

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS**

**ESTUDO DA VARIABILIDADE DE ONDAS NO OCEANO  
ATLÂNTICO SUL E A CONTRIBUIÇÃO ENERGÉTICA DE UM  
CICLONE EXTRATROPICAL INTENSO NOS ESPECTROS DAS  
ONDAS AO LARGO DO RIO GRANDE DO SUL**

**CLÁUDIA KLOSE PARISE**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS**

**ESTUDO DA VARIABILIDADE DE ONDAS NO OCEANO  
ATLÂNTICO SUL E A CONTRIBUIÇÃO ENERGÉTICA DE UM  
CICLONE EXTRATROPICAL INTENSO NOS ESPECTROS DAS  
ONDAS AO LARGO DO RIO GRANDE DO SUL**

**CLÁUDIA KLOSE PARISE**

**ORIENTADOR:**

Prof. Dr. LEANDRO FARINA

**BANCA EXAMINADORA:**

Prof. Dr. Elírio Ernestino Toldo Jr. (UFRGS)

Prof. Dr. Ivan Dias Soares (FURG)

Prof. Dr<sup>a</sup>. Rita de Cássia Marques Alves (UFRGS)

Dissertação de Mestrado apresentada como  
requisito para obtenção do Título de Mestre  
em Geociências (Área: Geologia Marinha).

## AGRADECIMENTOS

Penso que este seja o único espaço reservado para o pesquisador expor todo e qualquer sentimento, seja ele bom ou ruim. Falo isso porque nesse momento finalizo minha dissertação com a cabeça recheada de pensamentos e não saberia dizer se com mais dúvidas ou respostas. A culpa disso tudo é dela, da Ciência. O prazer em adquirir conhecimento acaba por tornar tudo científico, digno de provas, e ao mesmo tempo fascinante. Agora acho que não tem mais jeito, entreguei-me a Ciência.

Finalizo muito feliz esta etapa da minha formação de pesquisadora e gostaria de fazer alguns agradecimentos.

Os ciclones extratropicais, os espectros de energia e a propagação das ondas para regiões litorâneas realmente me fascinam. E em relação a isso devo agradecer e muito ao meu orientador Prof. Leandro Farina pela valiosa troca de conhecimentos, pelas reuniões semanais para resolver problemas de programação e a tamanha paciência em olhar as figuras dos padrões espaciais. Muito obrigada Leandro.

Gostaria de agradecer aos meus amigos oceanólogos e colegas do PPGEO pela amizade, pelas eventuais sugestões dadas ao trabalho, pela companhia do cafezinho e pelos momentos de descontração. Gabi, Felipe, Thunder, Bóris, Heitor, Edu, Luana, Suélen, Dominício, Cris e Miguel obrigada por proporcionarem um ótimo ambiente de trabalho.

Não poderia deixar de agradecer a saída de campo da disciplina de ‘Tectônica de bacias sedimentares’ onde pude conhecer a geologia e os processos de formação da Cordilheira do Andes. Um lugar com muita história e beleza.

Um muito obrigado especial ao Leonardo Gonçalves de Lima, O amigo, O companheiro, O amor. Agradeço o carinho, as conversas, os passeios, as corridas e as comidas macros.

Queria agradecer por toda força que recebi da minha família, por acreditarem em mim e por aceitarem a minha escolha. Obrigada por sempre me ajudarem.

E por fim, agradeço ao Programa de Pós-Graduação em Geociências e à Universidade Federal do Rio Grande do Sul por me permitir fazer parte da sua história.

## RESUMO

Devido à escassez de instrumentos de medição de onda bem como a grande dificuldade e os altos custos de coleta em regiões oceânicas, a modelagem numérica tem se tornado uma ferramenta bastante útil no estudo de comportamento de ondas costeiras e de oceano profundo. No presente trabalho foi utilizado um modelo numérico global (*WAM*) para obtenção de dados (modelados) de onda no Oceano Atlântico Sul entre junho de 2006 e julho de 2007. Foram aplicadas as análises *EOF* e *SVD* para agrupar as ondas em modos principais de variabilidade espaço-temporais. Em ambas as análises foram obtidos quatro modos principais de variabilidade de todas as variáveis analisadas, sendo que a maior correlação encontrada foi entre o *swell* e o período de pico. Os padrões espaciais mostraram a contribuição do *swell* oriundo dos oceanos Pacífico e Índico se propagando no Oceano Atlântico Sul. Foi observado, também, fortes relações entre a variabilidade das ondas e as variáveis atmosféricas de pressão e vento a 10 m de altura. Posteriormente, foi utilizado o mesmo modelo para geração dos espectros de onda durante um estudo de caso de um ciclone extratropical intenso no Oceano Atlântico Sul. Foram selecionados pontos no centro e na periferia do ciclone ao longo da sua trajetória a fim de investigar a presença de interação não linear onda-onda (ressonância) e três pontos *offshore* à Praia do Cassino com o intuito de estimar a contribuição de energia oriunda do ciclone. A máxima energia espectral no centro do ciclone ocorreu às 21h do dia 01 de setembro e na região *offshore* à Praia do Cassino o pico ocorreu nas 48 h seguintes. Na maioria dos espectros a densidade espectral foi maior à esquerda do ciclone o que torna válida a hipótese de ocorrência de ressonância nessa região. Assumindo esse evento como extremo em uma escala anual, é possível concluir que um evento de ciclone extratropical de mesma magnitude venha contribuir com mais de 70% da sua energia nos espectros de onda ao largo da costa do Rio Grande do Sul.

## **ABSTRACT**

Due to the shortage of measurement instruments of wave besides the many difficulties and the high price of data acquisition in oceanic regions, the numerical modeling has been came a useful tool in studies of coastal and ocean deep wave behavior. In this paper was employed a numerical global model (WAM) to obtain the wave data in the South Atlantic Ocean from June 2006 to July 2007. In order to group the waves in leading modes of spatial-temporal variability was applied the EOF and SVD statistic methods. In both analyses were obtained four principal modes of variability for all variables analyzed, where the biggest correlation found was between swell and peak period. The spatial patterns showed the contribution of swell from the Pacific and Indic oceans propagating on the South Atlantic Ocean. Strong relations between the wave variability and atmospheric fields like sea level pressure and wind speed at 10 m height. Later, the same model was used to generate the wave spectra during a case study of intense extratropical cyclone over the South Atlantic Ocean. Points in the center and periphery of cyclone following its track were selected in order to investigate the presence of non-linear wave-wave interaction (resonance) and others three offshore points to the Cassino Beach to estimate the energy contribution from this cyclone. The maximum spectral energy at the cyclone core occurred on September 01 and at the Cassino Beach offshore point just 48h after. In the majority of spectra the energy was greater at the left side of cyclone what become valid the assumption of resonance in the region. Taking this cyclone event like extreme in the annual scale is possible to conclude that a event of extratropical cyclone with the same magnitude can contribute with more that 70% from its energy over the wave spectra in offshore region of Rio Grande do Sul coast.

## SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS

RESUMO

ABSTRACT

<b>I. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>8</b>
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	17
<b>II. CORPO PRINCIPAL.....</b>	<b>21</b>
<b>CAPÍTULO 1.....</b>	<b>21</b>
ABSTRACT.....	22
1. INTRODUCTION.....	23
2. METODOLOGY.....	25
2.1. Wave generation model (WAM - Wave Model) .....	25
2.1.1 Implementation of the wave model.....	25
2.2. Data processing with EOF.....	26
2.2.1. Spatial patterns.....	26
2.2.2. Time series.....	27
2.3. Analysis of SVD (Singular Value Decomposition) .....	28
2.3.1. Data processing with DVS method.....	28
3. RESULTS AND DISCUSSIONS.....	29
3.1. Spatial-temporal means.....	29
3.2. Spatial-temporal variability of each variable.....	30
3.2.1. Significant wave height ( $H_s$ ).....	30
3.2.2. Velocity of the wind at height 10 meters ( $U_{10}$ ).....	32
3.2.3. Swell.....	35
3.2.4. Peak period ( $T_p$ ).....	37
3.3. Spatial-temporal variability of coupled fields.....	38
3.3.1. Between <i>swell</i> and $T_p$ .....	38
3.3.2. Between $H_s$ and $T_p$ .....	40
3.3.3. Between $U_{10}$ e $H_s$ .....	42
4. CONCLUSIONS.....	43
5. REFERENCES.....	44
<b>CAPÍTULO 2.....</b>	<b>46</b>
RESUMO.....	47
1. INTRODUÇÃO.....	48
2. METODOLOGIA.....	49
2.1. Modelo de geração de onda.....	49
2.2. Estudo de caso.....	50
2.3. Experimento.....	51
3. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	52
3.1. Centro e periferia do ciclone.....	52
3.2. Região ao largo da costa do RS.....	55
4. CONCLUSÕES.....	59
5. REFERÊNCIAS.....	60
<b>III. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>62</b>
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	65

## **ESTRUTURAÇÃO DA DISSERTAÇÃO**

A presente dissertação de mestrado foi redigida na forma de artigos científicos, onde os mesmos foram apresentados como capítulos da dissertação. Segue a seguir a estruturação da dissertação:

### **I. INTRODUÇÃO**

Abrange ‘*o estado da arte*’ da climatologia de ondas e da ciclogênese no Oceano Atlântico Sul, além da descrição geral dos objetivos e as referências bibliográficas utilizadas.

### **II. CORPO PRINCIPAL**

Serão apresentados dois artigos científicos, o primeiro redigido em inglês (CAPÍTULO I) e o segundo em português (CAPÍTULO II).

O primeiro capítulo é composto pelo artigo intitulado: “SEASONAL VARIABILITY OF OCEAN SURFACE WAVES IN THE SOUTH ATLANTIC OCEAN BASED ON NUMERICAL MODELLING, EMPIRICAL ORTHOGONAL FUNCTION AND SINGULAR VALUE DECOMPOSITION”. Esse artigo foi encaminhado a *Ocean Modelling*.

O segundo capítulo é composto pelo artigo intitulado: “ANÁLISE DOS ESPECTROS DE ONDA GERADOS POR UM CICLONE EXTRATROPICAL INTENSO NO OCEANO ATLÂNTICO SUL E A CONTRIBUIÇÃO ENERGÉTICA PARA AS ONDAS NA REGIÃO AO LARGO DA COSTA DO RIO GRANDE DO SUL”. Esse artigo será traduzido para o inglês e posteriormente encaminhado ao *Journal of Physical Oceanography*.

### **III. CONSIDERAÇÕES FINAIS**

Inclui a justificativa e aplicabilidade do trabalho e as referências bibliográficas utilizadas.

## I. INTRODUÇÃO

Ondas oceânicas são deformações na superfície do mar resultantes da transferência de *momentum* entre dois fluidos de densidades diferentes causada pelo atrito do vento com a camada superficial do oceano. Ondas de gravidade superficiais, por sua vez, têm grande importância no transporte da energia no mar exercendo importante papel na determinação das feições costeiras e constituindo-se em um agente erosivo em potencial, podendo ameaçar obras costeiras, a segurança da navegação e as operações navais.

A quantidade de energia transferida da atmosfera para o oceano é proporcional à intensidade, duração e ao tamanho da pista de vento (*fetch*) e inversamente proporcional à velocidade de deslocamento do centro de baixa pressão atmosférica. Dessa maneira, as maiores alturas de ondas são geradas na região de influência dos ciclones onde mais energia é transferida, tornando-os fenômenos meteorológicos sinóticos de fundamental importância no estudo de geração e propagação de ondas oceânicas. A combinação drástica para a geração de um estado de mar extremo é a presença de vento intenso com direção mais ou menos fixa, atuando por um longo tempo em uma grande área sob um ciclone que se desloca lentamente sobre o oceano. Ou seja, quanto mais lentamente o ciclone se desloca, mais energia é transferida para o oceano, conseqüentemente, maior a altura de onda (LUI *et al.* 2007).

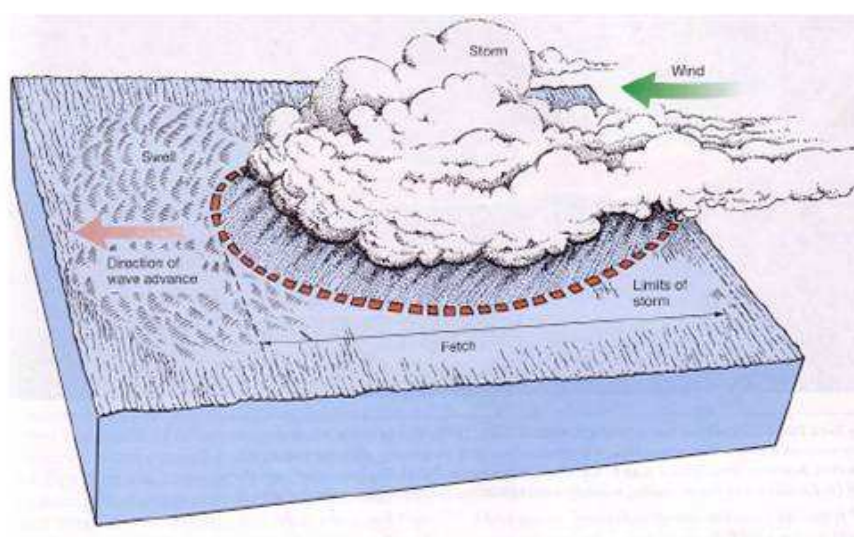


Figura I: Área de Geração e Propagação das Ondas de Gravidade. Modificado de THURMAN e TRUJILLO (1997).



Devido à grande interação e ligação entre os processos atmosféricos e as camadas superficiais do oceano, e levando em consideração que as maiores ondas são geradas por ventos intensos oriundo de ciclones extratropicais, a seguir é apresentado um breve histórico dos estudos sobre circulação atmosférica e ciclogênese no Oceano Atlântico Sul.

A circulação atmosférica superficial e o comportamento dos sistemas de pressão atmosférica em latitudes médias do hemisfério sul começaram a ser descritas no início do século XX, utilizando-se de cartas geográficas e observações de navios (MEINARDUS e MECKING (1911) e MEINARDUS (1929) *apud* TALJAARD (1967)). Porém, a descrição da distribuição de frentes, distribuição meridional de ciclones, ciclogênese e anticiclones no hemisfério sul foram iniciadas somente por VAN LOON (1965), no ano geofísico internacional (*IGY = International Geophysical Year*).

TALJAARD (1967) definiu anticiclones e ciclones como sistemas de alta e baixa pressão com pelo menos uma isóbara fechada, respectivamente, e a temperatura do ar e da água com sendo a variável mais importante no estudo da circulação atmosférica. O autor mostrou que anticiclones encontram-se bem definidos no cinturão de alta pressão atmosférica limitado entre 23 e 43° S, sendo mais numerosos ao redor dos 36° S no verão, dos 32° S no inverno e dos 34° S na estações intermediárias. A variação de frequência de ocorrência pode ser atribuída principalmente às variações nas velocidades dos sistemas em diferentes áreas. Nos locais onde os sistemas se movem mais lentamente as frequências de ocorrência são altas, como no lado leste dos oceanos, porém, onde os sistemas avançam rapidamente, são menos frequentes. A ciclogênese, para o referido autor, é mais freqüente entre as latitudes de 35 e 55° S, com o núcleo quente permanecendo em torno de 45° S em todas as estações. TALJAARD (*op. cit.*) concluiu que o lado oeste dos oceanos subtropicais é mais favorável para a ciclogênese que o leste que é ocupado, a maioria do tempo, por anticiclones estáveis que se movem lentamente.

Desde o início da década de 90, ciclones extratropicais no Oceano Atlântico Sul estão sendo estudados devido a sua alta frequência e intensidade. Trabalhos como o de GAN e RAO (1991), MURRAY e SIMMONDS (1991a e 1991b), JONES e SIMMONDS (1993), SINCLAIR (1994), SINCLAIR (1995), RAO *et al.* (2002), REBOITA *et al.* (2005) e PARISE *et al.* (2009) também contribuíram no melhor entendimento desses sistemas.

GAN e RAO (1991) identificaram duas regiões ciclogênicas no hemisfério sul, uma na Argentina sobre o Golfo de São Matias (42,5° S e 62,5° W), explicada pela instabilidade baroclínica dos ventos de oeste e outra sobre o Uruguai (em torno de 31,5° S e 55° W), associada à presença da Cordilheira dos Andes.

MURRAY e SIMMONDS (1991b) utilizaram um esquema automático (descrito em MURRAY e SIMMONDS, 1991a) baseado em mínimos de pressão ao nível médio do mar para detectar os sistemas. Os resultados obtidos foram comparados com os de outros pesquisadores que utilizaram dados de reanálise. MURRAY e SIMMONDS (1991b) notaram um máximo de atividade ciclônica nos oceanos de latitudes altas, principalmente em torno de 60° S, além de grande densidade de sistemas na costa leste dos continentes. Observaram algumas características nos ciclones como: movimento para leste ou sudeste com maior velocidade nas latitudes médias (entre 40° e 50° S) e ciclólise mais freqüente ao sul de 60° S. A diferença desse trabalho pra os anteriores é a localização do máximo de atividade ciclônica em 60° S e não em 45° S.

Posteriormente, REBOITA *et al.* (2005) identificaram uma terceira região ciclogênica na costa sul e sudeste do Brasil, situada entre 20° e 35° S (Fig. II).

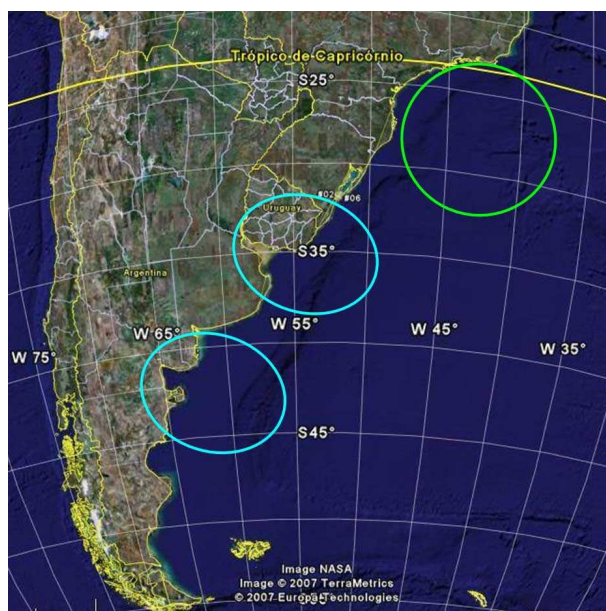


Figura II: Áreas de ciclogênese no Oceano Atlântico Sul. Em azul descrito por GAN e RAO (1991) e em verde por REBOITA *et al.* (2005). Fonte: Modificado de PARISE (2007).

PARISE *et al.* (2009) monitoraram os ciclones extratropicais associados a eventos de marés meteorológicas na Praia do Cassino (RS) em 2006 e 2007 e

encontraram três padrões de trajetórias baseadas no mínimo de vorticidade relativa no centro do ciclones: 1) PADRÃO I: Ciclogênese ao sul da Argentina com deslocamento para leste e trajetória entre 47.5° S e 57.5° S; 2) PADRÃO II: Ciclogênese ao sul do Uruguai com deslocamento para leste e trajetória entre 35° S e 42.5° S; 3) PADRÃO III: Ciclogênese ao sul do Uruguai com deslocamento para sudeste e trajetória entre 35° S e 57.5° S.

As ondas quando geradas no campo de atuação dos ventos dos ciclones são denominadas vagas (*sea*) e apresentam diferentes alturas e períodos, formando vários componentes de um espectro de ondas. Quando o vento não mais atua ou quando as ondas se afastam da área de geração, as de períodos semelhantes agrupam-se e passam a viajar com a mesma velocidade, conhecida como velocidade de grupo. Essas ondulações de longo período (*swell*) possuem alturas e distâncias entre as cristas mais regulares, viajam mais rápido que ondas de pequeno período (*sea*) e podem percorrer longas distâncias até atingir a costa (KOMAR, 1998).

Devido à escassez de dados de ondas oceânicas, muitas vezes decorrente da falta de equipamentos e/ou inviabilidade de coleta *in situ*, a modelagem numérica vem se tornando uma excelente ferramenta de investigação, viabilizando estudos de ondas e contribuindo para a automatização das previsões numéricas.

Embora não haja um estudo sistemático do clima de ondas em todo o domínio do Oceano Atlântico Sul, alguns trabalhos foram realizados buscando caracterizar regiões específicas da costa brasileira.

MELO FILHO *et al.* (1991) e ALVES (1991) caracterizaram, respectivamente, o clima de ondas e a ocorrência de ondulações longínquas na costa do Rio de Janeiro. Em MELO FILHO (1993) uma metodologia de observação visual de ondas, ventos e correntes foi proposta através do Projeto Sentinelas do Mar. Posteriormente, o mesmo autor investigou a chegada de *swell* na costa do Ceará oriundo do Oceano Atlântico Norte (MELO FILHO *et al.*, 1995).

COLI e MATA (1996) caracterizaram as alturas de onda no Oceano Atlântico Sul Ocidental entre as latitudes de 25° S e 45° S e longitudes de 30° W e 66° W utilizando-se de altimetria por satélite e encontraram ondas menores próximas à costa e linhas de mesma altura de onda ao largo da Argentina mais distantes da costa quanto menor a latitude.

BRANCO *et al.* (2004) investigaram a contribuição do *swell* para a clima de ondas no litoral brasileiro e notaram que a formação de um ciclone na porção sul do

continente africano no mês de maio foi responsável pela chegada de *swell* na região sudeste do Brasil com altura significativa de aproximadamente 1 m e períodos de 14 s a 15 s.

ALVES (2006) realizou um estudo sobre a contribuição do *swell* no clima de ondas global, definindo as áreas potenciais para geração de *swell* e realizando experimentos nos quais os campos de vento foram mantidos ativos em cada área, individualmente, enquanto o vento do resto do domínio foi desligado. Isso permitiu que ondas geradas nas áreas selecionadas se propagassem livremente como *swell* até outras regiões do globo. Segundo o autor, o *swell* oriundo do Pacífico Sul Extratropical penetra no Oceano Atlântico e interferem no clima de ondas da região sul e sudoeste. O *swell* do Índico Sul Extratropical também se propaga para o Atlântico e, devido à persistência de 30 a 180 dias, acabou contribuindo com 0,5 m a 1 m de altura de onda no centro do Atlântico Sul. ALVES (*op. cit.*) conclui ainda que a distribuição global dos continentes seja fator principal para determinar o impacto do *swell* no clima de onda global e que o *swell* gerado em áreas extratropicais do oceano austral espalha energia em todo o oceano global e é componente potencialmente importante no clima de ondas da maioria das bacias oceânicas em ambos os hemisférios.

LUI *et al.* (2007) analisaram a influência da variabilidade espaço-temporal dos ventos gerados por furações e da velocidade de deslocamento de tempestade (VDT) sobre as ondas superficiais no Oceano Atlântico Norte utilizando o modelo de água rasa SWAN. Esses pesquisadores analisaram as alturas significativas das ondas ( $H_s$ ) em duas regiões a uma distância de 300m do centro do ciclone cada, uma localizada a  $45^\circ$  do eixo da trajetória do ciclone, ou seja, a NE (Ponto A) e outra localizada a  $235^\circ$  do eixo da trajetória do ciclone, ou seja, a SW (Ponto B) (Fig. III). Os autores encontraram que com o aumento da velocidade de deslocamento da tempestade a  $H_s$  aumenta e diminui nos Ponto A e B, respectivamente (Fig. IV). Quando a VDF aumenta até 12 m/s a  $H_s$  aumenta no Ponto A, mas quando a VDT excede 13m/s a  $H_s$  começa a decrescer. LUI *et al.* (*op. cit.*) explicou esse fato pela teoria de ressonância proposta por KING e SHEMDIN (1978) e elaborada por YOUNG (1988), BOWYER e MACAFEE (2000) e MOON *et al.* (2003). Segundo esses autores, ondas a direita da trajetória da tempestade estão expostas a forçantes prolongadas do vento e como a VDT torna-se comparável à velocidade de grupo das ondas dominantes, o *swell* gerado anteriormente fica trapeado no domínio da tempestade e acaba interagindo com as ondas geradas localmente. Esse processo acontece pela interação não linear onda-onda,

conhecido na literatura com ressonância. Porém, quando a VDT torna-se maior que a velocidade de grupo a onda a direita da trajetória não se encontra mais trapeada. Assim o *swell* gerado no Ponto A não está mais interagindo com as ondas geradas pela tempestade, ou seja, não há mais ressonância e a energia de onda começa a diminuir.

No evento estudado por LUI *et al.* (2007) a  $H_s$  começa a diminuir quando a VDT atinge 13 m/s já que a velocidade de grupo das ondas dominantes foi de 12,3 m/s e período de 16 s.

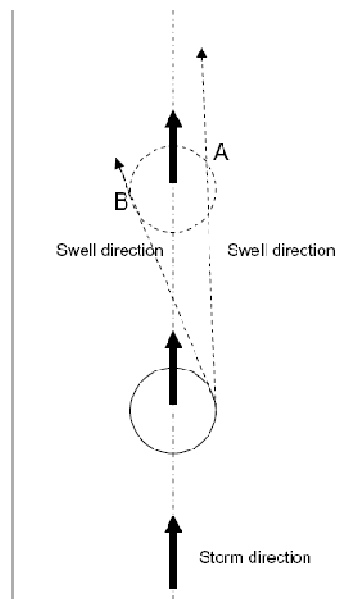


Figura III: Esquema da propagação do *swell* (nos pontos A e B) em direção tangencial ao círculo de 300 de raio, na posição anterior à chegada da tempestade. Extraído de LUI *et al.* (2007).

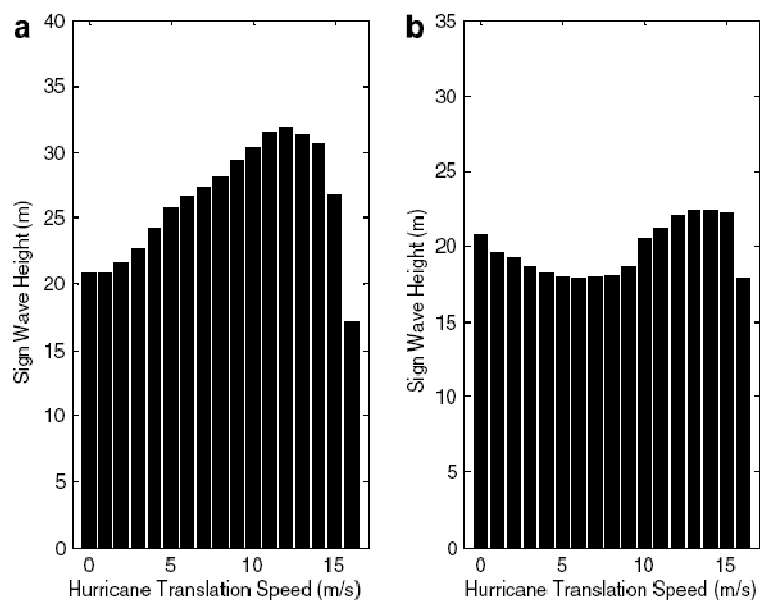


Figura IV: Altura de onda significativa geradas por furacões assimétricos movendo-se com diferentes velocidades de deslocamento nos pontos A e B. Extraído de LUI *et al.* (2007).

Recentemente, MELO FILHO *et al.* (2008) realizaram um estudo de caso de um evento de intenso *swell* aninhando um modelo global (*Wave Watch 3 - WW3*) a um regional (*RefDif*) a fim de avaliar o impacto nas regiões ao largo de Florianópolis (SC) e Vitória (ES). Os autores mostraram que, embora 3000 km separassem o núcleo da tempestade da costa, *swell* gerado pelo ciclone extratropical monitorado alcançaram a plataforma brasileira com alta energia. Esse ciclone formou-se em 31 de maio e alcançou à costa brasileira dia 03 de junho, ou seja, com uma defasagem de três dias. A máxima altura de onda no centro do ciclone simulada pelo *WW3* foi de 16 m, em Florianópolis de 4,3 m e período de 16 s e em Vitória onda de 5,3 m e período de 16 s, ou seja, altura de onda maior no ES que em SC, aparentando certa estranheza se comparado ao que se conhece na literatura. Os autores, entretanto, atribuíram esse fato à posição e trajetória do ciclone no oceano.

As aplicações de um modelo de ondas, no entanto, não estão restritas apenas à prognose. Forçado por dados pretéritos de vento, coletados por períodos suficientemente longos, os modelos podem auxiliar nos estudos relacionados à erosão costeira e transporte de sedimentos, estimativa da energia, reconstituição de eventos extremos, como furacões ou tempestades, projetos de portos e estruturas costeiras e oceânicas como plataformas de exploração de petróleo (WMO, 1988).

Em decorrência da pequena quantidade de estudos sobre ondas oceânicas em larga escala para o Hemisfério Sul, a presente dissertação vem contribuir com a investigação do comportamento de ondas de gravidade no domínio do Oceano Atlântico Sul buscando encontrar padrões de variabilidade espaciais e sazonais (Capítulo 1) bem como a contribuição energética de um ciclone extratropical intenso na energia das ondas ao largo da costa do Rio Grande do Sul (Capítulo 2).

Os dados utilizados na procura de respostas para os referidos objetivos foram gerados pelo modelo numérico global de geração de ondas *WAM (Wave Model)*. O *WAM* foi criado pelo *WAMDIG (Wave Model Development and Implementation Group)* e é utilizado operacionalmente, entre outros, pelo *ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts)* obtendo sucesso na previsão de alturas significativas e períodos de onda (BANNER e YOUNG, 1994; KOMEN *et al.*, 1994).

Como primeira tentativa de implementação de um modelo de ondas operacional de terceira geração, a contribuição do *WAM* foi a parametrização exata da fonte de transferência não linear de energia com o mesmo número de graus de liberdade do espectro e a especificação de uma função representativa da dissipação que feche o

balanço de energia (WAMDIG, 1988). A interação não linear foi parametrizada de forma a reduzir o esforço computacional, permitindo sua operacionalização (BANNER e YOUNG, 1994). A partir de trabalhos de PHILLIPS (1957) e MILES (1957) sobre a transferência de energia da atmosfera para o oceano e de HASSELMANN (1962) sobre a transferência não linear de energia foi possível estabelecer uma formulação como a atualmente utilizada (KOMEN *et al.*, 1994).

Nesse trabalho foi rodado o modelo *WAM* utilizando como *input* o campo de tensão vento do modelo atmosférico global T126L28, fornecidos pelo CPTEC/INPE, para o período de junho de 2006 a julho de 2007. Foi escolhido esse período com a finalidade de investigar o comportamento das ondas durante um evento de ciclone extratropical intenso no Oceano Atlântico Sul, cujos padrões atmosféricos e trajetória foram monitorados e apresentados por PARISE (2007) e PARISE *et al.* (2009). Apesar de ter sido utilizado um modelo de onda global o qual não resolve muito bem os processos em áreas rasas, esse auxiliará na investigação da energia do espectro de ondas gerado no domínio da tempestade e nas regiões *offshore* à costa do Rio Grande do Sul.

As variáveis selecionadas como *outputs* nas simulações formam: altura significativa de onda ( $H_s$ ), velocidade do vento a 10m de altura ( $U_{10}$ ), ondulações (*swell*) e período de pico ( $T_p$ ) os quais consistiram de um arquivo binário (*.bin*) contendo os valores das variáveis e um arquivo descritor e/ou controle (*.ctl*) descrevendo as características do binário como o nome do arquivo de dados, as coordenadas, incluindo o tempo, número de variáveis e o nome das variáveis presentes no binário. Posteriormente, foi realizado o tratamento desses dados no *software* MatLab.

Para cumprir com o principal objetivo do Capítulo 1 foi realizada a aplicação de Funções Ortogonais Empíricas (*EOF's - Empirical Orthogonal Function's*) e Decomposições de Valores Singulares (*SVD's - Singular Value Decomposition*), metodologias capazes de agrupar em modos principais de variabilidade, respectivamente, de uma única variável e de duas variáveis pareadas.

O método das Funções Ortogonais Empíricas é uma ferramenta estatística para identificar os modos principais de variabilidade espacial e temporal de uma única variável dependente espaço-temporalmente. Baseada em operações matriciais, a matriz covariância da variável a ser estudada é construída e diagonalizada, resultando em um conjunto de autovalores e autovetores correspondentes. Cada

autovetor (FOE) pode ser interpretado como um padrão espacial, ou seja, um mapa de covariância.

A fração de variância total de uma variável explicada pela FOE é proporcional aos autovalores associados. O modo principal, relacionado ao maior autovalor, explica a maior fração da variância total, o segundo modo explica a maior fração da variância restante, e assim por diante (VENEGAS *et al.*, 1997).

Para se observar como o padrão espacial se desenvolve no tempo, o autovetor é projetado no campo original para se obter a série temporal. Assim como as FOE's são ortogonais no espaço, as series temporais são ortogonais no tempo. O tratamento dos dados foi baseado em BJORNSSON e VENEGAS (1997) e VENEGAS *et al.* (1997).

Quando se pretende obter interpretações físicas dos padrões é desejável rotá-los, isto é, aplicar uma transformação linear no primeiro conjunto de autovetores a fim de encontrar um segundo conjunto de novos vetores chamados de componentes principais rotados. Há diferentes funções de simplificação na literatura tais como *varimax*, *dualmax*, *promax*, *vatmax* e *equimar*.

RICHMAN (1981) encontrou que as funções ortogonais empíricas quando não rotadas exibem freqüentemente quatro características que os impedem de isolar modos individuais de variações: dependência da forma do domínio da grade, instabilidade do subdomínio, problemas amostrais e representação imprecisa das relações físicas imbutida nos dados. Assim, como o objetivo do Capítulo 1 é não somente encontrar mais também interpretar fisicamente os modos de variabilidade das ondas foi necessário rotar os autovetores a fim de superar os problemas anteriormente citados. Mais informações sobre rotação de autovetores podem ser encontradas em CHENG e DUNKERTON (1995), BJORNSSON e VENEGAS (1997) e WILKS (1995).

Buscando cumprir os objetivos do Capítulo 2 foi rodado o modelo *WAM* obtendo como *output* a densidade de energia do espectro de onda (em  $m^2/s \cdot grau$ ) durante o período do evento de ciclone extratropical intenso que ocorreu entre 01 e 04 de setembro de 2006.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES, J. H. G. M. **Estudos sobre a Ocorrência de Ondulações Longínquas na costa da Cidade do Rio de Janeiro**. Monografia (Graduação) - Departamento de Oceanografia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1991.

ALVES, J. H. G. M. Numerical modeling of ocean swell contributions to the global wind-wave climate. **Ocean Modelling**, v. 11, p. 98-122, 2006.

BANNER, M. L. e YOUNG, I. R. Modeling Spectral Dissipation in the Evolution of Wind Waves. Part I: Assessment on Existing Model Performance. **Journal of Physical Oceanography**, v. 24, p. 1550-1571, 1994.

BJORNSSON, H. e VENEGAS, S. A. **A Manual for FOE and DVS analyses of Climatic Data**. Department of Atmospheric and Oceanic Sciences and Centre for Climate and Global Change Research, MGil University, 53p, 1997.

BOWYER, P. J. e MACAFEE, A. W. The theory of trapped-fetch waves with tropical cyclones – an operational perspective. **Weather Forecast**, v. 20, p. 229-244, 2000.

BRANCO, F. V.; ALVES, J. H. G. M. e CAMARGO, R. Contribuições de *Swell* gerado em tempestades distantes para o clima de ondas na costa brasileira. **In: XIII Congresso Brasileiro de Meteorologia**, Fortaleza, CE, v. 1, p. 1-1, 2004.

CHENG, X. e DUNKERTON T. J. Orthogonal rotation of spatial patterns derived from singular value decomposition analysis. **Journal of Climate**, v. 11, p. 2631-2643, 1995.

COLI, A. B.; MATA, M. M. Caracterização das Alturas de Onda no Atlântico Sul Ocidental Através da Altimetria Topex/Poseidon. **In: VIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, Salvador, BA, 1996.

GAN, M. A. e RAO, B. V. Surface cyclogenesis over South America. **Monthly Weather Review**, v. 119, p. 1293-1302, 1991.

HASSELMANN, K. On the non linear energy transfer in a gravity wave-spectrum. Part 1: General theory. **Journal of Fluid Mechanics**, v. 12, p. 481-500, 1962.

JONES, D. A. e SIMMONDS, I. Climatology of Southern Hemisphere extratropical cyclones. **Climate Dynamics**, v. 9, p. 131-145, 1993.

KING, D. B. e SHEMDIN, O. H. Radar observations of hurricane wave directions. **In: 16th International Conference on Coastal Engineering**, Hamburg, Germany, 1978.

KOMAR, P. D. **Beach processes and sedimentation**, 2nd Edition, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J., 544p, 1998.

KOMEN, G. J.; CAVALERI, L.; DONELAN, M.; HASSELMANN, K.; HASSELMANN, S. e JANSSEN, P. A. E. M. **Dynamics and Modelling of Ocean Waves**. Cambridge University Press, 532p, 1994.

LUI, H.; XIE, L.; PIETRAFESA, L. J. e BAO, S. Sensitivity of wind waves to hurricane wind characteristics. **Ocean Modelling**, v. 18, p. 37-52, 2007.

MEINARDUS, W. e MECKING, L. Mittlere Isobarenkarten und Tägliche Synoptische Wetterkarten der Höheren Südlichen Breiten von Oktober 1901 bis März 1904. Deutsche Südpolar-Expedition 1901-1903, **In: Meteorologischer Atlas**, 1911.

MEINARDUS, W. Luftdruckverhältnisse und ihre Wandlungen südlich van 30° südlicher Breite. **Meteor.**, Z, 46, 41-49, 86-96, 1929.

MELO FILHO, E; PARENTE; C. E. e ROSMAN; P. C. C. Considerações sobre o Clima de Ondas na Costa da Cidade do Rio de Janeiro. **In: Solução Conjunta dos Problemas de Erosão na Praia de Ipanema-Leblon e Qualidade de Água na Lagoa Rodrigo de Freitas. Segundo Relatório de Acompanhamento, COPPETEC**, Rio de Janeiro, RJ, 1991.

MELO FILHO, E. The Sea Sentinels Project: Watching Waves in Brazil. In: Proceedings of 8th Symposium on Coastal and Ocean Management (Coastal Zone), **American Society of Civil Engineering**, p. 505-517, 1993.

MELO FILHO; ALVES, J. H. G, de M.; JORDEN, V.; ZAGO, F. e DIAS, W. S. S. Instrumental Confirmation of the Arrival of North Atlantic Swell to the Ceara Coast. **In: Proceedings 4th International Conference on Coastal and Port Engineering in Developing Countries**, v. 3, p. 1984-1996, Rio de Janeiro, RJ, 1995.

MELO FILHO, E. ; ROMEU, M. A. R. e HAMMES, G. R. Reconstruction of Sea State Conditions at the Vitoria and Santa Catarina Coasts (Brazil) during the June 2006 Swell Event. **In: 7th International Conference on Coastal and Port Engineering in Developing Countries**, Dubai, p. 1-15, 2008.

MILES, J. W. On the generation of surface waves by shear flow. **Journal of Fluid Mechanics**, v. 3, p. 185-204, 1957.

MOON, I. J.; GINIS; I.; HARA, T.; TOLMAN, H. L.; WRIGHT, C. W. e WALSH, E. J. Numerical simulation of sea surface directional wave spectra under hurricane wind forcing. **Journal of Physical Oceanography**, v. 33, p. 1680-1760, 2003.

MURRAY, R. J. e SIMMONDS, I. A numerical scheme for tracking cyclone centers from digital data. Part I: Development and operation of the scheme. **Australian Meteorological Magazine**, v. 39, p. 155-166, 1991a.

MURRAY, R. J. e SIMMONDS, I. A numerical scheme for tracking cyclone centers from digital data. Part II: Application to January and July general circulation model simulations. **Australian Meteorological Magazine**, v. 39, p. 167-180, 1991b.

PARISE, C. K. **Padrões atmosféricos sinóticos geradores de marés meteorológicas intensas e a resposta morfodinâmica da Praia do Cassino**. Monografia (Graduação). Departamento de Geociências, Laboratório de Oceanografia Geológica, Fundação Universidade Federal de Rio Grande, 2007.

PARISE, C. K.; CALLIARI, L. J. e KRUSCHE, N. Extreme storm surges in the south of Brazil: atmospheric conditions and shore erosion. **Brazilian Journal of Oceanography**, v. 57(3), p. 175-188, 2009.

PHILLIPS, O. M. On the interaction of waves by turbulent wind. **Journal of Fluid Mechanics**, v. 2, p. 417-455, 1957.

RAO V. B.; DO CARMO A. M. C. e FRANCHITO, S. H. Seasonal Variation in the Southern Hemisphere Storm Track associated wave propagation. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 59, p. 1029-1048, 2002.

REBOITA, M. S.; ROCHA, R. P. e AMBRIZZI T. Climatologia de ciclones sobre o Atlântico Sul utilizando métodos objetivos na detecção destes sistemas. **In: IX Congresso Argentino de Meteorologia**, Buenos Aires, AR, Outubro 3-7, 2005.

RICHMAN, M. B. Obliquely rotated principal components: An improved meteorological map typing technique. **Journal of Applied Meteorology**, v. 20, p. 1145-1159, 1981.

SINCLAIR, M. R. An objective cyclone climatology for the Southern Hemisphere. **Monthly Weather Review**, v. 122, p. 2239-2256, 1994.

SINCLAIR, M. R. A climatology of cyclogenesis for the Southern Hemisphere. **Monthly Weather Review**, v. 123, p. 1601-1619, 1995.

TALJAARD, J. I. Development, distribution and movement of cyclones and anticyclones in the Southern Hemisphere during the I. G. Y. **Journal of Applied Meteorology**, v. 6, p. 973-987, 1967.

THURMAN, H. V. e TRUJILLO, A. P. **Introductory Oceanography**, Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, 1997.

VAN LOON, H. A. Climatological Study of the Atmospheric Circulation in the Southern Hemisphere during the IGY, Part I: July 1957 - 31 March 1958. **Journal of Applied Meteorology**, v. 4, p. 479-491, 1965.

VENEGAS, S. A., MYSAK, L. A. e STRAUB, D. N. Atmosphere - Ocean Coupled Variability in the South Atlantic. **Journal of Climate**, v.10, p. 2904-2920, 1997.

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION. **Guide to Wave Analysis and Forecasting**, Pub. 702, Geneve, Switzerland, 1988.

WAMDIG. The WAM Model - A Third generation ocean wave prediction model. **Journal of Physical Oceanography**, v. 18, p. 1775-1810, 1988.

WILKS D. S. **Statistical Methods in the Atmospheric Sciences**. Academic Press, NY, 467 p, 1995.

YOUNG, I. R. Parametric hurricane wave prediction model. **Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering**, v. 114, p. 637-652, 1988.

**II. CORPO PRINCIPAL:**

**CAPÍTULO 1**

# SEASONAL VARIABILITY OF OCEAN SURFACE WAVES IN THE SOUTH ATLANTIC OCEAN BASED ON NUMERICAL MODELLING, EMPIRICAL ORTHOGONAL FUNCTION AND SINGULAR VALUE DECOMPOSITION

Parise<sup>1</sup>, C. K. and Farina<sup>2</sup>, L.

<sup>1</sup>*Programa de pós-graduação em Geociências, UFRGS.*

<sup>2</sup>*Instituto de Matemática, UFRGS.*

<sup>1,2</sup> *(Av. Bento Gonçalves, 9500, Agronomia, CEP: 91509-900 Porto Alegre, RS, Brasil)*

## ABSTRACT

The availability of observational ocean wave data in the South Atlantic Ocean is very limited. Due to this shortage of data obtained in situ, numerical modeling has become the most used tool for the investigation of wave climate in this region. In this paper, the global model WAM is used to simulate waves from June 2006 to July 2007. An analysis of the results using empiric orthogonal functions (EOF) and singular value decomposition (SVD) is carried out. The leading modes of the significant wave height, swell, wave peak period and surface wind velocity are obtained. Most of the variability are explained by four modes and a strong correlation is found between the swell and peak period and between the significant wave height and peak period, when applying the SVD. Apart from appearing to be a pioneering application of EOF and SVD to ocean waves in the South Hemisphere, the results provided a better understanding of these wave fields in the South Atlantic Ocean.

**Key words:** Ocean Wave Variability, WAM, EOF, SVD, Ocean Wave Modelling.

## 1. INTRODUCTION

Most of the scientific articles on ocean waves in South Atlantic Ocean concern specific regions, mainly of the Brazilian coast. Comprehensive studies of wave fields in the whole Atlantic Ocean is somewhat restricted. In the North Atlantic Ocean, however, several studies of variability of waves in global scale are being developed. WANG and SWAIL (2001) and WANG and SWAIL (2002) considered seasonal extremes of significant wave height in North Atlantic based on forty years of reanalysis data and found significant multidecadal changes at northeast. These authors have found the leading modes of variability (EOF's) of significant wave height ( $H_s$ ) and of sea level pressure ( $SLP$ ), independently, in order to characterize a relation between both variables in large scale. They have found that the positive anomalies of  $H_s$  were often associated to negatives anomalies of  $SL$ : The changes in the extremes  $H_s$  were respectively more and less significant in winter and spring, and the authors have related it to changes of  $SLP$  and of North Atlantic Oscillation (NAO) variability.

COLI and MATA (1996) characterized the wave heights on the South Atlantic Ocean from 25°S to 45°S of latitude and from 30°W to 66°W of longitude using data from satellite altimeter and have found wave heights near the coast decreasing with lower latitudes.

PARK and SCHUBERT (1993) studied the zonal wind variability at 200 hPa and concluded that the fluctuations over the Atlantic are strongly coupled with those over the Pacific. Furthermore, for the EOF<sub>1</sub> (11.8 %) they found a pattern dominated by positive tropical anomaly extending from Atlantic to Indian, accompanied of negative anomalies in north and south. ROBERTSON and MECHOSO (2000) also investigated the wind variability at 200 hPa over the same area and found for the first mode (23.4 %) a strong cyclonic core in south of Intertropical Convergence Zone (ITCZ) and for the second mode (16.2 %) an intense positive anomaly near the Equator, characterized by Walker circulation.

VENEGAS *et al.* (1997) investigated the variability of the sea surface temperature ( $SST$ ) and of the sea level pressure ( $SLP$ ) data in the South Atlantic region using the empirical orthogonal function's (EOF's) and singular value decomposition (SVD) analyses methods. They found three leading patterns for  $SST$  and  $SLP$  which explained 47% and 59% of the square covariance, respectively.

ALVES (2006) proposed a new technique for studying the contribution

of ocean swell to the global wind-wave climate based on simulations of the wind-wave evolution. In this technique, waves are generated by winds that are kept active only in selected areas and switched off over the rest of the global ocean domain. In this way, swells are generated only in selected areas and are propagated freely elsewhere. This author discussed that the eastward penetration of extratropical south Pacific (ETSP) swell into the Atlantic Ocean is a persistent component of the wave climate in the southernmost parts of the Atlantic Ocean basin. The tropical south Indian (TSIO) swell also propagate westward penetrating into the South Atlantic Ocean with persistence between 30 and 180 days, where the maximum ranged from 0,5 to 1m in the South Atlantic. ALVES (*op. cit.*) concluded that even the global distribution of continental land masses is a major factor determining the impact of swell on the global wind-wave climate and that the swell generated in extratropical areas of southern oceans spread energy throughout the entire global ocean and are a potentially important component of the wave climate in most ocean basin in both hemispheres.

BRANCO *et al.* (2004) investigated the contribution of swell on wave climate in Brazilian coast and noticed that the formation of cyclones in south of the African continent was responsible for the occurrence of dispersed waves (swell) in southeast of Brazil with significant wave height of approximately 1m and wave period from 14 to 15s.

The frequent occurrence of extratropical cyclones in the South Atlantic Ocean cause the development of long wind fetch which generate well developed swells that propagate toward coastal regions. PARISE *et al.* (2009) monitored and calculated the tracks of 23 events of storms at the same area and period analyzed in this paper. Three patterns have been identified: 1) Cyclogenesis to the south of Argentina with displacement to the east and a trajectory between 47.5°S and 57.5°S; 2) Cyclogenesis to the south of Uruguay with displacement to the east and a trajectory between 35°S and 42.5°S; and 3) Cyclogenesis to the south of Uruguay with displacement to the southeast and a trajectory between 35°S and 57.5°S. These track patterns induced distinct responses on coastal zone and, possibly, on the wave fields, as will be discussed later in this paper.

Other results on waves climatology in the South Atlantic Ocean can be found in JANSSEN *et al.* (1997b); CANDELLA (1997); ROCHA *et al.* (2003); ALVES and YOUNG (2004); BRANCO (2005). Nevertheless, we are not aware of articles using Empirical Orthogonal Function's method as a statistical tool for studying of



variability of ocean surface waves.

Aiming at a better understanding of the wave climate in South Atlantic and given the great importance that waves represent in all activities linked to the ocean, this work has the goal to analyze the variability of wave field in the South Atlantic Ocean and their interactions with associated atmospheric and oceanic's events.

## 2. METODOLOGY

### 2.1. Wave generation model (WAM - Wave Model)

The WAM model computes the two-dimensional surface wave spectrum  $F(f, \theta, \phi, \lambda, t)$ , a function of frequency  $f$ , direction  $\theta$ , latitude  $\phi$ , longitude  $\lambda$  and time  $t$ . In deep water the spectrum is usually forced by three source terms,  $S_{in}$ ,  $S_{nl}$ , and  $S_{ds}$ , governed by the wave balance equation (HASSELMANN (1962); HASSELMANN and HASSELMANN (1985) and KOMEN *et al.* (1994)):

$$\frac{dF}{dt} + \mathbf{v}_g \cdot \nabla F = S_{in} + S_{nl} + S_{ds}$$

where  $\mathbf{v}_g = Dw/Dk$  is the group velocity in the quadridimensional space related to spatial coordinate  $x = (x_1, x_2)$  and to wave vector  $(k_1, k_2)$ ; the source functions on the right-hand side represent the physics of wind input, dissipation of energy due to whitecapping and the energy transfer due to wave-wave interactions, respectively.

The output files can be obtained for the two-dimensional spectrum or for parameters of integral properties of the spectrum such as significant wave height, wave direction, sea height and swell height, among others (WAMDIG, 1988).

#### 2.1.1 Implementation of the wave model

The wave field from June 2006 to July 2007 was generated using the wave global model WAM, version 4.5, with spatial resolution of  $0.937^\circ \times 0.935^\circ$ ,

temporal resolution of 3h (03Z, 06Z, 12Z, 15Z, 18Z, 21Z, 24Z) and spectral of 30 frequencies and 12 directions. The simulations were performed in a global domain from 82,7°S to 82,7°N and from zero to 359°E. To carry out our study on wave variability we chose, from the global grid of model, the area that include the South Atlantic Ocean, from 50°S to zero of latitude and from 70°W and 25°E of longitude.

As wind input, we used the wind stress field calculated by the CPTEC/COLA atmospheric global model with resolution T126L28. The simulations were carried out in hot start mode of model, i.e., the results of a day have took in consideration the sea state of earlier day and to do that was used a spin-up of 30 days. The purpose was to provide apart from the local generated waves, a representation of the sea state closer as possible to the reality, incorporating all swell fields. The output files of model were stored in the time step of 3h, resulting in eight daily data for each of seven variables chosen: significant wave height ( $H_s$ ), swell, velocity of the wind at height 10 meters ( $U_{10}$ ) and peak period ( $T_p$ ).

## 2.2. Data processing with EOF

### 2.2.1. Spatial patterns

To investigate the variability of wave field we used the EOF method. The values of a single variable at locations  $x_1, x_2, x_3, \dots, x_p$  at times  $t_1, t_2, t_3, \dots, t_n$  are stored in a data matrix  $M$ . Each spatial map was arranged into a row vector in  $M$  and each column has represented a time series for a given location (Fig. 1).

$$M = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdot & \cdot & \cdot & x_{1p} \\ x_{21} & x_{22} & \cdot & \cdot & \cdot & x_{2p} \\ \cdot & & & & & \cdot \\ \cdot & & & & & \cdot \\ \cdot & & & & & \cdot \\ x_{n1} & x_{n2} & \cdot & \cdot & \cdot & x_{np} \end{bmatrix}$$

Figure 1: The matrix  $M$ . Each row is one map and each column is a time series of observations for the given location.

Therefore, the eight first lines of this matrix correspond to the first day the following eight lines represent the second day and so on. The number of lines corresponds to number of days multiplied by eight and the number of columns is the total number of locations of each point in space.

Later on, we excluded from the original matrix the points located in land. The resulting matrix, consisting of only sea locations, is denoted by  $M_{sea}$ . The indexes of the mainland points were stored and have just returned to the matrix after performing the EOF analysis, at the moment to show the spatial patterns. The mean of each matrix element is subtracted and the covariance matrix is given by:

$$M_{cov} = M_{sea}^T M_{sea}$$

The data processing and analyses were carried out in the software *Matlab* and according to BJORNSSON and VENEGAS (1997). To calculate the eigenvalues and eigenvectors of the covariance matrix, the *eig.m* function was used.

A truncated eigenvector basis is formed from the first fourth eigenvectors obtained. We performed a rotation of the eigenvectors using the *varimax* algorithm. The reason for choosing *varimax* rotation is because it is one of the most widely used rotation methods and usually produces realistic spatial patterns (CHENG and DUNKERTON, 1995).

### 2.2.2. Time series

The principal component time series or expansion coefficients represent the time evolution of each EOF. These time series show how each EOF pattern oscillates in time. In this paper we mean to show the temporal series looking for some seasonal variability, since the analysis was carried out for a period of a single year.

Initially, a filter was applied to data matrix  $M_{sea}$  in order to eliminate the noises from high frequencies that can obscure the temporal series. It was chosen a low-pass Lanczos-cosine filter *mylanczos* (THOMSON and CHOW, 1980) and a period of

one week corresponding to the cut-off frequency of 56Hz. The number of weights was 150. This cut-off frequency was chosen to exclude from temporal series the frequencies larger than one week. Since each variable has eight daily data, multiplying eight (daily data) by seven (referring to one week) resulted in a cut-off frequency of 56. The eigenvectors and eigenvalues were then calculated from this filtered matrix.

The expansion coefficients or time series ( $Ts$ ) were found carrying out the projection of data matrix containing the water values on the matrix of eigenvectors.

$$Ts(i) = M_{sea} \cdot C(:, i)$$

where  $C$  is the matrix that contain the eigenvectors ( $i$ ).

### 2.3. Analysis of SVD (Singular Value Decomposition)

The singular value decomposition method can be used as a statistical technique to identify the leading modes of spatial and temporal variability of coupled fields. The method finds pairs of coupled spatial patterns, with each pair explaining a fraction of the temporal cross-covariance matrix between two depended fields in time. As in the EOF method, the temporal means for each variable are removed from the time series at all grid points.

The SVD of the cross-covariance matrix yields two spatially orthogonal sets of singular vectors, analogous to the EOF's eigenvectors, one for each variable, and a set of singular values associated with each pair of vectors. Each pair of spatial patterns describes a fraction of the square covariance between the two variables. The first pair of patterns describes the largest fraction of the covariance and each succeeding pair describes a maximum fraction of the covariance that is unexplained by the previous pairs (BRETHERTON *et al.*, 1992).

#### 2.3.1. Data processing with DVS method

The data matrix of two coupled fields is constructed analogously as

explained previously in the section 2.2.1. However, in the present case, both fields have a matrix:  $M_{sea\_var1}$  for the first variable and  $M_{sea\_var2}$  for the second variable. From these matrixes is constructed the covariance matrix:

$$M_{cov} = M_{sea.var1}^T M_{sea.var2}$$

To calculate the eigenvalues and eigenvectors of covariance matrix we used the *svd.m* function of *Matlab*.

### 3. RESULTS AND DISCUSSIONS

#### 3.1. Spatial-temporal means

The time averages of the 10 m wind velocity, of significant wave height, of swell and of peak period have been calculated at each grid point. The period of time is from June 2006 to July 2007. These averages are shown in Fig. 2. The maximum wave heights agree with the wind maximum, at southeast of Atlantic Ocean. These values decrease gradually towards north and nearer the coast. At the region of the wind maximum, however, the peak period are smaller and increase outwards of the wave generation center.

GRIGORIEVA and GULEV (2006) provided the global wave climatology from 1958 to 2005 and found significant wave height to the South Atlantic Ocean ranging between 2m (near to coast) and 2.5m (in the middle of ocean) in the summer and between 2.5m (near to coast) and 3m (in the middle of ocean) in the winter. To the winter was possible to notice the wave contribution from Indian Ocean.

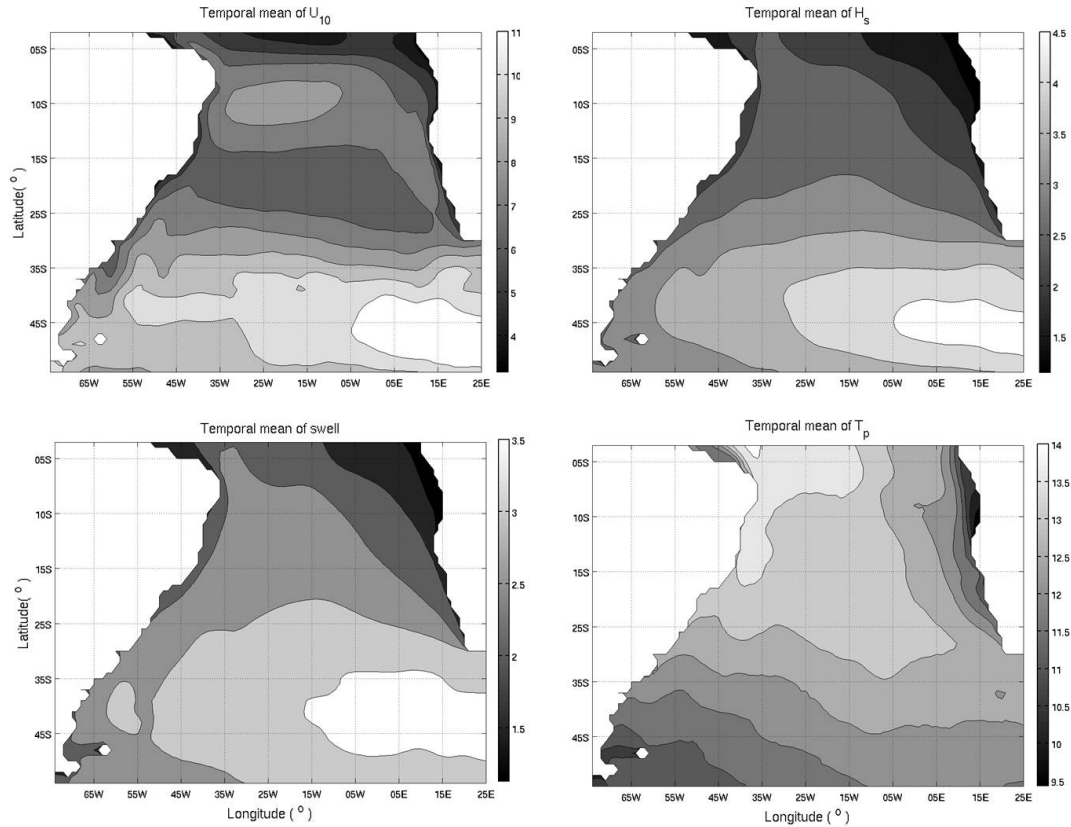


Figure 2: Temporal mean of velocity of the wind at height 10 meters, of significant wave height, of swell and of peak period from June 2006 to July 2007.

### 3.2. Spatial-temporal variability of each variable

For all variables analyzed by EOF's method, were found four leading modes that have explained most of their spatial-temporal variability. We show these modes next.

#### 3.2.1. Significant wave height ( $H_s$ )

The sum of four leading modes has explained 59% of whole variance of  $H_s$ , with individual valor's of 38%, 9%, 7% e 5% to the EOF<sub>1</sub>, EOF<sub>2</sub>, EOF<sub>3</sub> e EOF<sub>4</sub>, respectively (Fig. 3). The first mode has exhibited a pattern of monopole, with the maximum variance at southeast and it was on the wane toward north and southeast. The second mode has displayed a dipole pattern where the positive and negative anomalies happened respectively on east and west (EOF<sub>2</sub> of Fig. 3) agreeing with the result of

COLI and MATA (1996). The third mode was characterized by a zonal pattern of action centers of wave that has maintained the dipole structure, nevertheless, with positive anomalies in south/southwest, waning toward north/east. This mode can be related to zonal changes of Anticyclone of South Atlantic Ocean and, because of the line that shared this dipole be at  $40^{\circ}\text{S}$ , suggest that the variability of this mode has oceanic origin due to the association with the Brazil-Malvinas Confluence. At last, the fourth leading mode of  $H_s$  (5%) has displayed three meridian bands of acting centers, a positive between two negative anomalies.

The four variability modes of  $H_s$  showed a peak of maximum fluctuation in twenty days gap, being that the first mode was characterized by seasonal fluctuations which were positives in winter (2006), followed by decreasing in summer and increasing in winter (2007) (Fig. 4).

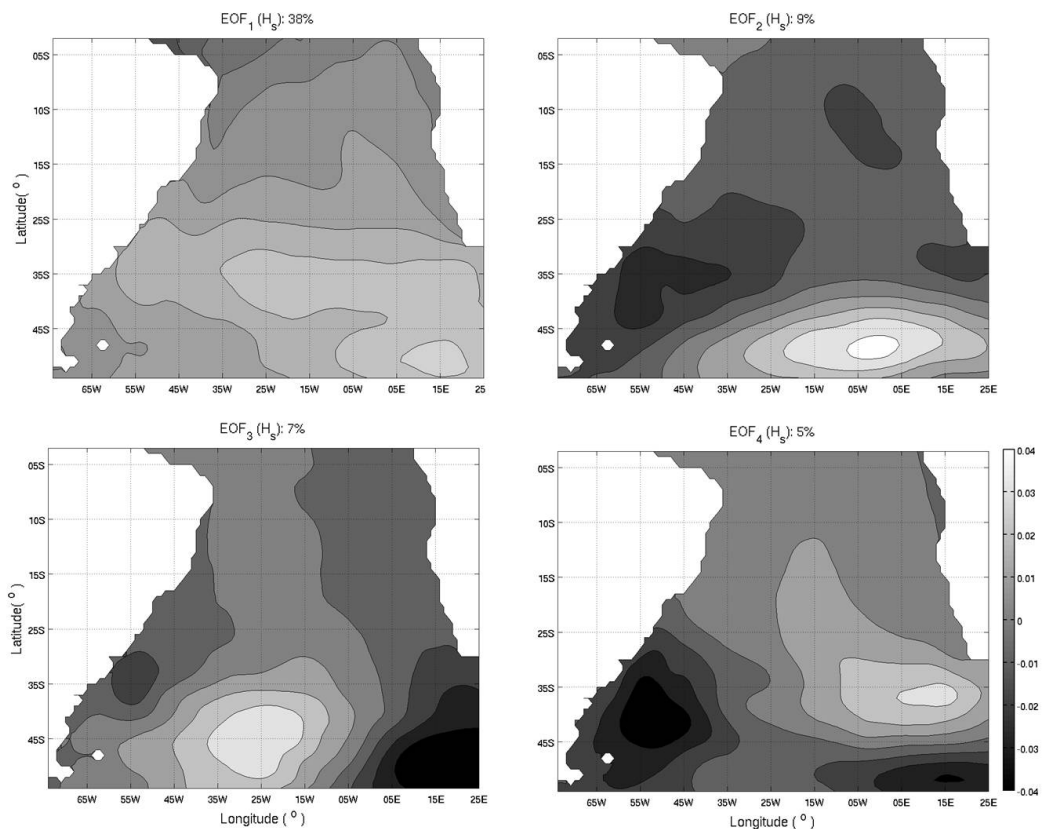


Figure 3: Leading modes of variability of significant wave height in the South Atlantic Ocean.

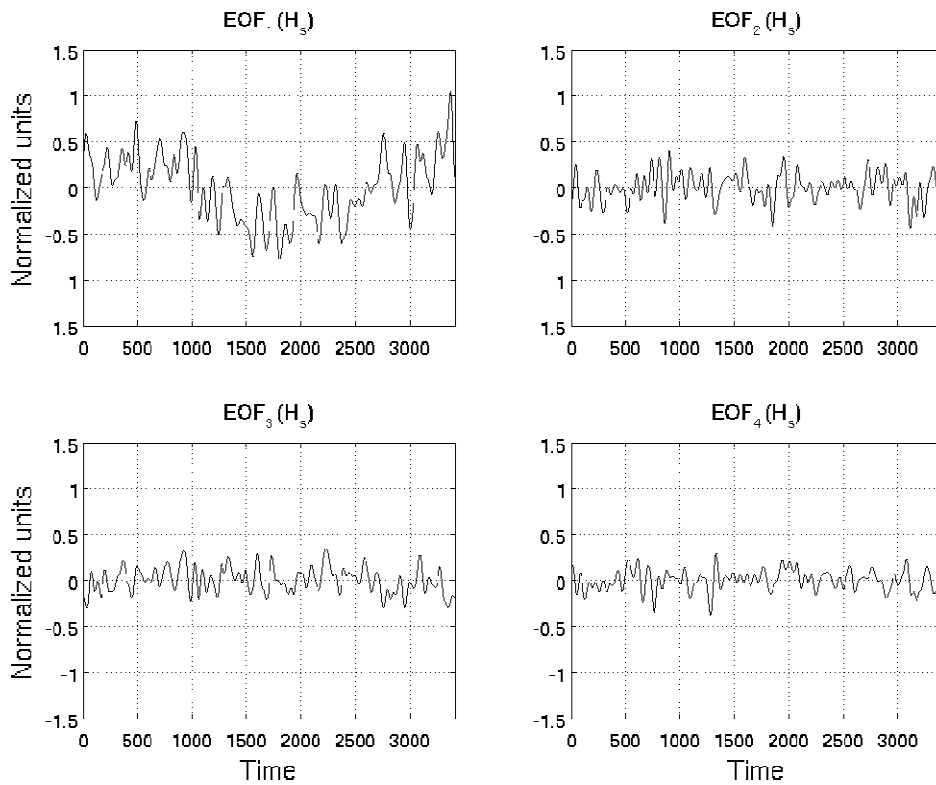


Figure 4: Time series of expansion coefficients of four principal modes of significant wave height.

### 3.2.2. Velocity of the wind at height 10 meters ( $U_{10}$ )

The variability of  $U_{10}$  was explained by fourth leading modes that added up to 29%. In the EOF<sub>1</sub> (12%), predominating positive anomalies appear in the middle of Atlantic Ocean. In the EOF<sub>2</sub> (7%), a dipole pattern with positive and negative anomalies in east and west, respectively and in EOF<sub>3</sub> (5%) a third action center have appeared and moved the positive anomalies toward the coast remaining stagnant between two centers of opposite signs (Fig. 5).

The time series of the four variability modes of  $U_{10}$  showed the same behavior that in the  $H_s$ , however, the maxima fluctuations values were bigger (Fig. 6).



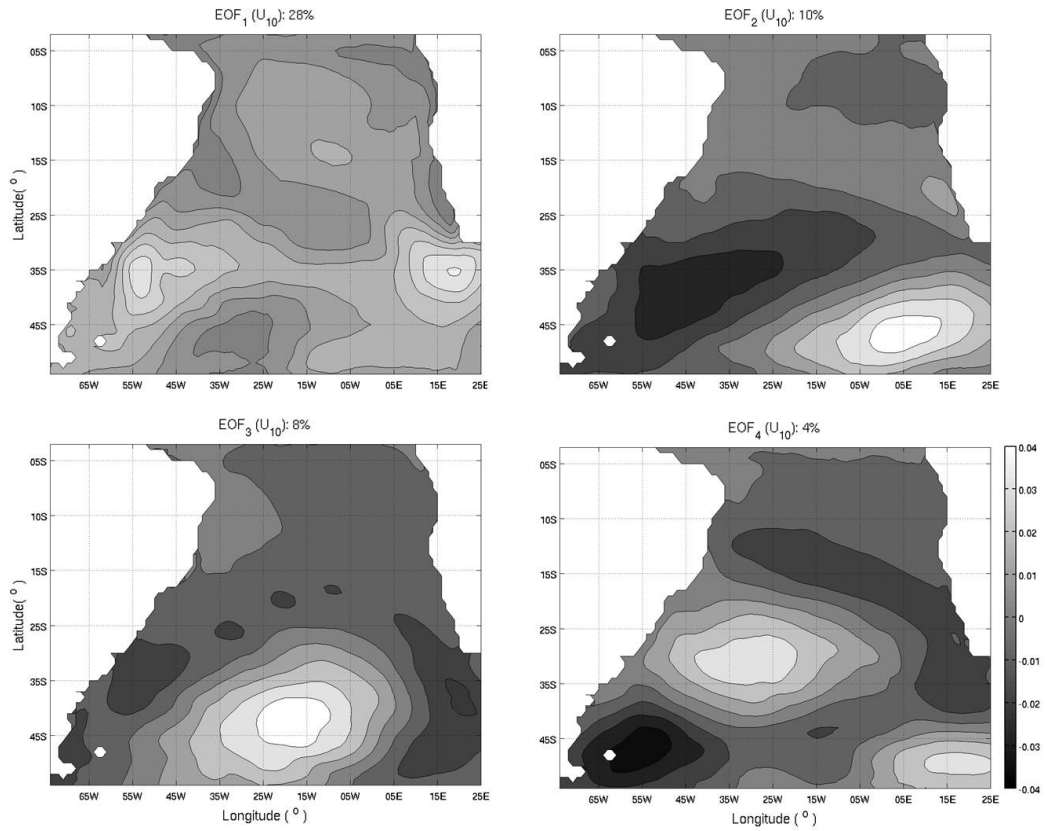


Figure 5: Leading modes of variability of the wind at height 10 meters over the South Atlantic Ocean.

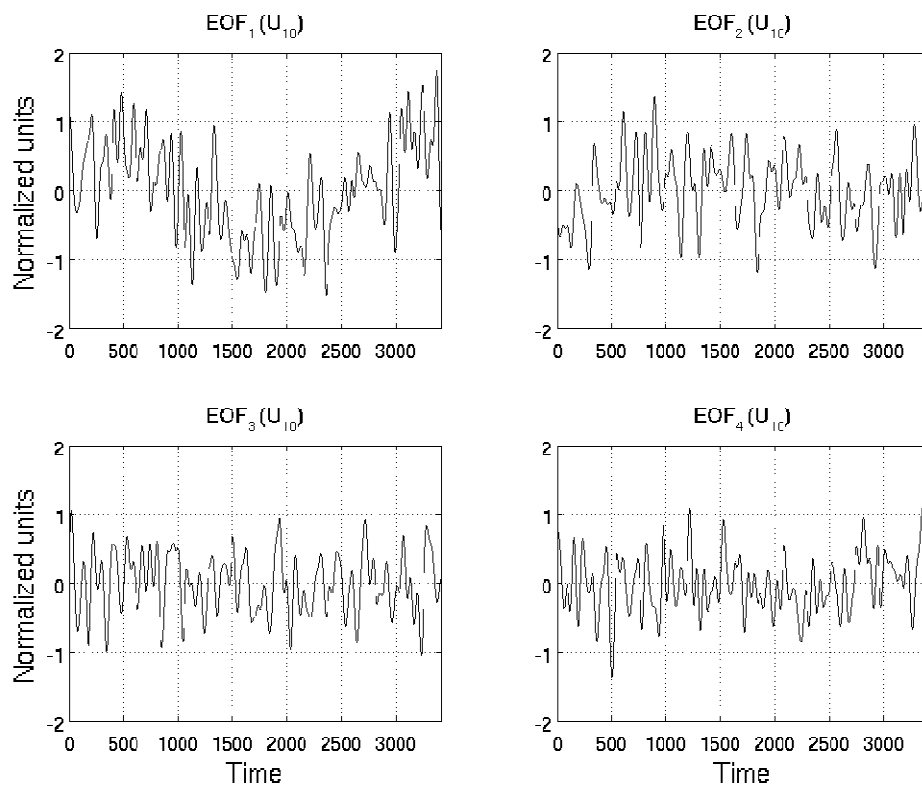


Figure 6: Time series of expansion coefficients of four principal modes of the wind at height 10 meters.

The spatial pattern of the first mode of variability of  $U_{10}$  is very similar to the wind pattern at 220hPa found by PARK and SCHUBERT (1993) and by ROBERTSON and MECHOSO (2000).

It was noticed that the first mode of variability of  $U_{10}$  is related to the first mode of  $H_s$ , as well as the second mode of  $U_{10}$  is to the second mode of  $H_s$ . The spatial pattern of the EOF<sub>3</sub> of  $U_{10}$  started to appear in the EOF<sub>3</sub> of  $H_s$ , but became really similar to the fourth mode of the  $H_s$ , what shows the known time lag of ocean surface response to the atmospheric forcing.

According to ROBERTSON and MECHOSO (2000) the strengthening (weakening) of Subtropical Anticyclone over the Atlantic Ocean accompany the negative anomalies (positive) of large scale of SST found by VENEGAS *et al.* (1997). In the first mode of SLP (35%), the action center was near to the center of the Subtropical Anticyclone, indicating a possible relation with its strengthening/weakening, seeing TALJAARD (1967) the majority of anticyclones in the south hemisphere are located in the high pressure belt (from 23°S to 43°S).

VENEGAS *et al.* (1997) found for the first mode of SST (30%) positive anomalies on the whole domain decreasing towards south and west. This pattern is opposite in sign to the EOF<sub>1</sub> of  $U_{10}$  and of  $H_s$  of the present paper, which decreases towards north. The centers of anomalies with alternated signs in the EOF<sub>3</sub> of SST found by VENEGAS *et al.* (*op. cit.*) are similar to our third mode of  $U_{10}$  and fourth mode of  $H_s$ .

The first leading mode of  $U_{10}$  and of  $H_s$  relate to the EOF<sub>1</sub> of SLP found by VENEGAS *et al.* (*op. cit.*), i.e., 12% of the variability of  $U_{10}$  and 38% of variability of  $H_s$  are associated to changes of intensity and spatial-temporal of the Anticyclone of South Atlantic. The positive anomalies found in this work were associated to negative anomalies of SLP found by VENEGAS *et al.* (*op. cit.*). A similar result was found by WANG and SWAIL (2002) in the North Atlantic.

A dipole east/west pattern explained by second mode of the SLP (16%) (VENEGAS *et al.* (1997) is related, but with opposite signs, to the second mode of  $U_{10}$  and of  $H_s$  from this paper, both associated to east/west changes in the location of Anticyclone center. The third mode of variability of SLP (8%) agrees, nevertheless also with opposite signs, with the second mode of  $H_s$  (7%). In this case, the third mode of SLP (a less representative mode) forces a mode more representative of the  $H_s$  (second mode).

### 3.2.3. Swell

The analyze of leading modes of variability of swell was carried out with the goal of finding the formation centers of wave generated by extratropical cyclone and the contribution them on the generation of swell in the west region of Atlantic Ocean. Winds under extratropical cyclones domain create a large spectrum of waves, where those of length period (swell) travel long distances from generation center of storm and many time can reach the coastal region and erode the coast.

The principal modes of swell were enough similar to  $H_s$ , however the biggest eigenvalue was a little major (40%) besides of showing a meridian behavior of action center with relating to first mode of  $H_s$  (Fig. 5 and 7).

The EOF<sub>1</sub> of swell has exhibited positive anomalies in southeast of grid and lowering of them toward northeast, what show a correspondence between the propagation directions of swell and the dominant directions of storms. That is, the first mode of variability of swell is directly associated to the pattern III of tracks proposed by PARISE *et al.* (2009). As well as the second and third modes of variability of swell relate to pattern I of tracks.

The positive anomalies observed in the EOF<sub>1</sub> and EOF<sub>2</sub> showed the contribution of swell generated in the Indic Ocean and the third mode indicate a contribution of swell from the Pacific Ocean, both modifying the wave climate of Atlantic Ocean (Fig. 7), similar behavior to results found by ALVES (2006).

The fluctuations in the time of the four variability modes of swell showed the same behavior that in the  $U_{10}$  and  $H_s$ , but the positive and negative variations values were lesser (Fig. 8).

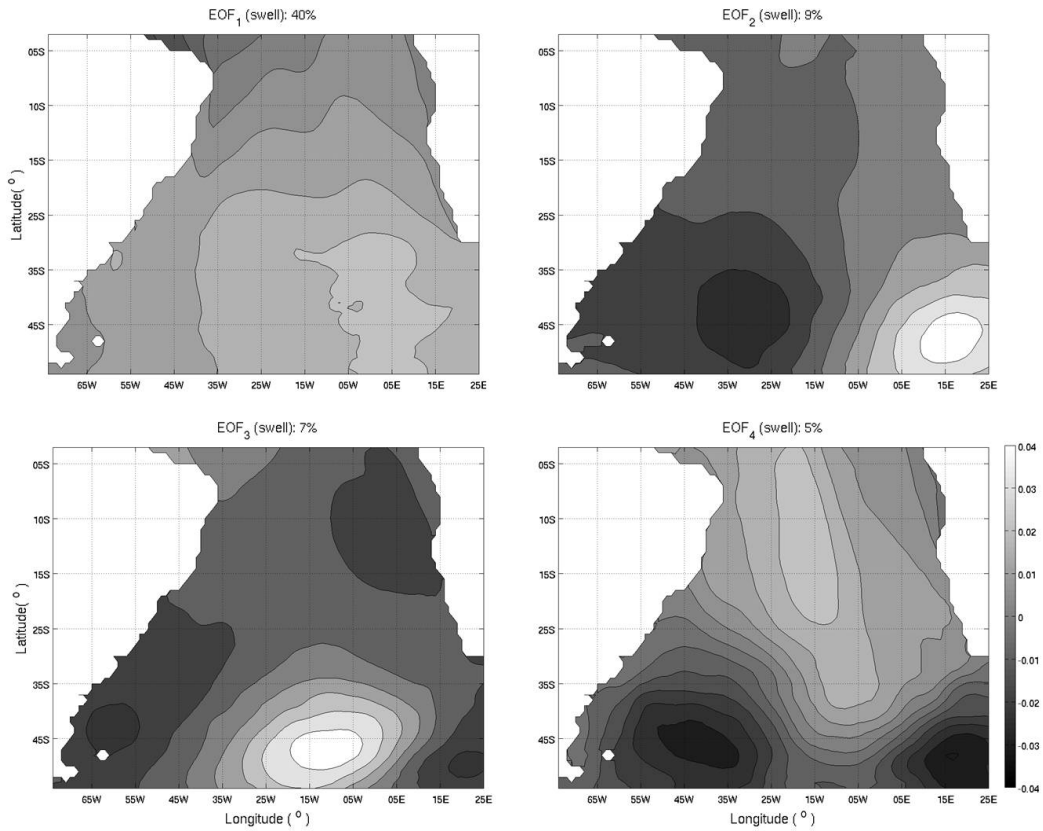


Figure 7: Leading modes of variability of swell in the South Atlantic Ocean.

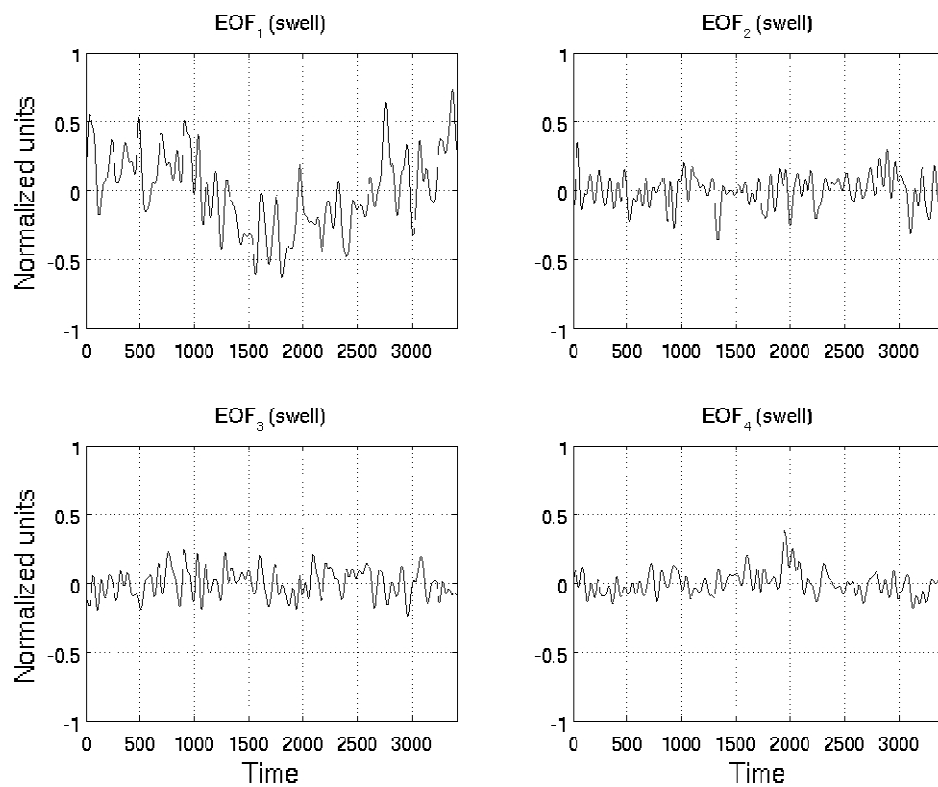


Figure 8: Time series of expansion coefficients of four principal modes of swell.

### 3.2.4. Peak period ( $T_p$ )

The sum of four leading eigenvalues has explained 50% of the total variability of  $T$ . The EOF<sub>1</sub> (28%) shows the variability of incident swells on the African coast (10°S a 25°S) generated by extratropical cyclones. The EOF<sub>2</sub> shows a north/south dipole and the EOF<sub>3</sub> and EOF<sub>4</sub> both show east/west patterns (Fig. 9). The third mode explains the evident and strong presence of swell reaching regions near to coast, what confirms the contribution of swell from Pacific ocean and its relation with the pattern I of track from PARISE *et al.* (2009), cited earlier in the Introduction.

The expansion coefficients of  $T_p$  were the biggest of all variables, mainly for the first mode which showed big anomalies also in summer (Fig. 10).

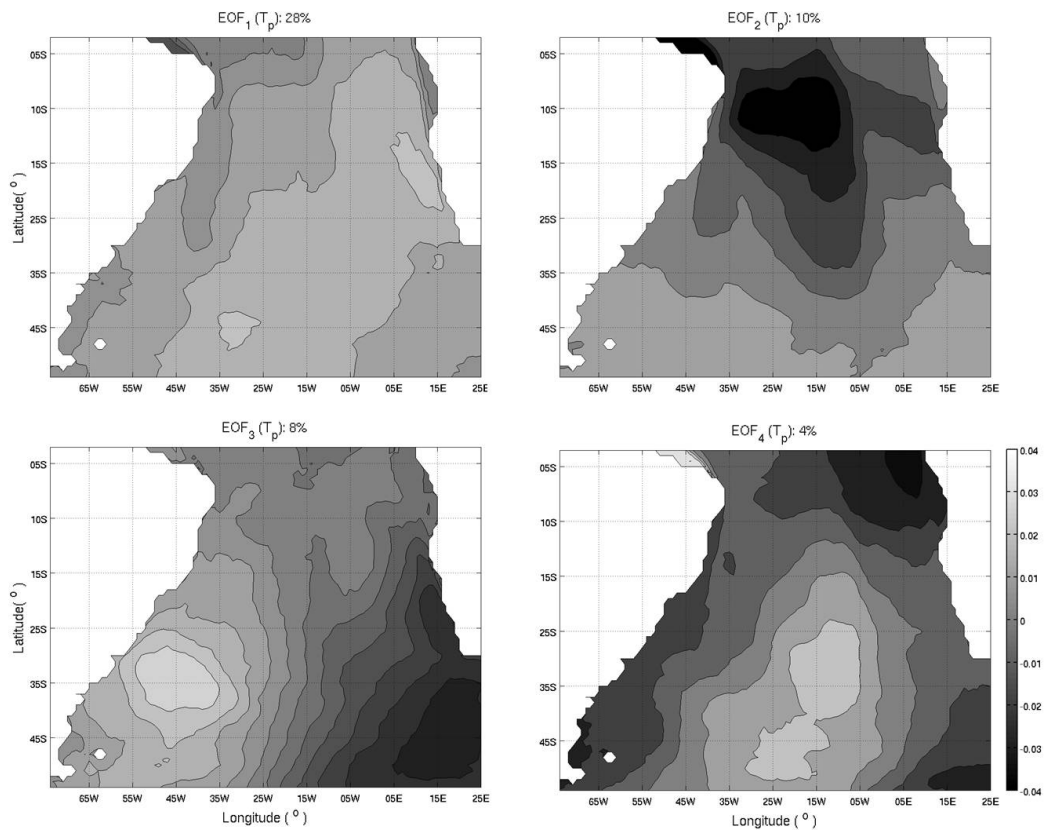


Figure 9: Leading modes of variability of peak period in the South Atlantic Ocean.

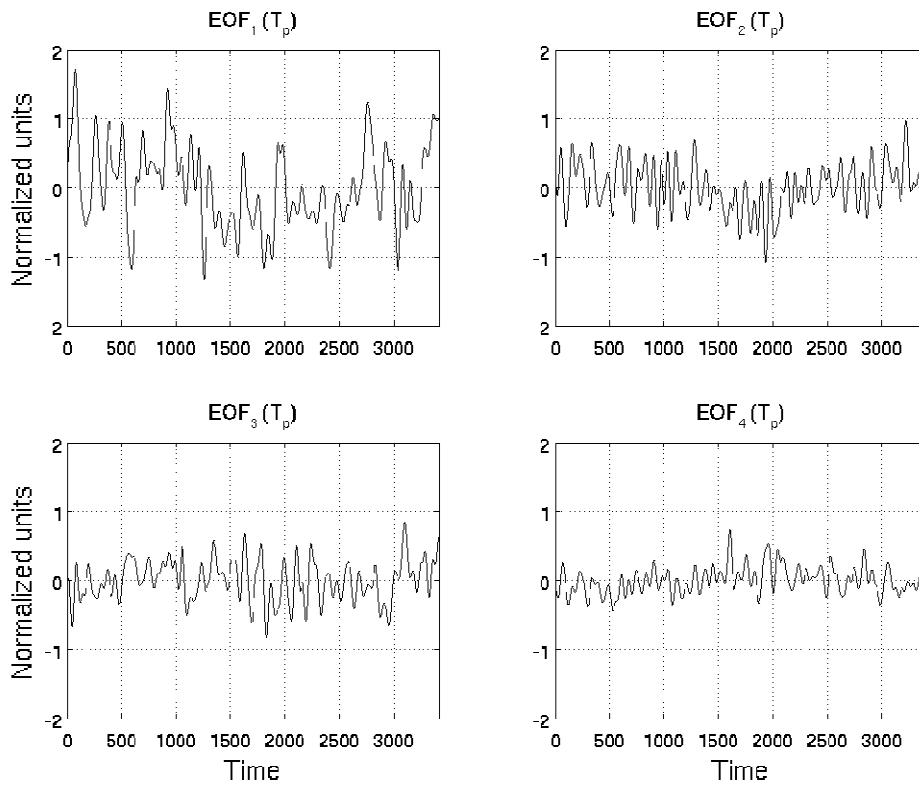


Figure 10: Time series of expansion coefficients of four principal modes of peak period.

### 3.3. Spatial-temporal variability of coupled fields

The singular value decomposition has been used in order to find the covariance between two variables, i.e., identify coupled spatial patterns which explain how much they are co-related. The results are now presented.

#### 3.3.1. Between swell and $T_p$

The greatest eigenvalues in the coupled analyzes were found in the swell and  $T_p$ . The action centers in the swell patterns are better defined than in  $T_p$ , but both of them clearly show correspondence in phase. 68% of coupled variability of swell and of  $T_p$  was also explained by four leading modes. It was noticed that in  $SVD_1$  the swell and the  $T_p$  decreased toward north and toward shallow regions, respectively. The  $SVD_2$  exhibited a positive anomaly at southeast of the domain, more specifically to the south

of Africa, suggesting again a contribution of this sector on the spatial variability of wave fields in the Atlantic Ocean (Fig. 11 and 12).

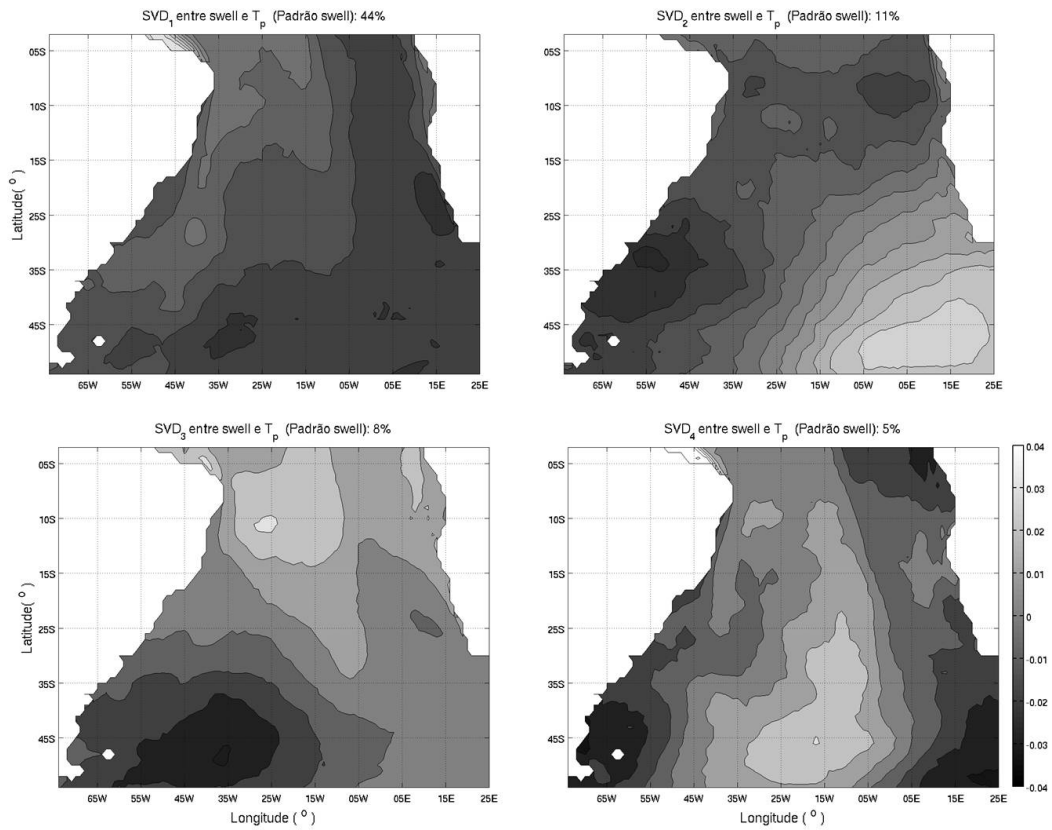


Figure 11: Spatial correlation maps of swell associated to variations of peak period.

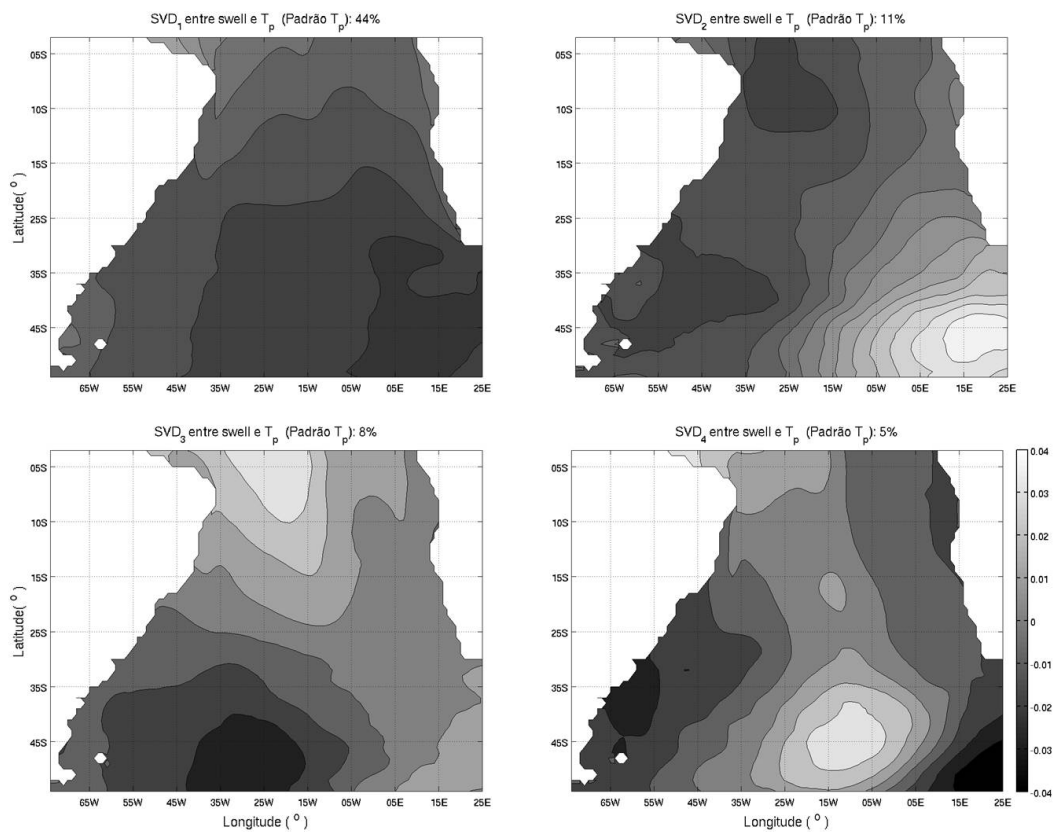


Figure 12: Spatial correlation maps of peak period associated to variations of swell.

### 3.3.2. Between $H_s$ and $T_p$

The second greatest correlation in the coupled analysis occurred between  $H_s$  and  $T_p$ , where the four principal modes have explained 61% of variability. As in the patterns obtained by SVD analysis of the  $T_p$  and swell, the actions centers of  $T_p$  is less clear than those of the swell patterns (Fig. 13 e 14).



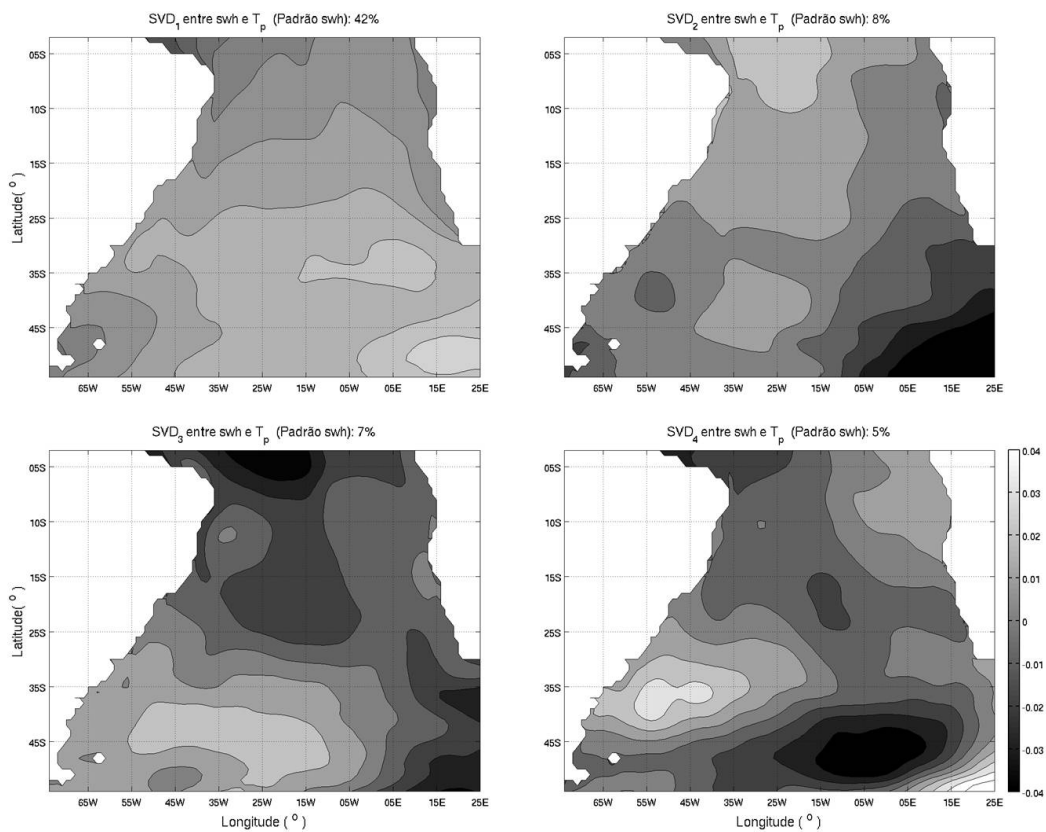


Figure 13: Spatial correlation maps of significant height wave associated to variations of peak period.

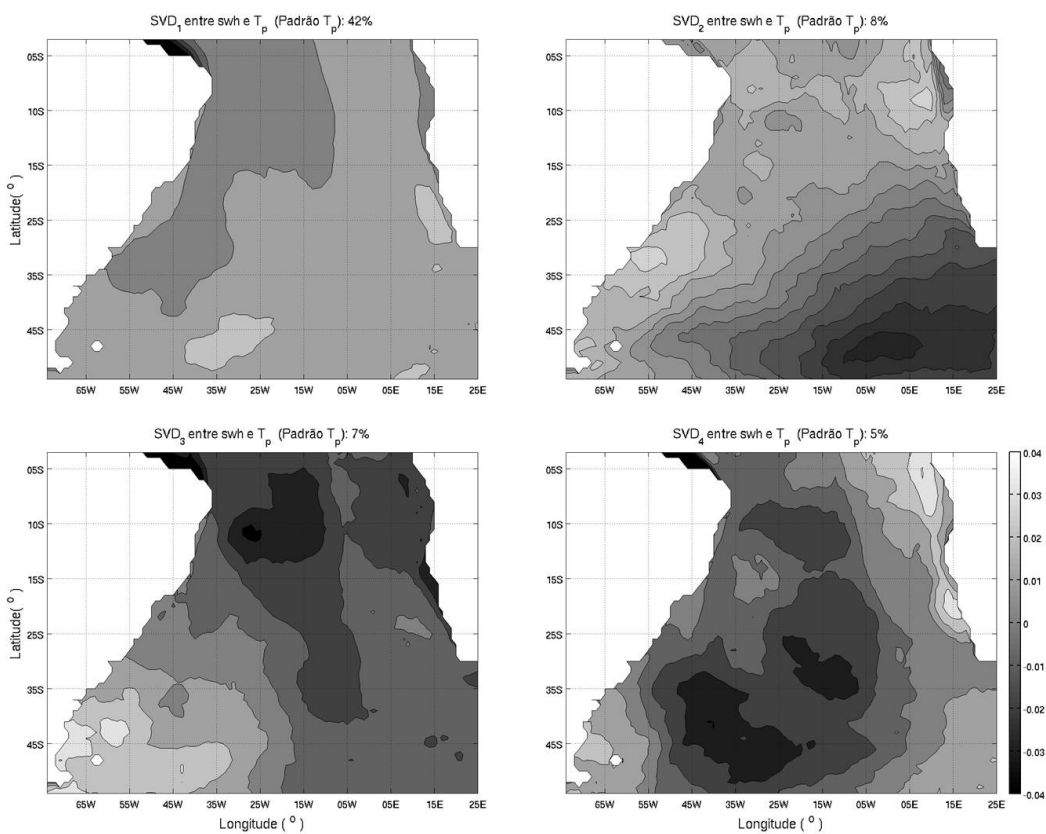


Figure 14: Spatial correlation maps of peak period associated to variations of significant wave height.

### 3.3.3. Between $U_{10}$ e $H_s$

The eigenvalues added have explained 46% of coupled variability between  $U_{10}$  and  $H_s$ , as can be realized in figure 15.

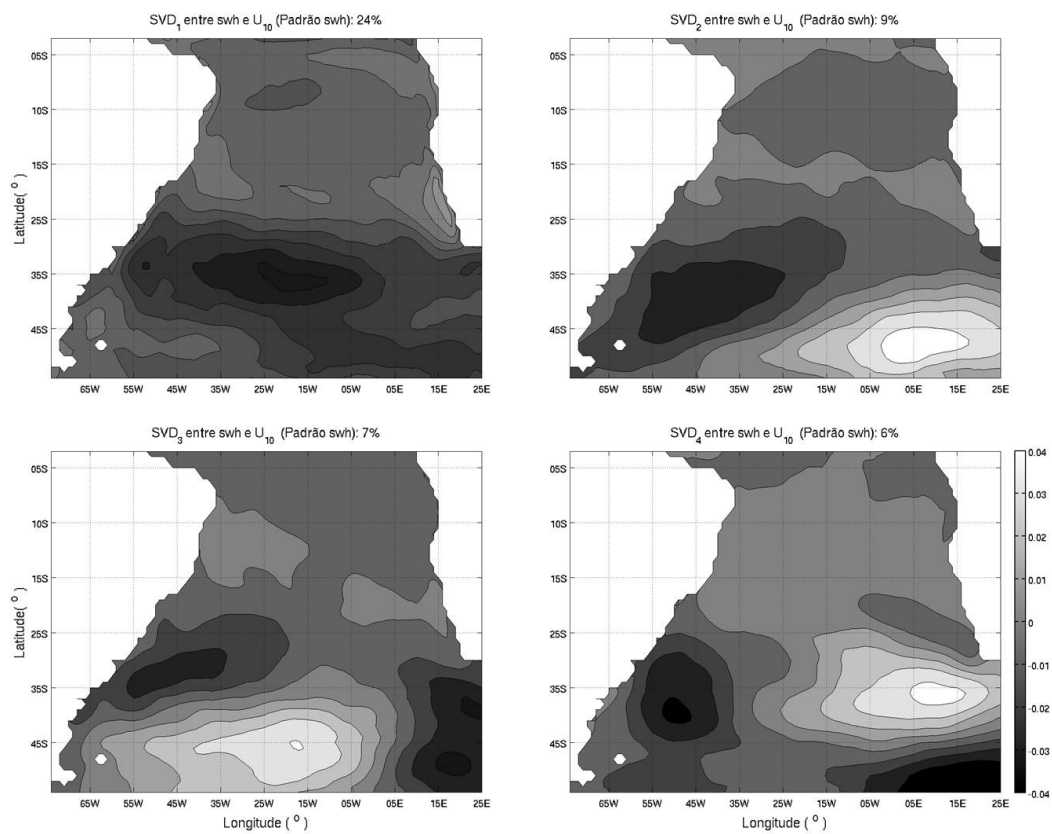


Figure 15: Spatial correlation maps of significant height wave associated to variations of wind at 10m height.

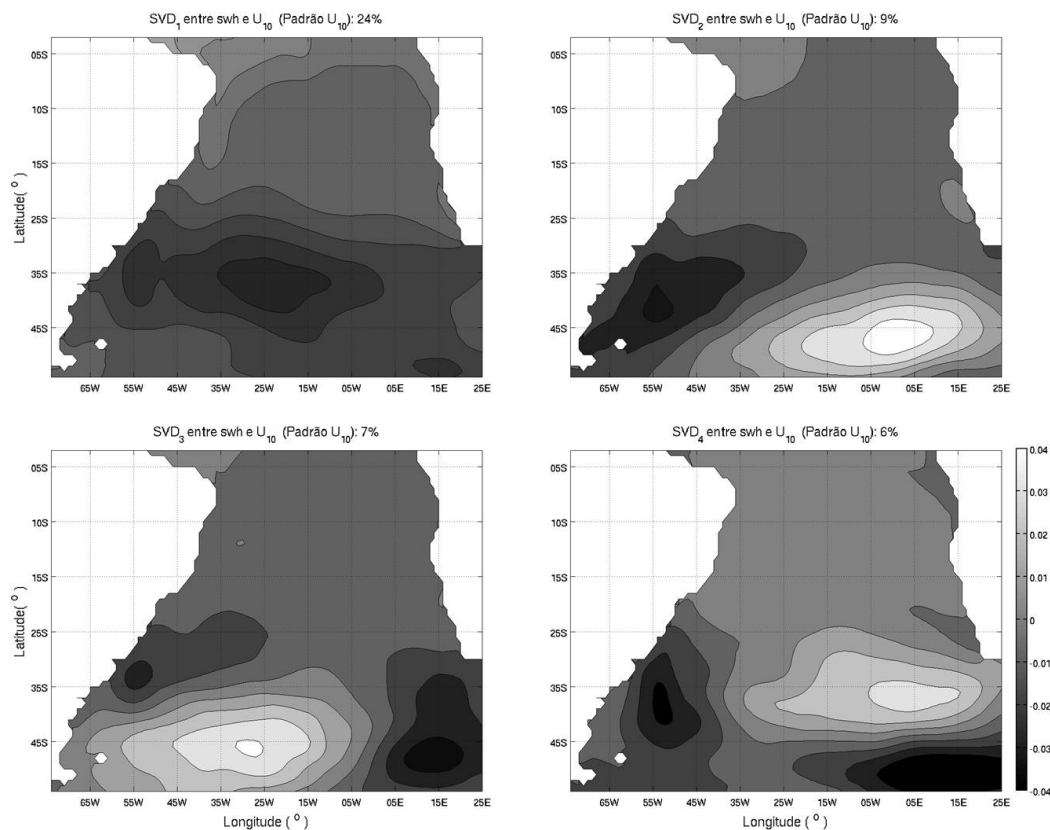


Figure 16: Spatial correlation maps of wind at 10m height associated to variations of significant wave height.

#### 4. CONCLUSIONS

The variability of ocean waves in the South Atlantic Ocean from June 2006 to July 2007 is explained by four leading modes. The greatest eigenvalues found were between swell and  $T_p$  and between  $H_s$  and  $T_p$ , indicating a strong correlation between these variables.

A strong association between the variability of ocean waves in the South Atlantic Ocean and the fluctuations of Subtropical Anticyclone of South Atlantic has been found.

It was found, even that for a short period of one year, contributions of swell from Pacific, Indian and North Atlantic Oceans.

The application of empirical orthogonal functions and singular value decomposition method's for obtaining leading modes of spatial variability of oceanic waves, apart from appearing pioneer in the South Hemisphere, provided a better understanding of the ocean wave's behavior in the South Atlantic Ocean. The wave

modeling combined with EOF and SVD considering a longer period of time is suggested for future work, in order to purpose insights for the variability of waves in annual and decadal scales.

## 5. REFERENCES

ALVES, J. H. G. M. and YOUNG, I. R. On estimating extreme wave heights using combined Geosat, Topex/Poseidon and ERS-1 altimeter data. **Applied Ocean Research**, v. 25, p. 167-186, 2004.

ALVES, J. H. G. M. Numerical modeling of ocean swell contributions to the global wind-wave climate. **Ocean Modelling**, v. 11, p. 98-122, 2006.

BJORNSSON, H. and VENEGAS, S. A. **A Manual for FOE and DVS analyses of Climatic Data**. Department of Atmospheric and Oceanic Sciences and Centre for Climate and Global Change Research, MGil University, 53p, 1997.

BRANCO, F. V.; ALVES, J. H. G. M. and CAMARGO, R. Contribuições de *Swell* gerado em tempestades distantes para o clima de ondas na costa brasileira. **In: XIII Congresso Brasileiro de Meteorologia**, Fortaleza, CE, v. 1, p. 1-1, 2004.

BRANCO, F. V. **Contribuições de *Swell* Gerado em Tempestades Distantes para o Clima de Ondas na Costa Brasileira**. Dissertação de mestrado da USP, 2005.

CANDELLA, R. N. **Estudo de Casos de Ondas no Atlântico Sul através de Modelagem Numérica**. Tese de Mestrado em Engenharia Oceânica, COPPE, 1997.

CHENG, X. and DUNKERTON T. J. Orthogonal rotation of spatial patterns derived from singular value decomposition analysis. **Journal of Climate**, v. 11, p. 2631-2643, 1995.

COLI, A. B. and MATA, M. M. Caracterização das Alturas de Onda no Atlântico Sul Ocidental Através da Altimetria Topex/Poseidon. **In: VIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, Salvador, BA, 1996.

GRIGORIEVA, V. and GULEV, S. K. Extreme Wind Waves Worldwide from the VOS Data and Their Changes over the Last 50 Years. **In 9th International Workshop on Wave Hindcasting and Forecasting**, Victoria, B. C., Canada, 2006.

HASSELMANN, K. On the non linear energy transfer in a gravity wave-spectrum. Part 1: General theory. **Journal of Fluid Mechanics**, v. 12, p. 481-500, 1962.

HASSELMANN, S. and HASSELMANN, K. Computations and parameterizations of the nonlinear energy transfer in a gravity-wave spectrum, part 1: A new method for efficient computations of the exact nonlinear transfer integral. **Journal of Physical Oceanography**, v. 15, p. 1369-1377, 1985.

JANSSEN, P. A. E. M.; HANSEN, B. and BIDLOT, J. R. Verification of the ECMWF Wave Forecasting System against Buoy and Altimeter data. **Weather Forecasting**, v. 12, p. 763-784, 1997b.

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

PARISE, C. K.; CALLIARI, L. J. and KRUSCHE, N. Extreme storm surges in the south of Brazil: atmospheric conditions and shore erosion. **Brazilian Journal of Oceanography**, v. 57(3), p. 175-188, 2009.

PARK, C. K. and SCHUBERT, S. D. Remotely forced intraseasonal oscillations over the tropical Atlantic. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 50, p. 89-103, 1993.

ROBERTSON, A. W. and MECHOSO C. R. Interannual and Interdecadal Variability of the South Atlantic Convergence Zone. **Monthly Weather Review**, v. 128, p. 2947-2957, 2000.

ROCHA, R. P.; SUGAHARA, S. and DA SILVEIRA, R. B. Sea Waves Generated by Extratropical Cyclones in the South Atlantic Ocean: Hindcast and Validation against Altimeter Data. **Weather and Forecasting**, v. 19, p. 398-410, 2003.

TALJAARD, J. I. Development, distribution and movement of cyclones and anticyclones in the Southern Hemisphere during the I. G. Y. **Journal of Applied Meteorology**, v. 6, p. 973-987, 1967.

VENEGAS, S. A., MYSAK, L. A. and STRAUB, D. N. Atmosphere - Ocean Coupled Variability in the South Atlantic. **Journal of Climate**, v.10, p. 2904-2920, 1997.

WAMDIG. The WAM Model - A Third generation ocean wave prediction model. **Journal of Physical Oceanography**, v. 18, p. 1775-1810, 1988.

WANG, X. L. and SWAIL V. R. Changes of Extreme Wave Heights in Northern Hemisphere Oceans and Related Atmospheric Circulation Regimes. **Journal of Climate**, v. 15, p. 2204-2221, 2001.

WANG, X. L. and SWAIL V. R. Trends of Atlantic Wave Extremes as Simulated in a 40-Yr Wave Hindcast Using Kinematically Reanalyzed Wind Fields. **Journal of Climate**, v. 15, p. 1020-1034, 2002.

**II. CORPO PRINCIPAL:**

**CAPÍTULO 2**

# ANÁLISE DOS ESPECTROS DE ONDA GERADOS POR UM CICLONE EXTRATROPICAL INTENSO NO OCEANO ATLÂNTICO SUL E A CONTRIBUIÇÃO ENERGÉTICA PARA AS ONDAS NA REGIÃO AO LARGO DA COSTA DO RIO GRANDE DO SUL

Parise<sup>1</sup>, C. K. e Farina<sup>2</sup>, L.

<sup>1</sup> Programa de pós-graduação em Geociências, UFRGS. Email: clau\_oceano@yahoo.com.br

<sup>2</sup> Instituto de Matemática, UFRGS. Email: farina@mat.ufrgs.br

<sup>1,2</sup> (Av. Bento Gonçalves, 9500, Agronomia, CEP: 91509-900, Porto Alegre, RS, Brasil)

## RESUMO

O presente trabalho tem o objetivo de fornecer informações sobre a contribuição de energia que um ciclone extratropical intenso fornece sobre as ondas em três regiões *offshore* à costa do Rio Grande do Sul. Foi utilizado o modelo global de onda WAM para obtenção dos espectros de energia ao longo da trajetória do ciclone, mais especificamente no centro do ciclone, a sua esquerda e a sua direita. A máxima energia espectral no centro do ciclone ( $155 \text{ m}^2/\text{s}^2/\text{grau}$ ) ocorreu dia 01 de setembro às 21h e na região *offshore* à Praia do Cassino ( $115 \text{ m}^2/\text{s}^2/\text{grau}$ ) dia 03 de setembro às 21h, isto é, com uma defasagem de 48 h. Os 67% dos espectros com densidade de energia maior à esquerda do ciclone e as figuras do *swell* e da altura significativa comprovam a ocorrência de interação onda-onda nessa região, fenômeno conhecido como ressonância. Assumindo esse evento como extremo em escala anual, pode-se concluir que um evento de ciclone extratropical de mesma magnitude venha contribuir com mais de 70% da sua energia nos espectros de onda ao largo da costa do Rio Grande do Sul.

**Palavras-chave:** Ciclone Extratropical, Espectro de Onda, Ressonância.

## 1. INTRODUÇÃO

A ciclogênese no Oceano Atlântico Sul vem sendo amplamente estudada por inúmeros pesquisadores devido ao seu importante papel na transferência de energia da atmosfera para o oceano (TALJAARD (1967); GAN e RAO (1991); MURRAY e SIMMONDS (1991a e 1991b); JONES e SIMMONDS (1993); SINCLAIR (1994 e 1995); RAO *et al.* (2002); REBOITA *et al.* (2005); PARISE (2007) e PARISE *et al.* (2009)).

Ciclones extratropicais são fenômenos meteorológicos sinóticos responsáveis por grande transferência de momentum devido ao atrito do vento com as camadas superficiais do oceano, o que os torna importantes no estudo de geração e comportamento de ondas oceânicas.

A quantidade de energia transferida cresce quanto maior foi a intensidade, duração e o tamanho da pista de vento (*fetch*) e quanto menor for a velocidade de propagação do centro de baixa pressão atmosférico. Assim, a combinação drástica para a geração de um estado de mar extremo é a presença de vento intenso com direção mais ou menos fixa, atuando por um longo período em uma grande área sob domínio de um ciclone que se desloca lentamente sobre o oceano. Ou seja, quanto mais lentamente o ciclone se desloca, mais energia é transferida para as camadas superficiais do oceano, conseqüentemente, maior a altura de onda (LUI *et al.* 2007).

ROCHA *et al.* (2003) reconstituíram o estado do mar durante seis ciclones extratropicais no Oceano Atlântico Sul entre abril e setembro de 1999 usando o modelo global *Wave Watch III* (TOLMAN, 1999) comparados a dados de altimetria do Topex. Três deles apresentaram trajetória para leste/sudeste e dois para norte, sendo que os ciclones mais e menos intensos ocorreram em abril e agosto, respectivamente.

Na região sob domínio da tempestade, ondas de diferentes alturas e intensidades são geradas e acabam dispersando-se à medida que se afastam da zona de vento máximo. As ondas de mesmo período agrupam-se e passam a propagar-se com velocidade de grupo através da relação de dispersão:

$$C_g^2 = gk \tanh(kh)$$

onde  $g$  é a gravidade;  $k$  é o número de onda e  $h$  é a profundidade do oceano.



YOUNG (2006) estudou o espectro direcional das ondas durante a passagem de furacões usando dados de bóia e concluiu que em quase todos os quadrantes da tempestade, as ondas dominantes foram *swell*.

LUI *et al.* (2007) realizaram um estudo para quantificar a influência da distribuição do vento e da velocidade de deslocamento e da intensidade de tempestades sobre as ondas no Hemisfério Norte. Os pesquisadores concluíram que a velocidade de deslocamento da tempestade (VDT) tem contribuição significativa na estrutura assimétrica das ondas elevando a altura de onda significativa ( $H_s$ ) no quadrante nordeste da trajetória da tempestade e diminuindo no quadrante sudoeste devido à diminuição da atuação do vento e da pista de vento, não havendo, assim, efeito de ressonância. Esse efeito é significativo quando a VDT aumenta até o valor da velocidade do grupo das ondas dominantes, e é menos significativo quando a VDT é maior que a velocidade do grupo.

O objetivo deste trabalho é reproduzir o espectro de energia de onda durante a formação de um ciclone extratropical intenso no Oceano Atlântico sul bem como investigar a sua influência sobre as ondas da região ao largo da costa do Rio Grande do Sul.

## 2. METODOLOGIA

### 2.1. Modelo de geração de onda

Os espectros de energia foram gerados pelo modelo de onda global *WAM* (*Wave Model*) (WAMDIG, 1988), versão 4.5, resolução espacial de  $0.937^\circ \times 0.935^\circ$ , temporal de 3h e espectral de 30 frequências e 12 direções. O *WAM* foi utilizado para geração de ondas no período de junho de 2006 a julho de 2007, forçado pelos campos de tensão de vento do modelo atmosférico de circulação geral do CPTEC (MCGA-CPTEC). O MCGA-CPTEC é um modelo hidrostático de equações primitivas, com resolução de 100 km na horizontal e 28 níveis na vertical (T126L28) operacionalmente inicializado com as análises geradas no *National Centers for Environmental Prediction* (NCEP). Maiores detalhes das características dessa versão, bem como das parametrizações físicas estão descritas em KINTER III *et. al* (1997).

As simulações do *WAM* foram realizadas no modo ‘hot start’ do modelo e com ‘spin-up’ de 30 dias. Os arquivos de saída do modelo foram armazenados em um passo de tempo de 6h, totalizando quatro dados diários de energia espectral.

Foi selecionado o período de 01 a 03 de setembro de 2006 para estudo de caso de um ciclone extratropical no Oceano Atlântico o qual gerou maré meteorológica extrema na Praia do Cassino (RS).

## 2.2. Estudo de caso

O evento de ciclone extratropical intenso selecionado para a geração dos espectros de energia ocorreu no Oceano Atlântico Sul, com formação dia 1° de setembro e tempo de vida de 48h, quando se dissipou para o meio do oceano. A situação meteorológica (pressão atmosférica ao nível do mar e vento zonal e meridional a 10 m de altura), e a trajetória do ciclone foram estudadas por *PARISE* (2007) e *PARISE et al.* (2009). Os autores utilizaram dados de re-análise para representar a situação meteorológica dois dias anteriores e no dia da máxima elevação da maré meteorológica (Fig. 1) os quais tem resolução espacial de  $2.5^\circ \times 2.5^\circ$  e temporal de 6h (0000, 0600, 1200, 1800 UTC) (*KALNAY et al.*, 1996).

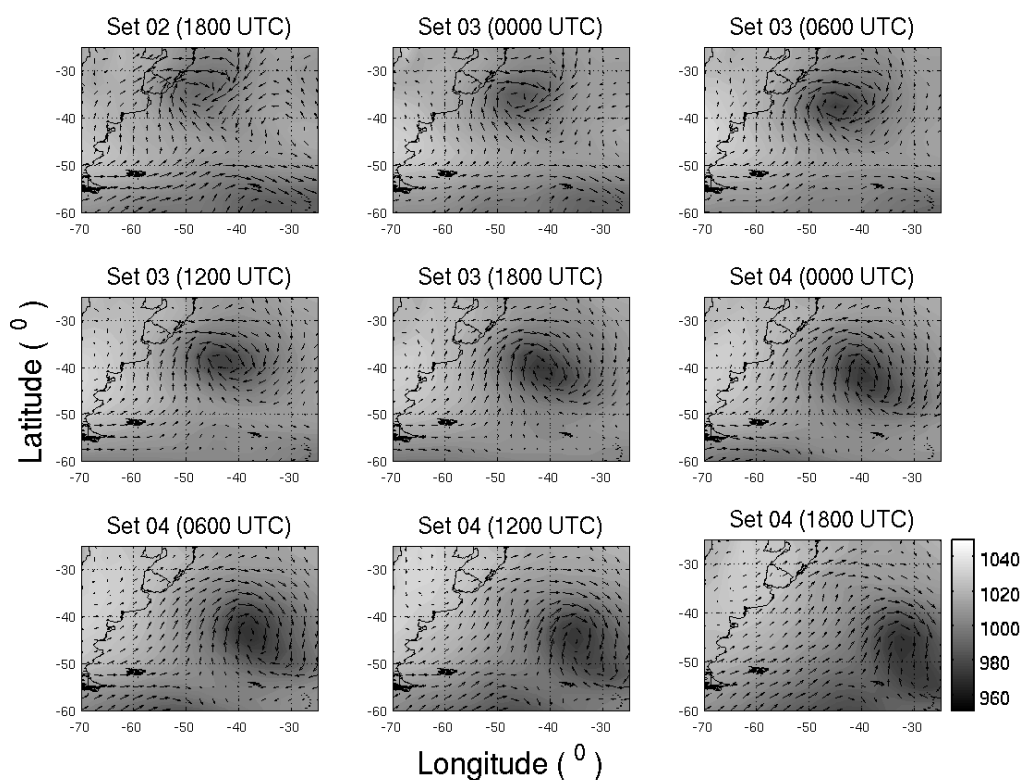


Figura 1: Pressão atmosférica e vento do ciclone extratropical intenso de setembro de 2006 representados, respectivamente, por tons de cinza e setas. São apresentadas três situações: 1º coluna: dois dias anteriores ao nível máximo; 2º coluna: dia anterior ao nível máximo e 3º coluna: dia de máxima sobre elevação do oceano. Foram utilizados quatro dados diários de pressão e vento (0000, 0600, 1200, 1800 UTC). Modificado de PARISE (2007).

### 2.3. Experimento

Com o objetivo de investigar diferentes espectros na periferia do ciclone decorrentes da sua circulação ciclônica e horária, o espectro de onda foi obtido no centro (C) do ciclone extratropical, bem como à direita (D) e à esquerda (E) da trajetória desenvolvida pelo ciclone, como esquematizado na figura 2.

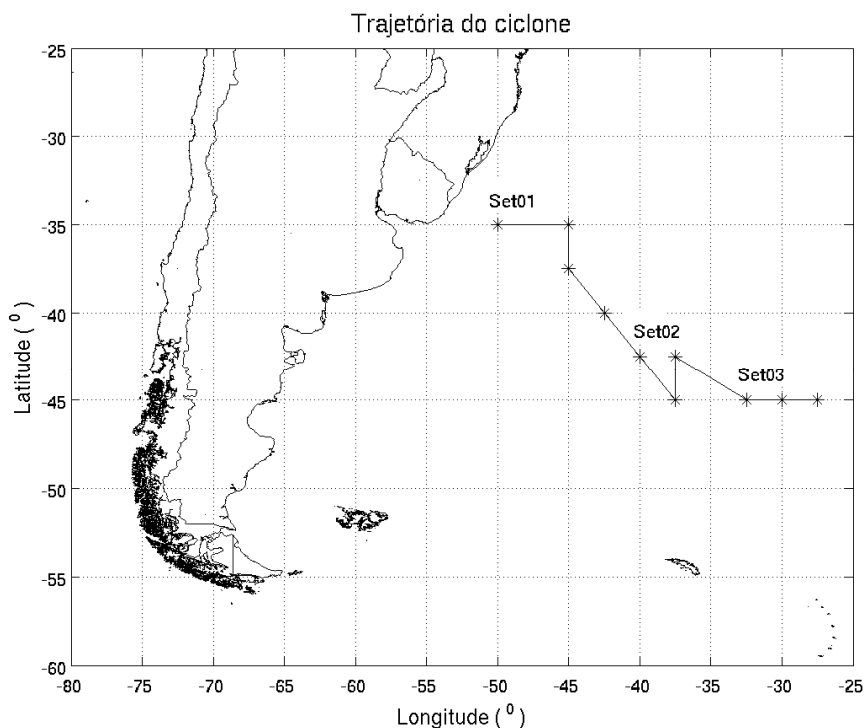


Figura 2: Trajetória do ciclone extratropical calculada pelo rastreamento da máxima vorticidade relativa no centro do ciclone por desde sua formação até a dissipação para o oceano. Modificado de PARISE (2007).

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

#### 3.1. Centro e periferia do ciclone

O espectro foi obtido pelo modelo de 01 a 04 de setembro a fim de acompanhar sua evolução desde a formação, desenvolvimento até a dissipação do ciclone.

Em 67 % dos espectros obtidos ao longo da trajetória do ciclone a energia espectral foi maior na região à esquerda do ciclone que na região à direita (Fig. 3). A máxima energia espectral no centro do ciclone ocorreu às 21 h do dia 01 de setembro com densidade espectral de  $155 \text{ m}^2/\text{s}\cdot\text{grau}$  no seu centro,  $80 \text{ m}^2/\text{s}\cdot\text{grau}$  à esquerda e  $60 \text{ m}^2/\text{s}\cdot\text{grau}$  à direita (Fig. 5).

A altura significativa de onda durante toda a vida do ciclone atingiu 9,18 m no seu centro, 6,90 m à esquerda e 6,68 m à direita do mesmo.

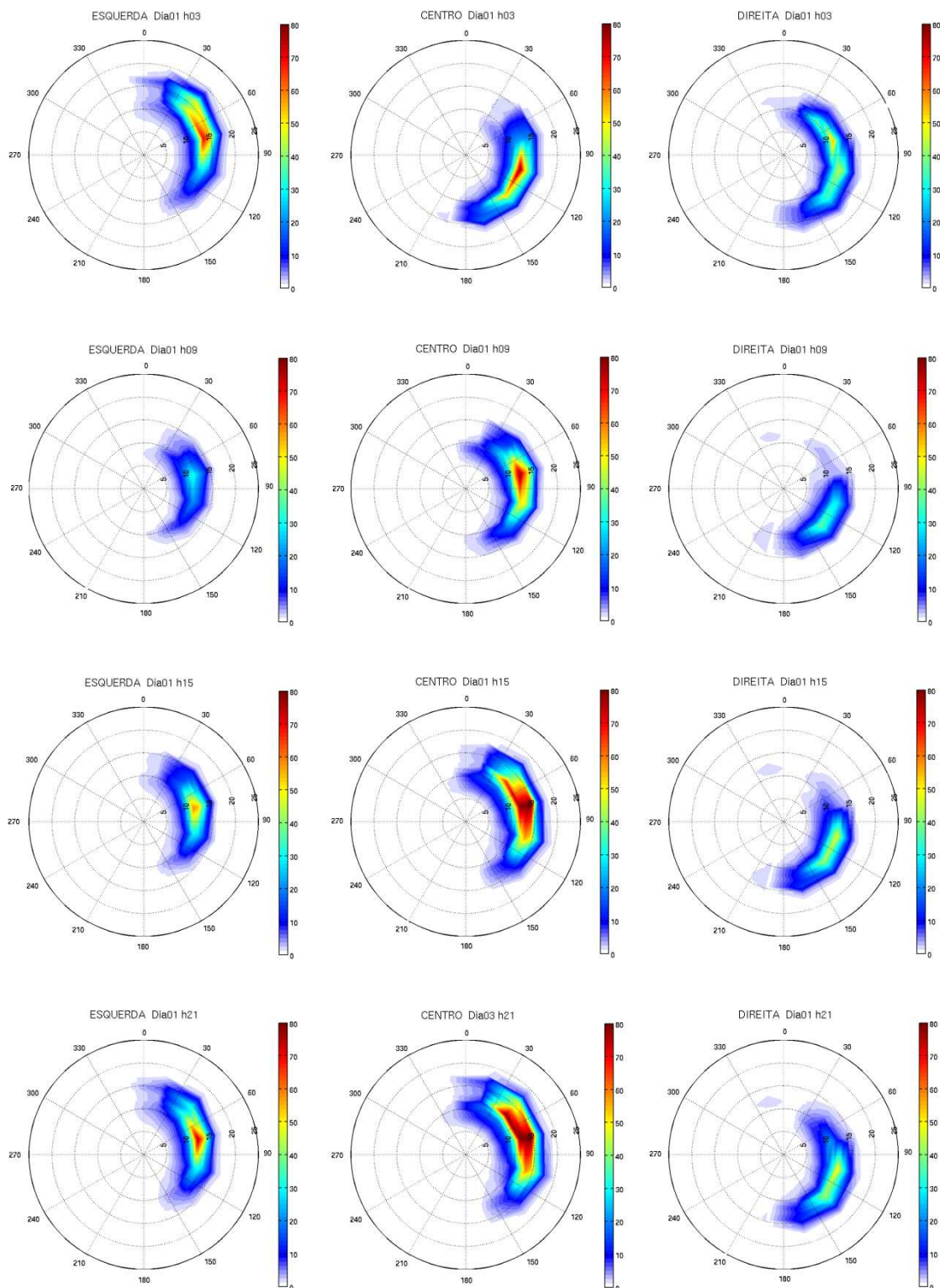


Figura 3: Primeira coluna: espectros de onda à esquerda do ciclone; Segunda coluna: espectros de onda no centro do ciclone; Terceira coluna: espectros de onda à direita do ciclone. Datas e horas estão representadas nos títulos.

Devido ao giro horário dos ciclones no Hemisfério Sul e ao sentido de deslocamento do seu centro de ação, a região a E acaba ficando exposta a forçantes de vento prolongadas fazendo com que o centro de baixa pressão, ao se deslocar, acabe encontrando as ondas antigas (*swell*) geradas anteriormente. Essas ondas acabam interagindo com ondas jovens geradas localmente (*sea*) e essa interação onda-onda na mesma direção resulta por amplificar as alturas de onda nessa região. Dessa maneira, a assimetria das ondas na periferia do ciclone pode ser explicada pelo fenômeno de ressonância, o qual estaria contribuindo para a amplificação dos espectros de onda à esquerda do ciclone. Quando o ciclone se move ao longo da sua trajetória não encontra, na nova posição, ondas *swell* a sua direita, pois nesse local o *swell* viaja em sentido contrário ao sentido de deslocamento do centro da tempestade (Fig. 4).

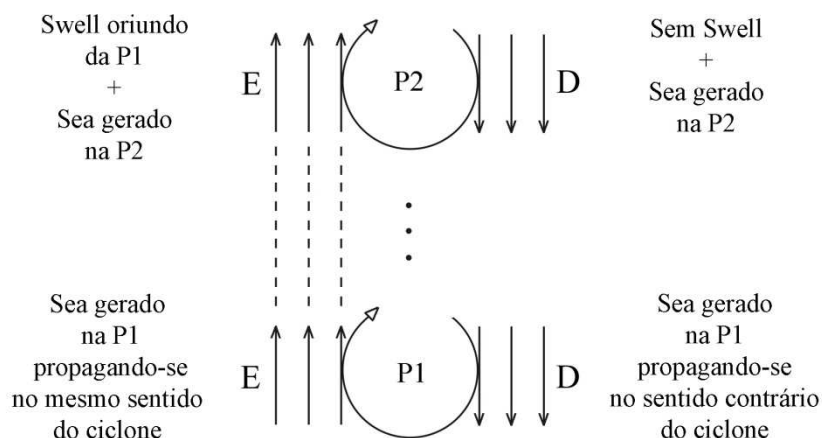


Figura 4: Figura esquemática mostrando a presença e ausência de *swell*, respectivamente à esquerda e à direita da trajetória do ciclone, quando esse se desloca da posição 1 (P1) para a posição 2 (P2).

A fim de se visualizar a banda de freqüências predominantes nos espectros foram gerados os espectros unidimensionais nos quais foi possível observar um pico espectral nas bandas de baixas freqüências (abaixo de 0,1 Hz) para os três pontos (E, C e D), o que indica a presença de ondas de longos períodos. Acima de 0,1 Hz, observou-se a presença de uma cauda espectral mostrando que ondas de pequenos períodos (*sea*) apresentaram um decréscimo da densidade de energia (Fig. 5).

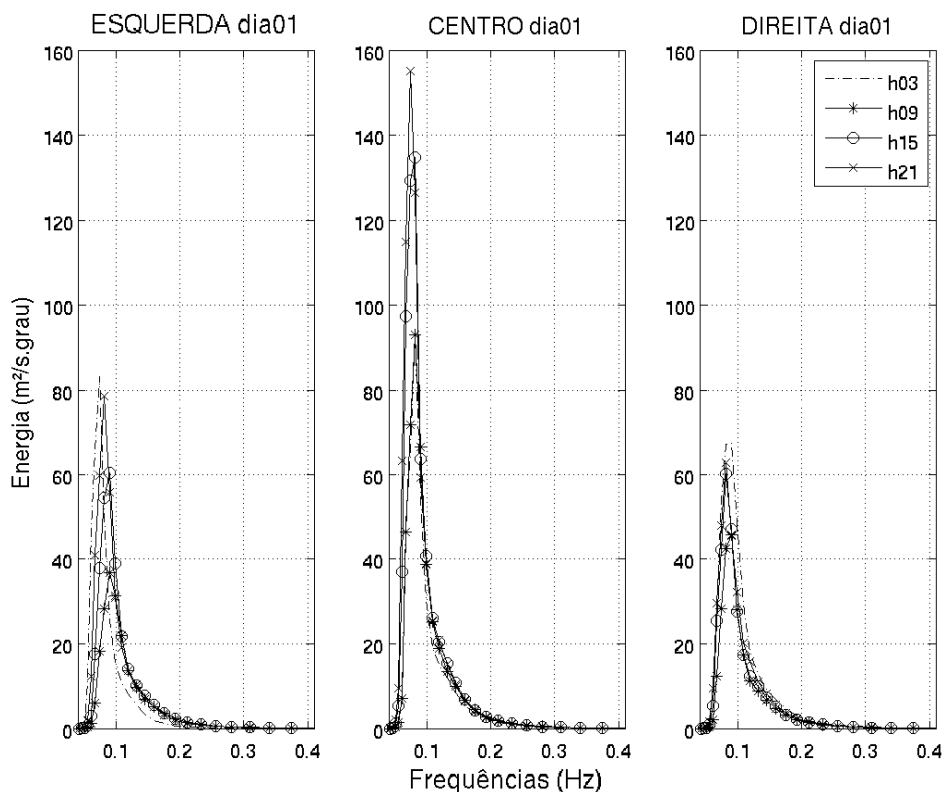


Figura 5: Espectros unidimensionais da energia de onda ao longo da trajetória do ciclone extratropical no Oceano Atlântico Sul no dia 01/09/06.

### 3.2. Região ao largo da costa do RS.

Foi selecionado um ponto *offshore* à Praia do Cassino ( $32^{\circ}$  S e  $50^{\circ}$  W), um ponto à esquerda ( $37^{\circ}$  S e  $55^{\circ}$  W) e um ponto à direita ( $27^{\circ}$  S e  $45^{\circ}$  W) desse para obtenção dos espectros de onda durante o período de ocorrência do ciclone extratropical com a finalidade de analisar a contribuição de energia desse para as ondas ao largo da costa do RS.

Os espectros na região à E, além de mais intensos que à D, apresentaram bi-modalidade, com presença de ondas de menor período (em torno de 8 s) se propagando de norte e ondas de maior período (em torno de 15 s) se propagando de sudeste. Isso indica a influência de outros sistemas atmosféricos locais na região gerando ondas locais que acabaram interagindo com o *swell* gerado pelo ciclone sobre o Oceano Atlântico Sul. Na região à direita, entretanto, não foi observado bi-modalidade e de acordo com o período de pico das ondas em torno de 15 s sugere-se a dominância do *swell* (Fig. 6).

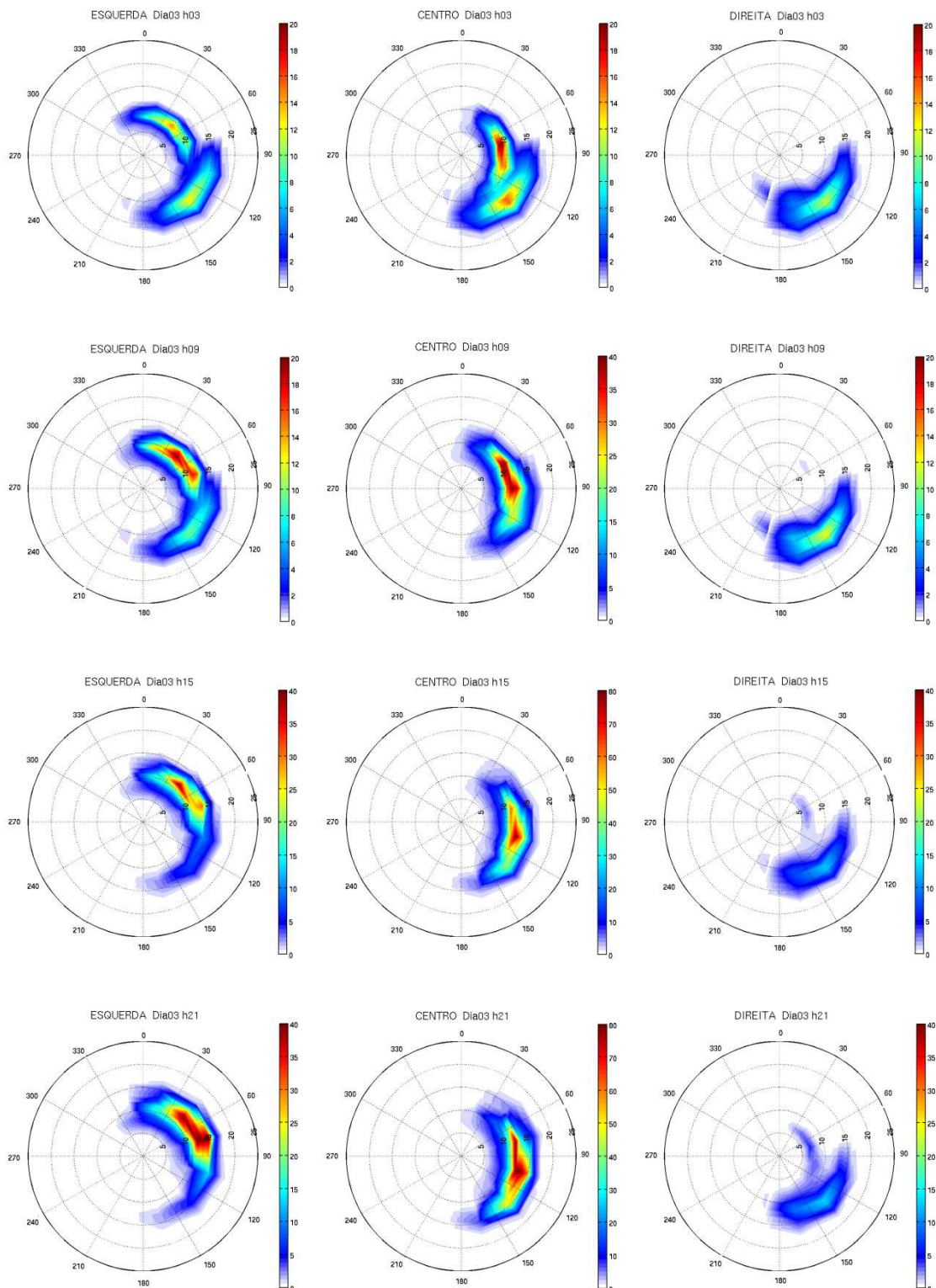


Figura 6: Espectros de energia de onda obtidos ao largo da costa do RS. Primeira coluna: espectros de onda à esquerda ( $37^{\circ}$  S e  $55^{\circ}$  W); Segunda coluna: espectros de onda *offshore* à Praia do Cassino ( $32^{\circ}$  S e  $50^{\circ}$  W); Terceira coluna: espectros de onda à direita ( $27^{\circ}$  S e  $45^{\circ}$  W). Datas e horas estão representadas nos títulos.



A figura 7 mostra a evolução do *swell* no dia 03 de setembro, das 03h quando não foi observada a presença de *swell* e às 21h quando se percebe a presença de *swell* de 5,5 m próximo aos pontos PE (ponto à esquerda), PC (ponto *offshore* à Praia do Cassino) e PD (ponto à direita).

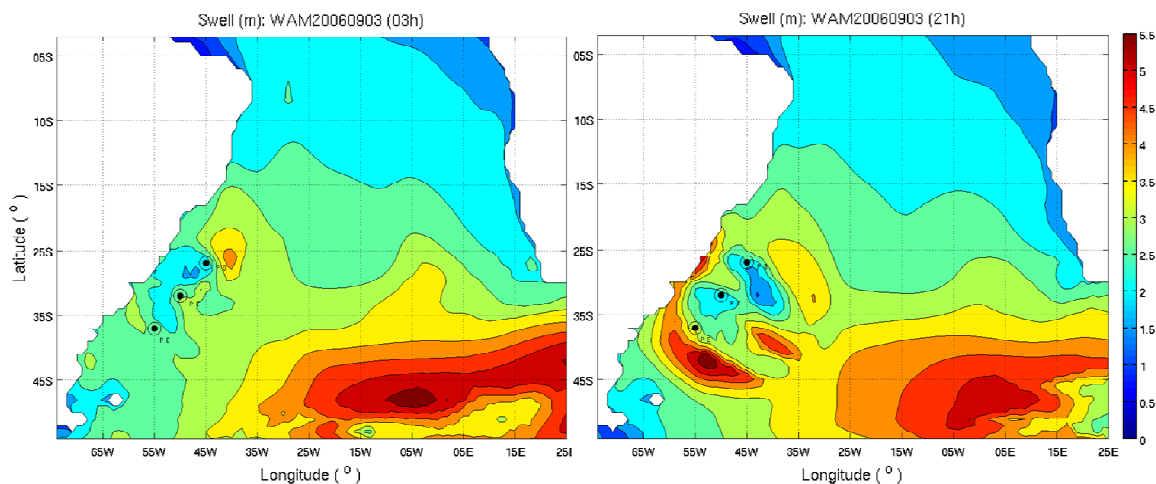


Figura 7: Evolução do *swell* das 03h (gráfico da esquerda) às 21h (gráfico da direita) do dia 03 de setembro.

Porém, a máxima densidade espectral na região ao largo da costa do RS ocorreu às 21 h do dia 03 de setembro, ou seja, com uma defasagem de 48 h em relação ao pico espectral no centro do ciclone.

A altura significativa de onda na região *offshore* à Praia do Cassino passou de 3,38 m para 8 m no intervalo de 24 h (Fig. 8), quando atingiu seu pico de energia espectral em  $115 \text{ m}^2/\text{s}^2/\text{grau}$ ,  $60 \text{ m}^2/\text{s}^2/\text{grau}$  no ponto à esquerda e  $10 \text{ m}^2/\text{s}^2/\text{grau}$  no ponto à direita desse (Fig. 9).

MELO FILHO *et al.* (2008) reconstituíram um evento de ciclone intenso no Oceano Atlântico Sudoeste aninhando um modelo global (*Wave Watch 3 - WW3*) a um regional (*RefDif*), enfatizando as regiões de Florianópolis (SC) e Vitória (ES). Esses autores mostraram que o ciclone formou-se em 31 de maio com máxima altura de onda simulada pelo *WW3* de 16 m, alcançando à costa brasileira com uma defasagem de três dias. As máximas densidades espectrais obtidas para os dois locais foram de  $29 \text{ m}^2/\text{s}^2/\text{grau}$  com altura significativa de 4,3 m em Florianópolis e  $65 \text{ m}^2/\text{s}^2/\text{grau}$  e altura significativa de 5,3 m em Vitória. Os autores associaram essa maior altura de onda no ES que em SC à posição e trajetória do ciclone no oceano.

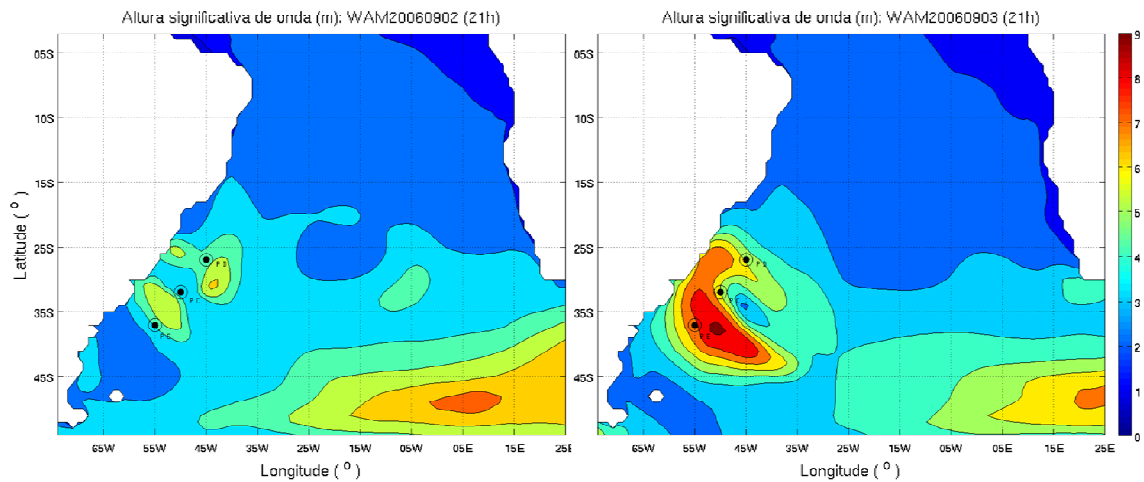


Figura 8: Evolução da altura significativa de onda no intervalo de 24h entre às 21h do dia 02 e às 21h do dia 03 de setembro.

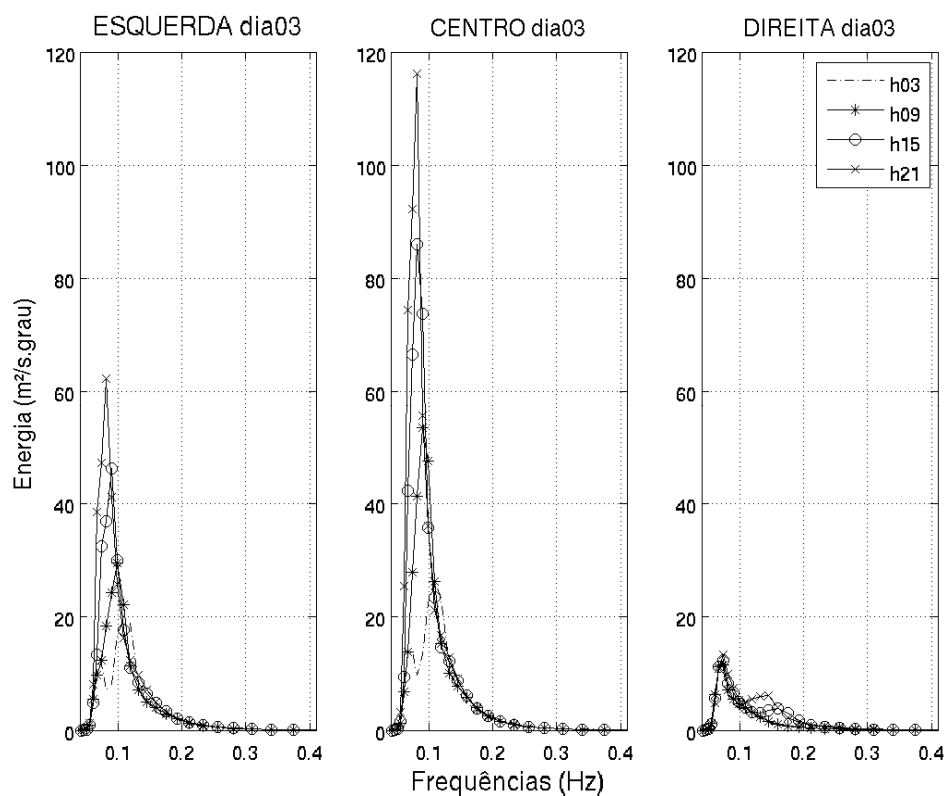


Figura 9: Espectros unidimensionais da energia de onda ao largo da costa do RS ( $32^{\circ}$  S e  $50^{\circ}$  W) e nos pontos à esquerda e à direita desse decorrente da passagem de um ciclone extratropical no Oceano Atlântico Sul.

#### 4. CONCLUSÕES

O ciclone extratropical de setembro de 2006 foi escolhido para esse estudo de caso por ter sido o mais intenso e por causar o maior deslocamento da linha d'água em direção ao continente em um ano de monitoramento (junho/2006 a julho/2007) na Praia do Cassino (RS).

Dos  $155 \text{ m}^2/\text{s}\cdot\text{grau}$  de densidade espectral máxima (no dia 01 às 21h) no centro do ciclone,  $115 \text{ m}^2/\text{s}\cdot\text{grau}$  (no dia 03 às 21h) foi transferido para o ponto central *offshore* (PC), ou seja, 74% da energia do ciclone foi transferida para a região ao largo do RS com uma defasagem de 48 h. Logo, assumindo esse evento como extremo em uma escala anual, pode-se concluir que um evento de ciclone extratropical de mesma magnitude venha contribuir com mais de 70% da sua energia nos espectros de onda ao largo da costa do RS.

Os resultados obtidos por meio dos espectros de onda gerados pelo modelo *WAM* comprovam a teoria da ressonância entre ondas. O fato de 67% dos espectros gerados em três dias de simulações (01, 02 e 03 de setembro) apresentarem-se mais intensos na região à esquerda do ciclone, torna verdadeira a hipótese de interação entre ondas *sea* e *swell* no lado esquerdo do sentido da trajetória do ciclone. Além de ondas de diferentes idades entrarem em ressonância resultando no aumento da altura de onda decorrentes da soma de ambas, a presença de uma maior pista de vento no lado esquerdo também favorece a amplificação das mesmas.

A modelagem de onda no presente trabalho foi uma ferramenta bastante eficaz por fornecer os espectros de energia de onda em locais específicos do Oceano Atlântico Sul diante da larga escala espacial utilizada.

Devido à freqüente ocorrência de eventos de ciclones extratropicais no Oceano Atlântico Sul e conhecendo-se a magnitude da transferência de energia desses sistemas para as ondas dessa bacia, sugere-se uma investigação do fenômeno de ressonância em um grupo de eventos de ciclones. Utilizando-se de um maior  $n$  amostral tornar-se-á possível a aplicação de ferramentas estatísticas que melhor responderão a questões tais como: 'Que relação existe entre as diferentes trajetórias dos ciclones extratropicais sobre o Oceano Atlântico e a quantidade de energia que alcança águas rasas'; 'As ondas na região à esquerda do sentido de movimentação do centro de baixa pressão do ciclone são significativamente maiores'; 'Quais as direções e intensidades

predominantes do *swell* que alcançam a costa do Rio Grande do Sul oriundos de distintas trajetórias de ciclones’.

## 5. REFERÊNCIAS

GAN, M. A. e RAO, B. V. Surface cyclogenesis over South America. **Monthly Weather Review**, v. 119, p. 1293-1302, 1991.

JONES, D. A. e SIMMONDS, I. Climatology of Southern Hemisphere extratropical cyclones. **Climate Dynamics**, v. 9, p. 131-145, 1993.

KINTER III J.L.; DEWITT, D.; DIRMEYER, P.; FENNESSY, M.; KIRTMAN, B.; MARX, L.; SCHNEIDER, E.; SHUKLA, J. e STRAUS, D. **The COLA Atmosphere-Biosphere General Circulation Model Volume: 1 Formulation**. COLA 51, 46 p, 1997.

LUI, H.; XIE, L.; PIETRAFESA, L. J. e BAO, S. Sensitivity of wind waves to hurricane wind characteristics. **Ocean Modelling**, v. 18, p. 37-52, 2007.

MURRAY, R. J. e SIMMONDS, I. A numerical scheme for tracking cyclone centers from digital data. Part I: Development and operation of the scheme. **Australian Meteorological Magazine**, v. 39, p. 155-166, 1991a.

MURRAY, R. J. e SIMMONDS, I. A numerical scheme for tracking cyclone centers from digital data. Part II: Application to January and July general circulation model simulations. **Australian Meteorological Magazine**, v. 39, p. 167-180, 1991b.

PARISE, C. K. **Padrões atmosféricos sinóticos geradores de marés meteorológicas intensas e a resposta morfodinâmica da Praia do Cassino**. Monografia (Graduação). Departamento de Geociências, Laboratório de Oceanografia Geológica, Fundação Universidade Federal de Rio Grande, 2007.

PARISE, C. K.; CALLIARI, L. J. e KRUSCHE, N. Extreme storm surges in the south of Brazil: atmospheric conditions and shore erosion. **Brazilian Journal of Oceanography**, v. 57(3), p. 175-188, 2009.

RAO V. B.; DO CARMO A. M. C. e FRANCHITO, S. H. Seasonal Variation in the Southern Hemisphere Storm Track associated wave propagation. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 59, p. 1029-1048, 2002.

REBOITA, M. S.; ROCHA, R. P. e AMBRIZZI T. Climatologia de ciclones sobre o Atlântico Sul utilizando métodos objetivos na detecção destes sistemas. **In: IX Congresso Argentino de Meteorologia**, Buenos Aires, AR, Outubro 3-7, 2005.

ROCHA, R. P.; SUGAHARA, S. e DA SILVEIRA, R. B. Sea Waves Generated by Extratropical Cyclones in the South Atlantic Ocean: Hindcast and Validation against Altimeter Data. **Weather and Forecasting**, v. 19, p. 398-410, 2003.

SINCLAIR, M. R. An objective cyclone climatology for the Southern Hemisphere. **Monthly Weather Review**, v. 122, p. 2239-2256, 1994.

SINCLAIR, M. R. A climatology of cyclogenesis for the Southern Hemisphere. **Monthly Weather Review**, v. 123, p. 1601-1619, 1995.

TALJAARD, J. I. Development, distribution and movement of cyclones and anticyclones in the Southern Hemisphere during the I. G. Y. **Journal of Applied Meteorology**, v. 6, p. 973-987, 1967.

TOLMAN, H. L. User manual and system documentation of WAVEWATCH-III, version 1.18, NOAA/NWS/NCEP/OMB Technical Note, v. 166, 110p, 1999.

WAMDIG. The WAM Model - A Third generation ocean wave prediction model. **Journal of Physical Oceanography**, v. 18, p. 1775-1810, 1988.

YOUNG, I. R. Directional spectra of hurricane wind waves. *Journal of Geophysical Research*, v. 111, C08020, 2006.

### III. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A busca por alternativas energéticas que causem menos impactos ao meio-ambiente tem se tornado muito atrativa do ponto de vista econômico e ambiental e cada vez mais está fazendo parte do planejamento estratégico das nações. O aproveitamento do comprovado potencial energético dos oceanos configura, atualmente, como uma possibilidade promissora para produzir energia limpa. Marés, ondas e correntes marinhas são recursos renováveis, cujo aproveitamento para a geração de eletricidade registra significativos avanços tecnológicos e apresenta vantagens em termos de acessibilidade, disponibilidade e aceitabilidade.

Várias tecnologias para a extração de energia das ondas já estão sendo testadas em projetos desenvolvidos por diversos países como Reino Unido (*Pelamis*), Holanda (*Limpet*), Portugal (*OWC*), Dinamarca (*Wave Dragon*). Outros países como Estados Unidos, Canadá, Austrália, Irlanda e Japão também vêm desenvolvendo pesquisas nesta área.

A capacidade de geração de energia a partir de uma usina de ondas em um determinado local é fornecida pelas características do estado do mar naquela região. O clima de ondas tem grande influência nas especificações de projetos de obtenção de energia a partir de ondas e na predição anual de eletricidade à medida que as características das ondas impõem determinadas limitações sobre os aparatos de conversão de energia e na escolha do princípio mais apropriado para aquelas condições de mar. A eficiência dos aparatos de conversão de energia das ondas varia consideravelmente diante de determinados estados de mar. Assim, conhecendo o clima de ondas de uma região, pode-se indicar o aparato que apresente o melhor aproveitamento de energia e que seja mais adequado àquele contexto ou, talvez, a localização mais adequada para determinado princípio de conversão.

Em águas profundas a potência por unidade de comprimento da frente de onda (kW/m), é estimada pela equação abaixo:

$$P \text{ (kW /m)} = 0,49H^2T$$

onde H (m) é a altura significativa de onda e T (s) o período da onda.

O potencial energético das ondas na costa brasileira, de uma maneira generalizada, pode ser considerado decrescente à medida que se dirige do sul ao norte

do país. Quanto à regularidade dessa potência ao longo do ano, fator importante na geração de eletricidade, ocorre quanto mais próximo ao Equador acompanhado de maiores variações à medida que se aproxima do sul do país (BESERRA, 2007).

Segundo RICHARDS *et al.* (1976) vários fatores climáticos, ambientais e geomorfológicos devem ser considerados no processo de avaliação e seleção do sítio de implementação da usina de onda, dentre os quais se encontram os fatores atmosféricos, oceanográficos, geológicos, geofísicos, geotécnicos, biota marinha e impactos ambientais, entre vários outros. Os fatores oceanográficos, por sua vez, incluem conhecimentos sobre propriedades físico-químicas da água do mar, variação do nível do mar, gelo oceânico, marés, correntes e ondas. Com relação às ondas os referidos pesquisadores apontam a importância no conhecimento do comportamento de vagas, *swell*, pista, velocidade e direção das ondas, dispersão, transporte de massa, características da como altura, comprimento, período e espectro de onda, arrebentação, refração, difração, ondas internas e tsunamis.

Devido ao imenso litoral brasileiro, o domicílio de usinas mostra grande flexibilidade, podendo tornar a obtenção de energia das ondas um vetor com alcance muito além de outros vetores convencionais.

BESERRA (2007) realizou uma abordagem dos macros critérios para desenvolvimento de usinas de exploração de energia das ondas a partir do processo de implantação do primeiro protótipo de conversão de energia das ondas do mar em eletricidade da América Latina, desenvolvido pelo Laboratório de Tecnologia Submarina (LTS) da COPPE/UFRJ em parceria com a Eletrobrás e o Governo do Estado do Ceará. O modelo brasileiro de conversão de energia de ondas foi realizado para as condições de mar próximo ao Porto do Pecém (CE), local previsto para a instalação da primeira usina de ondas do Brasil. Para tal, foram avaliadas as características das ondas do local e, após, simulações em laboratório (tanque oceânico) a fim de testar a capacidade de geração da tecnologia nas condições específicas do local onde será instalada a usina.

A análise dos dados obtidos com ondógrafo instalado ao largo de Pecém, a 60 km ao norte de Fortaleza, durante 22 meses (1997 a 1998) indicou predominância de ondas relativamente baixas (1 m e 1,2 m), porém com distribuição bastante homogênea o que fornece regularidade de altura significativa das ondas. Em 90% do tempo as ondas foram suficientes para geração de energia elétrica (HARARI *et al.*, 2009).

A figura V mostra a estrutura da usina contendo os flutuadores, o sistema de bombeamento, câmara hiperbárica, conjunto turbo - gerador, uma fotografia do Porto do Pecém (CE) e figura esquemática da Usina.

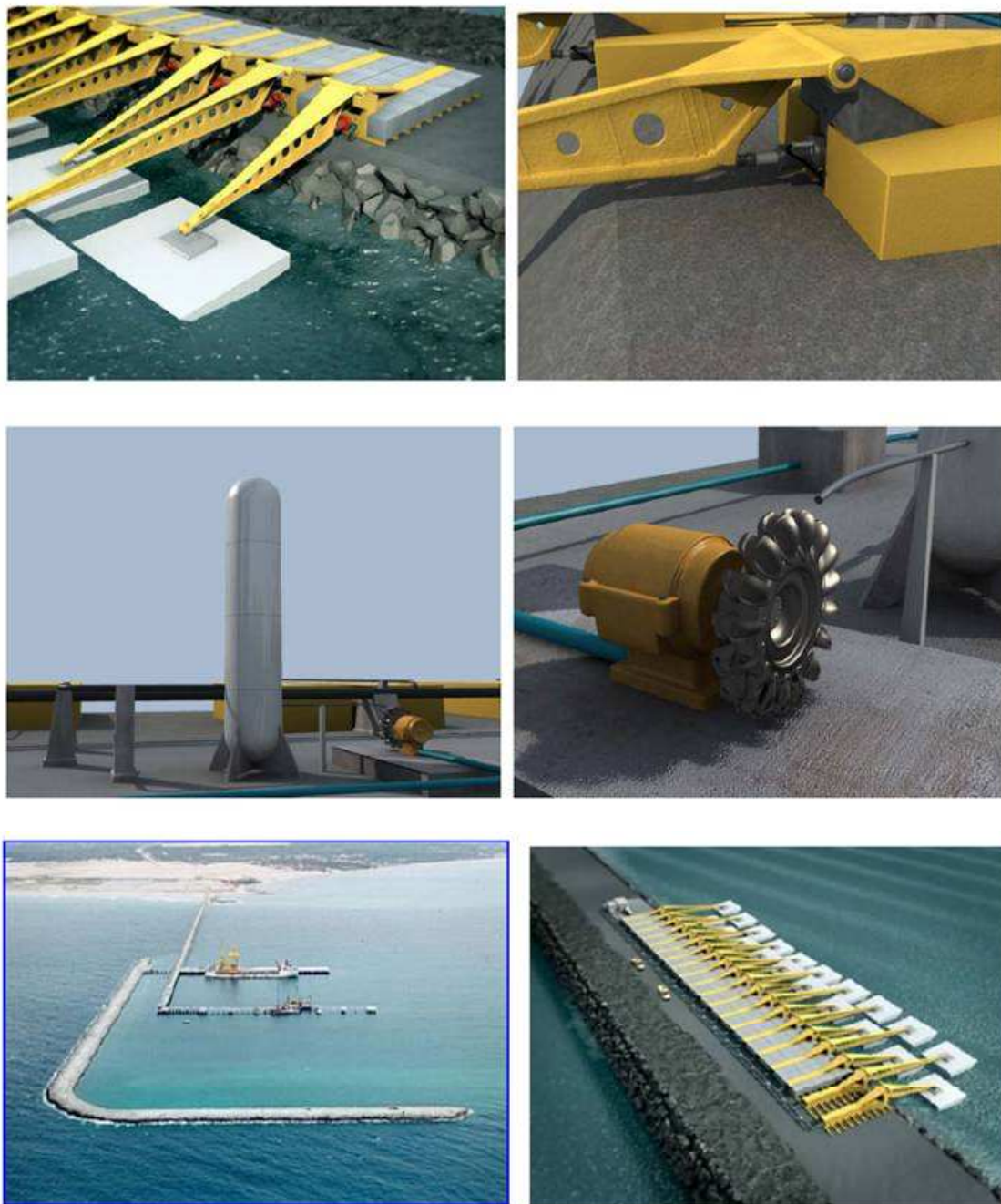


Figura V: Primeiro protótipo de conversão de energia das ondas do mar em eletricidade da América Latina: flutuadores, sistema de bombeamento, câmara hiperbárica, conjunto turbo-gerador, fotografia do Porto do Pecém (CE) e figura esquemática da Usina. Extraído de BESERRA (2007).



Nos últimos anos começaram a ser desenvolvidos sistemas de extração de energia em regiões marinhas com profundidade superior a 25 m. Empresas europeias lançaram em Portugal, em 2008, o sistema Pelamis que pode ser instalado em alto mar em grandes redes interconectadas. Nesse sistema, os movimentos induzidos pelas ondas são absorvidos por cilindros hidráulicos que pressurizam o óleo acionando geradores elétricos. A primeira etapa desse experimento contou com uma capacidade inicial de 2.25 MW, suficiente para iluminar de mil a 1,5 mil casas. Para se ter uma idéia do grande potencial energético das ondas oceânicas uma única onda de 3m de altura contem pelo menos 10 kW de energia por m<sup>2</sup> (HARARI *et al.*, 2009).

O Conselho Mundial de Energia estima que a consolidação da tecnologia de aproveitamento de energia das ondas se dê em um prazo de 10 a 15 anos, quando poderá atender cerca de 5% da demanda energética mundial (HARARI *et al.*, 2009).

Em um contexto de recursos financeiros escassos, especialmente para investimentos em projetos de alto custo e grandes impactos ambientais, a usina de ondas surge como fonte de menor interferência antrópica no meio físico e biológico. Conta, entretanto, com a simpatia dos maiores defensores da energia verde no planeta podendo projetar o país no cenário internacional do ponto de vista de liderança técnico-científica e de preservação ambiental.

Conscientes dos avanços tecnológicos e da demanda por energias renováveis, a presente dissertação de mestrado vem contribuir no entendimento do comportamento e variabilidade das ondas no Oceano Atlântico Sul. Espera-se que esse trabalho possa contribuir para futuros estudos de análise e seleção do sítio para a implementação de usinas para obtenção de energia (limpa) a partir de ondas.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BESERRA, E. R. Avaliação de sítios para o aproveitamento dos recursos energéticos das ondas do mar. **Tese de doutorado**, COPPE/UFRJ, 2007.

HARARI, J.; CAMARGO, R. de e ALMEIDA, E. G. de. Origens, Transformações e o Futuro. Petróleo, poluição e energias alternativas. **Coleção OCEANOS 4, Scientific American Brasil**, p. 80 (32-39), 2009.

RICHARDS, A. F.; LING, S. C.; GERWICK JR., B. C. Site Selection for Offshore Facilities. **Ocean Engineering**, v. 3, p. 189-206, Pergamon Press, UK, 1976.