



www.ugb.org.br  
ISSN 2236-5664

## Revista Brasileira de Geomorfologia

v. 16, nº 1 (2015)



# MORFODINÂMICA MULTITEMPORAL EM PRAIA REFLETIVA NO LITORAL CENTRO-NORTE DO RJ, EM RESPOSTA AO CLIMA DE ONDAS REGIONAL

## MULTITEMPORAL MORPHODYNAMICS IN REFLECTIVE BEACH IN CENTRAL AND NORTHERN COAST OF RJ IN RESPONSE TO REGIONAL WAVE CLIMATE

**Leonardo Azevedo Klumb-Oliveira**

*Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro.*

*Av. Athos da Silveira Ramos, 274. Ilha do Fundão, Rio de Janeiro, CEP: 21.941.916, Brasil*

*Email: leoklumb@gmail.com*

**Nair Emmanuela da Silveira Pereira**

*MAG - Mar, Ambiente e Geologia - Serviços*

*Rua Visconde de Inhaúma, 37 - 21º andar, Centro, Rio de Janeiro, CEP 20.091-007, Brasil*

*Email: nairemmanuela@gmail.com*

**Rafael Rocha Leão**

*MAG - Mar, Ambiente e Geologia - Serviços*

*Rua Visconde de Inhaúma, 37 - 21º andar, Centro, Rio de Janeiro, CEP 20.091-007, Brasil*

*Email: rafael@magservicos.com.br*

### Informações sobre o Artigo

Data de Recebimento:

31/08/2014

Data de Aprovação:

23/11/2014

### Palavras-chave:

Clima de Ondas Regional;  
Morfodinâmica Praial; Modelo  
Wavewatch III

### Keywords:

Regional Wave Climate; Beach  
Morphodynamics; Wavewatch  
III Model

### Resumo:

O artigo avalia a relação da morfodinâmica da praia do Lagomar, Macaé - RJ, com o clima de ondas regional e local do RJ, obtido através de resultados de simulações do modelo Wavewatch III, disponíveis para os anos de 1990-2009. Para tanto, foram avaliados três pontos de saídas de dados de ondas próximos à costa, sob diferentes graus de exposição, e seus resultados foram validados com dados medidos em campo por boia oceanográfica fundeada nas proximidades de Arraial do Cabo. Posteriormente, o comportamento das ondas foi relacionado com a morfologia da praia, a partir da análise de 41 perfis topográficos analisados em multiescala temporal (1995-2004). Os resultados apontaram boa correlação do modelo com dados reais de altura e período de ondas para a costa do RJ e boa correlação entre as variações de energia de onda e as variações de volume no perfil da praia ao longo da escala temporal avaliada.

### Abstract:

The article evaluates the relationship between the beach morphodynamic of Lagomar, Macaé - RJ, with the regional wave climate of RJ, obtained through simulation results of Wavewatch III model, available for the last 19 years (1990-2009). To this end, three points of data outputs of waves close to the shore were

evaluated, under different degrees of exposure, and the results were validated with data measured in the field by oceanographic buoy anchored near Arraial do Cabo. Subsequently, the behavior of waves was related to the morphology of the beach, through the analysis of 41 topographic profiles analyzed in multiscale (1995-2004). The results showed good correlation of the model with real data of height and period of waves and good correlation between the variations of wave energy and volume changes in beach profile along the assessed timescale.

## 1 Introdução

A resposta morfológica da costa ao clima de ondas configura uma entre as principais perspectivas de análise da geomorfologia costeira e constitui a condicionante principal dos processos que influenciam na dinâmica litorânea (Shepard, 1950, Komar, 1976; Short, 1999).

A ciclicidade dos processos costeiros constitui a característica principal do ambiente, onde processos sazonais de deposição e erosão se intercalam ao longo da escala de tempo. Nas estações de mau tempo, ou com predomínio de sistemas meteorológicos que transferem maior energia para as ondas, as praias tendem a experimentar processos erosivos de aplainamento de perfil emerso e transferência de sedimentos para regiões mais profundas, formando barras submersas. Nas estações de bom tempo, com baixa energia de ondas, as praias tendem a apresentar um perfil mais convexo e largo, com o retorno do volume de sedimentos ora perdidos nas estações de mau tempo, tal como discutido por Shepard (1950), Sonu e Van Beek (1971), entre outros.

Hasselmann (1963) aponta que o espectro de ondas de gravidade que chega à costa é resultado de uma interação não linear de ondas provenientes de diferentes ângulos de propagação, que são geradas em águas profundas, e interação com ondas geradas pelo vento local. Os diferentes ângulos de propagação favorecem um padrão randômico de aproximação. Ondas do tipo *swell* (marulhos) são ondas progressivas que tem sua origem em locais geralmente distantes da costa, onde há grande transferência de *momentum* da atmosfera para a superfície marinha. De modo geral, ondas do tipo *swell* são geradas em águas profundas e migram para regiões mais rasas até alcançarem as regiões litorâneas. Apresentam maior comprimento de onda e maior energia do que as ondas geradas por ventos locais, e, nestas circunstâncias, apresentam maior potencial de impacto na costa (Tucker e Pitt, 2001).

O processo de transição das ondas de águas profundas para águas rasas envolve a efetiva participação

da topografia do fundo na geometria do trem de ondas (Komar, 1976). Em águas rasas, as ondas dissipam energia ao se atritarem com o fundo, perdem velocidade, e, portanto, tendem a inclinar sua crista em relação à base na direção da propagação. Tal processo de empinamento resulta na quebra da onda, momento em que ocorre a mais significativa dissipação da energia. Na mesma medida, o contato da onda com o fundo induz processos de refração e difração, que promovem mudanças na direção do trem de ondas na costa.

No sentido de melhor compreender a climatologia de ondas e, com isso, simular e prevenir danos provenientes de eventos mais severos, os modelos numéricos computacionais têm sido desenvolvidos e aprimorados ao longo das últimas décadas, sobretudo no que se refere à discretização do maior número de variáveis que compõe o sistema, destacadamente, a interação entre as ondas que formam um mesmo espectro (Tolman, 2009). Neste aspecto, os dados disponibilizados pelo modelo Wavewatch III (NOAA/NCEP) (Tolman, 2009) aparecem como apropriada ferramenta para estimativa de dados de ondas em águas profundas em nível regional.

O modelo Wavewatch III é um modelo de ondas do tipo espectral de terceira geração, i.e, apresenta como dados de saída as propriedades do espectro de ondas em determinado local, como altura significativa, frequência de pico e direção de incidência. O modelo contempla em suas equações as interações entre ondas e o balanço do espectro de energia. Os dados disponibilizados pelo modelo apresentam abrangência global e regional e utilizam batimetria de larga escala e reanálises de ventos locais, não sendo contemplados os processos de águas rasas. Embora os dados representem equações para águas profundas, estes podem apresentar uma boa estimativa das condições hidrodinâmicas regionais e dos sistemas meteorológicos atuantes na plataforma interna, os quais terão impacto fundamental nas regiões costeiras. Além disso, os dados correspondem a uma escala multidecadal, o que favorece a investigação de tendências morfológicas em maior escala.

Este artigo se propõe a verificar a resposta morfológica de uma praia refletiva, em escala multitemporal, no que se refere aos cenários hidrodinâmicos gerados pelo clima de ondas da região centro-norte do litoral fluminense. Para a verificação foram utilizados 19 anos de dados de onda disponibilizados pelo modelo Wavewatch III. Para tanto, fez-se uma análise climática prévia sob o ponto de vista regional, e a seguir, procedeu-se a análise em nível mais restrito, de frente à praia. A região se destaca por ser o ponto de inflexão da linha de costa fluminense, que passa de uma orientação aproximadamente O-E para SO-NE, e neste sentido, experimenta uma série de processos oceanográficos e clima de ondas diferenciado em termos de energia.

## 2 Área de Estudo

A área de estudo compreende a costa oriental do estado do Rio de Janeiro no que se refere à climatologia de ondas em multiescala temporal, e a resposta morfológica da praia do Lagomar, no município de Macaé - RJ (Figura 1) aos eventos hidrodinâmicos detectados.

Trabalhos realizados sobre o clima de ondas para a costa sudeste do Brasil e Bacia de Campos (Parente,

1998; Violante-Carvalho, 1998; Candella *et al.*, 1999; Alves *et al.*, 2009), apontam para um o clima de ondas prevalente de tempo bom, com ondas de menor altura e períodos provenientes do quadrante NE (1 - 2m; 2-6s), sob influência do Anticiclone semi-permanente do Atlântico Sul e exposto a eventos mais energéticos provenientes dos quadrantes SO e SE, associados aos ciclones extratropicais e frentes frias, com ondas acima de 2m e frequentemente períodos acima de 10s. De acordo com a Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN), a região da costa é caracterizada pelo regime de micromaré.

A praia de Lagomar possui orientação NE – SO, é composta por areias grossas e apresenta tipologia predominantemente refletiva e baixo índice de mobilidade, (Muehe, 1998; Bastos e Silva, 2000, Figura 2). A praia é semi-exposta, pois sofre influência do sombreamento causado a NE pela protuberância do litoral gerada pelo rio Paraíba do sul, e a SO pela ponta de Cabo Frio. É comum a formação de cúspides praias. Situa-se em um segmento do litoral fluminense cuja plataforma interna atual apresenta menor gradiente topográfico se comparado ao alinhamento O-E da praia da Massambaba (RJ).

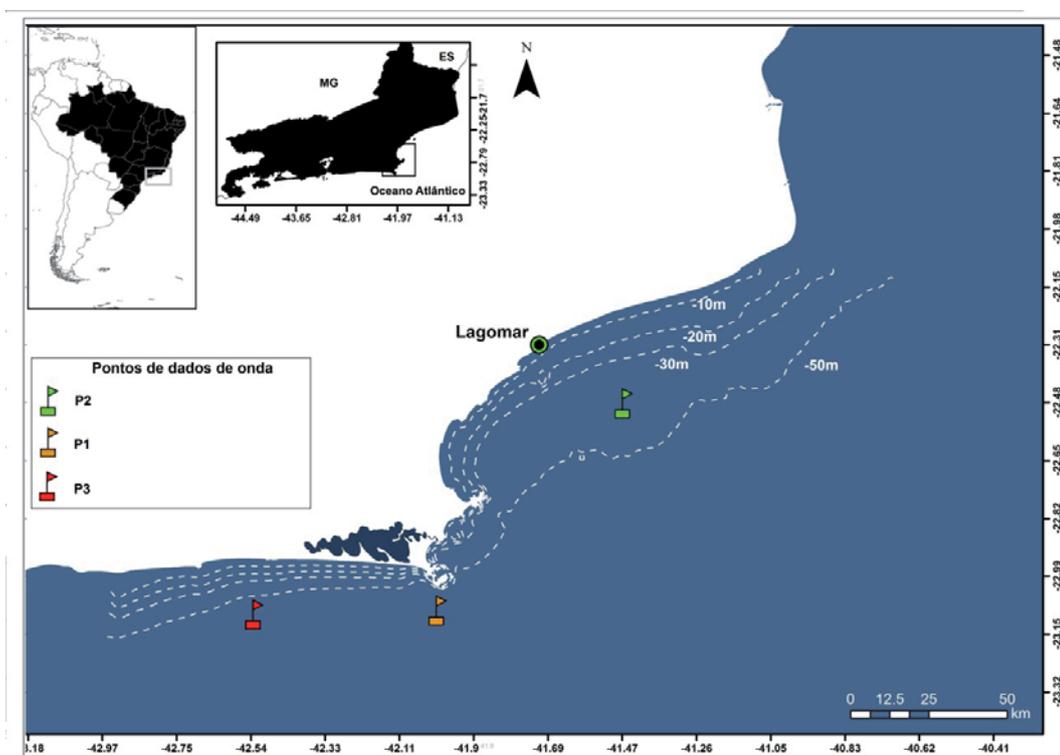


Figura 1 - Representação esquemática da área de estudo, com destaque para praia do Lagomar, e os pontos de saída de dados de ondas. Batimetria obtida de cartas náuticas DHN.



Figura 2 - Imagens da praia de Lagomar. a) Vista SO. b) Vista NE. Fotos: Dieter Muehe.

### 3 Metodologia

#### 3.1 Estimativa dos cenários de ondas de 1990-2009

Para a estimativa cenários de ondas na costa centro-norte do Rio de Janeiro foram utilizados dados de simulação (tipo *hindcast*) do modelo numérico de terceira geração Wavewatch III (Tolman, 2009) utilizando como dados de entrada a reanálise de ventos do *Forecast System Reanalysis Reforecast* da *National Oceanographic Atmospheric Administration* (CFSRR/NOAA-NCEP) (Chawla et al., 2012), disponibilizados no endereço eletrônico [ftp://nopp.ncep.noaa.gov/pub/CFSR\\_wavehind\\_ph1/](ftp://nopp.ncep.noaa.gov/pub/CFSR_wavehind_ph1/).

Foram extraídos os dados de altura significativa de onda  $H_s$  (m), período de pico  $T_p$  (s), e direção de pico  $D_p$  (°), (variando de 0 a 360°, com 0 correspondendo a ondas propagando de Norte), referentes, predominantemente, ao regime de ondas significativas de *swell*, correspondentes a um intervalo temporal de 1990 a 2009. Os dados apresentavam resolução temporal de 3 h e espacial de 0,5/0,5°. Para otimização do tempo de computação foram determinados 3 pontos amostrais, os mais próximos da costa, de acordo com a resolução da malha numérica disponível pelo modelo. Os pontos representam valores discretos para os nós da malha global do modelo, cuja resolução, como dito, é de 0,5 por 0,5°, ou seja, aproximadamente 55 km<sup>2</sup>. Os pontos estão situados em [GCS] P1 (23.0° S – 42.0° W); P2 (22.5° S – 41.5° W); e P3 (23.0° S – 42.5° W) em profundidades aproximadas de 50 a 60 m (Figura 1).

Os dados de onda foram extraídos para cada ponto determinado e trabalhados estatisticamente para

diferentes escalas de tempo: médias diárias, mensais, sazonais e multidecadais.

Para a estimativa da energia de ondas para cada região abrangida pelos pontos, foram calculadas médias diárias de energia desde janeiro de 1990 a dezembro de 2009, para cada ponto e em relação aos eventos de alta energia. Para tanto, foi utilizado o cálculo de energia por unidade de área [ $J/m^2$ ], a partir da equação:

$$E = \frac{\rho g (H)^2}{8}$$

onde:  $\rho$  é a densidade da água do mar;  $g$  é a aceleração da gravidade, e  $(H)$  é a altura de onda.

Para o cálculo da energia optou-se por utilizar como dados de altura de ondas os valores detectados na série a partir de  $H_s \geq 3m$ , com períodos  $T_p \geq 10s$ , pretendendo-se, com isso, avaliar a energia proveniente dos sistemas de alta hidrodinâmica que chegam ao local.

#### 3.2 Comparação dos dados Wavewatch III com dados medidos em campo

Para avaliar a pertinência dos dados do modelo Wavewatch III com dados medidos em campo fez-se uma correlação do modelo com dados da boia meteorológica da Marinha do Brasil, em parceria com a Fugro Brasil (Projeto SIODOC), fundada em [-22.99; -42.18; aprox. 50m prof.], com série temporal disponível para download no endereço eletrônico <http://metocean.fugrogeos.com/marinha/>. Os dados utilizados estavam disponibilizados de hora em hora, do dia 01 de

agosto de 2013 a 01 de janeiro de 2014. Desse modo, comparou-se dados do Wavewatch III para o mesmo intervalo temporal, a partir do ponto P1, por ser o mais geograficamente próximo da localização da boia.

Para a análise estatística, os dados da boia foram reduzidos a médias temporais com intervalo de 3h. Optou-se por utilizar os dados da boia brutos para a comparação, sendo consideradas a altura significativa e o período de pico.

### 3.3 Os perfis topográficos

Para a avaliação da morfodinâmica e as variações de volume na praia do Lagomar foram utilizados 41 perfis topográficos, levantados pelo Laboratório de Geografia Marinha – UFRJ, entre os anos 1995 a 2004, medidos em um mesmo ponto amostral, para fins de comparação. Os perfis foram levantados com periodicidade aproximadamente mensal, entre os anos 1995 e 1997 e trimestral, de 1998 a 2004. Os perfis foram ancorados sob as coordenadas GCS [-22.31°; -41.71°, WGS 1984] e prosseguiram rumo ao mar de acordo com um alinhamento azimutal previamente definido. O levantamento dos perfis de praia foi realizado predominantemente em situação de baixa mar de sizígia, através do método das balizas de Emery e também equipamento topográfico do tipo Nível de Precisão, mira graduada e trena métrica, com os quais foram verificadas as diferenças de cotas altimétricas e as distâncias entre estas ao longo do perfil. As cotas altimétricas foram niveladas a partir do nível médio da maré na hora do levantamento, de acordo com informações de altura de maré fornecida pela DHN. Os mesmos perfis já foram utilizados em outros trabalhos como em Muehe (1998a; 1998b) e Muehe e Valentini (1998), no entanto, sob outra perspectiva de análise.

A estimativa do cenário de ondas entre as datas das medições dos perfis foi feita calculando-se os valores médios de [Hs, Tp e Dp] entre os dias do intervalo entre um perfil e outro.

### 3.4 Quantificação da variação do volume do perfil

Para quantificação da variação do volume entre as datas amostradas os perfis foram plotados em software

estatístico específico, no qual foram calculadas as áreas correspondentes a cada perfil, utilizando-se para tanto a regra dos trapézios.

A regra dos trapézios utiliza uma função integral, de modo que toda a área abaixo de um gráfico pode ser calculada dividindo-se esta área em  $n$  partes, e calculando-se a área do trapézio para cada parte. Ao final, a área total do gráfico é dada em função do somatório de todas as áreas dos trapézios. Para a medição da área utilizou-se como *datum* vertical a cota do nível médio da maré local. Para se trabalhar com volume, a área obtida para cada perfil foi multiplicada por um metro de largura.

A variação do volume entre as datas dos perfis foi feita de forma que:

$$Vt = V_{\text{posterior}} - V_{\text{antecedente}}$$

onde V é o volume medido.

## 4 Resultados

### 4.1 Clima de ondas Regional [1990-2009]

#### 4.1.1 Hs, Tp e Dp

Nas Figuras 3, 4 e 5 apresentam-se, para cada um dos pontos P1, P2 e P3, os histogramas de altura significativa, período de pico e de direção de pico, bem como a distribuição destes parâmetros ao longo dos meses do ano.

O ponto P1 (Figura 3) apresentou maior frequência de alturas de onda entre 1 e 2 m (~65%), seguido do intervalo de 2 e 3m (~23%). As alturas de onda maiores que 3 m representaram aproximadamente 4% das ocorrências. A direção predominante de ondas ocorreu no quadrante SSO, entre 175° e 200° (~45%), e SSE, entre 90° e 175° (~35%). O quadrante NE apresentou menos de 5% da frequência de ocorrência. A frequência dos períodos apresentou-se bem distribuída, com ~45% representando períodos menores que 10s e 55% com valores maiores que 10s, característicos de ondas de *swell*. Os meses de verão apresentaram menores alturas de onda e períodos menores que 9s. Os meses de maio e setembro foram os que apresentaram maior Hs médio (acima de 1.8m), com períodos entre 10 e 11s.

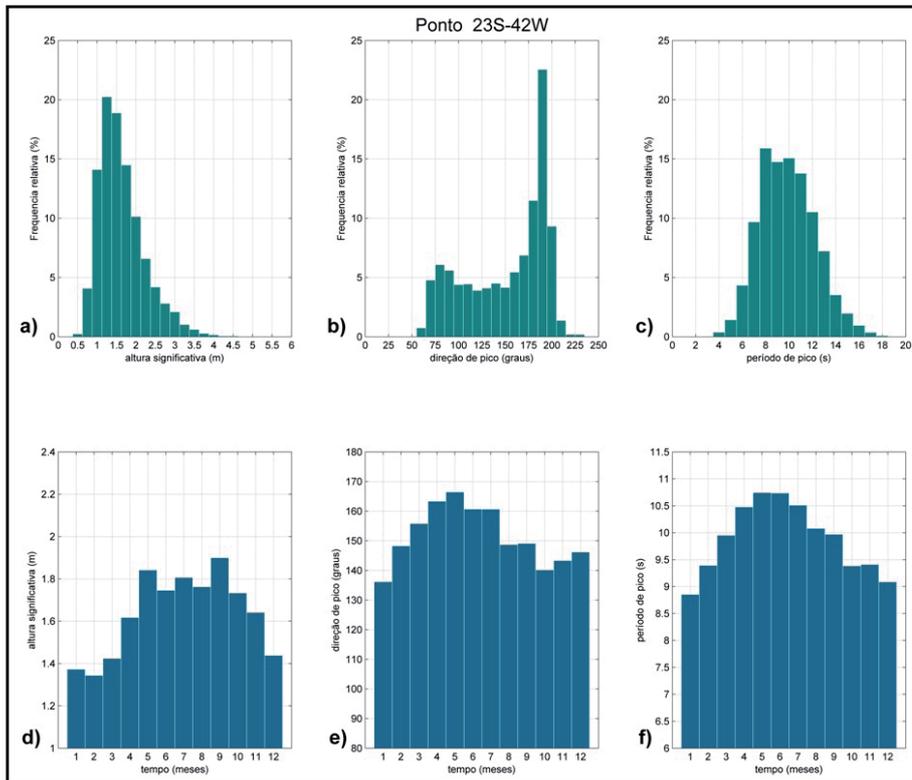


Figura 3 - Climatologia multidecadal de ondas para o ponto P1. a) Altura significativa (m); b) Direção de pico ( $^{\circ}$ ); c) Período de pico (s); d) Altura significativa por médias mensais; e) Distribuição da direção por médias mensais; f) Médias mensais da frequência dos períodos.

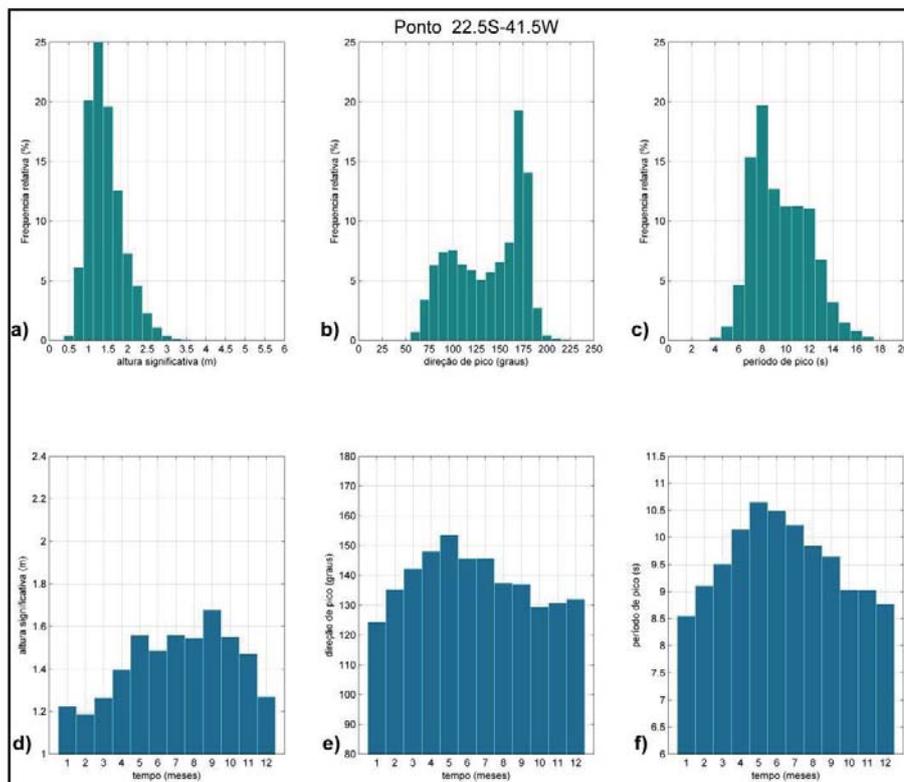


Figura 4 - Climatologia multidecadal de ondas para o ponto P2. a) Altura significativa (m); b) Direção de pico ( $^{\circ}$ ); c) Período de pico (s); d) Altura significativa por médias mensais; e) Distribuição da direção por médias mensais; f) Médias mensais da frequência dos períodos.

O ponto P2 (Figura 4) apresentou valores significativos de altura de onda entre 1 e 1,5 m (50%), com aproximadamente 15% de alturas entre 2 e 3m. As alturas maiores que 3m representaram aproximadamente 1% da ocorrência. A direção dominante das ondas neste ponto foi do quadrante SSE, entre 90 e 180° (~85%), seguido do quadrante NNE, que representou aproximadamente 15% das frequências.

Os períodos abaixo de 10s representaram aproximadamente 52% da amostragem, com pico em 8s. Os períodos acima de 10s apresentaram picos entre 10 e 12s, com incidências de valores entre 14 e 16s. Novamente os meses de verão apresentaram menores Hs e Tp, enquanto maio e setembro apresentaram os maiores Hs (acima de 1.5m), com maiores períodos (9.5-10.5s).

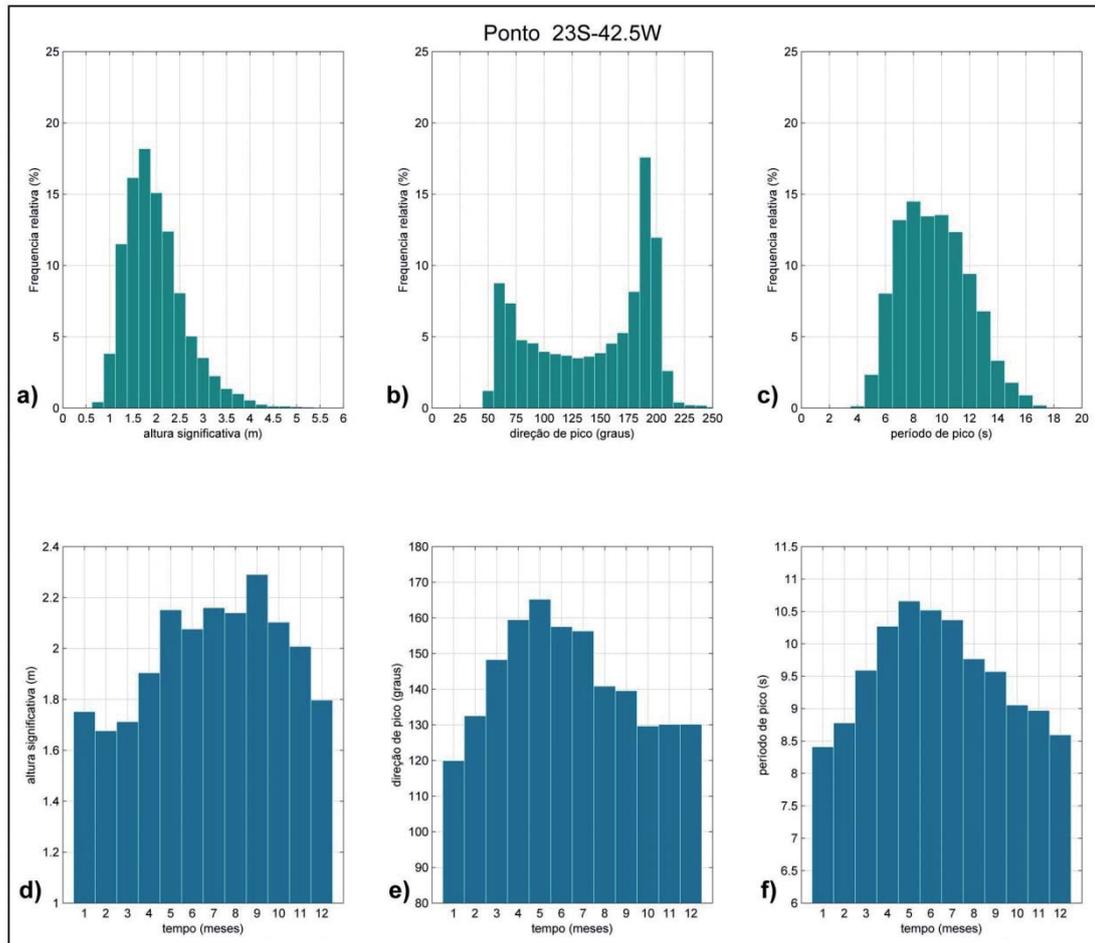


Figura 5 - Climatologia multidecadal de ondas para o ponto P3. a) Altura significativa (m); b) Direção de pico (°); c) Período de pico (s); d) Altura significativa por médias mensais; e) Distribuição da direção por médias mensais; f) Médias mensais da frequência dos períodos.

Para o ponto P3 (Figura 5), as frequências de ondas com altura entre 1 e 2 m representaram aproximadamente 51% das ocorrências. As ondas entre 2 e 3 m representaram ~35% das amostras, enquanto ondas acima de 3m apresentaram aproximadamente 13%, aparecendo valores de até 5,5 m. A direção predominante foi do quadrante SSE, com maior amplitude de direções no mesmo quadrante, representando 55% das

incidências. O quadrante SSO apresentou aproximadamente 30% da frequência, enquanto o quadrante NNE apresentou aproximadamente 15%. Os meses de maio, julho e setembro foram os que apresentaram maiores frequências de ondas acima 2.1m, correspondendo a uma maior frequência de períodos acima de 10s, com exceção do mês de setembro (9.5s). Os meses de verão corresponderam às menores alturas de onda e período.

4.1.2 Energia de ondas

A Figura 6 apresenta um gráfico comparativo entre a energia média anual de cada ponto em relação ao intervalo temporal 1990 - 2009, calculada a partir

das médias diárias de energia para todos os dias do ano.

A variação da energia ao longo da série (Figura 6) apresentou praticamente o mesmo padrão para os pontos P1 e P3, variando apenas na quantidade de energia em

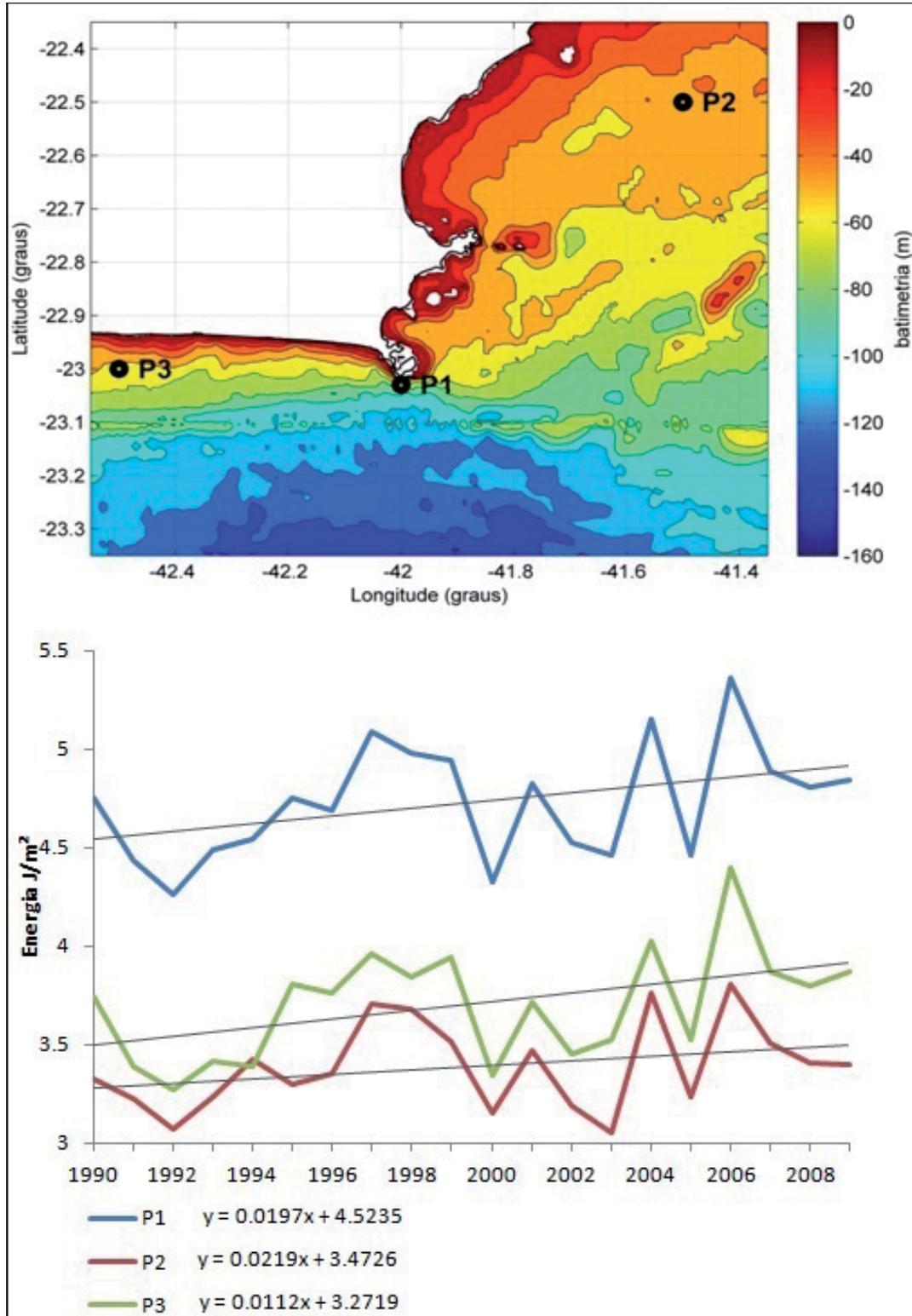


Figura 6 - Variação anual da energia de ondas em relação aos três pontos de dados avaliados.

cada ponto, provavelmente devido às características do modelo utilizado e por apresentarem semelhanças em seu grau de exposição em relação às ondas do quadrante S.

O ponto P2 apresentou padrão inversamente proporcional aos demais entre os anos 1994 e 1996, mas a partir de então, seguiu um padrão semelhante. Os picos de energia ocorreram nos anos de 1997, 1998, 2001, 2004 e 2006, sendo este último o maior deles. Já os anos de 1992, 2000, 2002, 2005 e 2007 apresentaram os menores valores. Os pontos demonstraram maior variação de energia a partir do ano 2000, quando são observados picos mais abruptos de alta e baixa intercalados por um intervalo aproximadamente anual.

Os três pontos apresentaram tendência a aumento de energia ao longo dos anos, que pode ser percebida a partir das linhas de tendência e equações da reta apresentadas na Figura 6. Este aumento pode estar relacionado ao aumento da ocorrência de eventos meteorológicos de mau tempo, uma vez que para o cálculo de energia foram utilizados valores de ondas acima de 3m e períodos acima de 10s, que caracterizam tais situações.

#### 4.2.1 Clima de Ondas Local: Proximidades de Macaé (Ponto P2)

As variações da hidrodinâmica nas proximidades de Macaé foram analisadas com base no ponto de ondas P2, nas escalas correspondentes às estações do ano (trimestral) e em relação à médias diárias.

A Figura 7 apresenta rosas de ondas correspondentes às estações do ano para o ponto P2. Os resultados demonstraram uma forte relação entre os eventos provenientes de S/SE e os períodos de onda acima de 10s, indicativos de *swell*, como pode ser observado em todas as estações. A estação do verão apresentou as menores alturas de onda e uma maior proveniência de E/NE dos que as outras estações. Na primavera ocorreram as maiores alturas de onda relacionadas aos quadrantes E/SE, com menores períodos quanto mais próximo de E. O outono e inverno apresentaram menores frequências de ventos de E/NE, concomitantes a um aumento de frequências de ondas de S/SE, com os maiores períodos e maiores alturas. Não foram detectados valores significativos de frequência relacionadas ao quadrante SO, provavelmente por ser a região mais abrigada quanto à orientação da costa.

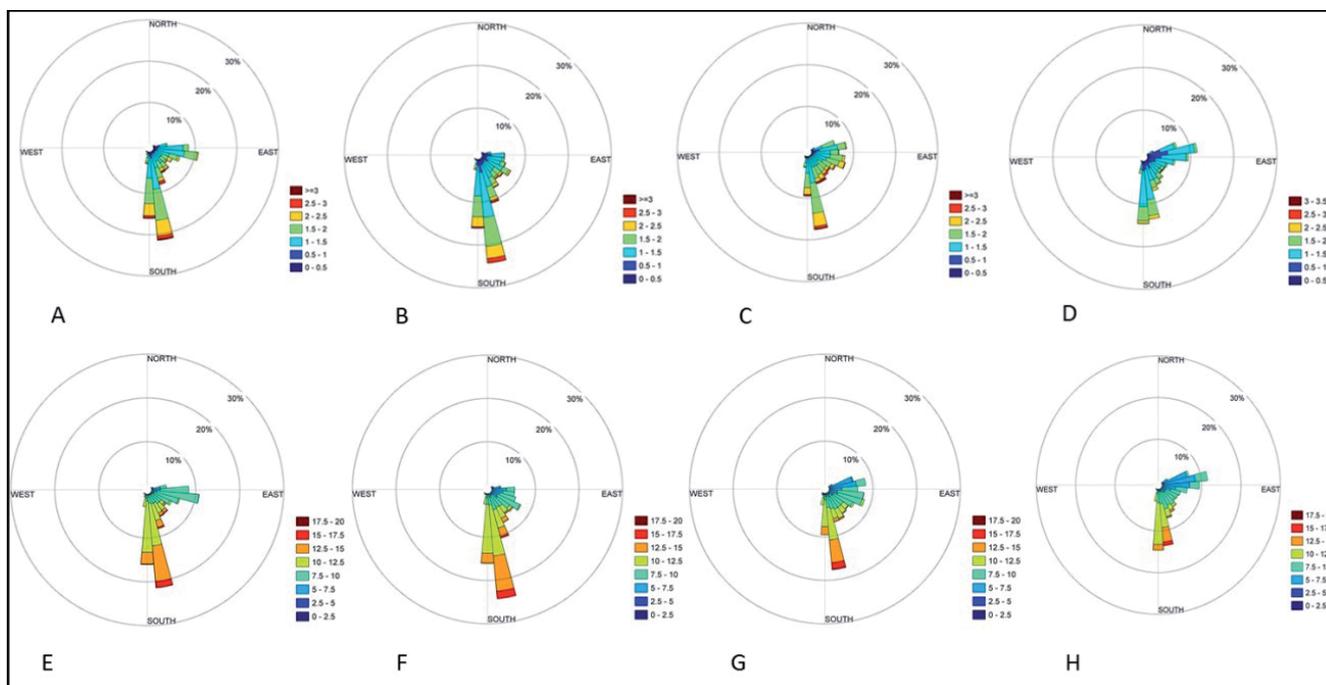


Figura 7 - Média climatológica de altura e período de ondas para os meses das estações do ano em relação ao ponto P2. A-E: altura e período no inverno; B-F: altura e período no outono; C-G: altura e período na primavera; D-H: altura e período para os meses de verão

A Figura 8 apresenta os valores de  $H_s$ ,  $T_p$  e  $D_p$ , em médias diárias, para o ponto de dados amostral ao longo de toda a série temporal escolhida. Uma análise dos dados permite observar um nítido padrão cíclico de variação de altura de ondas, de períodos, e de direções de incidência, representativos das estações mais e menos energéticas em relação à hidrodinâmica. Nesta perspectiva, é possível observar que os picos de  $H_s$  acima

de 3m configuram eventos aparentemente aleatórios, não aparecendo de modo frequente ou padrão no local. O mesmo ocorre com os valores de  $T_p$  acima de 15 s e  $D_p$  acima de  $200^\circ$ , os quais aparecem em eventos discretos dentro da escala temporal observada. Como anteriormente observado, os meses de outono e primavera representam as maiores incidências de ondas com altos períodos e maiores alturas, provenientes de S/SE.

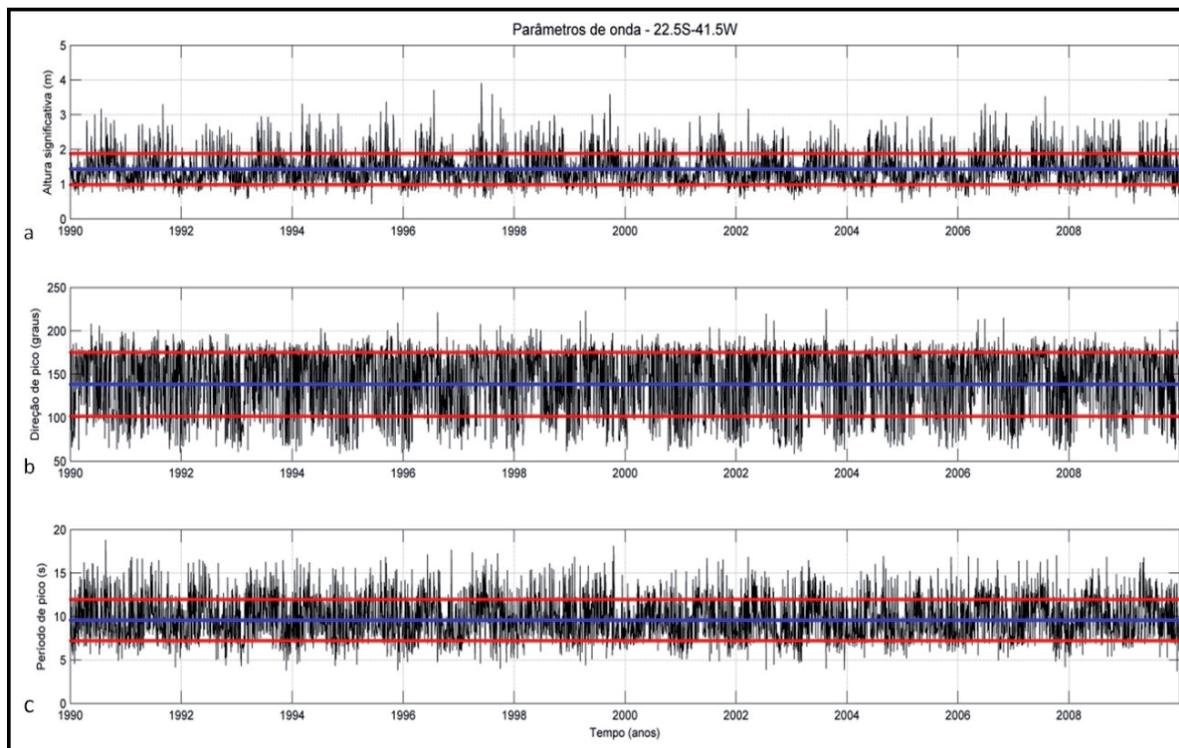


Figura 8 - Médias diárias de a) Altura (m), b) Direção ( $^\circ$ ), e c) Período (s) para o intervalo 1990 a 2009 obtidos em relação ao ponto P2.

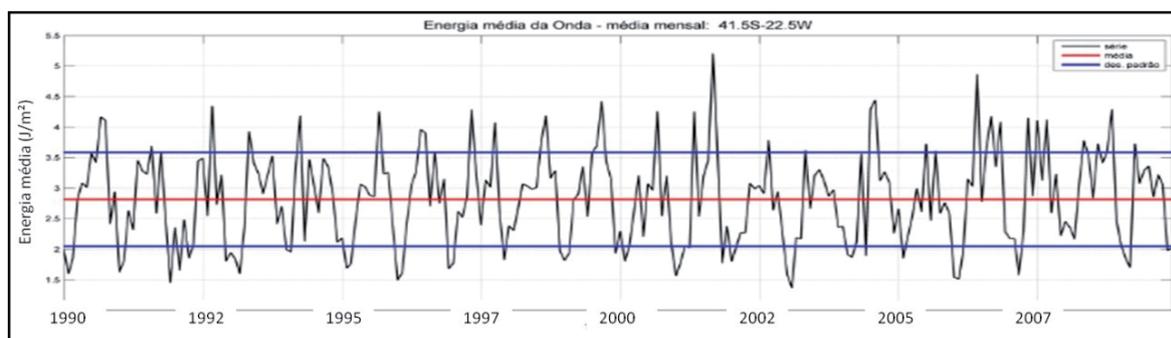


Figura 9 - Média mensal de variação de energia de ondas ao longo do intervalo 1990-2009, em relação ao ponto P2.

A variação mensal de energia do ponto P2 (Figura 9) supõe um padrão oscilatório anual entre um pico de alta, notadamente entre os meses de outono/inverno, e outro de baixa, predominante nos meses de verão. O

ano de 2001 demonstrou um pico de energia superior aos demais, aparentemente no mês de maio, assim como em 2006, de acordo com a energia média anual apresentada na Figura 6.

### 4.1.3 Comparação do Wavewatch III com dados medidos em campo

Na Figura 10 nota-se que os dados modelados apresentam comportamento geral similar aos dados encontrados no ambiente. O índice de correlação linear apresentou valor aproximado de 0.76 para a altura significativa e 0.62 para o período de pico. Apesar da maior correlação com a altura significativa, esse parâmetro apresentou maior superestimação pelo modelo, com diferença média de 0.47 m. O modelo superestimou o período de pico em 0.16 s. Em ambos os casos, a diferença entre os valores médios modelados e amostrados

encontram-se dentro do intervalo de desvio padrão. A direção de pico apresentou a menor correlação, provavelmente devido a influência de ventos locais.

Pode-se notar também variabilidades de alta frequência nos dados da boia que interferem negativamente na correlação entre os dados, que podem ser resultantes de efeitos como não-linearidades não previstas pelo modelo, interferência de marés e marés meteorológicas, diferença no posicionamento geográfico dos dados ou mesmo características do equipamento utilizado na amostragem em campo.

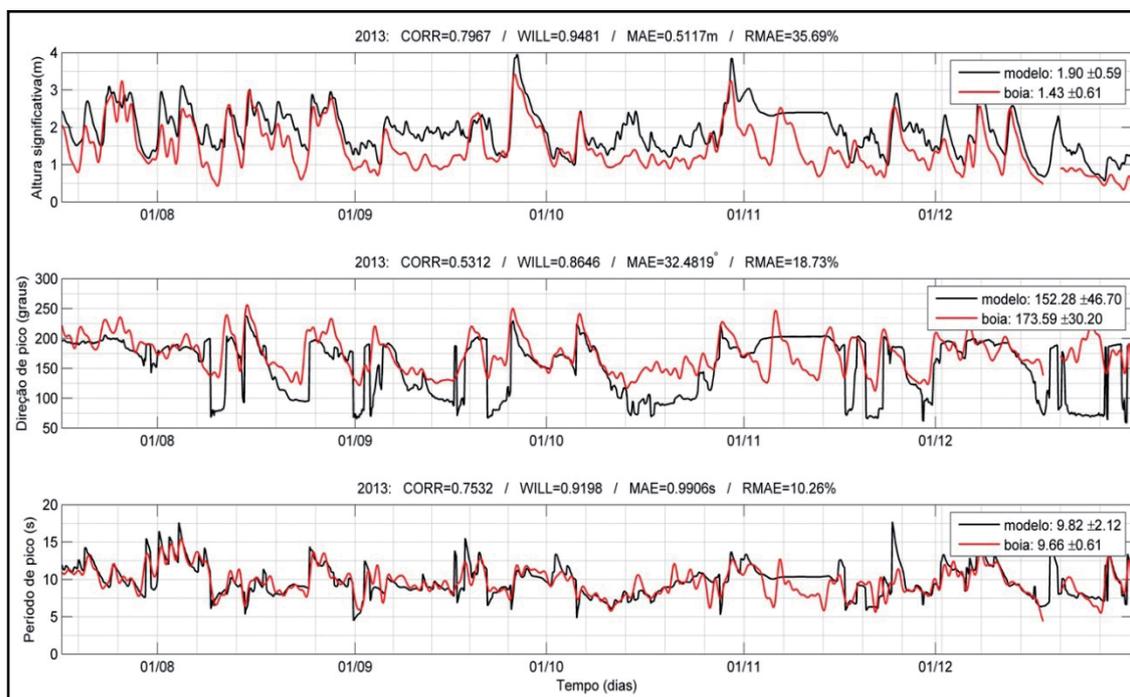


Figura 10 - Análise de correlação estatística entre dados obtidos por boia oceanográfica da Marinha do Brasil em Arraial do Cabo (linha vermelha) e dados obtidos pelo modelo Wavewatch III (linha preta), para Hs, Dp e Tp, para o mesmo local e para o mesmo intervalo de tempo.

### 4.2.1 Influência do clima de ondas na morfodinâmica da Praia de Lagomar

As Figuras de 11 a 15 apresentam a relação entre o clima de ondas detectado pelo modelo para a região de Macaé com os dados dos levantamentos dos perfis da praia do Lagomar.

A Figura 11 demonstra o volume médio acumulado por estação do ano, correlacionada à média da climatologia de ondas para o mesmo período. A estação verão é a que apresenta maior volume acumulado, o que pode ser relacionado às menores alturas de onda na estação e

a melhor distribuição dos eventos entre NE e SE, com menores períodos. As estações de inverno, primavera e outono apresentaram menores volumes acumulados, na mesma medida em que apresentam maiores alturas de onda e maiores períodos, relacionados aos eventos predominantes de SO-SE.

A Figura 12 representa a variação dos volumes e a tendência cíclica de acúmulo e perda de sedimentos ao longo do tempo. Os picos de acúmulo ocorreram predominantemente nos meses de novembro a março, com exceções de junho de 1997 e agosto de 1999 que apresentaram maiores volumes. Os menores volumes

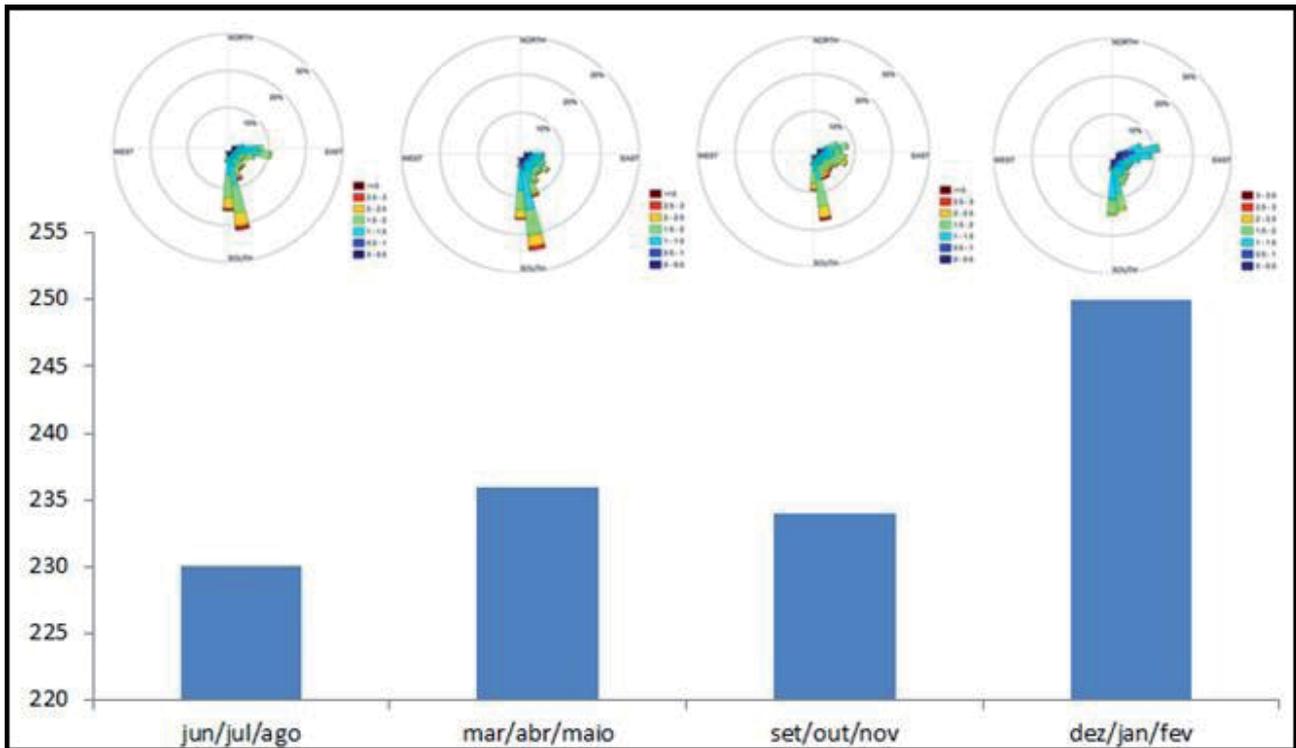


Figura 11 - Volume médio acumulado entre os meses que compõe as estações do ano, com correlação com a rosa de ondas média para o mesmo período. Volume em m<sup>3</sup>.

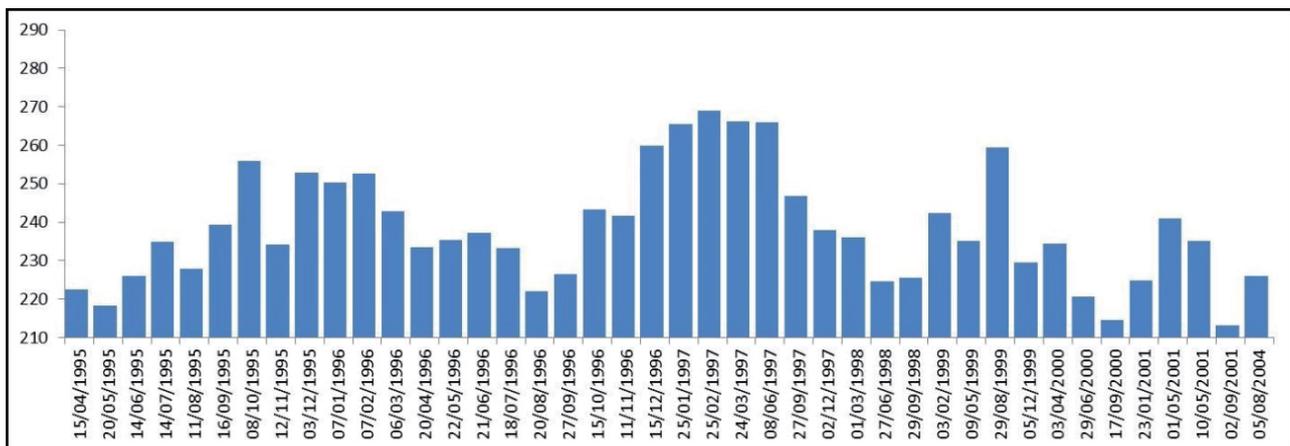


Figura 12 - Volume encontrado por perfil de praia, em relação a todas as datas amostradas. Volume em m<sup>3</sup>.

foram notados nos meses de abril/maio e setembro, o que está de acordo com as maiores alturas e períodos de onda encontrados para estes meses. O volume final acumulado entre o período 1995-2004 foi de - 40 m<sup>3</sup>/m.

A Figura 13 representa a relação entre as alturas médias de onda entre uma data de perfil e outra, e as variações de volume entre os perfis. A altura de ondas é diretamente relacionada à energia hidrodinâmica média entre as datas, aliada ao período de incidências das

ondas e a direção predominante. A partir da Figura 14 é possível observar uma boa correlação negativa entre a variação do volume entre os perfis e as alturas de ondas entre estes períodos. Observa-se que, de maneira geral, à medida que a energia de ondas aumenta, há uma tendência de diminuição de volume do perfil, tal como na série entre os meses de janeiro de 96 e setembro de 96, dezembro de 96 e junho de 98 e dezembro de 99 e maio de 01.

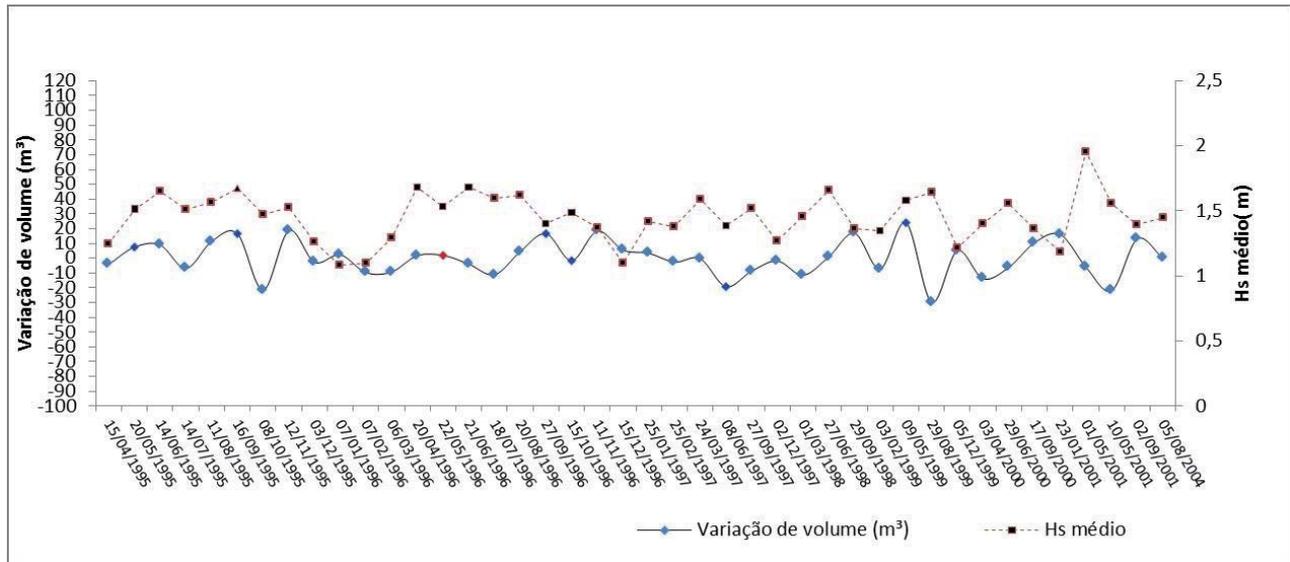


Figura 13 - Gráfico relacionando altura média de ondas entre as datas de medição dos perfis (linha vermelha) e a variação de volume entre as datas (linha preta).

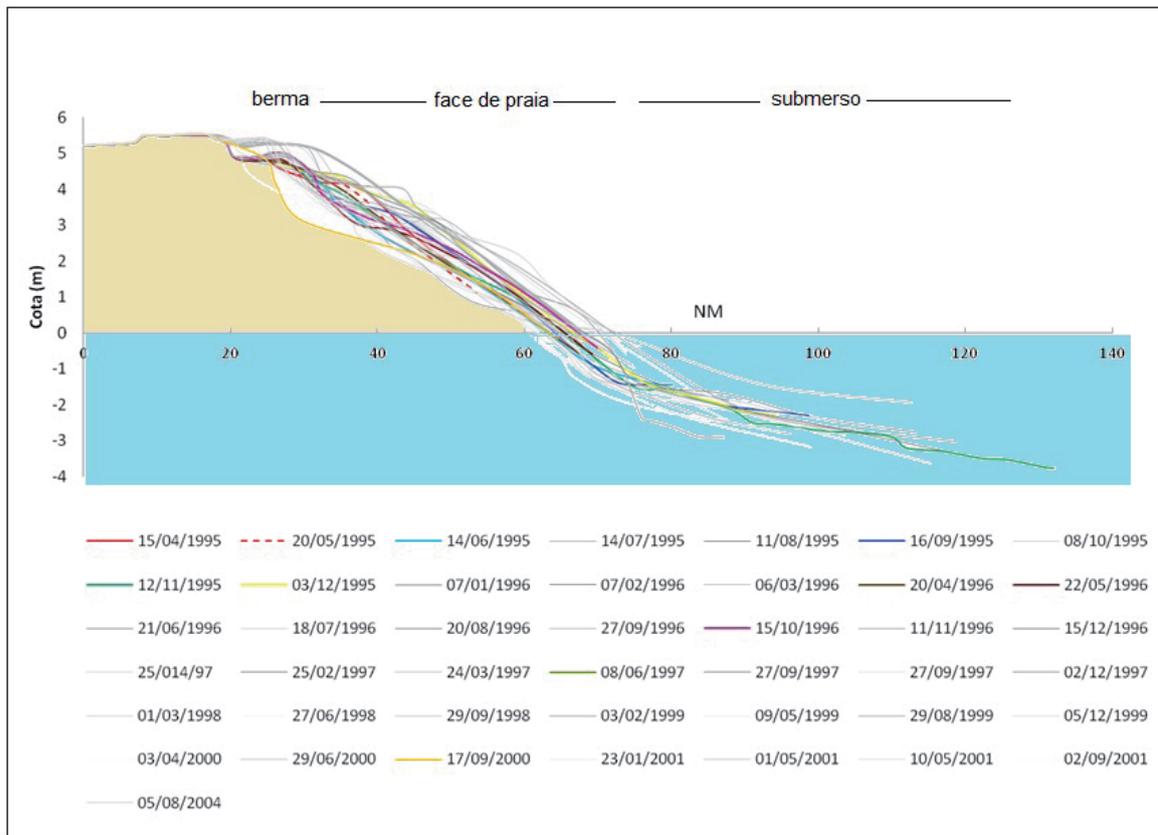


Figura 14 - Perfis topográficos mostrando a variação da praia ao longo do período estudado. As linhas coloridas indicam perfis mais erosivos.

A Figura 14 apresenta a superposição dos perfis de praia demonstrando as variações de volume ao longo do ano. As maiores variações ao longo do perfil ocorreram na face de praia e na região da berma, onde aparecem

variações do escarpamento de aproximadamente 5m, apresentando momentos de progradação e retrogradação, relacionados ao comportamento das ondas e da migração das cúspides praias. Destaque para o perfil

mais erosivo encontrado, de setembro de 2000 no qual o escarpamento da face praial é bastante significativo. Do mesmo modo, para os demais perfis, a região da face apresentou variação de morfologia, de modo geral, mais erosiva nos cenários de maiores ondas. A região

submersa apresenta uma suavização do gradiente de declividade rumo à plataforma interna. Não foi detectada nos perfis a presença de barras submersas, com exceção de novembro de 1995, provavelmente por se tratar de praia predominantemente refletiva.

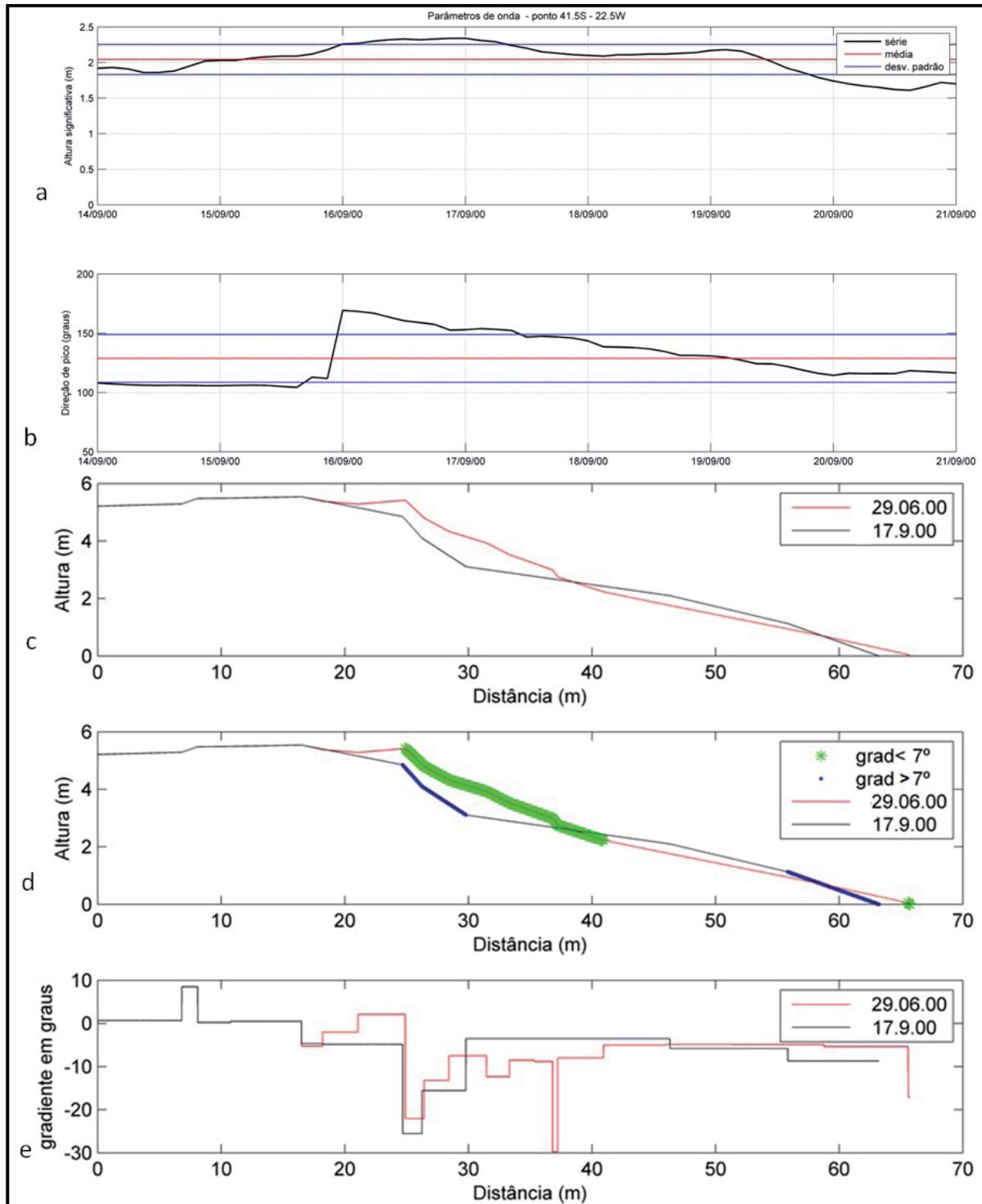


Figura 15 - Relação entre altura das ondas (a), direção de pico (b) e as variações do perfil da praia (c,d,e) para evento de tempestade em setembro de 2000.

A Figura 15 demonstra o escarpamento comparado da berma no perfil entre junho e setembro de 2000, juntamente com o comportamento das ondas para três dias antes e três dias depois da medição do perfil de 17/09. Nota-se que a região já apresentava ondas acima de 2m desde o dia 14/09, chegando ao seu máximo no dia 17/09. É notável a mudança de direção das ondas (16b) a partir do dia 15, de ESE para SSE. Consequentemente, o perfil de setembro demonstra a maior declividade da berma, que passa de menos, para mais de 7° de declividade, como pode ser melhor visualizado na Figura 16c, indicando escarpamento erosivo. Da mesma maneira, a partir da distância de 30m, que representa a região da face de praia, a Figura demonstra um aplainamento de gradiente do perfil de setembro em relação ao de junho, o que contribui para o aspecto erosivo do perfil de setembro em relação ao anterior.

## 5 Discussão

Em termos gerais, o modelo Wavewatch III apresentou resultados coerentes quando comparado a outros trabalhos utilizando o mesmo modelo. Feng *et al.* (2006); Alves *et al.* (2009); e Ostriz, Violante-Carvalho e Cruz (2012), também encontraram resultados satisfatórios quando compararam os dados do modelo com simulações numéricas e dados medidos em campo. Alves *et al.* (2009) encontraram boa relação na análise de correlação de Hs e Tp do Wavewatch III quando comparado a dados medidos em campo na Baía de Campos, com resultado de correlação de até 79%. Marques da Cruz (2004) *apud* Ostriz *et al.* (2012) verificou aceitável relação dos resultados do Wavewatch III em comparação com ondógrafo fundeado em Arraial do cabo, RJ. Do mesmo modo, neste trabalho foi encontrada boa relação entre os dados do Wavewatch III e os dados medidos em campo disponibilizados pela boia, sobretudo para Hs (79%) e Tp (75%), apesar de ter sido detectada superestimação por parte do modelo para Hs (0.4m) e Tp (0.16s). Alves *et al.* (2009) também encontraram mesma ordem de superestimação do modelo em simulação de evento extremo em setembro de 1999.

Os cenários do comportamento de ondas encontrados neste trabalho referentes ao intervalo 1990-2009 apresentaram coerência quando comparados a trabalhos anteriores para a costa do Rio de Janeiro, em especial na Baía de Campos, como em Violante-Carvalho *et al.* (1998); Pereira *et al.* (2000); Pinho (2003) e Alves

*et al.* (2009), onde são observados os eventos de onda provenientes de SSO e SSE, mais frequentes nas estações de outono, inverno e primavera, dotados de maiores alturas de onda e maiores períodos, classificados por Parente (1999) como situações de mau tempo. Do mesmo modo, para os meses de verão foi encontrado clima de ondas menores, com menores períodos e com maior influência de eventos de NNE, caracterizando situação de bom tempo.

A comparação entre os três pontos de dados de saída do modelo na costa (P1, P2, P3) também se mostrou coerente entre si, de maneira que o ponto P1, mais exposto às ondulações dos quadrantes de S e com maior gradiente de declividade da plataforma continental foi o que apresentou maior energia, com maiores alturas de onda e períodos, assim como boa frequência de incidência de eventos de SSO e SSE. Já o ponto P2, nitidamente, apresentou menor energia de eventos de mau tempo, com pouca significativa incidência de ondas de SO, haja vista o sombreamento gerado pela ponta do Cabo Frio. O ponto P3 apresentou energia intermediária entre o P3 e P2, com alguma incidência de eventos de SO e predomínio de SE. Neste sentido, os resultados atestam a importância do grau de exposição da orla costeira no que se refere à vulnerabilidade e sensibilidade da costa em relação a eventos severos.

Uma vez validados os dados do modelo com dados medidos em campo, a resposta morfológica da praia de Lagomar ao clima de ondas se mostrou, em termos gerais, de acordo com a variação das ondas locais, apresentando perfis de deposição e erosão respectivamente de acordo com baixa e alta energia hidrodinâmica do ambiente marinho adjacente. Este modelo de perfil de praia que intercala ciclos de tempo bom e mau tempo é tradicional na literatura sobre o tema (Sonu e Van Beek, 1971; Komar, 1998). No entanto, Muehe e Valentini (1998) observaram perfil deposicional, no mesmo local, no evento de tempestade de junho de 1997.

De fato, a praia apresentou mobilidade moderada em relação aos perfis topográficos, possivelmente por se tratar de praia predominantemente refletiva, de areias mais grossas. Este resultado está de acordo com o encontrado por Bastos (1998) e Muehe e Valentini (1998) sobre a baixa mobilidade da praia. Nas condições de tempo bom, a praia apresenta feições de cúspides praias, o que sugere fluxos transversais mais intensos resultantes da incidência de ondas normais à linha de costa, neste caso, provenientes de E/SE. Neste sentido,

as variações da topografia da face de praia observadas nos perfis podem estar relacionadas à migração lateral das cúspides, notadamente às variações entre crista e cava. No entanto, notou-se boa variação da largura da berma, provavelmente resultado do alcance do espraiamento em momentos de maior energia de ondas, como observado na Figura 15. Possivelmente, a maior erosão encontrada na berma e face do perfil em setembro de 2000, foi consequência de um maior empilhamento de água na costa, originado pela frequência de ondas acima de 2 m e da mudança repentina da direção de proveniência, de ESE para SSE.

De maneira adequada aos perfis, a quantificação da variação de volume se mostrou inversamente proporcional às alturas médias de onda ao longo de todo o intervalo temporal, principalmente nas perdas de maio e setembro, meses com maiores alturas de onda, e nos ganhos dos meses de verão. Com efeito, é comum a ocorrência de ressacas na praia do Lagomar entre os meses de maio a setembro, principalmente provenientes de SE, chegando a ocasionar transposição do espraiamento até a avenida litorânea (Monteiro, 2007). Kowsmann, (1970) *apud* Muehe, (2005), também encontrou maiores picos de erosão nos perfis da praia de Copacabana nos meses de maio e outubro. Muehe (2011) constatou significativa erosão e recuo da duna frontal da praia de Massambaba, RJ, nos eventos de maio/97, maio/00 e maio/01 e Oliveira e Albino (2014) apontam para os prejuízos gerados por forte ressaca em abril de 2010, na costa sudeste do ES.

A relação entre volume acumulado no perfil por estação do ano sugere que na primavera, outono e inverno, a quantidade de volume da praia tende a ser semelhante. Dessa maneira, constatou-se, para o ambiente estudado, a distinção de duas temporadas anuais de energia: uma de baixa, com tendência ao acúmulo de sedimentos, correspondente aos meses de dezembro a março e outra de alta, com tendência a erosão, de abril a novembro.

A resultante final de volume dos perfis, entre as perdas e ganhos ao longo de todo recorte temporal foi de aproximadamente  $-40 \text{ m}^3/\text{m}$ , o que sugere que a praia apresentou uma tendência erosiva ao longo dos 9 anos analisados, coerentemente com o aumento de energia hidrodinâmica anual demonstrado pela análise do ponto P2 (Figura 6). No entanto, as características naturais da praia favorecem uma maior estabilidade e resiliência. De maneira geral, praias formadas por sedimentos de maior granulometria, com maior declividade da face

da praia, tendem a apresentar um padrão mais estável, como sugerido por Bascom (1951), Wiegel (1964) e Short (1999) no que se refere às praias refletivas.

## 6 Conclusões

Uma das conclusões deste trabalho se refere à utilização de dados do modelo Wavewatch III, disponíveis gratuitamente na web, como importante ferramenta para avaliação e diagnóstico da dinâmica costeira. Embora de relativamente baixa resolução espacial e por apresentar resultados para águas profundas, os dados obtidos do modelo se mostraram válidos e coerentes com as situações medidas em campo, e, do mesmo modo, foi possível comprovar a resposta morfológica da praia em relação aos cenários de ondas. Isto pressupõe que, independentemente dos valores exatos referentes ao comportamento das ondas, as situações de maior ou menor energia foram bem detectadas, e com isso, o modelo é passível de ser utilizado em previsões de eventos severos e como critério para gestão costeira.

Em termos gerais a praia do Lagomar apresentou variação moderada em termos de volume do perfil de praia, com boa correlação inversa à energia de ondas local, i.e, quanto maior a energia, menor o volume. A praia apresentou uma tendência erosiva de 1995 a 2004 ( $-40 \text{ m}^3/\text{m}$ ), que pode estar relacionada ao aumento médio de energia anual detectado para a costa centro norte do RJ. No entanto, o monitoramento continuado da praia é fundamental para avaliar se trata-se de um processo de erosão ou tendência de longo prazo. Do mesmo modo, mais estudos envolvendo modelagem de águas rasas e monitoramento do perfil praias submerso seriam essenciais para a obtenção de conclusões mais acuradas, uma vez que a quantificação dos volumes se deu a partir da área da praia emersa.

A estimativa dos parâmetros de ondas ( $H_s$ ,  $T_p$  e  $D_p$ ) deu-se a partir da média destes parâmetros entre as datas dos perfis. Este critério permitiu detectar tendências e variações em escala mensal, geradas por possíveis agrupamentos de tempestades ou maiores períodos de duração de tempestades individuais, assim como o predomínio de situações de tempo bom. No entanto, é sabido que o ambiente praias responde, muitas vezes, de forma instantânea (horas e dias) às variações no clima de ondas, com possível perda ou recomposição rápida do perfil. Tais eventos possivelmente foram diluídos a partir do cálculo das médias mensais.

## Agradecimentos

Os autores agradecem ao Centro de Aperfeiçoamento de Pessoal de Ensino Superior (CAPES) pelo suporte à pesquisa e ao Programa de Suporte à Pesquisa e Desenvolvimento da MAG - Mar, Ambiente e Geologia (PSPD/MAG), setor responsável pelo financiamento, incentivo e cessão da estrutura física para o desenvolvimento e tratamento de dados.

## Referências Bibliográficas

- ALVES, J.H.G de M; RIBEIRO, E.O; MATHESON, G.S.G; LIMA, J.A.M.; RIBEIRO, C.E.P. **Reconstituição do clima de ondas no Sul e Sudeste brasileiro entre 1997 e 2005**. Revista Brasileira de Geofísica, v. 27, p. 427-445. 2009.
- BASCOM, W. N. **The Relationship between sand size and beach face slope**. Transaction, American Geophysical Union, v. 32, n. 6, Dec. 1951.
- BASTOS, A.C; SILVA, C.G. **Caracterização Morfodinâmica do Litoral Norte Fluminense, RJ, Brasil**. Revista Brasileira de Oceanografia, v. 48(I), p. 41-60. 2000.
- CANDELLA RN, GROSSMANN GS; QUENTAL SHAJ. **Reconstituição de condições de onda no oceano Atlântico Sul com a utilização do modelo de Terceira geração**. Revista de Pesquisa Naval, v. 12, p. 123-134. 1999.
- CHAWLA, A; SPINDLER, A; TOLMAN, H. **30 Year Hindcasts using Wavewatch III with CFSR winds. Phase 1**. Technical Note. 2012. Disponível em: [http://polar.ncep.noaa.gov/mmab/papers/tn302/MMAB\\_302.pdf](http://polar.ncep.noaa.gov/mmab/papers/tn302/MMAB_302.pdf). Acessado em ago/2014.
- FENG, H., VANDERMARK, D., QUILFEN, Y., CHAPRON, B., BECKLEY, B. **Assessment of wind -forcing impact on a global wind-wave model using the TOPEX altimeter**. Ocean Engineering, v.33, p. 1431-1461. 2006.
- HASSELMAN, K. **On the non-linear transfer in a gravity wave spectrum, Part 3. Evaluation of energy flux and swell interactions for a Neuman spectrum**. Journal of Fluid Mechanics, v. 15, p. 385-398. 1963.
- KOMAR, P. D.; **Selective Longshore Transport Rates of Different Grain-Size Fractions within a Beach**. Journal of Sedimentary Petrology, v. 47, n. 4, p.1444-1453. 1977.
- KOMAR, P. **Beach processes and sedimentation** (2nd Edn.) New Jersey: Prentice Hall. 1998.
- MONTEIRO, M. I. **Avanço do mar destrói parte da Avenida Atlântica e preocupa moradores do Barreto**. Disponível em : <http://www.macaee.rj.gov.br/noticias/leitura/noticia/avanco-do-mar-destrui-parte-da-avenida-atlantica-e-preocupa-moradores-do-barreto>. Acesso em: 17/02/2015.
- MUEHE, D. **Estado morfodinâmico praias no instante da observação: uma alternativa de identificação**. Revista Brasileira de Oceanografia, v. 46, n. 2, p. 157-169. 1998a.
- MUEHE, D. **Morfodinâmica de praias e meio-fauna no litoral centro oriental do Rio de Janeiro**. Projeto FUJB/Geociências/Petrobras. Contrato Petrobras no 650.2.127.949; Proc. FUJB 5541-7. Relatório técnico não publicado. 1998b.
- MUEHE D.; VALENTINI E. **O Litoral do Estado do Rio de Janeiro: uma caracterização físico-ambiental**. (Ed.): FEMAR. Rio de Janeiro, 99 p. 1998.
- MUEHE, D. **Geomorfologia Costeira**. In: GUERRA, A. J.T.; CUNHA, S. B. (Org.). Geomorfologia: uma atualização de bases e conceitos. 6. Ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2005.
- MUEHE, D. **Erosão costeira - Tendência ou eventos extremos? O litoral entre Rio de Janeiro e Cabo Frio, Brasil**. Revista da Gestão Costeira Integrada, v. 11, n. 3, p. 315-325. 2011.
- OLIVEIRA, L.A.K; ALBINO, J. **Mobilidade e erosão da enseada da praia do morro, Guarapari - ES, em diferentes escalas de tempo**. Revista Brasileira de Geomorfologia, v. 15, n.1. 2014.
- OSTRIZ, F.F; VIOLANTE-CARVALHO, N; CRUZ, L.M.M. **Estimativas de um modelo de geração e propagação de ondas empregando campo de vento com diferentes resoluções espaciais e temporais**. Revista Brasileira de Meteorologia, v27, n.3, 315-328, 2012.
- PARENTE, C. E. **Contribuições ao Conhecimento das Ondas na Costa Brasileira**. Relatório COPPE/UFRJ, Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE. 1998.
- PARENTE, C. E. **Uma Nova Técnica Espectral para Análise Direcional de Ondas**. Tese D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil. 1999.
- PEREIRA, J; CANDELLA, R.N; CARVALHO, J.L.B. **O clima de ondas na costa sul de Arraial do Cabo, RJ: Distribuição do parâmetro de onda**. Notas Técnicas FACIMAR, 4: 1-9, 2000.
- PINHO, U. F. **Caracterização dos Estados de Mar na Bacia de Campos**. Dissertação M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil. 2003.
- SHEPARD, F.P. **Beach cycles in Southern California**. U.S. Army Corps of Engineers. Beach Erosion Board Technical Memorandum, n. 20. 1950.

SHORT, A.D. **Handbook of beach and shoreface morphodynamics**. London: John Wiley & Sons Ltd. 1999.

SONU, C. J.; VAN BEEK, J. L., **Systematic beach changes on the outer banks**, North Carolina. *Journal of Geology*. USA, v. 79, p. 416-425, 1971.

TOLMAN, H. L. **User Manual and System Documentation of WAVEWATCHIII version 3.14**. U. S. Department of Commerce. National Oceanic and Atmospheric Administration. National Weather Service. National Centers for Environmental Prediction. Technical Note. 2009.

TUCKER, M.J; PITT, E.G. **Waves in ocean engineering**. New York: Elsevier, 2001.

VIOLANTE-CARVALHO, N., **Investigação sobre a evolução do clima de ondas na Baía de Campos e a correlação com as situações meteorológicas associadas**. Dissertação de Tese de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE. 186p. 1998.

WIEGEL, R.L. **Oceanographical Engineering**. Prentice Hall, Englewood Cliffs, N.J 532p. 1961.