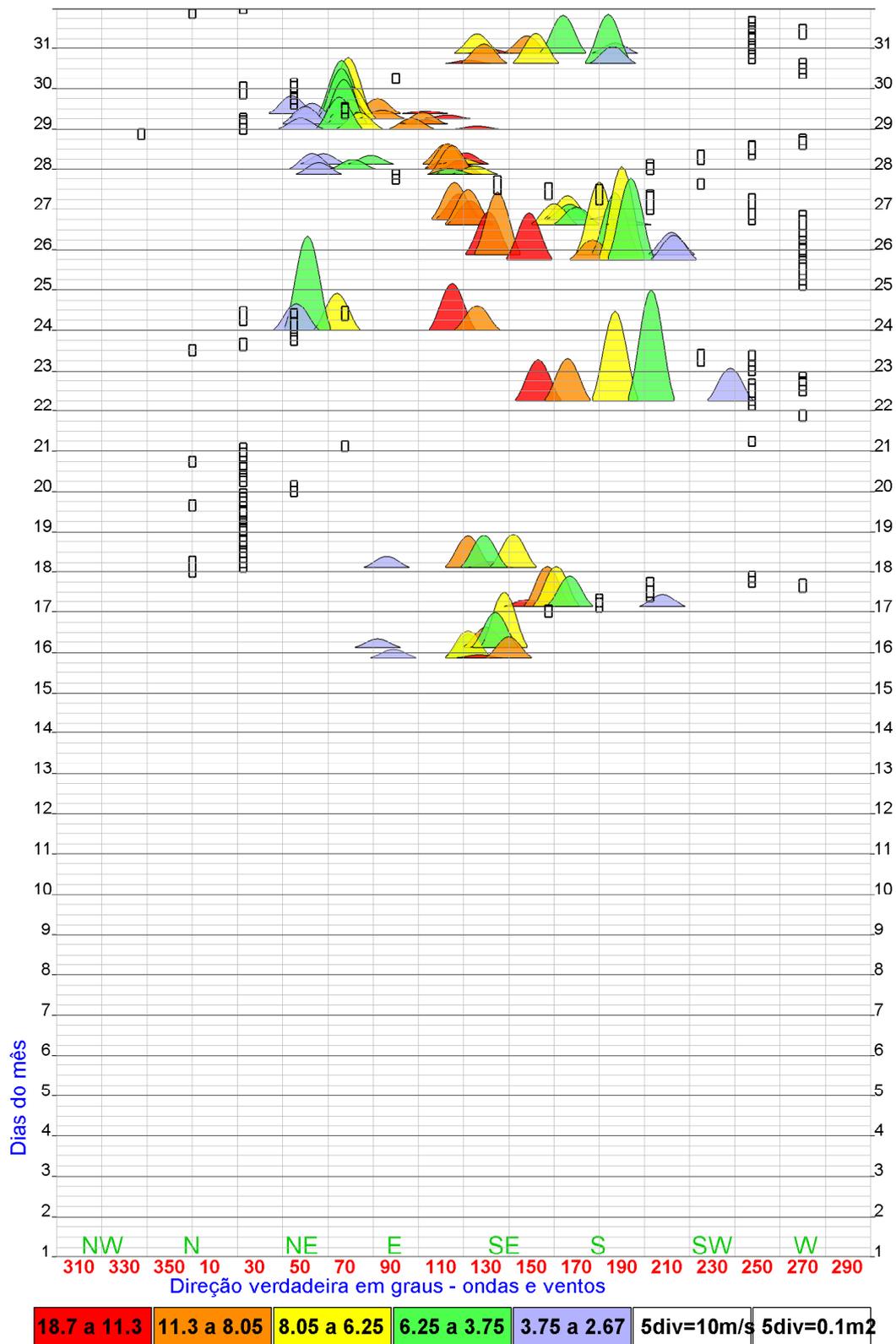


Figura 5.1: Representação gráfica da DAAT (PLEDS), mostrando a evolução temporal dos espectros direcionais de cada faixa de frequências dos dados extraídos das medições de ondas efetuada pelo Waverider (25 m) durante maio de 2005. As barras verticais indicam a intensidade e direção do vento.

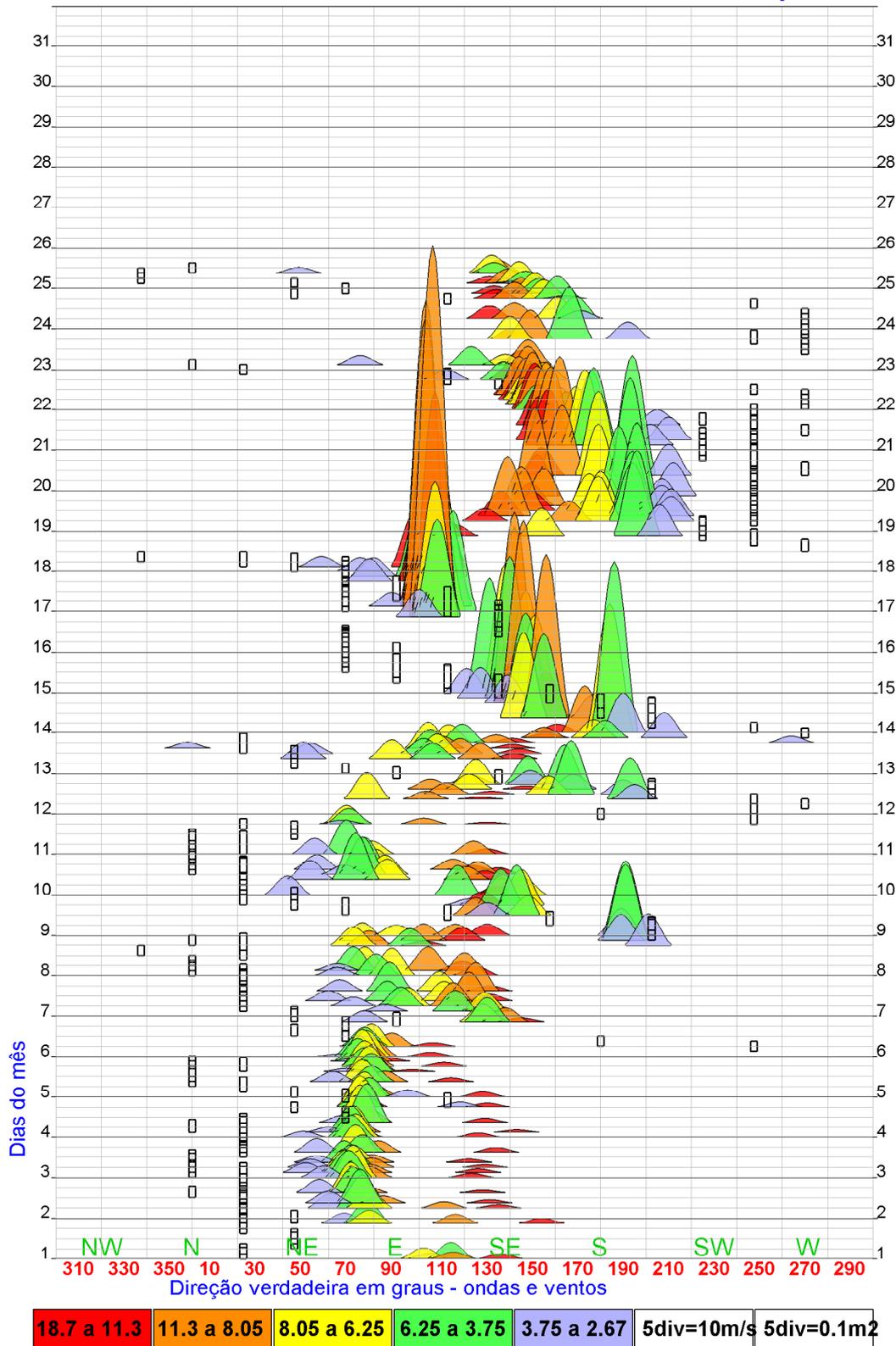


Figura 5.2: Representação gráfica da DAAT (PLEDS), mostrando a evolução temporal dos espectros direcionais de cada faixa de frequências dos dados extraídos das medições de ondas efetuada pelo Waverider (25 m) durante junho de 2005. As barras verticais indicam a intensidade e direção do vento.

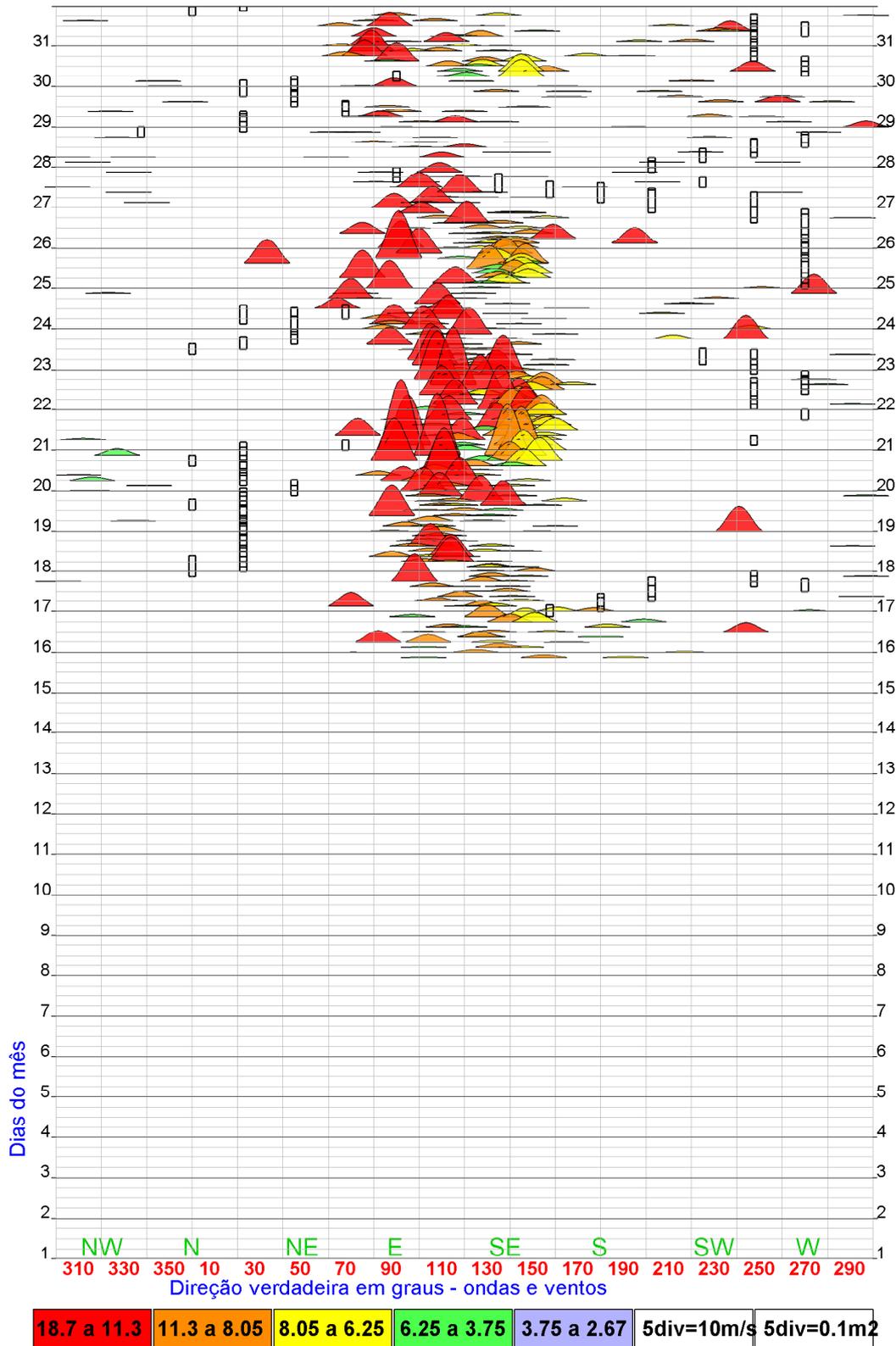


Figura 5.3: Representação gráfica da DAAT (PLEDS), mostrando a evolução temporal dos espectros direcionais de cada faixa de frequências dos dados extraídos das medições de ondas efetuada pelo Aquadopp (8 m) durante maio de 2005. As barras verticais indicam a intensidade e direção do vento.

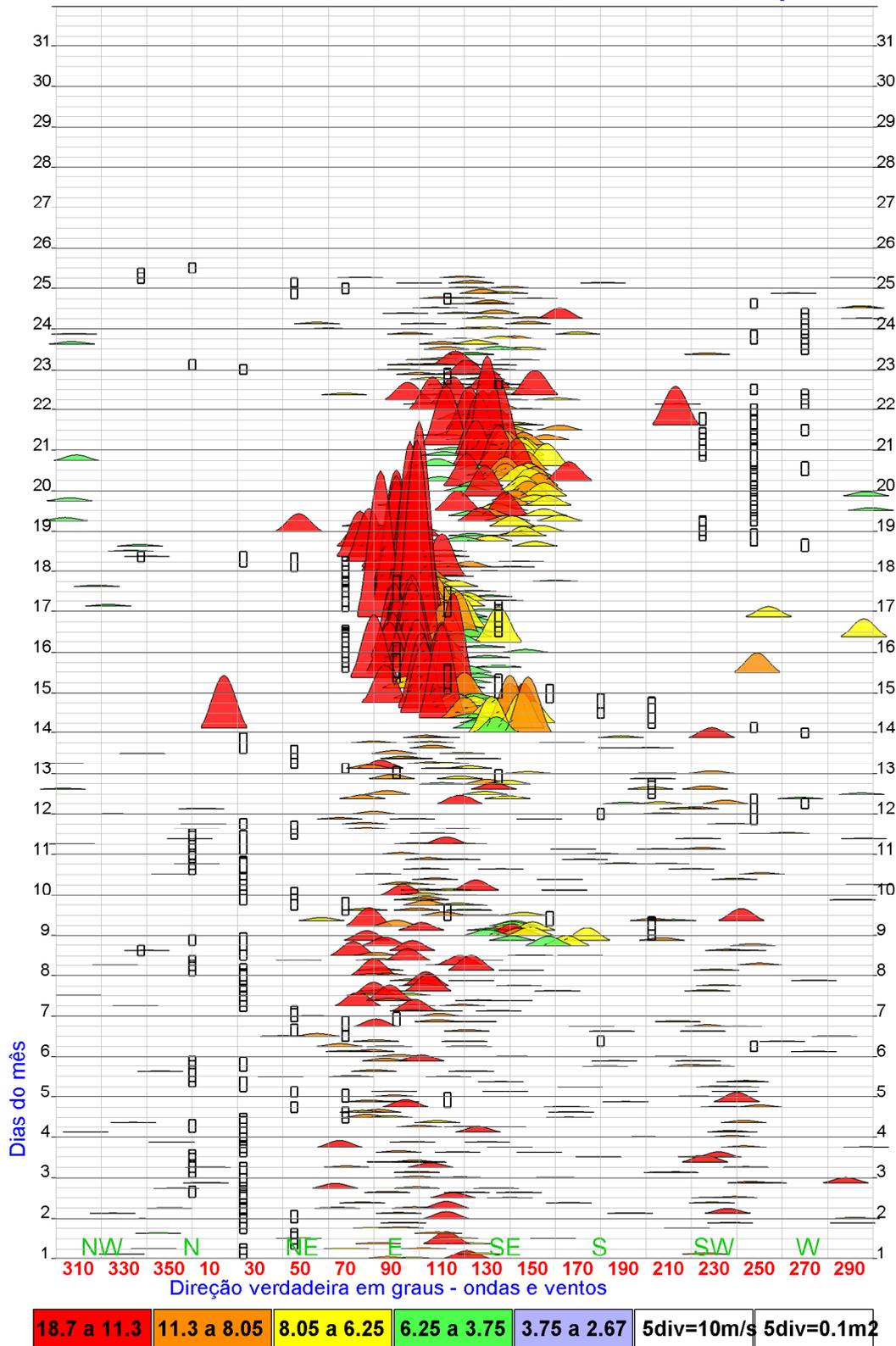


Figura 5.4: Representação gráfica da DAAT (PLEDS), mostrando a evolução temporal dos espectros direcionais de cada faixa de frequências dos dados extraídos das medições de ondas efetuada pelo Aquadopp (8 m) durante junho de 2005. As barras verticais indicam a intensidade e direção do vento.

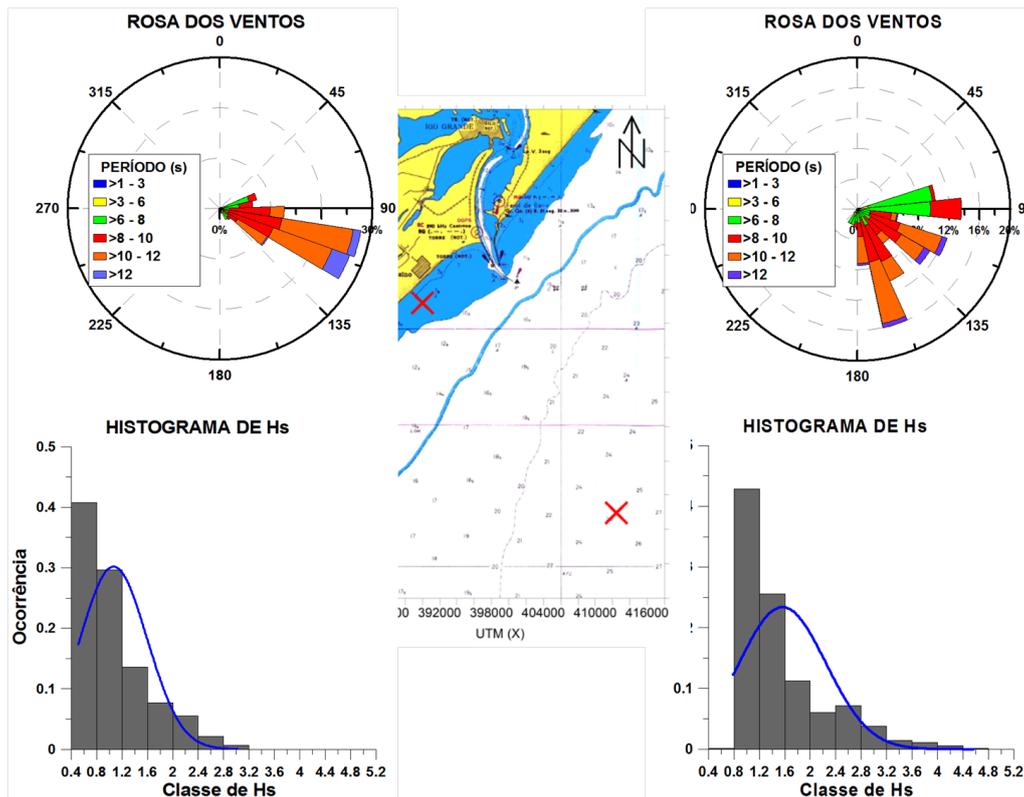


Figura 5.5: Rosa dos ventos (direção principal x período de pico) e histograma de H_s obtidos com os dados de ondas da campanha de 2005. A presença do mapa ilustra a posição das estações e a respectiva diferença de profundidade entre as mesmas (à esquerda: Aquadopp; à direita: Waverider).

Os resultados apresentados na Figura 5.5 corroboram com aqueles fornecidos pela DAAT, principalmente, no tocante à mudança de direção das ondas em virtude da refração (notar a orientação das linhas isobatimétricas na Figura 5.5). Durante o período de aquisição de dados, percebe-se que as ondas de maiores períodos (ondas mais longas), os marulhos, advêm do quadrante sul. Um exame do histograma de H_s mostra a diminuição da altura das ondas durante sua propagação sobre o transecto. A classe de H_s entre 0,4 e 0,8 m foi mais frequente na estação mais rasa, enquanto o intervalo $0,8 < H_s \leq 1,2$ m prevaleceu nas medições realizadas com o Waverider.

Com o propósito de extrair mais informações dos resultados fornecidos pela DAAT, o código do PLEDS foi modificado a fim de contemplar a visualização dos registros de ambos equipamentos em um mesmo gráfico para cada uma das faixas de frequências, permitindo uma observação qualitativa do amortecimento de energia das ondas. Nas Figuras 5.6, 5.7 e 5.8 vê-se o comportamento da evolução das ondas mais longas do espectro, correspondentes à faixa de frequência número 1, associada aos marulhos.

Os resultados ora apresentados revelam que a redução de energia dos espectros extraídos dos registros do Aquadopp não foi relevante. A evolução temporal das

ESPECTRO DIRECIONAL DE ONDAS - CASSINO, RS - mai/2005

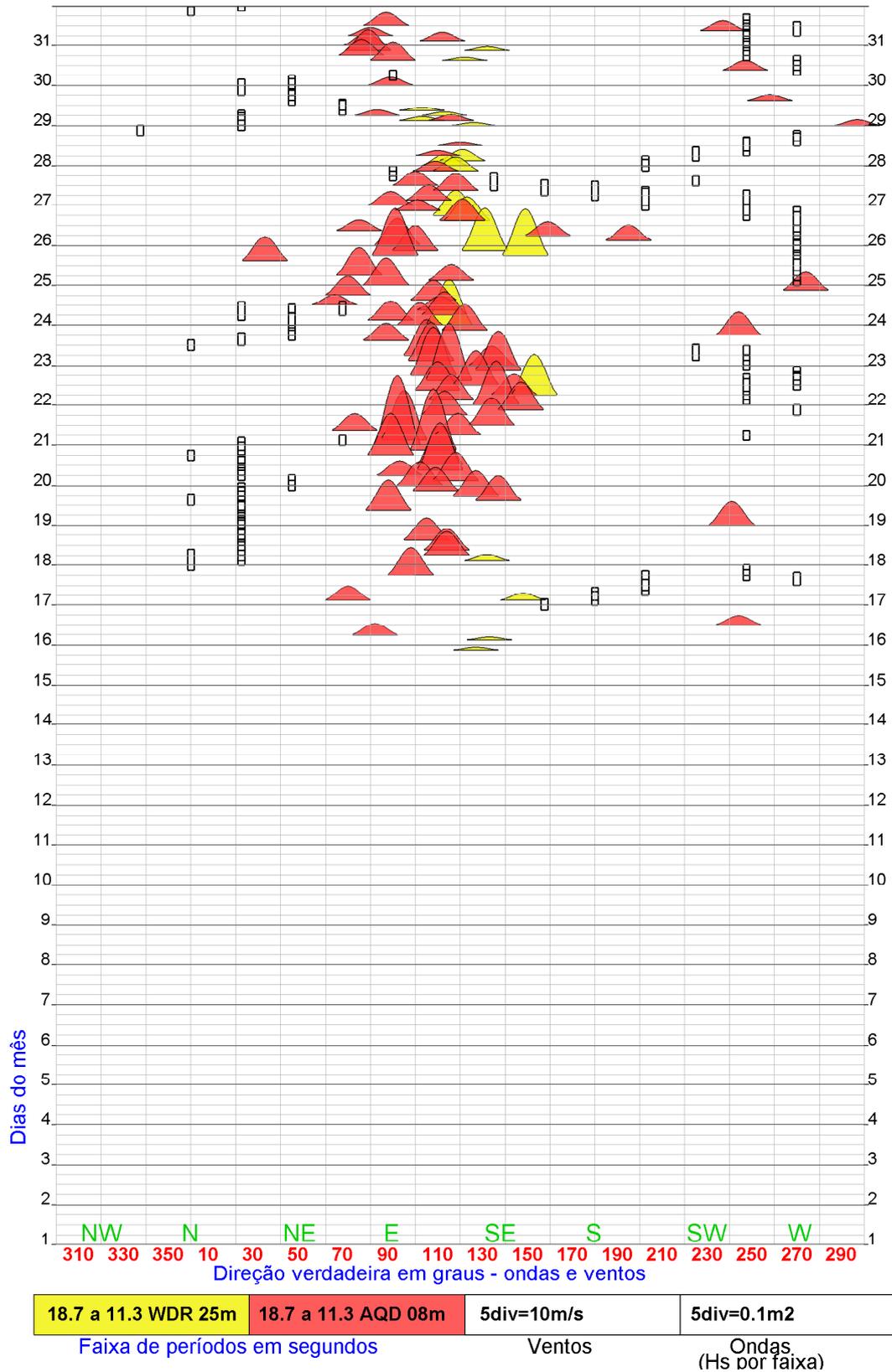


Figura 5.6: (a) Comparação do comportamento da evolução dos espectros direcionais das séries do Waverider (WDR) e do Aquadopp (AQD) para faixa 1 para o mês de maio. As cores representam os espectros dos registros de cada equipamento (Waverider em amarelo e Aquadopp em vermelho).

ESPECTRO DIRECIONAL DE ONDAS - CASSINO, RS - jun/2005

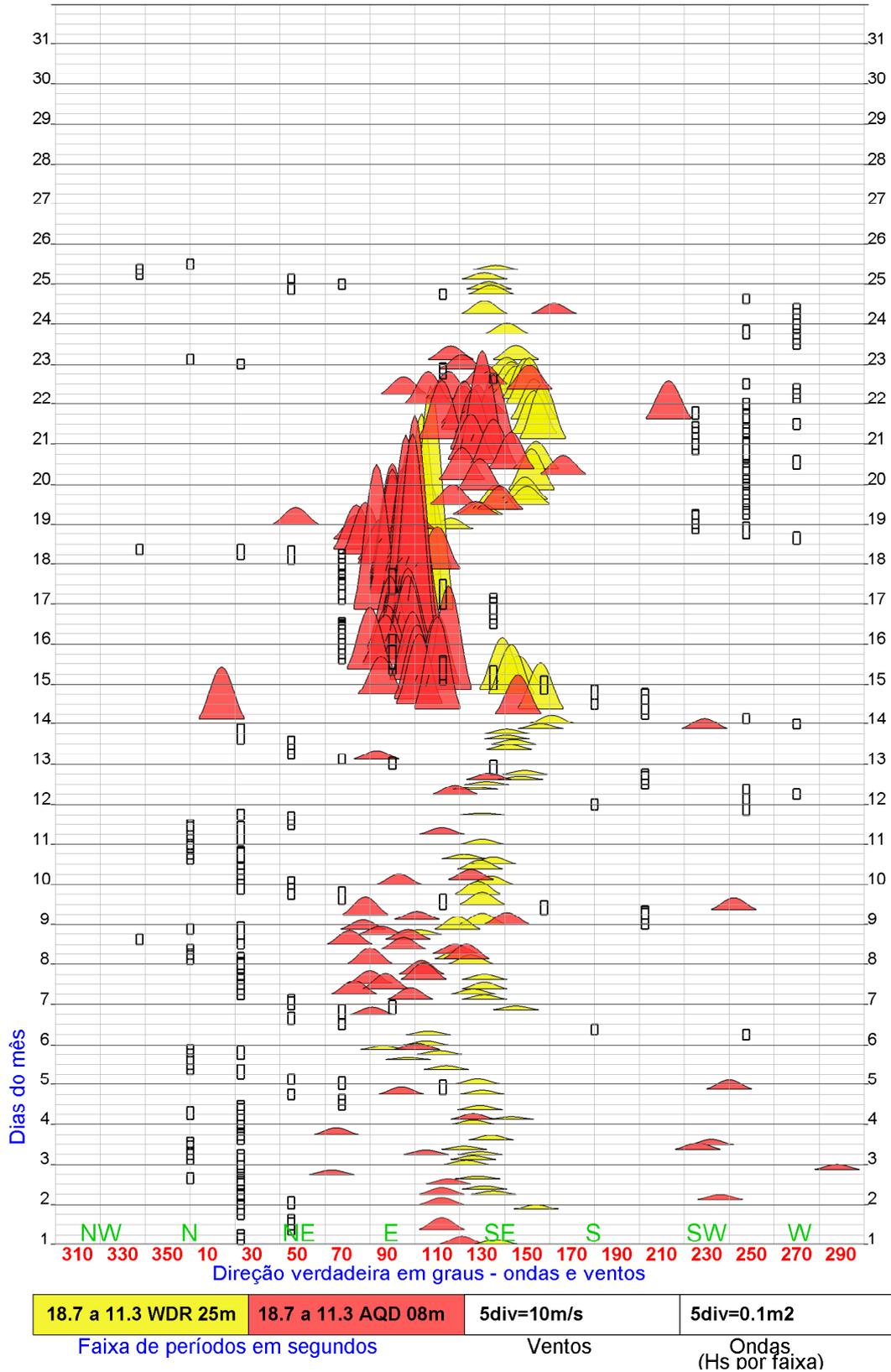


Figura 5.7: (b) Comparação do comportamento da evolução dos espectros direcionais das séries do Waverider (WDR) e do Aquadopp (AQD) para faixa 1 para o mês de junho. As cores representam os espectros dos registros de cada equipamento (Waverider em amarelo e Aquadopp em vermelho).

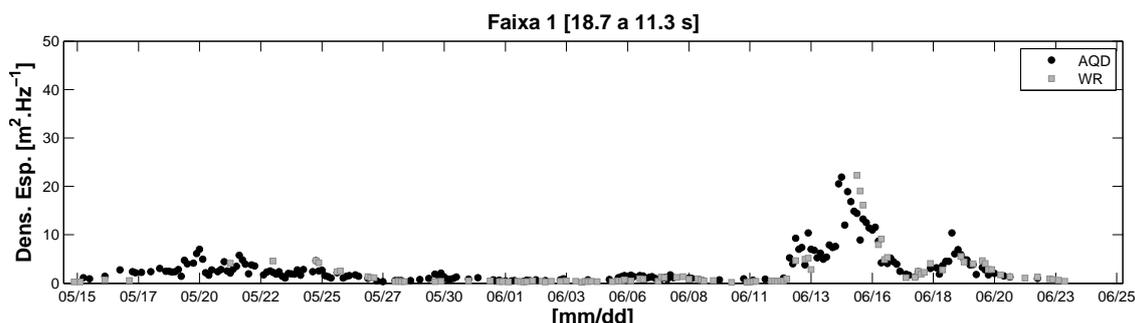


Figura 5.8: (c) Comparação da evolução temporal dos espectros de energia da faixa 1 entre o Waverider (WDR) e o Aquadopp (AQD) para a série completa.

séries de ambas as medições tem comportamento bastante semelhante em termos de energia (Figura 5.8). Percebe-se que em alguns trechos a energia dos espectros oriundos do Aquadopp passa a ser maior do que a do Waverider. Pode-se conjecturar como possível razão para tal, a transferência de energia das ondas mais curtas para a banda de baixa frequência do espectro durante a propagação do trem de ondas ao longo do transecto. Nota-se ainda que a direção principal das ondas da faixa 1, basicamente de E e SE, sofrem pouca influência do vento local, caracterizando as ondulações, que nesta faixa, possuem períodos entre 11,3 e 18,7 s (Figuras 5.6 e 5.7). A investigação segue para a faixa 2, que engloba as ondas de períodos entre 8,05 e 11,3 s, como visto nas Figuras 5.9, 5.10 e 5.11.

À primeira vista se averigua uma diferença mais acentuada de energia, no intervalo de 15 a 17/06, entre espectros de ambas as séries, chegando a ser até 10 vezes superior ao observado no restante do registro. Este período esteve associado à entrada de uma ressaca (ver seção 4.1.1). O cenário meteorológico observado propiciou a chegada de ondulações de ESE, como detetado pela DAAT (Figura 5.2), cuja maior energia esteve vinculada à faixa 2 correspondente às medições do Waverider. Durante a entrada da ressaca, o banco de lama amorteceu de forma expressiva a energia das ondas, como visto na Figura 5.11. Assim como observado na faixa 1, os espectros direcionais relativos à faixa 2, mostraram ondulações procedentes do quadrante ESE praticamente ao longo de toda a série, sofrendo pouca influência da atuação do vento local.

A faixa 3 inclui as ondas de 6,25 a 8,05 s, que na rosa dos ventos da Figura 5.5, aparece como o intervalo de maior ocorrência das ondas oriundas de ENE para a série do Waverider. O mesmo não é observado nos resultados obtidos das medições do Aquadopp.

Nas Figuras 5.12, 5.13 e 5.14 percebe-se uma maior redução do sinal da série

ESPECTRO DIRECIONAL DE ONDAS - CASSINO, RS - mai/2005

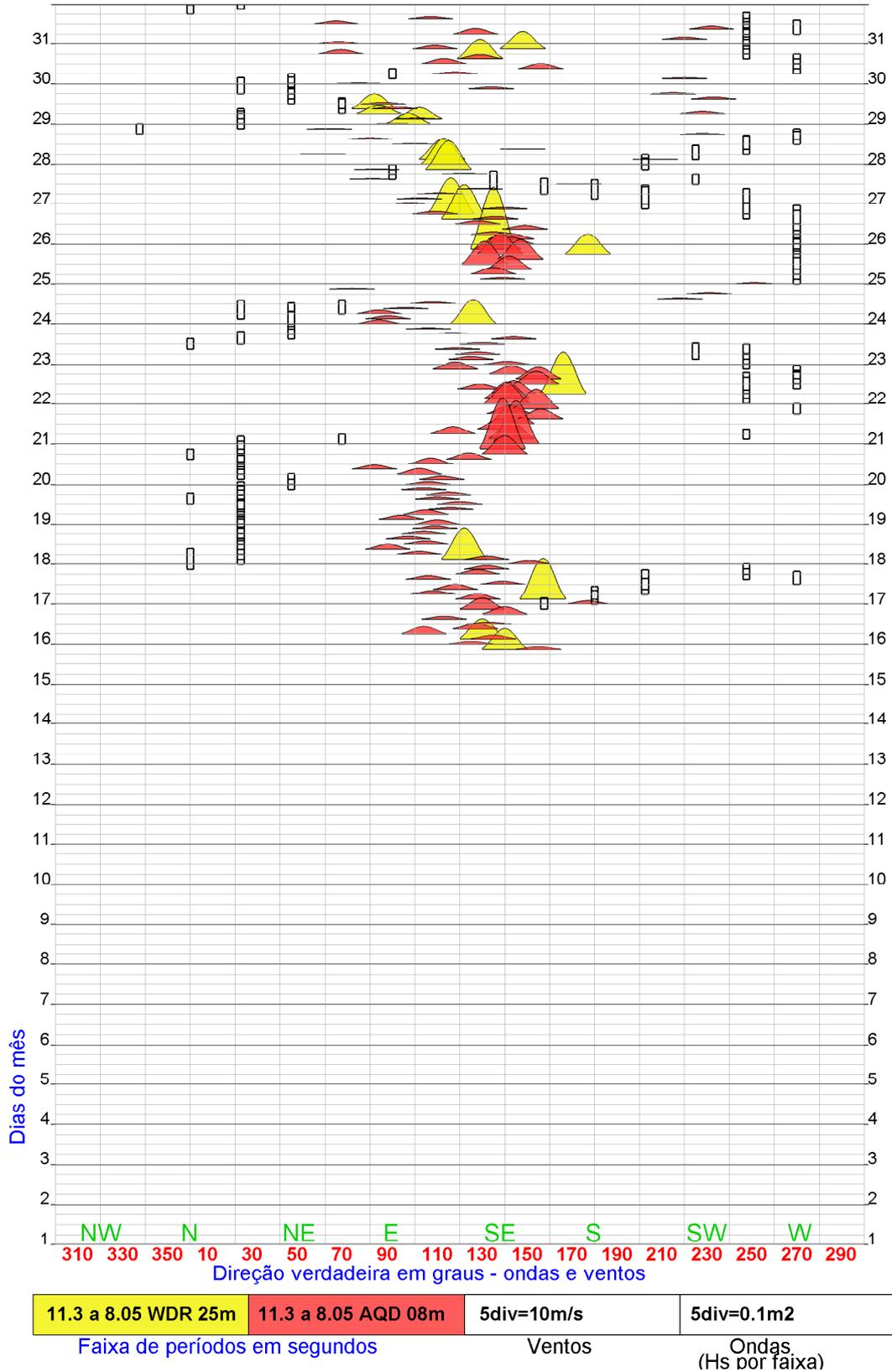


Figura 5.9: (a) Comparação do comportamento da evolução dos espectros direcionais das séries do Waverider (WDR) e do Aquadopp (AQD) para faixa 2 para o mês de maio. As cores representam os espectros dos registros de cada equipamento (Waverider em amarelo e Aquadopp em vermelho).

ESPECTRO DIRECIONAL DE ONDAS - CASSINO, RS - jun/2005

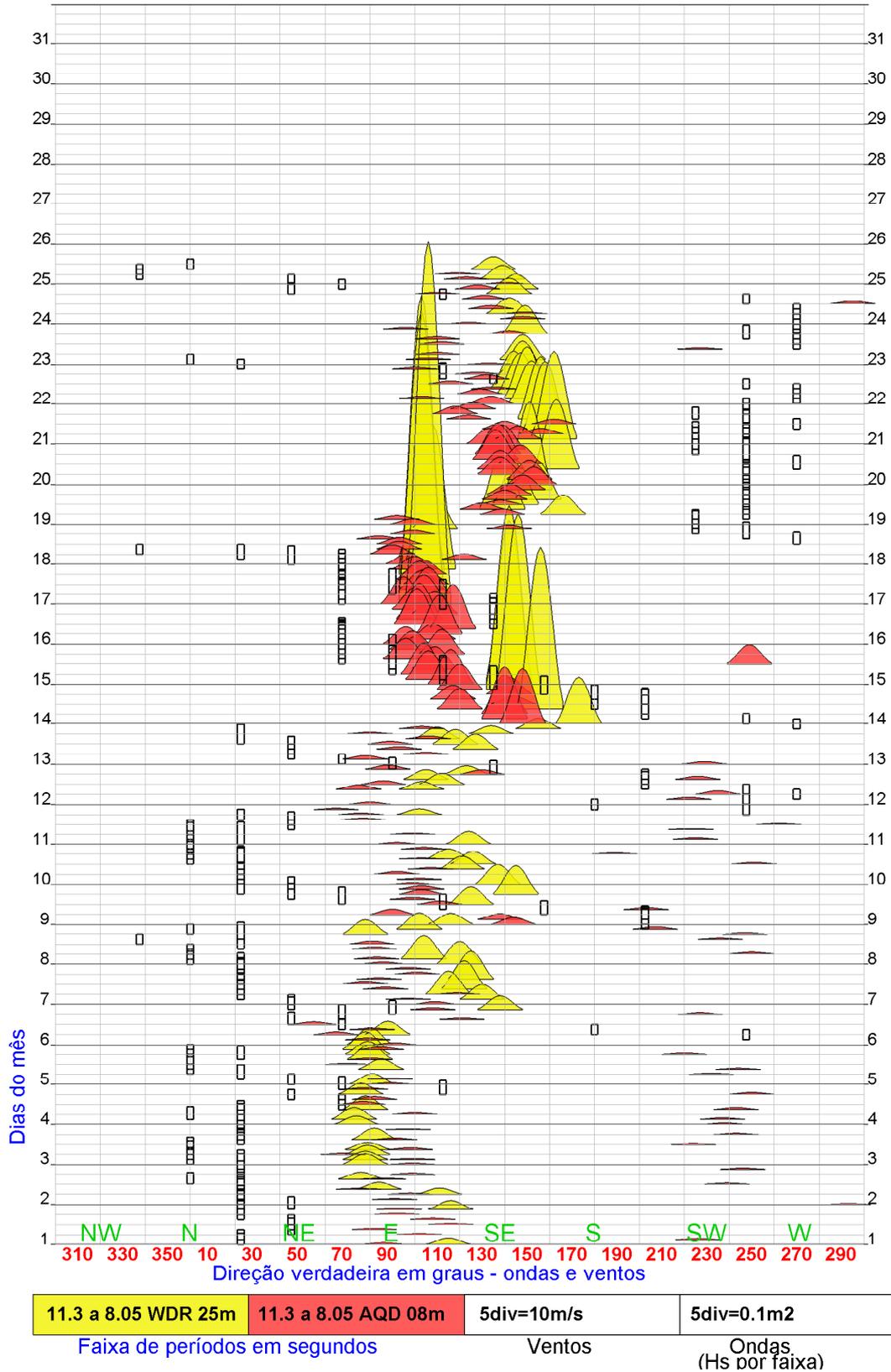


Figura 5.10: (b) Comparação do comportamento da evolução dos espectros direcionais das séries do Waverider (WDR) e do Aquadopp (AQD) para faixa 2 para o mês de junho. As cores representam os espectros dos registros de cada equipamento (Waverider em amarelo e Aquadopp em vermelho).

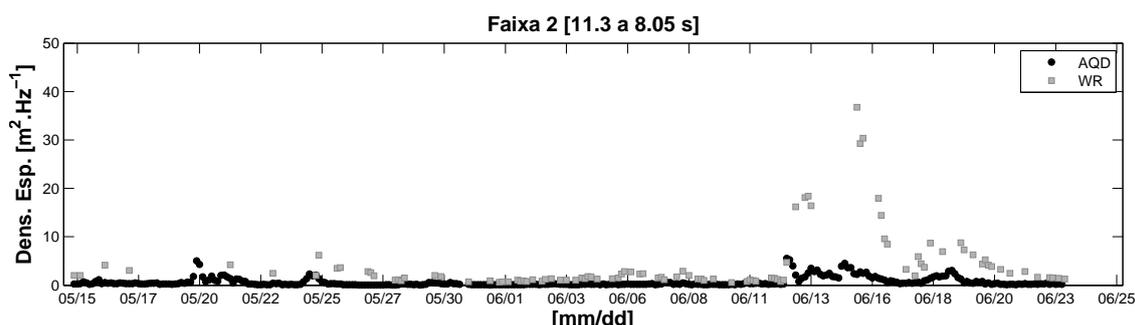


Figura 5.11: (c) Comparação da evolução temporal dos espectros de energia da faixa 2 entre o Waverider (WDR) e o Aquadopp (AQD) para a série completa.

do Aquadopp, se comparado com as faixas de períodos maiores ($> 8,05 s$). Em contraste, os espectros referentes às medições do Waverider possuem mais energia em relação às faixas 1 e 2 para os períodos de mar mais brandos, indicando uma possível e importante contribuição do mar local (ou "quase-local") no regime de ondas. Tal afirmação é reforçada pelo fato da direção das ondas tender a acompanhar a direção do vento (Figuras 5.12 e 5.13). Durante o evento de tempestade, vê-se um padrão semelhante ao observado na faixa 2. Nas Figuras 5.15, 5.16 e 5.17 são apresentados os resultados para a faixa 4 ($0,16 < f \leq 0,26 Hz$).

Os espectros da faixa 4 (Figuras 5.15, 5.16 e 5.17) apresentaram comportamento análogo aos das faixas 2 e 3, porém, os espectros do Waverider possuem uma energia associada ligeiramente maior durante quase todo o período e, em contrapartida, nota-se que o decréscimo de energia dos espectros do Aquadopp é relativamente mais acentuado. Essa suposição é válida para as situações de mar calmo, demonstrando, novamente, a relevância da atenuação das ondas mais curtas (faixa 3: de $8,05 a 6,25 s$ e faixa 4: de $6,25 a 3,75 s$) neste cenário. A direção das ondas apresentam coerência com a orientação dos ventos, visto claramente nos espectros dos registros do Waverider, situação típica de mar local (vagas) (Figuras 5.15 e 5.16).

Pela Figura 5.17 vê-se que a energia dos espectros gerados pelos registros do Aquadopp é baixa (média de $0,13 m^2.Hz^{-1}$) ao longo de toda a série em comparação com os espectros extraídos do Waverider. Diante dessa observação, é prudente alertar que a faixa 4 trabalha com ondas mais curtas (incluindo aquelas com período em torno de $3 - 4 s$), as quais estão próximas do limite de aplicação da técnica PUV. Por motivo semelhante, os resultados da DAAT para a faixa 5 ($0,26 < f \leq 0,37 Hz$) não foram apresentados. Uma outra interessante forma de visualizar a evolução dos espectros é vista na Figura 5.18.

Analisando a série dos espectros do Waverider, percebe-se que as faixas de

ESPECTRO DIRECIONAL DE ONDAS - CASSINO, RS - mai/2005

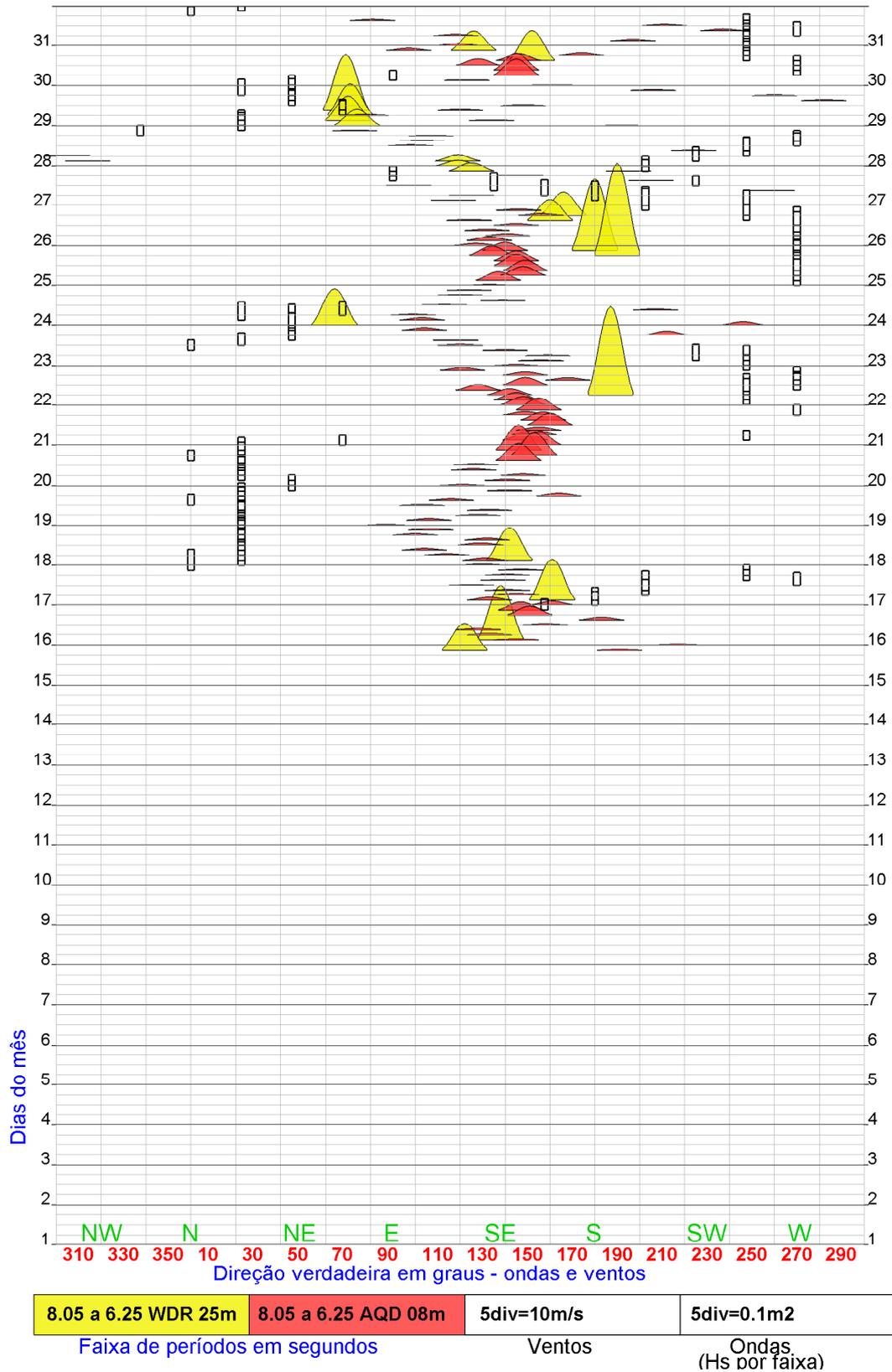


Figura 5.12: (a) Comparação do comportamento da evolução dos espectros direcionais das séries do Waverider (WDR) e do Aquadopp (AQD) para faixa 3 para o mês de maio. As cores representam os espectros dos registros de cada equipamento (Waverider em amarelo e Aquadopp em vermelho).

ESPECTRO DIRECIONAL DE ONDAS - CASSINO, RS - jun/2005

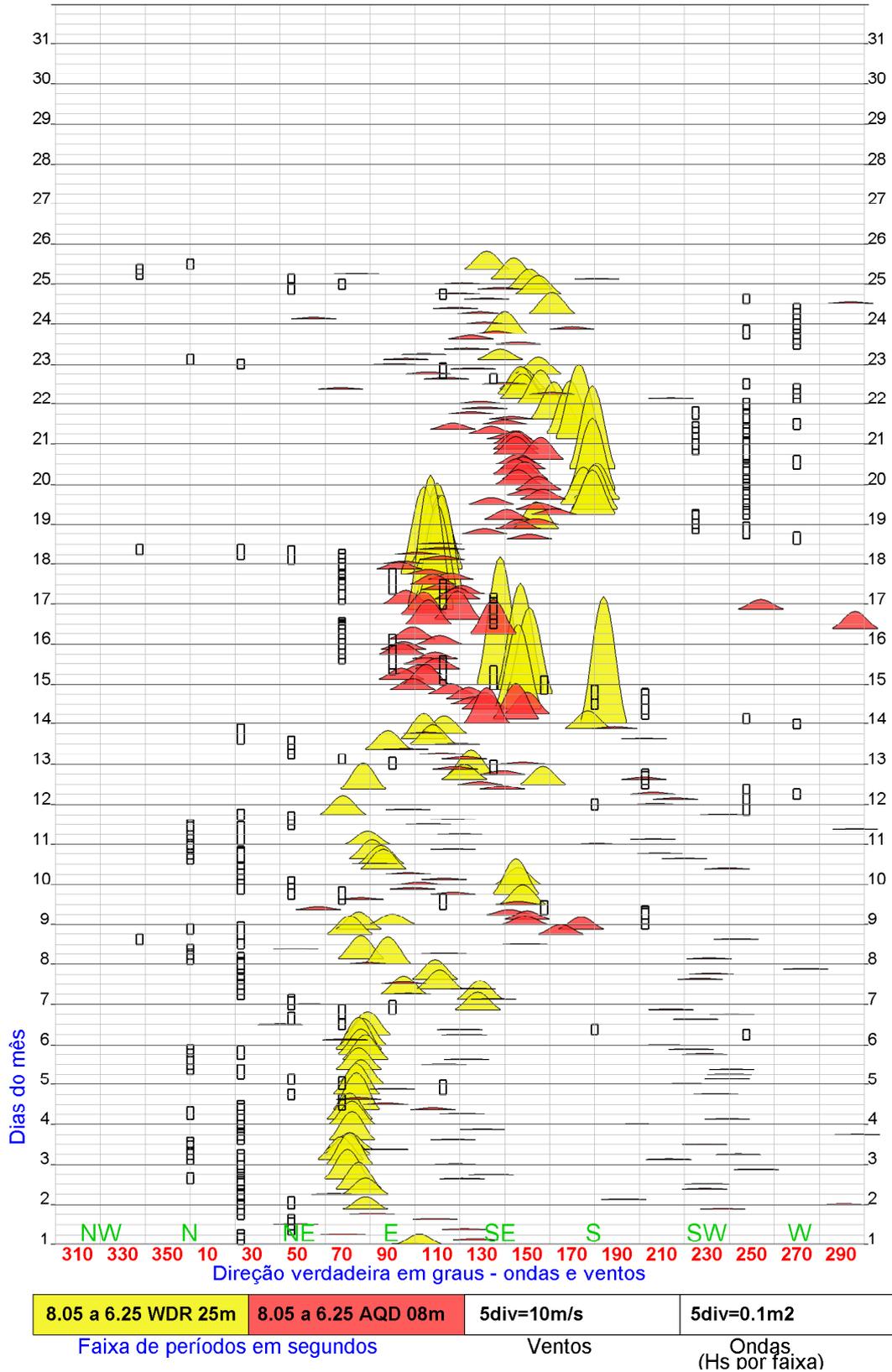


Figura 5.13: (b) Comparação do comportamento da evolução dos espectros direcionais das séries do Waverider (WDR) e do Aquadopp (AQD) para faixa 3 para o mês de junho. As cores representam os espectros dos registros de cada equipamento (Waverider em amarelo e Aquadopp em vermelho).

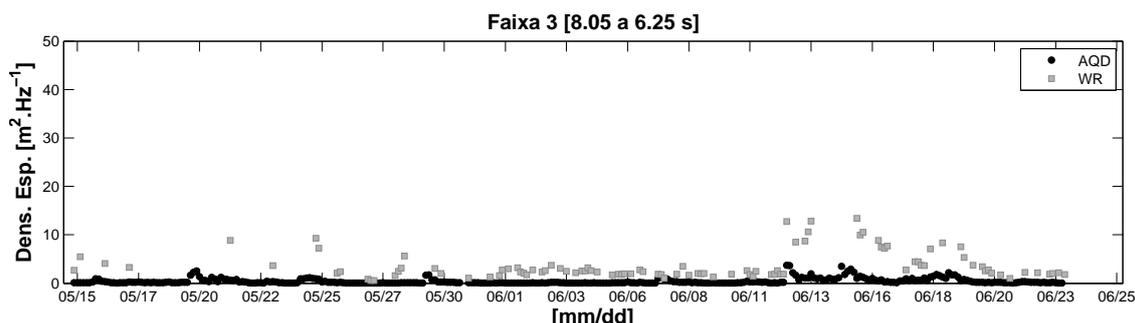


Figura 5.14: (c) Comparação da evolução temporal dos espectros de energia da faixa 3 entre o Waverider (WDR) e o Aquadopp (AQD) para a série completa.

frequência 3 e 4 têm em si mais energia, com exceção à situação de estado de mar agitado, quando a faixa 2 detém a maior energia. Poder-se-ia esperar o mesmo comportamento da série dos espectros das medições do Aquadopp, de forma que a atenuação (devido à interação com fundo lamoso) ocorresse de maneira proporcional para cada faixa. Porém um exame qualitativo da Figura 5.18 revela que a maior energia está associada à faixa 1, durante praticamente toda a série, com decréscimo sucessivo de energia para as demais faixas. Um exemplo dessa situação é visto na Figura 5.19, que apresenta os espectros unidirecionais $S(f)$ para duas situações distintas de estado de mar.

Na Tabela 5.1 é apresentada a estatística básica (mínimo, máximo, média e desvio padrão) das séries dos espectros de energia para cada uma das faixas de frequência. Os resultados estatísticos corroboram com a análise qualitativa vista anteriormente, reforçando as suposições de que a maior atenuação de energia está na faixa 4 e que não se observou uma dissipação de energia relevante na faixa 1.

Tabela 5.1: Estatística básica da série temporal dos espectros de densidade de energia referentes à ambos os equipamentos (WDR: Waverider; AQD: Aquadopp). min.: mínimo; máx.: máximo; média: média aritmética; desv. pad.: desvio padrão.

Faixa	min. (WDR/AQD)	máx. (WDR/AQD)	média (WDR/AQD)	desv. pad. (WDR/AQD)
1	0,17/0,32	22,30/21,90	2,08/3,47	3,23/3,77
2	0,58/0,02	36,76/5,58	4,20/0,67	6,33/0,93
3	0,58/0,01	13,43/3,72	3,65/0,42	2,90/0,60
4	0,55/0,01	17,04/1,61	4,23/0,13	3,23/0,18

GADE [19] demonstrou que a taxa de decaimento da altura das ondas no modelo de dissipação viscosa é proporcional à e^{-k_i} (ver seção 2.2.1), sendo k_i ($= \mathcal{J}(k)$) extraído da Equação 2.19. Para estimar a taxa de decaimento da onda significativa,

ESPECTRO DIRECIONAL DE ONDAS - CASSINO, RS - mai/2005

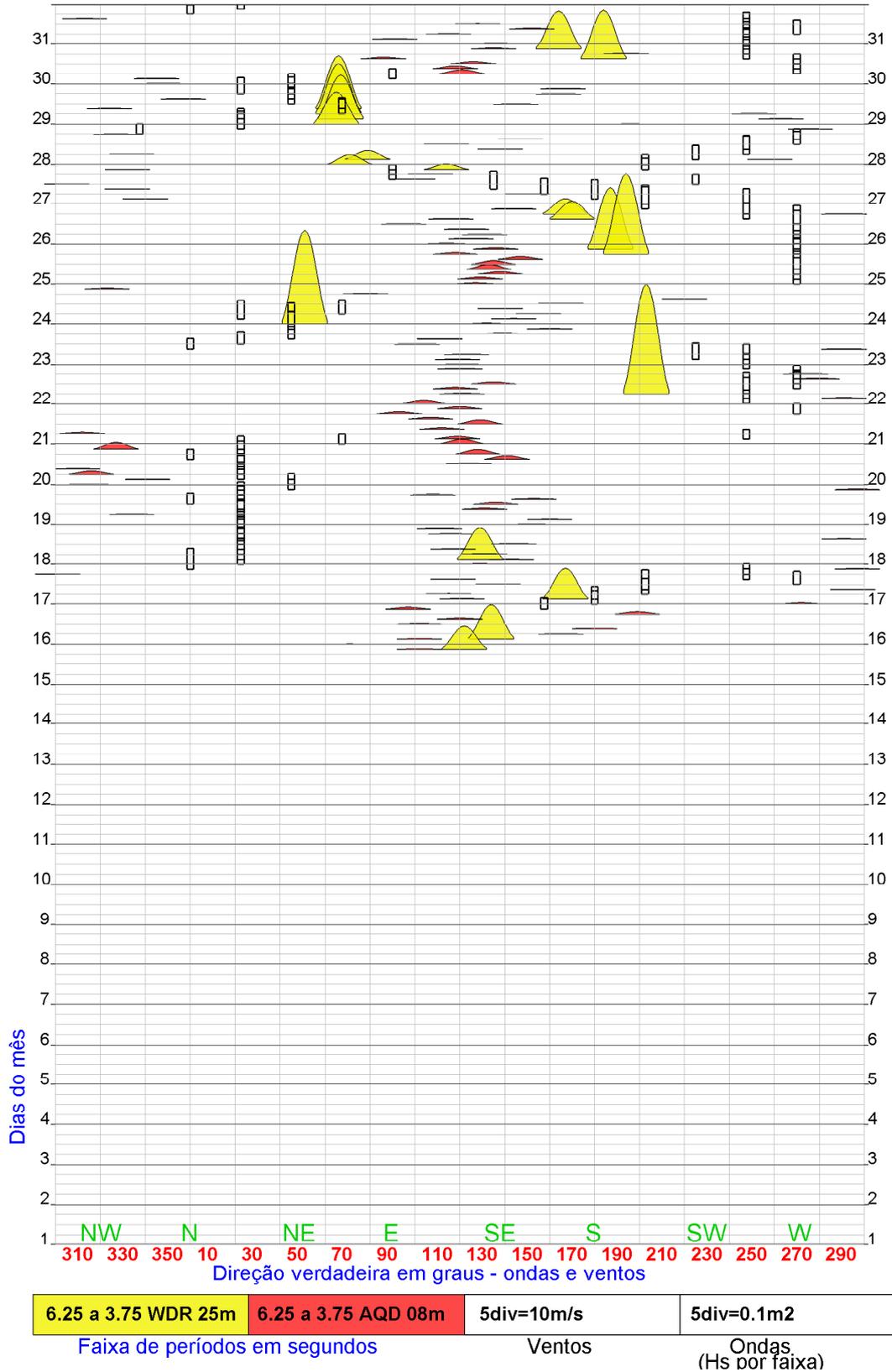


Figura 5.15: (a) Comparação do comportamento da evolução dos espectros direcionais das séries do Waverider (WDR) e do Aquadopp (AQD) para faixa 4 para o mês de maio. As cores representam os espectros dos registros de cada equipamento (Waverider em amarelo e Aquadopp em vermelho).

ESPECTRO DIRECIONAL DE ONDAS - CASSINO, RS - jun/2005

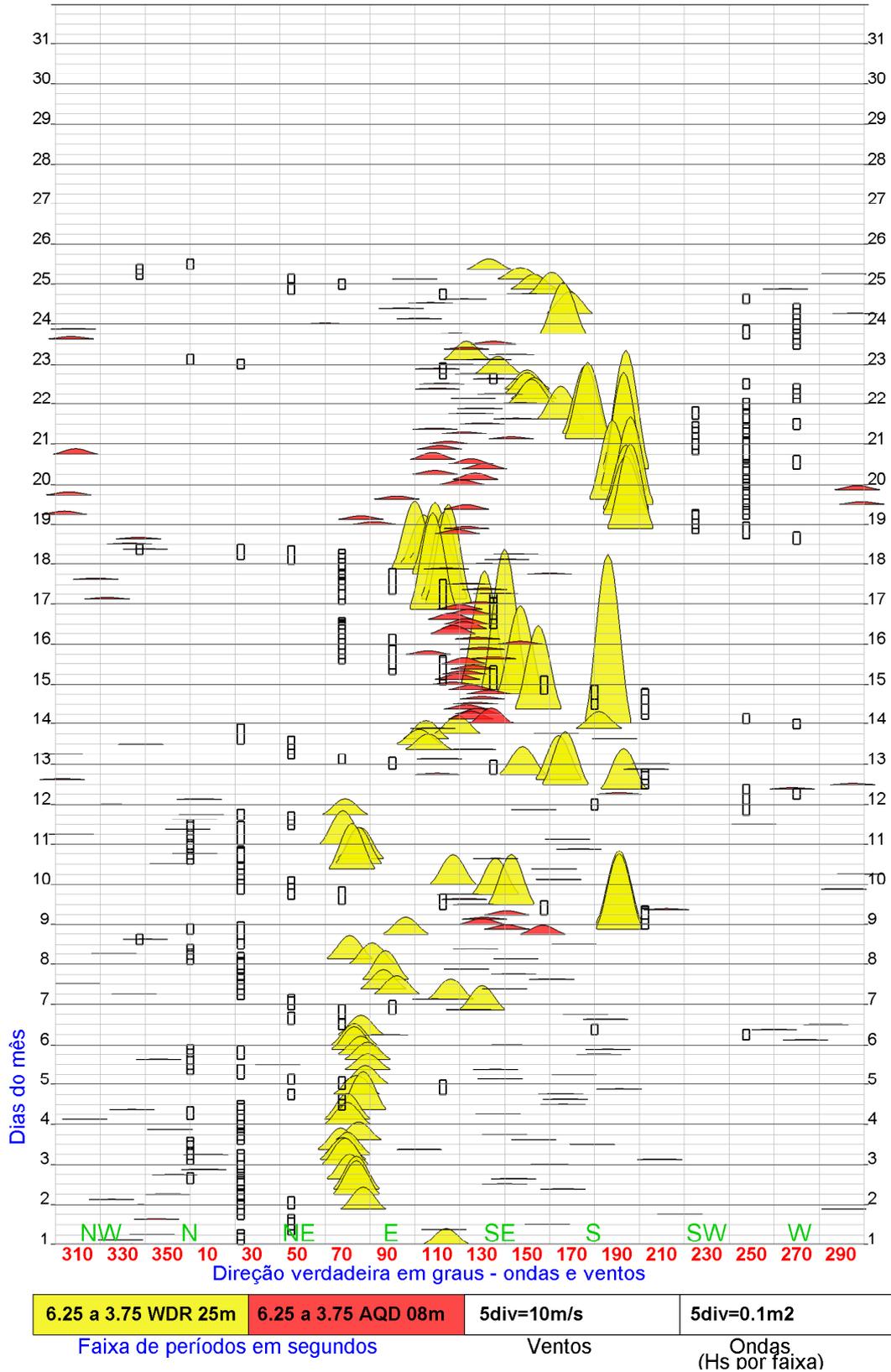


Figura 5.16: (b) Comparação do comportamento da evolução dos espectros direcionais das séries do Waverider (WDR) e do Aquadopp (AQD) para faixa 4 para o mês de junho. As cores representam os espectros dos registros de cada equipamento (Waverider em amarelo e Aquadopp em vermelho).

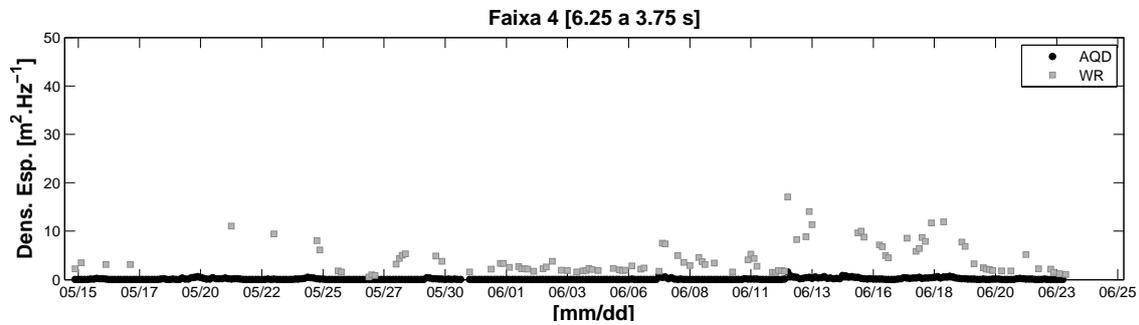


Figura 5.17: (c) Comparação da evolução temporal dos espectros de energia da faixa 4 entre o Waverider (WDR) e o Aquadopp (AQD) para a série completa.

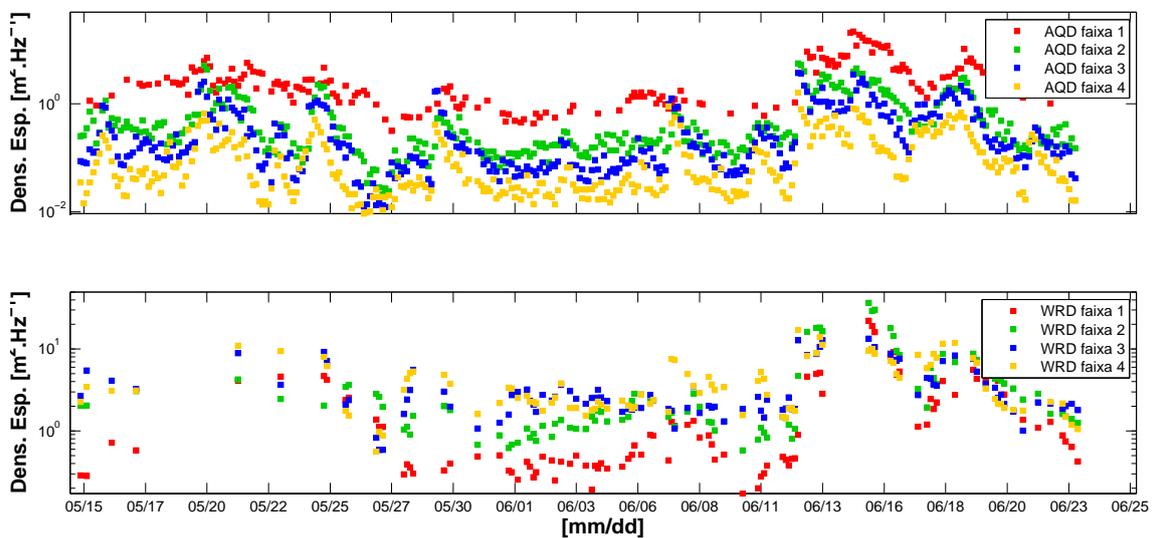


Figura 5.18: Evolução temporal dos espectros de densidade de energia para cada uma das faixas de frequências computadas pela DAAT tanto para a série do Waverider (painel inferior) quanto para a do Aquadopp (painel superior). Notar a diferença entre as escalas do eixo y dos gráficos.

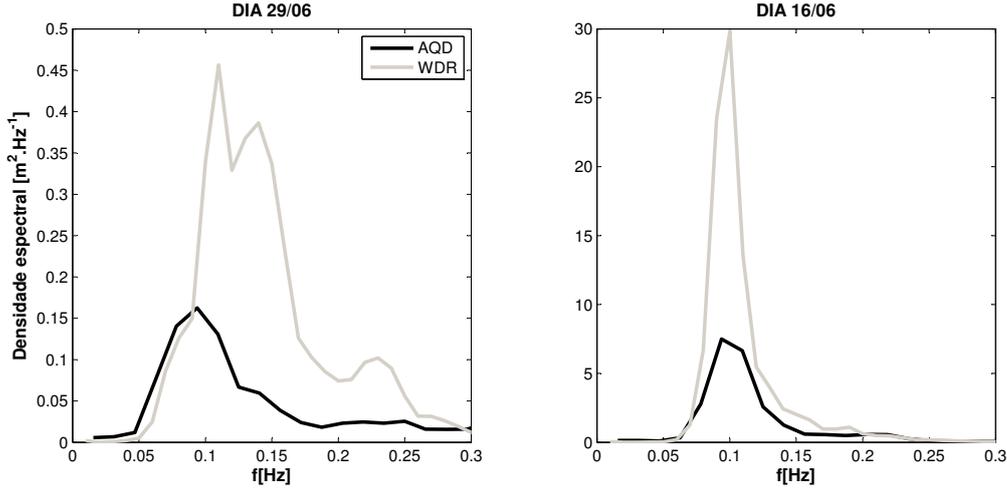


Figura 5.19: Comparação entre os espectros unidirecionais para os dias de estado de mar mais brando (29/05) e mais severo (16/06). Notar a diferença entre as escalas do eixo y dos gráficos.

neste trabalho, entre cada uma das faixas de frequência, fez-se uso da seguinte relação:

$$Hs_{wdr} = Hs_{aqd}e^{-D_s}.$$

Aqui Hs_{wdr} e Hs_{aqd} são as alturas significativas dos registros do Waverider e do Aquadopp, respectivamente, dada por $4\sqrt{E}$, no qual E significa a energia de cada faixa de frequência. D_s ($\propto k_i^1$) equivale à taxa de decaimento, que, se colocado em evidência, fica:

$$D_s = \log(Hs_{WDR}/Hs_{AQD}). \quad (5.1)$$

Os resultados, apresentados na Figura 5.20, apontam que a maior taxa de decaimento de Hs está vinculada à faixa 4, significando que as ondas com período entre 6,25 e 3,75 s experimentaram maior amortecimento de energia. Por outro lado, os valores de D_s para a faixa 1 indicam um acréscimo de energia nas ondas mais longas (18,7 a 11,3 s). O ganho de energia em baixa frequência pode ser imputado à transferência de energia entre as componentes de frequência do espectro. Em geral, a taxa de decaimento da altura da onda foi maior na faixa 4, diminuindo na sequência das demais faixas durante quase toda a série de dados.

Um exercício simulando a dissipação viscosa das ondas com o modelo proposto por GADE [19], objetivou compreender a atenuação induzida pela lama para possíveis situações encontradas durante a campanha de 2005. Para tal finalidade, foram estabelecidos diferentes valores para viscosidade cinemática ν , espessura da camada

¹Notar que $D_s \neq k_i$, uma vez que esse último advém da Equação 2.19, que é função, por exemplo da viscosidade cinemática ν e da densidade do sedimento ρ .

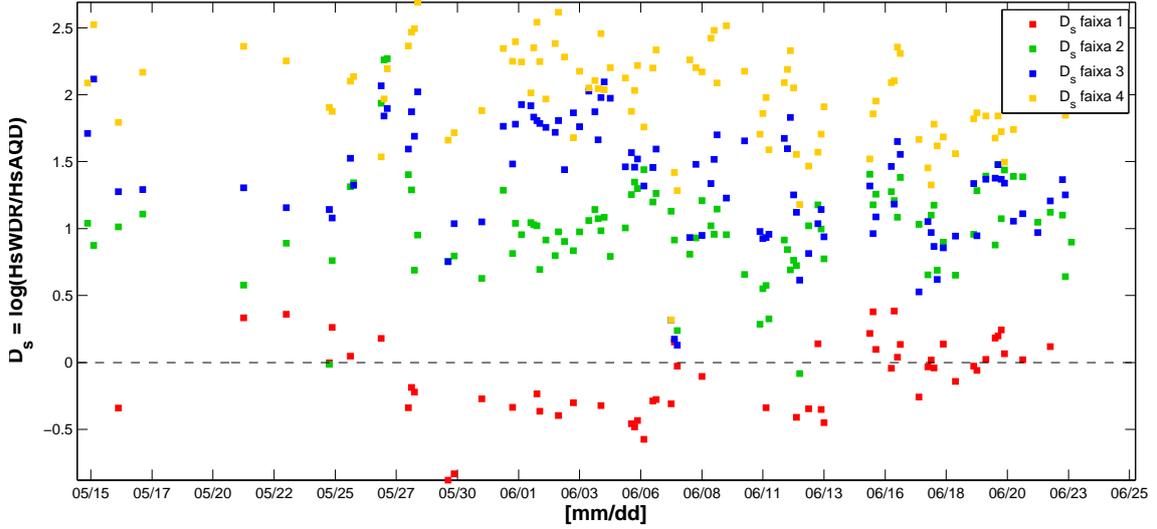


Figura 5.20: Série temporal da taxa do decaimento da altura de onda calculada pelo logaritmo da razão entre os valores de H_s do Waverider e do Aquadopp de cada banda de frequência. $H_s = \sqrt{E}$, sendo E , a densidade de energia de cada registro das faixas.

de lama H_{m0} e período das ondas T . Considerou-se uma profundidade de $8,0\text{ m}$ e a densidade da lama de 1310 g.l^{-1} , valores que coincidem com aqueles encontrados na estação aonde foi fundeado o Aquadopp, de acordo com CALLIARI *et al.* [7] e ROGERS e HOLLAND [50]. Os resultados elucidaram como ondas de diferentes períodos atenuam em função das propriedades da lama (Figura 5.21).

Por exemplo, nota-se na Figura 5.21, que o pico de atenuação acontece com as ondas de 5 s que se propagam sobre uma camada de lama de 1 m de espessura com viscosidade de $0,5\text{ m}^2.\text{s}^{-1}$. Fica claro que a atuação da dissipação viscosa é mais intensa sobre as ondas mais curtas ($T = 3$ e 5 s) em quase todo o domínio $\sqrt{\sigma/\nu}H_m$ para os diferentes cenários criados. De uma maneira geral, os resultados exprimem como pequenas alterações nas propriedades da lama influenciam no valor do número de onda k_i , o qual indica o amortecimento de energia da onda. Em face ao exposto, pode-se cogitar que, além da transferência de energia da alta para a baixa frequência do espectro, ocorre dissipação viscosa das ondas mais curtas por conta da lama fluida.

5.3 Considerações sobre os resultados obtidos com a DAAT

A divisão do espectro direcional de ondas em faixas de frequências previamente definidas pela técnica DAAT, permitiram certas inferências sobre a atenuação das ondas, considerando os diferentes estados de mar encontrados na Praia do Cassino

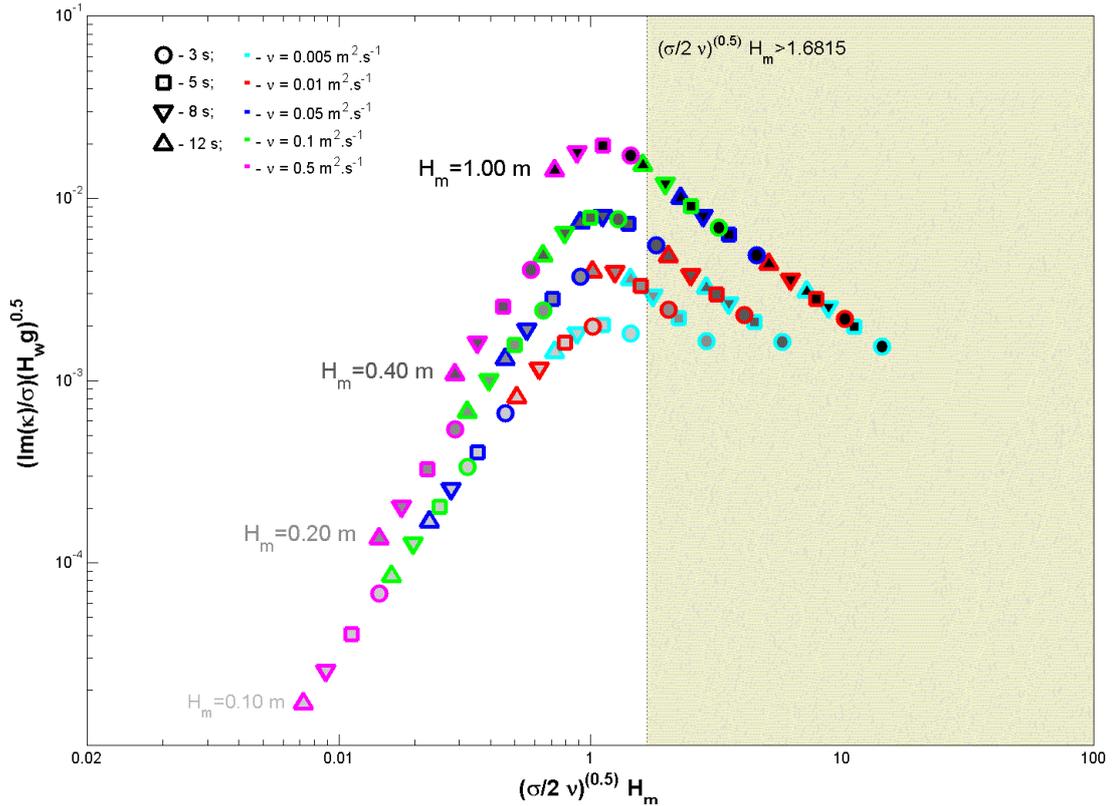


Figura 5.21: Variação do número de onda imaginário k_i (GADE [19]) para diferentes valores de ν , H_{m0} e T . A profundidade H_{w0} é de 8 m e a densidade da lama ρ_m é igual à 1310 g.l^{-1} . O eixo das abscissas é dado pelo parâmetro adimensional $\sqrt{\sigma/2\nu}H_m$ que representa a espessura da camada de lama e o eixo das ordenadas é representado pelo número de onda imaginário adimensional $(\Im(k)/\sigma\sqrt{H_m g})$. A área hachurada define o limite de aplicação do modelo.

durante as medições realizadas na campanha de 2005, conforme a seguir:

- a dissipação de energia foi mais significativa na faixa 4 ($0,16 < f \leq 0,26\text{ Hz}$) seguida da 3 ($0,12 < f \leq 0,16\text{ Hz}$) ao longo de praticamente toda a série temporal;
- durante a chegada de ondulações geradas pela presença de um anticiclone extratropical estacionário, a maior densidade de energia esteve associada à faixa 2 ($0,09 < f \leq 0,12\text{ Hz}$) com direção principal de ESE para as medições com o Waverider;
- observou-se um ganho de energia das ondas mais longas, que englobam a faixa 1 ($0,05 < f \leq 0,09\text{ Hz}$), o que confirma a hipótese de ocorrência de transferência de energia da alta para a baixa frequência do espectro;

Considerando a propagação do espectro de ondas ao longo do transecto, notou-se, na maior parte do registro, que ao atingir águas mais rasas, a energia se concentra

nas mais baixas frequências (faixa 1), diminuindo no sentido das altas frequências (faixas 2, 3 e 4) independente do estado de mar. Hipótese essa, suscitada por ELGAR e RAUBENHEIMER [15], sobre a transferência de energia para as ondas mais longas, condiz com os resultados processados pela DAAT.

Em consonância com os padrões detectados com a DAAT, o modelo de GADE [19] mostrou uma considerável dissipação das ondas em alta frequência. Na Figura 5.21 nota-se que a atenuação das ondas com diferentes períodos varia em função das propriedades do depósito de lama, no caso, a espessura e a viscosidade cinemática.

Não se observou um padrão bem definido do decaimento de energia ao longo da série temporal (Figura 5.20) para cada faixa de frequência. As taxas de decaimento das alturas significativas das ondas (Equação 5.1) calculadas para todo o domínio de frequência dos espectros unidirecionais (sendo H_s dado por $4\sqrt{f S(f)}$), apresentada na Figura 5.22, também não exibiram um comportamento bem definido em função das variações de H_s . Aventa-se como hipótese para o comportamento observado, que as propriedades do depósito, possivelmente, não se preservaram constantes durante a campanha de 2005, afetando diretamente a taxa de atenuação das ondas.

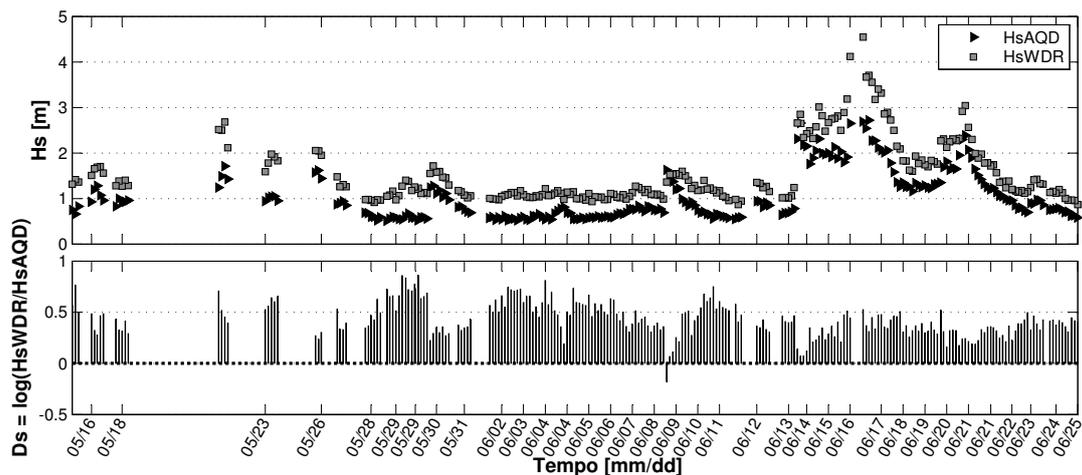


Figura 5.22: Pannel superior: série temporal de altura significativa dos dados medidos pelo Aquadopp (AQD) e pelo Waverider (WDR). Pannel inferior: taxa de dissipação D_s da altura significativa das ondas ao longo da série.

Os resultados vistos na Figura 5.22 demonstram o mecanismo de retroalimentação entre as características do depósito e a ação das ondas incidentes. Nota-se que os maiores valores de D_s estão associados às condições de agitação marítima mais brandas, entretanto, a dissipação viscosa pareceu estar atuando durante todo o período de medições.

As transformações observadas dos espectros de ondas dependem de uma série de forçantes externas associadas aos processos de geração, interação onda-onda e dissipação, os quais tendem a se intensificar na região costeira. Em águas intermediárias e rasas, a entrada de energia pelo vento ocorre comumente nas vizinhanças do pico

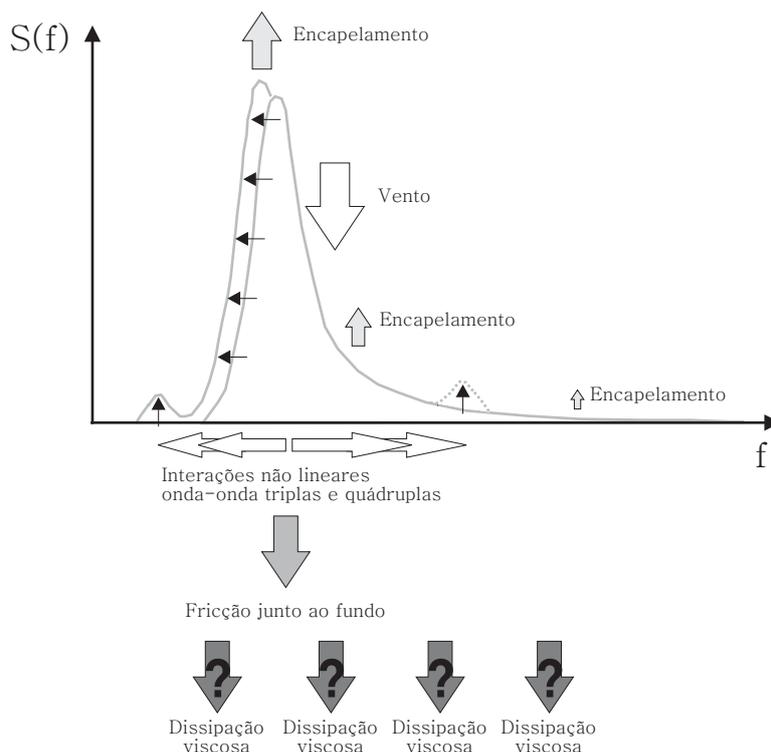


Figura 5.23: Fluxo de energia ao longo do espectro em águas rasas. Adaptado de HOLTHUIJSEN [22]. As setas hachuradas indicam a saída de energia do sistema por encapelamento, fricção e dissipação viscosa. As setas em branco significam entrada de energia pela ação dos ventos e migração de energia através das componentes de frequência mediante as interações não lineares triplas e quádruplas. As setas pretas ilustram as possíveis transformações dos espectros.

do espectro com um pequeno deslocamento para as frequências mais altas. Posteriormente, essa energia migra tanto para as baixas quanto para as altas frequências devido às interações não lineares (triplas e quádruplas), porém as ondas mais curtas podem ser dissipadas em consequência do encapelamento. Em águas relativamente mais rasas acontece a dissipação por fricção junto ao fundo (arenoso), que afeta basicamente às frequências intermediárias do espectro. O empinamento também modifica a forma do espectro, aumentando sua energia de pico e deslocando-o levemente para as frequências mais baixas. Nas frequências ainda mais baixas, a energia transferida da banda das frequências intermediárias do espectro, em virtude das interações quádruplas e triplas, é conservada e, além disso, a energia de pico sofre um deslocamento para esquerda [22]. Essas transformações são ilustradas na Figura 5.23.

As incertezas ainda existentes residem na atuação da dissipação viscosa ao longo do espectro de ondas. Como visto na Figura 5.21, a atenuação induzida pela lama fluida depende fortemente das características (dinâmicas) do depósito. Daí a dificuldade de saber a contribuição efetiva da dissipação viscosa para as diferentes frequências do espectro de densidade de energia das ondas.

As limitações relatadas, basicamente, concernem ao uso da análise PUV, que impossibilitou interpretações mais conclusiva dos resultados, principalmente, sobre a atenuação das ondas mais curtas ($T < 3,75 s$). Convém ressaltar, também, que a divisão das faixas de frequências da DAAT para a Praia do Cassino, adotou o mesmo critério de separação realizado para fins de classificação de mares, principalmente, do litoral sudeste. Neste caso, a perda de resolução em frequência inerente à DAAT, pode ter mascarado alguma feição da evolução do espectro para a divisão de faixas escolhida.

Tendo em vista a dinâmica do depósito lamítico, seriam indispensáveis informações sobre sua reologia simultaneamente ao período de medições de ondas. A escassez dessas, confinou a análise sobre a contribuição efetiva da lama fluida no amortecimento de energia das ondas. Nesse sentido, o emprego de modelos numéricos surge como uma alternativa para avaliar a participação de alguns termos dissipativos na evolução dos espectros de ondas sobre o fundo lamoso. Finalmente, baseado nos resultados conseguidos, deduz-se que a DAAT é uma robusta ferramenta para a compreensão da atenuação das ondas por banda de frequência espectral.

5.4 Modelagem numérica da dissipação viscosa

O objetivo da aplicação do modelo numérico foi mensurar a contribuição da dissipação viscosa, comparando com os principais processos responsáveis pela transformação do espectro de ondas em águas intermediárias. A atenuação das ondas induzida pela lama fluida tem sido incorporada a diversos modelos de ondas, como, mais recentemente, em WINTERWERP *et al.* [74], ROGERS e HOLLAND [50] e KRANENBURG [27]. O modelo de ondas escolhido foi uma versão modificada do SWAN (*Simulating WAves Nearshore*), que conta com o termo de dissipação de energia a partir do modelo de duas camadas de dissipação viscosa apresentado na seção 2.2.1. Detalhes sobre a implementação do termo de dissipação viscosa ($S_{m,b}$) no SWAN são apresentados no Apêndice A.

A ausência do módulo de dissipação relacionado ao fundo lamoso é frequentemente compensada pela manipulação do termo de fricção com fundo (S_{ds}), podendo gerar resultados inconsistentes. Isso ressalta a importância da implementação de um mecanismo fisicamente correto para a dissipação induzida pela lama [27]. No presente trabalho assumiu-se a premissa de que a física dos processos incorporados ao SWAN possui um nível de detalhes suficiente para simular adequadamente a propagação do espectro de ondas em uma escala da ordem de $35 km$ (distância aproximada entre as estações de medição da campanha de 2005). Informações sobre a metodologia aplicada para o emprego do SWAN no presente estudo são apresentadas no Apêndice B.

5.4.1 Simulações realizadas com o SWAN

A versão do SWAN empregada neste estudo foi testada por KRANENBURG [27], em que foram criados vários cenários teóricos para simulações em 1D. Ainda não há registros sobre a aplicação desta versão para simulações de casos reais (em duas dimensões), considerando os principais parâmetros de geração, propagação e dissipação das ondas.

ROGERS e HOLLAND [50] avaliaram o desempenho da versão anterior, proposta por WINTERWERP *et al.* [74], confrontando os resultados computados pelo SWAN com as medições da campanha de 2005. Os espectros de ondas oriundos das medições com o Waverider serviram como condição de contorno do modelo. Este trabalho adotou os mesmos parâmetros usados por ROGERS e HOLLAND [50] na configuração do SWAN no que corresponde às propriedades do depósito de lama. Foram realizadas diferentes simulações considerando separadamente alguns dos processos físicos do modelo de interesse para esta investigação com intuito de entender a participação de cada um desses termos na atenuação das ondas. Na Tabela 5.2 são apresentadas as configurações de cada simulação conduzida no presente estudo.

Tabela 5.2: Principais variáveis (des)ativadas nas diferentes rodadas com o SWAN. MUD = ativa a opção de dissipação por lama; WINDG = ativa a opção de crescimento das ondas pelo vento; QUAD = ativa as interações não lineares quádruplas; WCAP = ativa a dissipação de energia por encapselamento; TRIad = ativa as interações não lineares triplas; FRIC = ativa a opção de dissipação por atrito com o fundo.

Variáveis SWAN	S01	S02	S03	S04
MUD	✓	—	—	—
WINDG	✓	✓	✓	— ^a
QUAD	✓	✓	✓	—
WCAP	✓	✓	✓	— ^a
TRIad	✓	✓	—	✓
FRIC	—	✓	✓	✓

^a O manual do SWAN recomenda que ativação das opções WINDG e WCAP seja precedida da ativação da opção QUAD, por isso não foram consideradas em S04.

Nas simulações S01 e S02, foram comparadas as atuações dos termos S_{ds} e $S_{m,b}$ separadamente, sem alterar nenhuma outra opção de configuração. Em S03 foram desconsideradas as interações triplas (TRIad), enquanto em S04, a opção QUAD foi desativada, ignorando as interações quádruplas. Em S03 e S04 o termo $S_{m,b}$ (dissipação viscosa) foi desativado, considerando apenas a fricção junto ao fundo (FRIC). Os efeitos da refração foram ignorados por não serem o interesse central das simulações, o que reduziu consideravelmente o custo computacional. Como opção

de saída, configurou-se o SWAN para extrair os espectros de energia e de direção no ponto de grade correspondente à localização da estação aonde o Aquadopp foi instalado. O modelo computou ainda o campo de altura significativa, de direção principal e de outros dos principais parâmetros de onda.

Resultados das simulações

Os resultados das simulações, em se tratando da atuação dos termos S_{ds} (FRIC) e $S_{m,b}$ (MUD), mostraram que o efeito da dissipação viscosa sobrepuja a fricção junto ao fundo no que diz respeito ao decaimento de H_s , principalmente, para as ondas significativas com alturas maiores do que $\approx 0,6\text{ m}$ (Figura 5.24). Comparando as simulações $S03$ e $S04$ quanto ao papel das interações não lineares, os resultados computados pelo SWAN apontaram que as interações triplas têm menos influência nas variações de H_s do que as quádruplas. Ignorando qualquer fonte sistemática de erro, é plausível admitir que a ação da dissipação viscosa foi mais eficaz na atenuação da energia das ondas do que os demais processos discutidos.

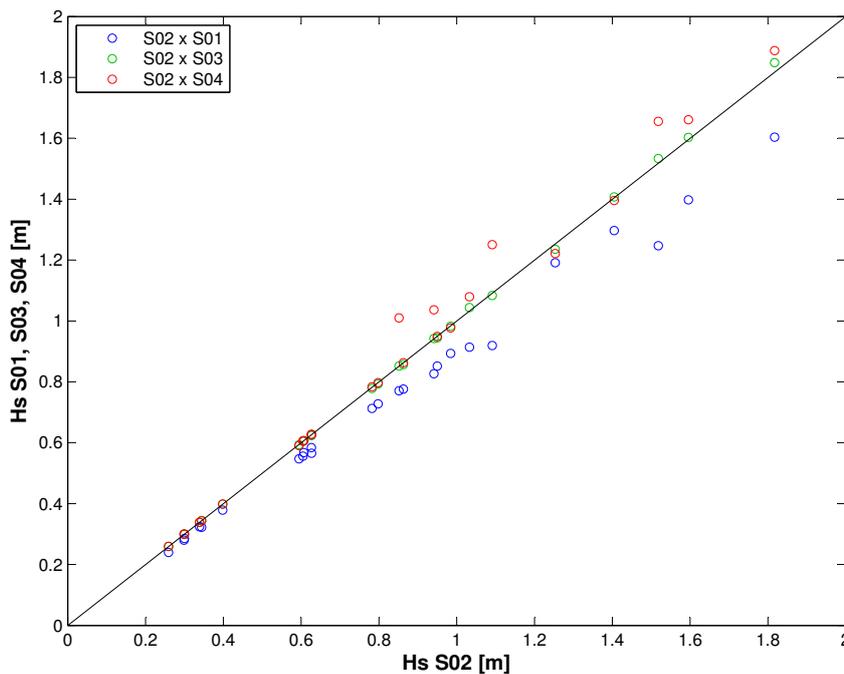


Figura 5.24: Gráfico de dispersão comparando as alturas significativas das diferentes simulações. $S02 \times S01$ compara o termo MUD contra o FRIC. $S02 \times S03$ compara o termo TRIad contra o FRIC. $S02 \times S04$ compara os termos QUAD, WINDG, WCAP contra o FRIC.

Vê-se na Figura 5.24, que as discrepâncias entre $S02$ e $S03$, e entre $S02$ e $S04$ são mais evidentes quando os valores de H_s são superiores a $0,8\text{ m}$, aproximadamente. Tal observação pode ser atribuída a intensificação das interações não lineares, conforme as ondas se aproximam de águas mais rasas, considerando que as ondas de

maior H_s estejam associadas a períodos mais longos (ou seja, menores valores da relação kH_{w0}). A inclusão do termo $S_{b,m}$ mostrou, que a dissipação viscosa tem maior influência nos valores de H_s do que o termo de fricção junto ao fundo (S_{ds}), principalmente, para ondas significativas maiores do que $0,8 m$.

O papel das interações não lineares se tornou mais pronunciado com a chegada de ondas mais longas, porém, ainda assim, são menos representativos do que o efeito da atenuação induzida pela lama. É oportuno ressaltar que as interações não lineares são responsáveis apenas por redistribuir a energia entre as componentes de frequência do espectro, não havendo ganhos ou perdas. As interações onda-onda, quando ativadas, tenderam a aumentar os valores de H_s , contudo as interações triplas não apresentaram uma contribuição significativa.

Em razão de uma perda persistente de energia pelas fronteiras do modelo, não foram permitidas inferências mais conclusivas sobre o resultados obtidos com SWAN. Em resumo, os resultados modelados permitiram conhecer a parcela da participação dos efeitos dissipativos e das interações não lineares de maneira separada, assumindo que o modelo reproduziu numericamente todos os processos físicos considerados de maneira correta. Diante dos resultados expostos, salienta-se a importância dos mecanismos de retroalimentação supracitados, os quais não são contemplados na modelagem numérica.

Capítulo 6

Estudo da atenuação das ondas por meio de dados coletados *In Situ*

Conforme exposto anteriormente, um dos principais impasses no entendimento da atenuação das ondas sobre fundos lamosos é a falta de informações simultâneas entre o regime de ondas e as principais características reológicas do depósito. Neste capítulo serão apresentados os resultados da campanha de 2008 (seção 4.3) com enfoque na variabilidade da estrutura vertical e horizontal de densidade do depósito de lama e sua relação com o amortecimento da energia das ondas.

A dinâmica da estrutura de depósitos de lama foi investigada em estudos pré-teritos. Por exemplo, WELLS e COLEMAN [72] conduziram um experimento de campo na costa Suriname no qual foram coletadas informações sobre o depósito de lama (e.g., densidade e concentração) em conjunto com dados do regime hidrodinâmico (e.g., ondas, marés e correntes). Em uma das etapas os autores mediram a densidade do depósito de lama durante 3 *h* consecutivas divididas em cinco intervalos de 20 *min* na maré enchente. Os resultados apontaram um decréscimo gradual da densidade de 1160 $g.l^{-1}$ para 1050 $g.l^{-1}$. O estudo faz ainda menção sobre uma perturbação da lama fluida em alta frequência, indicando ser resultado da passagem das ondas as quais afetaram principalmente as lamas com densidade inferiores a 1200 $g.l^{-1}$. Os resultados demonstraram como o depósito responde de modo diferenciado às forçantes hidrodinâmicas em escalas de tempo distintas, por exemplo, em função da passagem das ondas e do intervalo de maré.

TRAYKOVSKI *et al.* [62] investigaram o papel das ondas de gravidade no escoamento da lama fluida nas adjacências da desembocadura do Rio Eel na costa da Califórnia. Os autores identificaram a formação de ondas na interface água-lama fluida (lutoclina) com amplitudes na ordem da espessura do depósito. O referido

estudo não explicou o completo mecanismo para formação das ondas na lutoclina, porém encontrou coerência com as ondas superficiais. VINZON e MEHTA [66] propuseram uma equação para estimar a altura da lutoclina sob a ação (somente) das ondas e demonstraram empiricamente uma correlação com diversas variáveis, por exemplo, o período das ondas, a amplitude horizontal do movimento orbital das ondas junto ao fundo, a rugosidade do fundo, a densidade do sedimento, dentre outras.

6.1 Análise da variabilidade do perfil vertical de densidade da lama e sua influência na atenuação das ondas

Medições do perfil de densidade conduzidas durante a campanha de 2008, revelaram variações consideráveis na espessura da camada do depósito de lama dentro de um intervalo de 3 dias (Figura 6.1). Na estação #01, nas vizinhanças do depocentro, percebe-se uma notável diferença entre os perfis, que no dia 09/04 possuía uma espessura de 1,36 m cujos valores de densidade indicam uma característica mais fluida (entre 1080 e 1250 $g.l^{-1}$). No dia 11/04, vê-se uma redução da espessura da camada de lama (0,56 m) associada com um aumento da densidade ($> 1250 g.l^{-1}$).

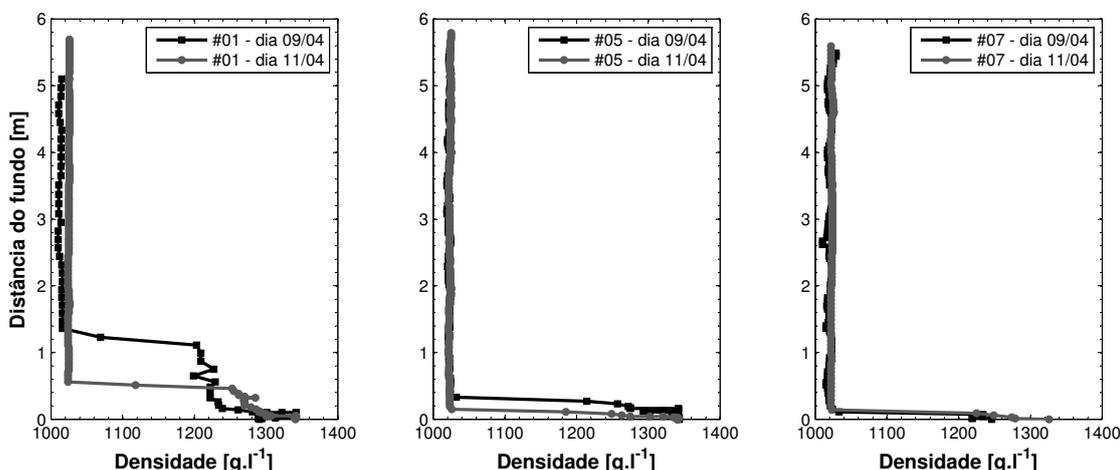


Figura 6.1: Variação do perfil de densidade do sedimento obtidos nos dias 09 (linha preta) e 11/04/2008 (linha cinza). As estações de coleta são, da esquerda para direita: #01, #05 e #07.

Na estação #05, a espessura da camada de lama também diminuiu do dia 09/04 para o dia 11/04 de 0,35 m para 0,15 m, respectivamente. Desta vez os valores de densidade comportaram-se de maneira semelhante, ao contrário da estação #01. Por fim, não se observaram variações significantes entre os perfis de densidade da

estação #07, com espessuras em torno dos 0,14m. Em se tratando dos padrões sedimentológicos da região, os resultados da análise granulométrica (Tabela 4.1) apontaram, em alguns casos, diferenças na distribuição dos sedimentos em uma mesma estação, como visto no diagrama triangular de Shepard (Figura 6.2). Uma maior concentração de areia foi encontrada entre as estações #05 e #07. Contudo, pode-se afirmar que o padrão textural compreende, basicamente, as classes argila-siltica e silte-argiloso.

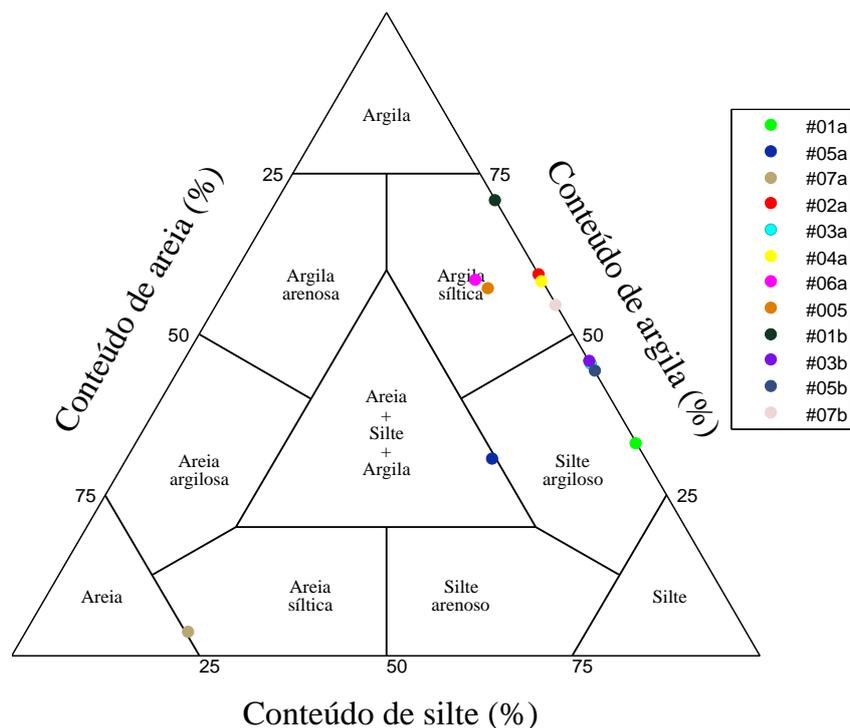


Figura 6.2: Diagrama triangular de Shepard para as amostras de sedimento coletadas durante a campanha de 2008. Notar a predominância da fração silte-argila. Na legenda são exibidas as estações. Os índices *a* e *b* representam o número de repetições em que foram coletadas amostras nas respectivas estações.

A seleção de sedimentos ao longo de um perfil de praia e o perfil submerso contíguo, até a profundidade de fechamento¹, é causado geralmente pela ação das ondas [33]. O perfil batimétrico sobreposto pelo banco de lama juntamente com os valores de H_s medidos durante a campanha de 2008 são apresentados na Figura 6.3. Na Tabela 6.1 são resumidos os valores dos parâmetro das medições realizadas em cada uma das estações, bem como a relação entre o H_s calculado na estação #10 e o H_s calculado para as estações mais rasas ($H_{s_{in}}/H_{s_{out}}$).

¹A Profundidade de fechamento pode ser definida como a profundidade na qual a ação das ondas sobre o transporte sedimentar e sobre a variabilidade topográfica do fundo marinho passa a ser insignificante.

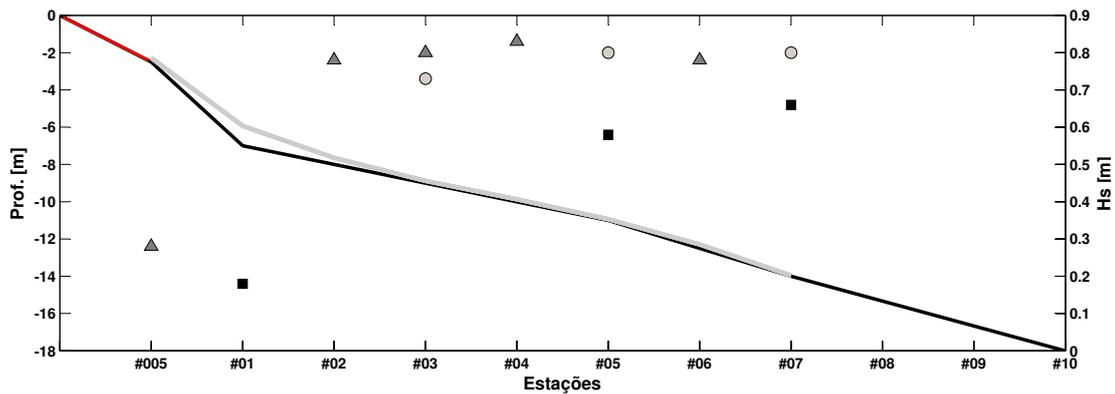


Figura 6.3: Perfil batimétrico (linha preta) sobreposto pelos valores máximos da espessura da camada de lama estimada pelo densímetro (linha cinza), juntamente com os valores de H_s medidos para cada dia de coleta. Os símbolos quadrados são referentes ao dia 09/04, os círculos ao dia 10/04 e os triângulos ao dia 11/04. A distância entre as estações é de aproximadamente $1,5\text{ km}$. O segmento de reta em vermelho indica a extrapolação do perfil e não deve ser considerado. Notar exagero vertical da figura.

Tabela 6.1: Apresentação dos resultados das medições de onda e espessura da camada de lama fluida para cada estação de coleta, bem como a relação entre os valores de H_s medidos nas estações mais rasas ($H_{s_{in}}$) com H_s medido na estação #10 ($H_{s_{out}}$).

Estação de coleta	Data da coleta	$Prof.(m)$	$H_{m0}(m)^a$	$H_s(m)$	$H_{s_{in}}/H_{s_{out}}$
#01	09/04	7	1,07	0,18	0,26
#05	09/04	11	0,10	0,58	0,85
#07	09/04	14	0,11	0,66	0,97
#005	10/04	2,5	0,21	0,28	0,30
#02	10/04	08	0,35	0,78	0,84
#03	10/04	09	0,15	0,80	0,86
#04	10/04	10	0,13	0,83	0,89
#06	10/04	12,5	0,21	0,78	0,84
#03	11/04	09	0,09	0,73	1,06
#05	11/04	11	0,03	0,80	1,16
#07	11/04	13	0,03	0,80	1,16
#10	Todas	18	—	—	—

^a Aqui é apresentada a espessura estimada da camada da lama efetivamente fluida, definida neste trabalho pelo intervalo $1080 < \rho_m \leq 1250$.

A maior espessura da camada de lama é vista sobre um ponto de quebra da declividade do perfil (Figura 6.3). É possível que essa região de mudança no gradiente do perfil submerso seja um sítio preferencial de deposição dos sedimentos que compõem depósito de lama, sendo transportada em direção à costa por advecção ou para região ao largo por fluxos gravitacionais.

A variação da altura significativa ao longo das estações do transecto experimental notória influência do banco de lama, visto a abrupta redução dos valores de H_s após a passagem do trem de ondas pela estação #01, aonde se observou a maior espessura de lama fluida (Figura 6.3). A evolução espacial dos espectros de ondas ao longo do transecto juntamente com a variação dos perfis verticais de densidade do sedimento são exibidos nas Figuras 6.4, 6.5 e 6.6 para os dias 09, 10 e 11/04, respectivamente.

A análise da evolução espacial dos espectros fundamentou-se na premissa de que não houve mudanças significativas nas propriedades estatísticas que definiam o estado de mar durante o período de medições de cada dia. Além disso, o tempo de propagação das ondas entre as estações não foi levado em conta, considerando uma condição estacionária.

Na Figura 6.4, referente aos levantamentos do dia 09/04, observa-se uma redução gradual do pico de energia dos espectros (extraídos dos registros do correntômetro - ver seção 4.3) ao mesmo tempo em que ocorre uma elevação da posição da lutocline na coluna d'água, da estação #07 rumando para #01. A espessura da camada de lama fluida aumenta de $\approx 0,10$ até $1,07\text{ m}$, quando o espectro sobre o banco de lama sofre uma acentuada atenuação, dissipando cerca de 92,7% da energia em relação ao espectro da estação #10, valores comparáveis ao encontrado por MATHEW *et al.* [30], que estudaram as transformações das ondas sobre os bancos de lama na costa oeste da Índia. Entre a estação #07 e #05, o espectro de ondas experimentou poucas transformações, cujo decaimento pouco apreciável de energia estaria atrelado a uma maior contribuição da fricção com fundo. O espectro referente à estação #01 exibe um intenso decréscimo de energia, principalmente, no intervalo de frequência entre $0,1 < f \leq 0,16\text{ Hz}$ (períodos de onda entre 10 e 6,25 s). Não se observou nenhum deslocamento significativo da frequência de pico do espectro ao longo do transecto, variando entre 0,10 e 0,11 Hz.

Nos levantamentos realizados no dia 10/04, foi possível verificar que a forma do espectro de ondas tende a se estreitar, com um perceptível alisamento nas frequências mais altas, de acordo com a análise apresentada no Capítulo 5. Ao mesmo tempo, notou-se um ganho de energia nos arredores da frequência de pico, principalmente, entre as estações #06 e #03, que distam entre si 4,5 km (Figura 6.5). Esse comportamento se deve às transformações dos espectros de ondas ao atingir águas cada vez mais rasas (Figura 5.23). Neste caso, pressupõe-se que seja resultado do empinamento.

A camada de lama fluida começa com uma espessura de 0,21 m na estação #06, sofre uma ligeira diminuição para 0,13 m na estação #04 e torna a aumentar até a estação #02, chegando à 0,35 m. A atenuação efetiva das ondas só é vista a partir da estação #02, na qual o espectro reduz em 28,8% a energia em comparação com o espectro de ondas da estação #10. Após $\approx 3,0\text{ km}$, na estação #005, localizada no

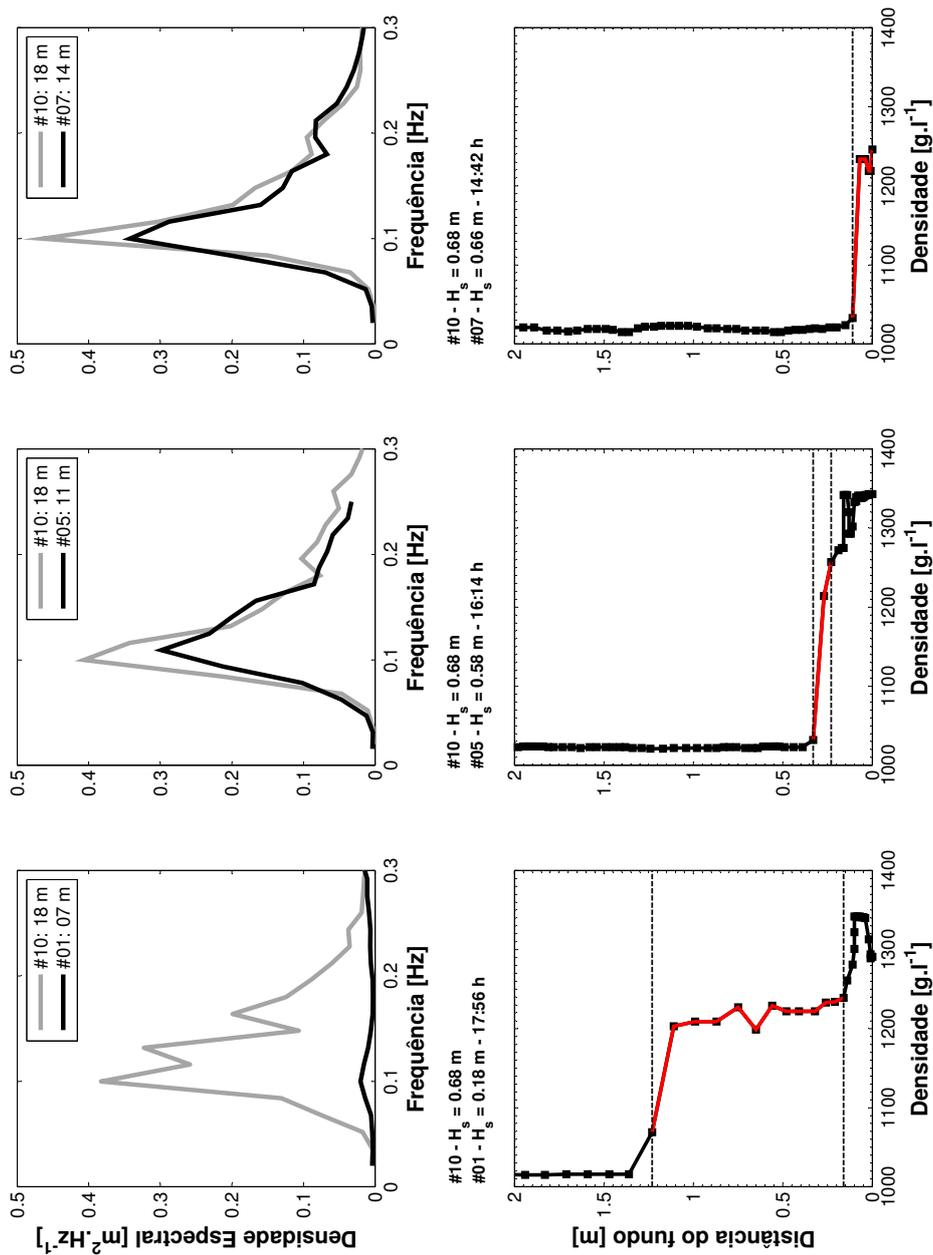


Figura 6.4: Painel superior: comparação dos espectros de densidade de energia extraídos das medições de ondas com AWAC (#10) e com Vector (#01, #05 e #07) para o dia 09/04. Painel inferior: perfil vertical de densidade do sedimento obtidos em concomitância com as medições de ondas nas estações #01, #05 e #07. A faixa de lama fluida é indicada pela linha vermelha. As estações de coleta são, da esquerda para direita: #01, #05 e #07. São apresentados os valores de H_s e os horários das medições.

ponto de maior gradiente horizontal do perfil, a energia das ondas já é dissipada em 90,7%, sendo observada uma expressiva redução da densidade de energia ao longo de quase todo o espectro ($0,07 < f < 0,21 \text{ Hz}$). Embasado nesses resultados, vê-se que o máximo amortecimento da energia ocorre quando da passagem das ondas pelo sítio preferencial de deposição identificado durante as medições, posicionado entre

as estações #02 e #005. O aumento do valor de H_s da estação #06 para a #04, apresenta relação com a diminuição da espessura da camada de lama fluida, indicando que outros processos de transformação das ondas prevalecem em detrimento da dissipação viscosa. O efeito do empinamento, pela diminuição da profundidade, deixa de existir a partir do momento em que a atenuação induzida pela lama fluida passa a ser dominante e, então, a altura das ondas decresce continuamente.

As medições do dia 11/04 revelaram uma situação mais típica de fundos com maior grau de compactação em relação aos dias anteriores (Figura 6.6). Tal hipótese pode ser justificada pelos perfis de densidade do depósito, que mostraram a quase ausência da lama efetivamente fluida. Defronte desse cenário, é razoável cogitar que a lama fluida pode ter migrado para próximo da costa, pela ação das ondas, ou dispersou (no sentido norte/sul) em função das correntes de fundo.

No tocante aos espectros de ondas, vê-se um ganho de energia de até 32% entre os espectros da estação #07 e #10, o qual é atribuído ao aumento da atuação do vento local (fonte de entrada de energia), conforme observação visual em campo. Um pico secundário menos energético visto em frequências mais altas ($0,17\text{ Hz}$) do espectro, corrobora com esta hipótese. Notou-se uma leve alteração na forma do espectro correspondente às medições na estação #05, contudo, a densidade de energia pareceu ser preservada em relação à estação #07, afastada $3,0\text{ km}$ ao longo do transecto. Na estação #03, o espectro possui um acréscimo de 9% de densidade de energia em oposição ao espectro da estação #10. Em comparação com a estação #05, houve uma perda de energia de 25%, denotando uma maior contribuição dos efeitos da dissipação, provavelmente, com maior participação da fricção. MATHEW *et al.* [30] encontraram uma taxa de perda de energia abaixo de 25% na maioria dos casos, durante os períodos de ausência do banco de lama.

Muito embora a camada de lama (fluida e compactada) na estação #03 seja relativamente espessa ($> 0,50\text{ m}$), os resultados apontaram que a dissipação viscosa foi pouco efetiva. Tal fato demonstra que a espessura da camada de lama exclusivamente fluida ($1080 < \rho_m \leq 1250\text{ g.l}^{-1}$), que na estação #03 era de somente $0,09\text{ m}$, possui importância capital na atenuação das ondas induzida pela lama. É válido ressaltar que a estação #03 está localizada ao largo do depocentro do depósito, zona de máximo amortecimento de energia das ondas.

Nos espectros da Figura 6.6 também é possível observar um alisamento nas altas frequências dos espectros das estações mais rasas, entretanto, essa suavização é acompanhada pela evolução do espectro da estação #10, o que pode indicar uma alteração do estado de mar. Cabe lembrar que a estação #10 está localizada a 18 m de profundidade, aonde as principais transformações que as ondas sofrem em águas intermediárias e rasas já se manifestam, além da atuação da transferência de energia entre as componentes de frequência.

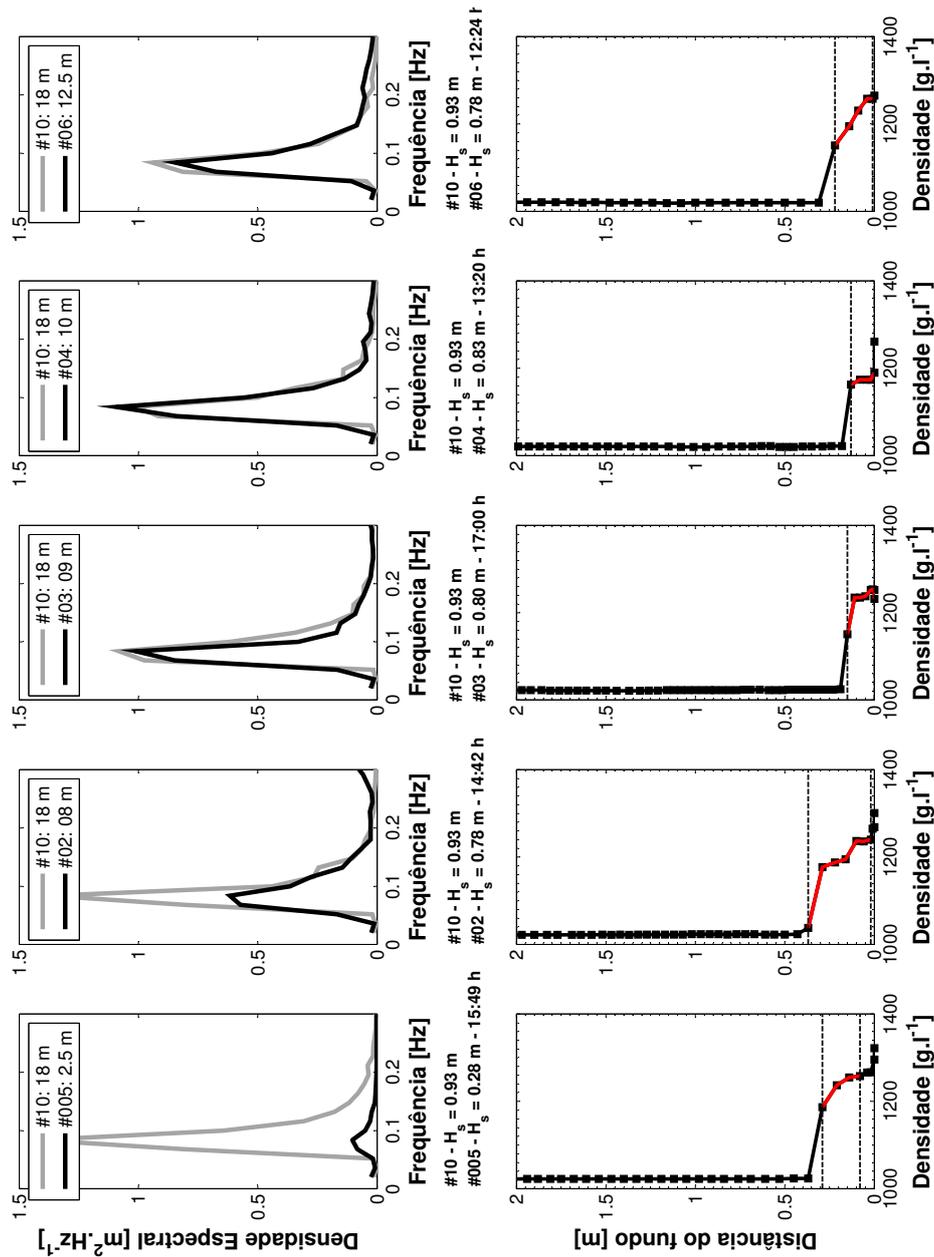


Figura 6.5: Pannel superior: comparação dos espectros de densidade de energia extraídos das medições de ondas com AWAC (#10) e com Vector (#005, #02, #03, #04 e #06) para o dia 10/04. Pannel inferior: perfil vertical de densidade do sedimento obtidos em concomitância com as medições de ondas nas estações #005, #02, #03, #04 e #06. A faixa de lama fluida é indicada pela linha vermelha. As estações de coleta são, da esquerda para direita: #005, #02, #03, #04 e #06. São apresentados os valores de H_s e os horários das medições.

6.2 Considerações Finais

O aspecto conspícuo do espectro de densidade de energia completamente atenuado apresentou estreita relação com a espessura da camada de lama fluida, definida neste trabalho no intervalo de 1080 a 1250 g.l⁻¹. A dissipação viscosa efetiva ocorreu durante a passagem das ondas sobre o sítio preferencial de acúmulo de lama fluida,

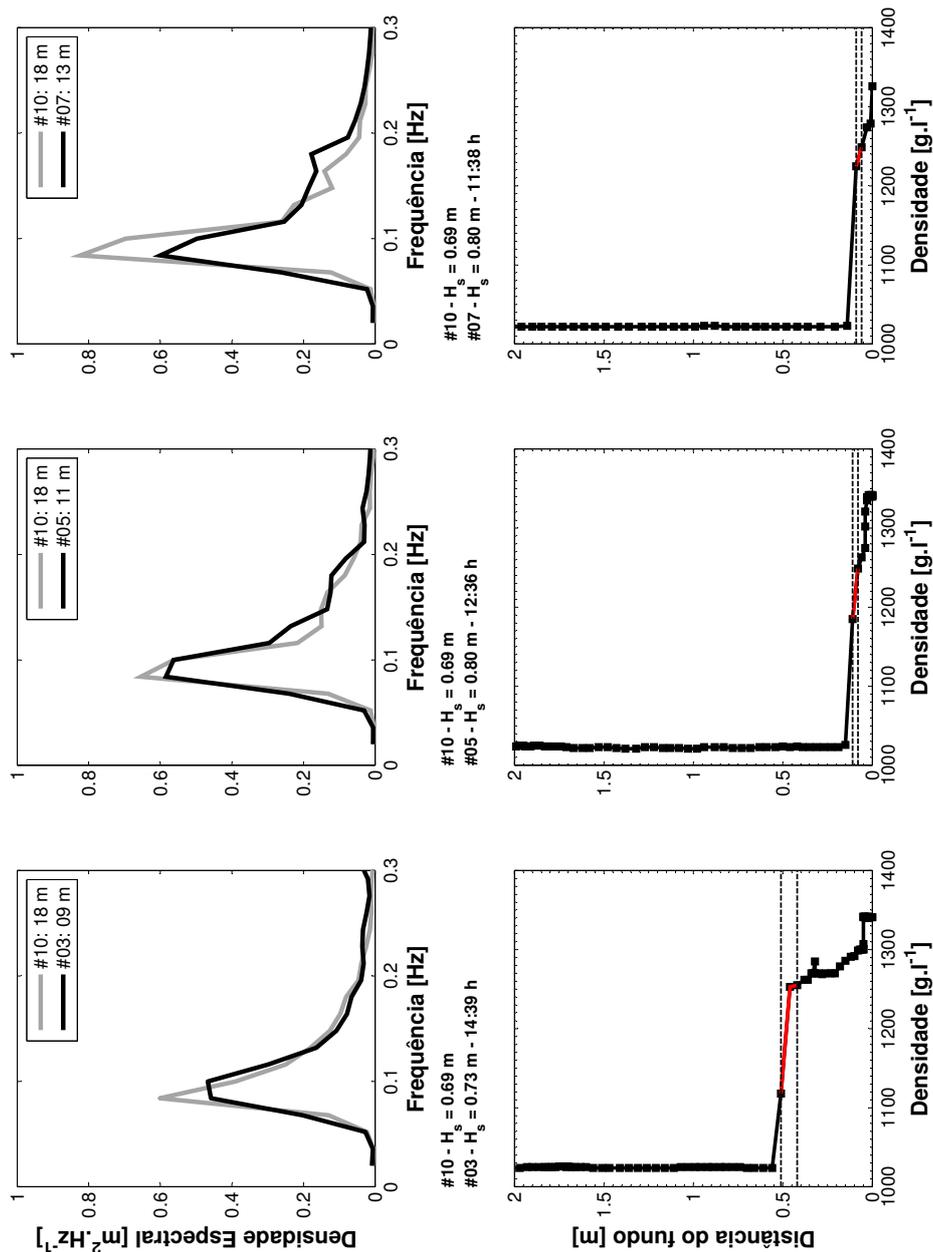


Figura 6.6: Painel superior: comparação dos espectros de densidade de energia extraídos das medições de ondas com AWAC (#10) e com Vector (#03, #05 e #07) para o dia 11/04. Painel inferior: perfil vertical de densidade do sedimento obtidos em concomitância com as medições de ondas nas estações #03, #05 e #07. A faixa de lama fluida é indicada pela linha vermelha. As estações de coleta são, da esquerda para direita: #03, #05 e #07. São apresentados os valores de H_s e os horários das medições.

com cerca de 3,0 km de extensão (entre a estação #02 e #005). Cogita-se que o máximo de amortecimento de energia ocorra na estação #01, aonde foi mapeada a maior espessura de lama fluida (1,07 m), contudo os efeitos da dissipação viscosa passam a sobrepujar os demais processos dissipativos a partir da estação #02.

Deve-se ressaltar, que o depósito é altamente dinâmico e que as feições observadas

durante o mapeamento efetuado no presente estudo são efêmeras e dependem das condições locais de hidrodinâmica. As mudanças nas características do depósito têm implicações direta na atenuação das ondas induzida pela lama fluida.

WELLS e COLEMAN [72] reportaram um alargamento do espectro com surgimento de picos secundários de energia quando as ondas se propagavam sobre o fundo lamoso em águas rasas ($H_{w0}/L < 0,05$). Os autores relacionaram essa forma a um espectro de ondas solitárias, demonstrando que as ondas, ao atravessarem o fundo lamoso, se comportariam como tal. Ao contrário, o presente estudo revelou que, de uma forma geral, os espectros tenderam a se tornar mais estreitos nas proximidades da frequência de pico, conforme as ondas se aproximavam de águas mais rasas (porém, intermediárias). Em verdade, as ondas mesmo na estação mais rasa (#005) apresentaram uma relação H_{w0}/L maior do que 0,05. As oscilações de pressão em torno do nível médio referentes às medições na estação #005 apresentaram aparência de um perfil de ondas senoidais, eliminando a possibilidade da formação de ondas solitárias sobre o banco de lama (Figura 6.7). Situações como esta poderiam acontecer quando da migração do banco de lama para a zona de surfe da Praia do Cassino em profundidades menores do que 1,5 m (e.g., ver Figura 3.6(a)).

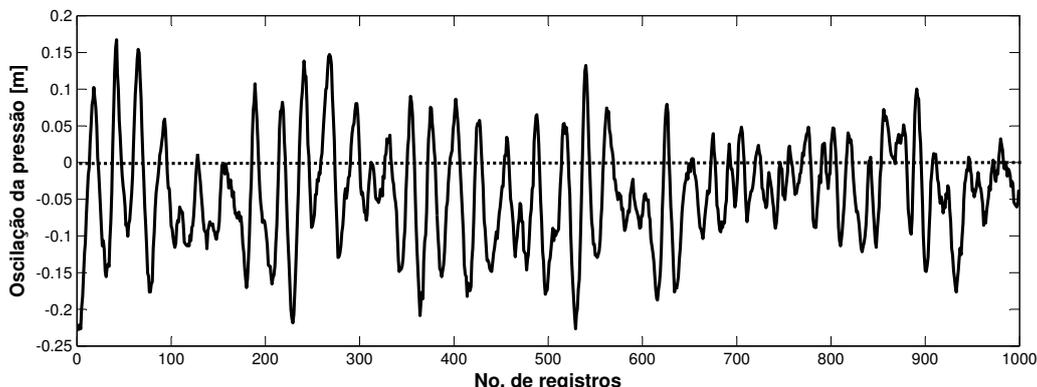


Figura 6.7: Segmento da série temporal do registro de pressão medido na estação #005 no dia 10/04.

A suavização dos espectros em altas frequências se deve a ação conjunta de vários processos. As ondas curtas o suficiente para não interagir com fundo podem ser dissipadas pela transferência de energia da alta para baixa frequência (interações não lineares) ou mesmo pelo encapelamento (não observado em campo). Neste estudo, a técnica PUV (seção 4.1) limitou a análise das ondas mais curtas do que 3,33 s (0,30 Hz). A Teoria Linear mostra que essas ondas já começam a interagir (levemente) com o fundo a partir de cerca de 15 m de profundidade, demonstrando que os efeitos da dissipação viscosa e da fricção tiveram importante contribuição no alisamento nas frequências maiores dos espectros obtidos das medições com o

correntômetro.

De uma forma geral, pode-se inferir que, não só a espessura da camada de lama fluida, como também sua extensão, sejam responsáveis pelo grau de dissipação viscosa. Com base nos resultados, acredita-se que um depósito com extensão de pelo menos uma ordem de grandeza superior ao comprimento das ondas e com espessura da camada de lama fluida maior do que $0,20\text{ m}$, possa dissipar cerca de 90% da energia das ondas de acordo com os estados de mar encontrados durante as medições. Nas situações em que a camada de lama fluida era inferior ao valor supracitado, outros processos dissipativos, por exemplo, a fricção junto ao fundo, foram aparentemente dominantes, porém menos efetivos no amortecimento de energia das ondas.

A redução da espessura da camada de lama fluida mostrou relação com um ligeiro aumento dos valores de H_s (Figura 6.5). KRANENBURG [27] verificou, por meio de modelagem numérica, o efeito do empinamento reversível (*reversible shoaling*), em que as alturas significativa das ondas tornaram a aumentar em virtude da diminuição da espessura da camada de lama ao longo do domínio computacional.

Capítulo 7

Considerações Finais

7.1 Sumário e conclusões

Este trabalho buscou elementos para explicar a atenuação das ondas sobre fundos lamosos. Para tanto, utilizou-se um conjunto de dados que contemplava, basicamente, medições de ondas e levantamentos sobre a estrutura de densidade do depósito de lama. Ainda foram utilizados os recursos da modelagem computacional com o SWAN e do modelo analítico derivado por GADE [19]. A série de dados de ondas coletados durante a campanha oceanográfica de 2005 serviu para investigar a dissipação da energia das ondas por bandas de frequência, enquanto os dados levantados durante os cruzeiros oceanográficos de 2007 e 2008 permitiram compreender as variações do perfil de densidade da lama e suas implicações nas transformações sofridas pelos espectros de ondas em águas intermediárias.

Com auxílio da técnica DAAT pôde-se observar que a maior taxa de decaimento de energia ocorreu com as ondas com períodos compreendidos entre 6,25 e 3,75 s ($0,16 < f \leq 0,26 \text{ Hz}$). Confirmou-se um ganho de energia das ondas mais longas, com períodos no intervalo de 18,7 a 11,3 s ($0,05 < f \leq 0,09 \text{ Hz}$), o que comprovou a transferência de energia para as frequências mais baixas do espectro. Em suma, viu-se que o mar local (representado pelas ondas mais curtas da faixa 4) sofreu maior atenuação de energia, porém não foi identificado um padrão de atenuação das ondas em função da agitação marítima.

Pelo emprego da modelagem computacional com o SWAN, mostrou-se que a atenuação das ondas em alta frequência é governada pela dissipação viscosa. A diferença entre a contribuição da fricção e da dissipação viscosa tende a ser maior com o aumento da altura significativa das ondas. As interações não lineares foram pouco representativas em oposição aos demais processos investigados. Estas, provavelmente, se intensificam em águas ainda mais rasas ($kH_{w0} \approx 1$) do que a profundidade aonde foi fundeado o Aquadopp ($kH_{w0} \gtrsim 1$). No entanto, as interações quádruplas foram

mais relevantes do que as triplas, principalmente, quando $Hs > 1 m$. Vale lembrar que, apenas as ondas com frequências entre 0,05 e 0,30 Hz foram consideradas no processamento dos dados de ondas, excluindo a análise daquelas ondas curtas o suficiente para não interagir com o fundo.

Os resultados obtidos com o modelo analítico apontaram que a atenuação das ondas de diferentes períodos é fortemente dependente das propriedades do depósito de lama, as quais são altamente variáveis. Tais observações foram confirmadas pelos perfis de densidade do sedimento cuja espessura da camada de lama sofreu consideráveis variações, afetando diretamente o grau de amortecimento da energia das ondas. O modelo de GADE [19] ainda previu a dissipação viscosa de ondas curtas (3 e 5 s) em conformidade com o obtido com a técnica DAAT.

As medições simultâneas de ondas em concomitância com levantamentos da estrutura vertical do depósito permitiram verificar a dinâmica espacial do banco de lama e sua relação de retroalimentação com o regime hidrodinâmico. CALLIARI e FACHIN [5] observaram que as maiores espessuras de lama superficial localizavam-se entre as isóbatas de 14 e 20 m com espessuras de até 0,80 m. Mapeamentos mais recentes identificaram a presença de lama nas formas fluida e compactada entre 6 e 20 m de profundidade com espessuras variando da ordem de dm até 2 m [7]. O presente estudo encontrou oscilações diárias da altura da lutoclina de até 0,56 m entre 7 e 14 m de profundidade. Essas diferenças demonstram as variabilidades espacial (horizontal e vertical) e temporal dos limites do depósito, que dependem da ação mútua entre o suprimento de lama e as taxas de erosão e de deposição dos sedimentos finos, as quais são função da hidrodinâmica costeira.

A passagem do trem de ondas pelas vizinhanças do depocentro (entre as estações #02 e #005) foi responsável por uma dramática redução da energia do espectro de ondas ($> 90\%$). Tanto a espessura da camada de lama fluida (definida entre 1080 e 1250 $g.l^{-1}$) quanto a extensão do depósito tiveram relação direta com o amortecimento de energia das ondas. De forma geral, a dissipação viscosa foi efetiva quando a espessura de lama fluida ultrapassou 0,20 m. Durante a evolução dos espectros de densidade de energia ao longo do transecto, foram identificadas algumas feições as quais foram atribuídas aos efeitos do empinamento e às interações não lineares. Tal qual visto anteriormente, estes processos tiveram contribuição secundária nas transformações dos espectros, prevalecendo a fricção junto ao fundo e, mais ainda, a dissipação viscosa. S. Elgar (comunicação pessoal) comentou que as interações não lineares tornam-se importantes em profundidades menores do que 5 – 6 m, fazendo alusão aos resultados das medições da campanha de 2008.

A interação das ondas superficiais com o banco de lama também promovem outros efeitos típicos de águas intermediárias e rasas. KAIHATU *et al.* [26] chamam a atenção para o efeito da difração das ondas quando atravessam o fundo lamoso.

Os autores, porém, trabalharam com modelos numéricos, em que foram criadas situações teóricas considerando ondas monocromáticas. Em situações reais, com ondas irregulares de cristas curtas (maior espalhamento direcional), a difração pode ser menos relevante. A diminuição da velocidade de fase do trem de ondas ao se propagar sobre o depósito lamítico faria com que os efeitos da refração viessem a ser relativamente mais notáveis, não fosse a brusca atenuação de energia por conta da dissipação viscosa, tornando a atuação da refração menos importante.

Com respaldo nesses resultados, é de importância capital alertar que as conclusões ora apresentadas são baseadas em um cenário que exprime sazonalidade sob o ponto de vista da hidrodinâmica costeira e da dinâmica dos sedimentos coesivos que compõem os depósitos da região em estudo. Os levantamentos da campanha de 2008 exibiram uma notória variação do perfil de densidade de lama fluida do depósito na escala de dias, denotando a característica transiente das propriedades do depósito. Muito provavelmente, o mesmo ocorreu durante a campanha de 2005, principalmente, com a entrada da ressaca.

A adoção de uma estratégia amostral adequada para o estudo da atenuação das ondas sobre fundos lamosos requer medições simultâneas sobre o regime hidrodinâmico e as características do depósito de lama. A localização espacial das estações ao longo de um transecto transversal à linha de costa, se mostrou eficiente de maneira que as estações mais profundas estavam localizadas sobre um ambiente sedimentar compactado e os pontos em águas mais rasas cruzavam o depósito de lama fluida. Obviamente, que a inclusão de uma estação controle, em águas mais rasas, sobre um fundo predominantemente arenoso traria informações mais precisas sobre o papel da fricção junto ao fundo. As instalações dos instrumentos sobre o substrato lamoso deve ser cuidadosamente planejada diante dos riscos de perda ou mesmo tombamento das estruturas de suporte dos equipamentos.

7.2 Recomendações para trabalhos futuros

De modo a complementar a presente investigação, sugere-se a aplicação do SWAN em 1D usando como entrada os dados medidos durante a campanha de 2008. As simulações no modo não estacionário permitiriam resultados mais realísticos sobre a evolução dos espectros de ondas. As simulações em 1D evitariam o efeito indesejável dos ruídos próximos às fronteiras do domínio computacional. O acoplamento entre o modelo de ondas com um modelo reológico, que incorpore as transformações do depósito de lama em função da hidrodinâmica, forneceria subsídios para o entendimento dos mecanismos de retroalimentação entre a interação das ondas incidentes com o banco de lama.

Sendo viável, recomendam-se novos levantamentos de campo adotando a mesma

estratégia, porém com aumento da resolução espacial entre as estações. Ainda, a inclusão de estações em águas mais rasas, forneceria informações sobre o papel das interações não lineares. Medições de correntes junto ao fundo também auxiliariam no entendimento da dinâmica do depósito. O uso do densímetro é indispensável para os estudos da estrutura vertical de densidade do depósito. Medições sistemáticas auxiliariam no entendimento da sazonalidade do depósito, integrando informações sobre a vazão da Laguna dos Patos e a taxa de exportação de sedimentos.

Referências Bibliográficas

- [1] BARREIRA, L. M., 2008, *Aplicação da DAAT (Data Analysis with Adaptive Technique) na determinação do espectro direcional de ondas com dados de ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler)*. Proposta de tese, Junho.
- [2] BISHOP, C. T., DONELAN, M. A., 1987, “Measuring waves with pressure transducer”, *Coastal Engineering*, v. 11, pp. 309–328.
- [3] CALLIARI, J. L., FARIA, A. F. G., 2003, “Bancos de lama na praia do Cassino: formação, implicações geomorfológicas, ambientais e riscos costeiros. Estudo de caso: maio de 2003”. In: *IX Congresso da Associação Brasileira de Estudos do Quaternário - IX ABEQUA*, pp. 1–5.
- [4] CALLIARI, L. J., 2009, *Considerações sobre as dragagens no Porto do Rio Grande: aspectos relativos ao lançamento de sedimentos finos na parte subaquosa do estuário e a deposição de lama na praia do Cassino*. Relatório técnico, Universidade Federal do Rio Grande - FURG.
- [5] CALLIARI, L. J., FACHIN, S., 1993, “Laguna dos Patos. Influência nos Depósitos Lamíticos Costeiros”, *Pesquisas*, v. 1, n. 20, pp. 57–69.
- [6] CALLIARI, L. J., SPERANSKI, N. S., TORRONTÉGUY, M., et al., 2000, “The mud banks of Cassino Beach, southern Brazil: characteristics, processes and effects”, *Journal of Coastal Research*, pp. 1–9. ICS 2000 Proceedings.
- [7] CALLIARI, L. J., WINTERWERP, J. C., FERNANDES, E., et al., 2008, “Fine grain sediment transport and deposition in the Patos Lagoon-Cassino beach sedimentary system”, *Continental Shelf Research*, p. 15. 10.1016/j.csr.2008.09.019.
- [8] CAMARGO, M. G., 2006, “Sysgran: um sistema de código aberto para análises granulométricas”, *Revista Brasileira de Geofísica*, v. 2, n. 36, pp. 371–378.
- [9] COLI, A. B., 2000, *Estudo do clima de ondas em Rio Grande, RS*. Tese de Mestrado, Fundação Universidade do Rio Grande - FURG. 76 pp.

- [10] DARLRYMPLE, R. A., LIU, P. L.-F., 1978, “Waves over soft muds: a two-layer fluid model”, *Journal of Physical Oceanography*, v. 8 (November), pp. 1121–1131.
- [11] DATAWELL BV, 2010, *Monitoring Software W@ves21*. Datawell bv - Laboratory for Instrumentation, . Disponível em: <http://www.datawell.nl>.
- [12] DATAWELL BV, 2010, *Directional Waverider Mark II*. Datawell bv - Laboratory for Instrumentation, . Disponível em: <http://www.datawell.nl>.
- [13] DE WIT, P. J., 1995, *Liquefaction of cohesive sediments caused by waves*. Tese de Mestrado, Delft University of Technology. 194 pp.
- [14] DIAS, C. R. R., ALVES, M. L., 2008, “Geotechnical properties of Cassino Beach mud”, *Continental Shelf Research*, p. 4. 10.1016/j.csr.2008.09.015.
- [15] ELGAR, S., RAUBENHEIMER, B., 2008, “Wave dissipation by muddy seafloors”, *Geophysical Research Letters*, v. 35, pp. 1–5.
- [16] FOLK, R. L., 1974, *Petrology of sedimentary rocks*. Hemphill Publishing Company.
- [17] FORTES, M. D., 2002, “Muddy Coasts of the World: Processes, Deposits and Function”. cap. 8: Natural biological processes and control, Elsevier. 229–244.
- [18] FROIDFROND, J. M., PUJOS, M., ANDRE, X., 1988, “Migration of mud banks and changing coastline in French Guiana”, *Marine Geology*, v. 84, pp. 19–30.
- [19] GADE, H. G., 1958, “Effects of a nonrigid, impermeable bottom on plane surface waves in shallow water”, *Journal of Marine Research*, v. 16, n. 2, pp. 61–85.
- [20] GRANGER, R. A., 1995, *Fluid mechanics*. Second ed. , Dover publication, inc.
- [21] HOLLAND, K. T., VINZON, S. B., CALLIARI, L. J., 2009, “A field study of coastal dynamics on muddy coast offshore of Cassino Beach, Brazil”, *Continental Shelf Research*, v. 29, pp. 503–514.
- [22] HOLTHUIJSEN, L. H., 2007, *Waves in oceanic and coastal waters*. Cambridge University Press.
- [23] HSIAO, S. V., SHEMDIN, O. H., 1980, “Interaction of ocean waves with soft bottom”, *Journal of American Meteorological Society*, (April), pp. 605–610.

- [24] JAIN, M., MEHTA, A. J., 2008, “Role of basic rheological models in determination of wave attenuation over muddy seabeds”, *Continental Shelf Research*. doi: 10.1016/j.csr.2008.09.008.
- [25] JIANG, L., ZHAO, Z., 1989, “Viscous damping of solitary waves over fluid-mud seabeds”, *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, v. 115, n. 3 (May), pp. 345–363.
- [26] KAIHATU, J. M., SHEREMET, A., HOLLAND, K. T., 2007, “A model for the propagation of nonlinear surface waves over viscous muds”, *Coastal Engineering*, v. 54, pp. 752–764.
- [27] KRANENBURG, W., 2008, *Modelling wave damping by fluid mud*. Tese de Mestrado, Delft University of Technology. 152 pp.
- [28] KRANENBURG, W., WINTERWERP, J., BOER, G. D., et al., 2009, “Viscous wave damping in a two-layer fluid mud schematization - II: implementation in SWAN and applications”, *Journal of Geophysical Research*. (submitted).
- [29] MARTINS, L. R., MARTINS, I. R., VILLWOCK, J. A., et al., 1978, “Ocorrência de lama na praia do Cassino, (RS)”, *Anais Hidrográficos*, , n. 35 (Maio), pp. 159–170.
- [30] MATHEW, J., BABA, M., KURIAN, N. P., 1995, “Mudbanks of Southwest coast India I: wave characteristic”, *Journal of Coastal Research*, v. 11, n. 1, pp. 168–178.
- [31] MCANALLY, W. H., FRIEDRICH, C., HAMILTON, D., et al., 2007, “Management of fluid mud in estuaries, bays and lakes. I: Present state of understanding on character and behavior”, *Journal of Hydraulic Engineering*, v. 133, n. 1 (March), pp. 9–22.
- [32] MCANALLY, W. H., TEETER, A., SCHOELLHAMER, D., et al., 2007, “Management of fluid mud in estuaries, bays and lakes. II: Measurement, Modeling and Management”, *Journal of Hydraulic Engineering*, v. 133, n. 1 (March), pp. 23–28.
- [33] MEHTA, A. J., 2002, “Muddy Coasts of the World: Processes, Deposits and Function”. cap. 3: Muddy dynamics and controls, Elsevier. 19-60.
- [34] MEIRELLES, S., VIOLANTE-CARVALHO, N., 2007, “Modelagem computacional da propagação de ondas superficiais no oceano: um subsídio para

a compreensão dos fenômenos ópticos”, *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 29, pp. 555–563.

- [35] MOTTA, V. F., 1969, *Relatório-diagnóstico sobre a melhoria e o aprofundamento do acesso pela barra de Rio Grande*. Relatório técnico, Instituto de pesquisas hidráulicas da UFRGS (IPH/UFRGS), Porto Alegre, Maio. 114 p.
- [36] NG, C.-O., 2000, “Water waves over a muddy bed: a two-layer Stokes’ boundary layer model”, *Coastal Engineering*, v. 40 (March), pp. 221–242.
- [37] NIMER, E., 1966, “Circulação atmosférica do Brasil (contribuição ao estudo da climatologia do Brasil)”, *Revista Brasileira de Geografia*, v. 28, n. 3 (Julho-Setembro), pp. 232–250.
- [38] NIMER, E., 1971, “Climatologia da região sul do Brasil: Introdução à climatologia dinâmica - Subsídios à geografia do Brasil”, *Caderno Especial da Revista Brasileira de Geografia*, v. 33, n. 4 (Outubro-Dezembro), pp. 3–66.
- [39] NORTEK, 2005, *Aquadopp corrente profiler - User guide*. Nortek - AS, September.
- [40] NORTEK, 2005, *AWAC - User guide*. Nortek - AS, September.
- [41] NORTEK, 2005, *Vector current meter - User manual*. Nortek - AS, August.
- [42] OCHI, M. K., 1998, *Ocean waves - The stochastic approach*. Cambridge ocean technology series.
- [43] PARENTE, C. E., 1999, *Uma nova técnica espectral para análise direcional de ondas*. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- [44] PEDERSEN, T., SIEGEL, E., 2008, *Wave measurements from a subsurface buoy: A new method is described for using the AWAC acoustic Doppler current profiler for directional wave measurements from a subsurface buoy*. Relatório técnico, Nortek, February.
- [45] PEDERSEN, T., MALZONE, C., SIEGEL, E., 2005, “Analysis of band-passed directional wave data”. In: *OCEANS, 2005. Proceedings of MTS/IEEE*, pp. 293–300.
- [46] PINTO, C. S., 2006, *Curso básico de mecânica dos solos*. Third ed. , Oficina de Textos.

- [47] REBOITA, M. S., 2001, *Normais Climatológicas Provisórias de Rio Grande, RS, no Período de 1991 a 2000*. Monografia de Graduação, Fundação Universidade do Rio Grande - FURG.
- [48] REED, A. H., FAAS, R. W., ALLISON, M. A., et al., 2009, “Characterization of a mud deposit offshore of the Patos Lagoon, southern Brazil”, *Continental Shelf Research*, v. 29, pp. 597–608.
- [49] RINE, J. M., GINSBURG, R. N., 1985, “Depositional facies of a mud shoreface in Suriname, South America - a mud analogue to sandy, shallow-marine deposits”, *Journal of Sedimentary Petrology*, v. 55, n. 5 (September), pp. 633–652.
- [50] ROGERS, W. E., HOLLAND, K. T., 2008, “A study of dissipation of wind-waves by mud at Cassino Beach, Brazil: Prediction and inversion”, *Continental Shelf Research*.
- [51] SEDIMENTATION AND RIVER HYDRAULICS GROUP, 2006, *Erosion and sedimentation manual*. U.S. Department of the Interior, Denver, Colorado, November.
- [52] SHEREMET, A., STONE, G. W., 2003, “Observations of nearshore wave dissipation over muddy sea beds”, *Journal of Geophysical Research*, v. 108(C11), n. 3357.
- [53] SOLTANPOUR, M., HAGHSHENAS, S. A., SHIBAYAMA, T., 2005, “Sediment and Ecohydraulics: INTERCOH 2005”. cap. 26: An integrated hydrodynamic model on muddy coasts. 379-390.
- [54] SOLTANPOUR, M., SAMSAMI, F., HAGHSHENA, S. A., 2009, “Laboratory and numerical study of Hendijan coast mud”. In: *10th International Conference on Cohesive Sediment Transport Processes - INTERCOH'09*, Rio de Janeiro.
- [55] STEMA SURVEY SERVICES, *DensLog - Density acquisition module*. STEMA Survey Services b. v., The Netherlands.
- [56] TATAVARTI, R., NARAYANA, A. C., MANOJ KUMAR, P., et al., 1999, “Mudbank regime off the Kerala coast during monsoon and non-monsoon seasons”, *Proc. Indian Acad. Sci. (Earth Planet. Sci.)*, v. 108, n. 1, pp. 57–68.
- [57] THE OPEN UNIVERSITY, 1999, *Waves, tides and shallow-water processes*. Second ed. , Elsevier Ltd.

- [58] THE SWAN TEAM, 2006, *SWAN Cycle III version 40.51 - User Manual*. Delft University of Technology.
- [59] TOMAZELLI, L. J., VILLWOCK, J. A., 2005, “Mapeamento geológico de planícies costeiras: o exemplo da costa do Rio Grande do Sul”, *Gravel*, v. 3, pp. 109–115.
- [60] TOMAZELLI, L. J., DILLENBUG, S. R., VILLWOCK, J. A., 2000, “Late quaternary geological history of Rio Grande do Sul Coastal Plain, southern Brazil”, *Revista Brasileira de Geociências*, v. 30, n. 3 (September), pp. 474–476.
- [61] TORRES, R. J., 2000, *Uma análise preliminar dos processos de dragagem do Porto de Rio Grande, RS*. Tese de Mestrado, Fundação Universidade Federal do Rio Grande. 190 pp.
- [62] TRAYKOVSKI, P., GEYER, W. R., IRISH, J. D., et al., 2000, “The role of wave-induced density-driven fluid mud flows for cross-shelf transport on the Eel River continental shelf”, *Continental Shelf Research*, v. 20, pp. 2113–2140.
- [63] UMMUS, M. E., 2009, *Avaliações de estimativas de temperatura da superfície terrestre em eventos frios para a região sul do Brasil, utilizando dados do sensor MODIS*. Tese de Mestrado, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE. 131 pp.
- [64] VELLOZO, T. G., ALVES, A. R., 2006, “Características gerais do fenômeno da maré no Brasil”, *Anais Hidrográficos da Diretoria de Hidrografia e Navegação*, v. Tomo LXI, pp. 8.
- [65] VILLWOCK, J. A., MARTINS, L. R., 1972, “Depósitos lamfticos de póspraia, Cassino (RS)”, *Pesquisas*, v. I, n. 1 (Maio), pp. 69–75.
- [66] VINZON, S. B., MEHTA, A., 1998, “A mechanism for the formation of luto-clines by waves”, *Port, Coastal, and Ocean Engineering, ASCE*, v. 124, n. 3, pp. 147–149.
- [67] VINZON, S. B., CALLIARI, L. J., HOLLAND, T., 2005, “Wave attenuation on Muddy bottoms - A multidisciplinary field study offshore Cassino Beach, Southern Brazil”. In: *International Conference on Cohesive Sediment Transport, INTERCOH 05*, Saga.

- [68] VINZON, S. B., WINTERWERP, J. C., NOGUEIRA, R., et al., 2008, “Mud deposit formation on the open coast of the larger Patos Lagoon-Casino Beach system”, *Continental Shelf Research*, (Setembro), pp. 17. 10.1016/j.csr.2008.09.021.
- [69] VIOLANTE-CARVALHO, N., 1998, *Investigação sobre a evolução do clima de ondas na Baía de Campos e a correlação com as situações meteorológicas associadas*. Tese de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- [70] WANG, Y., HEALY, T., SCOR WORKING GROUP 106, 2002, “Muddy Coasts of the World: Processes, Deposits and Function”. cap. 2: Definition, properties, and classification of muddy coasts, Elsevier. 9-18.
- [71] WELLS, J. T., ROBERTS, H. H., 1980, “Fluid mud and shoreline stabilization: Louisiana chenier plain”. In: *17th International Coastal Engineering Conference ASCE*, pp. 1382–1401, Sydney, March. ASCE.
- [72] WELLS, T. J., COLEMAN, J. M., 1981, “Physical processes and fine-grained sediment dynamics, coast of Surinam, South America”, *Journal of Sedimentary Petrology*, v. 51, n. 4 (December), pp. 1053–1068.
- [73] WINTERWERP, J. C., VAN KESTEREN, W. G. M., 2004, *Introduction to the physics of cohesive sediment in the marine environment*. Developments in sedimentology 56. First ed. , Elsevier B. V.
- [74] WINTERWERP, J. C., DEGRAAFF, R. F., GROENEWEG, J., et al., 2007, “Modelling of wave damping at Guyana mud coast”, *Coastal Engineering*, v. 54, pp. 249–261.

Apêndice A

Descrição da implementação do modelo de dissipação viscosa no modelo de ondas SWAN

O SWAN é um modelo numérico de terceira geração planejado para estimar as condições das ondas em pequena escala, por exemplo, em regiões costeiras, lagoas, estuários e, ainda, tanques (condições controladas) [58]. Este modelo é capaz de representar todos os processos relevantes de geração, dissipação e propagação das ondas.

As ondas são descritas por meio da evolução do espectro de densidade de ação no plano bidimensional (*phase averaging model*), mesmo quando os fenômenos não lineares são dominantes (e.g., na zona de surfe). A evolução do espectro de ondas no SWAN é representada pela Equação do Balanço de Ação Espectral:

$$\frac{\partial}{\partial t}N + \frac{\partial}{\partial x}c_xN + \frac{\partial}{\partial y}c_yN + \frac{\partial}{\partial \sigma}c_\sigma N + \frac{\partial}{\partial \theta}c_\theta N = \frac{\partial S_{tot}}{\partial \sigma}. \quad (\text{A.1})$$

Onde:

- σ é a frequência angular relativa dada em radianos;
- θ é a direção da onda em graus;
- $N(\sigma, \theta)$ é o espectro de densidade de ação das ondas, sendo $N(\sigma, \theta) = E(\sigma, \theta)/\sigma$. $E(\sigma, \theta) = S(\sigma)D(\theta)$ corresponde ao espectro direcional de densidade de energia.

O primeiro termo do lado esquerdo da equação representa a taxa de variação da densidade de ação no tempo. O segundo e o terceiro termo indicam a propagação da densidade de ação no espaço geográfico (com velocidades de propagação c_x e c_y no plano x, y , respectivamente). O quarto termo trata da variação das frequências relativas devido à mudanças de profundidade e na intensidade da corrente (com velocidade de propagação c_σ). O quinto termo, por sua vez, representa a refração

induzida pelas variações de profundidade e de corrente (com velocidade de propagação c_θ). S_{tot} ($= S(\sigma, \theta)$) é o termo fonte de energia, que representa os efeitos de geração, propagação, dissipação e interações onda-onda não lineares.

A implementação do termo de dissipação viscosa no SWAN foi inicialmente descrita por WINTERWERP *et al.* [74], que utilizaram a formulação baseada no modelo de GADE [19] com aproximação de águas rasas (seção 2.2.1), o que limitaria o domínio de sua aplicação. Posteriormente, KRANENBURG [27] aprimorou a formulação do SWAN, de forma a abranger um maior domínio de aplicação (profundidades maiores), ao derivar uma nova relação de dispersão, a qual foi inserida no termo fonte do SWAN, a saber:

$$S_{tot} = S_{in} + S_{nl} + S_{ds} + \mathbf{S}_{b,m}. \quad (\text{A.2})$$

Sendo S_{in} o termo para a parametrização da transferência de energia do vento para as ondas, ou seja, S_{in} descreve o processo de geração das ondas através do vento. O termo S_{nl} representa as interações não lineares onda-onda entre as componentes espectrais, sendo responsável por redistribuir energia entre ondas de diferentes frequências. Já o termo S_{ds} reproduz a dissipação de energia por basicamente três processos: encapelamento (*whitecapping*), fricção com o fundo (arenoso) e quebra da onda na zona de surfe. Enfim, $S_{b,m}$ é o termo sumidouro (*sink term*) que conta com a dissipação viscosa devido à lama. $S_{b,m}$ é obtido do transporte de energia entre a interface água-lama, o que, matematicamente, significa a integração do trabalho, W_t , realizado pelas ondas superficiais sobre a camada de lama fluida no período, T , correspondente ao ciclo de onda, como se segue:

$$W_t = -\frac{1}{T} \int_0^T p \frac{d\xi}{dt} dt. \quad (\text{A.3})$$

KRANENBURG [27] aplicou o mesmo método proposto por GADE [19], porém as expressões para a pressão, p , e para o deslocamento da interface, ξ , são válidas para águas profundas, resultando em um termo de dissipação de energia, E_t , consistente com a nova relação de dispersão derivada pelo autor. O novo termo pode ser escrito, após certa manipulação matemática, em função da energia, conforme a seguir:

$$E_t = -\omega \frac{\Re(p_{z=H_{tot0}}) b \sin(\varphi)}{\rho_w g a^2}. \quad (\text{A.4})$$

O desenvolvimento pormenorizado do algebrismo dessas equações é visto em KRANENBURG *et al.* [28]. O autor, ainda, afirma que a pressão, expressa nas Equações A.3 e A.4, pode ser considerada o único mecanismo de transferência de energia da camada de água para a camada de lama. Assim, os parâmetros que contribuem efetivamente para a dissipação relativa de energia são as flutuações da pressão p , o deslocamento da interface água-lama ξ e a diferença de fase entre as ondas superficiais e internas φ (ver a Tabela 2.2.1 e a Figura 2.1 para definição dos parâmetros).

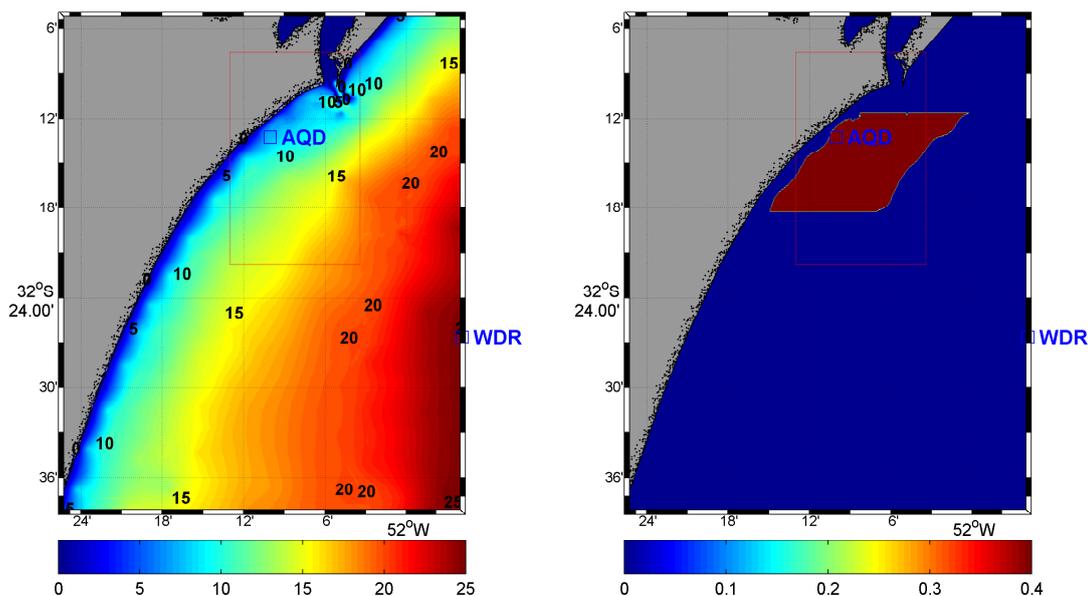
Apêndice B

Condições de contorno e batimetria utilizados como entrada no SWAN

A grade computacional foi elaborada por meio da digitalização da carta náutica *No. 2100* (De Mostardas a Rio Grande), criando um arquivo do tipo *xyz*. O esquema de grade foi gerado pelo método de interpolação *Kriging*, tendo como resultado uma malha regularmente espaçada, onde cada valor de z (correspondente à profundidade) foi referido a uma coordenada (x, y) do sistema geográfico. As características geométricas da malha são dadas por um espaçamento na direção x (Δx) de $92,6\text{ m}$ e na direção y (Δy) de $125,3\text{ m}$ (500×500 pontos). A grade foi aninhada na região do banco de lama, aonde foi fundeado o Aquadopp, o que aumentou a resolução espacial na área em questão, de maneira que $\Delta x = 55,4\text{ m}$ e $\Delta y = 62,2\text{ m}$ (321×423 pontos). Na Figura B.1(a) é apresentada a batimetria usada para as simulações com detalhe da área aninhada.

A máscara do banco de lama foi criada segundo as informações fornecidas por CALLIARI *et al.* [7] e ROGERS e HOLLAND [50], baseadas nos experimentos de campo acontecidos em 2005. Assim, os limites do depósito ficaram confinados às isóbatas entre 6 e 15 m com extensão de cerca de $4,5\text{ km}$ ao sul da desembocadura da Laguna dos Patos (Figura B.1(b)). A espessura da camada de lama ficou definida em $0,40\text{ m}$, com densidade da lama ρ_m equivalente à 1310 g.l^{-1} e viscosidade cinemática ν_m de $7,6 \times 10^{-3}\text{ m}^2\text{s}^{-1}$.

A resolução espectral em direção foi de $\Delta\theta = 4^\circ$ para ambos esquemas de grade. No domínio da frequência, o espectro foi dividido em 32 partes com distribuição logarítmica de $0,03$ a $0,58\text{ Hz}$, de modo que $\Delta f/f = 0,1003$. As simulações ocorreram no modo estacionário e foram utilizados os valores padrões das opções de geração/dissipação da física do modelo (e.g., interações não lineares, encapela-



(a) Batimetria do domínio computacional. (b) Máscara do banco de lama para o domínio.

Figura B.1: Batimetria do domínio computacional e a máscara da camada de lama utilizada nas simulações em 2D. O retângulo em vermelho representa o domínio do aninhamento.

mento, etc.), quando estas foram ativadas. Além disso, os efeitos da maré foram desconsiderados devido ao regime de pequena amplitude.

Os espectros (de energia e de direção) referentes às medições do ondógrafo (Waverider) serviram como condição inicial para as simulações e, além disso, o modelo foi forçado com os ventos (velocidade e direção) medidos pela praticagem de Rio Grande (ver seção 4.1). O domínio computacional foi construído de forma que a fronteira leste coincidissem com o ponto onde o Waverider coletou os dados de ondas (Figura B), desta forma, os espectros seriam propagados a partir da fronteira leste. O modelo calculou a propagação dos espectros (extraídos dos registros do Waverider) por todo domínio computacional até a fronteira com a grade batimétrica aninhada (mais resolvida). Nesta região, o espectro de saída da grade grosseira representou a condição inicial do esquema aninhado com grade retangular e fronteiras fechadas.

Uma avaliação inicial do modelo constatou um efeito indesejável de perda de energia pelas fronteiras sul e, em menor proporção, pela fronteira norte. Com propósito de minimizar essa perda, a configuração do SWAN foi ajustada de forma que os espectros do Waverider (condição inicial) também entrassem por um segmento de 45,55 dos 46,30 km de extensão da fronteira sul (Figura B.2). Pelo fato das ondas durante praticamente todo período advirem do quadrante sul e leste, nenhuma condição inicial foi imposta à fronteira norte.

Foram selecionados apenas os arquivos dos registros das medições de ondas (com

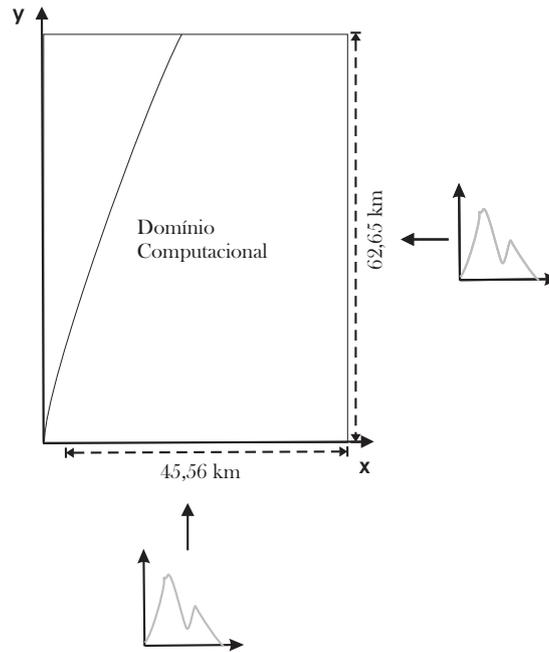


Figura B.2: Esquema ilustrativo do domínio computacional SWAN, exibindo a extensão dos segmentos das fronteiras (leste e sul) por onde os espectros do Waverider entraram (condição inicial). Notar que o espectro entra por toda a fronteira leste.

o Waverider e o Aquadopp) e vento, que ocorreram exatamente no mesmo instante de tempo. As simulações abrangeram todo período de medição de ondas da campanha de 2005.

Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)