

**INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS**  
**PROGRAMA INSTITUCIONAL DE BOLSAS DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA**  
**PIBIC-CNPq 2005-2006**

**AVALIAÇÃO DE ATLAS DE VENTOS E DE ONDAS**  
**UTILIZANDO OPERADOR CEF (COMPLEX ENTROPY FORM)**  
**DA TÉCNICA GPA (GRADIENT PATTERN ANALYSIS)**

São José dos Campos, SP  
2006

**INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS**  
**PROGRAMA INSTITUCIONAL DE BOLSAS DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA**  
**PIBIC-CNPq 2005-2006**

**Avaliação de Atlas de Ventos e de Ondas utilizando operador CEF  
(Complex Entropy Form) da técnica GPA (Gradient Pattern Analysis)**

Márcio Fábio Raposo Rodrigues

Orientador: Nandamudi Lankalapalli Vijaykumar

Colaboradores: Reinaldo Roberto Rosa  
Fernando Manuel Ramos

Monografia apresentada ao INPE –  
Instituto Nacional de Pesquisas  
Espaciais, pela participação no  
Programa Institucional de Bolsas de  
Iniciação Científica – PIBIC / CNPq  
2005-2006.

São José dos Campos, SP  
2006

Dedico esta publicação a meus pais e amigos que me apoiaram, direta ou indiretamente, em todos os momentos.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus pelo direito a vida, a minha família pelo apoio e auxílio no meu desenvolvimento acadêmico e profissional ao longo destes anos.

Gostaria de fazer um agradecimento especial ao meu orientador, o Professor Doutor Nandamudi Lankalapalli Vijaykumar, pela sua atenção, dedicação e amizade no decorrer do curso e na elaboração desse trabalho, bem como o Professor Doutor Reinaldo Roberto Rosa e o Professor Doutor Fernando Manuel Ramos que me auxiliaram durante toda a pesquisa.

Agradeço também ao CNPq pela concessão da bolsa de iniciação científica e pelo apoio financeiro para a realização desta pesquisa.

“Se um homem tem um talento e não tem capacidade de usá-lo, ele fracassou. Se ele tem um talento e usa somente a metade deste, ele fracassou parcialmente. Se ele tem um talento e de certa forma aprende a usá-lo em sua totalidade, ele triunfou gloriosamente e obteve uma satisfação e um triunfo que poucos homens conhecerão”.

Thomas Wolfe

## RESUMO

O conhecimento de clima costeiro é fundamental para avaliar impactos de mudanças climáticas nestas áreas. A importância de conhecer o clima do passado para poder avaliar o clima de futuro foi reconhecida e a União Européia financiou um projeto para gerar dados consistentes para o clima do passado (*hindcast*) utilizando modelos atmosféricos e de ondas para a região da Europa [Soares et al, 2002]. O presente trabalho se concentra para a região da Irlanda onde os resultados de um modelo de circulação global foram refinados por um modelo atmosférico de área limitada para gerar ventos com alta resolução. Por sua vez esses ventos foram integrados com um modelo de ondas para que alturas de ondas e outras informações relevantes fossem geradas. Este projeto gerou um Atlas de ventos e de ondas de 1958 a 1997 [Vijaykumar et al, 2003] e [Vijaykumar et al, 2004]. É importante avaliar esses dados no domínio espaço-temporal. Até o momento só foram geradas avaliações utilizando estatísticas convencionais. Este trabalho tem como objetivo utilizar a técnica *Gradient Pattern Analysis* (GPA) como caracterizador de evolução espaço-temporal dos padrões de ventos e ondas. Ela é baseada em dois operadores computacionais: AAF (*Asymmetric Amplitude Fragmentation*) que permite obter uma medida de quebra de simetria de um padrão dinâmico; e CEF (*Complex Entropic Form*), que permite observar padrões intermitentes durante a evolução espaço-temporal. Em nossa análise, aplicamos os operadores AAF, gerador do primeiro momento gradiente ( $g_1^a$ ), e o CEF, gerador do quarto momento gradiente (em particular a amplitude -  $|g_4|$ ), em uma parte desse *hindcast* (1988-1997) para detectar padrões de equilíbrios em médias e grandes escalas colocando-se em destaque os resultados obtidos no domínio espaço-temporal de  $g_1^a \times |g_4|$ , além de observar esses comportamentos ao longo dos anos.

**Palavras Chave:** Clima Costeiro, Hindcast, GPA, CEF, AAF.

## EVALUATION OF WIND AND WAVE DATASETS USING CEF OPERATOR (COMPLEX ENTROPY FORM) FROM GPA TECHNIQUE (GRADIENT PATTERN ANALYSIS)

### ABSTRACT

The knowledge of coastal climate is essential to evaluate impacts of climatic changes in these areas. The importance to know the climate of the past to be able to evaluate the future climate was recognized in the international level and the European Union supported a project to generate climate for the past (hindcast) using atmospheric models and wave models for the region of Europe. The present report is concentrated for the region of Ireland where the results of a Global Circulation Model (GCM) were downscaled through a limited area atmospheric model to generate high resolution winds. The wind fields, in turn, were integrated with a wave model so that information on wave heights was generated. This project generated Wind and Wave Atlas from 1958 to 1997. These data must be evaluated in the spatio-temporal domain, as just conventional statisticians were used. This work has as objective to use the Gradient Pattern Analysis (GPA) technique to characterize spatio-temporal evolution of wind and wave patterns. It is based on two computational operators: AAF (Asymmetric Amplitude Fragmentation) obtains asymmetry of a dynamic pattern; and CEF (Complex Entropic Form), observes intermittent patterns during the spatio-temporal evolution. In our analysis, we apply operators AAF, first gradient moment ( $g_1^a$ ), and the CEF, fourth gradient moment ( $|g_4|$ ), to a part of this hindcast (1988-1997) to detect patterns of equilibrium in medium and large scales putting the emphasis on the results obtained in the spatio-temporal domain from  $g_1^a \times |g_4|$ , besides observing this behavior throughout the years.

**Keywords:** Coastal Climate, Hindcast, GPA, CEF, AAF.

## SUMÁRIO

Resumo.....	i
Abstract.....	ii
Lista de Figuras.....	iii
Lista de Tabelas.....	iv
Lista de Siglas.....	v
Lista de Abreviações e Siglas.....	vi
1. Capítulo 1 - Introdução.....	13
1.1 Esboço Geral.....	13
2. Capítulo 2 - O Projeto HIPOCAS.....	14
3. Capítulo 3 - A Técnica GPA.....	17
3.1 Os Momentos Gradientes.....	17
3.2 O Quarto Momento – O operador CEF.....	19
4. Capítulo 4 - Resultados.....	21
5. Conclusão.....	27
Bibliografia.....	28
Glossário.....	30



**LISTA DE FIGURAS**

Figura 1 - Saída do parâmetro de vento do Modelo HIRLAM.....	14
Figura 2 - Saída do Modelo WAM para a região da Irlanda .....	15
Figura 3 - Os momentos gradientes de uma matriz escalar .....	17
Figura 4 - Média anual da velocidade dos ventos e altura de ondas.....	22
Figura 5 - Valores do $ g_4 $ e $\Phi g_4$ para a velocidade dos ventos em 1987 .....	22
Figura 6 - Valores do $ g_4 $ e $\Phi g_4$ para a altura das ondas em 1987 .....	23
Figura 7 - Valores do $ g_4 $ de ventos e ondas para o inverno de 1987.....	23
Figura 8 - Momento com dispersão de grande variação de $g_1^a \times  g_4 $ .....	25
Figura 9 - Momento com dispersão de pequena variação de $g_1^a \times  g_4 $ .....	25

**LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 - Organização das resoluções para águas irlandesas .....	15
---	----

## LISTA DE SÍMBOLOS

### Latinos

- $f$  - Fluido
- $G$  - Campo vetorial gradiente
- $M$  - Matriz de amplitudes
- $i$  - Índice da linha da matriz de amplitudes
- $j$  - Índice da coluna da matriz de amplitudes
- $h$  - Medidas de Haar
- $g$  - Momento gradiente
- $\mathbf{r}$  - Vetores de norma e fase
- $r$  - Parte real do vetor
- $W$  - Degenerescência

### Gregos

- $\Gamma$  - Raio de aspecto médio
- $\delta$  - Espaço de dispersão
- $\square$  - Gradiente
- $\Phi$  - Fase
- $\varepsilon$  - Escalar

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

**AAF** - Asymmetric Amplitude Fragmentation.

**CEF** - Complex Entropy Form.

**CMRC** - Coastal and Marine Resources Centre.

**CNPq** - Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico.

**IPCC** - Intergovernmental Panel on Climate Change.

**GCM** - Global Circulation Model.

**GPA** - Gradient Pattern Analysis.

**HINDCAST** – Banco de dados com parâmetros de ventos e ondas.

**HIPOCAS** - Hindcast of Dynamical Processes of the Ocean and Coastal Areas of Europe.

**HIRLAM** - High-Resolution Limited Area Model.

**IDL** - Interactive Data Language.

**INPE** - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.

**NCAR** - National Center for Atmospheric Research, Boulder.

**NCEP** - National Center for Environmental Prediction.

**PIBIC** - Programa de Incentivo a Bolsas de Iniciação Científica.

**REMO** - Regional Model.

**UCC** - University College Cork.

**WAM** - Wave Model.

# CAPÍTULO 1

## 1. Introdução

O Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) emitiu relatórios onde estabelece que o aquecimento global para o Século 21 estará associado diretamente com riscos de meio ambiente costeiro e da marinha com impactos significativos nas populações humanas e na vida animal [Gates et al., 1992] e [Houghton et al., 1996]. A população que vive nas áreas costeiras tem exigido das autoridades informações detalhadas sobre impactos causados pelas mudanças climáticas globais. Relatórios mais recentes sobre margens nas costas europeias indicam aumento em velocidades de ventos e em alturas das ondas forçando tempestades de alta intensidade [Gunther et al., 1998]. Para poder avaliar o clima costeiro do futuro, é necessário ter um estudo detalhado do clima costeiro do passado. Esta importância foi reconhecida e a União Europeia financiou um projeto *HIPOCAS – Hindcast of Dynamical Processes of the Ocean and Coastal Areas of Europe* o qual consistiu em gerar um Atlas de ventos e de ondas de alta resolução para várias regiões costeiras da Europa. O trabalho descrito aqui neste relatório concentra para a região da Irlanda que foi a responsabilidade do Coastal and Marine Resources Centre (CMRC) da University College Cork (UCC) da cidade de Cork.

### 1.1. Esboço Geral

Este trabalho foi dividido em mais cinco capítulos, descritos a seguir:

- *CAPÍTULO 2 – O projeto HIPOCAS*: Este capítulo fornece um breve histórico do trabalho feito pela União Europeia para o clima costeiro do passado na costa irlandesa.
- *CAPÍTULO 3 – A técnica GPA*: Este capítulo contém a descrição da metodologia utilizada para a caracterizar a formação e a evolução dos dados analisados.
- *CAPÍTULO 4 - Resultados*: Os resultados das análises feitas são apresentados neste capítulo.
- *CAPÍTULO 5 - Conclusões*: Conclusões e perspectivas de trabalhos futuros.

## CAPÍTULO 2

### 2. O projeto HIPOCAS

A base deste projeto consistiu na disponibilização dos resultados de reanálise [Kalnay et al., 1996] de 40 anos (1958 a 1997) pelos institutos NCEP-National Center for Environmental Prediction, Washington, EUA e NCAR-National Center for Atmospheric Research, Boulder, Colorado, EUA. No entanto, a resolução (espacial de 200Km e temporal de 6 Horas) não é adequada para conduzir estudos sobre processos costeiros [Weisse & Gayer, 2000]. Então a solução consiste em fazer um processo de *downscaling* utilizando um modelo regional e o escolhido foi o *Regional Model REMO* [Jacob & Podzun, 1997]. Os dados de reanálise foram utilizados como condições de contorno para forçar o modelo REMO e com isso os resultados obtidos a partir deste modelo regional possuíam uma resolução espacial de 50Km e temporal de 1 Hora. Para o caso das águas da Irlanda, foi feito mais um passo de *downscaling* utilizando um outro modelo de área limitada *HIRLAM (High-Resolution Limited Area Model)* [Sass et al., 2000] conseguindo uma resolução espacial de 10Km e temporal de 1 Hora. A Figura 1 mostra a saída do parâmetro de vento do Modelo HIRLAM.

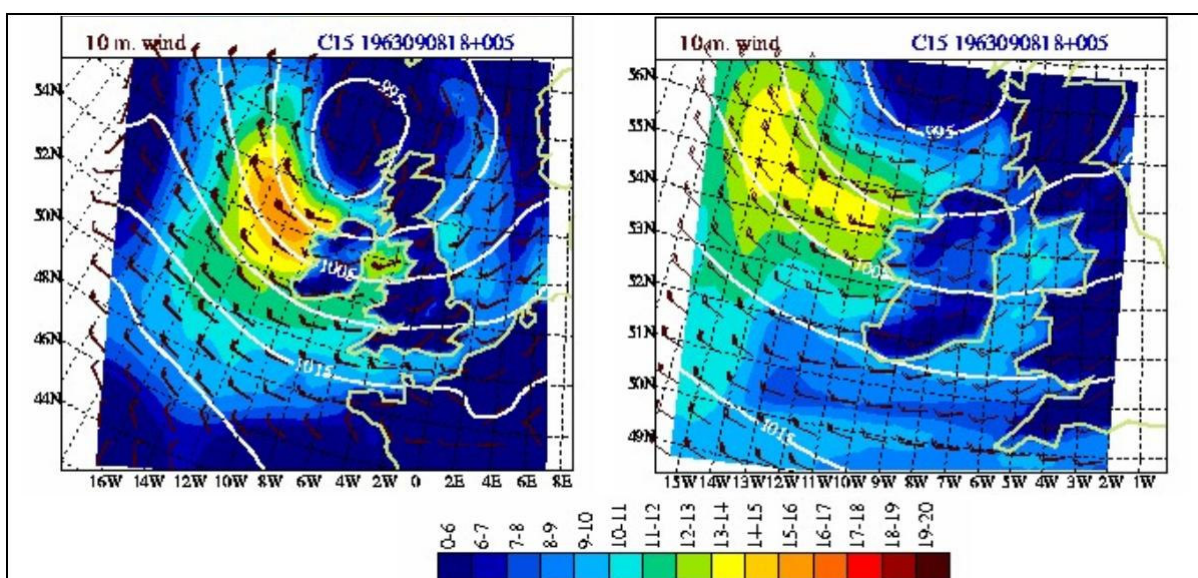
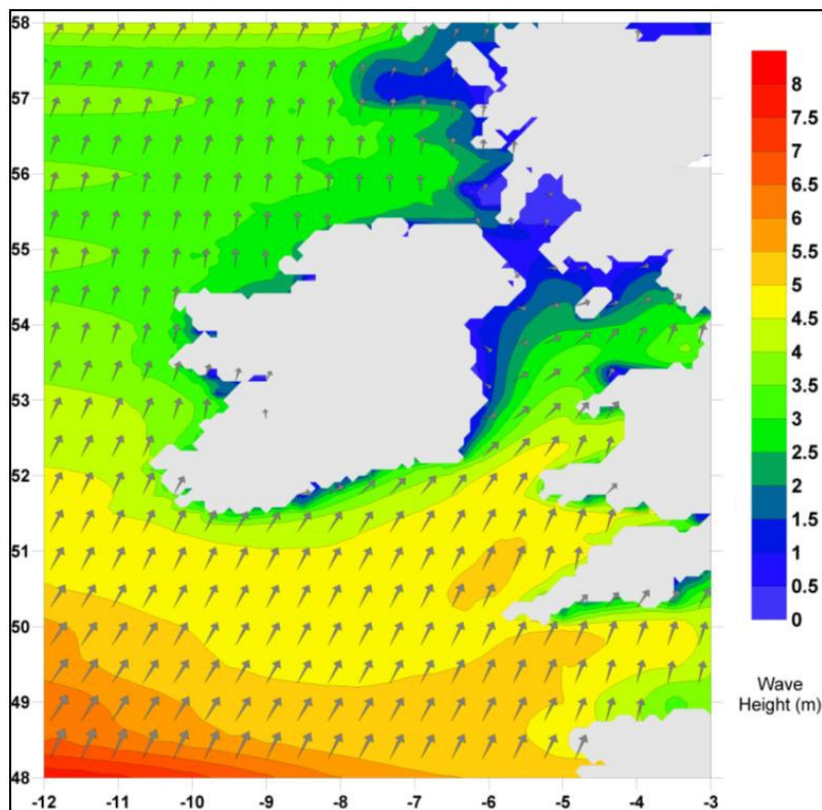


Figura 1. Saída do parâmetro de vento do Modelo HIRLAM

Antes de prosseguir para integrar estes campos de ventos com o modelo de Ondas, eles foram validados com alguns dados de observação disponíveis além de comparar com resultados de outros modelos e outras renálises.

O próximo passo natural é integrar os campos de ventos com o modelo de Ondas WAM (*Wave Model*) [WAMDI Group, 1988]. A Figura 2 mostra um exemplo da saída do modelo WAM.



**Figura 2. Saída do Modelo WAM para a região da Irlanda (25/12/97-00H)**

A Tabela 1 mostra a organização das grades para a execução do modelo WAM. A resolução é maior quando se aproxima da costa.

**Tabela 1. Organização das resoluções para águas irlandesas**

Resolução em Latitude	Resolução em Longitude	Latitude Inicial	Latitude Final	Longitude Inicial	Longitude Final
<b>0.5</b>	<b>0.5</b>	48.0	58.0	-15.0	0.0
<b>0.166666</b>	<b>0.166666</b>	50.0	57.0	-13.0	-2.0
<b>0.083333</b>	<b>0.083333</b>	51.0	56.0	-11.0	-2.5

De uma maneira semelhante, a mesma abordagem de validação aplicada ao parâmetro de vento gerado pelo modelo HIRLAM também foi aplicada aos resultados gerados pelo modelo WAM.

Com o término da geração dos parâmetros de vento e de ondas, o CMRC possui hoje 40 anos (1958 à 1997) de ventos a partir do HIRLAM espaçados por hora e também as condições de ondas a partir do WAM espaçados a cada três horas. Já foram calculadas as médias mensais para cada coordenada pertencente à grade cobrindo a Irlanda (48 a 58N e 15 a 0W). Esta análise preliminar mostrou uma coerência com a realidade em termos de variação sazonal e em especial alguns picos estão de acordo com tempestades severas ocorridas na região. Como era de se esperar, os modelos também mostram ventos e ondas mais fortes na costa oeste (que está totalmente exposto às tempestades no Atlântico Norte) e a sua diminuição ao se aproximar da costa leste.

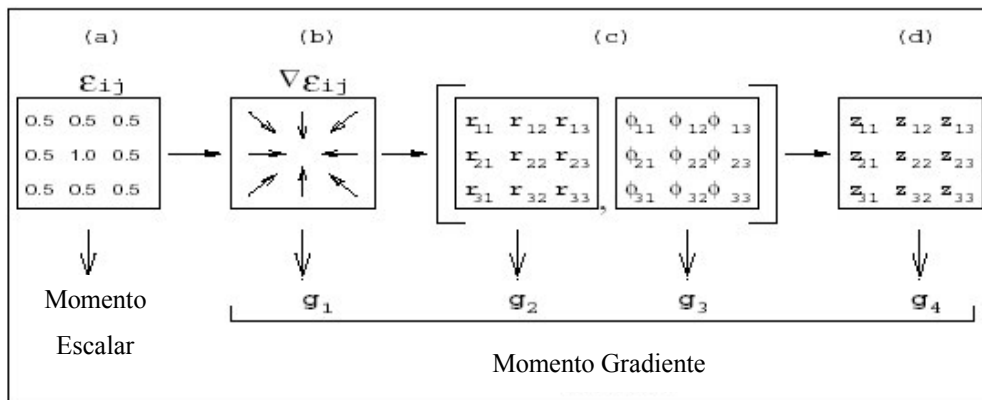
A proposta consiste em uma análise mais fina desses dados, onde informações como: a frequência e localização com que ocorrem as grandes mudanças nas atividades de ventos e ondas, e traçar tendências desses eventos poderão ser obtidas utilizando a técnica GPA.



## CAPÍTULO 3

### 3. A Técnica GPA

A técnica de Análise de Padrões Gradiente GPA [Rosa et al, 1998, 2003] é capaz de caracterizar a formação e a evolução de estruturas espaço-temporais. Consiste na extração de valores, chamados momentos gradientes ( $g_1, g_2, g_3$  e  $g_4$ ) de uma matriz escalar representada pelo seu campo gradiente, conforme mostra a figura 3.



**Figura 3. Os momentos gradientes de uma matriz escalar.**

A técnica é uma eficiente ferramenta para entender a formação de modelos durante o desenvolvimento de turbulências e relaxamento espaço-temporal [Rosa et al, 1999], [Assireu et al, 2002] e [Rosa et al, 2003].

Recentemente foram desenvolvidos operadores computacionais para caracterização de assimetrias e entropias no campo gradiente. O GPA calcula três parâmetros:  $\mathbf{g}_1^a$ ,  $\Phi\mathbf{g}_4$  e  $|\mathbf{g}_4|$ , de um grupo de quatro momento-gradiente teóricos ( $g_1, g_2, g_3$  e  $g_4$ ), que são respectivamente as medidas vetoriais e as assimetrias locais, a desordem de modelo, a desordem de fase e a entropia complexa [Rosa et al, 1998].

#### 3.2. Os Momentos Gradientes

Dentro do formalismo GPA, um campo vetorial gradiente  $G_t = \nabla[\varepsilon(y, x)]_t$ , composto por  $V$  vetores  $r$ , onde cada vetor  $r_{ij}$ , localizado na posição  $(i, j)$  do campo gradiente, caracterizado

por sua norma e fase ( $r_{ij} = (r, \varphi)$ ), pode ser descrito pela composição de quatro momentos gradientes:

- o momento gradiente de primeira ordem,  $\mathbf{g}_1$ , uma medida global da distribuição dos vetores;
- o momento gradiente de segunda ordem,  $\mathbf{g}_2$ , uma medida global das normas dos vetores;
- o momento gradiente de terceira ordem,  $\mathbf{g}_3$ , uma medida global das fases dos vetores;
- o momento gradiente de quarta ordem,  $\mathbf{g}_4$ , uma representação complexa global do padrão gradiente.

Considerando os conjuntos de  $\{r_{ij}\}$  e  $\{\varphi_{ij}\}$  como sendo grupos compactos discretos, espacialmente distribuídos, os momentos gradientes são equivalentes a medidas de Haar,  $\mathbf{h}$ , as quais possuem a propriedade de serem invariantes à rotação e a translação da amplitude [Ramos et al, 2000].

Quando aplicado tanto aos retículos de mapas caóticos como as soluções da equação de Swift-Hohenberg [Rosa et al, 2000] tem mostrado que a medida  $|\mathbf{g}_4|$  é muito sensível ao processo de relaxamento espaço-temporal preservando a informação das flutuações do gradiente global e a medição de  $\Phi \mathbf{g}_4$ , caracteriza, por meio da desordem de fase, as flutuações do gradiente local.

Na presença de flutuações espaço-temporais de multi-escala, essas medidas do campo gradiente no retículo são mais sólidas que as medidas derivativas e os comprimentos de correlação espacial. Particularmente vários cálculos de modelos aleatórios têm mostrado que os momentos gradiente são muito mais sensíveis e precisos na caracterização da dinâmica de estruturas irregulares que as medidas de comprimento de correlação espacial [Rosa et al, 1999] e [Ramos et al, 2000].

Uma medida da assimetria pode ser determinada por meio do operador AAF. Este operador computacional mede a quebra de simetria de um modelo dinâmico, e tem sido usado em muitas aplicações.

O operador computacional chamado de CEF [Ramos et al, 2000], calcula o módulo e a fase relativos à forma complexa do quarto momento gradiente  $\mathbf{g}_4$ .

Até o momento a análise do GPA é feita baseada no primeiro momento gradiente  $\mathbf{g}_1$  e no quarto momento gradiente  $\mathbf{g}_4$ . Não há operadores computacionais publicados na literatura para calcular o segundo e terceiro momento gradiente.

### 3.2. O Quarto Momento Gradiente – O Operador CEF

O momento gradiente  $\mathbf{g}_4$  é uma representação complexa do módulo,  $|\mathbf{g}_4|$ , e da fase,  $\Phi_{\mathbf{g}_4}$ , de um campo gradiente. Uma medida global, com representação complexa, é dada pelo operador CEF (Complex Entropic Form), também denominado, de uma forma generalizada, como GEF (Generalized Complex Entropic Form) [Ramos et al, 2000]. Este operador computacional permite quantificar o grau de desordem das fases associado a um dado campo gradiente de um sistema dinâmico espacial não-linear estendido.

Sistemas dinâmicos não-lineares espacialmente estendidos produzem padrões de amplitude complexa que surgem das dinâmicas concomitantes de suas diferentes regiões. Experiências em várias áreas têm mostrado complexidade espaço-temporal notavelmente em fluxos de fluido, sistemas químicos reativo-difusivo, eletrônica óptica e físico laser. Em todos estes casos, é importante quantificar o grau da complexidade local para poder caracterizar os modelos espaciais e também estudar sua evolução no tempo [Walgraef, 1996; Rosa et al, 2003]. Conseqüentemente, uma das principais incumbências na física computacional hoje é definir medidas apropriadas para caracterizar as dinâmicas de tais sistemas complexos.

Se consideramos sistemas espaciais estendidos em duas dimensões  $(x, y)$ , sua distribuição de amplitudes energéticas é representada pelo envelope  $\mathbf{A}(x, y)$ , que pode ser aproximado por uma matriz de amplitudes  $\mathbf{A} = \{a_{k,l}\}$ , com  $K \times L$  pixels. Note que uma seqüência dinâmica de matrizes pode ser relacionada a uma evolução temporal de um envelope  $\mathbf{A}(x, y, t)$ . Da definição de  $\mathbf{A}$ , é possível representar o campo gradiente de amplitudes do envelope por  $\mathbf{G} \equiv$

$\nabla(A) = \{z_{k,l}\}$ , onde  $z_{k,l}$  é um número complexo com  $\text{Re}(z_{k,l}) = a_{k,l+1} - a_{k,l-1}$  e  $\text{Im}(z_{k,l}) = a_{k+1,l} - a_{k-1,l}$ .

Dado a matriz de campo gradiente (A), definimos o operador da forma complexa da entropia (CEF) como:

$$S_c(\mathbf{G}) \equiv - \sum_{k,l} \frac{|z_{k,l}|}{|z|} \ln \left( \frac{|z_{k,l}|}{|z|} \right) = - \sum_{k,l} \frac{|z_{k,l}|}{|z|} \ln \left( \frac{|z_{k,l}|}{|z|} - i \sum_{k,l} \frac{|z_{k,l}|}{|z|} \phi_{k,l} \right)$$

Este operador é obtido da generalização do conceito de degenerescência  $W$  [Ramos, 2000], dado pelo coeficiente da fórmula multinomial, e normalmente usado para deduzir as expressões da entropia de Shannon de campos escalares positivos. Considerando o gradiente da matriz  $G$ , definido acima,  $W(z_{1,1}, \dots, z_{k,l})$  pode ser generalizado como a seguir:

$$W(z_{1,1}, \dots, z_{k,l}) \equiv \frac{\Gamma(z)}{\Gamma(z_{1,1}) \dots \Gamma(z_{k,l})}$$

onde,  $z = \sum_{k,l} z_{k,l}$ . Usando a aproximação de Stirling, tem-se imediatamente:

$$z^{-1} \ln W \rightarrow S_z = - \sum_{k,l} \frac{z_{k,l}}{z} \ln \left( \frac{z_{k,l}}{z} \right)$$

A fim de ilustrar o desempenho dos operadores computacionais descritos acima, nós aplicamos CEF para caracterização de formação de padrões de amplitude (fragmentação, quebra e desordem da fase simétrica) para a velocidade dos ventos e as alturas de ondas do projeto HIPOCAS, analisando a correlação nas atividades dessas estruturas irregulares, em médias e grandes escalas, devido a dinâmicas locais e globais não lineares do sistema integrado oceano-atmosfera.

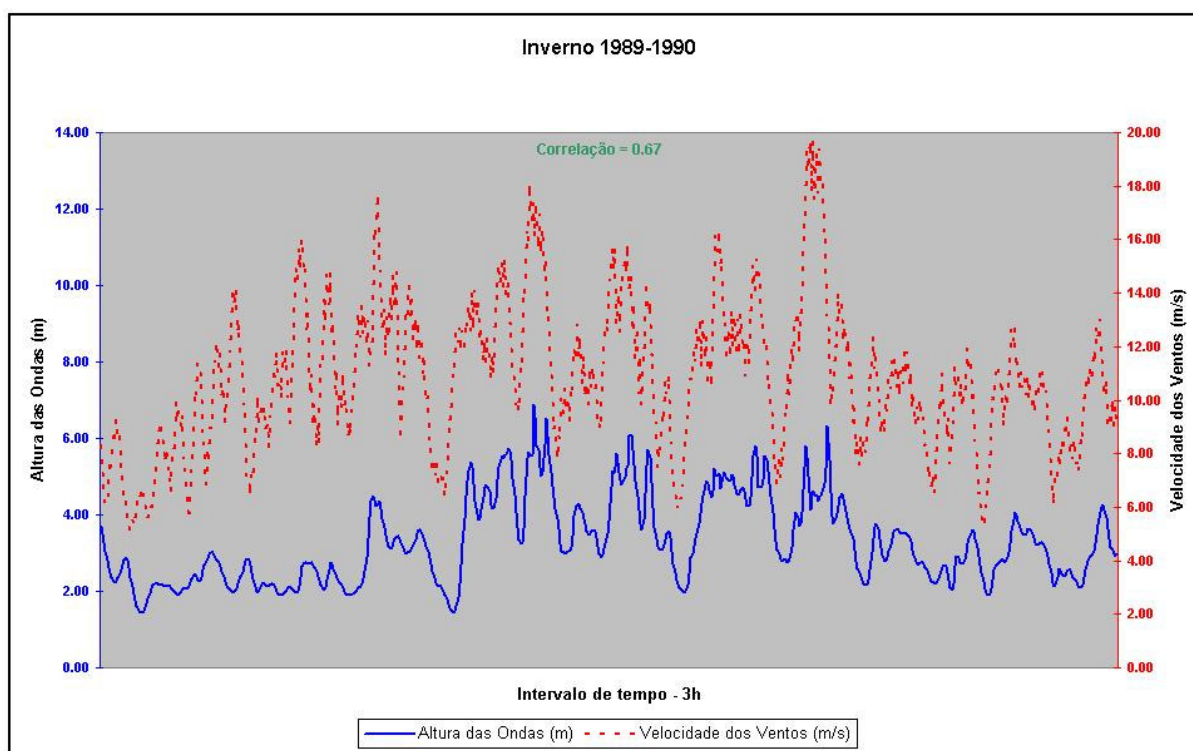
## CAPÍTULO 4

### 4. Resultados

Utilizando-se dos algoritmos originais, concebidos nas linguagens de programação IDL (operador CEF) e Fortran (dados de HINDCAST), testes iniciais com o operador foram feitos a fim de adaptá-lo para a leitura de matrizes, já que o mesmo foi concebido para a leitura de vetores. Após essa adequação, leituras nos dados foram feitas para matrizes 120X80, em velocidade dos ventos, com um intervalo de tempo de uma hora; e para matrizes de 180X120, em altura de ondas, com um intervalo de tempo de três horas.

As alturas de ondas variam de 0,5m até 10m e as velocidades de ventos variam de 1m/s até 20m/s.

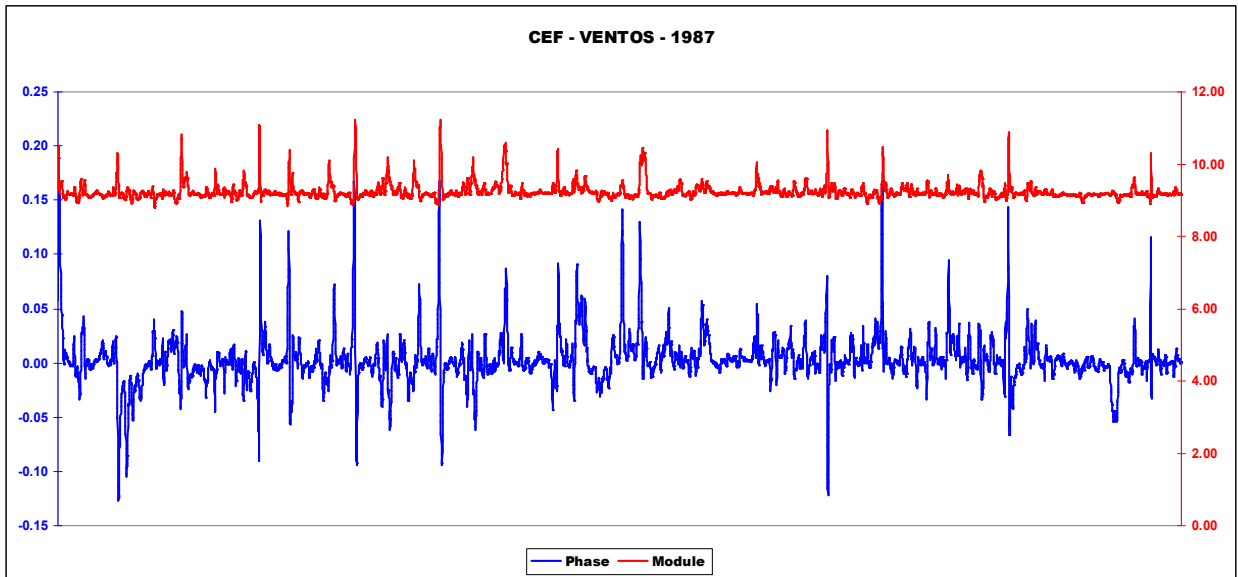
A figura 4 ilustra a média anual da velocidade dos ventos e altura das ondas para o inverno de 1989-1990.



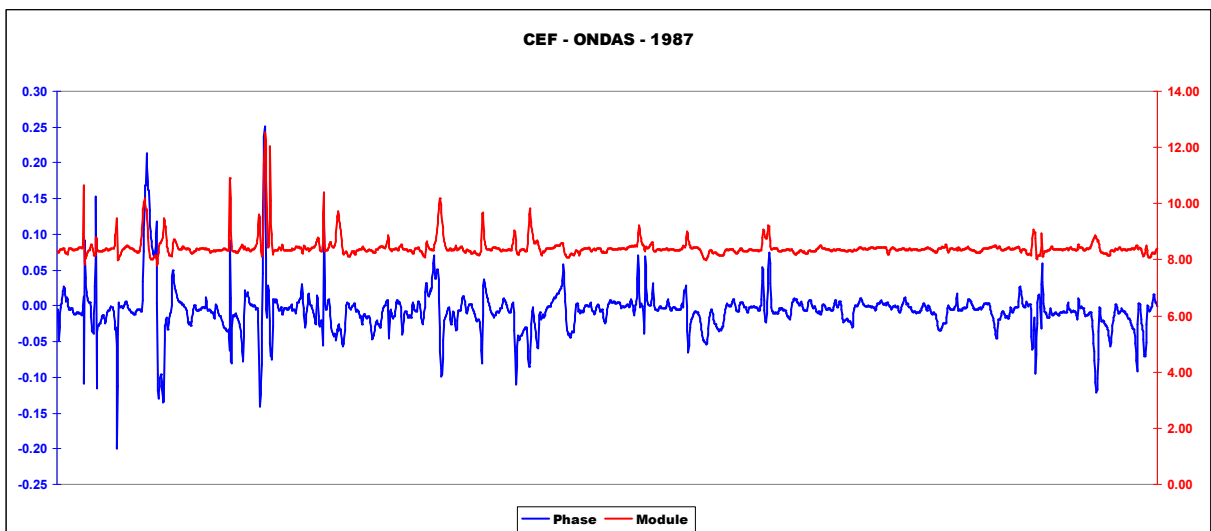
**Figura 4 – Média anual da velocidade dos ventos e altura de ondas**

A partir de então, aplicamos o operador CEF para um período aleatório de inverno de 1989-1990 para observar a dinâmica os comportamentos locais e globais dos ventos e das ondas.

A Figura 5 mostra os valores do  $|g_4|$  e  $\Phi g_4$  obtidos dos ventos no ano de 1987, enquanto que a Figura 6 mostra os valores do  $|g_4|$  e  $\Phi g_4$  para ondas no ano de 1987.



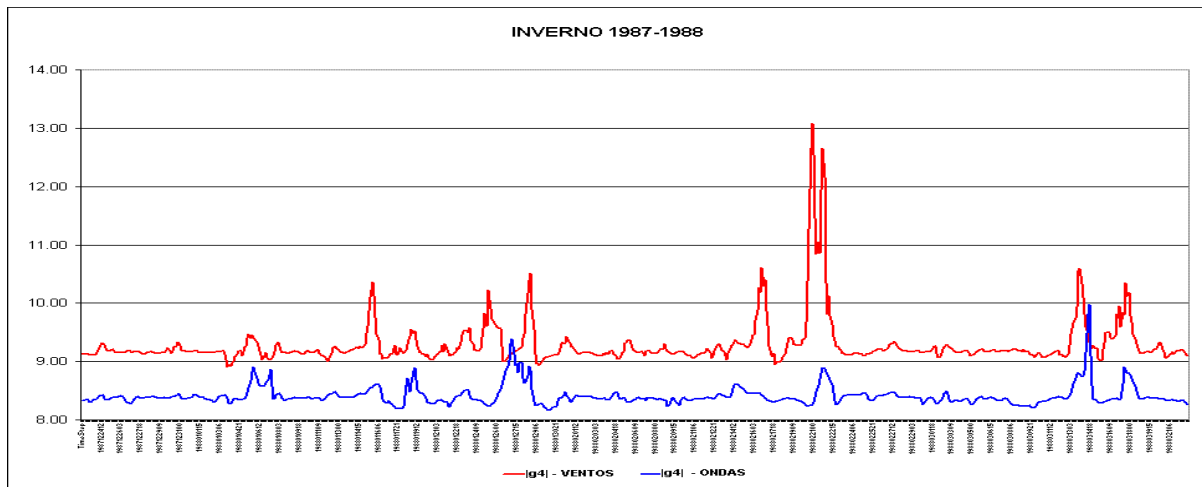
**Figura 5. Valores do  $|g_4|$  e  $\Phi g_4$  para a velocidade dos ventos em 1987**



**Figura 6. Valores do  $|g_4|$  e  $\Phi g_4$  para a altura das ondas em 1987**

Nosso primeiro objetivo era caracterizar, através de correlações estatísticas, a influência dos ventos sobre as ondas. Para tanto resolvemos comparar os resultados obtidos com o  $|g_4|$  de ventos e ondas, a fim de detectar variações locais bruscas nas atividades dos ventos e identificar sua influência para a elevação na altura das ondas. Para facilitar essa análise, resolvemos concentrar em um período de tempo menor, mais especificamente, num período que iniciasse e terminasse em uma estação climática. Escolhemos a estação do inverno de 1987, pois neste período as atividades dos ventos são mais intensas, e os resultados obtidos

nessa amostra com um intervalo de tempo de três horas para todo o período são demonstrados na figura 7.



**Figura 7. Valores do  $|g_4|$  de ventos e ondas para o inverno de 1987**

Os resultados apresentaram uma taxa de correlação variando positivamente entre 0,05 e 0,60 em diversos períodos dentro do intervalo de 10 anos de análise (1987 a 1997).

Uma outra análise mais fina foi integrar os resultados da amplitude do quarto momento gradiente ( $|g_4|$ ), responsável por detectar mudanças em grande escalas, com os resultados do primeiro momento gradiente ( $g_1^a$ ), responsável por detectar mudanças em médias escalas, para ratificar a potencialidade de detecção dessas variações, utilizando os resultados obtidos pelo operador AAF (Asymmetric Amplitude Fragmentation), [Moraes e Vijaykumar, 2006].

Uma das principais propriedades do parâmetro  $g_1^a$  é a sua capacidade de quantificar a dinâmica de modelos em escala intermediária comparada com as escalas globais e locais da grade sendo analisada. Esta propriedade é devida às assinaturas de multi-escala presentes no campo de triangulação construído sobre vetores assimétricos [Rosa et al, 2001]. E o quarto momento gradiente, através de seus resultados ( $|g_4|$ ,  $\Phi g_4$ ) são mais sensíveis para as características globais e locais do campo gradiente. Em conseqüência a dinâmica do modelo gradiente pode se caracterizar por um par de espaços  $g_1^a$  versus  $|g_4|$  e  $g_1^a$  versus  $\Phi g_4$ .

Nos dois espaços pode ser determinado o coeficiente  $\delta$ , dado pela media da distância euclidiana entre os pontos espaciais da fase.

O primeiro  $\delta_L \times t$ , ( $\mathbf{g}_1^a$  versus  $|\mathbf{g}_4|$ ) caracteriza a dinâmica relacionada com escalas do nível global para o nível intermediário; e a segunda  $\delta_l \times t$  ( $\mathbf{g}_1^a$  versus  $\Phi\mathbf{g}_4$ ) caracteriza a dinâmica relacionada com escalas abrangendo do nível intermediário até o nível local. Em resumo a metodologia usando o AAF e o CEF segue as etapas abaixo descritas:

- 1 - Calcular  $\mathbf{g}_1^a$  na grade (matriz) para cada etapa.*
- 2 - Calcular  $|\mathbf{g}_4|$  e  $\Phi\mathbf{g}_4$  da grade(matriz) para cada etapa.*
- 3 - Calcular  $\delta_L$  a partir do gráfico  $\mathbf{g}_1^a$  e  $|\mathbf{g}_4|$ , para detectar variações da escalas média até a escala grande.*
- 4 - A dinâmica de uma estrutura irregular espaço-tempo está caracterizada na série de tempo:  $\delta_L \times t$ .*

A etapa 3 fornece um espaço de dispersão GPA das velocidades do vento e das alturas da onda usando  $\mathbf{g}_1^a$  e  $|\mathbf{g}_4|$

Assim a metodologia do GPA foi aplicada para o inverno de 1989-1990 nos dados de ventos e ondas. A área de cobertura na Irlanda é de aproximadamente 100 km<sup>2</sup> com uma resolução aproximada de 7 km. A velocidade do vento está disponível a cada hora variando de 1 até 20 m ,enquanto que as alturas da onda estão disponíveis cada 3 horas e variam de 0,6 até 7 m. Em conseqüência o tempo usado para a metodologia foi de 3 horas.

A figura 8 apresenta um momento em que há uma dispersão com grande variação enquanto que a Figura 9 apresenta um momento com pequena variação usando a entropia.



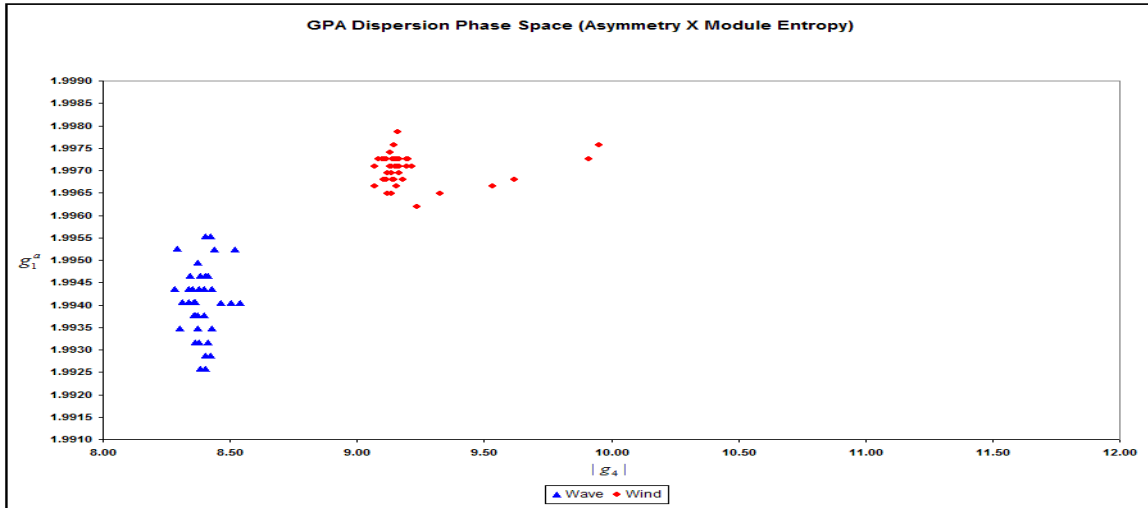


Figura 8. Momento com dispersão de grande variação de  $g_1^a$  X  $|g_4|$

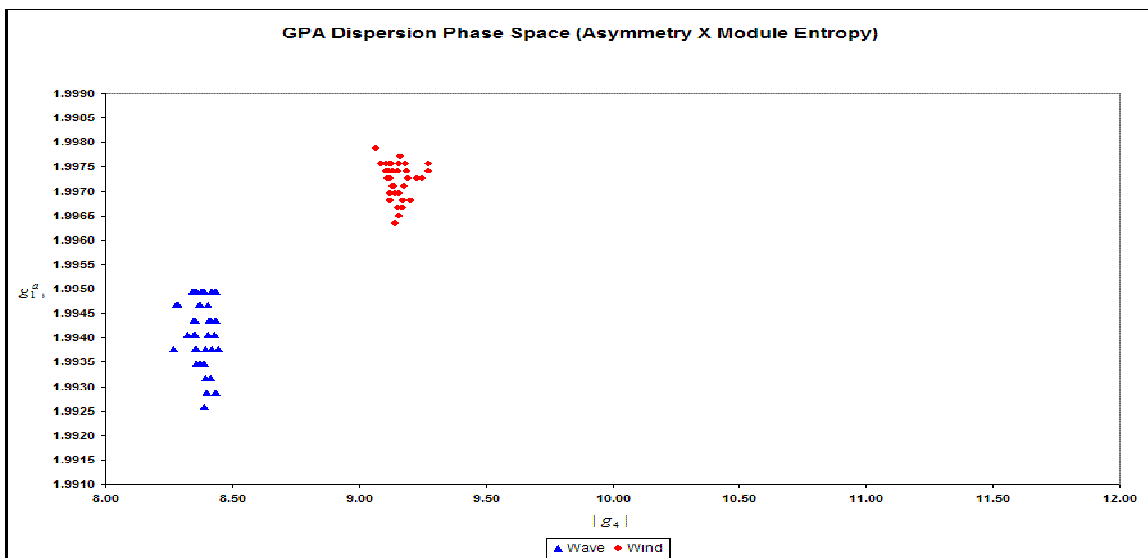


Figura 9. Momento com dispersão de pequena variação de  $g_1^a$  X  $|g_4|$

Os resultados dessa análise revelaram uma correlação muito baixa na maioria das etapas. Isto quer dizer que a medida da distância determinada pelos conjuntos das velocidades de vento não é semelhante à medida da distância determinada pelos conjuntos das alturas de ondas, indicando uma independência nas atividades dos ventos e das ondas, na escala maior até a intermediária.

Da mesma maneira é também possível caracterizar flutuações muito pequenas do gradiente, na linha entre o vento e a dinâmica da onda. Nesse caso  $|g_4|$  não é adequado. Com isso, se fez

necessário uma outra avaliação utilizando-se os resultados dos operadores AAF e CEF, baseado no espaço  $\mathbf{g}_1^a \times \Phi \mathbf{g}_4$  [Moraes e Vijaykumar, 2006].

Os testes revelaram uma forte correlação na maioria dos intervalos de tempo. Isto quer dizer que, medidas da distância determinadas no conjunto de velocidades do vento é seguida pela medida da distância determinada no conjunto da altura da onda, indicando uma elevada influência não linear dos ventos sobre as ondas, tanto nas análises de escala grande ( $|g_4$ ), escala pequena ( $\Phi \mathbf{g}_4$ ), e nas combinações da escala intermediária até a pequena escala ( $\mathbf{g}_1^a \times \Phi \mathbf{g}_4$ ), entretanto não detectamos nas combinações da escala intermediária até a grande escala ( $\mathbf{g}_1^a \times |g_4$ ).

## 5. CONCLUSÃO

Este projeto demonstrou que a técnica para Análise de Padrões Gradientes (Gradient Pattern Analysis – GPA), com base em seus operadores, é uma ferramenta adequada para detectar correlações não-lineares entre as dinâmicas espaço-temporais do sistema oceano-atmosfera.

Analisando os resultados obtidos com os dados do HINDCAST tem sido mostrado que o GPA é sensível para detectar assimetrias e entropias relacionadas com o campo gradiente das matrizes do vento e de onda ao redor da costa, simulada com uma alta resolução espacial.

Isso caracteriza a formação e resolução de modelos estendidos a partir de correlações espaço-tempo entre flutuações de amplitude, grandes e pequenas, da estrutura modelo representada no campo gradiente.

Um dos maiores desafios para a aplicação futura deste trabalho será a de melhorar a desempenho computacional desses operadores e aplicá-los em um ambiente Opensource, já que, atualmente, é gasto um tempo substancial na execução dos mesmos, utilizando-se softwares proprietários.

Essa continuidade irá conduzir um estudo mais rigoroso de como tais operadores ajudará a estabelecer uma metodologia de monitoramento para detectar modelos de escala não-lineares de dinâmicas costeiras que podem ser úteis para estratégias futuras de proteção costeira.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Assireu, A.T.; Rosa, R.R.; Vijaykumar, N.L.; Lorenzetti, J.A.; Rempel, E.L.; Ramos, F.M.; Abreu Sá, L.D.A.; Bolzan, M.J.A.; Zanandrea, A. Gradient Pattern Analysis of short nonstationary time series: an application to Lagrangian data from satellite tracked drifters. *Physica D*, 168-169, pp. 397-403, 2002.
- Gunther, H.; Hasselmann, S.; Janssen, P.A.E.M. Technical Report No. 4 WAM Model Cycle 4. Technical Report.
- Jacob, D.; Podzun, R. Sensitivity Studies with the Regional Climate Model REMO. *Meteorological Atmospheric Physics*, 63, 119-129, 1997.
- Kalnay, E., Kanamitsu, M., Kistler, R., Collins, W., Deaven, D., Gandin, L., Iredell, M., Saha, S., White, G., Woollen, J., Zhu, Y., Chelliah, M., Ebisuzaki, W., Higgins, W., Janowiak, J., Mo, K.C., Ropelewski, C., Wang, J., Leetmaa, A., Reynolds, R., Jenne, R., Joseph, D. The NCEP/NCAR reanalysis project. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 77, 431-471, 1996.
- Moraes, T.A.; Vijaykumar, N.L. Avaliação de Atlas de Ventos e Ondas Utilizando Operador AAF (Asymmetric Amplitude Fragmentation) da técnica GPA (Gradient Pattern Analysis). SICINPE, INPE 2006.
- Ramos, F.M.; Rosa, R.R.; Neto, C.R.; Zanandrea, A. Generalized complex entropic form for gradient pattern analysis of spatio-temporal dynamics. *Physica A*, 283, 171-174, 2000.
- Rosa, R.R.; Neto, C.R.; Ramos, F.M.; Sharma, A.S.; Valdivia, J.A. Computational operator for dynamical complex pattern recognition. In: European Physical Society (Ed.), *EPS-modelling Collective Phenomena in Complex Systems*, 22F, 304-305, 1998.
- Rosa, R.R.; Sharma, A.S.; Valdivia, J.A. Characterization of asymmetric fragmentation patterns in spatially extended systems. *International Journal of Modern Physics C*, 10 (1), 147-163, 1999.
- Rosa, R.R.; Pontes, J.; Christov, C.; Ramos, F.M.; Rodrigues Neto, C.; Rempel, E.L.; Walgraef, D. Gradient Pattern Analysis of Swift-Hohenberg Dynamics: Phase Disorder Characterization. *Physica A*, v.283 (1-2), pp.156-159, 2000.
- Rosa, R.R.; Campos, M.R.; Ramos, F.M.; Vijaykumar, N.L.; Fujiwara, S.; Sato, T. Gradient Pattern Analysis of Structural Dynamics: Application to Molecular System Relaxation. *Brazilian Journal of Physics*, 33(3). To be published in September 2003.
- Sass, B.H.; Nielsen, N.W.; Jørgensen, J.U.; Amstrup, B.; Kmit, M. The Operational HIRLAM System at DMI. Danish Meteorological Institute Technical Report 00-26, Copenhagen, Denmark, 2000.
- Soares, C.G., Weisse, R., Carretero, J.C., Alvarez, E. A 40 Years Hindcast of Wind, Sea Level and Waves in European Waters. *Proceedings of the 21<sup>st</sup> International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, Oslo, Norway, 2002.

- Vijaykumar, N.L.; Devoy, R.J.; Gault, J.; Dunne, D.; O'Mahony, C. Validation Methods and Links to a Coastal-GIS in the development of a High Resolution Limited Area Model (HIRLAM) for producing a 40-year Wave Atlas for the Irish and Celtic Seas. CoastGIS'03 – Fifth International Symposium on GIS and Computer Cartography for Coastal Zone Management, Genova, Italy, October 2003. (Proceedings with full papers on CD-ROM)
- Vijaykumar, N.L.; Gault, J.; Devoy, R.; Assireu, A.; Dunne, D.; O'Mahony, C. An experience on Wind Hindcast to simulate a Wave Hindcast over the Irish Sea, *XIII CBMET (Brazilian Congress of Meteorology)*, Fortaleza, CE, Brazil, August-September 2004 (Poster Presentation. Full Paper published in the Proceedings)
- Walgraef, D. Spatio-Temporal Pattern Formation, with examples in Physics, Chemistry and Material Science. Springer-Verlag, New York, 1996.
- WAMDI Group. The WAM Model – A Third Generation Ocean Wave Prediction Model. *Journal of Physical Oceanography*, 18, 1775-1810, 1988.
- Weisse, R., Gayer, G. An Approach Towards a 40-Year High-Resolution Wave Hindcast for the Southern North Sea. Proceedings of the 6<sup>th</sup> International Workshop on Wave Hindcasting and Forecast, Monterey, USA, 2000.

## **GLOSSÁRIO**

**AAF** – Fragmentação Assimétrica de Amplitude

**CEF** – Forma Complexa da Entropia.

**DOWNSCALING** - Redução de tamanho.

**GPA** – Análise do Padrão Gradiente.

**GEF** – Forma Complexa da Entropia Generalizada

**HIRLAM** – Modelo de Área Limitada com Alta Resolução.

**HINDCAST** – Projeto europeu para análise de clima costeiro do passado.

**WAM** – Modelo de Ondas.