

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS  
UNIDADE ACADÊMICA DE CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM**

# **METEOROLOGIA**



## **Tese de Doutorado**

**Edvaldo de Oliveira Alves**

**INFLUÊNCIA EM CURTA DURAÇÃO DE ONDAS PLANETÁRIAS NA  
DINÂMICA DAS MARÉS ATMOSFÉRICAS OBSERVADAS NOS VENTOS  
METEÓRICOS DE SÃO JOÃO DO CARIRI-PB**

**Campina Grande, Abril de 2012**



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
UNIDADE ACADÊMICA DE CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM METEOROLOGIA  
CURSO DE DOUTORADO EM METEOROLOGIA**

**TESE DE DOUTORADO**

**INFLUÊNCIA EM CURTA DURAÇÃO DE ONDAS PLANETÁRIAS NA  
DINÂMICA DAS MARÉS ATMOSFÉRICAS OBSERVADAS NOS  
VENTOS METEÓRICOS DE SÃO JOÃO DO CARIRI-PB**

**Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Meteorologia da Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas (UACA) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG) como requisito obrigatório para obtenção do título de Doutor em Meteorologia.**

**Candidato: Edvaldo de Oliveira Alves**

**Orientadores: Dr. Lourivaldo Mota Lima**

**Dr. Amauri Fragoso de Medeiros**

**DCA-UFCG  
CAMPINA GRANDE - PB  
27/abril/2012**

**TESE DE DOUTORADO**

**INFLUÊNCIA EM CURTA DURAÇÃO DE ONDAS PLANETÁRIAS NA DINÂMICA  
DAS MARÉS ATMOSFÉRICAS OBSERVADAS NOS VENTOS METEÓRICOS DE  
SÃO JOÃO DO CARIRI-PB**

**Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Meteorologia da Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas (UACA) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG) como requisito obrigatório para obtenção do título de Doutor em Meteorologia.**

**Candidato: Edvaldo de Oliveira Alves**

**Orientadores: Dr. Lourivaldo Mota Lima**

**Dr. Amauri Fragoso de Medeiros**

**Área de Concentração: Meteorologia de Meso e Grande Escalas**

**Sub-área: Sinótica-Dinâmica da Atmosfera Tropical**

**DCA-UFCG  
CAMPINA GRANDE - PB  
Abril/2012**

## FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

- A474i      Alves, Edvaldo de Oliveira.  
              Influência em curta duração de ondas planetárias na dinâmica das marés Atmosféricas observadas nos ventos meteóricos de São João do Cariri-PB / Edvaldo de Oliveira Alves. - Campina Grande, 2012.  
              254 f.: il., color.
- Tese (Doutorado em Meteorologia) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais.  
              Orientadores: Prof. Dr. Lourivaldo Mota Lima, Prof. Dr. Amauri Fragoso de Medeiros.  
              Referências.
1. Meteorologia. 2. Interação não Linear Ressonante. 3. Radar Meteórico. 4. Mesosfera. 5. Dinâmica da Alta Atmosfera. 6. *Locked Phase*. 7. Aquecimento Abrupto Estratosférico. I. Título.

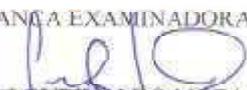
CDU 551.5 (043)

EDVALDO DE OLIVEIRA ALVES

INFLUÊNCIA EM CURTA DURAÇÃO DE ONDAS PLANETÁRIAS NA  
DINÂMICA DAS MARES ATMOSFÉRICAS OBSERVADAS NOS VENTOS  
METEÓRICOS DE SÃO JOÃO DO CARIRI-PB

TESE APROVADA EM 27/04/2012

BANCA EXAMINADORA

  
Prof. Dr. LOURIVALDO MOTA LIMA  
Centro de Ciências e Tecnologia  
Universidade Estadual da Paraíba

  
Prof. Dr. AMAURI FRAGOSO DE MEDEIROS  
Unidade Acadêmica de Física  
Universidade Federal de Campina Grande

  
Prof. Dr. ENIO PEREIRA DE SOUZA  
Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas  
Universidade Federal de Campina Grande

  
Prof. Dr. RICARDO ARLEN BURITI DA COSTA  
Unidade Acadêmica de Física  
Universidade Federal de Campina Grande

  
Prof. Dr. CARLOS FRÉDERICO MENDONÇA RAUPP  
Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas  
Universidade de São Paulo

  
Prof. Dr. PAULO PRADO BATISTA  
Coordenação Geral de Ciências Espaciais e Atmosféricas, Divisão de Aeronáutica  
Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

## **AGRADECIMENTOS**

Deposito neste espaço os meus mais sinceros agradecimentos a todas e todos que contribuíram para a realização deste trabalho, particularmente:

À Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas da Universidade Federal de Campina Grande, que através do programa de Pós-Graduação em Meteorologia proporcionou esta conquista que hora se concretiza.

Ao Departamento de Física da Universidade Estadual da Paraíba e aos meus colegas daquele Departamento, que compreenderam a importância desta Pós-Graduação e seguiram me incentivando sempre.

Ao INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais) pela cessão dos dados, pois sem eles esta pesquisa não seria possível.

Ao OLAP (Observatório de Luminescência Atmosférica da Paraíba) que na parceria com o INPE, proporciona aos pesquisadores da área a disponibilidade dos dados.

Ao professor Lourivaldo Mota, pela orientação e os momentos de ricas discussões e, principalmente, pela serenidade na separação entre a amizade e o compromisso do trabalho de pesquisa, o que nos tornou melhores e mais maduros.

Ao professor Amauri Fragoso, pela orientação, pelas discussões técnicas e pelos momentos de reflexões filosóficas que ajudaram a melhorar minha visão de mundo,

Ao professor Ricardo Buriti, pelas discussões, pelas contribuições no trabalho e pelo bom humor nos momentos difíceis.

Aos professores do programa de Pós-Graduação em Meteorologia, que se empenham para que tanto aqueles alunos oriundos de outras áreas como os alunos de Meteorologia possam adquirir conhecimentos que os permitam seguir com suas pesquisas e contribuir com a área.

Aos colegas de curso, pelos incentivos, pelos momentos de socialização das angústias, pela alegria das conquistas e por todos os momentos que compartilhamos ao longo desta caminhada.

Aos alunos de Iniciação Científica e alunos de pós-graduação do Grupo de Física da Atmosfera da UEPB, que ao nos questionarem para aprender, nos ensinam muito mais que

imaginam.

A toda minha família que, na maioria das vezes, não compreendia que pesquisa eu estava desenvolvendo, mas em momento algum deixou de acreditar e me incentivar na tarefa que escolhi concretizar.

Ao CNPq e CAPES pelos financiamentos das pesquisas.

Ao povo brasileiro que através do pagamento de seus impostos financiam a educação e a pesquisa. Espero que eu possa devolver a sociedade pelos menos na mesma proporção em que ela me proporcionou.

## Dedicatória

*Este trabalho é dedicado primeiramente a todas as mulheres que, com coragem e determinação, vencem preconceitos e avançam nas conquistas que lhes são suas por direito. Em especial gostaria de homenagear minha vó Dona França (em memória), Dona Judi (mamãe), Julieta, Jura e Juberlita (minhas tias), Elinalva e Eliane (minhas irmãs) e Nilzicleide (minha esposa), a companheira que sempre tem me apoiado nas mais árduas empreitadas e nos grandes desafios que enfrento. Também ao meu “vôin” mestre Lucas (em memória) pelos ensinamentos e ao meu pai “Zeurique”(em memória), que, mesmo com pouca escolaridade, sempre enxergou a educação como o caminho e a possibilidade. A “Nado”, “Vaná”, Ednaldo e Eduardo (meus irmãos) por todas as lutas e conquistas. A vocês, todo meu carinho e admiração.*

## SUMÁRIO

	Pág.
Lista dos Principais Símbolos .....	12
Lista de Siglas.....	14
Lista de Figuras .....	15
Lista de Tabelas .....	21
Resumo .....	24
Abstract.....	25
1 - Introdução.....	26
1.1. Ondas Atmosféricas .....	26
1.2. Marés Atmosféricas.....	27
1.3. A Dinâmica das Marés Atmosféricas em S. J. do Cariri durante o SSW de 2006....	28
1.4. Variabilidade das amplitudes das Marés Atmosféricas.....	29
1.5. Importância da variabilidade das amplitudes das Marés Atmosféricas .....	29
2 - Revisão Bibliográfica.....	32
2.1. Ondas Atmosféricas .....	32
2.2. Marés Atmosféricas.....	32
2.3. Variabilidade da Amplitude da Maré .....	37
2.4. Ondas Planetárias (PW) .....	38
2.4.1. Onda de Quase Dois Dias (QTDW).....	39
2.4.2. Onda de Seis Dias e Meio (Onda de 6,5 Dias).....	40
2.4.3. Onda de Dezesesseis Dias (Onda de 16 Dias).....	41
3 - Interação Não Linear entre Ondas Atmosféricas .....	43
3.1. Ondas Lineares e o Método da Perturbação.....	43
3.2. Considerações sobre a Interação Não Linear entre Ondas Atmosféricas.....	46
3.2.1. Interação Ressonante.....	46
3.2.2. Interação não linear Onda-Maré.....	48
3.3. Considerações para um desenvolvimento matemático relativo a alguns dados teóricos sobre a propagação de Ondas Atmosféricas .....	52
3.4. Soluções do Sistema de Equações de Movimento .....	53
3.4.1. Solução de ordem “0” .....	53
3.4.2. Solução de 1ª ordem .....	54
3.4.3. Solução de 2ª ordem e a Interação Não Linear.....	58
3.5. Aquecimento Abrupto Estratosférico (SSW).....	62

4 - Instrumentação e Metodologia.....	65
4.1. Coleta e Análise dos Dados.....	65
4.2. Radar Interferométrico SKiYMET.....	66
4.3. Análise dos Ventos.....	69
4.4. Estimativa das Componentes do Vento.....	69
4.5. Análise em Wavelets (Ondeletas).....	71
4.5.1. A Transformada de Fourier (TF).....	73
4.5.2. Convolução.....	74
4.5.3. A Transformada Janelada de Fourier (TF).....	75
4.5.4. A Transformada em Wavelets (Ondaletas) de Morlet.....	75
4.6. Análise Biespectral.....	78
4.7. Periodograma de Lomb-Scargle.....	80
4.8. Análise Harmônica.....	81
5 - Resultados e Discussões.....	82
5.1. Fluxo típico de meteoros detectado pelo radar de S. J. Cariri – PB.....	82
5.2. Evidências de interação não linear entre a maré atmosférica e Ondas Planetárias presentes nos ventos meteóricos em São João do Cariri-PB (7,5°S; 36,5°O).....	84
5.2.1. Estação de Verão.....	84
5.2.1.1. Verão 2004-2005.....	85
5.2.1.2. Verão 2005-2006.....	99
5.2.1.3. Verão 2006-2007.....	106
5.2.1.4. Verão 2007-2008.....	110
5.2.1.5. Discussões dos resultados para os Verões entre 2004 e 2008.....	114
5.2.2. Estação de Outono.....	125
5.2.2.1. Espectros em wavelets para todos os outonos.....	125
5.2.2.2. Análise dos dados filtrados.....	128
5.2.2.3. Perfis de amplitudes e fases.....	129
5.2.2.4. Densidade de Potência Espectral (PSD).....	131
5.2.2.5. Análise Biespectral.....	136
5.2.3. Estação de Inverno.....	144
5.2.3.1. Espectro em wavelets.....	144
5.2.3.2. Análise dos dados filtrados.....	147
5.2.3.3. Perfis de amplitudes e fases.....	148
5.2.3.4. Densidade de Potência Espectral (PSD).....	149
5.2.3.5. Análise Biespectral.....	153
5.2.4. Estação de Primavera.....	159
5.2.4.1. Espectro em wavelets.....	159

5.2.4.2. Análise dos dados filtrados .....	162
5.2.4.3. Perfis de amplitudes e fases .....	163
5.2.4.4. Densidade de Potência Espectral (PSD).....	165
5.2.4.5. Análise Biespectral.....	170
5.3. Observações de episódios de interação não linear ressonante entre modos de marés e Ondas Planetárias presentes nos ventos meteóricos de Cachoeira Paulista-SP. ....	177
5.3.1 Discussões dos resultados para os Verões entre 2004 e 2008.....	178
5.3.2 Discussões dos resultados para os Outonos entre 2005 e 2008.....	180
5.3.3 Discussões dos resultados para os Invernos entre 2005 e 2008 .....	181
5.3.4. Discussões dos resultados para as Primaveras entre 2005 e 2008 .....	182
5.4. Evidências de interação não linear entre a maré diurna e a QTDW em Cachoeira Paulista-SP e São João do Cariri-PB: Um estudo de caso .....	183
5.5. Dinâmica da MLT equatorial durante SSW de 2005-2006.....	187
6 - Conclusões .....	192
Sugestões e questões para pesquisas futuras .....	200
Referências Bibliográficas.....	201
Anexos-A.....	212
Trabalhos publicados/apresentados a partir das investigações desta Tese.....	212
1: Evidências de Interação não linear entre a Maré Atmosférica e a Onda de Quase Dois Dias em Cachoeira Paulista-SP e São João do Cariri-PB: Um estudo de caso. ....	212
2: Sudden stratospheric warming effects on the mesospheric tides and 2-day wave dynamics at 7°S .....	213
Anexos-B.....	214
Observações de episódios de interação não linear ressonante entre modos de marés e Ondas Planetárias presentes nos ventos meteóricos em Cachoeira Paulista-SP. ....	214
1. Estação de Verão.....	214
1.1. Verão 2004-2005.....	214
1.2. Verão 2005-2006.....	218
1.3. Verão 2007-2008.....	221
2. Estação de Outono.....	226
2.1. Outono 2005.....	226
2.2. Outono 2006.....	229
2.3. Outono 2008.....	231
3. Estação de Inverno .....	235
3.1. Inverno 2005 .....	235

3.2. Inverno 2006 .....	237
3.3. Inverno 2007 .....	240
3.4. Inverno 2008 .....	243
4. Estação de Primavera .....	247
4.1. Primavera 2005 .....	247
4.2. Primavera 2007 .....	250
4.3. Primavera 2008 .....	253

## LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
$a$	Raio da Terra
$A$	Amplitude
$A_{n,s}$	Amplitude do modo de maré $n$ com número de onda $s$
$B(k,l)$	Biespectro
$c$	Velocidade de fase; velocidade do som no ar
$\frac{D}{Dt}$	Derivada total temporal
$e$	Número de Euler ( $e = 2,718\dots$ )
$E$	Energia; direção leste
$f, f_o$	Parâmetro de Coriolis
$f, f_n, f_s$	Frequência; frequência de Nyquist; frequência de amostragem
$f(t)$	Função matemática com dependência temporal; Transformada Inversa de Fourier
$F(\omega), F[f(t)]$	Transformada Direta de Fourier
$g, g_o$	Aceleração da gravidade
$h$	Altitude
$h_e$	Profundidade equivalente
$H$	Escala de altura; como sub-índice indica horizontal
$\hat{i}_i$	Vetor unitário da linha de visada do radar
$j$	Parâmetro indicador do termo imaginário de um número complexo ( $j = \sqrt{-1}$ )
$k$	Número de onda
$l_i$	Cosseno diretor na direção leste
$L$	Direção leste
$m_i$	Cosseno diretor na direção norte
$n$	Número inteiro (1, 2, 3,...)
$n_i$	Cosseno diretor na direção vertical
$N$	Frequência de Brunt Väisälä; direção norte
$O$	Direção oeste
$O^n$	Termo de ordem $n$ de um polinômio
$O$	Oxigênio atômico
$O_2$	Oxigênio molecular;
$O_3$	Ozônio
$p$	Probabilidade; pressão
$p_X$	Periodograma de Lomb-Scargle
$r, \hat{r}$	Módulo do vetor posição; vetor posição
$R$	Constante dos gases para o ar seco ( $\approx 278 \text{ J.kg}^{-1}\text{K}^{-1}$ );
$s$	Numero de onda zonal
$S_n$	Modos de maré
$T$	Temperatura; período da onda
$t, t_{LT}, t_{UT}$	Tempo; Tempo local; tempo universal
$u, \bar{u}, u'$	Velocidade do vento zonal; velocidade do vento básico zonal, velocidade do vento perturbado zonal
$U$	Velocidade do vento
$v, \bar{v}, v'$	Velocidade do vento meridional; velocidade média do vento meridional; velocidade do vento perturbado meridional

$V, \vec{V}$	Módulo do vetor vento; vetor vento
$x(t), X(t)$	Sinal de entrada dependente do tempo para um sistema
$x$	Coordenada cartesiana na direção zonal
$X_m$	Oscilação resultante da interação não linear ressonante na tríade
$z$	Coordenada cartesiana na direção vertical
$w$	Velocidade da componente vertical do vento
$W$	Transformada em wavelets; direção oeste
$y$	Coordenada cartesiana na direção meridional
$Y(t)$	Sinal de saída de um sistema não linear
$\alpha$	Defasagem; constante de proporcionalidade
$\beta$	Plano beta equatorial
$\vec{\chi}$	Componente horizontal do vetor número de onda
$\delta$	Variação de uma grandeza
$\frac{\partial}{\partial t}, \frac{\partial}{\partial x}$	Derivada parcial em relação ao tempo; derivada parcial em relação ao espaço na direção x
$\varepsilon^2$	Valor residual; erro quadrático médio
$\phi$	Fase; geopotencial
$\phi'$	Flutuação do geopotencial
$\eta_i^{jk}$	Coefficiente de interação entre oscilações numa tríade ressoante
$\varphi$	Ângulo zenital
$\lambda, \lambda_z$	Longitude; comprimento de onda; comprimento de onda vertical
$\nu$	Frequência
$\Theta$	Funções de Hough
$\theta$	Latitude; colatitude
$\theta(\omega)$	Fase da componente de Fourier
$\rho$	Densidade volumétrica de massa
$\tau, \tau_N$	Período; período de Brunt Väisälä
$\upsilon$	Volume específico
$\nu$	Frequência da onda
$\omega$	Velocidade angular; frequência angular
$\psi$	Função de onda; função “ondaleta-mãe”
$\psi^*$	Função de onda conjugada
$\vec{\zeta}$	Vetor unitário na direção vertical
$\Delta$	Variação de uma grandeza;
$\nabla$	Operador diferencial nabla;
$\nabla^2$	Operador Laplaciano
$\Phi$	Geopotencial;
$\Phi'$	Flutuação do geopotencial
$\Theta$	Funções de Hough; polinômios associados de Legendre
$\Sigma$	Somatório
$\Omega$	Velocidade angular da Terra

## LISTA DE SIGLAS

<b>Siglas</b>	<b>Significado</b>
CIRA	Cooperative Institute for Research in the Atmosphere
CMAM	Canadian Middle Atmosphere Model
DT	Diurnal Tide
ENSO	El – Niño Southern Oscillation
GPS	Global System Positioning
GSWM	Global Scale Wave Model
HRDI	High Resolution Doppler Imager
MLT	Mesosphere and Lower Thermosphere
NCEP	National Center for Environmental Prediction
OLAP	Observatório de Luminescência Atmosférica da Paraíba
PSD	Power Spectral Density
PW	Planetary Wave
QBO	Oscillation Quasi Biennial
QTDW	Quasi-Two Days Wave
SABER	Sounding of the Atmosphere by Broadband Emission Radiometer
SSW	Sudden Stratospheric Warming
ST	Semidiurnal Tide
TFJ	Transformada de Fourier Janelada
TIMED	Thermosphere-Ionosphere-Mesosphere Energetics and Dynamics
TT	Terdiurnal Tide
UARS	Upper Atmosphere Research Satellite
VHF	Very High Frequency

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 01</b> - Diagrama vetorial de números de onda horizontal para um trio de frequências ressonantes. ....	47
<b>Figura 02</b> – Localização dos radares meteorológicos utilizados nesta pesquisa. ....	65
<b>Figura 03</b> – Diagrama em blocos do Radar Meteorológico – SKiYMET. ....	67
<b>Figura 04</b> – Radar Meteorológico – SKiYMET em São João do Cariri. (a) Equipamentos: transmissor, receptor e fonte da alimentação. (b) Antena transmissora yagi de três elementos. (c) Sitio de localização do Radar Meteorológico. ....	68
<b>Figura 05</b> – Esquema geométrico para determinar a velocidade do vento radial com um radar Doppler. ....	69
<b>Figura 06</b> – Esquema mostrando o resultado da análise de multiresolução. ....	77
<b>Figura 07</b> - Fluxo típico de meteoros detectado pelo radar em São João do Cariri–PB. (a) distribuição vertical de ocorrências de meteoros não ambíguos registrados no dia 04 de maio de 2007. (b) taxa de ecos meteorológicos amostrados em função da hora do dia, para os dias 03 e 04 de maio de 2007. ....	82
<b>Figura 08</b> - Maré atmosférica diurna nos ventos meteorológicos em São João do Cariri-PB, em 90 km, para os verões entre 2004 e 2008. ....	85
<b>Figura 09</b> - Espectros de energia em wavelets nos ventos meteorológicos em São João do Cariri-PB no verão 2004-2005, e da Energia Espectral Global em 90 km. ....	86
<b>Figura 10</b> - Perfis de amplitudes e fases da maré atmosférica nos ventos meteorológicos em São João do Cariri-PB em 17/fev/2005. ....	90
<b>Figura 11</b> - Periodograma de Lomb-Scargle do vento meteorológico, em 90 km, no período de 18/jan até 28/fev/2005 em São João do Cariri-PB. ....	91
<b>Figura 12</b> - Comportamento da amplitude da maré diurna e o comportamento da QTDW no vento meteorológico em São João do Cariri entre 01 e 28/fev/2005. ....	93
<b>Figura 13</b> - Análise biespectral para os dados de ventos meteorológicos do verão 2004-2005, em São João do Cariri-PB, em 90 km. ....	94
<b>Figura 14</b> - Perfis de amplitudes e fases da onda de QTDW, na componente meridional do vento meteorológico, para 06/fev/2005, em São João do Cariri-PB. ....	97
<b>Figura 15</b> - Onda de 16 horas em função da altitude no vento meteorológico meridional em São João do Cariri-PB, no período entre 05 e 09/fev/2005. ....	98
<b>Figura 16</b> - Espectros de energia em wavelets nos ventos meteorológicos em São João do Cariri-PB no verão 2005-2006, e da Energia Espectral Global em 90 km. ....	99
<b>Figura 17</b> - Comportamento da amplitude da maré diurna e o comportamento da QTDW em São João do Cariri-PB, entre 10/jan e 24/fev/2006. ....	100
<b>Figura 18</b> – (a) Comportamento das amplitudes da maré diurna e das ondas de 6,5 dias, 10 dias e de 16 dias, em São João do Cariri-PB, em 90 km. (b) Comparação entre os comportamentos das amplitudes da maré e onda de 6,5 dias, maré e onda de 10 dias e maré e onda de 16 dias. ....	101
<b>Figura 19</b> - Perfis de amplitudes e fases da maré diurna, na componente meridional do vento meteorológico, para 17/fev/2006 em São João do Cariri-PB. ....	102

<b>Figura 20</b> - Análise biespectral para os dados de ventos meteóricos de verão 2005-2006, em São João do Cariri-PB, em 90 km.....	102
<b>Figura 21</b> - Periodograma de Lomb-Scargle do vento meteórico, em 90 km, no intervalo de 18/jan até 15/fev/2006 em São João do Cariri-PB..	105
<b>Figura 22</b> - Periodograma de Lomb-Scargle do vento meteórico, em 90 km, no intervalo de 18/jan até 15/fev/2006 em São João do Cariri-PB. ....	105
<b>Figura 23</b> - Espectros de energia em wavelets nos ventos meteóricos em São João do Cariri-PB no verão 2006-2007, e da Energia Espectral Global em 90 km. ....	106
<b>Figura 24</b> - Perfis de amplitudes e fases da maré diurna, na componente meridional do vento meteórico, para 17/fev/2007 em São João do Cariri-PB. ....	107
<b>Figura 25</b> - Periodograma de Lomb-Scargle do vento meteórico, em 90 km, no intervalo de 18/jan até 15/fev/2007 em São João do Cariri-PB..	108
<b>Figura 26</b> - Análise biespectral para os dados de ventos meteóricos de verão 2006-2007, em São João do Cariri-PB, em 90 km.....	109
<b>Figura 27</b> - Espectros de energia em wavelets nos ventos meteóricos em São João do Cariri-PB no verão 2007-2008, e da Energia Espectral Global em 90 km. ....	111
<b>Figura 28</b> - Perfis de amplitudes e fases da maré diurna, na componente meridional do vento meteórico, para 17/fev/2008 em São João do Cariri-PB. ....	112
<b>Figura 29</b> - Periodograma de Lomb-Scargle do vento meteórico, em 90 km, no intervalo de 18/jan até 28/fev/2008 em São João do Cariri-PB. ....	112
<b>Figura 30</b> - Análise biespectral para os dados de ventos meteóricos de verão 2007-2008, em São João do Cariri-PB, em 90 km.....	113
<b>Figura 31</b> – Comportamento da amplitude da QTDW, no verão em São João do Cariri-PB. (a) 2004-2005; (b) 2005-2006; (c) 2006-2007; e (d) 2007-2008.....	117
<b>Figura 32</b> – Comportamento da amplitude e da fase da QTDW, na componente meridional, entre 11/jan e 28/fev. (a) 2005; (b) 2006; (c) 2007; e (d) 2008.....	118
<b>Figura 33</b> – Comportamento das amplitudes da maré e da onda de 6,5 dias na componente zonal do vento. (topo) 14/fev a 05/mar/2008, e (base) 07 a 23/mar/2007. ....	122
<b>Figura 34</b> – Comportamento das amplitudes da maré e da onda de 10 dias na componente zonal do vento entre 05/jan a 09/fev para os anos de 2005-2008. ....	123
<b>Figura 35</b> – Comportamento das amplitudes da maré e da onda de 16 dias na componente zonal do vento nos intervalos de 15/dez a 14/fev para os anos de 2004 a 2006 e entre 10/Jan a 25/fev para os anos de 2007 e 2008. ....	124
<b>Figura 36</b> - Espectro de energia em wavelets da componente zonal nos ventos meteóricos do outono em São João do Cariri-PB, e da Energia Espectral Global em 90km. ....	126
<b>Figura 37</b> - Espectro de energia em wavelets da componente meridional nos ventos do outono em São João do Cariri-PB, e da Energia Espectral Global em 90 km. ....	128
<b>Figura 38</b> - Amplitudes da maré diurna no outono em São João do Cariri-PB, em 90 km. (a) 2005; (b) 2006; (c) 2007; (d) 2008.....	129
<b>Figura 39</b> - Perfis de amplitudes e fases da maré atmosférica meridional no outono em São João Cariri-PB. (a) 2005, (b) 2006, (c) 2007, (d) 2008.....	130
<b>Figura 40</b> - Periodograma de Lomb-Scargle, entre 23/mar e 05/mai, nos ventos meteóricos do	

outono de 2005 em São João do Cariri-PB, em 90 km.. .....	132
<b>Figura 41</b> - Periodograma de Lomb-Scargle, entre 23/mar e 05/mai, nos ventos meteóricos do outono de 2006 em São João do Cariri-PB, em 90 km.. .....	133
<b>Figura 42</b> - Periodograma de Lomb-Scargle, entre 23/mar e 05/mai, nos ventos meteóricos no outono de 2007 em S. J. Cariri-PB, em 90 km.....	134
<b>Figura 43</b> - Periodograma de Lomb-Scargle, entre 23/mar e 05/mai, nos ventos meteóricos no outono de 2008 em S. J. Cariri-PB, em 90 km.....	136
<b>Figura 44</b> - Análises biespectrais dos ventos meteóricos no outono 2005, em São João do Cariri-PB, em 90 km.. .....	137
<b>Figura 45</b> - Análises biespectrais dos ventos meteóricos no outono 2006, em São João do Cariri-PB, em 90 km. ....	137
<b>Figura 46</b> - Análises biespectrais dos ventos meteóricos no outono 2007, em São João do Cariri-PB, em 90 km. ....	138
<b>Figura 47</b> - Análises biespectrais dos ventos meteóricos no outono 2008 em São João do Cariri-PB, em 90 km.. .....	139
<b>Figura 48</b> - Comparação entre as amplitudes médias da maré diurna e Ondas Planetárias no outono 2008 em São João do Cariri-PB, em 90 km.....	143
<b>Figura 49</b> - Espectro de energia em wavelets da componente zonal do vento meteórico do inverno, e da Energia Espectral Global em 90 km.....	145
<b>Figura 50</b> - Espectro de energia em wavelets da componente meridional do vento meteórico do inverno (Cariri-PB) e da Energia Espectral Global em 90 km.....	146
<b>Figura 51</b> - Amplitude das componentes da maré diurna no Inverno em Cariri-PB .....	148
<b>Figura 52</b> - Perfis de amplitudes e fases da maré na componente meridional do vento meteórico do inverno em S. J. Cariri-PB em 90 km .....	149
<b>Figura 53</b> - Periodograma de Lomb-Scargle, entre 18/jun e 08/ago, nos ventos meteóricos do inverno de 2005 em São João do Cariri-PB, em 90 km. ....	151
<b>Figura 54</b> - Periodograma de Lomb-Scargle, entre 18/jun e 08/ago, nos ventos meteóricos do inverno de 2007 em São João do Cariri-PB, em 90 km.....	152
<b>Figura 55</b> - Periodograma de Lomb-Scargle, entre 18/jun e 08/ago, nos ventos meteóricos do inverno de 2008 em São João do Cariri-PB, em 90 km.....	153
<b>Figura 56</b> - Análises biespectrais dos ventos meteóricos no inverno 2005 em São João do Cariri-PB, em 90 km. ....	154
<b>Figura 57</b> - Análises biespectrais dos ventos meteóricos no inverno 2007 em São João do Cariri-PB, em 90 km.....	155
<b>Figura 58</b> - Análises biespectrais dos ventos meteóricos no inverno 2008 em São João do Cariri-PB, em 90 km.....	156
<b>Figura 59</b> - Comparação entre as amplitudes médias da maré diurna e Ondas Planetárias no inverno 2005 em São João do Cariri-PB, em 90 km. ....	158
<b>Figura 60</b> - Espectro de energia em wavelets da componente zonal do vento meteórico do inverno (Cariri-PB) e da Energia Espectral Global em 90 km.....	160
<b>Figura 61</b> - Espectro de energia em wavelets da componente meridional do vento meteórico	

do inverno e da Energia Espectral Global em 90 km. ....	162
<b>Figura 62</b> - Espectro de Energia em Ondas da componente meridional do vento meteórico do inverno e da Energia Espectral Global em 90 km. ....	163
<b>Figura 63</b> - Espectro de Energia em wavelets da componente meridional do vento meteórico da primavera (Cariri-PB), em 90 km. ....	164
<b>Figura 64</b> - Periodograma de Lomb-Scargle, entre 26/set e 14/nov, nos ventos meteóricos da primavera de 2005 em São João do Cariri-PB, em 90 km. ....	166
<b>Figura 65</b> - Periodograma de Lomb-Scargle, entre 26/out a 14/dez, nos ventos meteóricos da primavera de 2006 em São João do Cariri-PB, em 90 km. ....	167
<b>Figura 66</b> - Periodograma de Lomb-Scargle, entre 26/out a 14/dez, nos ventos meteóricos da primavera de 2007 em São João do Cariri-PB, em 90 km. ....	168
<b>Figura 67</b> - Periodograma de Lomb-Scargle, entre 26/out a 14/dez, nos ventos meteóricos da primavera de 2008 em São João do Cariri-PB, em 90 km. ....	170
<b>Figura 68</b> - Análises biespectrais dos ventos meteóricos na primavera 2005, em São João do Cariri-PB, em 90 km. ....	171
<b>Figura 69</b> - Análises biespectrais dos ventos meteóricos na primavera 2006 em São João do Cariri-PB, em 90 km. ....	171
<b>Figura 70</b> - Análises biespectrais dos ventos meteóricos na primavera 2007 em São João do Cariri-PB, em 90 km. ....	172
<b>Figura 71</b> - Análises biespectrais dos ventos meteóricos na primavera 2008 em São João do Cariri-PB, em 90 km. ....	173
<b>Figura 72</b> - Comparação entre as amplitudes médias da maré diurna e Ondas Planetárias na primavera de 2005 em São João do Cariri-PB, em 90 km. (esquerda). ....	175
<b>Figura 73</b> - Comparação entre as amplitudes médias da maré diurna e Ondas Planetárias na primavera de 2007, em São João do Cariri-PB, em 90 km. ....	176
<b>Figura 74</b> - Transformada em ondas do vento meridional para Cachoeira Paulista-SP e S. J. do Cariri-PB em 2008, em 90 km. ....	184
<b>Figura 75</b> - Densidade de Potência Espectral (Power Spectral Density - PSD) para C. Paulista-SP (julho de 2008). ....	185
<b>Figura 76</b> - Transformada S do vento Meridional para C. Paulista-SP no intervalo de junho – julho de 2008. ....	185
<b>Figura 77</b> - Resultado da análise biespectral para o vento meridional em julho de 2008, na altura de 90 km, em Cachoeira Paulista-SP e São João do Cariri-PB. ....	186
<b>Figura 78</b> - Amplitudes para a maré diurna e onda QTDW nos ventos da componente meridional na altitude de 90 km observados em Cariri, temperatura zonal média (NCEP) na calota polar, e amplitudes das ondas 1-2 na altura do geopotencial em 60°N, no nível de pressão de 10 hPa, para (a) 2004-2005, (b) 2005-2006 e (c) 2006-2007. ....	188
<b>Figura 79</b> – Amplitudes da maré semidiurna na componente meridional dos ventos na altitude de 90 km obtidos em Cariri-PB. ....	190
<b>Figura 80</b> – Espectros de energia em wavelets do vento meteórico no verão 2005, em Cachoeira Paulista-SP, para 90 km de altitude e da Energia Espectral Global (direita). ....	214

<b>Figura 81</b> – Análise biespectral, com limite das frequências ampliados, para as componentes do vento meteórico no verão 2005, em Cachoeira Paulista – SP, em 90 km de altitude. ....	215
<b>Figura 82</b> – Análise biespectral para as componentes do vento meteórico no verão 2005, em Cachoeira Paulista – SP, para 90 km de altitude.....	216
<b>Figura 83</b> – Periodograma de Lomb-Scargle (PSD) para as componentes do vento meteórico no verão 2005 em C. Paulista-SP para 90 km. ....	218
<b>Figura 84</b> – Espectros de energia em wavelets do vento meteórico no verão 2006, em Cachoeira Paulista-SP, para 90 km de altitude, e da Energia Espectral Global.....	219
<b>Figura 85</b> – Análise biespectral para as componentes do vento meteórico no verão 2006 em C. Paulista - SP para 90 km de altitude.....	219
<b>Figura 86</b> – Análise biespectral para as componentes do vento meteórico no verão 2006 em C. Paulista - SP para 90 km de altitude. ....	220
<b>Figura 87</b> – Periodograma de Lomb-Scargle para as componentes do vento meteórico no verão 2006 em C. Paulista - SP para 90 km de altitude.. ....	221
<b>Figura 88</b> – Espectros de energia em wavelets do vento meteórico no verão 2007, em Cachoeira Paulista-SP, para 90 km de altitude e da Energia Espectral Global.....	222
<b>Figura 89</b> – Análise biespectral para as componentes do vento meteórico no verão 2007, em Cachoeira Paulista – SP, para 90 km de altitude.....	222
<b>Figura 90</b> – Análise biespectral para as componentes do vento meteórico no verão 2007 em C. Paulista - SP para 90 km de altitude.....	223
<b>Figura 91</b> – Periodograma de Lomb-Scargle para as componentes do vento meteórico no verão 2007, em Cachoeira Paulista – SP, para 90 km de altitude....	223
<b>Figura 92</b> – Espectros de energia em wavelets do vento meteórico no outono 2005 em C. Paulista-SP para 90 km de altitude e da Energia Espectral Global.....	227
<b>Figura 93</b> – Análise biespectral para as componentes do vento meteórico no outono 2005 em C. Paulista - SP para 90 km de altitude.....	227
<b>Figura 94</b> – Periodograma de Lomb-Scargle para as componentes do vento meteórico no outono de 2005 em C. Paulista-SP para 90 km de altitude. ....	228
<b>Figura 95</b> – Espectros de energia em wavelets do vento meteórico no outono 2006 em C. Paulista-SP para 90 km de altitude e, da Energia Espectral Global (direita).....	229
<b>Figura 96</b> – Análise biespectral para as componentes do vento meteórico no outono 2006 em C. Paulista - SP para 90 km de altitude.....	230
<b>Figura 97</b> – Periodograma de Lomb-Scargle para as componentes do vento meteórico no outono de 2006 em C. Paulista - SP para 90 km de altitude.. ....	231
<b>Figura 98</b> – Espectros de energia em wavelets do vento meteórico no outono 2008 em C. Paulista-SP para 90 km de altitude.....	232
<b>Figura 99</b> – Análise biespectral para as componentes do vento meteórico no outono 2008, em Cachoeira Paulista – SP.....	232
<b>Figura 100</b> – Periodograma de Lomb-Scargle para as componentes do vento meteórico no outono de 2008 em C. Paulista - SP para 90 km de altitude. ....	233
<b>Figura 101</b> – Espectros de energia em wavelets do vento meteórico no inverno de 2005 em C. Paulista-SP para 90 km de altitude e da Energia Espectral Global.....	235

<b>Figura 102</b> – Análise biespectral para as componentes do vento meteórico no inverno de 2005 em C. Paulista - SP para 90 km de altitude..	236
<b>Figura 103</b> – Periodograma de Lomb-Scargle para as componentes do vento meteórico no inverno de 2005 em C. Paulista - SP para 90 km de altitude..	237
<b>Figura 104</b> – Espectros de energia em ondaletas do vento meteórico no inverno de 2006 em C. Paulista-SP para 90 km de altitude, e da Energia Espectral Global	238
<b>Figura 105</b> – Análise biespectral para as componentes do vento meteórico no inverno de 2006 em C. Paulista - SP para 90 km de altitude. (a) zonal; (b) meridional.	239
<b>Figura 106</b> – Periodograma de Lomb Scargle para as componentes do vento meteórico no inverno de 2006 em C. Paulista - SP para 90 km de altitude..	240
<b>Figura 107</b> – Espectros de energia em ondaletas do vento meteórico no inverno de 2007 em C. Paulista-SP para 90 km de altitude e da Energia Espectral Global.	241
<b>Figura 108</b> – Análise biespectral para as componentes do vento meteórico no inverno de 2007 em C. Paulista - SP para 90 km de altitude..	242
<b>Figura 109</b> – Periodograma de Lomb-Scargle para as componentes do vento meteórico no inverno de 2007 em C. Paulista-SP para 90 km de altitude..	243
<b>Figura 110</b> – Espectros de energia em ondaletas do vento meteórico no inverno de 2008 em C. Paulista-SP para 90 km de altitude e da Energia Espectral Global (direita).	244
<b>Figura 111</b> – Análise biespectral para as componentes do vento meteórico no inverno de 2008, em Cachoeira Paulista – SP, para 90 km de altitude.	245
<b>Figura 112</b> – Periodograma de Lomb-Scargle para as componentes do vento meteórico no inverno de 2008, em Cachoeira Paulista – SP, para 90 km de altitude.	246
<b>Figura 113</b> – Espectros de energia em wavelets do vento meteórico na primavera de 2005 em C. Paulista-SP para 90 km de altitude, e da Energia Espectral Global	248
<b>Figura 114</b> – Análise biespectral para as componentes do vento meteórico na primavera de 2005 em C. Paulista - SP para 90 km de altitude..	248
<b>Figura 115</b> – Periodograma de Lomb Scargle para as componentes do vento meteórico na primavera de 2005 em C. Paulista - SP para 90 km de altitude.	250
<b>Figura 116</b> – Espectros de energia em ondaletas do vento meteórico na primavera de 2007 em C. Paulista-SP para 90 km de altitude e da Energia Espectral Global	251
<b>Figura 117</b> – Análise biespectral para as componentes do vento meteórico na primavera de 2007 em C. Paulista - SP para 90 km de altitude..	251
<b>Figura 118</b> – Periodograma de Lomb Scargle para as componentes do vento meteórico na primavera de 2007 em C. Paulista - SP para 90 km de altitude..	252
<b>Figura 119</b> – Espectros de energia em wavelets do vento meteórico na primavera de 2008 em C. Paulista-SP para 90 km de altitude e da Energia Espectral Global	253
<b>Figura 120</b> – Análise biespectral para as componentes do vento meteórico na primavera de 2008 em C. Paulista - SP para 90 km de altitude.	254
<b>Figura 121</b> – Periodograma de Lomb Scargle para as componentes do vento meteórico na primavera de 2008 em C. Paulista - SP para 90 km de altitude..	254

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 01.</b> Série de dados de ventos meteóricos disponíveis em São João do Cariri-PB entre 2004 e 2008 .....	71
<b>Tabela 02.</b> Série de dados de ventos meteóricos disponíveis em Cachoeira Paulista-SP entre 2004 e 2008 .....	71
<b>Tabela 03.</b> Frequências e períodos aproximados de ondas secundárias resultantes da interação não linear ressonante entre a maré diurna e Ondas Planetárias.....	95
<b>Tabela 04.</b> Frequências e períodos aproximados de ondas secundárias resultantes da interação não linear ressonante entre a maré semidiurna, maré diurna/Ondas Planetárias. ....	95
<b>Tabela 05.</b> Episódios identificados através da análise biespectral como interação não linear ressonante entre a maré diurna e outras ondas nos ventos meteóricos em 90 km para os verões de São João do Cariri – PB.....	115
<b>Tabela 06 -</b> Valores e datas de ocorrências da amplitude máxima atingida pela QTDW nos meses de janeiro e fevereiro do vento meteórico meridional de São João do Cariri-PB. ....	117
<b>Tabela 07 –</b> Possíveis interações não lineares envolvendo marés semidiurna, diurna e QTDW para gerar a maré diurna (1, 6). ....	119
<b>Tabela 08 -</b> Valores estimados dos parâmetros das ondas de 3-4 dias durante os quatro episódios na componente zonal do vento meteórico de São João do Cariri-PB, em 2005. ...	121
<b>Tabela 09.</b> Episódios identificados através da análise biespectral como interação não linear ressonante entre a maré diurna e outras ondas nos ventos meteóricos em 90 km para os outonos de São João do Cariri – PB.....	141
<b>Tabela 10.</b> Episódios identificados através da análise biespectral como interação não linear ressonante entre a maré diurna e outras ondas nos ventos meteóricos em 90 km para os invernos de São João do Cariri – PB.....	156
<b>Tabela 11.</b> Episódios identificados através da análise biespectral como interação não linear ressonante entre a maré diurna e outras ondas nos ventos meteóricos em 90 km para as primaveras de São João do Cariri – PB.....	173
<b>Tabela 12.</b> Episódios identificados, através da análise biespectral, como interação não linear ressonante entre modos de maré e Ondas Planetárias nos ventos meteóricos em 90 km para as estações do ano em Cachoeira Paulista – SP.....	178
<b>Tabela 13.</b> Episódios identificados através da análise biespectral como interação não linear ressonante entre a maré diurna e outras ondas nos ventos meteóricos em 90 km para os verões de Cachoeira Paulista – SP.....	179

<b>Tabela 14.</b> Episódios identificados através da análise biespectral como interação não linear ressonante entre a maré semidiurna e outras ondas nos ventos meteóricos em 90 km para os verões de Cachoeira Paulista – SP. ....	179
<b>Tabela 15.</b> Episódios identificados através da análise biespectral como interação não linear ressonante entre a maré diurna e outras ondas nos ventos meteóricos em 90 km para os outonos de Cachoeira Paulista – SP. ....	181
<b>Tabela 16.</b> Episódios identificados através da análise biespectral como interação não linear ressonante entre a maré semidiurna e outras ondas nos ventos meteóricos em 90 km para os outonos de Cachoeira Paulista – SP. ....	181
<b>Tabela 17.</b> Episódios identificados através da análise biespectral como interação não linear ressonante entre a maré diurna e outras ondas nos ventos meteóricos em 90 km para os invernos de Cachoeira Paulista – SP. ....	182
<b>Tabela 18.</b> Episódios identificados através da análise biespectral como interação não linear ressonante entre a maré semidiurna e outras ondas nos ventos meteóricos em 90 km para os invernos de Cachoeira Paulista – SP. ....	182
<b>Tabela 19.</b> Episódios identificados através da análise biespectral como interação não linear ressonante entre a maré diurna e outras ondas nos ventos meteóricos em 90 km para as primaveras de Cachoeira Paulista – SP. ....	183
<b>Tabela 20.</b> Episódios de interação não linear envolvendo modos de marés e ondas secundárias, em São João do Cariri-PB, nos ventos meteóricos em 90 km. ....	193
<b>Tabela 21.</b> Episódios de interação não linear envolvendo modos de marés e ondas secundárias, em Cachoeira Paulista-SP, nos ventos meteóricos em 90 km. ....	193
<b>Tabela 22.</b> Episódios identificados através da análise biespectral como interação não linear ressonante entre a maré diurna e outras ondas nos ventos meteóricos em 90 km para os verões de Cachoeira Paulista – SP. ....	225
<b>Tabela 23.</b> Episódios identificados através da análise biespectral como interação não linear ressonante entre a maré semidiurna e outras ondas nos ventos meteóricos em 90 km para os verões de Cachoeira Paulista – SP. ....	225
<b>Tabela 24.</b> Episódios identificados através da análise biespectral como interação não linear ressonante entre a maré diurna e outras ondas nos ventos meteóricos em 90 km para os outonos de cachoeira Paulista – SP. ....	234
<b>Tabela 25.</b> Episódios identificados através da análise biespectral como interação não linear ressonante entre a maré semidiurna e outras ondas nos ventos meteóricos em 90 km para os outonos de Cachoeira Paulista – SP. ....	234

<b>Tabela 26.</b> Episódios identificados através da análise biespectral como interação não linear ressonante entre a maré diurna e outras ondas nos ventos meteóricos em 90 km para os invernos de Cachoeira Paulista – SP.....	246
<b>Tabela 27.</b> Episódios identificados através da análise biespectral como interação não linear ressonante entre a maré semidiurna e outras ondas nos ventos meteóricos em 90 km para os invernos de Cachoeira Paulista – SP.....	246
<b>Tabela 28.</b> Episódios identificados através da análise biespectral como interação não linear ressonante entre a maré diurna e outras ondas nos ventos meteóricos em 90 km para as primaveras de Cachoeira Paulista – SP.....	255

## RESUMO

As Marés Atmosféricas estão entre os mais importantes movimentos na região entre a porção superior da Mesosfera e a porção inferior da região termosférica, denominada de região MLT (Mesosphere and Lower Thermosphere). As variações, na circulação atmosférica, verificadas na região MLT devem-se, em grande parte, à propagação de ondas que, em geral, são originadas por processos dinâmicos nas camadas mais baixas da atmosfera e se propagam horizontal e ascendentemente, podendo atingir os níveis mais elevados. Nesta região, as marés apresentam amplitudes intensas e os seus efeitos devem ser considerados ao se explicar as características da dinâmica da região próxima a mesopausa. As características das Marés Atmosféricas nos ventos horizontais entre 80 e 100 km, observadas sobre São João do Cariri-PB, foram estudadas recentemente. De acordo com os resultados deste estudo, as amplitudes das Marés Atmosféricas mostram variabilidade ao longo do tempo. Através de estudos baseados em modelos numéricos e em observações, apontou-se que as amplitudes das marés apresentam variabilidade se estendendo desde a escala de dias até anos. Nesta Tese, Análise em Wavelets, Análise Harmônica, Densidade de Potência Espectral e Análise Biespectral foram aplicadas aos dados horários dos ventos meteóricos obtidos, entre os anos de 2004 e 2008, através de radares meteóricos instalados em São João do Cariri-PB (7,4°S; 36,5°O) e Cachoeira Paulista-SP (22,7°S; 45,0°O) para investigar a variabilidade, em períodos de Ondas Planetárias, da amplitude da Maré Atmosférica. Componentes espectrais presentes nos ventos meteóricos na região MLT, as quais não possuem explicações através dos mecanismos conhecidos, são associadas às interações não lineares ressonantes entre a Maré Atmosférica e Ondas Planetárias. Estas interações resultam na modulação da amplitude da maré pelas Ondas Planetárias e, conseqüentemente, na produção das componentes espectrais secundárias através da soma e/ou da diferença das frequências das oscilações primárias. Portanto, as investigações realizadas, nesta Tese, foram focadas na interação não linear ressonante como um mecanismo importante para explicar a variabilidade da amplitude da maré em períodos de Ondas Planetárias. Adicionalmente, se estudou a influência de um evento de Aquecimento Abrupto Estratosférico nas amplitudes das marés e da Onda de Quase Dois Dias (QTDW) na MLT de São João do Cariri-PB. Finaliza-se a pesquisa fazendo a comparação de alguns resultados obtidos em Cachoeira Paulista – SP com aqueles de São João do Cariri – PB.

**Palavras-chave:** Interação não Linear Ressonante; Radar Meteórico; Mesosfera; Dinâmica da Alta Atmosfera; Locked Phase; Aquecimento Abrupto Estratosférico.

## **ABSTRACT**

The Atmospheric Tides are among the most prominent motions in the Mesosphere and Lower Thermosphere (MLT), often dominating the wind field at low latitudes. The variations in atmospheric circulation verified in the MLT region are, in large part, due to the propagation of waves which, in general, are caused by dynamic processes in the lower layers of the atmosphere and propagate horizontally and vertically upward, reaching the highest levels. In this region, tides present intense amplitude and its effect must be considered to explain the dynamics characteristics of the near mesopause region. The characteristics of the Atmospheric Tides in the horizontal winds between 80 and 100 km, observed at São João do Cariri-PB, had been studied recently. In accordance with results of this study, the amplitude of the Atmospheric Tides shows variability throughout the time. Through studies based on numerical models and observations, it was pointed out that the tidal amplitudes exhibit variability extending from the scale of days to years. In this Thesis, Wavelets Analysis, Harmonic Analysis, Power Spectral Density and Bispectral Analysis were applied to hourly data obtained from meteor winds, between the years 2004 and 2008, using meteor radars installed in São João do Cariri-PB (7,4°S, 36,5°W) and Cachoeira Paulista-SP (22,7°S, 45,0°W), to investigate the variability, in periods of Planetary Waves, of the Atmospheric Tide amplitudes in these region. Spectral components present in the meteor winds in the MLT region, which do not have explanations through known mechanisms, are associated with resonant nonlinear interactions between Atmospheric Tides and Planetary Waves. These interactions result in the amplitude modulation of the tide by Planetary Waves and, consequently, the production of secondary spectral components by sum and/or difference of primary oscillations frequencies. Therefore, the accomplished investigations, in this Thesis, were focused in the resonant nonlinear interaction as an important mechanism to explain the variability of the tidal in periods of Planetary Waves. Additionally, it was studied the influence of one event of Sudden Stratospheric Warming in the amplitudes of the tides and Quasi-Two Day Wave (QTDW) in the MLT of São João do Cariri-PB. We concluded the research making the comparison of some results obtained in Cachoeira Paulista - SP with those of São João do Cariri - PB.

**Key Words:** Nonlinear Resonant Interaction; Meteor Radar; Mesosphere, High Atmospheric Dynamic; Locked Phase; Sudden Stratospheric Warming.

## 1 - INTRODUÇÃO

### 1.1. Ondas Atmosféricas

Sob o ponto de vista dinâmico, uma das propriedades mais importantes da atmosfera é a sua capacidade de comportar movimentos ondulatórios, cujo espectro contém componentes com períodos que vão desde a ordem de segundos até milhares de anos. Boa parte das variações verificadas na região entre a porção superior da Mesosfera e a porção inferior da Termosfera, denominada de região MLT (Mesosphere and Lower Thermosphere), deve-se à propagação de ondas que, em geral, são originadas por processos dinâmicos nas camadas mais baixas da atmosfera e se propagam horizontal e ascendentemente, podendo atingir os níveis mais elevados. Devido à quebra e/ou à dissipação, elas depositam suas energias e momento no fluxo médio e desempenham um importante papel na estrutura e na circulação global da média e alta atmosfera (Vincent, 1993; Yoshida *et al.*, 1999).

Para classificar os movimentos ondulatórios presentes em fluidos geofísicos adotam-se vários critérios em função das propriedades físicas ou geométricas deste fluido. No caso da atmosfera, os movimentos ondulatórios podem ser classificados de acordo com os mecanismos restauradores da seguinte forma: ondas acústicas, cujo mecanismo restaurador deve-se à compressibilidade dos gases; ondas de gravidade internas cuja existência deve-se a estratificação da atmosfera; ondas inércio-gravidade que resultam de uma combinação da estratificação e dos efeitos da força de Coriolis; e as ondas devidas às forças rotacionais chamadas de ondas de escala planetária Rossby. Outro critério de classificação faz a distinção entre ondas forçadas - quando a sua existência só é possível na presença de um forçamento com frequência e número de onda conhecidos - e ondas livres, como é o caso dos modos normais. As ondas ainda podem ser estacionárias ou propagantes (Beer, 1975; Holton, 2004).

Ondas de Gravidade, Ondas Planetárias e Marés Atmosféricas são os três tipos de oscilações mais importantes resultante das diversas forças restauradoras na atmosfera. As componentes de Marés Atmosféricas se constituem no principal movimento de larga escala na região MLT. Nesta região, as marés apresentam amplitudes intensas e os seus efeitos devem ser considerados ao se explicar as características da dinâmica da região próxima a mesopausa (Miyahara *et al.*, 1993, 1999). Estudos recentes mostraram características dos ventos médios, do comportamento das Marés Atmosféricas e de outras oscilações observadas na MLT em 23<sup>o</sup>S (Batista *et al.*, 2004; Lima *et al.*, 2004; Lima *et al.*, 2005, Lima *et al.*, 2007a, 2007b).

## 1.2. Marés Atmosféricas

O Sol e a Lua exercem forças periódicas na atmosfera terrestre. Os efeitos térmicos devido à energia solar exercem forte influência na atmosfera terrestre gerando oscilações nos campos atmosféricos, enquanto que os efeitos da ação gravitacional do Sol e da Lua são fracos. As Marés Atmosféricas são oscilações de escala global causadas pela combinação das forças gravitacional solar e lunar e pela ação térmica do Sol, cujos períodos são sub-harmônicos de um dia solar ou lunar (Beer, 1975).

Estudos teóricos mostram que os modos propagantes da maré diurna são concentrados nas regiões de baixas latitudes (Chapman e Lindzen, 1970), e de acordo com os modelos mecânicos (Forbes e Vial, 1989; Hagan *et al.*, 1998; Hagan *et al.*, 2002) a maré diurna solar migrante apresenta amplitudes máximas nos ventos para latitudes em torno de 20°. As amplitudes e fases das componentes de marés diurna e semidiurna observadas na MLT revelam variações ao longo do tempo em pequena e grande escalas. A variabilidade da maré pode ocorrer de forma interanual, anual, intersazonal, sazonal e de curto período. Estudos sobre marés diurnas na região da Mesosfera e Baixa Termosfera (MLT), relacionados com a variabilidade interanual de maré, foram realizados por Burrage *et al.* (1995), Vincent *et al.* (1998), Tsuda *et al.* (1999), e Gurubaran e Rajaram (1999).

Alguns estudos sugerem que as variações interanuais observadas, nas componentes da maré diurna na MLT em baixas latitudes, estão conectadas com a oscilação quase bienal (QBO) dos ventos na Estratosfera equatorial (Vincent *et al.*, 1998). Estudos usando o modelo Global-Scale Wave Model (GSWM), mostraram que a maré diurna na região MLT é afetada pelas variações na componente do vento zonal (Hagan *et al.*, 1999), contudo, os resultados também indicaram que a maré diurna na MLT é insensível a QBO no ozônio estratosférico. Simulações realizadas com o Canadian Middle Atmosphere Model (CMAM) mostraram que a maré diurna, na região MLT, é muito sensível às variações na estrutura horizontal do vento médio zonal e também é afetada pela QBO nestes ventos (McLandress, 2002a,b).

Vincent *et al.* (1998).Gurubaran *et al.* (2005) reportaram correlação entre as variações na maré nos ventos na MLT e a Oscilação Sul-El Niño (OSEN ou ENSO - El Niño-Southern Oscillation), e de acordo com Lieberman *et al.* (2007) a principal causa parece ser, na componente diurna migrante, devido à absorção da radiação solar pelo vapor d'água.

A componente da maré diurna migrante na MLT também apresenta uma variação semi-anual importante em que as amplitudes alcançam valores máximos durante os meses de

outono e de primavera e os mínimos ocorrem nos meses em torno dos solstícios. Esse comportamento tem sido atribuído a variação sazonal dos ventos médios na componente zonal (McLandress, 2002a, b). Interação não linear entre a maré diurna e Ondas Planetárias também foram sugeridas para explicar a variação semi-anual observada na componente diurna da maré (McLandress e Ward 1994).

As variações, em períodos de Ondas Planetárias, observadas nas amplitudes das componentes de Marés Atmosféricas têm recebido atenção nos últimos anos. Estudos teóricos (ex.: Teitelbaum *et al.*, 1989) e experimentais (ex.: Teitelbaum and Vial, 1991; Pancheva *et al.*, 2002) propõem, como explicação para essa variação, a interação não linear entre Marés Atmosféricas e Ondas Planetárias.

### **1.3. A Dinâmica das Marés Atmosféricas em S. J. do Cariri durante o SSW de 2006**

Observações recentes da dinâmica da alta Mesosfera equatorial, a partir de medidas de radar meteorológico em São João do Cariri-PB, mostraram variabilidade interanual incomum nos campos de vento. A ausência de uma explicação para o comportamento apresentado pelas componentes das marés diurna e semidiurna, motivou a investigação de possíveis causas e, dentre as várias alternativas encontradas em estudos publicados, chamou a atenção uma importante característica da Estratosfera polar. Devido à ausência de luz solar na região polar durante a estação de inverno, uma zona fria de baixa pressão é formada sobre o pólo de inverno. Por esta razão, o vento zonal na Estratosfera é caracterizado por sua alta intensidade e o seu padrão é conhecido como vórtice polar noturno. Ocasionalmente, durante algumas estações de inverno do Hemisfério Norte, a configuração da circulação da Estratosfera é rompida e é acompanhada de um Aquecimento Abrupto da Estratosfera (Sudden Stratospheric Warming - SSW), em que a temperatura da Estratosfera polar aumenta rapidamente num período curto de dias, enquanto o escoamento oeste-leste do vórtice estratosférico polar desacelera, chegando a reverter para leste-oeste em ocasiões de aquecimentos extremos (Andrews *et al.*, 1987). Durante os eventos de SSW o escoamento médio zonal enfraquece de forma surpreendente num curto intervalo de tempo. Com este enfraquecimento do escoamento zonal, a circulação estratosférica torna-se extremamente assimétrica e o vórtice estratosférico polar é afastado do pólo. Nos casos mais intensos, as temperaturas podem subir cerca de 50 K, e o escoamento estratosférico circumpolar pode reverter em apenas alguns dias (Limpasuvan *et al.*, 2004).

Como as camadas atmosféricas estão acopladas verticalmente, os eventos de aquecimento Abrupto estratosférico intenso<sup>1</sup> (SSW *major*) afetam a dinâmica da Mesosfera, da Termosfera (Liu e Roble, 2002), e da Ionosfera (Goncharenko e Zhang, 2008). Os impactos causados na Mesosfera e na Ionosfera, em baixas e médias latitudes e na região equatorial, foram observados recentemente através de estudos do acoplamento entre eventos intensos de Aquecimento Abrupto da Estratosfera em altas latitudes do Hemisfério Norte e perturbações detectadas em parâmetros estimados em outras regiões e outras latitudes.

#### 1.4. Variabilidade das amplitudes das Marés Atmosféricas

As características das Marés Atmosféricas com períodos de 1/2 dia e de 1 dia nos ventos horizontais entre 80 e 100 km, observadas sobre São João do Cariri-PB, foram estudadas recentemente (Lima *et al.*, 2007b). De acordo com os resultados deste estudo, as amplitudes das Marés Atmosféricas mostram variabilidade ao longo do tempo. Através de estudos baseados em modelos numéricos e em observações, apontou-se que as amplitudes das marés apresentam variabilidade se estendendo desde a escala de dias até anos (Manson *et al.*, 1989; Tsuda *et al.*, 1989). Variações na amplitude das marés semidiurna, entre 10 e 60 dias, também têm sido observadas, em várias localidades, através de radares meteorológicos (Pancheva *et al.*, 2002).

Vários mecanismos são apontados como causadores de variabilidade nas amplitudes das Marés Atmosféricas, tais como: variações de forçamentos na Troposfera e Estratosfera; efeitos de marés não migrantes; efeitos associados às mudanças no vento médio e na temperatura; mudanças na atividade solar e/ou geomagnética; e efeitos de interação não linear entre Marés Atmosféricas e outras ondas (Ondas Planetárias e Ondas de Gravidade).

#### 1.5. Importância da variabilidade das amplitudes das Marés Atmosféricas

Recentemente observa-se um interesse crescente na região atmosférica em torno da mesopausa. Uma das principais razões para o aumento de estudos focados nesta região da alta atmosfera é que a sociedade tornou-se cada vez mais dependente de tecnologias espaciais a exemplo das comunicações via satélite e dos sistemas de navegação. Sabe-se que as ondas de rádio são distorcidas quando atravessam a Ionosfera. Informações precisas sobre a estrutura

---

<sup>1</sup> Adotou-se as palavras intenso e fraco, respectivamente, como tradução para os termos “major” e “minor”.

da alta atmosfera são importantes para se assegurar, por exemplo, um bom desempenho de sistemas como o Sistema de Posicionamento Global (GPS). Outra razão para a crescente atenção nesta região é a substancial importância do acoplamento entre a mesopausa e as camadas adjacentes. A mesopausa é menos complicada que as regiões adjacentes. Nela há menos efeitos locais que possam afetar medidas realizadas ali e, nesta região, a influência solar é particularmente baixa. Isto pode facilitar a determinação de tendências de causas potenciais presentes nas medidas e, portanto, tornando a região interessante, por exemplo, para investigações de mudanças climáticas.

Nas regiões próximas a mesopausa, as marés produzem efeitos importantes sobre os campos de densidade, temperatura e pressão. Forbes e Vincent (1989) mostraram que a dissipação molecular e turbulenta da maré diurna pode acelerar os ventos, zonal e meridional, na baixa Termosfera.

Embora existam trabalhos publicados sobre o tema, o entendimento da dinâmica da região próxima a mesopausa equatorial e de baixas latitudes do Hemisfério Sul ainda é insuficiente. Portanto, justificando a necessidade de estudos que contribuam para a sua melhor compreensão através da identificação, caracterização e classificação de movimentos periódicos de pequena e de grande escala. A identificação e compreensão dos parâmetros estimados e a compreensão da variabilidade das Marés Atmosféricas, fornecerão informações que permitirão inferir o impacto causado pelo transporte e deposição de momento e energia na região MLT equatorial. Neste contexto, o estudo da variabilidade das amplitudes das Marés Atmosféricas, e suas possíveis causas, têm se constituído numa importante linha de pesquisa na comunidade científica especializada.

Esta pesquisa apresenta-se como uma investigação que aborda aspectos adicionais sobre a questão que envolve a dinâmica das Marés Atmosféricas na região equatorial. Dentro do propósito desta Tese em estudar a variabilidade das amplitudes das marés e, com base na literatura da área, encontrou-se fortes indícios para adotar a hipótese de que dois mecanismos, a saber, são de primeira importância para a variabilidade, em curta duração: (a) Interação não linear entre a maré atmosférica e Ondas Planetárias e (b) Influência do Aquecimento Abrupto Estratosférico nas amplitudes das Marés Atmosféricas e das Ondas Planetárias equatoriais.

O objetivo principal desta pesquisa é investigar a influência em curta duração de Ondas Planetárias na dinâmica das Marés Atmosféricas observadas nos ventos da região da alta Mesosfera e baixa Termosfera equatorial em São João do Cariri-PB (7,5°S; 36,5°O) utilizando dados de ventos mesosféricos horários obtidos através de radar meteorológico, entre os

anos de 2004 a 2008.

No desenvolvimento da pesquisa as seguintes etapas foram realizadas: cálculos dos ventos horários para 07 (sete) camadas atmosféricas; construção das séries temporais dos ventos nas direções zonal e meridional; construção dos espectros dos ventos horários e das amplitudes das Marés Atmosféricas; determinação das amplitudes e fases das Marés Atmosféricas; identificação de possíveis casos de modulação de marés para periodicidades de Ondas Planetárias; análise das possíveis ocorrências de interação não linear entre as marés e outras ondas atmosféricas; investigação de possíveis eventos responsáveis por variações bruscas nas amplitudes das Marés Atmosféricas; comparação dos resultados obtidos experimentalmente com as teorias; busca por modelos teóricos que expliquem a variabilidade da amplitude da maré atmosférica em curto período; comparação com resultados obtidos através de estudos sobre o tema com dados de Cachoeira Paulista - SP (22,7°S; 45°O).

## **2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1. Ondas Atmosféricas**

Uma vez que, acima da camada limite planetária, a atmosfera terrestre pode ser considerada estratificada, a mesma tem a capacidade de comportar e propagar movimentos ondulatórios dentro de amplo espectro (Volland, 1988). Ondas atmosféricas se propagam no espaço e no tempo. Elas surgem quando parcelas do ar são afastadas do seu estado básico de equilíbrio e forças restauradoras, em oposição às perturbações, produzem oscilações locais nas propriedades dos campos atmosféricos. A circulação zonal média é controlada principalmente por ondas atmosféricas que são geradas na baixa atmosfera e se propagam horizontal e verticalmente, sob condições favoráveis, alcançando regiões da alta atmosfera (Beer, 1975; Holton, 2004).

Quanto à natureza da propagação e do deslocamento, as ondas atmosféricas podem ser divididas em três classes: as ondas que se propagam horizontalmente e com deslocamentos verticais denominam-se de ondas verticais transversas; ondas que se propagam horizontalmente com deslocamento horizontal perpendicular à direção de propagação são denominadas de ondas horizontais transversas; e ondas cujo deslocamento está na mesma direção da propagação são ditas ondas longitudinais. De forma geral, o movimento das ondas atmosféricas pode ser pensado como uma combinação desses três tipos de ondas (Beer, 1975).

### **2.2. Marés Atmosféricas**

Ambos, o Sol e a Lua exercem forças externas periódicas sobre a atmosfera da Terra. Diferentemente das marés oceânicas que são geradas principalmente pela força de atração gravitacional da Lua, as ondas de maré atmosférica são produzidas principalmente pelo aquecimento periódico da atmosfera devido à absorção direta da radiação solar. Embora esta absorção represente apenas 20% da energia total recebida pelo planeta, ela é a causa da excitação de ondas internas na atmosfera (Chapman e Lindzen, 1970).

O Sol ao exercer um forte efeito térmico e um efeito gravitacional fraco, fará a atmosfera responder a esses efeitos de forma análoga às oscilações mecânicas forçadas. O aquecimento diário do Sol produz um efeito de maré muitas vezes mais intenso do que o causado pela ação gravitacional. As Marés Atmosféricas são produzidas na atmosfera em

rotação e os períodos são sub-harmônicos de um dia solar ou lunar. A absorção da radiação solar, por unidade de massa e de tempo, é proporcional ao cosseno do ângulo zenital solar durante o dia, e é nula durante a noite. Esta função cosseno truncada tem um período fundamental de 24 horas, e uma análise de Fourier desta função revela uma componente diurna com amplitude de aproximadamente duas vezes maior que a da componente semidiurna. Marés solares migrantes são induzidas, principalmente, pela absorção de radiação no infravermelho próximo pela água e vapor d'água na Troposfera; no ultravioleta pelo ozônio na Estratosfera e baixa Mesosfera; nas bandas e contínuo de Schumann-Runge pelo  $O_2$  e  $N_2$  na baixa Termosfera; e no ultravioleta extremo pelo  $O$  na alta Termosfera (Beer, 1975; Forbes, 1995).

As marés solares migrantes constituem-se no fenômeno dinâmico mais regular e distinto observado na MLT, contribuindo substancialmente para a dinâmica desta região (Vial, 1989; Tsuda *et al.*, 1999). As características básicas de suas componentes, diurna e semidiurna, podem ser descritas pela teoria clássica de marés (Chapman e Lindzen, 1970); porém, para um melhor entendimento quantitativo, torna-se necessário considerar uma atmosfera básica realista, além de uma parametrização apropriada dos forçamentos, considerando-se ainda os efeitos de dissipação e arraste iônico.

Em todas as localizações geográficas, o estado da atmosfera em termos de temperatura, densidade, ventos, pressão, etc., varia com o tempo local. Esta variação com o tempo local pode ser decomposta através da síntese de Fourier em componentes de marés. As amplitudes e fases das marés variam também com a localização. O tempo e longitude são diretamente acoplado numa atmosfera em rotação e, segundo Zhang *et al.*, (2010), a resposta esperada, da atmosfera em termos de maré, ao aquecimento solar pode ser expressa como:

$$\psi_{n,s}(\theta, \lambda, h, t) = \sum_{s=-L}^{s=L} \sum_{n=1}^N A_{n,s}(\theta, h) \cos(n\Omega t + s\lambda - \phi_{n,s}(\theta, h)), \quad (1)$$

com:  $\Omega = \frac{2\pi}{24} (\text{horas})^{-1}$ ,  $t$  é o tempo universal em horas;  $n$  é um inteiro positivo ( $n = 1, 2, 3, \dots$ )

denotando maré diurna, semidiurna, terdiurna e etc., respectivamente;  $s$  é um inteiro que representa o número de onda zonal;  $\lambda$  é a longitude;  $\theta$  é a latitude;  $h$  é a altitude;  $A_{n,s}$  é a amplitude da componente da maré especificada pelos valores de  $n$  e  $s$ , enquanto que  $\phi_{n,s}$  é a fase a qual é definida como o tempo de ocorrência do máximo em longitude zero. Uma expressão alternativa para a componente de maré expressa em tempo local é:

$$\psi_{n,s}(\theta, \lambda, h, t_{LT}) = \sum_{s=-L}^L \sum_{n=1}^N A_{n,s}(\theta, h) \cos(n\Omega t_{LT} + (s-n)\lambda - \phi_{n,s}(\theta, h)), \quad (2)$$

em que  $t_{LT}$  é o tempo local, com  $t_{LT} = t + \frac{\lambda}{\Omega}$ . Esta expressão tem a vantagem de permitir facilmente distinguir matematicamente entre maré migrante e não migrante. Quando  $s = n$ , variações de marés no tempo local não mudam com a longitude, isto é, toda localização no mesmo círculo zonal tem o mesmo estado de maré, assim como a mesma posição relativa (em tempo local) com respeito ao Sol e, este estado, apenas varia com o tempo local. Então  $s = n$  denota marés migrantes, enquanto que  $s \neq n$  denota marés não migrantes (Zhang *et al.*, 2010).

A maré existe numa variedade de escalas, mas, geralmente apenas aquelas oscilações de marés numa escala global são consideradas na teoria de marés. Elas podem se propagar tanto na direção oeste-leste como na direção leste-oeste, ou podem ser estacionárias, porém as componentes mais relevantes são aquelas que se propagam na direção leste-oeste acompanhando o movimento aparente do Sol e chamadas de marés migrantes (Forbes, 1995). As marés migrantes dependem do tempo local, enquanto que as marés não migrantes dependem de ambos, tempo local e longitude. Para a região em que as marés migrantes dominam, elas podem ser determinadas a partir de observações, numa dada latitude, através de uma série temporal numa única longitude. Diferentemente, abaixo de 30 km de altitude, marés diurnas não migrantes são importantes e, assim, as marés migrantes podem ser apenas determinadas de dados em torno de um ciclo de latitude (Lindzen, 1978, 1979). A maré migrante diurna comumente afeta mais fortemente a região MLT equatorial, enquanto que a influência da maré semidiurna é maior para médias latitudes.

Na teoria clássica de marés, as equações de movimentos (conjunto de equações linearizadas para perturbações de maré sobre um estado básico sem fluxo médio e sem gradiente horizontal de temperatura numa atmosfera sem viscosidade e não condutora) podem ser reduzidas a uma única equação para, por exemplo, a altura geopotencial. Esta escolha não é única, outras são possíveis. A equação resultante (escolhendo-se um número zonal e frequência) é separável em suas componentes que dependem da latitude e da altitude. A equação dependente em latitude é a equação de Maré de Laplace, cujas soluções consistem num infinito conjunto de autofunções chamadas de funções Hough (Longuet-Higgins, 1968; Andrews *et al.*, 1987), as quais estão associadas a autovalores ou constantes de separação chamadas de profundidades equivalentes ( $h_e$ ).

A profundidade equivalente determina a natureza da estrutura vertical da oscilação. Valores positivos, menores que certo valor (aproximadamente de 8 km), da profundidade equivalente, implicam na propagação vertical da onda, enquanto que valores grandes ou negativos implicam em ondas aprisionadas verticalmente. A totalidade de todos os campos meteorológicos (velocidade de vento, temperatura, densidade, pressão, etc.) associados com cada função de Hough são similares aos polinômios associados de Legendre de segunda ordem e são numerados de forma semelhante  $\Theta_{2,2}(\theta)$ ,  $\Theta_{2,3}(\theta)$ ,  $\Theta_{2,4}(\theta)$  ..., em que  $\theta$  é a colatitude. A função  $\Theta_{2,2}$  é a mais importante função simétrica semidiurna de Hough;  $\Theta_{2,3}$  é a mais importante função antisimétrica e aumentando-se os índices envolvidos aumenta-se o número de zeros (Lindzen, 1979).

Todas as funções de Hough semidiurnas têm profundidades equivalentes positivas. O Modo (2,2) tem um comprimento de onda vertical quase infinito; o modo (2,3) tem um comprimento de onda vertical em torno de 80 km; já para o modo (2,4) ele encontra-se próximo a 50 km; modos de ordens maiores têm progressivamente comprimentos de onda menores. Para marés migrantes diurnas (número de onda zonal 1), a situação é mais complicada; existem dois distintos conjuntos de funções de Hough: um conjunto com valores relativamente pequenos e positivos de profundidades equivalentes e que são restritos, principalmente, das latitudes de  $30^\circ$  para o equador; e outro conjunto com profundidades equivalentes negativas que são restritos, (excetuando-se modos de mais baixa ordem), principalmente às latitudes de  $30^\circ$  para o pólo. As funções de profundidades equivalentes positivas são:  $\Theta_{1,1}$ ,  $\Theta_{1,2}, \dots$ , iniciando com a função de Hough principal; as funções de profundidades equivalentes negativas são:  $\Theta_{1,-2}$ ,  $\Theta_{1,-3}$ , onde  $\Theta_{1,-2}$  é a principal função simétrica aprisionada. Existe uma função de Hough antisimétrica  $\Theta_{1,-1}$  a qual possui uma profundidade equivalente quase infinita. A função  $\Theta_{1,1}$  é associada com um comprimento de onda vertical em torno de 25 km, enquanto que modos de profundidades equivalentes de ordens mais altas possuem comprimentos de onda progressivamente mais curtos. Os modos relacionados com profundidades equivalentes negativas são aprisionados devido à rotação da Terra. É importante mencionar que as ondas atmosféricas verticalmente propagantes tem suas amplitudes aumentando com a altura de forma proporcional com o inverso da raiz quadrada da pressão básica não perturbada. Isto demonstra, em parte, a importância das marés na alta atmosfera (Lindzen, 1979).

Em 1882, Kelvin levantou uma importante questão observada: “*Como explicar o*

porquê de a amplitude da oscilação da superfície de pressão semidiurna ser maior e mais regular que a da diurna?”. A resposta é obtida ao se considerar o comportamento da média e baixa atmosfera, em relação ao aquecimento diurno e semidiurno, como um todo. Acontece que as oscilações de marés forçadas semidiurnas apresentam um comprimento de onda vertical muito grande. Isto permite que elas sejam eficientemente excitadas pelo aquecimento profundo na região do ozônio que se encontra presente na estratopausa, assim, elas podem facilmente propagar-se para baixo e para cima da superfície de flutuação de pressão. Elas são regulares por que o aquecimento devido ao ozônio é regular e sua estrutura latitudinal é razoavelmente uniforme (Andrews *et al.*, 1987).

Por outro lado, a maré diurna apresenta um comportamento mais complexo. Entre 30°N e 30°S ela pode se propagar verticalmente com um comprimento de onda bem menor que o da semidiurna. Entre 30° e os pólos, elas são aprisionadas verticalmente na região próxima ao forçamento. Como um resultado, os modos forçados pelo aquecimento profundo do ozônio e verticalmente propagantes tendem a interferir destrutivamente e, portanto, apresentam pequenas amplitudes em Terra, enquanto que os modos aprisionados verticalmente nunca atingem a Terra completamente (Andrews *et al.*, 1987).

De forma geral, para a maré diurna, observa-se que as respostas aos forçamentos térmicos no Infra-Vermelho (IR) e no Ultra-Violeta (UV) estão fora de fase e, portanto, isto provoca a redução da amplitude da perturbação em virtude de interferência destrutiva entre as respostas. As interações com Ondas de Gravidade na Mesosfera também reduzem a amplitude da maré diurna na baixa Termosfera. A componente de maré diurna apresenta suas maiores amplitudes nos meses em torno dos equinócios e os picos de amplitudes ocorrem em médias e baixas latitudes. O comprimento de onda vertical deste modo de maré encontra-se próximo a 25 km.

Como característica, o modo de maré semidiurna apresenta amplitudes de perturbação menores que a da maré diurna na região da Mesosfera. O comprimento de onda vertical deste modo é maior que o da maré diurna. Já os maiores picos de amplitude ocorrem em médias e altas latitudes e deslocam-se com as estações, as mais altas amplitudes ocorrem na baixa Termosfera e o comprimento de onda vertical encontra-se em torno de 50 km.

Assim como as marés migrantes, as Marés Atmosféricas não migrantes são ondas de escala global cujos períodos também são sub-harmônicos de um dia solar. Entretanto, estas ondas não se propagam na direção leste-oeste seguindo o movimento aparente do Sol. As marés não migrantes podem se propagar tanto na direção leste-oeste como oeste-leste, ou

podem ser oscilações estacionárias para qualquer número de onda zonal diferente daqueles das marés migrantes (Chapman e Lindzen, 1970). Um importante mecanismo de geração das marés não migrantes é a liberação de calor latente associado com atividade convectiva na região troposférica tropical (Hagan e Forbes, 2002).

A dissipação das Marés Atmosféricas ocorre em toda a atmosfera, podendo ser atribuída a diversos fatores tais como o arraste iônico, viscosidade molecular e turbulenta, e amortecimento radiativo ou resfriamento newtoniano (Hagan *et al.*, 1996).

### 2.3. Variabilidade da Amplitude da Maré

A amplitude da maré diurna na MLT exhibe variações na escala de tempo que vão desde dias até anos (Fritts and Isler, 1994; Burrage *et al.*, 1995; Eckermann *et al.*, 1997; Nakamura *et al.*, 1997; Pancheva *et al.*, 2002). As causas possíveis não têm sido completamente explicadas, entretanto elas encontram-se dentro de duas grandes categorias: (1) variabilidade de forçamentos de maré na Troposfera e Estratosfera, e (2) modulação da amplitude devido à interação: com o fluxo médio (Forbes and Vincent, 1989; Hagan *et al.*, 1999; McLandress, 2002b), com Ondas Planetárias (Manson *et al.*, 1982; Teitelbaum and Vial, 1991; Palo *et al.*, 1999; Pancheva *et al.*, 2002; Lieberman *et al.*, 2007; Liu *et al.*, 2007) e com ondas de gravidade (Walterscheid, 1981; Fritts and Vincent, 1987; McLandress and Ward, 1994; Nakamura *et al.*, 1997; Meyer, 1999; McLandress, 2002a; Liu *et al.*, 2007).

Dentre os muitos estudos associados com a variabilidade da maré, destacam-se o estudo sobre as mudanças no vento zonal médio ou na estrutura da temperatura por onde a maré se propaga (Lindzen e Hong, 1974); estudo sobre mudanças na distribuição global do Ozônio e Vapor d'água (Bernard, 1981); sobre a liberação de calor latente na tropopausa (Hagan, 1996; Hagan *et al.*, 1997); variação na difusividade turbulenta ou na dissipação (Geller *et al.*, 1997); efeitos geomagnéticos sobre a maré atmosférica na MLT (Singer *et al.*, 1994); interação não linear entre maré diurna e maré semidiurna (Teitelbaum *et al.*, 1989); interação não linear entre a maré diurna e ondas de gravidade (Mayr *et al.*, 1998; Forbes *et al.*, 1991; Talaat *et al.*, 2001); interação não linear entre a maré diurna e Ondas Planetárias (Spizzichino, 1969a,b; Teitelbaum e Vial, 1991; Beard *et al.*, 1999; Pancheva, 2002); e a influência do Aquecimento Abrupto da Estratosfera (Lima *et al.*, 2011).

Recentemente, Tokumoto (2007) utilizou seis anos de dados coletados pelo radar meteorológico SKiYMET, na região de 80-100 Km de altitude sobre Cachoeira Paulista-SP

(22,7°S; 45°O), para estudar a variabilidade sazonal e a variabilidade dia-a-dia da maré diurna. Neste trabalho, ele concluiu que as interações não-lineares entre a maré diurna e a semidiurna, quando ocorrem, produzem duas ondas secundárias: uma maré diurna e uma maré terdiurna. Esta última aparece muito fraca, porém, mostra uma distribuição sazonal nas amplitudes características, com picos próximos aos equinócios, tal qual a maré diurna, indicando que pode haver um reforço na amplitude da maré diurna primária pela maré diurna secundária presente na interação não linear. Em suas análises ele verificou que há indícios maiores da interação não linear, entre as componentes de marés, na camada centrada em 85km e este mecanismo deve colaborar para a variabilidade dia-a-dia observada particularmente nos meses de abril, setembro e dezembro dos anos analisados.

Em relação às Ondas Planetárias, Tokumoto (2007) concluiu que, levando-se em conta o tipo de componente zonal ou meridional, a onda de quase dois dias (QTDW) é um elemento dominante na componente meridional do vento no verão, época em que a amplitude da maré diurna diminui. Este tipo de comportamento é típico de interação não linear desta onda planetária com a maré. Ele concluiu também, através da análise espectral, que os casos de interação não linear entre estas ondas são raros e foram encontrados apenas em dois anos 2000 e 2003, na camada em 95 km. Assim, ele discute que a interação não linear entre onda de quase dois dias e a maré diurna não é um mecanismo importante para variabilidade da maré. Concluiu, também, que não existe predomínio da QTDW na componente zonal do vento e, em seu lugar, aparecem ondas de períodos mais longos como a de quase dez dias. Esta onda, embora fraca, é um elemento bem regular no inverno, aparecendo em praticamente todos os anos em junho e, quando aparece, interage não linearmente com a maré diurna, afirma o autor.

#### **2.4. Ondas Planetárias (PW)**

As ondas de escala planetária são de grande estrutura horizontal, da ordem do diâmetro terrestre, com períodos maiores do que um dia. A variação do efeito da força de Coriolis com a latitude age sobre a atmosfera como uma força externa, tendo como resultado ondas horizontalmente transversais com comprimentos de onda horizontais de milhares de quilômetros.

Processos convectivos, interações não lineares entre Marés Atmosféricas e ondas de gravidade ou modos diferentes de ondas de marés, variações isoladas na topografia, e

aquecimento diferencial entre continentes e oceanos têm sido apontadas como fontes geradoras das Ondas Planetárias (Beer, 1974). As ondas equatoriais de escala planetária são geradas principalmente por mecanismos que envolvem sistemas convectivos de nuvens na Troposfera Tropical (Holton, 1972; Horinouchi e Yoden, 1997). As ondas de Rossby devem sua existência à conservação da vorticidade absoluta, decorrente da variação do parâmetro de Coriolis com a latitude. O exemplo mais simples de uma onda de Rossby ocorre numa atmosfera barotrópica, ou seja, numa atmosfera em que a temperatura potencial é constante em cada superfície de pressão.

#### 2.4.1. Onda de Quase Dois Dias (QTDW)

A onda de quase dois dias (QTDW), referida como onda de 2 dias, é uma oscilação de escala global na média atmosfera (na região entre 50 e 100 km de altura) observada em ambos os hemisférios. Contudo, o mecanismo de geração e seu papel na média atmosfera exigem ainda melhores estudos. Muitas observações de radar mostram que as QTDW, em médias latitudes, apresentam uma grande amplitude na componente meridional comparada com as amplitudes na componente zonal. Em geral a amplitude da componente meridional é de 2 a 3 vezes maior do que a amplitude da componente zonal. As amplitudes máximas são atingidas em altitudes entre 80 e 95 km (Thayaparan *et al.*, 1997; Waltersheid & Vincent, 1996).

Esta oscilação de escala global é identificada como sendo uma característica sempre presente no verão da alta Estratosfera e da Mesosfera. Ela tem sido observada através de radares em Terra em estudos dos ventos mesosféricos. Observações simultâneas feitas em mais de uma latitude mostraram que a onda se desloca para oeste e possui número de onda zonal 3 e períodos próximos de 2,1 dias. As observações também mostraram que ela é fortemente assimétrica, sendo confinada principalmente no hemisfério de verão e atingindo sua máxima amplitude após o solstício de verão, em torno de julho/agosto no hemisfério Norte e em janeiro/fevereiro no hemisfério Sul (Salby, 1981; Plumb *et al.*, 1987). No equador as QTDW são observadas na maior parte do ano, entretanto as amplitudes máximas são observadas após o solstício de verão e podem ser bastante elevadas (cerca de  $50\text{ms}^{-1}$ ) e existem, ainda, evidências de comportamento com interação não linear ressonante revelado pelo surgimento simultâneo de oscilações com períodos de 16 h e 9,6h. Estas oscilações são ambas produzidas por interação com a maré solar ou são harmônicos superiores da própria onda (Waltersheid & Vincent, 1996).

Apesar das semelhanças no tempo de surgimento destas ondas, existem importantes diferenças nas propriedades entre as ondas do hemisfério Norte em relação ao hemisfério Sul. No hemisfério Norte, as ondas têm períodos de 50 horas ou mais, o crescimento é mais gradual e a onda persiste com a amplitude máxima por cerca de 1 a 2 meses. Em contraste, no hemisfério Sul, a onda de janeiro/fevereiro é um evento tipo pulso, com crescimento rápido e o período próximo de 48 horas com fortes evidências de que sua fase é travada (Locked Phase), isto significa que uma dada fase da onda ocorre no mesmo tempo local para vários ciclos. A mesma fase da onda repete-se de ano para ano (Waltersheid & Vincent, 1996).

#### **2.4.2. Onda de Seis Dias e Meio (Onda de 6,5 Dias)**

Ondas Planetárias propagando-se para oeste com número de onda zonal 1 ( $s = 1$ ) e períodos entre 5 e 7 dias foram observadas em algumas variáveis atmosféricas e em diferentes alturas (Rosenlof and Thomas, 1990; Randel, 1993, Talaat *et al.*, 2001). A onda de 6,5 dias na região MLT tem sido identificada através de observações em Terra e por satélite (Andrews *et al.*, 1987; Wu *et al.*, 1994; Talaat *et al.*, 2001, 2002; Clarck *et al.*, 2002; Lieberman *et al.*, 2003; Kishore *et al.*, 2004). Pesquisas com dados de ventos horizontais, medidos por radares na região da Mesopausa, detectaram oscilações cujos períodos encontram-se na faixa entre 4 e 8 dias e, estas oscilações, foram sugeridas como sendo ondas de 6,5 dias (Salby e Roper, 1980; Masseur *et al.*, 1981; Manson *et al.*, 1982; Vincent 1984). Talaat *et al.* (2001) detectaram a onda de 6,5 dias nos ventos horizontais, na temperatura e no oxigênio atômico. Observações realizadas via radar MF em Pontimak (0°N, 109°O) e Christmas Island (2°N, 157°O) também revelaram a presença da oscilação de 6,5 dias (Kovalam *et al.*, 1999).

Estudando a diferença de fase entre duas localidades verificou-se que a oscilação de 6,5 dias se propaga para oeste (Kishore *et al.*, 2004). Estas oscilações geralmente ocorrem antes e depois dos equinócios, mas, também podem aparecer de forma esporádica nos meses de inverno (Lima *et al.*, 2005). A onda de 6,5 dias apresenta-se intensa na componente zonal do vento e pode ser observada continuamente entre as altitudes 85-95 km (Kishore *et al.*, 2004).

Nos ventos mesosféricos a oscilação de 6,5 dias exibe uma estrutura latitudinal semelhante ao modo de Rossby (1, -2) referida como a onda de 5 dias (Madden e Julian, 1972). A teoria de ondas atmosféricas indica a existência de uma oscilação livre que apresenta número de onda zonal 1 e período de aproximadamente 5 dias (Longuet-Higgins, 1967). Esta

onda é o mais importante modo simétrico meridional e é conhecido como a onda de 5 dias.

A oscilação de 6,5 dias apresenta variabilidade anual e as amplificações mais intensas ocorrem na época em que a fase da QBO é para oeste (Kishore *et al.*, 2004; Lima *et al.*, 2005;). Usando dados de radar meteorológico, em regiões de baixa latitude do hemisfério sul, Lima *et al.* (2005) mostraram que a onda de 6,5 dias é um fenômeno comum durante as primaveras e os outonos, mas se apresenta mais intensa na primavera nesta região. As amplitudes máximas observadas apresentam valores de cerca de 20 m/s acima de 90 km de altitude e comprimento de onda vertical de até 100 km.

### 2.4.3. Onda de Dezesseis Dias (Onda de 16 Dias)

A oscilação atmosférica cujo período está entre 12-20 dias é referida como a onda de 16 dias. Esta oscilação se propaga para oeste com número de onda zonal 1 ( $s = 1$ ), e tem sido identificada como o segundo modo simétrico de Rossby (1, -4). Espy *et al.* (1997) identificaram a assinatura da onda de 16 dias na temperatura mesosférica em Stockholm (60°N) durante os verões de 1992 e 1994. Jacobi *et al.* (1998) investigaram oscilações, nos ventos no verão da mesopausa em Collm (52°N), cujos períodos estão entre 12-25 dias. As variabilidades interanuais destas oscilações mostraram uma dependência da QBO equatorial.

Mitchell *et al.* (1999) através da análise de quase 5 anos de dados de ventos meteorológicos, obtidos em Sheffield (53°N, 2°O), mostraram um ciclo sazonal da onda de 16 dias e as maiores amplitudes foram observadas entre janeiro e meados de abril e um segundo máximo menos intenso ocorreu do final de junho para o início de julho. Usando dados de ventos obtidos via radar MF sobre Saskatoon (52°N, 107°O), Luo *et al.* (2000) investigaram a climatologia e a variação interanual da onda de 16 dias.

Usando dados de radar nas regiões da Troposfera-Estratosfera e Mesosfera, obtidos durante 1984, Williams e Avery (1992) mediram oscilações com períodos entre 12 e 19 dias em Poker Flat (65°N, 147°O). Eles encontraram que a onda de 16 dias apresentou amplitude máxima na Estratosfera no período de inverno e, este resultado, está de acordo com previsões teóricas, entretanto, este máximo foi em torno de 85 km no verão. Para explicar a presença desta oscilação na região MLT, durante a estação de verão, sugeriram-se dois mecanismos: (i) a onda de 16 dias é canalizada através do equador no hemisfério de inverno; (ii) a onda de 16 dias presente na Mesosfera é o resultado da deposição de momento nesta mesma região por ondas de gravidade que se propagam para cima depois de modulada por uma onda de 16 dias

na região troposférica (Luo *et al.*, 2002a,b).

Forbes *et al.* (1995) analisaram os ventos na região da Mesopausa e uma oscilação de 16 dias, amplitude da ordem de 10 m/s e número de onda zonal 1, foi observada quando fortes oscilações deste tipo também foram observadas na região da Troposfera e da Estratosfera. Simulações numéricas realizadas por Forbes *et al.* (1995), confirmaram a interpretação de que onda de 16 dias na MLT é resultante da propagação para cima desta oscilação que surge nas camadas mais baixas. Estas simulações sugerem a ocorrência de algum vazamento desta onda através do equador para a região da Mesopausa. Miyoshi (1999) usando um modelo de circulação geral para examinar o comportamento da onda de 16 dias na região MLT encontrou que a penetração inter-hemisférica da onda ocorre próximo à região da Mesopausa.

Lima *et al.* (2006), usando dados de radar meteorológico em Cachoeira Paulista (22,7°S), entre abril de 1999 e abril de 2004, encontraram a presença da oscilação de 16 dias no vento zonal. Os resultados obtidos por eles revelaram que a onda de 16 dias apresenta variabilidade interanual, mas não exibe um claro comportamento sazonal.

### 3 - INTERAÇÃO NÃO LINEAR ENTRE ONDAS ATMOSFÉRICAS

#### 3.1. Ondas Lineares e o Método da Perturbação

Um sistema de equações é denominado de sistema linear quando nele não existem produtos entre as variáveis dependentes, por outro lado, num conjunto de equações não lineares estes produtos estão presentes. A equação de momentum para a atmosfera é uma equação não linear, pois, o termo de advecção  $(\vec{U} \cdot \nabla)$  produz termos cruzados entre as variáveis dependentes.

Equações não lineares suportam ondas não lineares, as quais apresentam comportamentos bastante diferentes daqueles exibidos pelas ondas lineares. Uma primeira diferença que se apresenta é que ondas lineares não interagem entre si e, portanto, não trocam energia. Se duas ondas lineares passam uma através da outra, qualquer interferência que ocorra entre elas é estritamente linear e, em algum ponto, o efeito dessa interferência é a soma dos efeitos das duas ondas e, logo após acontecer à interferência, as ondas voltam a ser como eram antes. As ondas não lineares interagem e podem trocar energia, além disso, elas são muito mais complexas. As equações governando a dinâmica da atmosfera são altamente não lineares e, conseqüentemente, as ondas atmosféricas resultantes dessas soluções são também não lineares.

Para encontrar uma forma matemática simplificada de estudar as propriedades das ondas atmosféricas, pode-se recorrer ao processo de linearização das equações de momentum e então se estuda as ondas lineares suportadas por esse conjunto de equações. Estudando essas ondas, é possível encontrar propriedades, informações e a relevância delas para a atmosfera.

Para linearizar as equações usa-se o método da Perturbação. Ele consiste em duas partes: inicialmente o estado básico é assumido ser constante ou apenas dependente das coordenadas espaciais e; na segunda parte, as perturbações das grandezas são variáveis com o tempo e em todas as coordenadas espaciais, por exemplo:

$$\begin{cases} u(x, y, z, t) = \bar{u} + u'(x, y, z, t), \\ v(x, y, z, t) = \bar{v} + v'(x, y, z, t), \\ w(x, y, z, t) = \bar{w} + w'(x, y, z, t), \\ p(x, y, z, t) = \bar{p} + p'(x, y, z, t), \\ \rho(x, y, z, t) = \bar{\rho} + \rho'(x, y, z, t), \end{cases} \quad (3)$$

em que as grandezas com barra são os valores do estado básico e as grandezas perturbadas são aquelas que apresentam apóstrofos. Finalmente, considera-se, para aplicar o método da perturbação, que as grandezas perturbadas são muito pequenas em magnitude, quando comparadas com o estado básico, de modo que os produtos cruzados entre elas podem ser negligenciados. Com estas considerações, as grandezas são substituídas nas equações dinâmicas que, após as simplificações, chega-se a um conjunto de equações linearizadas.

Considerando-se a estratégia de simplificação do problema; assumindo-se que a estrutura horizontal, dos vários modos das ondas atmosféricas, pode ser resolvida através da teoria de oscilações livres dentro do contexto de águas rasas; e que essas ondas podem ser tratadas como pequenas variações em torno de um estado básico, então, é possível resolvê-las através de equações lineares.

Inicialmente, linearizam-se as equações de momentum e da continuidade para um sistema fluídico de profundidade equivalente  $h_e$  num estado básico sem movimento. Dessa forma, o sistema de equações que descreve o movimento possui apenas termos perturbados até 1ª ordem, isto é, consideram-se pequenas perturbações sobrepostas aos campos atmosféricos em estudo. Outra aproximação ocorre partindo-se do pressuposto de que a região de interesse para este estudo encontra-se entre os trópicos e, assim, a geometria cartesiana sobre um plano  $\beta$  equatorial pode ser utilizada. Nesta aproximação, os termos proporcionais ao  $\cos\phi$  são substituídos pela unidade e os termos proporcionais ao  $\sin\phi$  são substituídos por  $\frac{y}{a}$ . Sendo  $y$  a distância de um círculo de latitude ao equador e  $a$  o raio da Terra (Matsuno, 1966). O parâmetro de Coriolis neste contexto é aproximadamente dado por:

$$f = f_0 + \beta y, \quad (4)$$

com  $\beta = 2\Omega/a$ , e  $\Omega$  é a velocidade angular da Terra.

Após essas considerações tem-se que as equações linearizadas resultantes para perturbações sobre um estado básico sem movimento podem ser escritas como:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u'}{\partial t} - \beta y v' &= -\frac{\partial \Phi'}{\partial x}, \\ \frac{\partial v'}{\partial t} + \beta y u' &= -\frac{\partial \Phi'}{\partial y}, \\ \frac{\partial \Phi'}{\partial t} + g h_e \left( \frac{\partial u'}{\partial x} + \frac{\partial v'}{\partial y} \right) &= 0, \end{aligned} \quad (5)$$

As duas primeiras equações em (5) descrevem o movimento e a terceira é a equação da continuidade. Sendo que  $\Phi' = gh'$  é a flutuação do geopotencial e as variáveis com apóstrofos representam perturbações nos campos. A partir das equações linearizadas para as ondas atmosféricas, é possível obter soluções simples e tratáveis matematicamente.

Entretanto, mesmo desprezando-se os processos de perdas não lineares, as ondas podem interferir umas com as outras através de termos não lineares de advecção nas equações de movimento. Esse acoplamento não linear faz surgir um novo tipo de onda com frequências misturadas. Tais interferências não podem mais ser descritas através das aproximações por equações lineares e torna-se necessário tratá-las através da teoria da não linearidade.

Não linearidade num sistema de ondas pode surgir através de uma quantidade variada de formas. Ela pode ser devido à presença de fontes ou de fortes efeitos de processos dissipativos, ela pode também surgir devido à própria amplitude da onda demasiadamente grande ou através da interação entre duas ondas.

Uma propriedade fundamental de oscilações lineares é que a frequência da oscilação  $\nu$  depende apenas das características físicas do oscilador e não do movimento em si. Para ondas propagantes, entretanto,  $\nu$ , geralmente depende do número de onda  $k$  e das propriedades físicas do meio. Então, como  $c = \frac{\nu}{k}$ , a velocidade de fase da onda depende do número de onda, exceto quando  $\nu \propto k$ . Para ondas na qual a velocidade de fase  $c$  varia com  $k$ , as várias componentes senoidais da perturbação originadas num mesmo local estarão, num tempo futuro, em diferentes localizações e serão dispersadas. Para estas ondas dispersivas, a forma do grupo de ondas não permanece constante quando o grupo se propaga. Isto porque cada componente de frequência do grupo propaga-se com velocidade diferente e, então, elas interferem cancelando-se ou reforçando-se dependendo da fase relativa entre as componentes e, com o passar do tempo, o grupo se estende e a energia do grupo se dispersa (Holton, 2004).

Historicamente, o estudo de ondas dispersivas não lineares começou com o trabalho pioneiro de Stokes (Debnath, 1984) sobre ondas na água. Stokes inicialmente evidenciou que a existência de trens de ondas é possível em sistemas de ondas dispersivos não lineares. Ele também determinou que a relação de dispersão envolve a amplitude da onda. A dependência da relação de dispersão com a amplitude produz mudanças qualitativas significantes no comportamento de ondas não lineares. Durante o século XX, foi realizado um grande esforço no desenvolvimento da teoria de movimentos ondulatórios linearizados em fluídos e de

estabilidade hidrodinâmica. Com base no trabalho de Stokes têm-se desenvolvimentos gerais sobre ondas dispersivas não lineares e, em particular, sobre ondas não lineares na água e nos fenômenos de instabilidade não linear (Debnath, 1984).

A teoria que trata de ondas não lineares na água e das ondas solitárias (sólitons) avançou bastante e muitos fenômenos diferentes e inesperados são observados em sistemas físicos, químicos e biológicos. Atualmente têm-se novas soluções para ondas moduladas em ambos, espaço e tempo, os quais exibem novos fenômenos tão diversos quanto os sólitons; interações ressonantes; instabilidades de faixa lateral; e quebra de ondas. A descoberta de interações com sólitons e o método da Transformada Inversa de Espalhamento (IST) para encontrar a solução exata explícita, para várias equações diferenciais parciais canônicas não lineares, também se constituem em outros avanços da teoria. O estudo das ondas dispersivas não lineares tem provocado mudanças e se tornado uma fonte de inspiração para muitos novos desenvolvimentos teóricos, computacionais e experimentais (Debnath, 1984).

## 3.2. Considerações sobre a Interação Não Linear entre Ondas Atmosféricas

### 3.2.1. Interação Ressonante

Para ocorrer interação não linear ressonante onda-onda, certas condições ressonância devem ser satisfeitas. Por exemplo, se as ondas interagem como um trio de ondas ressonantes com frequências  $\omega_1, \omega_2$  e  $\omega_3$  e com seus correspondentes vetores de ondas complexos  $\overset{\frown}{k}_1, \overset{\frown}{k}_2$  e  $\overset{\frown}{k}_3$ , as condições ressonantes são (Beer, 1975):

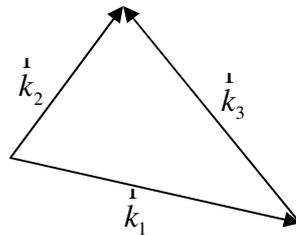
$$\omega_1 + \omega_2 + \omega_3 = 0, \quad (6)$$

$$\overset{\frown}{k}_1 + \overset{\frown}{k}_2 + \overset{\frown}{k}_3 = 0, \quad (7)$$

Desde que os valores de  $\omega$  e  $\overset{\frown}{k}$  podem ser positivos ou negativos, o terceiro membro do trio ressonante pode ter dois valores. Se  $\omega_1, \omega_2, \overset{\frown}{k}_1$  e  $\overset{\frown}{k}_2$  são conhecidos, ainda que a escolha dos valores sejam restritos devido à relação de dispersão entre  $\omega$  e  $\overset{\frown}{k}$ , obtém-se então:

$$\begin{aligned} \omega_3 &= \omega_1 \pm \omega_2, \\ \vec{k}_3 &= \vec{k}_1 \pm \vec{k}_2, \end{aligned} \quad (8)$$

Se duas ondas evanescentes, cujas magnitudes dos números de ondas são quase iguais, interagem e sendo a diferença de frequências  $\omega_1 - \omega_2$  arbitrariamente pequena, enquanto que a diferença de número de ondas é comparável em magnitude com  $\vec{k}_1$  ou  $\vec{k}_2$ , mesmo que as magnitudes de  $\vec{k}_1$  ou  $\vec{k}_2$  sejam muito próximas, suas direções necessariamente não são. Então, as condições de ressonância (8) podem ser representadas através de um diagrama vetorial, do tipo triângulo fechado, como o mostrado na Figura 01.



**Figura 01** - Diagrama vetorial de números de onda horizontal para um trio de frequências ressonantes.

Variando-se a amplitude de  $\vec{k}_2$  em torno de  $\vec{k}_1$  é possível se obter um modo de onda interna  $(\vec{k}_3, \omega_3)$ . Isto pode ser uma possível fonte do mecanismo para ondas internas, desde que a onda  $(\vec{k}_3, \omega_3)$  lentamente extraia energia das ondas evanescentes para as quais ela está acoplada. Este mecanismo é importante no oceano e é possível que ondas internas possam ser extraídas das principais ondas atmosféricas evanescentes, isto é, modos de Marés Atmosféricas, ondas de Lamb e ondas de superfícies. Como existem muitos outros mecanismos importantes como fontes para ondas internas, a interação ressonante é mais ligada à ocorrência de dois modos internos para produzir um terceiro modo de onda evanescente (Beer, 1975).

A interação não linear pode surgir não apenas pela soma e diferença de frequências, mas, adicionalmente, pela relação de fases conhecida como acoplamento quadrático de fase. Considerando-se um sinal  $X(t)$  consistindo de duas ondas cossenoidais na forma:

$$X(t) = A_1 \cos(\omega_1 t + \phi_1) + A_2 \cos(\omega_2 t + \phi_2), \quad (9)$$

em que:  $A_i$ ,  $\omega_i$ ,  $\phi_i$  representando a amplitude, a frequência angular e a fase da  $i$ -ésima

componente. Considerando-se que este sinal passa através de um sistema não linear, por exemplo, cuja resposta é da forma:

$$Y(t) = X(t) + \alpha X^2(t), \quad (10)$$

em que  $\alpha$  é uma constante. Então:

$$Y(t) = A_1 \cos(\omega_1 t + \phi_1) + A_2 \cos(\omega_2 t + \phi_2) + \alpha [A_1 \cos(\omega_1 t + \phi_1) + A_2 \cos(\omega_2 t + \phi_2)]^2,$$

desenvolvendo-se a expressão e fazendo-se o agrupamento, obtém-se:

$$\begin{aligned} Y(t) = & A_1 \cos(\omega_1 t + \phi_1) + A_2 \cos(\omega_2 t + \phi_2) + 0,5\alpha \{ A_1^2 [1 + \cos 2(\omega_1 t + \phi_1)] \\ & + A_2^2 [1 + \cos 2(\omega_2 t + \phi_2)] + 2A_1 A_2 \cos [(\omega_1 + \omega_2)t + (\phi_1 + \phi_2)] \\ & + \cos [(\omega_1 - \omega_2)t + (\phi_1 - \phi_2)] \} \end{aligned}, \quad (11)$$

O sinal de saída  $Y(t)$  possui termos cossenoidais em  $(\omega_1, \phi_1)$ ,  $(\omega_2, \phi_2)$ ,  $(2\omega_1, 2\phi_1)$ ,  $(2\omega_2, 2\phi_2)$ ,  $[(\omega_1 + \omega_2), (\phi_1 + \phi_2)]$ ,  $[(\omega_1 - \omega_2), (\phi_1 - \phi_2)]$ . Um sistema que possui relações de fases que são da mesma forma que as relações de frequências é considerado exibir acoplamento em quadratura de fase. Embora a presença de soma e de diferença de frequências num periodograma seja um forte indício de interação não linear entre ondas, é possível que ela ocorra casualmente através de ondas excitadas espontaneamente por ondas independentes. A detecção de acoplamento quadrático de fases entre as ondas primárias e secundárias se constitui numa condição necessária e em forte evidência de interação não linear onda-onda (Beard *et al.*, 1999, 2001).

### 3.2.2. Interação não linear Onda-Maré

Existem diferenças importantes entre a interação não linear entre duas ondas diferentes e efeitos não lineares de uma mesma onda. Isto é uma característica de ondas quase transversais, como é o caso para as marés e ondas de gravidade de baixas frequências, para as quais os termos advectivos tornam-se significativos apenas para grandes amplitudes. Por outro lado, a interação de duas ondas de diferentes períodos e número de ondas pode ser muito forte mesmo para amplitudes moderadas. Isto porque a importância da não linearidade depende essencialmente da amplitude da velocidade induzida no fluído, na direção da propagação, comparada com a velocidade de propagação da onda. Para ondas transversais, a velocidade do fluído e a velocidade de propagação da onda formam um ângulo reto. Quando duas ondas se propagam simultaneamente, a velocidade do fluído pode ter uma forte

componente na direção de propagação de uma das ondas e, então, os termos advectivos, os quais são os forçamentos das ondas secundárias, podem ser fortes (Teitelbaum e Vial, 1991).

Spizzichino (1969) através de investigações sobre interações ressonantes não lineares apontou que muitas ondas de gravidade observadas em alturas meteóricas surgem da interação entre a maré diurna e as ondas de gravidade aprisionadas abaixo da mesopausa. Outra conclusão foi que o vento predominante produz uma circulação meridional adicional através da interação não linear com as oscilações atmosféricas e que a interação entre os modos de marés  $S_1$  e  $S_2$  produz uma maré diurna propagando-se para baixo.

A análise de muitos dados observacionais, obtidos próximo a mesopausa usando radar, mostrou que as componentes da maré têm uma amplitude modulada com períodos de poucos dias (Teitelbaum e Vial, 1991). Estes pesquisadores mostraram que a interação não linear da maré atmosférica com Ondas Planetárias pode modular a amplitude da maré com períodos igual ao da onda planetária. Eles mostraram também que, em algumas situações, as características dos casos analisados encontram-se no estudo teórico da interação não linear. Neste contexto, notaram que o mecanismo de interação não linear pode se constituir numa satisfatória explanação para a existência de diversas ondas bem conhecidas com períodos próximos ao da maré e que ainda não são bem entendidas do ponto de vista teórico. Nesta direção, um caso bastante particular é a onda de aproximadamente 16 horas que é observada a partir das medidas de ventos obtidas em vários sites (Teitelbaum e Vial, 1991). Eles sugeriram que no caso da onda de aproximadamente dezesseis horas (~16 horas), novos estudos experimentais e desenvolvimentos teóricos fossem realizados.

Pancheva (1999), pesquisando sobre o acoplamento de Ondas Planetárias e a maré atmosférica mostrou que, através do estudo do espectro dinâmico da amplitude da maré, as marés, diurna e semidiurna, apresentam modulação de amplitude por Ondas Planetárias no vento básico. Usando análise biespectral, Pancheva (1999) mostrou que a interação não linear entre a maré semidiurna e Ondas Planetárias é mais forte que entre essas ondas e a maré diurna e, ainda, que a maré diurna meridional apresenta maior atividade de interação não linear que a componente de maré diurna zonal. Foi encontrado também que uma característica muito forte da região estudada (MLT na Bulgária) é que ela apresenta a forte presença de oscilações com períodos entre ~20 e ~30 horas.

Numa pesquisa realizada sobre a interação da Maré Atmosférica e a Onda de Quase Dois Dias (QTDW), Salby e Callahan (2008) usaram um modelo tridimensional da média e

alta atmosfera para estudar a interação não linear entre estas ondas. Eles encontraram que a maré solar influencia a amplificação da QTDW e que para pequenas amplitudes dessa onda, a modulação da maré é linear e, desta forma, largamente reversível. Para QTDW, de grandes amplitudes, a interação é não linear e irreversível e esse comportamento não linear resulta numa variância em cascata para pequena escala. Outro resultado encontrado é que em altitudes onde a amplitude da maré é intensa, a propagação regular é interrompida, substituída por um comportamento de banda larga associado com a geração de não linearidade através de mistura turbulenta e o mesmo processo influencia a maré solar.

Num estudo realizado sobre a QTDW e a variabilidade da maré em Ascension Island, Pancheva (2006) observou que quando a fase desta onda era relativamente estável, o período era diferente de 48 horas e quando a amplitude não era muito forte a amplitude da maré era modulada. Segundo Pancheva (2006), essa modulação indica que pode existir um acoplamento entre a maré diurna e a QTDW. O estudo através de análise biespectral mostra evidências de uma relação de frequência/fase entre as ondas primárias (QTDW e maré) e ondas secundárias. Através dos dados observacionais, ela encontrou que picos espectrais de ondas secundárias (períodos de 9,6 horas e 16,5 horas) estão presentes nos locais previstos pela teoria. Ela conclui afirmando que esse fato suporta fortemente a validade de que a interação não linear é o mecanismo responsável pela modulação da amplitude da maré pela QTDW observada em Ascension Island.

Tokumoto (2007) utilizou seis anos de dados de ventos meteorológicos para estudar a variabilidade sazonal e a variabilidade dia-a-dia da maré diurna na região MLT de Cachoeira Paulista-SP. Ele concluiu que as interações não lineares entre a maré diurna e a semidiurna podem produzir duas ondas secundárias: uma maré diurna e uma maré terdiurna. Ele apontou que, para o período de dados analisados e para região de investigação, a interação não linear entre a QTDW e a maré diurna não é um mecanismo importante para variabilidade da maré.

Com relação às energias envolvidas num processo de interação não linear entre ondas atmosféricas, Raupp (2006), em um estudo teórico, obteve, a partir da versão adiabática das equações primitivas em coordenadas isobáricas, um modelo assintótico reduzido que governa a evolução fracamente não linear da amplitude das ondas numa determinada tríade ressonante. Este modelo reduzido foi obtido a partir da aplicação da teoria clássica de perturbação assintótica e do método de múltiplas escalas temporais nas equações governantes na forma adimensional. Partindo do princípio de que a amplitude de uma determinada onda está relacionada com sua energia, ele determinou a relação para o princípio da conservação da

energia no modelo atmosférico adotado e, com isso, obteve relações gerais da energia que envolve ondas num determinado tripleto ressonante.

Segundo este pesquisador, esta análise é importante, pois, sabendo o princípio geral da conservação da energia do modelo de equações e o aplicando para as ondas obtidas como solução de ordem dominante nesse modelo, obtém-se vínculos os quais os coeficientes de interação devem satisfazer para garantir tal lei de conservação. Tais vínculos, por sua vez, estabelecem informações sobre a estabilidade das ondas e também quais ondas são mais energeticamente ativas em determinado tripleto ressonante. Ele mostrou que a componente de ordem dominante da energia total pode ser representada de forma diagonalizada em termos dos modos normais, sendo escrita como:

$$E^{(0)} = \sum_a c_a^2 A_a A_a^* = \sum_a c_a^2 |A_a|^2, \quad (12)$$

em que  $c_a$  é uma constante de separação e  $A_a$  representa a amplitude da onda associada ao índice  $a$ .

Um resultado obtido é que o termo de ordem dominante da energia total  $E^{(0)}$  é conservado se, e, somente se, os coeficientes de interação entre as oscilações num tripleto ressonante qualquer ( $\eta_i^{jk}$ ) satisfazem à seguinte relação:

$$\eta_a^{bc} + \eta_b^{ac} + \eta_c^{ab} = 0 \quad (13)$$

Raupp (2006) aponta também que a equação resultante (13) tem algumas consequências interessantes para a dinâmica dos tripletos ressonantes. A equação obtida implica que, numa tríade ressonante qualquer, o coeficiente de interação com maior valor absoluto deve, necessariamente, possuir sinal oposto ao dos outros dois. Relacionando esta equação com outras equações desenvolvidas no modelo, ele discute que, fisicamente, esta condição significa que o modo que apresenta o coeficiente de interação com sinal oposto e, conseqüentemente, com maior valor absoluto sempre age como uma fonte ou sumidouro de energia para os outros dois membros da tríade ressonante.

### 3.3. Considerações para um desenvolvimento Matemático relativo a alguns dados teóricos sobre a propagação de Ondas Atmosféricas

Para este desenvolvimento tomou-se como base os artigos de Spizzichino (1969)<sup>2</sup>. Inicialmente, para uma pequena margem de erro, modela-se o comportamento da atmosfera como sendo de um gás ideal. Adota-se uma atmosfera isotérmica, com constituição independente da altitude, movimentos adiabáticos e velocidades médias pequenas. Com estas condições, obtém-se o seguinte sistema de equações para a dinâmica dos movimentos:

$$\begin{aligned}\frac{D\mathbf{u}}{Dt} + \nu \nabla p + g\zeta + \mathbf{\Omega} \times \mathbf{u} &= 0, \\ \frac{D\nu}{Dt} - \nu \nabla \cdot \mathbf{u} &= 0, \\ \frac{Dp}{Dt} + \frac{c^2}{\nu^2} \frac{D\nu}{Dt} &= 0,\end{aligned}\tag{14}$$

em que o estado do gás ideal é definido através de sua pressão  $p$ , seu volume específico  $\nu$  (inverso da densidade do gás:  $\nu = \frac{1}{\rho}$ ) e sua velocidade  $\mathbf{u}$ ;  $c$  é a velocidade do som no ar,  $g$  é a aceleração da gravidade,  $\mathbf{\Omega}$  é o dobro do vetor velocidade de rotação da Terra,  $\zeta$  é um vetor unitário na vertical e a derivada total é dada por:

$$\frac{D}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla,\tag{15}$$

Na busca de solução para o sistema de equações (14), conjuntamente com as hipóteses já feitas deve-se considerar também a hipótese fundamental de pequenos movimentos (Método da Perturbação). Nela, admite-se que o estado da atmosfera é definido, em cada ponto, por  $\mathbf{u}$ ,  $\nu$ ,  $p$ , os quais diferem muito pouco de um estado de equilíbrio definido por  $\mathbf{u} = 0$ ,  $\nu_o$ ,  $p_o$ . Procuram-se soluções do tipo:

<sup>2</sup> SPIZZICHINO, A. Étude des interactions entre les différents composants du vent dans la haute atmosphère (Deuxième partie: Quelques données sur la propagation des ondes atmosphériques). Annales de Géophysique, t, 25, fasc. 4., p 755 a 771. 1969,

SPIZZICHINO, A. Étude des interactions entre les différents composants du vent dans la haute atmosphère (Troisième partie: Théorie des interactions non linéaires entre les ondes atmosphériques). Annales de Géophysique, t, 25, fasc. 4., p 773 a 783. 1969,

$$\begin{aligned}
\dot{u} &= \dot{u}_0 + \dot{u}_1 + \dot{u}_2 + \dots, \\
v &= v_0 + v_1 + v_2 + \dots, \\
p &= p_0 + p_1 + p_2 + \dots,
\end{aligned} \tag{16}$$

Considera-se que pequenos movimentos, em primeira aproximação, se limitam aos termos de 1ª ordem,  $\dot{u}_1$ ,  $v_1$ ,  $p_1$ , representando assim os termos de  $\dot{u}$ ,  $v$ ,  $p$  variáveis com o tempo. A aproximação de pequenos movimentos tem validade se:

$$\left\{ \begin{array}{l} |p_1| \ll |p_0| \\ |p_2| \ll |p_1| \end{array} \right. \text{ e com: } \left\{ \begin{array}{l} |\dot{u}| \ll |c| \\ |\dot{u}| \ll \frac{\lambda_z}{\tau_N} \end{array} \right.$$

em que  $\lambda_z$  é o comprimento de onda vertical e  $\tau_N$  é o período de Brunt Vaisála.

### 3.4. Soluções do Sistema de Equações de Movimento

Para se obter as soluções de movimento, substitui-se  $\dot{u}$ ,  $v$ ,  $p$  em (12) pelos desenvolvimentos em (14) e, para cada solução, busca-se determinar a solução da ordem de interesse, desprezando-se termos cruzados das variáveis e termos que correspondam às ordens superiores.

#### 3.4.1. Solução de ordem “0”

Para a solução de ordem “0” do sistema de equações (12), primeiro escolhe-se  $\dot{u}$ ,  $v$ ,  $p \rightarrow \dot{u} = 0$ ,  $v = v_0$ ,  $p = p_0$ . Neste caso, a solução obtida, corresponde à solução de equilíbrio:

$$\begin{aligned}
\frac{D\dot{u}}{Dt} + v \nabla p + g \zeta + \Omega \times \dot{u} &= 0, \\
\nabla p_0 &= -\frac{g}{v_0} \zeta,
\end{aligned} \tag{17}$$

Considerando-se a equação de estado de um gás ideal escrita como:

$$p_0 v_0 = \frac{c^2}{\gamma}, \tag{18}$$

$$\text{com: } \gamma = \frac{c_p}{c_v}.$$

Desde que  $p'_o = \frac{\partial p_o}{\partial z}$  e  $v'_o = \frac{\partial v_o}{\partial z}$ , pode-se escrever:  $\frac{1}{\nabla} p_o = p'_o \zeta$  e  $\frac{1}{\nabla} v_o = v'_o \zeta$ , obtém-se então:

$$\frac{p'_o}{p_o} = \frac{v'_o}{v_o} = -\frac{\gamma g}{c^2} = -\frac{1}{H}, \quad (19)$$

com  $H$  representando a escala de altura. Esta grandeza estabelece uma medida da altura dentro da qual algum parâmetro, como pressão ou densidade, sofre diminuições por um fator  $\frac{1}{e}$  numa atmosfera isotérmica. De outro modo, podemos defini-la como a medida efetiva da espessura de uma camada atmosférica.

### 3.4.2. Solução de 1ª ordem

Para a solução de 1ª ordem, adota-se que:  $\vec{u}, v, p \rightarrow \vec{u} = \vec{u}_1, v = v_o + v_1, p = p_o + p_1$  e aplica-se ao conjunto de equações (12):

$$\begin{aligned} \frac{D\vec{u}_1}{Dt} + (v_o + v_1) \vec{\nabla} (p_o + p_1) + g \zeta + \vec{\Omega} \times \vec{u}_1 &= 0 \\ \Rightarrow \frac{\partial \vec{u}_1}{\partial t} + (\vec{u}_1 \cdot \vec{\nabla}) \vec{u}_1 + v_o \vec{\nabla} p_o + v_o \vec{\nabla} p_1 + v_1 \vec{\nabla} p_o + v_1 \vec{\nabla} p_1 + g \zeta + \vec{\Omega} \times \vec{u}_1 &= 0 \end{aligned}$$

Considerando-se que:  $\vec{\nabla} p_o = -\frac{g}{v_o} \zeta$  e, que para soluções de primeira ordem, apenas os termos de primeira ordem devem ser preservados e, desprezando-se os termos cruzados, tem-se:

$$\frac{\partial \vec{u}_1}{\partial t} + \vec{\Omega} \times \vec{u}_1 + v_o \vec{\nabla} p_1 - \frac{1}{v_o} g \zeta v_1 = 0, \quad (20)$$

De forma semelhante, procedendo-se com as variáveis  $v, p$  e considerando-se

$$\vec{\nabla} p_o = -\frac{g}{v_o} \zeta \text{ e } p_o v_o = \frac{c^2}{\gamma}, \text{ então:}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\mathbf{v}_0 + \mathbf{v}_1)}{\partial t} + (\mathbf{u}_1 \cdot \nabla)(\mathbf{v}_0 + \mathbf{v}_1) - (\mathbf{v}_0 + \mathbf{v}_1) \nabla \cdot \mathbf{u}_1 &= 0 \\ \Rightarrow \frac{\partial \mathbf{v}_0}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{v}_1}{\partial t} + (\mathbf{u}_1 \cdot \nabla) \mathbf{v}_0 + (\mathbf{u}_1 \cdot \nabla) \mathbf{v}_1 - \mathbf{v}_0 \nabla \cdot \mathbf{u}_1 + \mathbf{v}_1 \nabla \cdot \mathbf{u}_1 &= 0 \end{aligned}$$

Após fazer simplificações, tem-se:

$$\frac{\partial \mathbf{v}_1}{\partial t} + \frac{\gamma g}{c^2} \mathbf{v}_0 \zeta^{\mathbf{r}} \cdot \mathbf{u}_1 - \mathbf{v}_0 \nabla \cdot \mathbf{u}_1 = 0, \quad (21)$$

Semelhantemente, obtém-se:

$$\frac{\partial p_1}{\partial t} + \frac{c^2}{v_o^2} \frac{\partial \mathbf{v}_1}{\partial t} + (\gamma - 1) \frac{g \zeta^{\mathbf{r}}}{v_o} \cdot \mathbf{u}_1 = 0, \quad (22)$$

A partir das equações (20), (21) e (22), forma-se o seguinte sistema de equações:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \mathbf{u}_1}{\partial t} + \mathbf{\Omega} \times \mathbf{u}_1 + \mathbf{v}_o \nabla p_1 - \frac{1}{v_o} g \zeta^{\mathbf{r}} \mathbf{v}_1 &= 0, \\ \frac{\partial \mathbf{v}_1}{\partial t} + \frac{\gamma g}{c^2} \mathbf{v}_o \zeta^{\mathbf{r}} \cdot \mathbf{u}_1 - \mathbf{v}_o \nabla \cdot \mathbf{u}_1 &= 0, \\ \frac{\partial p_1}{\partial t} + \frac{c^2}{v_o^2} \frac{\partial \mathbf{v}_1}{\partial t} + (\gamma - 1) \frac{g \zeta^{\mathbf{r}}}{v_o} \cdot \mathbf{u}_1 &= 0, \end{aligned} \quad (23)$$

O sistema de equações obtido representa as equações que descrevem os movimentos para a aproximação de 1ª ordem. Sabe-se que um sistema de equações diferenciais lineares, homogêneas e com coeficientes constantes, permite soluções do tipo onda. Entretanto, o sistema de equações (23) apresenta equações lineares, homogêneas, mas os coeficientes não são constantes. Observa-se que, por intermédio de  $v_o$ , os coeficientes dependem da altitude e, através  $\zeta^{\mathbf{r}}$  (vetor unitário na vertical), dependem da latitude. Portanto, é necessário realizar mudanças de variáveis. Neste caso, através das seguintes transformações:

$$\begin{aligned}
 \overset{\mathbf{r}}{U}_1 &= \left( \frac{c}{v_0} \right)^{\frac{1}{2}} \overset{\mathbf{r}}{u}_1, \\
 V_1 &= \left( \frac{c}{v_0} \right)^{\frac{3}{2}} v_1, \\
 P_1 &= \left( \frac{c}{v_0} \right)^{\frac{1}{2}} p_1,
 \end{aligned} \tag{24}$$

obtem-se o conjunto de equações:

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial \overset{\mathbf{r}}{U}_1}{\partial t} + \overset{\mathbf{r}}{\Omega} \times \overset{\mathbf{r}}{U}_1 + c \left( \frac{\overset{\mathbf{r}}{\nabla}}{\nabla} - \frac{\gamma g}{2c^2} \overset{\mathbf{r}}{\zeta} \right) P_1 - \frac{g}{c} \overset{\mathbf{r}}{\zeta} V_1 &= 0, \\
 \frac{\partial V_1}{\partial t} - c \left( \frac{\overset{\mathbf{r}}{\nabla}}{\nabla} - \frac{\gamma g}{c^2} \overset{\mathbf{r}}{\zeta} \right) \cdot \overset{\mathbf{r}}{U}_1 &= 0, \\
 \frac{\partial P_1}{\partial t} + \frac{\partial V_1}{\partial t} + (\gamma - 1) \frac{g \overset{\mathbf{r}}{\zeta}}{c} \cdot \overset{\mathbf{r}}{U}_1 &= 0,
 \end{aligned} \tag{25}$$

Com estas transformações e considerando-se uma região de estudo pouco extensa para desprezar a curvatura da Terra e tornar o vetor unitário  $\overset{\mathbf{r}}{\zeta}$  constante, o novo sistema de equações torna-se linear, homogêneo e com coeficientes constantes com:  $P_1 = \alpha v_0^\beta p_1$ ,  $\overset{\mathbf{r}}{U}_1 = \alpha' v_0^{(\beta-1)} \overset{\mathbf{r}}{u}_1$ ,  $V_1 = \alpha'' v_0^{(\beta-2)} v_1$  e o parâmetros  $\alpha, \alpha', \alpha''$  e  $\beta$  constantes. As soluções obtidas são do tipo ondas:  $\overset{\mathbf{r}}{U}_1, V_1, P_1 \propto \exp j(k \cdot \overset{\mathbf{r}}{r} - \omega t)$ <sup>3</sup>,

Escrevendo-se  $\overset{\mathbf{r}}{U}_1$ ,  $\overset{\mathbf{r}}{\Omega}$  e  $\overset{\mathbf{r}}{\nabla}$  nas seguintes formas:

$$\begin{aligned}
 \overset{\mathbf{r}}{U}_1 &= \overset{\mathbf{r}}{U}_{H1} + w_1 \overset{\mathbf{r}}{\zeta}, \\
 \overset{\mathbf{r}}{\Omega} &= \overset{\mathbf{r}}{\Omega}_H + \overset{\mathbf{r}}{\Omega}_v, \\
 \overset{\mathbf{r}}{\nabla} &= \overset{\mathbf{r}}{\nabla}_H + \overset{\mathbf{r}}{\nabla}_v,
 \end{aligned} \tag{26}$$

Aplicando-se (26) ao sistema de equações (25), tem-se:

<sup>3</sup>Os valores escolhidos para  $\overset{\mathbf{r}}{k}$  e  $\omega$  são tais que as soluções obtidas para equação  $\overset{\mathbf{r}}{U}_1, V_1, P_1 \propto \exp(j(k \cdot \overset{\mathbf{r}}{r} - \omega t))$  resultem em senóides puras.

$$\begin{aligned}
 & \frac{\partial(\mathbf{U}_{H1} + w_1 \boldsymbol{\zeta}^r)}{\partial t} + (\boldsymbol{\Omega}_H + \boldsymbol{\Omega}_v) \times (\mathbf{U}_{H1} + w_1 \boldsymbol{\zeta}^r) + c \left[ (\nabla_H + \nabla_v \boldsymbol{\zeta}^r) - \frac{\gamma g}{2c^2} \boldsymbol{\zeta}^r \right] P_1 - \frac{g}{c} V_1 \boldsymbol{\zeta}^r = 0 \\
 \Rightarrow & \frac{\partial \mathbf{U}_{H1}}{\partial t} + \frac{\partial w_1 \boldsymbol{\zeta}^r}{\partial t} + \cancel{\boldsymbol{\Omega}_H \times \mathbf{U}_{H1}} + \cancel{\boldsymbol{\Omega}_v \times w_1 \boldsymbol{\zeta}^r} + \boldsymbol{\Omega}_v \times \mathbf{U}_{H1} + \boldsymbol{\Omega}_H \times w_1 \boldsymbol{\zeta}^r + c \nabla_H P_1 + c \nabla_v P_1 \boldsymbol{\zeta}^r \\
 & - \frac{\gamma g}{2c^2} \boldsymbol{\zeta}^r P_1 - \frac{g}{c} V_1 \boldsymbol{\zeta}^r = 0 \\
 \Rightarrow & \begin{cases} \frac{\partial \mathbf{U}_{H1}}{\partial t} + \boldsymbol{\Omega}_v \times \mathbf{U}_{H1} + c \nabla_H P_1 = 0, \\ \frac{\partial w_1 \boldsymbol{\zeta}^r}{\partial t} + c \left[ \nabla_v - \frac{\gamma g}{2c^2} \right] \boldsymbol{\zeta}^r P_1 - \frac{g}{c} V_1 \boldsymbol{\zeta}^r = 0, \end{cases}
 \end{aligned}$$

De forma semelhante, para a segunda equação tem-se:

$$\begin{aligned}
 & \frac{\partial V_1}{\partial t} - c \left( (\nabla_H + \nabla_v \boldsymbol{\zeta}^r) - \frac{\gamma g}{c^2} \boldsymbol{\zeta}^r \right) \cdot (\mathbf{U}_{H1} + w_1 \boldsymbol{\zeta}^r) = 0 \\
 \Rightarrow & \frac{\partial V_1}{\partial t} - c \nabla_H \cdot \mathbf{U}_{H1} + c \nabla_H \cdot w_1 \boldsymbol{\zeta}^r + c \nabla_v \boldsymbol{\zeta}^r \cdot \mathbf{U}_{H1} + c \nabla_v \boldsymbol{\zeta}^r \cdot w_1 \boldsymbol{\zeta}^r - \frac{c \gamma g}{c^2} \boldsymbol{\zeta}^r \cdot \mathbf{U}_{H1} - \frac{c \gamma g}{c^2} \boldsymbol{\zeta}^r \cdot w_1 \boldsymbol{\zeta}^r = 0 \\
 \Rightarrow & \frac{\partial V_1}{\partial t} - c \nabla_H \cdot \mathbf{U}_{H1} + c \nabla_v \boldsymbol{\zeta}^r \cdot w_1 \boldsymbol{\zeta}^r - \frac{c \gamma g}{c^2} \boldsymbol{\zeta}^r \cdot w_1 \boldsymbol{\zeta}^r = 0 \\
 \Rightarrow & \frac{\partial V_1}{\partial t} + c \left( \nabla_v \boldsymbol{\zeta}^r \cdot w_1 \boldsymbol{\zeta}^r - \frac{\gamma g}{c^2} w_1 \right) - c \nabla_H \cdot \mathbf{U}_{H1} = 0,
 \end{aligned}$$

Realizando-se da mesma forma para a terceira equação, tem-se:

$$\begin{aligned}
 & \frac{\partial P_1}{\partial t} + \frac{\partial V_1}{\partial t} + (\gamma - 1) \frac{g \boldsymbol{\zeta}^r}{c} \cdot \mathbf{U}_1 = 0 \\
 \Rightarrow & \frac{\partial P_1}{\partial t} + \frac{\partial V_1}{\partial t} + (\gamma - 1) \frac{g \boldsymbol{\zeta}^r}{c} \cdot (\mathbf{U}_{H1} + w_1 \boldsymbol{\zeta}^r) = 0 \\
 \Rightarrow & \frac{\partial P_1}{\partial t} + \frac{\partial V_1}{\partial t} + (\gamma - 1) \frac{g \boldsymbol{\zeta}^r}{c} \cdot \mathbf{U}_{H1} + (\gamma - 1) \frac{g \boldsymbol{\zeta}^r}{c} \cdot w_1 \boldsymbol{\zeta}^r = 0 \\
 \Rightarrow & \frac{\partial P_1}{\partial t} + \frac{\partial V_1}{\partial t} + (\gamma - 1) \frac{g}{c} w_1 = 0,
 \end{aligned}$$

Considerando-se que  $U_1 = A \exp j(k \cdot \mathbf{r} - \omega t)$ , com  $j = \sqrt{-1}$ , e realizando-se a seguinte

operação:  $\frac{\partial U_1}{\partial t}$ , tem-se como resultado:  $\frac{\partial A \exp(j(k \cdot \mathbf{r} - \omega t))}{\partial t} = -j\omega A \exp(j(k \cdot \mathbf{r} - \omega t)) = -j\omega U_1$ .

De forma semelhante, ao se aplicar  $\nabla \cdot U_1$  tem-se como resultado  $j k U_1$ . Então, para encontrar

as soluções, adotam-se as seguintes substituições:  $\frac{\partial}{\partial t} = -j\omega$  e  $\vec{\nabla} = j\vec{k} = (\vec{\chi} + \vec{k}_z)$ , e encontra-se o seguinte sistema de equações:

$$\begin{aligned} (-j\omega + \vec{\Omega} \times) \vec{U}_{H1} + jc\vec{\chi} P_1 &= 0, \\ -j\omega W_1 + c \left( jk_z - \frac{\gamma g}{2c^2} \right) P_1 - \frac{g}{c} V_1 &= 0, \\ -j\omega V_1 - c \left( jk_z - \frac{\gamma g}{2c^2} \right) W_1 - jc\vec{\chi} \cdot \vec{U}_{H1} &= 0, \\ -j\omega P_1 - j\omega V_1 + c(\gamma - 1) \frac{g}{c} W_1 &= 0, \end{aligned} \quad (27)$$

$\vec{U}_{H1}$  é a componente horizontal e  $W_1$  é a coordenada vertical de  $\vec{U}_1$ ;  $\vec{\chi}$  é a componente horizontal;  $k_z$  a coordenada vertical de  $\vec{k}$ ;  $\vec{\Omega}$  é substituída pela componente vertical  $\vec{\Omega}_v$ .

Levando-se em consideração a rotação da Terra e isolando-se  $\vec{U}_{H1}$ , na primeira equação de (27), obtém-se:

$$\vec{U}_{H1} = \frac{c}{\omega^2 - \Omega_v^2} (\omega - j\vec{\Omega}_v \times) \vec{\chi} P_1, \quad (28)$$

e, substituindo-se a expressão obtida para  $\vec{U}_{H1}$  na terceira equação de (27), tem-se:

$$\vec{\chi} \cdot \vec{U}_1 = \frac{c}{\omega^2 - \Omega_v^2} \omega \vec{\chi}^2 P_1, \quad (29)$$

### 3.4.3. Solução de 2ª ordem e a Interação Não Linear

Fazendo-se:  $\vec{u}, \nu, p \rightarrow \vec{u} = \vec{u}_1 + \vec{u}_2$ ,  $\nu = \nu_o + \nu_1 + \nu_2$ ,  $p = p_o + p_1 + p_2$  e aplicando-se no conjunto de equações (14), pode-se obter o sistema de equações para as soluções de 2ª ordem, então:

$$\begin{aligned}
 & \frac{D\mathbf{u}}{Dt} + \mathbf{v}\nabla p + g\zeta + \mathbf{\Omega} \times \mathbf{u} = 0 \\
 \Rightarrow & \frac{\partial}{\partial t}(\mathbf{u}_1 + \mathbf{u}_2) + [(\mathbf{u}_1 + \mathbf{u}_2) \cdot \nabla](\mathbf{u}_1 + \mathbf{u}_2) + (\mathbf{v}_0 + \mathbf{v}_1 + \mathbf{v}_2)\nabla(p_0 + p_1 + p_2) + \\
 & + g\zeta + \mathbf{\Omega} \times (\mathbf{u}_1 + \mathbf{u}_2) = 0 \\
 \Rightarrow & \frac{\partial \mathbf{u}_2}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{u}_1}{\partial t} + \mathbf{u}_1 \cdot \nabla \mathbf{u}_1 + \mathbf{u}_1 \cdot \nabla \mathbf{u}_2 + \mathbf{u}_2 \cdot \nabla \mathbf{u}_1 + \mathbf{u}_2 \cdot \nabla \mathbf{u}_2 + \mathbf{v}_0 \nabla p_0 + \mathbf{v}_0 \nabla p_1 + \mathbf{v}_0 \nabla p_2 + \\
 & + \mathbf{v}_1 \nabla p_0 + \mathbf{v}_1 \nabla p_1 + \mathbf{v}_1 \nabla p_2 + \mathbf{v}_2 \nabla p_0 + \mathbf{v}_2 \nabla p_1 + \mathbf{v}_2 \nabla p_2 + g\zeta + \mathbf{\Omega} \times \mathbf{u}_1 + \mathbf{\Omega} \times \mathbf{u}_2 = 0,
 \end{aligned}$$

Considerando-se que:  $\nabla p_0 = -\frac{g}{v_0}\zeta$ ,  $\mathbf{v}_1 \nabla p_0 = -\frac{g}{v_0}\mathbf{v}_1\zeta$ ,  $\mathbf{v}_2 \nabla p_0 = -\frac{g}{v_0}\mathbf{v}_2\zeta$  e que apenas

os termos ordem menor ou igual a 2 devem ser preservados e, ainda, desprezando-se os termos cruzados de ordem superior a 2, tem-se:

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial \mathbf{u}_2}{\partial t} + \mathbf{\Omega} \times \mathbf{u}_2 + \mathbf{v}_0 \nabla p_2 + \mathbf{v}_2 \nabla p_0 &= -\left( \frac{\partial \mathbf{u}_1}{\partial t} + \mathbf{u}_1 \cdot \nabla \mathbf{u}_1 + \mathbf{\Omega} \times \mathbf{u}_1 + \mathbf{v}_0 \nabla p_1 + \mathbf{v}_1 \nabla p_0 + \mathbf{v}_1 \nabla p_1 \right), \\
 \frac{\partial \mathbf{u}_2}{\partial t} + \mathbf{\Omega} \times \mathbf{u}_2 + \mathbf{v}_0 \nabla p_2 + \mathbf{v}_2 \nabla p_0 &= -\mathbf{f}_2,
 \end{aligned} \tag{30}$$

Com:

$$\mathbf{f}_2 = \frac{\partial \mathbf{u}_1}{\partial t} + \mathbf{u}_1 \cdot \nabla \mathbf{u}_1 + \mathbf{\Omega} \times \mathbf{u}_1 + \mathbf{v}_0 \nabla p_1 + \mathbf{v}_1 \nabla p_0 + \mathbf{v}_1 \nabla p_1, \tag{31}$$

Procedendo-se de forma semelhante com as equações seguintes, obtém-se:

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial v_2}{\partial t} - \frac{\gamma}{c^2} \mathbf{v}_0 \mathbf{g} \cdot \mathbf{u}_2 - \mathbf{v}_0 \nabla \cdot \mathbf{u}_2 &= -g_2, \\
 \frac{\partial p_2}{\partial t} + \frac{1}{v_0} \mathbf{g} \cdot \mathbf{u}_2 - \frac{c^2}{v_0} \nabla \cdot \mathbf{u}_2 &= -h_2,
 \end{aligned} \tag{32}$$

Com:

$$\begin{aligned}
 g_2 &= \mathbf{u}_1 \cdot \nabla v_1 - \mathbf{v}_1 \nabla \cdot \mathbf{u}_1, \\
 h_2 &= \mathbf{u}_1 \cdot \nabla p_1 + \gamma v_1 \nabla \cdot \mathbf{u}_1,
 \end{aligned} \tag{33}$$

Então, o sistema de equações completo é:

$$\begin{aligned}
\frac{\partial \mathbf{u}_2}{\partial t} + \mathbf{\Omega} \times \mathbf{u}_2 + \mathbf{v}_o \cdot \nabla p_2 - \rho_o g \zeta \mathbf{v}_2 &= -\mathbf{f}_2, \\
\frac{\partial \mathbf{v}_2}{\partial t} + \frac{\gamma g}{c^2} \mathbf{v}_o \zeta \cdot \mathbf{u}_2 - \mathbf{v}_o \cdot \nabla \cdot \mathbf{u}_2 &= -g_2, \\
\frac{\partial p_2}{\partial t} + \rho_o \mathbf{g} \cdot \mathbf{u}_2 + c^2 \rho_o \nabla \cdot \mathbf{u}_2 &= -h_2,
\end{aligned} \tag{34}$$

com:

$$\begin{aligned}
\mathbf{f}_2 &= \mathbf{u}_1 \cdot \nabla \mathbf{u}_1 + \mathbf{v}_1 \cdot \nabla p_1, \\
g_2 &= \mathbf{u}_1 \cdot \nabla \mathbf{v}_1 + \mathbf{v}_1 \cdot \nabla \cdot \mathbf{u}_1, \\
h_2 &= \mathbf{u}_1 \cdot \nabla p_1 + \gamma p_1 \nabla \cdot \mathbf{u}_1,
\end{aligned} \tag{35}$$

Observa-se que por intermédio de  $\mathbf{v}_o$  os coeficientes dependem da altitude e, através de  $\zeta$ , eles dependem da latitude. Portanto, novamente necessita-se realizar mudanças de variáveis para que o sistema se torne linear, homogêneo e com coeficientes constantes. Fazendo-se as seguintes escolhas:

$$\begin{aligned}
\mathbf{U}_2 &= (\rho_o c) \mathbf{u}_2, \\
V_2 &= (\rho_o c^2) \mathbf{v}_2, \\
P_2 &= p_2 \\
\Gamma_2 &= -(\gamma - 1) \frac{g}{c^2},
\end{aligned} \tag{36}$$

Realizando-se as substituições, obtém-se o novo sistema de equações:

$$\begin{aligned}
\frac{\partial \mathbf{U}_2}{\partial t} + \mathbf{\Omega} \times \mathbf{U}_2 + c \nabla P_2 + \frac{g}{c} V_2 &= -\mathbf{F}_2, \\
\frac{\partial V_2}{\partial t} - c \nabla \cdot \mathbf{U}_2 &= -G_2, \\
\frac{\partial P_2}{\partial t} + c (\nabla - \Gamma_2) \cdot \mathbf{U}_2 &= -H_2,
\end{aligned} \tag{37}$$

$$\begin{aligned}
\mathbf{F}_2 &= \mathbf{U}_1 \cdot \nabla \mathbf{U}_1 + V_1 \nabla P_1 + \frac{1}{2H} (\mathbf{U}_1 \cdot \zeta \mathbf{U}_1 - P_1 V_1 \zeta), \\
G_2 &= \mathbf{U}_1 \cdot \nabla V_1 - V_1 \nabla \cdot \mathbf{U}_1 + \frac{V_1}{H} \mathbf{U}_1 \cdot \zeta, \\
H_2 &= \mathbf{U}_1 \cdot \nabla P_1 + \gamma P_1 \nabla \cdot \mathbf{U}_1 + \frac{\gamma - 1}{2H} P_1 \zeta \cdot \mathbf{U}_1,
\end{aligned} \tag{38}$$

As soluções de 1ª ordem são do tipo:  $\overset{1}{U}_1 = \sum_m \overset{1}{U}_1^m$  o que leva a soluções ondulatórias do tipo  $\overset{1}{U}_1^m, V_1^m, P_1^m \propto \exp j(k^m \cdot r - \omega^m t)$ .

As soluções de segunda ordem são do tipo:  $\overset{1}{F}_2 = \sum_m \sum_p \overset{1}{F}_2^{m,p}$ , então as soluções ondulatórias para o sistema são:  $\overset{1}{U}_2^{m,p}, V_2^{m,p}, P_2^{m,p} \propto \exp j((k^m + k^p) \cdot r - (\omega^m + \omega^p) t)$ .

A solução de 2ª ordem é a soma de algum dos seguintes termos:  $\overset{1}{U}_2^{m,p}, V_2^{m,p}, P_2^{m,p}$ . Cada um desses termos não depende só das características das duas ondas de 1ª ordem. Representa, na verdade, a resultante da interação entre as duas ondas, e pode ser estudada como se figurasse nas soluções de 1ª ordem. Isto porque o resultado não se limita apenas ao caso da soma destas soluções. Considerando-se as seguintes ondas:  $\overset{1}{U}^1 \propto \exp j(k^1 \cdot r - \omega^1 t)$  e  $\overset{1}{U}^2 \propto \exp j(k^2 \cdot r - \omega^2 t)$  e os respectivos complexos conjugados:  $\overset{1}{U}^3 \propto \exp j(-k^1 \cdot r + \omega^1 t)$  e  $\overset{1}{U}^4 \propto \exp j(-k^2 \cdot r + \omega^2 t)$ . Essas quatro ondas fazem surgir dezesseis termos de interações na solução de 2ª ordem, a saber:

$$(a) \text{ dois termos em: } \overset{1}{U}_2^{1,2}, \overset{1}{U}_2^{2,1} \rightarrow \begin{cases} \omega^1 + \omega^2 \\ \overset{1}{k}^1 + \overset{1}{k}^2 \end{cases},$$

$$(b) \text{ dois termos em: } \overset{1}{U}_2^{1,4}, \overset{1}{U}_2^{4,1} \rightarrow \begin{cases} \omega^1 - \omega^2 \\ \overset{1}{k}^1 - \overset{1}{k}^2 \end{cases},$$

(c) quatro termos complexos conjugados dos termos em (a) e (b), e

(d) oito termos que representam de fato a interação de cada onda real com ela mesma.

Ao se aplicar a um caso de uma única onda de frequência e número de onda particular, tem-se como resultado, na solução de 2ª ordem, um vento dominante de frequência zero e uma harmônica com o dobro da frequência e do comprimento de onda. Essas interações são:  $\overset{1}{U}_2^{1,1}; \overset{1}{U}_2^{1,3}; \overset{1}{U}_2^{3,1}; \overset{1}{U}_2^{2,2}; \overset{1}{U}_2^{2,4}; \overset{1}{U}_2^{4,2}; \overset{1}{U}_2^{3,3}; \overset{1}{U}_2^{4,4}$ .

A interação entre duas ondas reais (ondas primárias) da solução de 1ª ordem com suas respectivas frequências e números de onda:  $\omega^1, k^1$  e  $\omega^2, k^2$  faz-se surgir nas soluções das equações de 2ª ordem duas ondas secundárias definidas por:

$$\begin{aligned} \omega &= \omega' \pm \omega'' \\ \vec{k} &= \vec{k}' \pm \vec{k}'' \end{aligned} \quad (39)$$

As equações em (39) se constituem, para as frequências e os números de onda, nas condições de ocorrência da tríade ressonante.

As amplitudes das ondas secundárias são inversamente proporcionais á densidade  $\rho_0$  do ar da seguinte forma:  $\vec{u}_2 = \rho_0^{-1} \vec{U}_2$ , enquanto que, as amplitudes das ondas de primárias variam da seguinte forma  $\vec{u}_1 = \rho_0^{-\frac{1}{2}} \vec{U}_1$ . Assim, os termos de 2ª ordem aumentam mais rapidamente com a altitude que os de 1ª ordem e, desta forma, uma altitude limite é estabelecida para esses termos. Portanto, abaixo da altitude limite ( $z_{lim}$ ) a solução de 1ª ordem leva às equações do tipo ondas plana e se constitui numa boa aproximação e, acima de  $z_{lim}$ , deve-se acrescentar as soluções de ordem superior (2, 3,..). Os termos de ordem 2, 3,... são proporcionais às amplitudes das ondas de ordem 1 e, isto, implica na interação não linear entre as ondas (Spizzichino, 1969b). Para o modo de maré diurna (1, -1), Spizzichino (1969b), a partir da relação  $u = \frac{\lambda_z}{\tau_N}$ , encontrou que a altitude limite ( $z_{lim}$ ) situa-se em torno de 80 km.

Este valor de  $z_{lim}$  encontra-se na região MLT, que é a região de investigação desta Tese

### 3.5. Aquecimento Abrupto Estratosférico (Sudden Stratospheric Warming - SSW)

A circulação da Estratosfera Polar durante a estação de verão é caracterizada por um anticiclone de grande extensão centrado no pólo e gradiente de temperatura regular na direção pólo-equador. Os ventos sopram na direção leste-oeste e apresentam pouca variabilidade. No outono, a situação se modifica devido ao início do esfriamento da região polar, de modo que, à medida que o inverno se aproxima a circulação reverte desde leste-oeste para oeste-leste e o gradiente de temperatura também inverte seu sinal. No inverno, devido à formação da zona fria de baixa pressão sobre o pólo de inverno, o vento zonal na Estratosfera caracteriza-se pela alta intensidade e, este padrão, é chamado de Vórtice Polar Noturno, cuja circulação apresenta uma grande variabilidade. Esta variabilidade é devida, principalmente, ao rompimento da configuração da circulação estratosférica, a qual é acompanhado por um Aquecimento Abrupto da Estratosfera em altas latitudes e abaixo do nível de 10 hPa. A temperatura polar aumenta rapidamente num curto período de dias e acontece a desaceleração do vento médio zonal (que escoia na direção oeste-leste), ou pode ainda ocorrer reversão da circulação do

vento médio zonal, que passa a escoar na direção leste-oeste (Andrews et. al., 1987).

A formação deste fenômeno, conhecido como Aquecimento Abrupto da Estratosfera (Sudden Stratospheric Warming - SSW), foi atribuída ao crescimento de Ondas Planetárias transientes propagando-se para cima e a interação delas com o fluxo zonal médio (Matsuno, 1971). Esta interação causa uma desaceleração e/ou a reversão do vento que sopra na direção oeste-leste no inverno e também induz uma circulação descendente na Estratosfera, causando aquecimento adiabático (e.x., Pancheva *et al.*, 2008). Quando o aumento da temperatura média não conduz a uma reversão de vento zonal médio, o SSW é classificado como um SSW “minor” (fraco)<sup>4</sup>, enquanto que se ocorre um aumento da temperatura média a partir de 60° latitude em direção ao pólo acompanhado por uma reversão de vento, o SSW é classificado como um aquecimento “major” (intenso) (Schoeberl, 1978; Andrews *et al.*, 1987).

Alguns estudos demonstraram que o aumento da atividade de Ondas Planetárias durante a estação de inverno é atribuída à excitação ressonante de modos de ondas livres (Esler e Scott, 2005; Liu e Roble, 2002). Além disso, existem evidências de que para os eventos de SSWs acontecerem, é necessário que a composição de seu tempo de duração seja precedida por condições de fluxo zonal estratosférico e anômalo, com a presença de um forçamento quase-estacionário de número de onda 1 na Estratosfera e próximo aos níveis de superfície (Limpasuvan *et al.*, 2004). Muitos estudos realizados tiveram como base observações com certas limitações (tais como resolução pobre, extensão vertical limitada, falta de cobertura), não permitindo o entendimento em detalhe da evolução do comportamento da Estratosfera e Mesosfera durante um ciclo completo de um SSW. Entretanto, estudos recentes com base em observações realizadas a partir de instrumentos que provêm dados com boa qualidade e alta resolução tornaram possível o estudo da evolução da atmosfera durante eventos com SSW.

Como as camadas atmosféricas estão acopladas verticalmente, os eventos de Aquecimento Abrupto da Estratosfera intensos afetam a dinâmica da Mesosfera, da Termosfera (Liu e Roble, 2002), e da Ionosfera (Goncharenko e Zang, 2008). Utilizando um modelo numérico, Holton (1983) estudou os efeitos dos eventos de Aquecimento Abrupto da Estratosfera polar na circulação da região da Mesosfera. Ele interpretou que um esfriamento da Mesosfera durante os eventos de aquecimento da Estratosfera Polar pode ser causado pela absorção de ondas de gravidade interna devido à reversão do vento médio zonal. Estudos

---

<sup>4</sup> Os termos “minor” e “major” foram usados, nesta Tese, como sendo, respectivamente, “fraco” e “intenso”.

baseados em observações também demonstram que os eventos de Aquecimento Abrupto da Estratosfera Polar durante a estação de inverno são acompanhados por um esfriamento da baixa Mesosfera Polar (Labitzke, 1972; Siskind e Coy, 2005).

Os impactos causados na Mesosfera e na Ionosfera em latitudes médias, baixas e na região equatorial foram observados recentemente através de estudos do acoplamento entre os eventos intensos de Aquecimento Abrupto da Estratosfera em altas latitudes do Hemisfério Norte e perturbações detectadas em parâmetros estimados nas outras regiões e latitudes. Segundo Kodera (2006), a influência do aquecimento no Hemisfério Norte é vista claramente na temperatura estratosférica equatorial. Este efeito também é visto no vento zonal extratropical no verão do Hemisfério Sul. Shepherd *et al.* (2007) observaram que esfriamento da Mesosfera e aquecimento da Estratosfera nos trópicos estão correlacionados com eventos de aquecimento da Estratosfera em médias e altas latitudes. O acoplamento dinâmico na Estratosfera e na Mesosfera em altas e baixas latitudes durante eventos intensos de Aquecimento Abrupto da Estratosfera do pólo norte no inverno de 2003-2004 foi estudado por Pancheva *et al.* (2008). Investigação conduzida por Sridharan *et al.* (2009) demonstrou a relação entre eventos intensos de Aquecimento Abrupto da Estratosfera e a reversão do eletrojato equatorial para o período crepuscular.

Resultados da investigação dos ventos na região MLT sobre Tirunelveli (8,7°N, 77,8°E), observados durante diferentes eventos SSW, mostraram que existe uma relação entre a resposta para as variações na dinâmica da região MLT e os eventos de SSW intensos, sendo esta conexão atribuída à variabilidade de ondas de gravidade (Sathishkumar *et al.*, 2009). Em outro estudo, as variações da temperatura da mesopausa durante eventos de SSW sobre Trivandrum (8,5°N; 76,5°E) indicaram um acoplamento entre as duas regiões, a qual ocorre através da intensificação da atividade de Ondas Planetárias (Vineeth *et al.*, 2009b).

## 4 - INSTRUMENTAÇÃO E METODOLOGIA

### 4.1. Coleta e Análise dos Dados

Este estudo das possíveis causas para as variações, em períodos de Ondas Planetárias, das amplitudes das Marés Atmosféricas teve como base os dados de ventos meteorológicos da região MLT. Os ventos horários horizontais foram obtidos no período compreendido entre os anos de 2004 e 2008, através dos radares meteorológicos localizados em São João do Cariri-PB (7,4°S; 36,5°O) e Cachoeira Paulista-SP (22,7°S; 45,0°O). O radar meteorológico de Cachoeira Paulista foi adquirido com recursos CNPq/PRONEX e o de São João do Cariri com recursos de projeto temático FAPESP.

O radar meteorológico VHF é um sistema que possui visada de todo o céu e foi projetado para operar em alta repetição de pulsos de frequências. Eles detectam trilhas meteorológicas nas altitudes compreendidas entre, aproximadamente, 80 e 100 km e são capazes de detectar entre 2.000 e 20.000 meteoros por dia dependendo dos parâmetros do sistema, da época do ano e das atividades meteorológicas existentes. Nesta pesquisa, os ventos médios horários horizontais foram determinados para sete camadas com 4 km de espessura e centradas nas altitudes de 81, 84, 87, 90, 93, 96 e 99 km.



**Figura 02** – Localização dos radares meteorológicos cujos dados foram utilizados nesta pesquisa.

Além dos dados de ventos meteorológicos, também foram utilizados parâmetros da Estratosfera polar, fornecidos pelo National Centre for Environmental Prediction (NCEP), na investigação do comportamento da dinâmica da alta Mesosfera e baixa Termosfera equatorial

durante o evento de Aquecimento Abrupto da Estratosfera polar do hemisfério norte, ocorrido em janeiro-fevereiro de 2006.

Em geral, as ondas atmosféricas de escala planetária ocorrem como manifestações transitórias de atividades de ondas durante determinados intervalos de tempo que se prolongam por semanas ou até meses. Conseqüentemente se faz necessário avaliar a distribuição temporal do espectro de frequências. Assim, o emprego da transformada em wavelets (ondaletas) mostra-se uma ferramenta útil na análise de séries não estacionárias (Chui, 1992; Morettin, 1999; Kumar e Foufoula-Georgiou, 1997; Torrence e Compo, 1998). Dada a sua simplicidade, a transformada em wavelets de Morlet, tem sido utilizada na investigação de perturbações ondulatórias observadas nos ventos da região próxima a mesopausa (e.x. Pancheva e Mukhtarov, 2000; Lima *et al.*, 2005) e, portanto, ela foi empregada no presente trabalho.

Para estudar a evolução temporal de cada uma das oscilações de interesse, os dados foram submetidos a um filtro Passa Banda cujas frequências de cortes, superior e inferior, permitem selecionar oscilações com períodos específicos. Os perfis de amplitudes e as estruturas de fases referentes a estas oscilações foram obtidas através de análise harmônica.

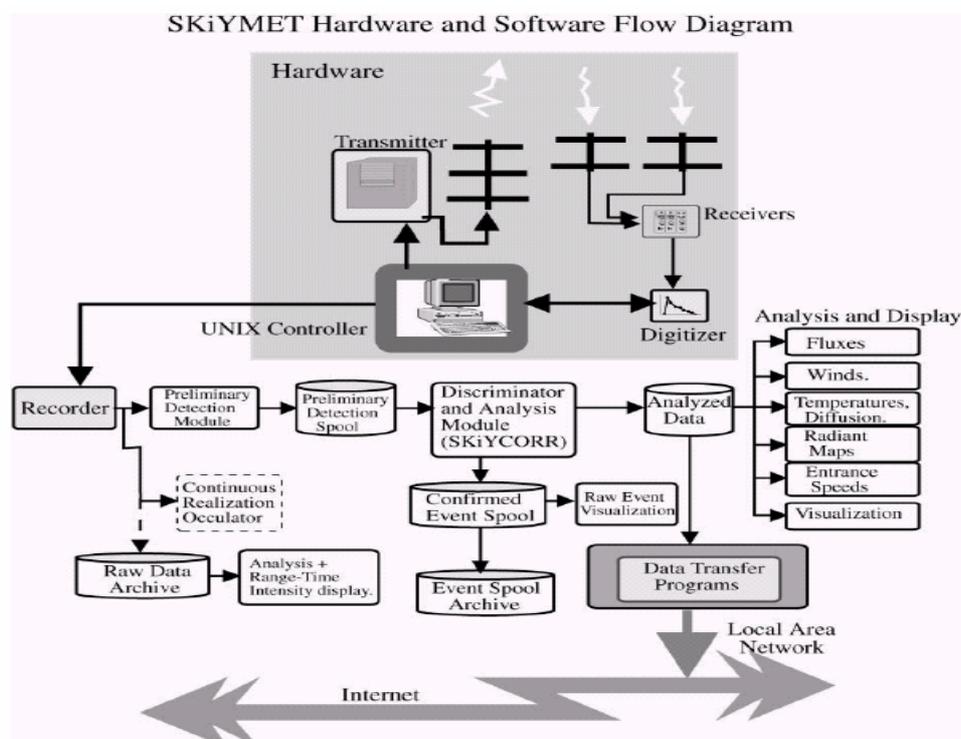
Devido aos termos não lineares advectivos nas equações dinâmicas gerais dos movimentos atmosféricos, um possível processo de interação não linear onda-onda ou onda-maré, identificado como um acoplamento quadrático, não pode ser examinado através de análise espectral tradicional. Isto se deve ao fato de que análise espectral tradicional é baseada, principalmente, no espectro de potência, onde a relação de fases entre componentes é suprimida; ela não fornece informações sobre possíveis interações entre ondas como o faz a análise biespectral. Portanto, nesta pesquisa, a análise biespectral também foi utilizada para se identificar possíveis interações não lineares ressoantes entre modos de Marés Atmosféricas e Ondas Planetárias.

#### **4.2. Radar Interferométrico SKiYMET**

Quando um meteoróide entra na atmosfera, ele interage com os constituintes atmosféricos e rapidamente sofre ablação produzindo uma trilha de gás ionizado ao longo do caminho por onde passou. A trilha meteórica resultante, de tempo de vida curto, é levada pelo vento e pode ser detectada através de um radar meteórico. As informações da trilha meteórica detectada são utilizadas para medir os ventos na atmosfera e, através da medida da taxa de

expansão da trilha, podem-se determinar também as temperaturas dos níveis superiores.

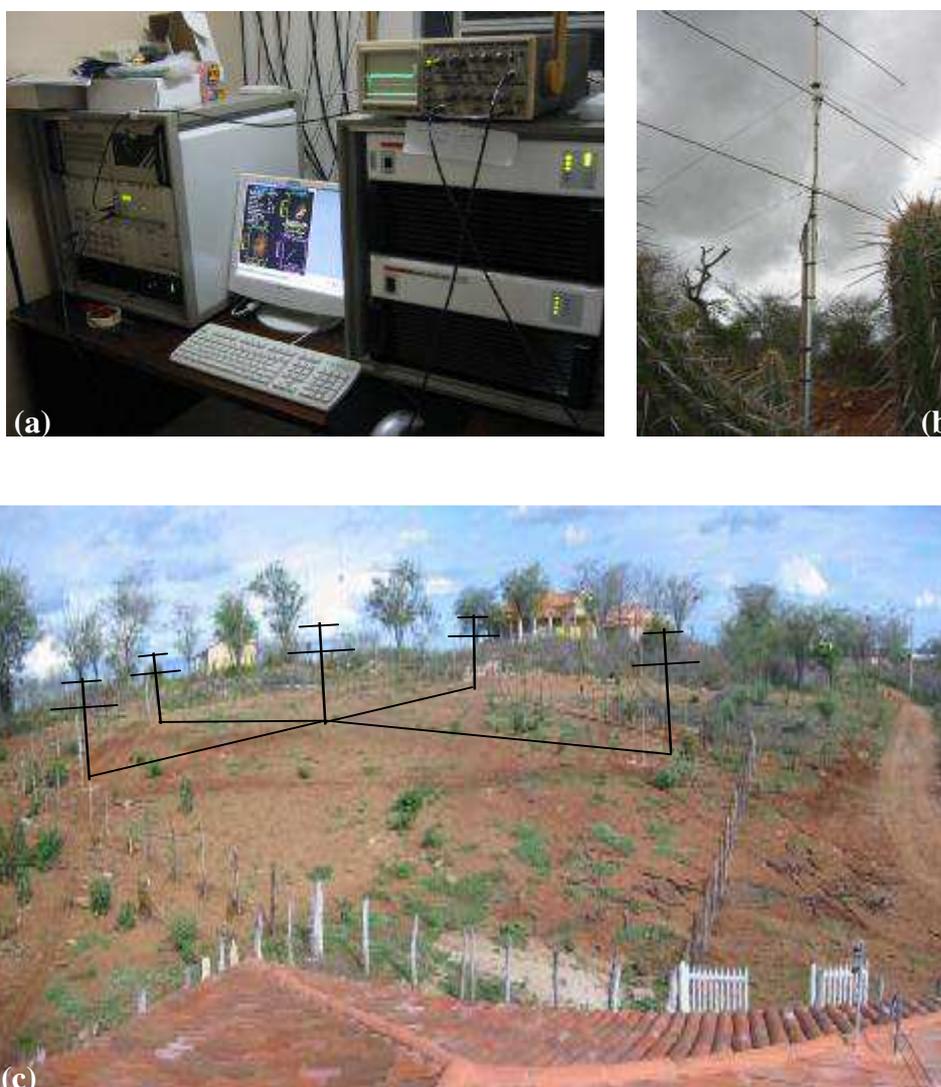
O sistema de radar meteorológico interferométrico VHF All-Sky (SKiYMET Meteor Radar System) é um receptor multicanal coerente de pulsos de radar, utilizando software e técnicas de cálculos sofisticados para adquirir, detectar, analisar e mostrar eventos meteorológicos. Os sistemas instalados em São João do Cariri-PB e em Cachoeira Paulista-SP operam continuamente com potência de pico de 12 kW e utilizam um arranjo de antenas Yagi para a transmissão e recepção de sinais com frequência de 35,24 MHz e taxa de repetição de 2144 pulsos por segundo. Na Figura 03, apresenta-se um diagrama esquemático do Sistema SKiYMET. Destaca-se o hardware (bloco escuro) e o diagrama em blocos do software.



**Figura 03** – Diagrama em blocos do Radar Meteorológico – SKiYMET. Destacam-se os componentes do hardware (parte superior mais escura da figura) e os componentes de software (parte inferior). (Fonte: Adaptação da Genesis Software Pty Ltd, 10 Marian St. North Adelaide SA 5006. Austrália. <http://www.gsoft.com.au>).

O radar em Terra transmite um pulso de energia eletromagnética através de uma antena. Esse pulso ocorre na forma de onda de rádio em Muito Alta Frequência (VHF). Ao atingir o alvo, parte da energia é refletida pela trilha meteórica e, em Terra, é detectada no conjunto de antenas receptoras. Como a trilha meteórica é transportada pelo vento, a frequência do sinal refletido para o radar sofre um desvio Doppler. Este desvio Doppler junto com o atraso do pulso refletido e o ângulo de chegada do eco permite determinar as componentes da velocidade do vento.

A detecção do meteoro é realizada através de dois processos sucessivos. Primeiro é feita a identificação do potencial do sinal através da análise de quadratura de fase. No segundo estágio, o sinal é detalhadamente examinado e confirmado como sinal meteórico ou não e, as características do sinal detectado, são armazenadas. Devido ao seu design, pode-se monitorar uma grande parte do céu simultaneamente, visto que o sistema tem capacidade de visada de todo céu. Na Figura 04 apresenta-se fotos do sistema SKiYMET de São João do Cariri-PB.



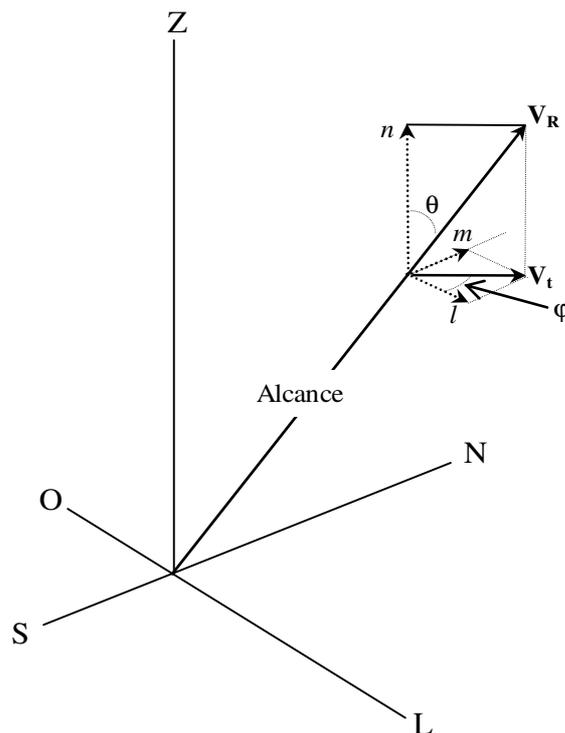
**Figura 04** – Radar Meteorológico – SKiYMET em São João do Cariri. (a) Equipamentos: transmissor, receptor e fonte da alimentação. (b) Antena transmissora yagi de três elementos. (c) Sítio de localização do Radar Meteorológico em São João do Cariri, com destaque para o arranjo das cinco antenas receptoras yagi de dois elementos. (Fotos cedidas pelo Observatório de Luminescência Atmosférica da Paraíba-OLAP).

### 4.3. Análise dos Ventos

A partir da observação de como a trilha meteórica se desloca no tempo, realizam-se vários cálculos com os dados dos ecos detectados e deduções são feitas sobre a velocidade e a direção do vento atmosférico na altitude na qual o meteoro foi observado. O vento é obtido através da medida da velocidade radial de todos os meteoros detectados. As velocidades radiais são determinadas através de funções de autocorrelação e correlação cruzada associadas aos meteoros detectados e da taxa de mudança de fase no intervalo próximo a zero. A metodologia utilizada para estimativa dos ventos horizontais é a mesma descrita por Lima (2004b).

### 4.4. Estimativa das Componentes do Vento

As informações disponibilizadas por um radar Doppler são registradas como uma função do alcance, e dos ângulos azimutal ( $\phi$ ) e zenital ( $\theta$ ). O diagrama da geometria usada para obter os ventos é mostrado na Figura 05, onde são indicados o alcance, a velocidade radial, e os ângulos azimutal e zenital.



**Figura 05** – Esquema da geometria usada para determinar a velocidade do vento radial com um radar Doppler.  
 FONTE: Adaptado de Lima (2004).

A estimativa das componentes dos ventos apresentada aqui segue o método descrito por Thayaparan (1995), com o vetor velocidade radial medido dado por:

$$\overset{1}{V}_{ri} = V_{ri} \overset{1}{i}_{ri}, \quad (40)$$

em que  $\overset{1}{i}_{ri} = l_i \hat{i} + m_i \hat{j} + n_i \hat{k}$  é o vetor unitário na direção radial que passa pelo  $i$ -ésimo ponto espalhado,  $l_i$ ,  $m_i$  e  $n_i$  são os cossenos diretores, sendo expressos por:

$$l_i = \text{sen}\theta_i \cos\varphi_i, \quad (41)$$

$$m_i = \text{sen}\theta_i \text{sen}\varphi_i, \quad (42)$$

$$n_i = \cos\theta_i, \quad (43)$$

O vento médio,  $\overset{1}{V}$ , é descrito teoricamente, em coordenadas cartesianas, como segue:

$$\overset{1}{V} = u\hat{i} + v\hat{j} + w\hat{k}, \quad (44)$$

em que  $u$ ,  $v$  e  $w$  representam as componentes zonal, meridional e vertical do vento, respectivamente. Adota-se que o valor do vento radial medido,  $V_{ri}$ , pode ser aproximado como sendo a projeção do vetor velocidade média,  $\overset{1}{V}$ , sobre o vetor da linha de visada do radar,  $\overset{1}{i}_{ri}$ , ou seja:

$$V_{ri} = \overset{1}{V} \cdot \overset{1}{i}_{ri}, \quad (45)$$

Para uma série de medidas ( $l_i$ ,  $m_i$  e  $n_i$ ) numa camada de espessura  $\Delta z$  num determinado intervalo de tempo  $\Delta t$ , tem-se  $i$ -valores que permitem buscar o melhor ajuste para  $u$ ,  $v$ , e  $w$ . Se o ajuste dos mínimos quadrados for adequado para todos os  $i$ -ésimos pontos, o valor residual,  $\varepsilon^2$ , entre os valores teóricos,  $\overset{1}{V}$ , e os valores medidos,  $V_{ri}$ , será:

$$\varepsilon^2 = \sum_{i=1}^N \left[ (ul_i + vm_i + wn_i) - V_{ri} \right]^2, \quad (46)$$

Logo, as melhores estimativas para as componentes  $u$ ,  $v$  e  $w$  serão aquelas para o menor valor residual  $\varepsilon^2$  e, isto, significa fazer:

$$\frac{\partial^2 \epsilon}{\partial u^2} = \frac{\partial^2 \epsilon}{\partial v^2} = \frac{\partial^2 \epsilon}{\partial w^2} = 0, \tag{47}$$

então, obtém-se o conjunto de equações:

$$\begin{cases} u \sum l_i^2 + v \sum l_i m_i + w \sum l_i n_i = \sum V_{ri} l_i \\ u \sum l_i m_i + v \sum m_i^2 + w \sum m_i n_i = \sum V_{ri} m_i, \\ u \sum l_i m_i + v \sum m_i n_i + w \sum l_i n_i = \sum V_{ri} n_i \end{cases} \tag{48}$$

Assim, para cada conjunto  $(l_i, m_i \text{ e } n_i)$  medido, pode-se resolver o sistema de equações (48) e ter-se-á um conjunto  $(u_i, v_i \text{ e } w_i)$  para os valores das componentes do vento e, portanto, produzem-se os arquivos com as séries desejadas de ventos meteorológicos.

Os radares utilizados nesta pesquisa apresentaram períodos de interrupções de funcionamento e de indisponibilidade dos dados. Nas tabelas<sup>5</sup> 01 e 02 estão representados os períodos nos quais as séries de dados de ventos meteorológicos, de São João do Cariri-PB e Cachoeira Paulista-SP, estavam disponíveis e sem problemas para análise (partes escuras).

**Tabela 01.** Séries de dados de ventos meteorológicos disponíveis, em São João do Cariri-PB, entre 2004 e 2008

Ano	Verão			Outono			Inverno			Primavera		
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
2004												
2005												
2006												
2007												
2008												

**Tabela 02.** Séries de dados de ventos meteorológicos disponíveis, em Cachoeira Paulista-SP, entre 2004 e 2008

Ano	Verão			Outono			Inverno			Primavera		
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
2004												
2005												
2006												
2007												
2008												

#### 4.5. Análise em Wavelets (Ondeletas)

O estudo de sinais não estacionários exige análise com abordagens matemáticas robustas para que se possam compreender os fenômenos físicos que estão agindo em qualquer sistema natural. Na análise de séries temporais o objetivo básico é o de aproximar uma função

<sup>5</sup> Os quadros não preenchidos indicam os períodos de indisponibilidades dos dados de ventos meteorológicos.

do tempo por uma combinação linear de harmônicos (Morettin, 1999). Uma destas ferramentas é a Transformada em Wavelets (Ondaletas)<sup>6</sup>, que permite analisar séries temporais obtidas de qualquer sistema físico. A Transformada em Wavelets pode ser aplicada nas mais diversas áreas do conhecimento, como por exemplo, nos estudos sobre turbulência atmosférica, processamento de sinais, assim como em sistemas hidrológicos. O uso desta ferramenta se faz necessário devido ao fato de que as séries temporais, tomadas de qualquer sistema físico, possuem características não estacionárias. Entendem-se, como características não-estacionárias, as séries temporais cujos momentos estatísticos (média, variância, etc.), variam em quaisquer segmentos tomados destas séries (Morettin, 1999).

Uma componente cossenoidal de uma onda plana pode ser descrita, de forma geral, como uma função do tipo:

$$f(t) = A \cos(\vec{k} \cdot \vec{r} \pm \omega t \pm \phi), \quad (49)$$

em que  $A$  é a máxima amplitude atingida pela onda e  $(\vec{k} \cdot \vec{r} \pm \omega t \pm \phi)$  é denominada de fase da onda. Na fase,  $\vec{k}$  é o vetor número de onda,  $\vec{r}$  é o vetor posição na direção de propagação da frente de onda,  $\omega$  é a frequência angular da onda e  $\phi$  é um ângulo de defasagem.

O conjunto composto pelas funções  $\cos(n\omega_o t)$  e  $\sin(n\omega_o t)$ , para  $n = 0, 1, 2, \dots$ , forma um conjunto ortogonal completo e, portanto, qualquer função matemática  $f(t)$  (uma função que descreva um grupo de ondas, por exemplo) pode ser representada em termos destas funções em qualquer intervalo  $\left(t_0, t_0 + \frac{2\pi}{\omega_o}\right)$  (Bloomfield, 1976).

Antes de 1930, Joseph Fourier, com sua teoria de análise em frequência afirmou que qualquer função periódica,  $f(t)$ , pode ser expressa, no intervalo  $(t_0 < t < t_0 + T)$ , por um somatório de funções senos e cossenos na seguinte forma:

$$f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \cos(n\omega_o t) + b_n \sin(n\omega_o t)], \quad (50)$$

em que  $a_0$ ,  $a_n$  e  $b_n$  são constantes dadas por:

---

<sup>6</sup> O vocábulo “ondaleta” é utilizado por Morettin (1999) dada a conotação diminutiva do termo original “ondellete”, do francês (cuja correspondência em inglês é wavelet). Embora o vocábulo “ondaleta” seja utilizado, neste trabalho, optamos pelo vocábulo utilizado por Morettin.

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} f(t) dt, \quad (51)$$

$$a_n = \frac{2}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} f(t) \cos(n\omega_0 t) dt, \quad (52)$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} f(t) \text{sen}(n\omega_0 t) dt. \quad (53)$$

com  $L$  sendo o período genérico da função  $f(t)$ .

Portanto, pode-se descrever qualquer onda mais complexa através de suas diversas componentes de frequências (harmônicas). O trabalho matemático maior consiste na determinação dos coeficientes  $a_0$ ,  $a_n$  e  $b_n$ . Assim cada harmônico se constitui numa onda plana de frequência particular cujo valor é um múltiplo inteiro da frequência da onda fundamental.

#### 4.5.1. A Transformada de Fourier (TF)

A Transformada de Fourier (TF) é uma ferramenta que permite determinar a contribuição de cada componente seno e cosseno presente na energia total da série temporal. O par de Transformadas de Fourier é dado como:

(a) Transformada inversa de Fourier de  $F(\omega)$ :

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F(\omega) e^{i\omega t} d\omega = F^{-1}[F(\omega)], \quad (54)$$

(b) Transformada direta de Fourier de  $f(t)$ :

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-i\omega t} dt, = F[f(t)], \quad (55)$$

Em que  $\omega$  é a frequência e  $f(t)$  é a série temporal. Assim, uma função não periódica  $f(t)$  pode ser representada em termos de funções exponenciais em todo o intervalo  $(-\infty < t < \infty)$ . A equação (54) representa como uma soma contínua de funções exponenciais com

frequências compreendidas no intervalo  $(-\infty < \omega < \infty)$ . As amplitudes das componentes de qualquer frequência  $\omega$  são proporcionais a  $F(\omega)$ . Portanto,  $F(\omega)$  representa o espectro de frequências e é chamada de função densidade espectral. Neste caso, diferentemente de uma função periódica que possui um espectro discreto de frequências, o espectro para uma função não-periódica é contínuo. A Transformada de Fourier é uma ferramenta que decompõe determinado sinal nas suas componentes. A representação no domínio do tempo especifica uma função em cada instante de tempo, enquanto que a representação no domínio da frequência especifica as amplitudes relativas das componentes de frequência da função. Em geral a função  $F(\omega)$  é complexa e necessita de dois gráficos para sua representação gráfica (Bloomfield, 1976). Sendo a função  $F(\omega)$  dada por:

$$F(\omega) = |F(\omega)|e^{j\theta(\omega)}, \quad (56)$$

então,  $F(\omega)$  é representada por um gráfico da amplitude  $|F(\omega)|$  e um gráfico da fase  $\theta(\omega)$ .

#### 4.5.2. Convolução

A convolução (operação representada pelo símbolo: \*) é uma das mais eficazes ferramentas na análise em frequências. Ela é um tipo especial de multiplicação e, dadas duas funções  $f_1(t)$  e  $f_2(t)$ , a convolução, de forma geral, é definida através da seguinte integral:

$$f_1(t) * f_2(t) = f(t) = \int_{-\infty}^{\infty} f_1(t)f_2(t-\tau)d\tau, \quad (57)$$

A convolução pode ser:

- no tempo, se:  $f_1(t) \rightarrow F_1(\omega)$  e  $f_2(t) \rightarrow F_2(\omega)$ , pode-se mostrar que:

$$f_1(t) * f_2(t) = \int_{-\infty}^{\infty} f_1(t)f_2(t-\tau)d\tau \leftrightarrow F_1(\omega)F_2(\omega). \quad (58)$$

- na frequência, se:  $f_1(t) \rightarrow F_1(\omega)$  e  $f_2(t) \rightarrow F_2(\omega)$ , pode-se mostrar que:

$$f_1(t)f_2(t) \leftrightarrow \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F_1(u)F_2(\omega-u)du, \quad (59)$$

Ou seja:

$$f_1(t)f_2(t) \leftrightarrow \frac{1}{2\pi}[F_1(\omega) * F_2(\omega)]. \quad (60)$$

Portanto, tem-se que a convolução de duas funções no domínio do tempo é equivalente à multiplicação dos seus espectros no domínio da frequência e a multiplicação de duas funções no domínio do tempo é equivalente a convolução dos seus espectros no domínio da frequência. Na convolução de  $f_1(t)$  com  $f_2(t)$ , a função  $f_1(t)$  representa uma série temporal qualquer e  $f_2(t)$  representa um filtro cuja função principal é identificar e seleccionar o período de cada uma das componentes presentes na série temporal (Bolzan, 2004).

#### 4.5.3. A Transformada Janelada de Fourier (TF)

Na natureza a maioria das séries temporais é não estacionária. Por outro lado, a Transformada de Fourier (TF) se aplica bem às séries temporais estacionárias. Em 1946, essa limitação de aplicabilidade da TF em séries temporais não estacionárias foi percebida por Gabor. Ele procurou modificar a Transformada de Fourier da seguinte forma: dividiu uma série temporal em vários segmentos de comprimentos fixo, depois aplicou a TF em cada um desses segmentos separadamente. Este procedimento é extremamente importante porque ao separar a série temporal em segmentos, inseriu-se automaticamente uma informação no tempo da ação de cada componente da série, comportamento este impossível pela TF aplicada a toda série temporal. A idéia de Gabor ficou conhecida como a Transformada de Fourier Janelada (TFJ) (Morettin, 1999).

#### 4.5.4. A Transformada em Wavelets (Ondaletas)<sup>7</sup> de Morlet

A transformada de Fourier é uma ferramenta amplamente utilizada para muitos fins científicos, mas ela é adequada apenas para o estudo de sinais estacionários onde todas as frequências possuem um tempo de coerência infinito. A análise de Fourier traz apenas informação global que não são suficientes para detectar padrões compactos. Embora a Transformada de Fourier Janelada (TFJ) de Gabor tenha dado uma contribuição enorme para

---

<sup>7</sup> Nesta Tese, ambos os termos “ondaleta” e “wavelet” são utilizados indistintamente com o propósito de adequar este texto aos textos originais utilizados.

o estudo de séries temporais não estacionárias, havia dois problemas: (i) a janela da TFJ é fixa, não podendo ser modificada após o início do processo de aplicação e, portanto, tornando-se difícil, através dela, capturar as componentes de alta e de baixa frequência simultaneamente (Morettin, 1999) e; (ii) as funções trigonométricas possuem energia infinita, ou seja, os limites destas funções estão entre  $-\infty$  e  $\infty$ .

No início da década de 1980, Jean Morlet percebeu estes dois problemas da TFJ e apresentou a transformada em ondaletas, a fim de ter uma coerência tempo proporcional ao período. Pode-se pensar ondaletas como alternativas a outros sistemas, de funções, usados como base para representação de funções pertencentes a certos espaços. Entretanto, as ondaletas apresentam a vantagem de que elas funcionam como uma janela que diminui para capturar as componentes de altas frequências e aumenta para capturar as componentes de baixas frequências. Morlet e Alex Grossman buscaram funções matemáticas base,  $\psi$ , que fossem como pequenas ondas que possuíam energia finita e cuja melhor maneira desta base cobrir todo o eixo dos reais era através de translações da base em todo o comprimento da série temporal. Ao reunir estas duas propriedades, dilatação e translação, em um único protótipo de função base, chegaram às chamadas funções ondaletas, onde as dilatações e as translações são dadas por duas variáveis,  $j$  e  $k$ , respectivamente (Morettin, 1999; Bolzan, 2004).

O termo ondaleta ou ondeleta refere-se a um conjunto de funções com forma de pequenas ondas geradas por dilatações,  $\psi(t) \rightarrow \psi(2t)$ , e translações,  $\psi(t) \rightarrow \psi(t+1)$ , de uma função base geradora simples  $\psi(t)$ , a ondaleta-mãe. Logo, através da ondaleta-mãe, pode-se gerar as chamadas ondaletas filhas (Bolzan, 2004). A função ondaleta-mãe é expressa como:

$$\Psi_{a,b}(x) = |a|^{-1/2} \Psi\left(\frac{x-b}{a}\right), \quad (61)$$

com:  $a, b \in \mathbb{R}$ ,  $a \neq 0$ . Em geral, consideram-se valores especiais para  $a$  e  $b$ :  $a = 2^{-j}$ ,  $b = k2^{-j}$  e  $j, k \in \mathbb{R}$ .

A Transformada em Ondaletas  $W_x(a, b)$  de um sinal contínuo no tempo  $x(t)$  é definida como:

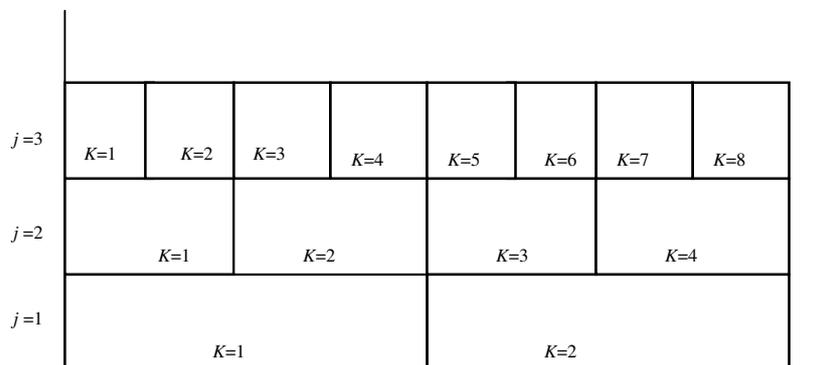
$$W_x(a, b) = |a|^{-1/2} \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt. \quad (62)$$

A Transformada em Ondaletas é calculada como o produto escalar de uma função

$x(t)$  com uma função  $\psi(t)$  que é transladada e escalonada. A idéia central da análise em wavelets consiste em decompor um sinal em diferentes níveis de resolução, processo conhecido como Multiresolução. A representação de Multiresolução fornece uma moldura hierárquica simples para interpretação de informações da série-temporal. Com diferentes resoluções, os detalhes de um sinal geralmente caracterizam diferentes estruturas físicas do mesmo. Com uma resolução mais grosseira, estes detalhes geralmente caracterizam as grandes estruturas que fornecem o contexto. Com o aumento da resolução, obtém detalhes mais finos.

O processo de decomposição ocorre da seguinte forma: Em uma série-temporal com um comprimento de  $s$  pontos. Coloca-se este número como potência de 2, tal que  $s = 2^n$ . Por exemplo, se  $s = 1024$  pontos, então  $1024 = 2^n \rightarrow n = 10$ , Isso significa que existem 10 escalas ou frequências que se pode encontrar através das wavelets. A primeira escala que a função wavelets irá atuar é na escala de  $n - 1 = 9$ , e isto implica que a série-temporal será dividida em duas partes iguais, cada uma com  $n - 1 = 9 \rightarrow 2^9 = 512$  pontos. A função ondaleta-mãe será comprimida pela metade e aplicada na primeira metade da série-temporal. Em seguida, será transladada para a segunda parte da mesma série-temporal (Bolzan, 2004).

Para o próximo nível de resolução  $n - 2 = 8 \rightarrow 2^8 = 256$  pontos. Isto equivale a dividir pela metade cada uma das duas séries anteriores. Com isso, a função ondaleta deve também ser novamente comprimida pela metade de modo a caber dentro do primeiro segmento da série de 256 pontos para, em seguida, ser translada para os demais segmentos da série-temporal. Este processo se repetirá até a última escala  $n = 1 \rightarrow 2^1 = 2$  pontos. Isto proporcionará um diagrama que é conhecido como periodograma de ondaleta, como mostrado esquematicamente na Figura 06.



**Figura 06** – Esquema mostrando o resultado da análise de multiresolução dada pela função ondaleta (periodograma em ondaletas).

Existem duas classes de funções ondaletas, as contínuas e as discretas, cada qual útil para determinadas aplicações. As ondaletas discretas são utilizadas para a decomposição e filtragem de qualquer série temporal. A sua aplicabilidade neste aspecto advém do fato de que estas ondaletas não provocam redundâncias de coeficientes entre escalas (frequências). As ondaletas contínuas são geralmente utilizadas para visualizar, através de um periodograma, a relação existente entre as componentes de diferentes frequências em função da escala temporal da série temporal. As ondaletas contínuas mais comuns são: a Morlet e a Chapéu Mexicano, dentre outras (Morettin, 1999).

Do ponto de vista físico, em um sistema natural qualquer, é importante se buscar relações entre os diversos fenômenos físicos atuantes neste sistema. Neste caso, as ondaletas contínuas propiciam um meio matemático adequado para se buscar estas relações. O diagrama de uma série temporal é construído de forma que: o eixo das ordenadas é a escala das frequências, o eixo das abscissas é a escala do tempo e, por fim, a representação da intensidade de energia, a qual é realizada através de uma escala de cores ou de cinza (Morettin, 1999).

#### **4.6. Análise Biespectral**

Por causa dos termos não lineares advectivos nas equações dinâmicas gerais dos movimentos atmosféricos, um possível processo, de interação linear onda-onda ou onda-maré, identificado como um acoplamento quadrático não pode ser examinado através de análise espectral tradicional. Isto se deve ao fato de que a análise espectral tradicional é baseada principalmente no espectro de potência, onde a relação de fases entre componentes é suprimida; a análise espectral tradicional não provê informações sobre possíveis interações entre ondas como o faz a análise biespectral. Se um processo sob consideração é não estacionário, ou se existe interação entre diferentes frequências, a análise biespectral pode ser usada. O biespectro retém informações da fase e, através dele, é possível identificar processos de interação não linear que podem gerar acoplamentos de fase (Pancheva, 2000).

O biespectro é equivalente à transformada de Fourier bidimensional da seqüência de momentos de terceira ordem. Ele dá uma medida das interações multiplicativas das componentes de frequências. O biespectro representa a contribuição do produto médio entre três componentes de Fourier onde uma das frequências é igual à soma (ou diferença) das outras duas. O biespectro será diferente de zero apenas quando as condições de ressonância

forem totalmente preenchidas (Pancheva, 2000).

Estimação do espectro de potência tem sido utilizada para determinar a potência de cada componente espectral de uma série temporal de um sinal e é equivalente a informação contida na autocorrelação do sinal. Informações concernentes a fase associada a cada componente é suprimida. Esta informação de fase associada pode ser utilizada para indicar a relação entre cada componente de frequência. Espectro de ordem superior ou poliespectro preserva a informação da fase e pode ser utilizado para discriminar entre acoplamento não linear de ondas e ondas espontaneamente excitadas (Clark e Bergin, 1997).

Ondas espontaneamente excitadas são geradas independentemente de outras frequências e, portanto, tem amplitudes e fases independentes. O biespectro é uma média do produto conjunto de três componentes espectrais e pode revelar informações sobre a coerência de fase das três componentes. Em particular, o biespectro verifica a coerência de fase de todo conjunto das três frequências, em que duas das frequências se adicionam ou se subtraem para produzir a terceira. Se a soma das fases associadas com as três frequências é sempre constante cada vez que ela ocorre, então o biespectro irá resultar num grande valor. O biespectro apresenta um resultado não nulo apenas quando as três componentes têm acoplamento de fases. Uma dificuldade com o biespectro é que intensas componentes espectrais com moderada coerência de fase ou mistura pode encobrir componentes fracas com alta coerência de fases. Para minimizar este problema, sugere-se o uso do espectro bi-coerente quadrático, o qual é basicamente a magnitude quadrática do biespectro normalizado dividido pela potência associada com as três ondas. Então, o espectro bi-coerente quadrático estima a fração da potência da mistura quadrática da onda gerada (Clark e Bergin, 1997).

Para entender o biespectro e a motivação por trás desta técnica, o conceito de acoplamento entre três ondas, conhecido como mistura ou batimento, deve ser compreendido. Uma não linearidade quadrática irá relacionar três componentes de onda de forma que:

$$X_m = \sum_{k+l=m} A_{k,l} X_k X_l + \varepsilon, \quad (63)$$

em que  $X_k$  e  $X_l$  são as componentes espectrais complexas de Fourier em  $\omega_k$  e  $\omega_l$  com fases  $\theta_k$  e  $\theta_l$ . O termo  $A_{k,l}$  representa o coeficiente de acoplamento e é dependente das propriedades do sistema não linear e, o termo  $\varepsilon$ , representa algum erro associado com este modelo. Neste sistema  $X_k$  e  $X_l$  irão interagir para criar a terceira componente de onda  $X_m$  onde  $\omega_m = \omega_k \pm \omega_l$  e  $\theta_m = \theta_k \pm \theta_l$ . Nota-se que a equação (63) é a convolução na forma

discreta. O biespectro é definido como:

$$B(k, l) = \langle X_k X_l X_m^* \rangle, \quad (64)$$

em que  $X_m^*$  denota o complexo conjugado de  $X_m$ . Pode-se notar como isto leva em conta a mistura entre duas frequências. Se  $\omega_k$ ,  $\omega_l$  e  $\omega_{k+l}$  são independentes, cada uma terá uma fase aleatória e independente (uma em relação às outras). Portanto, a soma de fases das três frequências será aleatoriamente distribuída de  $-\pi$  a  $\pi$ . Então, calculando a média, o biespectro será aproximadamente zero. Entretanto, se  $\omega_k$ ,  $\omega_l$  e  $\omega_{k+l}$  estiverem relacionadas através de batimento, suas fases não serão independentes e, portanto, a média irá produzir resultado diferente de zero. Esta propriedade pode ser usada para determinar se  $\omega_k$ ,  $\omega_l$  e  $\omega_{k+l}$  são não linearmente acopladas.

O biespectro é computacionalmente potente quando se analisa um sinal de duração significativa. Entretanto, observando-se alguma propriedade de simetria do biespectro, assim como limitações físicas devido à amostragem, pode-se reduzir o número de cálculos necessário para o biespectro. Uma limitação colocada na região de cálculo é devida contaminação (aliasing) de frequências. Nenhuma componente espectral pode ser maior que a frequência de Nyquist  $f_n = \frac{1}{2} f_s$ , onde  $f_s$  é a frequência de amostragem. Portanto, a soma de duas componentes misturadas,  $\frac{\omega_m}{2\pi}$ , não pode ser maior que a frequência de Nyquist.

#### 4.7. Periodograma de Lomb-Scargle

O periodograma é uma técnica de análise de uma série temporal de dados em que se representa a Densidade de Potência Espectral (PSD) de cada componente de frequência, sobre um segmento da serie temporal. A contribuição espectral, em cada frequência ou período, é representada por picos. Tradicionalmente a PSD é calculada através da transformada de Fourier, sendo que neste caso ela é proporcional ao quadrado da amplitude do sinal em cada frequência presente no espectro. Mas, para que essa técnica seja aplicada é necessário que os dados do sinal estejam igualmente espaçados, caso contrário o cálculo da Transformada de Fourier falha (Tokumoto, 2007).

Nas situações em que os dados igualmente espaçados não podem ser obtidos, um método bastante utilizado e o periodograma de Lomb-Scargle, cujas bases teóricas são

encontradas nos trabalhos de Lomb (1976) e Scargle (1982). Neste caso, a definição do periodograma,  $P_X(\omega)$ , como uma função da frequência,  $\omega$ , para uma serie temporal  $X(t_j)$ , onde  $j = 1, 2, \dots, N_0$ , é:

$$P_X(\omega) = \frac{1}{2} \left\{ \frac{\left[ \sum_{j=1}^{N_0} X(t_j) \cos \omega(t_j - \tau) \right]^2}{\sum_{j=1}^{N_0} \cos^2 \omega(t_j - \tau)} + \frac{\left[ \sum_{j=1}^{N_0} X(t_j) \text{sen} \omega(t_j - \tau) \right]^2}{\sum_{j=1}^{N_0} \text{sen}^2 \omega(t_j - \tau)} \right\}, \quad (65)$$

O termo  $\tau$  pode ser definido através da expressão:

$$\text{tg}(2\omega\tau) = \frac{\left( \sum_{j=1}^{N_0} \text{sen} 2\omega t_j \right)}{\left( \sum_{j=1}^{N_0} \cos 2\omega t_j \right)}, \quad (66)$$

A escolha de  $\tau$  torna a estimativa do periodograma equivalente a um ajuste pelo método dos mínimos quadrados de uma função  $h'(t)$ , em senos e co-senos, em uma dada frequência  $\omega$  (Lomb, 1976),

$$h'(t) = A \cos(\omega t) + B \text{sen}(\omega t), \quad (67)$$

Para o cálculo do nível de confiança Scargle (1982) e Hornes & Baliunas (1986) consideraram que os dados são valores aleatórios e independentes, ou seja, constituem um ruído Gaussiano puro. Assim, a probabilidade de se observar picos com alturas maiores do que um nível  $z$ , sendo consideradas  $M$  frequências independentes, é dada pela expressão:

$$P(> z) = 1 - (1 - e^{-z})^M \quad (68)$$

#### 4.8. Análise Harmônica

A análise harmônica é baseada no pressuposto de que uma oscilação periódica complexa pode ser produzida pela superposição de ondas simples que oscilam sobre um nível médio. As frequências dessas ondas são harmônicas de uma frequência fundamental. A Equação (69) mostra a representação da onda reconstruída, em que  $A_n$ , é a amplitude e  $\left( \frac{2m\pi t_i}{T} + \phi_n \right)$  é a fase da  $n$ -ésima componente.

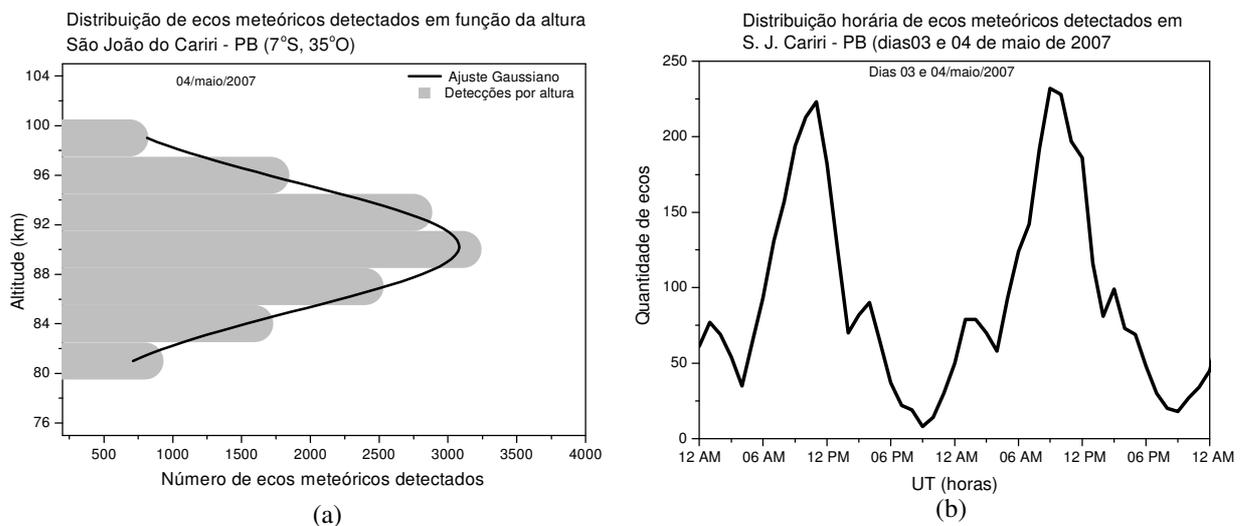
$$X(t) = A_0 + \sum_{i=1}^k A_n \cos \left( \frac{2m\pi t_i}{T} + \phi_n \right), \quad \text{com } n = 1, 2, 3, \dots \quad (69)$$

## 5 - RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1. Fluxo típico de meteoros detectado pelo radar de S. J. do Cariri – PB

Apresenta-se na Figura 07(a), para efeitos de ilustração, nas sete camadas atmosféricas centradas em 81, 84, 87, 90, 93, 96 e 99 km, os números de eventos meteorológicos, a cada 4 km de altitude, detectados sem ambiguidade pelo radar meteorológico em São João do Cariri-PB no dia 04 de maio de 2007. Observa-se que a distribuição em altitude, das ocorrências de meteoros, segue uma distribuição gaussiana com máximo em torno de 90 km.

O número de meteoros detectados apresenta variações em curta e longa duração. A taxa de ecos meteorológicos amostrados em função da hora do dia, obtidos nos dias 03 e 04 de maio de 2007, está representada na Figura 07(b). Os máximos de detecção são observados em torno das 6 horas no horário local (LT) ou 9 horas no horário universal (UT) e os mínimos em torno das 18 horas LT ou 21 horas UT.



**Figura 07** - Fluxo típico de meteoros detectado pelo radar em São João do Cariri-PB. (a) distribuição vertical de ocorrências de meteoros não ambíguos, registrados no dia 04 de maio de 2007. (b) taxa de ecos meteorológicos amostrados em função da hora do dia, para os dias 03 e 04 de maio de 2007.

A variação diária de eventos detectados é explicada em termos de efeitos de geometria. Devido ao seu movimento orbital, da ordem de 30 km/s, a face da Terra na vanguarda da órbita está invadindo a nuvem de meteoróides esporádicos, o que ocorre em torno das 6 horas no horário local, proporcionando a observação máxima de eventos meteorológicos neste horário e a observação mínima 12 horas após. Normalmente a razão da

variação é de 5 para 3, e espera-se que a mesma seja maior na região equatorial e menor nos pólos (McKinley, 1961; Ceplecha *et al.*, 1998). Dada a inclinação da Terra em relação à eclíptica, considerando uma distribuição isotrópica dos meteoróides esporádicos, espera-se uma quantidade maior de eventos meteóricos durante o equinócio de outono e menor atividade durante a primavera. Porém este modelo não explica o comportamento observado no hemisfério sul, sendo necessário considerar outros fatores tais como uma variação na densidade e distribuição de raios durante o ano (McKinley, 1961).

A partir da Figura 07(a), observa-se que a maior taxa de ecos meteóricos, na região em estudo, ocorre para a altitude de 90 km, fornecendo, portanto, maior quantidade de dados, mais confiabilidade e a possibilidade de se obter séries de dados completas. Então, esta altitude se mostra como mais interessante para realização desta pesquisa.

A idéia que se adotou foi de realizar as análises dos dados por estação do ano. A estação de verão do Hemisfério Sul (HS) ocorre entre o final de um ano e o início do outro, as séries de dados para esta estação inicia-se em dezembro de um ano e se estende ao ano subsequente. Como se optou por representar o dia do ano em lugar do dia do mês, o número de dias para cada série de dados nesta estação ultrapassa o valor de 365.

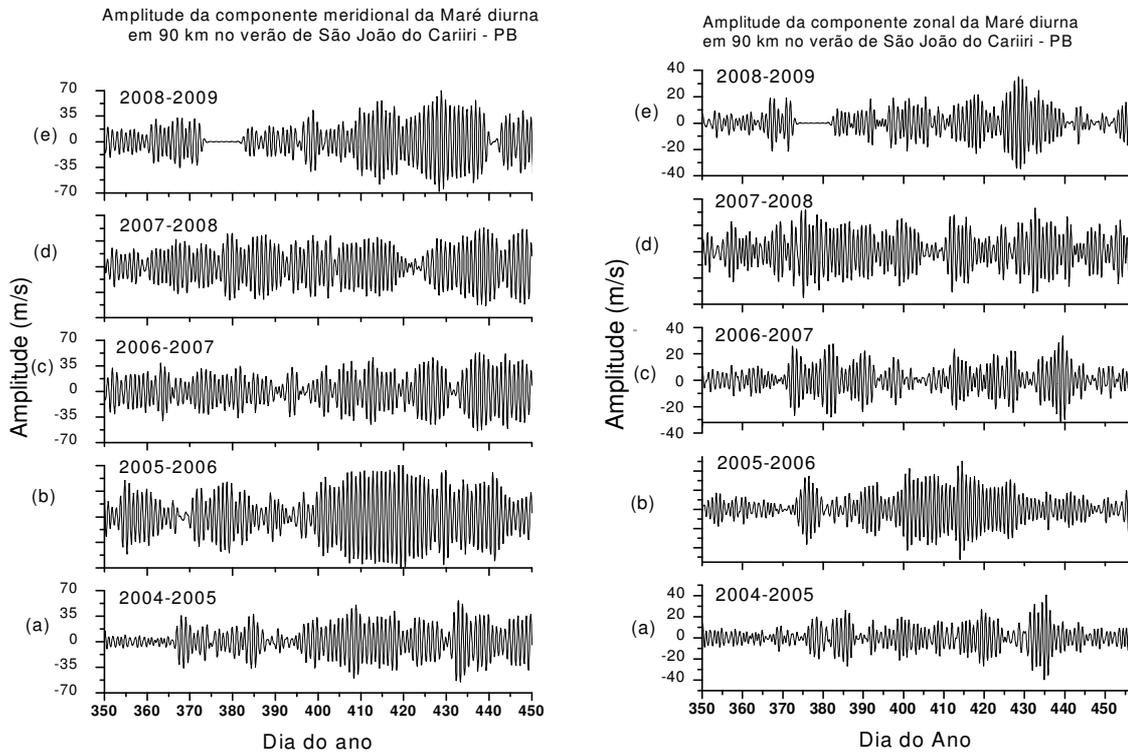
## **5.2. Evidências de interação não linear entre a maré atmosférica e Ondas Planetárias presentes nos ventos meteorológicos em São João do Cariri-PB (7,5°S; 36,5°O)**

### **5.2.1. Estação de Verão**

Inicia-se esta seção com a apresentação dos resultados do comportamento das amplitudes da maré atmosférica diurna nos ventos meteorológicos para os verões entre os anos de 2004 e 2008, Figura 08, nas componentes meridional (esquerda) e zonal (direita). Os resultados foram obtidos aplicando-se um filtro Passa Banda às séries de dados de ventos meteorológicos de São João do Cariri-PB.

A partir da base, Figura 08(a), até o topo, Figura 08(e), respectivamente, encontram-se os resultados, na altitude de 90 km, para os verões: (a) 2004-2005 (dez/2004-mar/2005), (b) 2005-2006 (dez/2005-mar/2006), (c) 2006-2007 (dez/2006-mar/2007), (d) 2007-2008 (dez/2007-mar/2008) e 2008-2009 (dez/2008-mar/2009). Estes gráficos possuem em suas ordenadas os valores das amplitudes e nas abscissas o dia do ano. Os gráficos foram construídos na mesma escala para permitir avaliar o comportamento da maré durante cada verão, entre os verões e em períodos de Ondas Planetárias.

Analisando-se de forma global todos os gráficos da Figura 08, é possível se observar que o comportamento da amplitude da maré é diferente em ambas as direções zonal e meridional dos ventos. Para cada verão, a amplitude varia bastante ao longo da estação mostrando intervalos de maiores e menores intensidades. Observa-se também que, dentro destes períodos de maiores e menores intensidades, a amplitude também apresenta variabilidade. Estas alternâncias de amplitudes são mais evidentes na componente zonal. Assim, a maré apresenta claramente variabilidade de curta duração dentro da estação. Observa-se ainda que, entre os verões, a maré também apresenta uma variabilidade interanual. Destaca-se que no início do período de verão a intensidade da maré, para ambas as componentes, é sempre menor que para o restante desta estação. Particularmente ela é muito baixa nos verões de: (a) 2004-2005 nas componentes meridional e zonal, (b) 2005-2006 e (c) 2006-2007 na componente zonal. Todos os gráficos obtidos com os dados filtrados mostram que a maré apresenta um comportamento com modulação em amplitude.



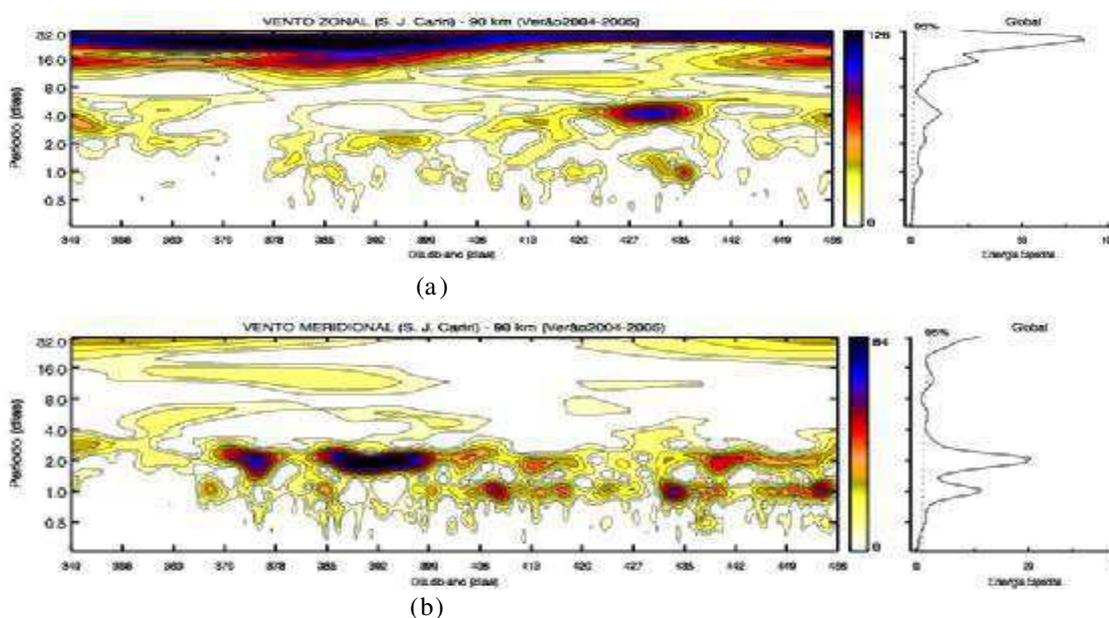
**Figura 08** – Gráficos do comportamento das amplitudes da Maré Atmosférica diurna nos ventos meteorológicos em São João do Cariri-PB. Componente meridional (esquerda) e componente zonal (direita) em 90 km. Verões de (a) 2004-2005; (b) 2005-2006; (c) 2006-2007; (d) 2007-2008; (e) 2008-2009

### 5.2.1.1. Verão 2004-2005

Para se identificar e estudar as intensidades das oscilações presentes nos dados de ventos, as épocas de ocorrências das oscilações e a relevância de cada uma dentro da série, aplicou-se a análise em wavelets. A Figura 09 mostra os resultados da análise em wavelets, para o verão que se inicia em dezembro de 2004, na componente zonal, Figura 09(a)-direita, e componente meridional, Figura 09(a)-esquerda. Os gráficos possuem no eixo das ordenadas os valores, em escala logarítmica, dos períodos (em dias) das oscilações presentes nas séries de dados estudadas e, nas abscissas tem-se os dias do ano. Estes gráficos possuem uma escala de cor para identificar a intensidade (em  $m^2/s^2$ ) da energia espectral da oscilação presente. A escala, normalizada, vai desde a cor branca (indicando não haver densidade de energia) até a cor preta (indicação da presença de uma grande densidade espectral de energia). À direita, do gráfico do espectro em wavelets, encontra-se o gráfico que representa o Espectro Global de Energia. Nele são mostrados os picos das periodicidades significativas que estão presentes no intervalo de estudo e quão intensos são suas energias espectrais. A linha pontilhada indica um nível de significância de 95%. Isto dá a informação da periodicidade que apresenta 95% de

confiança de que sua energia espectral está presente na série de dados analisada e, nesta Tese, considera-se como um pico significativo aquele que ultrapassar esta linha.

Um detalhe importante no gráfico do espectro em wavelets está no fato de que as periodicidades encontradas são identificadas através de núcleos. Estes núcleos refletem um compromisso estabelecido pelo princípio da incerteza. A representação simultânea da localização temporal da densidade espectral de energia com os períodos das oscilações não resulta num ponto, mas numa área. Isto ocorre porque as grandezas energia e tempo são conjugadas e, portanto, suas representações simultâneas exigem uma incerteza mínima. Além disto, as periodicidades não correspondem a uma única frequência, mas, a bandas de frequências.



**Figura 09** - Espectros de energia em wavelets nos ventos meteorológicos em São João do Cariri-PB no verão 2004-2005. (a) zonal; e (b) meridional; e da Energia Espectral Global em 90 km.

A partir da análise da Figura 09(a), correspondente a componente zonal, identifica-se a presença das seguintes periodicidades: oscilações intensas (núcleos entre o vermelho e o azul) com períodos próximos a 16 e 27 dias durante praticamente todo o verão. A periodicidade de ~27 dias corresponde ao período de rotação do sol (aproximadamente 27,8 dias). A periodicidade de ~16 dias é mais intensa nos intervalos entre, aproximadamente, os dias 374 (08/jan) e 404 (07/fev/2005) e entre os dias 424 (27/fev) e 441 (17/mar/2005). No intervalo entre os dias 420 (23/fev) e 423 (26/fev/2005), ela não apresenta densidade de energia espectral intensa. Neste último intervalo identifica-se uma oscilação intensa com período de ~10 dias entre aproximadamente os dias 424 (27/fev) e 441 (17/mar/2005).

A maré atmosférica diurna se revela com maior intensidade em torno dos dias 386 (20/jan), 398 (01/fev), 419 (22/fev), 435 (10/mar/2005). Estes eventos também são identificados através dos gráficos dos dados filtrados, Figura 08(a)-direita. Embora a maré consista num evento de ocorrência diária, os resultados das análises em wavelets mostram intervalos em que sua energia não é detectada, principalmente na componente zonal. Uma justificativa possível para este comportamento é que a maré na componente zonal se apresenta sempre menos intensa que sua componente meridional. Isto se deve ao fato de que a dinâmica das oscilações, nesta direção, é mais intensa e se comporta com variações mais rápidas, devido ao vento zonal ser mais perturbado que o vento meridional. Portanto, detectar a maré diurna na componente zonal, torna-se mais complicado. Por outro lado, as oscilações de períodos mais longos são mais facilmente detectadas nesta componente, como é o caso das ondas de ~6,5, ~10, ~16 e ~27 dias. Além do mais, as intensidades das oscilações no espectro em wavelets são normalizadas pela periodicidade de mais alta intensidade e, isto, faz com que a revelação da presença da densidade de energia espectral para a maré seja minimizada no espectro zonal.

Ainda com relação às periodicidades observadas, encontra-se uma oscilação menos intensa, com período de ~5 dias, no intervalo entre os dias 358 (23/dez/2004) e 367 (01/jan/2005) e mais intensa no intervalo entre os dias 416 (18/fev) e 438 (14/mar/2005). Uma periodicidade bastante intensa, de ~4 dias, encontra-se entre os dias 423 e 437. Identificam-se também núcleos de QTDW no intervalo entre os dias 386 (20/jan) e 402 (04/fev/2005).

No espectro meridional, Figura 09(b), identifica-se energia espectral, na periodicidade de ~27 dias, entre os dias 349 (14/dez/2004) e 392 (25/jan/2005) e entre os dias 422 (21/fev) e 456 (30/mar/2005). Oscilações com período de ~6,5 dias são observadas entre os dias 356 (21/dez/2004) e 406 (09/fev/2005) e entre os dias 420 (27/fev) e 428 (02/mar/2005). O núcleo de maior intensidade desta oscilação localiza-se entre os dias 358 (23/dez/2004) e 370 (04/jan/2005). O núcleo para a periodicidade de ~4 dias não aparece na componente meridional sugerindo que esta periodicidade é uma onda ultra-rápida de Kelvin (Alves, 2007 e Lima *et al.*, 2008).

De forma bastante intensa, localizam-se núcleos correspondentes às oscilações de QTDW. Esta oscilação encontra-se presente durante praticamente todo o verão. Particularmente, ela apresenta sua maior intensidade nos intervalos entre os dias 370 (04/jan) e 410 (13/fev/2005) e entre os dias 435 (10/mar) e 456 (30/mar/2005). Estas observações concordam com estudos que afirmam que QTDW é uma característica da estação de verão em

ambos os hemisférios e atinge seus máximos após os solstícios e para alturas entre 80 e 95 km (Salby, 1981; Plumb *et al.*, 1987; Thayaparan *et al.*, 1997; Walterscheid & Vincent, 1996).

Núcleos correspondentes a maré diurna são observados no intervalo entre o dia 366 e o final da estação. Os núcleos mais intensos desta periodicidade encontram-se em torno dos dias 409 (12/jan), 432 (07/mar) e 456 (30/mar/2005). Observa-se ainda uma relação de anticorrelação entre as amplitudes da QTDW e da maré. Nos períodos em que a amplitude da QTDW é muito intensa, a amplitude da maré se mostra pouco intensa e, isto, é bastante pronunciado entre os dias 370 (04/jan) e 406 (10/fev/2005). Esta anticorrelação de amplitudes pode indicar que existe uma interação não linear entre as duas periodicidades.

Ao se estender a análise aos Espectros Globais de Energias, observa-se que eles reforçam a discussão baseada no espectro em wavelets, pois, embora não mostrando os períodos de ocorrências das oscilações, verifica-se que os picos indicando periodicidades de maré diurna, QTDW, ~3-4 dias, ~8-10 dias e ~12-20 dias ultrapassam a linha que indica níveis de significância de 95%.

Para detalhar a análise, a partir dos resultados dos dados filtrados e dos espectros em wavelets obtidos, escolheu-se o período entre os dias 425 (28/fev) e 435 (10/mar/2005), Figuras 08(a) e 09(a). Nelas, encontra-se um núcleo intenso para a maré no espectro em wavelets e um máximo na amplitude da maré zonal nos dados filtrados. Estimando-se este máximo de amplitude, encontra-se que seu valor está próximo de 30 m/s.

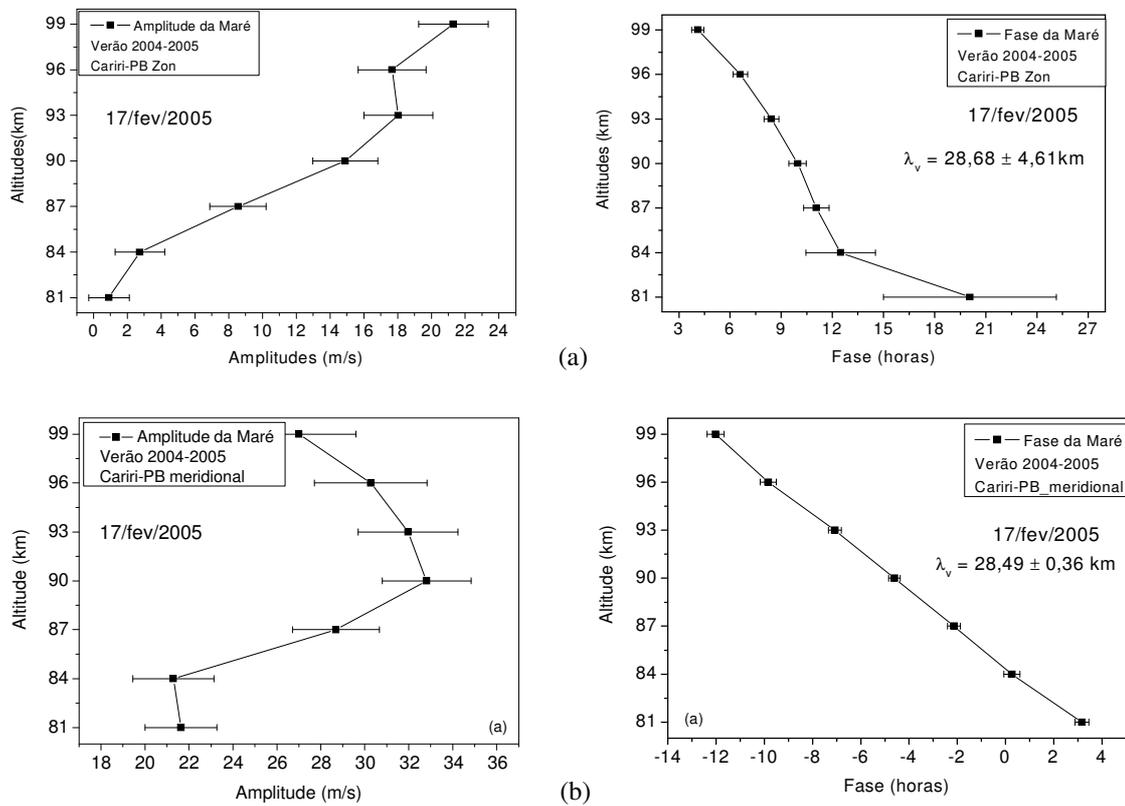
Avançando na análise, através de análise harmônica, foram construídos os gráficos dos perfis de amplitudes médias e das fases da maré diurna. Este tipo de análise permite que se observe o comportamento das amplitudes médias da oscilação em cada altitude estudada. Nele é possível acompanhar o comportamento da amplitude na medida em que a onda se propaga verticalmente. Mais importante neste tipo de análise é o perfil de fases. Através dele, estima-se o comprimento de onda vertical da oscilação e, a partir da propagação da fase, é possível inferir se a onda está se propagando acedente ou descentemente. Os comprimentos de onda da maré diurna obtidos foram utilizados de duas formas: (i) para comparar se os valores encontrados concordam com os valores apresentados na literatura; (ii) a partir da relação (7) entre os números de ondas das oscilações de uma tríade ressonante, é possível estimar o comprimento de onda da onda secundária resultante.

Para esta análise foi escolhido o evento centrado no dia 17/fev/2005. Os perfis obtidos correspondem a um valor médio diário calculado para uma janela móvel de 15 dias, portanto,

o evento representa, na verdade, os valores médios para o período entre 17/fev e 04/mar/2005. O perfil de amplitudes (esquerda) e o perfil de fases (direita), para maré diurna, estão apresentados na componente meridional (topo) e zonal (base) através da Figura 10. Os gráficos dos perfis de amplitudes possuem nas ordenadas as altitudes das camadas estudadas e, nas abscissas, os valores médios das amplitudes (em m/s) atingidas pela maré em cada camada. Os resultados revelam que ela atinge, na componente zonal, o valor de 21 m/s em 99 km e de 15 m/s em 90 km. Este resultado é menor que o valor estimado utilizando-se os gráficos dos dados filtrados para maré. A justificativa para um valor menor deve-se a fato de que esta análise é realizada adotando-se um valor médio diário calculado com uma janela de 15 dias e, portanto, diferindo do valor instantâneo dos dados filtrados. Para a componente meridional a amplitude máxima é atingida em 90 km e seu valor é de aproximadamente 33 m/s. A partir daí, a amplitude começa a diminuir indicando, provavelmente, que a onda começa quebrar nesta altitude.

Para determinação do comprimento de onda vertical, utiliza-se o perfil de fases. Através do coeficiente angular da reta que permite o melhor ajuste linear do gráfico da fase, Figura 10(a)-direita, calculou-se o comprimento de onda vertical da maré diurna. O resultado obtido para a componente zonal foi  $\lambda_v = 28,68 \pm 4,61$  km. Este valor situa-se entre 24,07 km e 33,29 km. Os valores não são tão diferentes dos resultados relatados na literatura especializada, as quais apontam valores em torno de 25 km. Entretanto, a margem de erro é elevada. Para justificar este resultado argumenta-se que os valores utilizados no cálculo são médias diárias para a janela de 15 dias e, ainda, que na componente zonal dos ventos, a amplitude da maré é baixa dificultando a definição da fase e consequentemente aumentando o erro neste cálculo.

O cálculo do comprimento de onda vertical da maré diurna apresenta um resultado melhor quando realizado usando-se o perfil de fases na componente meridional. Como a intensidade da maré é maior nesta componente, o perfil de fases tem melhor definição. Na Figura 10(b) encontram-se os gráficos da amplitude (esquerda) e da fase (direita) na componente meridional para 17/fev/2005. A escolha deste evento decorre do fato de que, nos testes prévios, a amplitude da maré apresentou-se mais intensa e a fase bem definida em todas as altitudes. Inicialmente verifica-se através da Figura 10(b)-esquerda que as amplitudes da maré assumem valores maiores que na componente zonal. O perfil de fases, Figura 10(b)-direita, é bem definido e aponta uma propagação de fase descendente indicando propagação ascendente de energia. Através do ajuste linear do gráfico, calcula-se o comprimento de onda vertical e o valor obtido foi  $\lambda_v = 28,49 \pm 0,36$  km.



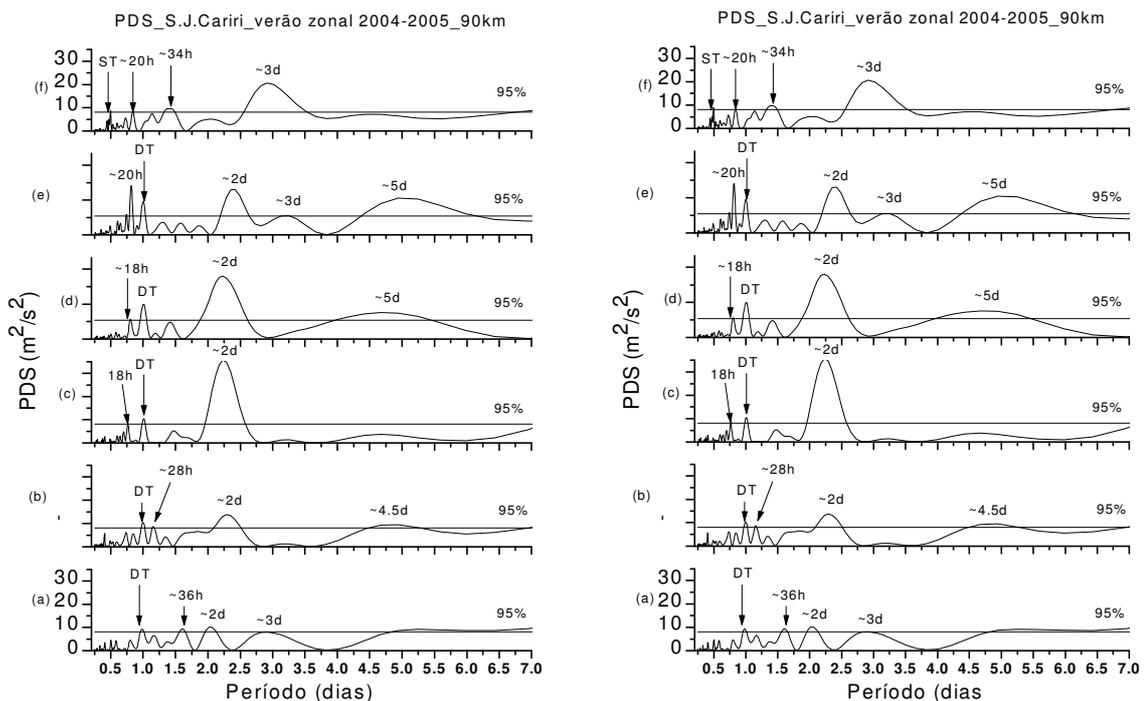
**Figura 10** - Perfis de amplitudes e fases da maré atmosférica nos ventos meteorológicos em São João do Cariri-PB entre 17/fev a 04/mar/2005. (a) componente meridional e (b) componente zonal.

Para avançar no estudo das características das oscilações, observadas através das análises em wavelets, foi realizada a análise de Densidade de Espectral de Potência (Power Spectral Density-PSD) utilizando-se especificamente o algoritmo de Lomb-Scargle. Esta análise permite se identificar os picos das oscilações presentes na série de dados e o período central da banda correspondente a cada oscilação. Os picos na PSD, conjuntamente com a análise em wavelets, fornecem informações sobre a época do ano de ocorrência da oscilação, o período central da oscilação e sua intensidade relativa dentro da série de dados analisada. Esta análise permite acompanhar a evolução temporal dos picos, possibilitando inferir qualitativamente sobre o comportamento das oscilações presentes na série. Através da PSD é possível, por exemplo, acompanhar a variação das intensidades dos picos, as modificações dos períodos das oscilações e em que intervalo de tempo uma oscilação específica apresenta energia significativa. Como os picos na PSD são separados, a identificação de possíveis oscilações secundárias, dentro das séries, torna-se mais fácil que no espectro em wavelets. Os picos das oscilações secundárias ajudam na identificação de possíveis tríades ressonantes as quais, através da análise biespectral, podem ser reveladas.

Nesta Tese, procurou-se identificar os períodos para picos de oscilações secundárias; eventos que apontem indícios de anticorrelação de amplitudes; e eventos que apontem possíveis trocas de energias entre as oscilações. Posteriormente, através da Análise Biespectral, e de posse destas informações, procurou-se identificar possíveis casos de interações não lineares ressonantes envolvendo modos de marés e Ondas Planetárias.

Na Figura 11 tem-se a PSD (periodograma de Lomb-Scargle) para o intervalo entre 18/Jan e 20/fev/2005. No eixo das ordenadas encontram-se as intensidades, enquanto que, nas abscissas, têm-se as periodicidades dos respectivos picos do periodograma. Cada gráfico, a partir da base, Figura 11(a) até a Figura 11(f), representa uma série de dados correspondente a uma janela móvel de dados de 32 dias e passo de 7 dias (uma semana). Os gráficos da PSD possuem uma linha horizontal que estabelece um nível de significância de 95%. Portanto, ao longo desta Tese, ao se afirmar que um pico na PSD é significativo ou intenso, adota-se que o mesmo ultrapassa a linha de 95% de significância.

A Figura 11-esquerda é a PSD na componente zonal e, através dela, identificam-se oscilações com significância acima de 95% nas periodicidades da maré diurna, QTDW, na banda de ~3-5 dias e, ainda picos centrados em ~16 horas, ~18 horas, ~20 horas, ~28 horas e ~36 horas.



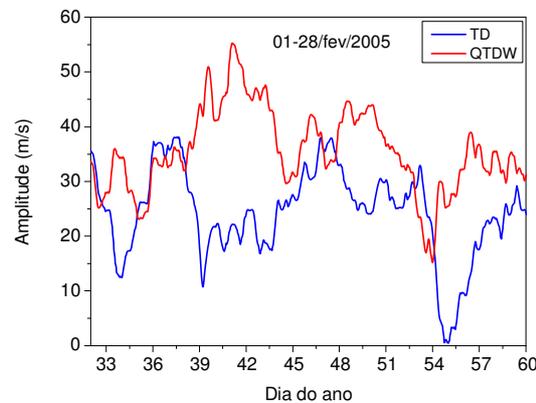
**Figura 11** - Periodograma de Lomb-Scargle do vento meteorológico, em 90 km, no período de 18/Jan até 20/Fev/2005 em São João do Cariri-PB. Componente zonal (esquerda) e componente meridional (direita). Cada gráfico representa uma série de dados de uma semana (7 dias).

A QTDW, na componente zonal, apresenta o seguinte comportamento: na primeira semana existe um pico pouco intenso com período de 2 dias; na segunda e terceira semanas o pico da QTDW aumenta atingido seu máximo na terceira semana e, a partir daí, o pico volta a diminuir e o período desloca-se para valores maiores do que 2 dias. Ainda, nesta componente é interessante notar que uma oscilação com período de ~3 dias surge na última semana enquanto que o pico referente à QTDW diminui para valores abaixo do nível de significância.

A Figura 11-direita é a PSD para na componente meridional. Através dela identificam-se picos, com nível de significância acima de 95%, nas periodicidades da maré diurna, QTDW, ~3 dias e picos em ~16 horas, ~30 horas e ~36 horas. Nota-se também que a QTDW apresenta um comportamento indicando variação de amplitude e de período. Analisando-se os picos presentes na PSD, observa-se que o pico para a maré diurna sofre modificações da seguinte forma: inicialmente na primeira semana, Figura 11(a), ele é pouco intenso e, depois, a partir da quarta semana, se intensifica.

As intensidades dos picos para a maré diurna e para a QTDW apresentam comportamentos opostos. Outro fato de bastante relevância verificado é a modificação do período da QTDW e o alargamento do pico. Na PSD da componente meridional observa-se que, na primeira semana, o período encontra-se acima de 2 dias; na segunda semana ele diminui para próximo de 2 dias e surge um pico próximo de 2,5 dias; depois, na terceira semana, o período é de 2 dias e o segundo pico praticamente desaparece; nas semanas seguintes, o período assume valores maiores que 2 dias. Na última semana, além do surgimento de um pico de ~3 dias, surgem dois picos atribuídos à QTDW, um com período acima de 2 dias e outro abaixo deste valor. Estes comportamentos da maré juntamente com o da QTDW são indícios de uma possível interação não linear entre estas duas oscilações.

O gráfico, mostrado na Figura 12, foi construído para fazer uma análise comparativa, entre o comportamento da amplitude da maré diurna e a amplitude da QTDW, na componente meridional para o mês de fevereiro de 2005 em São João do Cariri-PB. Os resultados obtidos reforçam que existe a anticorrelação entre as amplitudes e, isto, fica mais evidente, entre os dias 39 (08/fev) e 45 (14/fev/2005), quando a amplitude da QTDW (vermelho) aumenta enquanto que a amplitude da maré diurna (azul) diminui. Estas modificações do período da QTDW e a anticorrelação de amplitudes da maré com a amplitude da QTDW são fortes indícios de interação não linear.

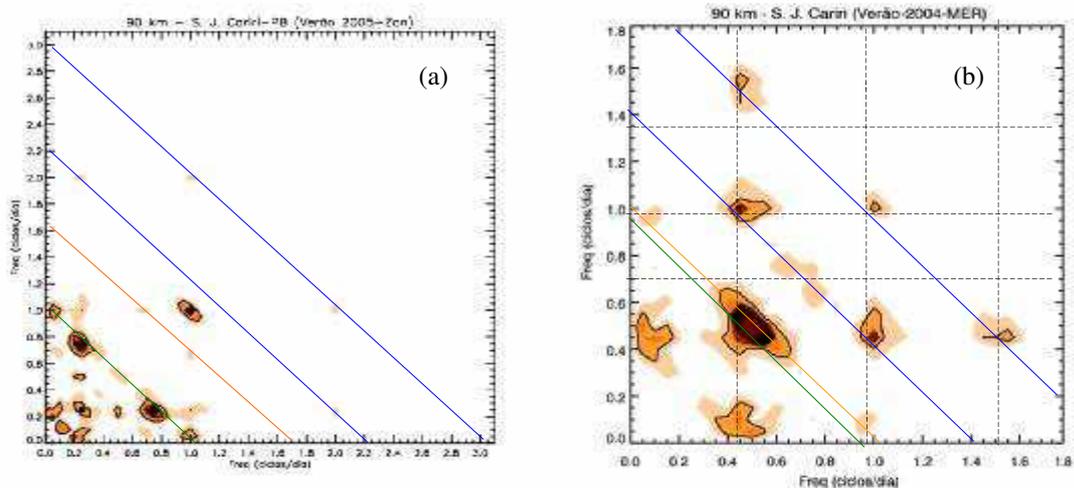


**Figura 12** - Comportamento da amplitude da maré diurna (azul) e o comportamento da QTDW (vermelho) para a componente meridional do vento meteorológico em São João do Cariri entre 01 e 28/fev/2005.

Para averiguar possíveis eventos de interação não linear, entre a maré e Ondas Planetárias, utiliza-se a análise biespectral. A partir do gráfico do biespectro buscam-se as regiões preenchidas e, nelas, procura-se identificar as possíveis frequências que interagem formando uma tríade ressonante. O gráfico do biespectro possui em ambos os eixos coordenados valores de frequências.

Para encontrar as frequências de possíveis tríades ressonantes, identificam-se os núcleos simétricos e, a partir deles, projetam-se suas coordenadas sobre os eixos. Este procedimento permite identificar duas das três frequências que interagem não linearmente. A terceira frequência é encontrada através da intersecção, com ambos os eixos coordenados, do prolongamento da reta que interliga os dois núcleos, o que significa realizar a soma ou a diferença das frequências que estão interagindo.

A Figura 13 refere-se ao biespectro da série de dados nas componentes zonal e meridional dos ventos meteorológicos para o verão 2004-2005. Na Figura 13(b), o biespectro para a componente meridional, tem-se valores de frequências que varrem desde o valor 0 (zero) até 1,8ciclo/dia. Enquanto que para a componente zonal, Figura 13(a), os valores das frequências foram estendidos para até 3ciclos/dia. Ao se aumentar a faixa de representação de frequências no biespectro cria-se a oportunidade de observar possíveis interações entre a maré diurna e oscilações de maiores frequências (por exemplo, com a maré semidiurna gerando a maré terdiurna). Ao se realizar os testes prévios com o algoritmo para o biespectro utilizado nesta pesquisa, observou-se que ocorria a redução da definição dos núcleos do biespectro. Assim, quando os biespectros não revelavam as interações pesquisadas, fez-se a opção por representar os gráficos com as frequências menores.



**Figura 13** - Análise biespectral para os dados de ventos meteorológicos do verão 2004-2005, em São João do Cariri-PB, em 90 km. (a) zonal e (b) meridional.

No biespectro da Figura 13(a), para a componente zonal, têm-se os seguintes pares de núcleos simétricos com a presença da maré:

(a) (0,7ciclo/dia; 1,0ciclo/dia), estas periodicidades correspondem, respectivamente, à maré diurna e a oscilação com período de ~36 horas. A reta que liga os núcleos, quando prolongada intercepta os eixos em 1,7ciclo/dia, que corresponde à oscilação com período aproximado de 0,6 dia e, este conjunto, forma a tríade ressonante (0,7; 1,0; 1,7)<sup>8</sup>;

(b) (0,3ciclo/dia; 0,7ciclo/dia), correspondendo à interação não linear entre uma onda de ~3 dias, ~36 horas e a maré diurna formando a tríade (0,3; 0,7; 1,0). Na PSD identificam-se picos para periodicidades próximas a estes valores.

(c) (0,06ciclo/dia; 0,94ciclo/dia), correspondendo à interação de ~16 dias, uma periodicidade próxima a maré e a própria maré diurna, formando a tríade (0,06; 0,94; 1,0).

(d) (0,2 ciclo/dia; 2,0 ciclo/dia), este par corresponde a uma interação não linear entre uma oscilação de ~10 dias, a maré semidiurna produzindo a frequência de 2,2 ciclo/dia (~10,9 horas) e formando a tríade (0,2; 2,0; 2,2).

(e) (1,0ciclo/dia; 2,0ciclo/dia), esta é uma interação entre a maré diurna (DT), maré semidiurna (ST) produzindo, através da soma de frequências, a maré terdiurna (TT) e formando a tríade ressonante (1,0; 2,0; 3,0).

<sup>8</sup> A unidade de frequência adotada para as ondas que compõem as tríades identificadas nesta Tese é ciclo/dia. Deste ponto em diante as tríades serão representadas apenas com os 03 números entre parêntesis sem unidades.

Na componente meridional identifica-se os seguintes núcleos simétricos envolvendo a maré.

(a) (0,06; 0,94; 1,0), tríade correspondente à interação não linear entre a onda de ~16 dias, uma oscilação próxima da maré e a maré diurna.

(b) (0,5; 1,5; 2,0), tríade correspondente à interação não linear entre a maré semidiurna e QTDW que, através da subtração de frequências, produz uma oscilação de ~16 horas.

(c) (0,45; 1,0; 1,45), estas periodicidades correspondem, respectivamente, à maré diurna e uma QTDW com período centrado em 2,2 dias. Ao se ligar os núcleos, a reta prolongada intercepta os eixos coordenados em 1,45 ciclo/dia, apontando uma oscilação com período de ~0,69 dia (~16 horas).

Para efeito de comparação, nas Tabelas 03 e 04, são apresentados os resultados de possíveis frequências das ondas secundárias resultantes da interação não linear ressonante entre modos de marés e as Ondas Planetárias mais significativas (as quais foram identificadas através da análise em wavelets).

**Tabela 03.** Frequências e períodos aproximados de ondas secundárias resultantes da interação não linear ressonante entre a maré diurna e Ondas Planetárias (QTDW, 3-4 dias, 6,5 dias, 10 dias e 16 dias).

Ondas interagindo com a Maré Diurna $\omega_1 = 1$ ciclo/dia (ciclo/dia)	Frequências resultantes (ciclo/dia)		Períodos resultantes (horas)	
	$\omega_3 = \omega_1 + \omega_2$	$\omega_3 = \omega_1 - \omega_2$	$\tau_{som}$	$\tau_{sub}$
Onda de Quase Dois Dias ( $\omega_2 = 0.5$ )	1,5	0,5	16	48
Ondas ultra-rápidas de Kelvin ( $\omega_2 = 0.3$ )	1,3	0,7	18	36
Onda de Cinco Dias ( $\omega_2 = 0.2$ )	1,2	0,8	20	30
Onda de Seis Dias e Meio ( $\omega_2 = 0.154$ )	1,154	0,846	20,8	28,4
Onda de Dez Dias ( $\omega_2 = 0.1$ )	1,1	0,9	21,8	27,222
Onda de Dezesesseis Dias ( $\omega_2 = 0.063$ )	1,063	0,937	22,578	25,614

**Tabela 04.** Frequências e períodos aproximados de ondas secundárias resultantes da interação não linear ressonante entre a maré semidiurna, maré diurna/Ondas Planetárias (QTDW, 3-4 dias, 6,5 dias, 10 dias e 16 dias).

Ondas interagindo com a Maré Semidiurna $\omega_1 = 2$ ciclo/dia (ciclo/dia)	Frequências resultantes (ciclo/dia)		Períodos resultantes (horas)	
	$\omega_3 = \omega_1 + \omega_2$	$\omega_3 = \omega_1 - \omega_2$	$\tau_{som}$	$\tau_{sub}$
Maré diurna ( $\omega_2 = 1,0$ )	3,0	1,0	12	24
Onda de Quase Dois Dias ( $\omega_2 = 0,5$ )	2,5	1,5	9,6	16
Ondas ultra-rápidas de Kelvin ( $\omega_2 = 0.3$ )	2,3	1,7	10	14
Onda de Cinco Dias ( $\omega_2 = 0,2$ )	2,2	1,8	10,91	13,33
Onda de Seis Dias e Meio ( $\omega_2 = 0,154$ )	2,154	1,85	11,14	12,97
Onda de Dez Dias ( $\omega_2 = 0,1$ )	2,1	1,9	11,43	1,63
Onda de Dezesesseis Dias ( $\omega_2 = 0,063$ )	2,063	1,94	11,630	12,370

Através das condições de ressonância e dos comprimentos de ondas verticais das ondas primárias (por exemplo: maré e QTDW) é possível estimar o comprimento de onda vertical da oscilação secundária resultante da interação não linear ressonante entre estas oscilações. Para a tríade ressonante  $(\omega_m, \omega_{pw}, \omega_r)$  tem-se que:

$$(i) \ \omega_m \pm \omega_{pw} = \omega_r \Rightarrow \begin{cases} \omega_m + \omega_{pw} = \omega_r \\ \omega_m - \omega_{pw} = \omega_r \end{cases} \quad e \quad (ii) \ k_m \pm k_{pw} = k_r \Rightarrow \begin{cases} k_m + k_{pw} = k_r \\ k_m - k_{pw} = k_r \end{cases}$$

Utilizando-se como exemplo a tríade ressonante (0,45; 1,0; 1,45) obtida no biespectro para a componente meridional, Figura 13(b), e a condição (i) calcula-se a frequência da oscilação secundária resultante entre a maré atmosférica diurna e a QTDW:

$$\omega_r = \omega_m + \omega_{pw} \Rightarrow \omega_r = 1,0 \frac{\text{ciclo}}{\text{dia}} + 0,45 \frac{\text{ciclo}}{\text{dia}} \Rightarrow \omega_r = 1,45 \frac{\text{ciclo}}{\text{dia}}$$

A partir da condição (ii) e dos comprimentos de onda da maré atmosférica e da onda planetária calcula-se o comprimento de onda resultante da interação não linear entre elas usando:

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \Rightarrow \begin{cases} k_{vm} = \frac{2\pi}{\lambda_{vm}} \\ k_{vpw} = \frac{2\pi}{\lambda_{vpw}} \end{cases}$$

$$\text{Assim: } k_r = k_m + k_{pw} \Rightarrow \frac{2\pi}{\lambda_r} = \frac{2\pi}{\lambda_m} \pm \frac{2\pi}{\lambda_{pw}} \Rightarrow \frac{1}{\lambda_r} = \frac{1}{\lambda_m} \pm \frac{1}{\lambda_{pw}} = \frac{\lambda_{pw} \pm \lambda_m}{\lambda_{pw} \lambda_m}, \text{ encontra-se que:}$$

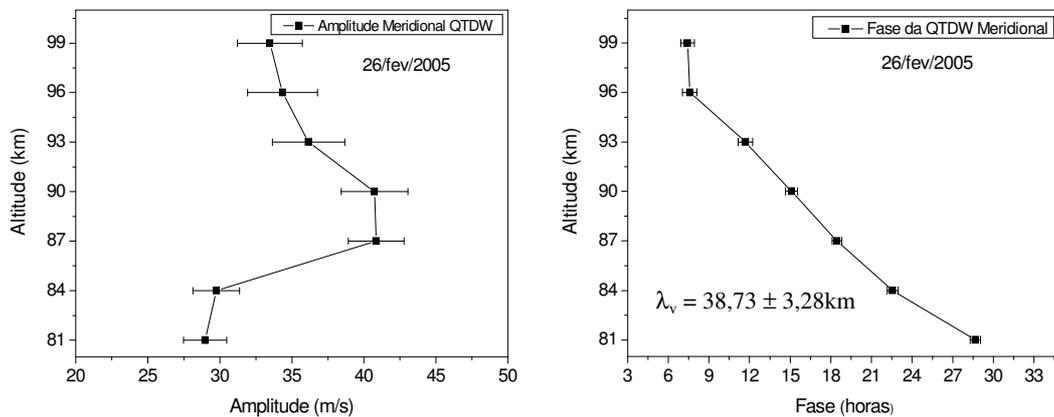
$$\Rightarrow \lambda_r = \frac{\lambda_m \lambda_{pw}}{\lambda_m - \lambda_{pw}} (\text{subtração}), \tag{70}$$

$$\Rightarrow \lambda_r = \frac{\lambda_m \lambda_{pw}}{\lambda_m + \lambda_{pw}} (\text{soma}), \tag{71}$$

Para realizar o cálculo do comprimento de onda vertical  $\lambda_r$  da onda de ~16,55 horas, inicialmente construiu-se os perfis de amplitudes (esquerda) e fases (direita) para QTDW na componente meridional, Figura 14. Através do gráfico observa-se que as amplitudes da QTDW atingem valores máximos em torno de 42 m/s para as altitudes de 90 e 93 km. Estes valores concordam com os obtidos por Vincent e Harris (1993) que encontraram valores de amplitudes excedendo 30 m/s nas altitudes variando entre 86 a 90 km. O perfil de fases é bem comportado e a fase propaga-se descendentemente indicando propagação ascendente de

energia. Através do coeficiente angular da reta que melhor se ajusta ao gráfico de fases, encontra-se que o comprimento de onda vertical, da QTDW, é  $\lambda_v = 38,73 \pm 3,28\text{km}$ . Estes resultados concordam com os resultados de Lima *et al.* (2004; 2007) que encontraram valores de amplitudes próximos a 50 m/s e comprimentos de onda entre 40 e 70 km em Cachoeira Paulista-SP e entre 30 e 35 km em São João do Cariri-PB, nas altitudes variando entre 80 e 100 km. Então, a partir dos comprimentos de onda das duas ondas primárias, o comprimento de onda vertical da onda de 16,55 horas, na expressão (71), é:

$$\lambda_r = \frac{\lambda_m \lambda_{pw}}{\lambda_m + \lambda_{pw}} = \frac{(28,49 \pm 0,36\text{km}) \cdot (38,73 \pm 3,28\text{km})}{(28,49 \pm 0,36\text{km}) + (38,73 \pm 3,28\text{km})} = \frac{(1104,84 \pm 122,44)}{67,22 \pm 3,86} \Rightarrow \lambda_r = (16,44 \pm 2,09)\text{km}$$

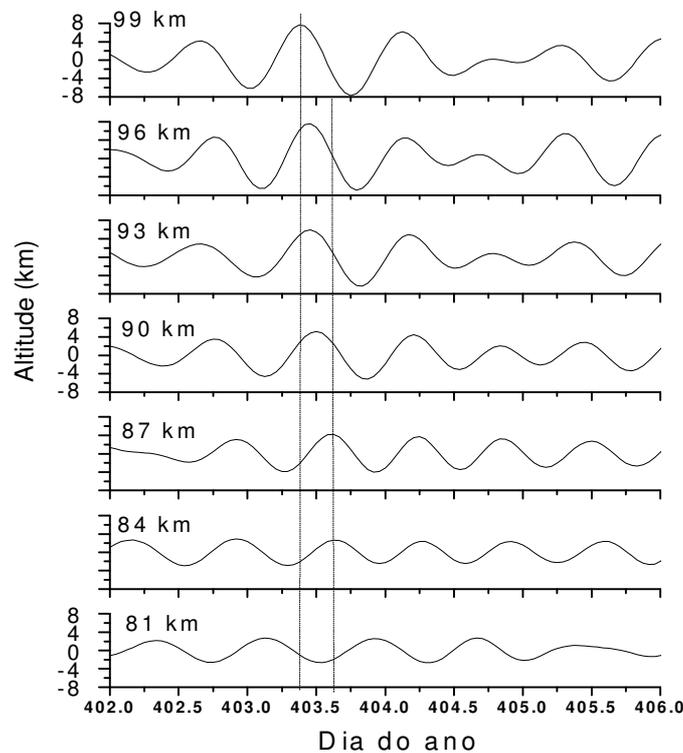


**Figura 14** - Perfis de amplitudes e fases da onda de QTDW, na componente meridional do vento meteorológico, para 06 de fevereiro de 2005 em São João do Cariri-PB.

Utilizando-se a série de dados filtrados para a onda de ~16 horas é possível, através da Figura 15, estimar o comprimento de onda médio desta oscilação. A partir da diferença de fases  $\Delta t$  entre os picos da onda entre 84 km e 99 km calcula-se:

$$w = \frac{\Delta h}{\Delta t}, \tag{72}$$

em que  $\Delta h$  é a variação da altura e  $\Delta t$  o atraso de fase da onda assim, na Figura 16, encontra-se que,  $\Delta h = 15\text{km}$  e  $\Delta t = 0,5$  dia, então:  $w = \frac{\Delta h}{\Delta t} = \frac{15\text{km}}{0,5\text{dia}} = 30,00 \frac{\text{km}}{\text{dia}}$ . Logo o comprimento de onda para 16 horas (0,67 dia) será:  $\lambda_v = w\pi = 30 \frac{\text{km}}{\text{dia}} \times 0,67\text{dia} \approx 20,1\text{km}$ . Este resultado, considerando-se a margem de erro, é próximo daquele determinado a partir da equação (71).



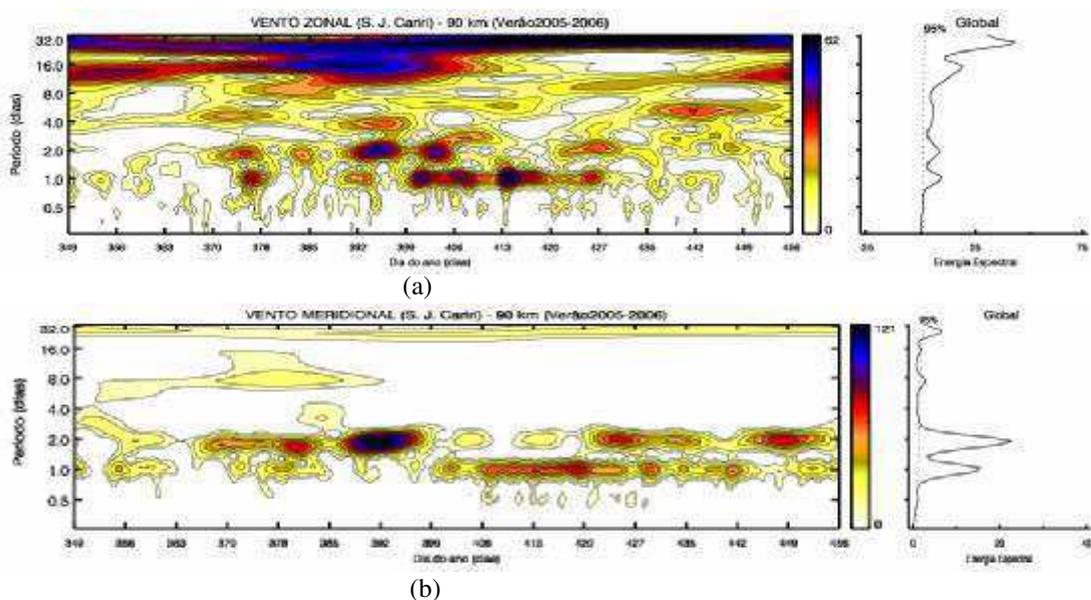
**Figura 15** - Onda de 16 horas em função da altitude no vento meteorológico meridional em São João do Cariri-PB, no período entre os dias 402 (05/fev) e 406 (09/fev/2005).

Este último resultado mostra que esta oscilação de 16 horas possui comprimento de onda menor que o comprimento de onda da maré diurna. Isto é coerente, pois, através da expressão (71), o valor do comprimento de onda resultante deve ser menor que o menor dos comprimentos de onda das ondas primárias e, neste caso é o da maré. Portanto, o valor  $\lambda_v = 20,1km$  encontrado através dos dados filtrados para a onda de 16 horas é consistente com a afirmação anterior. Este é mais um indício de que a interação não linear ressonante da maré com a QTDW ocorreu.

Ainda, na componente meridional, tem-se a seguinte tríade: (0,06; 0,95; 1,01). Esta interação não linear ressonante envolve uma onda com frequência, 0,95ciclo/dia (período de ~25 horas), a onda de 0,06 ciclo/dia (período de ~16 dias) e uma onda de 1,1 ciclo/dia (período de ~22 horas). Na Tabela 03 tem-se que a periodicidade de ~25 horas é uma periodicidade possível resultante da subtração entre as frequências do modo de maré diurna e da onda de ~16 dias. A onda com período de ~22 horas pode resultar da soma das frequências da maré diurna e da onda de ~16 dias; verifica-se, também, a presença do núcleo (0,45; 1,55; 2,0). Este núcleo é possível através da interação não linear entre a QTDW e a maré semidiurna que, por subtração das frequências, gera uma onda de 1,55ciclo/dia (~16 horas).

### 5.2.1.2. Verão 2005-2006

Os espectros em wavelets dos ventos meteorológicos, no verão de 2005-2006, Figura 16, mostram núcleos para oscilações com comportamentos semelhantes aos do verão anterior. Através da Figura 16(a), para a componente zonal, identifica-se a presença das seguintes periodicidades: oscilações intensas com períodos de  $\sim 27$  e  $\sim 16$  dias durante praticamente toda a estação. A periodicidade de  $\sim 16$  dias é mais intensa no intervalo entre os dias 349 e 410. Identifica-se uma oscilação intensa com período de  $\sim 10$  dias no intervalo entre os dias 420 e 456. Observa-se a presença intensa da maré diurna, a qual se revela com maior intensidade em torno dos dias 376, 393 e no intervalo entre os dias 399 a 420. Identificam-se núcleos intensos, para a oscilação com período de  $\sim 5$  dias, no intervalo entre os dias 368 a 381 e para a oscilação, com período de  $\sim 6,5$  dias, no intervalo entre os dias 335 e 354. Identificam-se também núcleos intensos para a periodicidade de  $\sim 4$  dias, principalmente, no intervalo entre os dias 390 e 399.



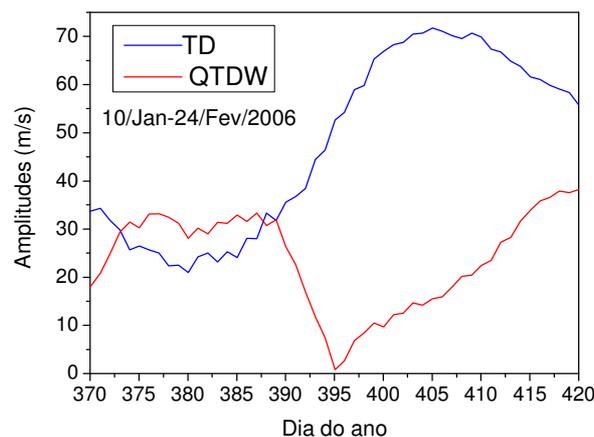
**Figura 16** - Espectros de energia em wavelets nos ventos meteorológicos em São João do Cariri-PB no verão 2005-2006. (a) zonal; e (b) meridional; e da Energia Espectral Global em 90 km.

Ainda com relação às periodicidades observadas neste verão, encontra-se a QTDW bastante intensa nos intervalos entre os dias 372 e 378, 389 e 406 e entre 422 e 428. Estendendo-se as análises aos Espectros Globais de Energia, verifica-se que picos para oscilações com períodos da maré diurna, QTDW,  $\sim 5$  dias,  $\sim 6,5$  dias, 8-10 dias e 12-20 dias ultrapassam o nível de significância de 95%. Através dos dados filtrados, Figura 08(b)-direita, e do espectro em wavelets verifica-se que, no verão 2005-2006, a maré diurna, na componente

meridional, apresenta-se com a maior intensidade dentre os verões estudados.

Ao se analisar o espectro em wavelets na componente meridional, Figura 16(b), identifica-se uma periodicidade entre 8-10 dias no intervalo entre os dias 368 e 388. Observa-se densidade de energia espectral para a QTDW em praticamente todo o verão, entretanto, nos intervalos entre os dias 368 e 398 (período correspondendo ao mês de janeiro) e entre os dias 422 e 452 (período correspondendo ao mês de março) ela é mais intensa. Verifica-se que existe anticorrelação entre as intensidades da maré diurna e QTDW, particularmente, entre os dias 387 e 397, quando a QTDW é muito intensa. Por outro lado, no intervalo entre os dias 399 e 420, a intensidade da QTDW é muito baixa, mas a maré é muito intensa. A oscilação com período de ~4 dias não foi identificada na componente meridional. Como esta oscilação encontra-se intensa apenas na componente zonal, ela possivelmente corresponde a uma onda ultra-rápida de Kelvin.

Na Figura 17, mostra-se, no período entre os dias 370 (05/jan) e 420 (24/fev), uma comparação entre o comportamento das amplitudes da maré diurna e da QTDW na componente meridional. Os resultados reforçam que existe anticorrelação entre estas amplitudes, isto fica evidente, por exemplo, entre os dias 372 (07/jan) e 395 (30/jan). Neste intervalo observa-se que, enquanto a amplitude da QTDW (vermelho) aumenta a amplitude da maré (azul) apresenta um comportamento oposto e, de forma semelhante, quando a amplitude da maré aumenta a amplitude da QTDW diminui.

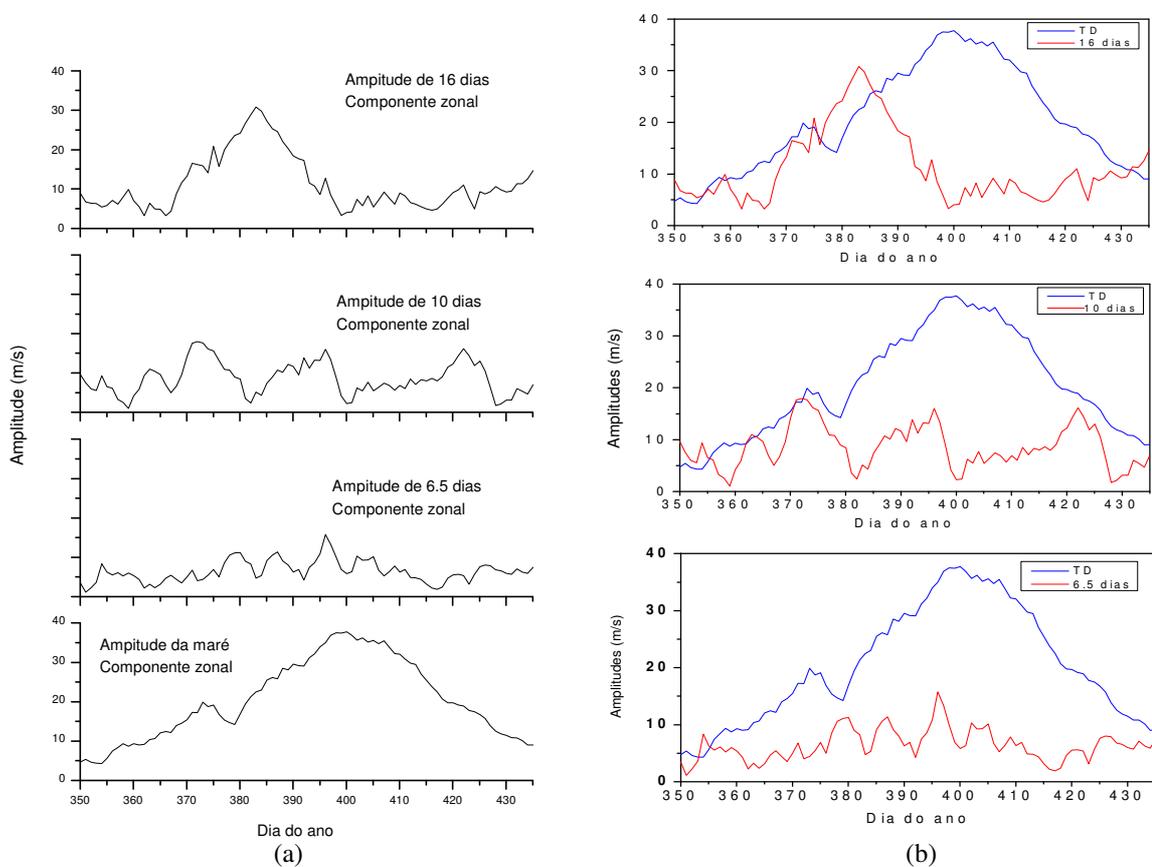


**Figura 17** - Comportamento da amplitude da maré diurna e o comportamento da QTDW para a componente meridional, no vento meteorológico em São João do Cariri-PB, entre 10/jan a 24/fev/2006.

Na Figura 18(a), tem-se o comportamento das amplitudes das oscilações: maré diurna, ~6,5 dias, ~10 dias e ~16 dias. Este gráfico foi construído com amplitudes médias diárias para uma janela de 48 dias de dados de ventos meteorológicos. Destaca-se que, em torno do dia 420, a

amplitude da maré atinge sua maior intensidade,  $\sim 40$  m/s. Para as Ondas Planetárias observa-se que os valores máximos acontecem em torno do dia 396 para 6,5 dias, do dia 425 para  $\sim 10$  dias e em torno de 385 para a onda de  $\sim 16$  dias.

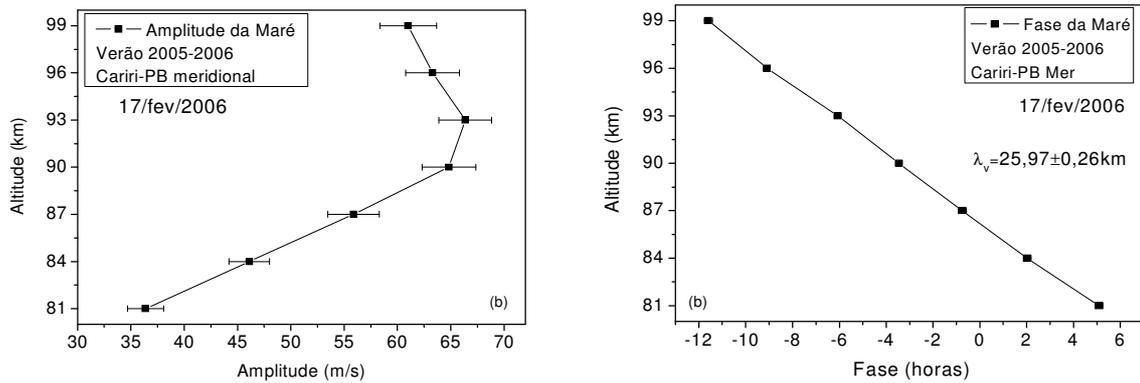
Na Figura 18(b) apresenta-se uma tentativa de comparação entre o comportamento das amplitudes da maré e das principais Ondas Planetárias identificadas nos ventos. A idéia é buscar alguma evidência, entre as amplitudes da maré diurna e destas oscilações, que possa implicar na modulação da amplitude da maré e na ocorrência de interação não linear ressonante entre elas.



**Figura 18** – (a) Comportamento das amplitudes, de baixo para cima: maré diurna; 6,5 dias; 10 dias; e 16 dias na componente zonal do vento meteorológico em S. J. do Cariri para 90 km de altitude, entre dez/2005 e mar/2006. (b) Comparação entre os comportamentos das amplitudes, de baixo para cima: maré e onda de 6,5 dias; maré e onda de 10 dias; e maré e a onda de 16 dias.

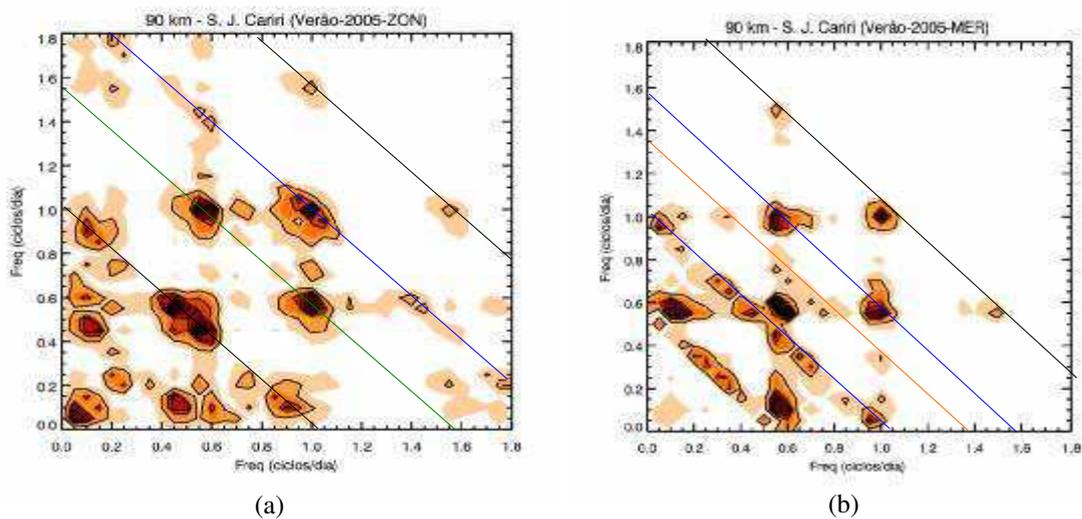
No topo da Figura 18(b), observa-se que parece existir alguma anticorrelação entre as amplitudes da maré e da onda de  $\sim 16$  dias, particularmente, entre os dias 387 e 400. Por outro lado, entre os dias 350 e 387, a amplitude da maré parece acompanhar o comportamento da onda de  $\sim 16$  dias. Entre a maré e as ondas de  $\sim 6,5$  dias e de  $\sim 10$  dias, não se identificam evidências de uma correlação significativa entre suas amplitudes.

Na Figura 19 tem-se os perfis de amplitudes e fases para a maré diurna na componente meridional centrado em 17/fev/2006. O procedimento para os cálculos foram semelhantes aos utilizados para os perfis anteriores. O valor máximo da amplitude, Figura 19(a), é atingido em 93 km e vale ~ 65 m/s. A amplitude para a altitude de 90 km não difere muito do valor para 93 km. Na Figura 19(b), através da linearização do gráfico do perfil de fases encontra-se que o comprimento de onda vertical é  $\lambda_v = 25,97 \pm 0,26$  km. Os valores encontrados da amplitude e do comprimento de onda vertical são consistentes com a literatura.



**Figura 19** - Perfis de amplitudes e fases da maré diurna, na componente meridional do vento meteorológico, para o dia 17/fev/2006, do período de 17/fev a 04/mar/2006, em São João do Cariri-PB.

Na Figura 20 apresenta-se os resultados da análise biespectral para o verão 2005-2006. Observa-se que os gráficos mostram muitos núcleos possíveis de interações não lineares envolvendo a maré diurna..



**Figura 20** - Análise biespectral para os dados de ventos meteorológicos de verão 2005-2006, em São João do Cariri-PB, em 90 km. (a) zonal e (b) meridional.

Na componente zonal, Figura 20(a), identificam-se possíveis núcleos interações não lineares ressonantes envolvendo as frequências da maré e de Ondas Planetárias, são eles:

(a) (0,56; 1,0; 1,56), que corresponde a tríade envolvendo a maré diurna, a QTDW (0,56 ciclo/dia) e a onda secundária, produzida por somas das frequências das ondas primárias, cujo período é de ~15 horas,

(b) (0,75; 1,0; 1,75), que corresponde a uma interação não linear entre a maré diurna, uma onda com período próximo a 27 horas (frequência de 0,75 ciclo/dia) e uma onda com período ~14 horas (frequência de 1,75 ciclo/dia),

(c) (0,25; 1,75; 2,0), que corresponde a interação entre a onda de ~4 dias, maré semidiurna e uma onda secundária de ~14 horas,

(d) (1,0; 1,55; 2,55), correspondendo a uma interação entre a maré diurna, a onda de ~16 horas e uma oscilação de ~9 horas,

(e) (0,15, 0,85; 1,0), (f) (0,1, 0,9; 1,0) e (g) (0,45, 0,55; 1,0), correspondendo à três tríades ressonantes envolvendo o modo de maré diurna: Na tríade em (e), além da maré diurna, tem-se a frequência 0,85 ciclo/dia (período de ~28 horas) e a frequência de 0,15 ciclo/dia (período de aproximadamente 6,5 dias). A periodicidade de ~28 horas pode surgir da soma das frequências da maré diurna e a onda de ~6,5 dias; em (f), tem-se a possível interação da maré diurna com a onda de ~10 dias (0,1 ciclo/dia) e a periodicidade de 0,9 ciclo/dia (correspondendo a um período de ~26 horas). Este último período é previsto como onda secundária originada na soma das frequências da maré com a onda de ~10 dias e em (g) tem-se a maré, a oscilação de 0,45 dias (QTDW com período aproximado de 2,2 dias) e uma oscilação de 0,55 ciclo/dia (QTDW com período aproximado de 1,82 dia).

Através da Figura 20(b), componente meridional, identificam-se tríades as ressonantes:

(a) (1,0; 0,56; 1,56), tríade envolvendo o modo de maré diurna, a QTDW (0,56 ciclo/dia cujo período é de ~1,8 dias) e uma onda com período de ~15 horas (1,56 ciclo/dia),

(b) (0,35; 1,0; 1,35), envolvendo a maré diurna, a oscilação de 0,35 ciclo/dia (~3 dias), e a onda de 1,35 ciclo/dia (~18 horas),

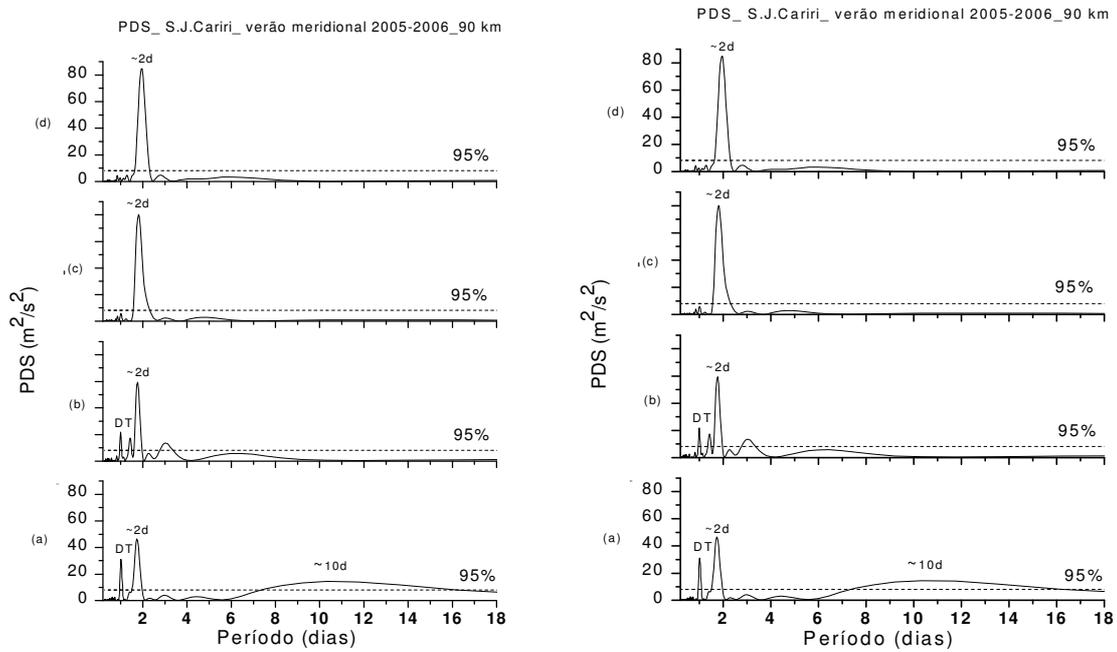
(c) (0,3; 0,7; 1,0), que corresponde a interação entre uma oscilação de ~3 dias, maré diurna e uma oscilação de ~34 horas,

(d) (0,15; 0,85; 1,0) que corresponde às frequências das ondas de ~6,5 dias (0,15 ciclo/dia), da maré diurna e da onda de 0,85 ciclo/dia (período de ~28 horas).

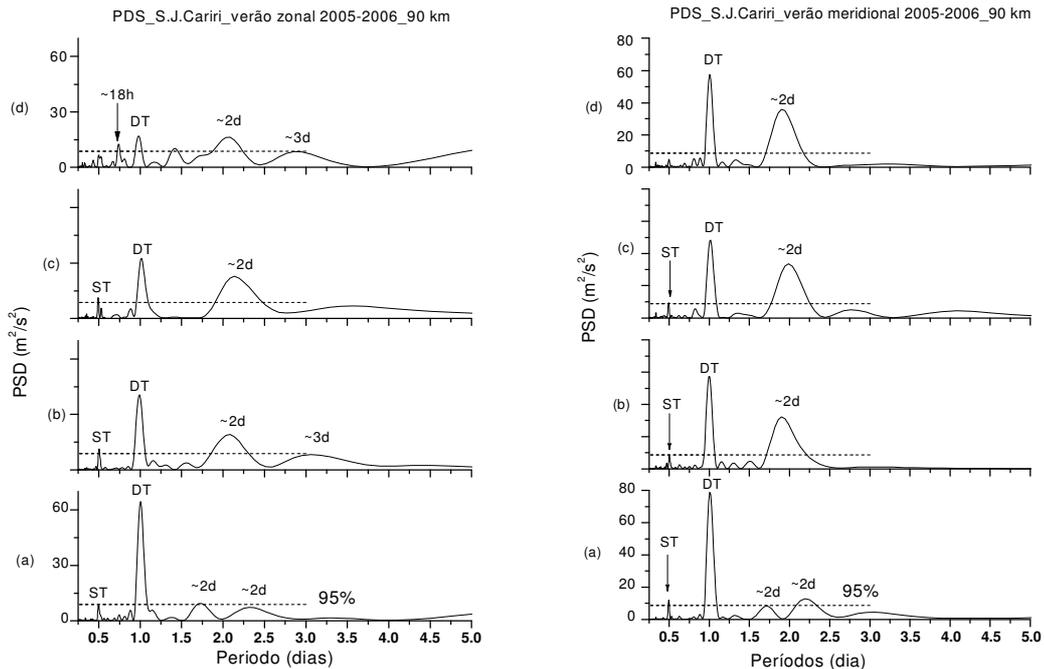
Em ambos os biespectros, os núcleos das tríades envolvendo a maré e a QTDW são intensos e largos, podendo ser interpretados como se houvesse mais de uma QTDW com períodos ligeiramente diferentes. A presença, nestas análises, de duas periodicidades correspondentes a QTDW remete aos trabalhos desenvolvidos por Palo *et al.* (1999; 2007).

Nas análises biespectrais encontram-se também oscilações cujos períodos estão entre 20 horas e 32 horas. Estas periodicidades remetem a um estudo desenvolvido por Pancheva (1999) que, usando uma série de dados de ventos horários meteorológicos em 95 km de altitude em Yambol (42,5°N, 26,6°E), identificou a presença significativa de oscilações com períodos próximos de 20 horas e de 30 horas. Estas oscilações com períodos próximos a 20 horas e 30 horas, encontrados na pesquisa desta Tese, surgem, provavelmente, da interação não linear ressonante entre a maré diurna e Ondas Planetárias com periodicidade de ~5-7 dias, enquanto que, as oscilações com períodos de ~18 horas e de ~32 horas resultam da interação não linear ressonante entre a maré diurna e a periodicidade de ~3-4 dias (ondas ultra rápidas de Kelvin).

Nas Figuras 21 e 22, apresentam-se duas versões para a PSD, nas componentes zonal e meridional dos ventos, no intervalo entre 18 de janeiro a 15 de fevereiro de 2006. A idéia de mostrar, através de um periodograma estendido, Figura 21, os picos intensos das bandas de 8-10 dias e de 12-20 dias na componente zonal. Isto, além de fornecer os valores dos períodos centrais para as bandas identificadas, permite confirmar as observações destas oscilações através das análises em wavelets. Adicionalmente, na componente meridional, confirma-se que apenas as oscilações de menores frequências apresentam-se significativas como foi observado nos espectros em wavelets. Por outro lado, as interações não lineares ressonantes envolvendo a maré diurna e Ondas Planetárias produzem oscilações secundárias com períodos próximos do período da maré e, estes periodogramas com periodicidades grande, dificultam a observação destas oscilações secundárias próximas da maré. Assim, a PSD da Figura 22, foi construída com períodos menores para tornar mais adequada a identificação dos picos e dos períodos das oscilações secundárias resultantes das interações não lineares ressonantes entre a maré diurna e as Ondas Planetárias.



**Figura 21** -Periodograma de Lomb-Scargle do vento meteorológico, em 90 km, no intervalo de 18/Jan até 15/Fev/2006 em São João do Cariri-PB. Componente zonal (esquerda) e componente meridional (direita). Cada gráfico representa uma série de dados de uma semana (7 dias).

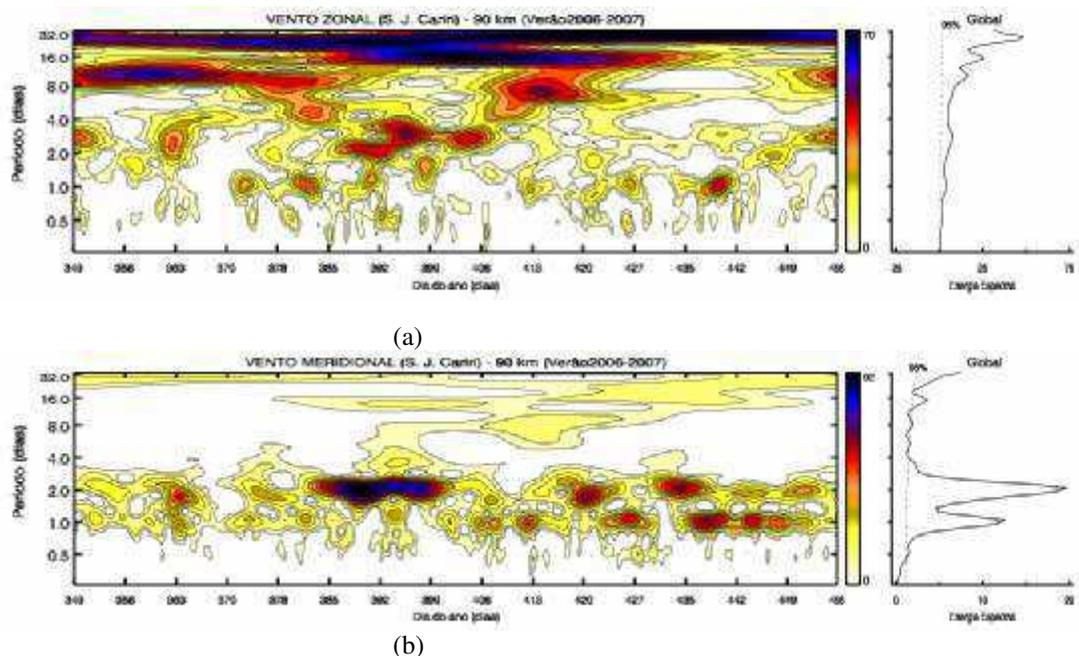


**Figura 22** -Periodograma de Lomb-Scargle do vento meteorológico, em 90 km, no intervalo de 18/Jan até 15/Fev/2006 em São João do Cariri-PB. Componente zonal (esquerda) e componente meridional (direita). Cada gráfico representa uma série de dados de uma semana (7 dias).

Em ambas as PSD, observa-se que na primeira semana, Figura 22(a) o pico para a maré diurna é bastante intensa enquanto que a QTDW não é, além disso identificam-se dois picos para esta oscilação. Na semana seguinte, Figura 22(b), a amplitude da maré diminui e a da QTDW aumenta. Observa-se também, em ambas as PSD, um pico referente a maré semidiurna cujo valor encontra-se no limiar do nível de significância. Para a componente zonal, na quarta semana, as amplitudes da maré diurna e da QTDW diminuem e surgem picos referentes a  $\sim 18$ h e  $\sim 3$  dias. A oscilação de  $\sim 18$ h juntamente com a maré diurna e a oscilação de  $\sim 3$  dias podem formar uma tríade ressonante. Alves (2007) identificou oscilações com periodicidades entre 3 e 4 dias (ondas ultra-rápidas de Kelvin) na componente zonal dos ventos meteorológicos de São João do Cariri-PB em 2005. Particularmente, ele identificou que, no verão, esta onda apresentou periodicidade de  $\sim 4$  dias e amplitude máxima de  $\sim 25$ m/s.

### 5.2.1.3. Verão 2006-2007

A Figura 23 mostra os resultados das análises em wavelets da série de dados de ventos meteorológicos de São João do Cariri, no verão de 2006-2007.



**Figura 23** - Espectros de energia em wavelets nos ventos meteorológicos em São João do Cariri-PB no verão 2006-2007. (a) zonal; e (b) meridional; e da Energia Espectral Global em 90 km.

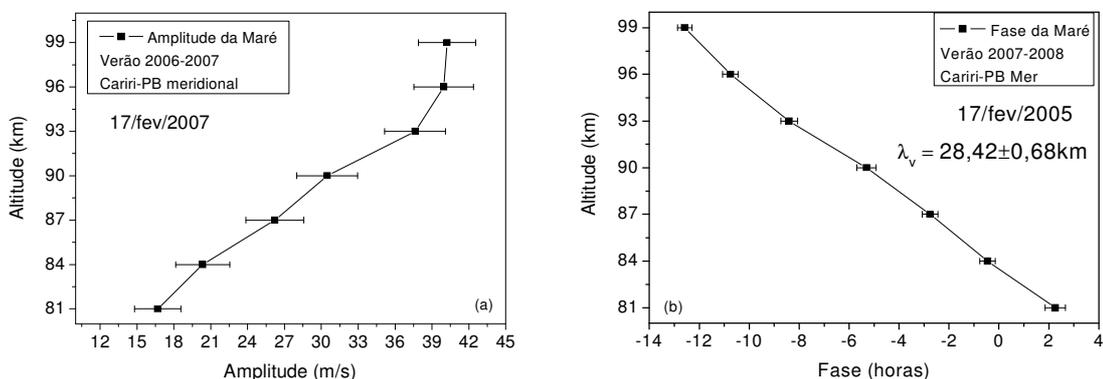
Através da Figura 23(a), para a componente zonal, identificam-se as seguintes periodicidades: oscilações intensas com períodos de  $\sim 16$  e  $\sim 27$  dias durante praticamente toda

a estação. A periodicidade de ~16 dias é mais intensa no intervalo entre os dias 382 e 438. Identifica-se uma oscilação intensa com período entre 8 e 10 dias nos intervalos entre os dias 349 e 388 e entre os dias 449 e 456. A oscilação de ~5 dias encontra-se no intervalo entre os dias 378 e 385. A componente zonal da maré diurna não é muito intensa, ela se revela com maior intensidade nos intervalos entre os dias 370 a 376, entre os dias 380 a 383 e no intervalo entre os dias 438 a 442. A QTDW, excetuando-se o intervalo entre os dias 385 e 393, tem presença pouco intensa. Destaca-se ainda que, a partir do dia 393, o núcleo correspondente a energia da QTDW parece se transformar numa oscilação com período em torno de 3 dias. Esta última oscilação é bastante intensa no intervalo entre os dias 392 e 406.

Através da Figura 23(b), componente meridional, identifica-se presença pouco intensa da oscilação de ~27 dias em praticamente toda a estação. A oscilação de ~16 dias surge pouco intensa a partir do dia 378 e permanece até o final da estação. A oscilação de ~3 dias não se apresenta intensa nesta componente. A QTDW, entre os dias 382 e 402, é a oscilação mais intensa. A maré diurna apresenta núcleos mais intensos a partir do dia 406 até o final da estação. E, novamente, observa-se a anticorrelação entre a amplitude da maré e da QTDW.

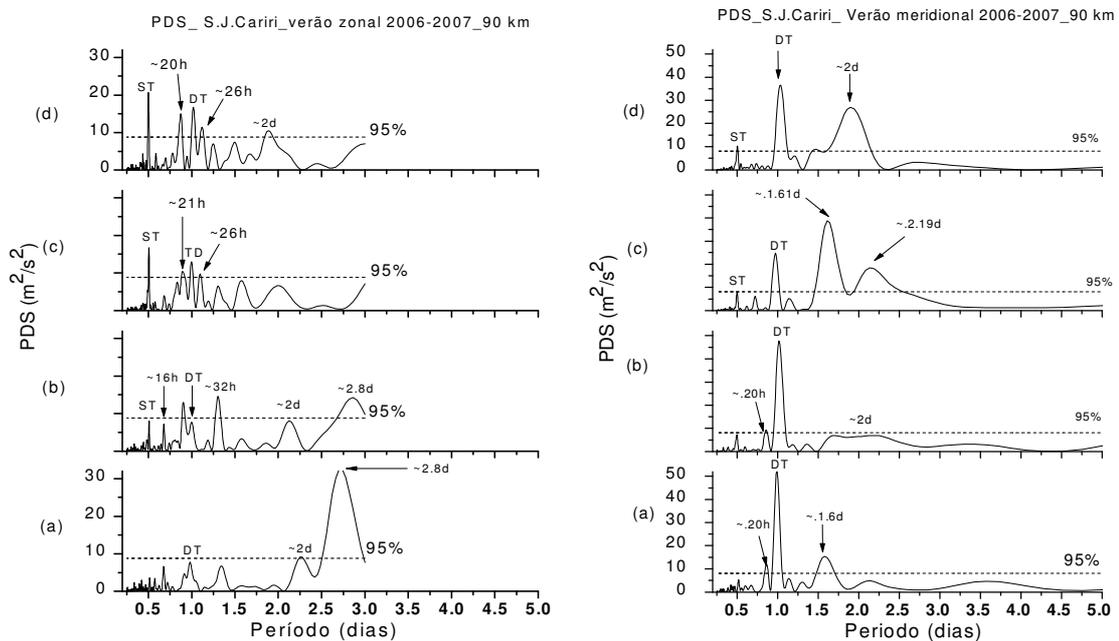
Nos Espectros Globais de Energia, observam-se picos para as periodicidades da maré diurna, 5-7 dias, 8-10 dias e de 12-20 dias com significância acima 95%. Através dos dados filtrados e do espectro em wavelets verifica-se que a maré neste verão, na componente meridional, apresentou-se com a maior intensidade dentre os quatro verões estudados.

Na Figura 24(a) tem-se o perfil de amplitudes, em função da altitude, para a maré diurna na componente meridional em 17 de fevereiro de 2007. Observa-se que a máxima amplitude é atingida em 96 km de altitude e o valor fica próximo de 40 m/s. Através do perfil de fases, Figura 24(b), encontra-se que o comprimento de onda vertical é  $\lambda_v = 28,42 \pm 0,68$  km.



**Figura 24** - Perfis de amplitudes e fases da maré diurna, na componente meridional do vento meteorológico, para 17 de fevereiro de 2007 em São João do Cariri-PB.

A Figura 25 mostra a PSD no intervalo entre 18/jan e 15/fev/2007. Na componente zonal, Figura 25(a), observam-se picos com periodicidades de ~16 horas, ~20 horas, ~26 horas, ~32 horas, maré diurna, QTDW e ~3 dias. Nele o pico da maré modifica-se da seguinte forma: inicialmente ele é baixo e vai aumentando para cada semana subsequente. Este mesmo comportamento observa-se para a o pico da maré semidiurna. Ao mesmo tempo em que a maré aumenta a intensidade da QTDW diminui. A partir da segunda semana, observam-se vários picos em torno do pico da maré.



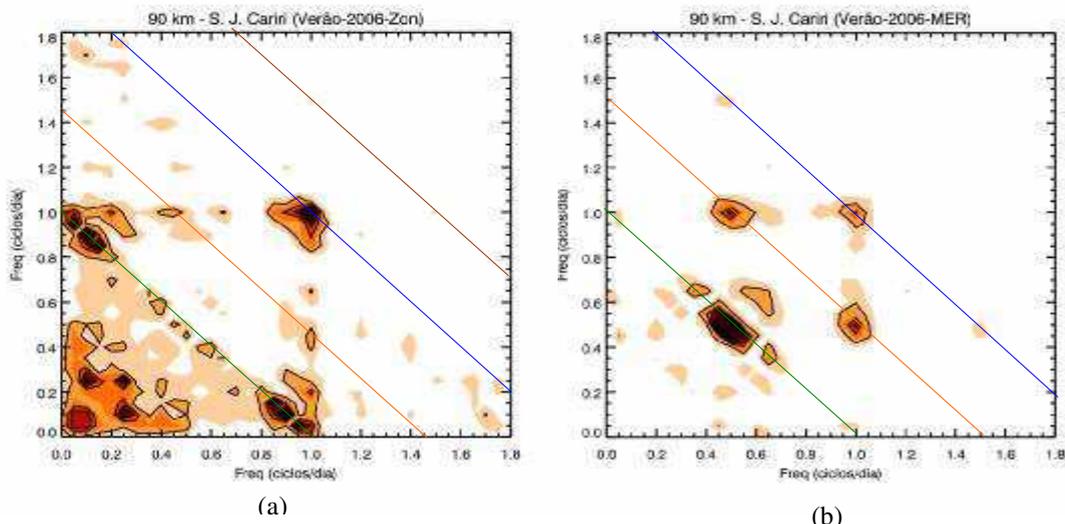
**Figura 25** - Periodograma de Lomb-Scargle do vento meteorológico, em 90 km, no intervalo de 18/Jan até 15/Fev/2007 em São João do Cariri-PB. Componente zonal (esquerda) e componente meridional (direita). Cada gráfico representa uma série de dados de uma semana (7 dias).

Na componente meridional, Figura 25(b), a maré diurna inicialmente é bastante intensa e vai diminuindo para cada semana subsequente, neste mesmo intervalo a QTDW apresenta um comportamento inverso ao da maré. Destaca-se que a intensidade da maré semidiurna apresenta comportamento semelhante ao da QTDW. Ainda, nesta PSD, identificam-se periodicidades de ~20 horas e de ~1,6 dias.

O comportamento da oscilação de ~2,8 dias sugere uma interação não linear com a maré diurna. Esta onda inicia-se bastante intensa e depois diminui até desaparecer na terceira semana. O surgimento de uma oscilação de ~32 horas (~0,75 dias) pode resultar da interação não linear entre estas duas oscilações. A oscilação de ~16 horas surge da interação não linear ressonante entre a maré diurna e a QTDW, enquanto que a oscilação de ~20 horas pode

resultar da interação não linear ressonante da maré com periodicidades entre 5 e 7 dias. Por outro lado, periodicidade entre ~25 horas até ~28 horas podem ser resultantes da interação não linear através da subtração entre as frequências de maré diurna e de ondas com períodos entre 6,5 dias e 16 dias, respectivamente.

Apresenta-se, na Figura 26, os gráficos resultantes da análise biespectral para os dados de vento do verão 2006-2007.



**Figura 26** - Análise biespectral para os dados de ventos meteorológicos de verão 2006-2007, em São João do Cariri-PB, em 90 km. (a) zonal e (b) meridional.

Na Figura 26(a), componente zonal, identificam-se as seguintes tríades resultantes de interações não lineares ressonantes envolvendo a maré diurna:

(a) (0,45; 1,0; 1,45), que corresponde a tríade ressonante da maré diurna, QTDW e a periodicidade de 16,5 horas (frequência de 1,45 ciclo/dia),

(b) (0,4; 0,6; 1,0), que aponta a interação não linear ressonante entre a maré diurna e duas QTDW de períodos diferentes,

(c) (0,2; 1,0; 1,2), que aponta a interação não linear da maré diurna, a onda de ~5 dias e uma periodicidade próxima da maré, cuja frequência é 1,2 ciclo/dia (período de ~20 horas),

(d) (1,0; 0,06; 0,94), (1,0; 0,15; 0,85), (1,0; 0,6; 0,4) e (1,0; 0,65; 0,35). A primeira tríade ressonante deste conjunto aponta uma interação com subtração entre as frequências da maré diurna e da onda de 16 dias (0,06 ciclo/dia) produzindo a onda secundária de 0,94 ciclo/dia (período de ~25 horas). A segunda tríade aponta a interação ressonante entre a maré diurna, a onda de 6,5 dias (0,15 ciclo/dia) produzindo a onda de 0,85 ciclo dia (~28 horas). A

terceira tríade envolve a maré diurna e duas QTDW, uma com frequência 0,4 ciclo/dia (período de ~2,5 dias) e a frequência de 0,6 ciclo/dia (~1,67 dia). Na última tríade tem-se uma interação envolvendo a maré diurna, a onda de 0,35 ciclo/dia (~3 dias) e a onda de 1,35 ciclo/dia (~18 horas), esta tríade ressonante também foi observada na componente meridional.

Na Figura 26(b), componente meridional, identificam-se as tríades ressonantes:

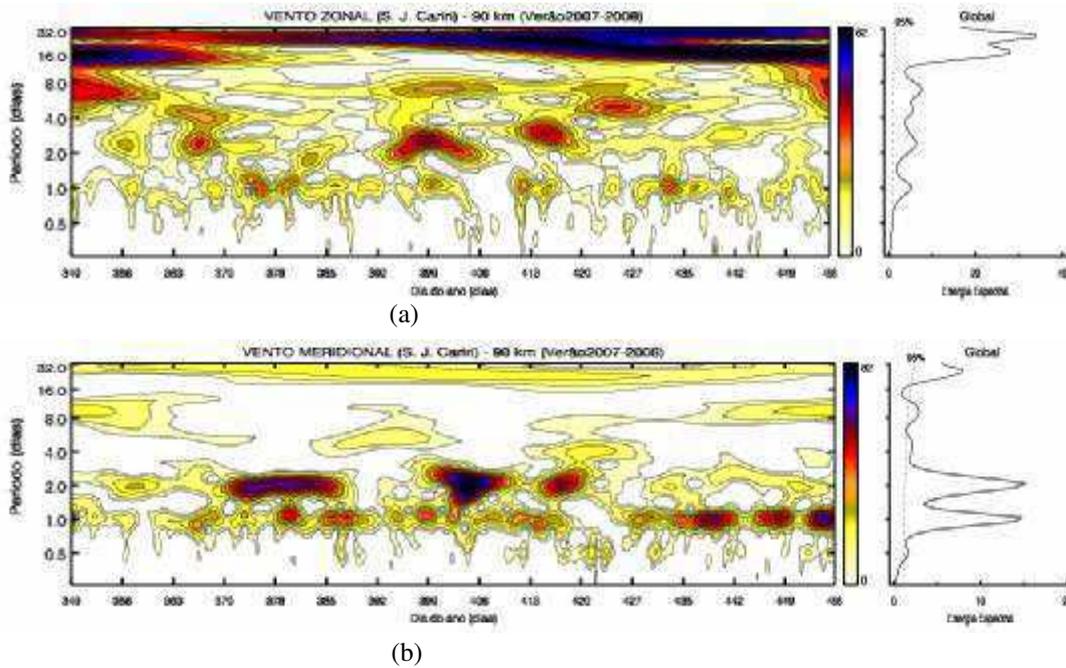
(a) (1,0; 0,5; 1,5), que corresponde a uma interação ressonante envolvendo o modo de maré diurna a QTDW e a onda secundária de período 16 horas. Esta onda resulta da soma das frequências das duas primeiras,

(b) (0,95; 0,06; 1,01) corresponde a interação envolvendo a onda de ~25 horas, a onda de ~16 dias (0,06 ciclo/dia) e a maré diurna. Neste caso, a PSD mostra que o período da maré apresenta pequeno deslocamento para cima ou para baixo (indícios de modulação em amplitude), particularmente, isto é melhor observado na segunda e terceira semanas,

(c) (1,0; 0,35; 1,35), (1,0; 0,5; 0,5). Na primeira tríade tem-se a interação não linear ressonante da maré diurna, a onda de 0,35 ciclo/dia (~3 dias) e a onda de 1,35 ciclo/dia (~18 horas). A tríade (1,0; 0,5; 0,5) aponta a interação não linear da maré diurna com a QTDW, resultando numa onda também de QTDW.

#### 5.2.1.4. Verão 2007-2008

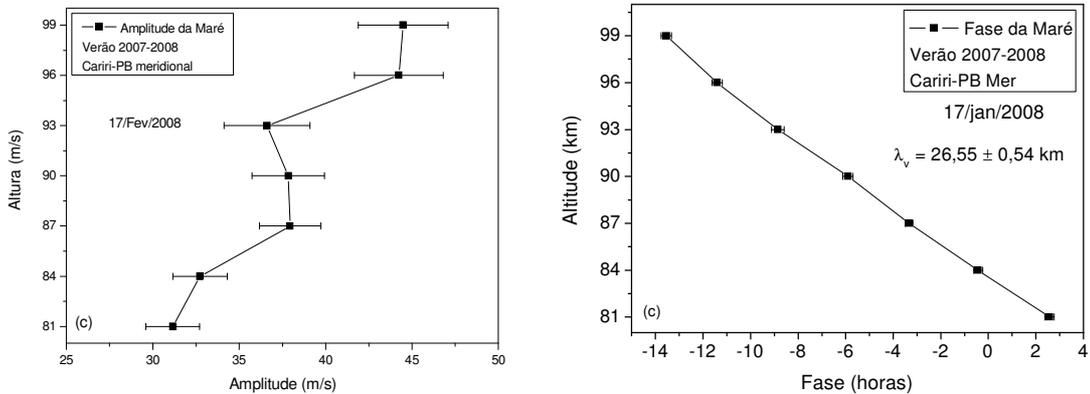
Através dos resultados das análises em wavelets mostradas na Figura 27(a), para o verão 2007-2008 na componente zonal, identificam-se as seguintes periodicidades: oscilações intensas com períodos de ~16 dias e de ~27 dias. A periodicidade de ~16 dias é muito intensa no intervalo que vai, aproximadamente, do dia 349 ao dia 370 e do dia 420 a 456. Identifica-se a oscilação com período de ~8 dias no intervalo do dia 349 a 363 e de 392 a 425, Observa-se também que a maré diurna se revela mais intensa nos intervalos em torno dos dias 374, 380, 399, 412 e 429. Estes eventos também são identificados através dos gráficos dos dados filtrados na Figura 08d. Ainda identificam-se núcleos intensos da oscilação com período de ~3 dias, principalmente, entre os dias 411 e 419 e, ainda, alguma energia significativa para a oscilação com período entre 5 e 7 dias. Neste verão, encontra-se que a QTDW é bastante intensa em torno do dia 366 e no intervalo entre os dias 394 a 406. Encontra-se também alguma energia para oscilações entre 3 e 5 dias. Através da análise do Espectro Global de Energia observa-se que as oscilações identificadas possuem nível de significância acima 95%.



**Figura 27** - Espectros de energia em wavelets nos ventos meteorológicos em São João do Cariri-PB no verão 2007-2008. (a) zonal; e (b) meridional; e da Energia Espectral Global em 90 km.

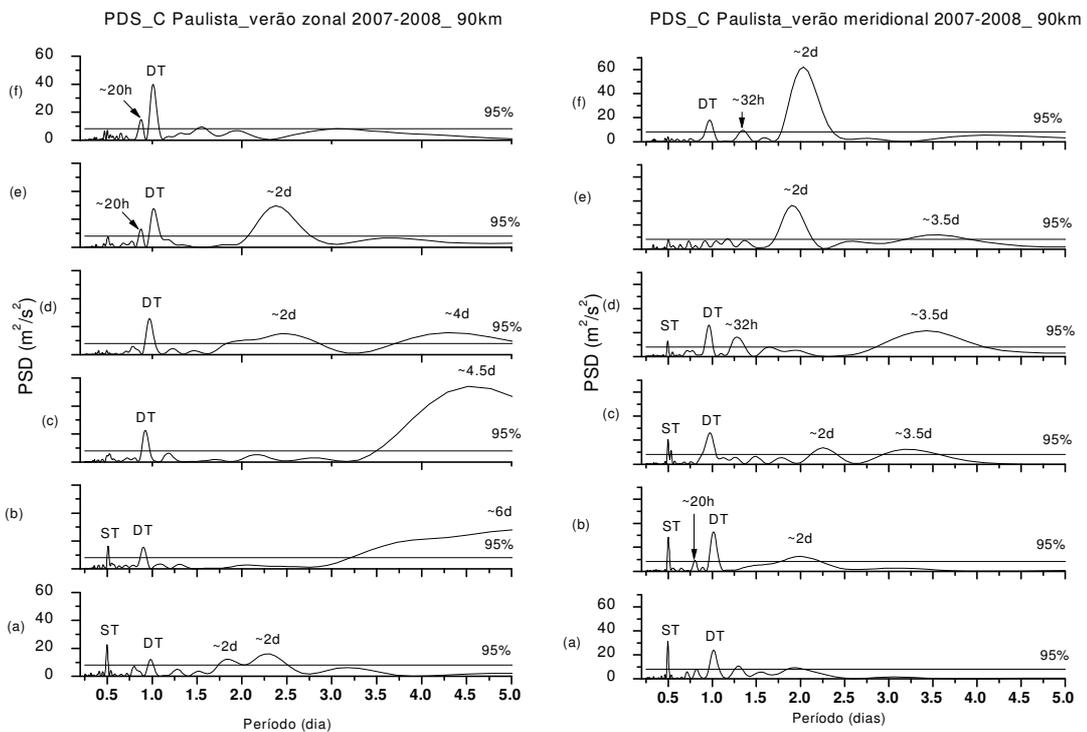
Através da Figura 27(b), referente à componente meridional, identifica-se a oscilação de ~27 dias. Nota-se que não existe energia intensa na periodicidade de ~16 dias. Identifica-se a oscilação com período de ~8-10 dias no intervalo entre os dias 349 e 363 e de 438 a 456. Observam-se vários núcleos intensos para a maré diurna. Estes eventos também são identificados através dos gráficos dos dados filtrados, Figura 08(a). Ainda identifica-se um núcleo para a oscilação com período entre 5 e 7 dias. Observa-se energia espectral bastante intensa para QTDW no intervalo entre 370 e 392 e entre os dias 399 e 408. Este segundo núcleo indica oscilação intensa com período abaixo da QTDW.

A Figura 28(a) mostra o perfil de amplitudes, em função da altitude, para a maré diurna na componente meridional em 17 de fevereiro de 2008. Através dele observa-se que a máxima amplitude da maré é atingida em 96 km de altitude e o valor fica próximo de 40 m/s. Através do perfil de fases, Figura 28(b), encontra-se que o comprimento de onda vertical vale  $\lambda_v = 26,55 \pm 0,54$  km.



**Figura 28** - Perfis de amplitudes e fases da maré diurna, na componente meridional do vento meteorológico, para 17 de fevereiro de 2008 em São João do Cariri-PB.

Na Figura 29 tem-se a PSD para as componentes meridional (direita) e zonal (esquerda) para fevereiro de 2008. Cada um dos gráficos representa uma janela de 07 dias.



**Figura 29** - Periodograma de Lomb-Scargle do vento meteorológico, em 90 km, no intervalo de 18/Jan até 28/Fev/2008 em São João do Cariri-PB. Componente zonal (esquerda) e componente meridional (direita). Cada gráfico representa uma série de dados de uma semana (7 dias).

Para a componente zonal, Figura 29(b), identificam-se picos para a maré diurna, QTDW, maré semidiurna, ~4 dias, ~4,5 dias, ~6 dias e ~20 horas. Na primeira semana existem dois picos referentes a QTDW, e a maré é fraca.

Na componente meridional, Figura 29(b), observam-se picos intensos para maré diurna, maré semidiurna, QTDW,  $\sim 3,5$  dias,  $\sim 20$  horas e  $\sim 32$  horas. Observa-se a anticorrelação entre as intensidades dos picos da maré diurna e da QTDW. A maré semidiurna também apresenta comportamento semelhante ao da maré diurna.

Na componente zonal, Figura 30(a), encontram-se as tríades ressonantes:

(a) (0,8; 1,0; 1,8), que envolve a maré diurna, onda de 30 horas (0,8 ciclo/dia) e uma periodicidade de 1,8 ciclo/dia (período de  $\sim 13$  horas).

(b) (0,45; 1,0; 1,45), que aponta a interação da maré e a QTDW, resultando numa onda secundária de período de  $\sim 16,5$  horas.

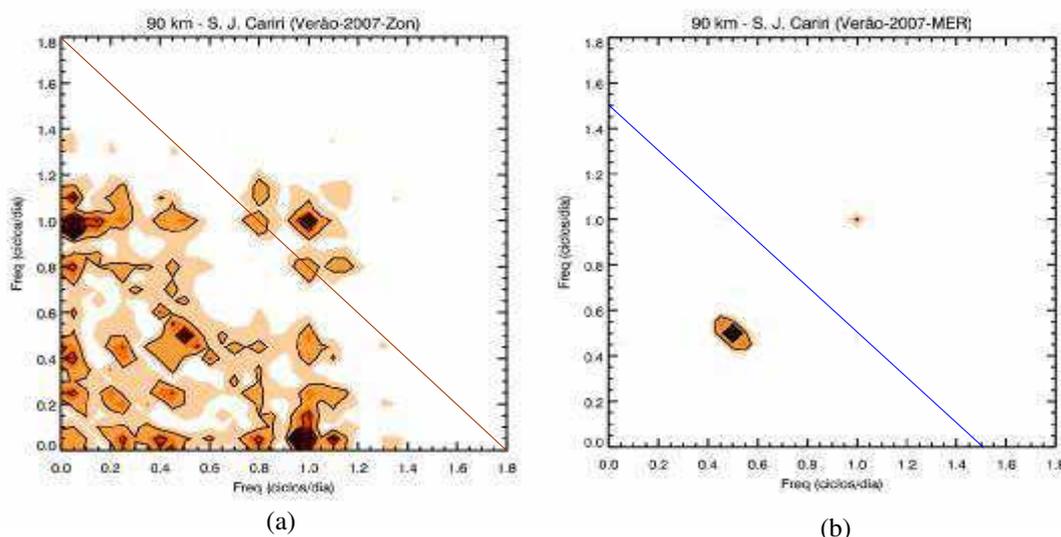
(c) (0,15; 1,0; 1,15), tríade envolvendo a maré diurna, a onda de 6,5 dias e uma periodicidade de  $\sim 21$  horas.

(d) (0,3; 0,7; 1,0), envolve as frequências da maré, da onda de  $\sim 3$  dias e uma frequência de 0,7 ciclo/dia que corresponde a um período de  $\sim 34$  horas.

(e) (0,4; 0,6; 1,0), indica a interação não linear da maré diurna com duas QTDW. Uma QTDW de 0,4 ciclo/dia (período de 2,5 dia) e a outra de 0,6 ciclo/dia (período de 1,67 dia).

(f) (0,49; 1,0; 1,49), envolvendo a maré diurna, a QTDW e a onda de  $\sim 16$  horas.

O resultado da análise biespectral para a componente meridional, Figura 30(b), revela apenas um núcleo tênue que indica interação não linear ressonante entre a maré diurna e a QTDW, o núcleo (0,55; 1,0; 1,55), resultando na onda de  $\sim 16$  horas.



**Figura 30** - Análise biespectral para os dados de ventos meteorológicos de verão 2007-2008, em São João do Cariri-PB, em 90 km. (a) zonal e (b) meridional.

### 5.2.1.5. Discussões dos resultados para os Verões entre 2004 e 2008

Para os verões entre 2004 e 2008, os resultados das análises em wavelets, revelaram a presença de densidade de energia espectral intensas para a maré diurna, QTDW e nas bandas: ~3-4 dias, ~5-7 dias, ~8-10 dias e ~12-20 dias. As oscilações com menores frequências são mais pronunciadas na componente zonal, enquanto que as de maiores frequências são mais evidentes na componente meridional (ex. maré e QTDW). Os espectros de Densidade Global de Energia mostram que estas periodicidades estão presentes com níveis de significância acima de 95%. Durante os verões estudados, encontrou-se oscilações com periodicidades variando entre ~16 horas e ~32 horas. Estas periodicidades podem ser explicadas ao se considerar interações não lineares ressonantes entre a maré diurna e as periodicidades de: QTDW e nas bandas de 3-4 dias, 5-7 dias, 8-10 dias e 12-20 dias.

As séries temporais dos ventos quando submetidos ao filtro Passa Banda, Figura 08, centrado na frequência da maré diurna, revelaram que a amplitude da maré é modulada por periodicidades correspondentes às Ondas Planetárias. A modulação em amplitude se constitui numa mistura ou batimento entre as frequências da onda portadora e da modulante. O sinal resultante deste batimento apresenta um espectro, em frequências, que é composto da onda portadora (no caso a maré diurna) e duas bandas centradas na soma e na diferença entre as frequências da portadora e da modulante (neste caso as Ondas Planetárias).

A interação não linear ressonante é o mecanismo responsável para que ocorra este processo de modulação em amplitude da maré diurna. Neste processo ocorrem trocas de energias entre as frequências envolvidas na interação, de forma tal que, a partir das ondas primárias geram-se ondas secundárias e, isto, se constitui no que se denomina de tríade ressonante. Portanto, a maré diurna ao ser modulada por Ondas Planetárias, participa de um processo de interação não linear ressonante que provoca a variabilidade de sua amplitude e gera oscilações com frequência resultantes de soma/diferença das frequências das ondas primárias que interagem.

Os perfis de amplitudes e fases foram usados para estudar as características da maré diurna. Através destes perfis foi possível estimar os valores das amplitudes máximas atingidas pela maré, em qual altitude elas ocorrem e, ainda, estimar o comprimento de onda vertical. No verão de 2004-2005 este mesmo procedimento também foi aplicado para a QTDW. Os resultados obtidos nas análises concordam com aqueles presentes na literatura da área, demonstrando que os resultados obtidos, nesta pesquisa, são consistentes. Adicionalmente, os

valores obtidos para os comprimentos de onda da maré e da QTDW, juntamente com as condições de interação não linear ressonante, foram utilizados para estimar o comprimento de onda vertical da oscilação secundária de ~16 horas. O valor obtido nesta estimativa é consistente com o valor, do comprimento de onda, obtido através dos dados filtrados e, isto, corrobora com os indícios de interação não linear ressonante entre a maré diurna e a QTDW.

Muitos picos identificados nos espectros de Densidade de Potência Espectral (PSD) encontram-se em períodos correspondentes às ondas secundárias, como por exemplo, a onda de ~16 horas. Para confirmar eventos de interação não linear ressonante entre a maré e outras ondas foi utilizada a técnica de análise biespectral. Os resultados revelaram interações da maré com Ondas Planetárias cujas periodicidades variam entre 0,5 e 20 dias. Na tabela 05 apresenta-se um resumo destes episódios de interação não linear ressonante detectados nos verões entre 2004 e 2008.

**Tabela 05.** Episódios identificados através da análise biespectral como interação não linear ressonante entre a maré diurna e outras ondas nos ventos meteorológicos em 90 km para os verões de São João do Cariri – PB.

	Zonal						Meridional					
	Período das outras ondas (dias)						Período das outras ondas (dias)					
	0,5	2	3-4	5-7	10	12-20	0,5	2	3-4	5-7	10	12-20
2004-5	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	-	Sim	Sim	Sim	-	Sim
2005-6	-	Sim	Sim	Sim	Sim	-	-	Sim	Sim	Sim	-	-
2006-7	-	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	-	Sim	Sim	-	-	Sim
2007-8	-	Sim	Sim	Sim	-	-	-	Sim	-	-	-	-

Os resultados da análise biespectral mostraram que a interação da maré diurna com a QTDW é um evento regular que ocorre em todos os verões estudados. Esta interação é mais importante na componente meridional, embora também ocorra na componente zonal. Como a QTDW é uma oscilação cuja intensificação característica ocorre após os eventos de solstícios (janeiro e fevereiro para o Hemisfério Sul), verifica-se que, neste intervalo, a interação não linear ressonante com a maré diurna é mais pronunciada. Isto fica evidente quando se utiliza a análise da Densidade de Potência Espectral (PSD), pois ela revela que os picos referentes a ambas as oscilações apresentam comportamentos de anticorrelação e também se observa modificações nos períodos das QTDW. Estas características se constituem em fortes evidências de interação não linear entre elas e, a sugestão deste processo de interação não linear, se fortalece ao se identificar picos para oscilações centrados em ~16 horas.

Os resultados obtidos concordam com estudos teóricos (Teitelbaum *et al.*, 1989) e experimentais (Teitelbaum and Vial, 1991; Pancheva *et al.*, 2002) os quais propõem a interação não linear entre Marés Atmosféricas e Ondas Planetárias. E, ainda, que existem

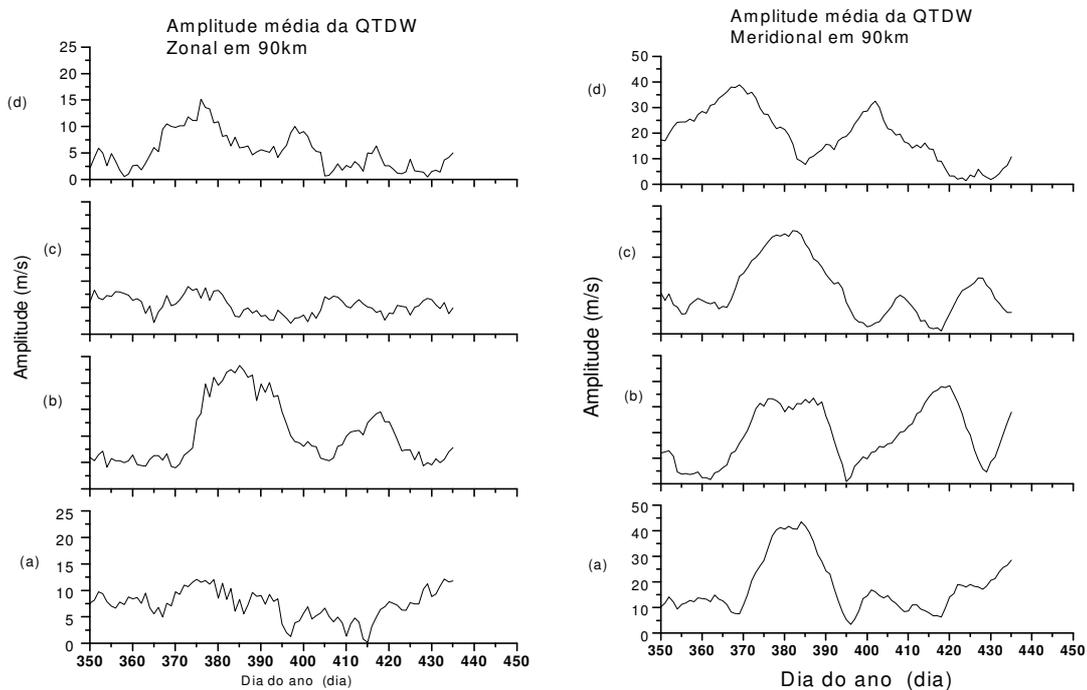
evidências de comportamento com interação não linear ressonante da QTDW com a Maré Atmosférica revelado através do surgimento de oscilações com períodos de ~16 horas (Walterscheid e Vincent, 1996).

Através das análises das Densidades de Potencia Espectral em ambas componentes do vento, em todos os verões estudados, foram encontrados episódios com dois picos simultâneos referentes à QTDW cujos períodos situam-se em valores acima e abaixo de 2 dias, ou, foram encontrados episódios contendo um único pico da QTDW bastante alargado e intenso. Estes comportamentos da QTDW associados com as variações da intensidade observadas nos picos da maré diurna permitem interpretar que uma desta QTDW é gerada a partir da interação não linear ressonante entre a maré diurna e a outra QTDW.

O surgimento simultâneo de duas QTDW foi discutido por Palo *et al.* (1999; 2007). Neste último trabalho, eles usaram dados do SABER (Sounding of the Atmosphere by Broadband Emission Radiometer) a bordo do satélite TIMED (Thermosphere-Ionosphere-Mesosphere Energetics and Dynamics) para mostrar a existência simultânea de duas QTDW, uma com número de onda zonal 2 propagando-se para leste e outra com número zonal 3 propagando-se para oeste. Nesse estudo, eles utilizaram um espectro de frequências em função do número de onda para uma série de dados de temperatura, observados entre as latitudes de 42° e 45°S nas altitudes de 78 e 82 km, entre 22 e 29 de janeiro de 2005. A partir das análises dos resultados eles verificaram um pico dominante na frequência de 0,43ciclo/dia (período de 2,17 dias) propagando-se para oeste e com número zonal três ( $s = -3$ ) e um pico secundário em 0,56ciclo/dia (período de 1,85 dias) se propagando para leste e com número de onda zonal 2 ( $s = +2$ ).

Chang, *et al.*, (2011) usaram o modelo TIME-CGM (Thermosphere Ionosphere Mesosphere Electrodynamic Global Circulation Model) para simular um evento de QTDW para as condições de final de janeiro. Eles encontraram que as bandas laterais para as ondas secundárias são resolvidas, indicando que ocorre uma interação não linear entre o QTDW e a maré. A maré diurna migrante na MLT exibe uma amplitude local que diminui de 20–40%, como também o comprimento de onda vertical diminui de aproximadamente 4 km. Os autores quando examinaram os mecanismos físicos que conduzem a interação, entre a maré e a QTDW, verificaram que a advecção não linear provoca amplificação da maré em algumas regiões e suavização em outras. Adicionalmente, eles encontraram que a QTDW também aumenta o jato de vento leste do verão o qual também pode contribuir nas mudanças na amplitude da maré e no comprimento de onda vertical

Para detalhar o comportamento da QTDW, foram construídos os gráficos da Figura 31, os quais mostram o comportamento das amplitudes médias da QTDW nas componentes zonal e meridional para os verões entre 2004 e 2008. Observa-se que as maiores intensidades acontecem na componente meridional. De forma geral, encontra-se que, nesta componente, a QTDW se intensifica mais pronunciadamente no intervalo entre os dias 370 (04/jan) e 395 (30/jan) com valores em torno de 40 m/s em todos os verões. Este comportamento é tipo pulso e acontece praticamente na mesma época do ano. Na tabela 06 encontram-se os valores e datas de ocorrências da amplitude máxima da QTDW nos meses de janeiro e fevereiro.



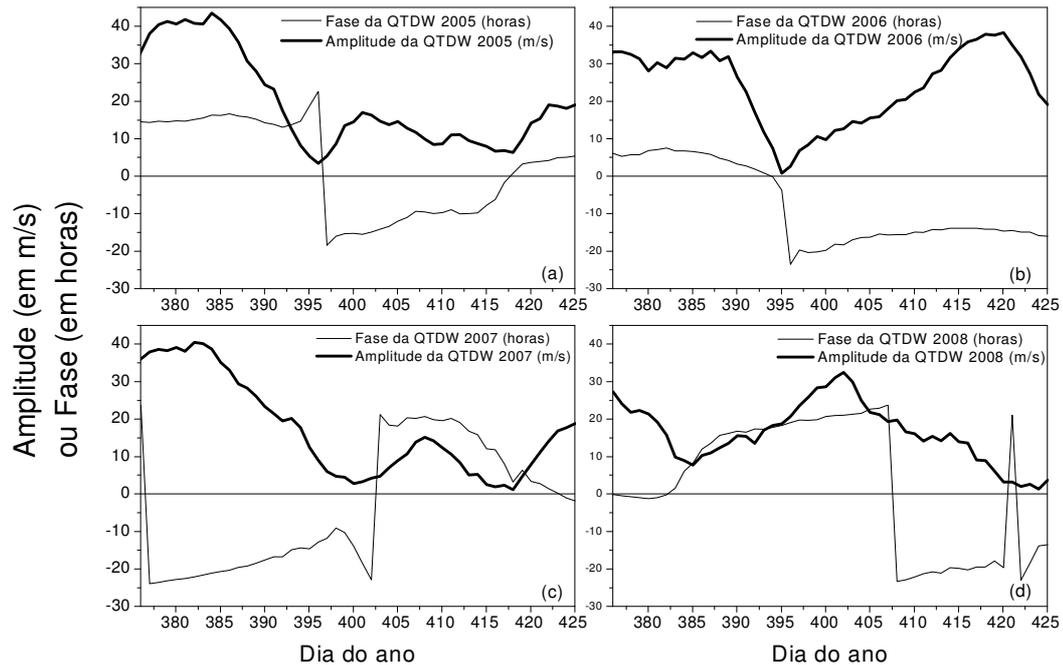
**Figura 31** – Comportamento da amplitude da QTDW, nas componentes zonal (esquerda) e meridional (direita), no verão em São João do Cariri-PB. (a) 2004-2005; (b) 2005-2006; (c) 2006-2007; e (d) 2007-2008.

**Tabela 06** - Valores e datas de ocorrências da amplitude máxima atingida pela QTDW nos meses de janeiro e fevereiro do vento meteorológico meridional de São João do Cariri-PB.

Ano	Meridional		Zonal	
	Período	Amplitude	Período	Amplitude
2005	384 (18/Jan)	~44m/s	375 (09/Jan)	~12m/s
2006	376 (11/Jan)	~33m/s	385 (20/Jan)	~23 m/s
	420 (14/Fev)	~38m/s		
2007	383 (18/Jan)	~40m/s	373 (08/Jan)	~9 m/s
2008	369 (04/Jan)	~39m/s	376 (18/Jan)	~15 m/s
	402 (06/Fev)	~32m/s		

Na Figura 32 tem-se o comportamento da amplitude média e da fase para a QTDW, na componente meridional, entre 11 de janeiro e 28 de fevereiro, para os anos de 2005 a 2008.

Observa-se que, em janeiro, quando a onda se intensifica a fase permanece praticamente constante, isto é, ocorre o fenômeno de travamento de fase ou “Locked Phase”. Este evento que ocorre após o solstício de verão do Hemisfério Sul é tipo pulso.



**Figura 32** – Comportamento da amplitude (linha escura) e da fase (linha clara) da QTDW, na componente meridional, entre 11 de janeiro e 28 de fevereiro. (a) 2005; (b) 2006; (c) 2007; e (d) 2008.

Os resultados aqui obtidos concordam com o estudo de Walterscheid e Vincent (1996) que discutiram o processo de intensificação da QTDW, no Hemisfério Sul, durante o mês de janeiro, e sugeriram que esta oscilação apresenta comportamento tipo pulso com “Locked Phase”. Para explicar a ocorrência do “Locked Phase”, eles sugeriram que o mecanismo responsável por este fenômeno deveria conectar dinamicamente a QTDW a uma variação diária repetitiva tal como as Marés Atmosféricas. O rápido crescimento da amplitude em um tempo curto aponta para uma instabilidade. Então, eles propuseram que o “Locked Phase” está associado a um processo de ressonância paramétrica produzida pela maré sobre a QTDW neste período de intensificação da QTDW.

As condições para a ressonância paramétrica envolvem inicialmente uma interação não linear ressonante onda-onda e, examinando teoricamente este processo para o caso em discussão, Walterscheid e Vincent (1996) encontraram que o modo de maré diurna (1, -6) é a oscilação secundária que pode produzir a ressonância paramétrica da QTDW. Este modo de maré propaga-se para oeste e em fase com a QTDW (0,5 -3) e, a interação não linear

ressonante entre elas, reforça a QTDW que se amplifica enquanto se propaga.

Walterscheid e Vincent (1996) propuseram que o modo de maré diurna (1, -6) envolvido nesta ressonância paramétrica possui características apontando que o mecanismo de sua geração ocorre através da interação não linear ressonante envolvendo as ondas: QTDW e os modos mais importantes das maré semidiurna e diurna. Na tabela 07 apresenta-se as possíveis interações não lineares propostas, por eles, para a geração da maré (1, -6).

**Tabela 07** – Possíveis interações não lineares envolvendo marés semidiurna, diurna e QTDW para gerar a maré diurna (1, -6). Fonte: Walterscheid e Vincent (1996)

Modo de maré	Interações 1	Produtos 1	Interações 2	Produtos finais
Semidiurna	$(2; -2) + (0,5; -3)$	$(2,5; -5)$	$(2,5; -5) - (1,5; 1)$	Maré (1, -6)
	$(2; -2) - (0,5; -3)$	$(1,5; 1)$		
Diurna	$(1; -1) + (0,5; -3)$	$(1,5; -4)$	$(1,5; -4) - (0,5; 2)$	Maré (1, -6)
	$(1; -1) - (0,5; -3)$	$(0,5; 2)$		

McCormack, *et al.* (2010) usaram medidas de temperaturas estratosféricas e mesosféricas do Aura Microwave Limb Sounder (MLS) e do SABER/TIMED, para pesquisar sobre a interação não linear ressonante envolvendo o modo de maré (1, -1), de maré semidiurna (2, -2) e a QTDW (0,5, -3) e, como resultado, encontraram o modo de maré diurna de número de onda 6 propagando-se para oeste (1, -6).

Dentre as oscilações secundárias resultantes das interações não lineares ressonantes (produtos 1, Tabela 07) proposta por Walterscheid e Vincent (1996), encontra-se a oscilação com frequência de 1,5 ciclo/dia (~16 horas). Esta oscilação secundária resulta da interação não linear ressonante entre a maré diurna e a QTDW. Vários picos referentes à episódios desta oscilação foram observados nas PSD dos verões estudados, particularmente, na componente meridional do vento, em janeiro de 2005 e na componente zonal em janeiro de 2007. As análises biespectrais também mostraram possíveis tríades ressonantes envolvendo a oscilação de ~16 horas na componente meridional em todos os verões e, excetuando-se o verão 2007-2008, observa-se também na componente zonal. Estes resultados reforçam a importância da interação não linear ressonante entre a maré e a QTDW na região de estudo.

As séries de dados de ventos meteorológicos de uma única localidade não permitem diferenciar o número de onda zonal das oscilações presentes nos resultados obtidos. Assim, tanto o mecanismo de interação não linear ressonante envolvendo a maré diurna e a QTDW gerando outra QTDW propagando-se para leste com número de onda zonal 2, discutida por Palo *et al.* (2007), quanto a interação não linear da maré diurna com QTDW, que gera uma maré com número de onda zonal 6, discutido por Walterscheid e Vincent (1996) para explicar

o fenômeno de “Locked Phase” da QTDW, a qual foi encontrada experimentalmente por McCormack *et al.* (2010), são explicações possíveis para a variabilidade da amplitude da maré diurna devido a interação não linear ressonante com a QTDW.

Tokumoto (2007) utilizou seis anos de dados coletados pelo radar meteorológico SKiYMET, na região de 80 -100 Km de altitude sobre Cachoeira Paulista-SP, para estudar a variabilidade sazonal e a variabilidade dia-a-dia da maré diurna. Ele encontrou que as interações não lineares entre a maré diurna e a semidiurna, quando ocorrem, produzem duas ondas secundárias: uma maré diurna e uma maré terdiurna. Esta última aparece muito fraca, porém, mostra uma distribuição sazonal nas amplitudes características, com picos próximos aos equinócios, tal qual a maré diurna, indicando que pode haver um reforço na amplitude da maré diurna primária pela maré diurna secundária. Em suas análises ele verificou que há indícios maiores da interação não linear ressonante, entre as componentes de marés, na camada centrada em 85 km e que este mecanismo deve colaborar para a variabilidade dia-a-dia observada particularmente nos meses de abril, setembro e dezembro dos anos analisados. Em relação às Ondas Planetárias, ele concluiu que a QTDW é dominante na componente meridional do vento no verão, época em que a amplitude da maré diurna diminui, e isto é comportamento típico de interação não linear desta Onda Planetária com a maré. Ele concluiu também, através da análise espectral, que os casos de interação não linear entre estas ondas são raros e foram encontrados apenas em dois anos 2000 e 2003, na camada em 95 km. Por isso, Tokumoto sugere que a interação não linear entre a QTDW e a maré diurna não é um mecanismo importante para variabilidade da maré.

Diferentemente dos resultados obtidos por Tokumoto em Cachoeira Paulista-SP, as análises biespectrais dos ventos, em São João do Cariri-PB, apontam que a interação não linear ressonante envolvendo a maré diurna e a QTDW é um evento presente em todos os verões entre 2004 e 2008. Esta interação acontece em ambas componentes, zonal e meridional e, isto, sugere que esta interação é importante para a variabilidade da amplitude da maré diurna, em períodos de Ondas Planetárias, na região mesosférica de São João do Cariri-PB.

Outra interação não linear ressonante identificada envolve a maré diurna e oscilações de ~3-4 dias. As ondas secundárias, geradas nestas tríades ressonantes, apresentam períodos em torno de 18 horas e em torno de 32 horas. As primeiras originam-se da soma das frequências da maré e das ondas de ~3-4 dias, enquanto que as últimas originam-se da diferença das frequências. Mostrou-se, através da Tabela 05, que estas interações foram detectadas em todos os verões estudados. As ondas de ~3-4 dias na região equatorial

detectadas na componente zonal são, possivelmente, ondas ultra-rápidas de Kelvin (Riggin *et al.*, 1997).

A onda ultra-rápida de Kelvin é um tipo de onda atmosférica que existe apenas na região equatorial. O balanço de forças que governa este tipo de onda é controlado pela estratificação do ar e pela mudança do sinal da força de Coriolis no equador. Ela se move para leste e sua componente de velocidade meridional é atenuada quando se afasta do equador. Ela é observada, principalmente, com comprimentos de onda igual à circunferência da Terra ou metade dele, isto é, com número de onda zonal 1 e 2. A onda propaga-se verticalmente, com a amplitude aumentando exponencialmente com a altitude, até um nível em que as condições são tais que ela se dissipa e transfere energia para o fluxo básico (Timmermans, 2005).

As ondas de Kelvin são originadas pela liberação de calor latente associada com convecção na Troposfera e podem ser observadas no vento atmosférico, nos campos de temperatura e pressão e são fontes de momento na média atmosfera (Younger e Mitchell, 2006). Estas ondas podem ser classificadas em três distintas classes segundo os seus períodos e velocidades de fase. As ondas lentas são aquelas com períodos entre 15 a 20 dias, velocidade de fase horizontal de 20-40 m/s, e comprimento de onda vertical de 10 km (Wallace e Kousky, 1968). As ondas com períodos entre 6 e 10 dias são denominadas de ondas rápidas de Kelvin, se propagam com velocidade de fase horizontal de 50-80 m/s e comprimento de onda vertical de 20 km (Hirota, 1978). As ondas de Kelvin com períodos de ~3-4 dias são denominadas ondas ultra-rápidas de Kelvin, a velocidade de fase horizontal é de 120 m/s e o comprimento de onda vertical é de aproximadamente 40 km (Salby *et al.*, 1984).

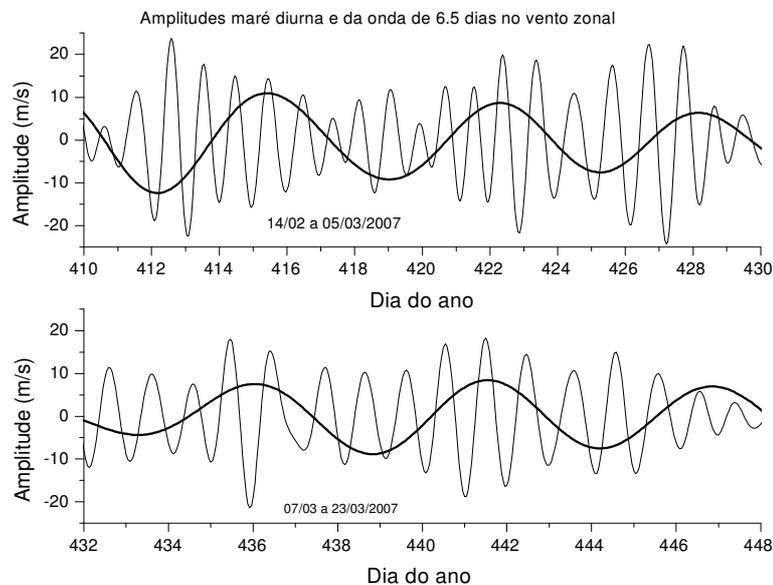
Estudando ondas ultra-rápidas de Kelvin nos ventos meteorológicos de 2005 em São João do Cariri-PB, Alves (2007) identificou 4 episódios bastante significativos destas oscilações. Na tabela 08, apresenta-se um quadro resumo de parâmetros (amplitudes e comprimentos de onda) obtidos por Alves (2007) para períodos em que foram identificadas ocorrências de energia espectral para estas oscilações.

**Tabela 08** - Valores estimados dos parâmetros das ondas de 3-4 dias durante os quatro episódios na componente zonal do vento meteorológico de São João do Cariri-PB, em 2005. Fonte: Alves (2007).

Episódios (estação)	Intervalos de ocorrência (dias/datas)	Período da onda (dias)	Amplitude máxima (m/s)	Comprimento de onda vertical (km)
(verão)	48-78 (17/fev-19/mar)	4,0	25	43,8 ± 3,6
(outono)	130-160 (9/mai-8/jun)	3,6	20	42,4 ± 2,8
(inverno)	200-230 (19/jul-18/ago)	4,0	18	82,0 ± 6,1
(primavera)	300-330 (27/out-26/nov)	3,5	22	79,8 ± 3,5

Os dois primeiros episódios (verão e outono) possuem comprimentos de onda verticais compatíveis com as ondas ultra-rápidas de Kelvin, mas, os dois últimos (inverno e primavera) apresentam valores de comprimentos de onda verticais elevados. Adicionalmente, Alves (2007) utilizou dados de temperaturas do SABER/TIMED para observar a direção de propagação destas ondas e, todos os episódios, mostram propagação para leste compatível com as ondas ultra-rápidas de Kelvin. Devido aos picos intensos de ~18 horas e de ~32 horas detectados através da PSD; dos núcleos envolvendo, a maré diurna e a onda de 3-4 dias, os quais foram identificados nas análises biespectrais; e, ainda, em função da importância das ondas de Kelvin na região equatorial, sugere-se que a onda ultra-rápida de Kelvin contribui para a variabilidade da amplitude da maré diurna na região MLT em São João do Cariri-PB.

Na Figura 33 mostram-se os comportamentos das amplitudes da maré diurna e da onda de ~6,5 dias (mais escuro), na componente zonal do vento, nos intervalos de 07 a 23 de março de 2007 (base) e de 14 de fevereiro a 05 de março de 2008 (topo).



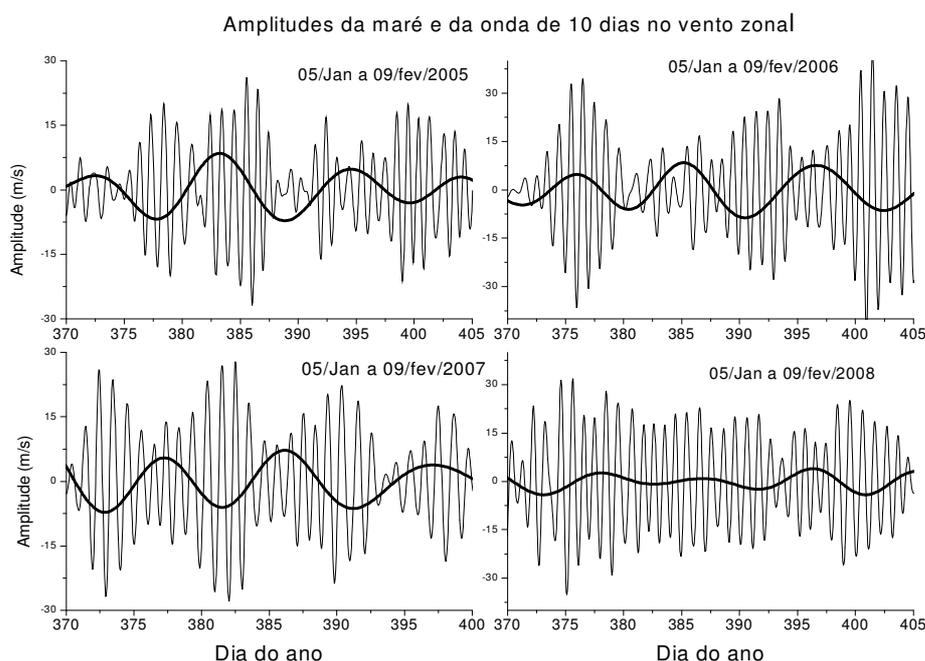
**Figura 33** – Comportamento das amplitudes da maré e da onda de 6,5 dias na componente zonal do vento. (topo) 14 de fevereiro e 05 de março de 2008, e (base) 07 a 23 de março de 2007.

A idéia com estes gráficos é tentar mostrar que a amplitude da maré acompanha o comportamento da onda de ~6,5 dias. Este comportamento implica na modulação da amplitude da maré por esta onda. Portanto, mesmo que a oscilação da onda de 6,5 dias não apresente densidade espectral de energia muito intensa quando comparada às outras ondas planetárias observadas no espectro em wavelets, encontram-se núcleos de interação não linear envolvendo ela e a maré diurna, principalmente, na componente zonal dos ventos. A

interação não linear destas duas ondas pode gerar ondas secundárias com periodicidades de ~20 horas e de ~30 horas. Picos referentes a estas periodicidades são observados nas PSD da componente zonal dos verões estudados. Os resultados das análises biespectrais revelaram núcleos indicando interações não lineares ressonantes entre a maré e a onda de ~6,5 dias.

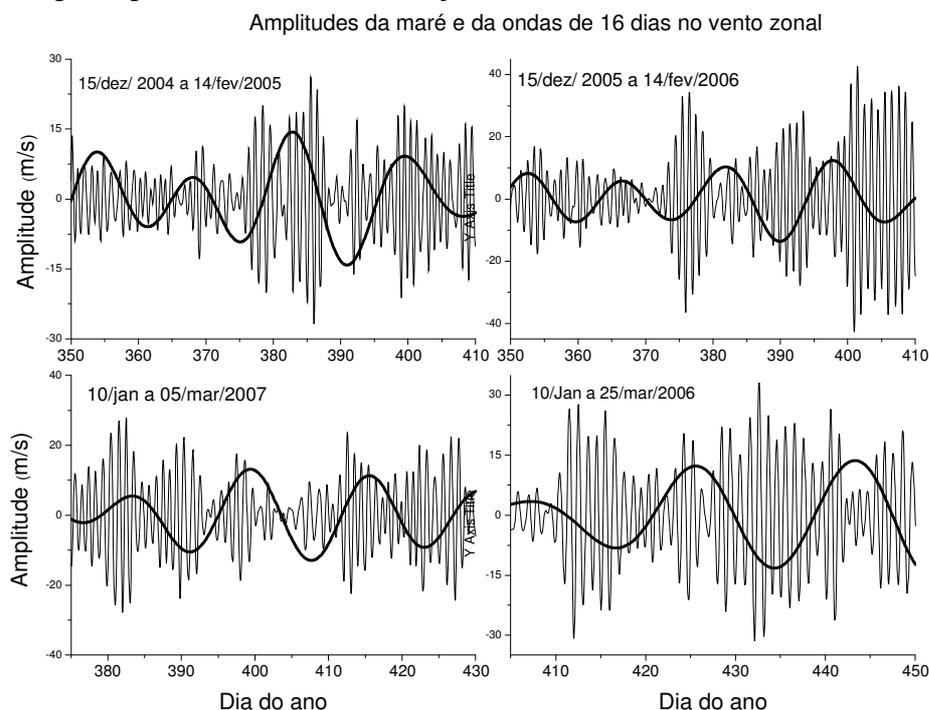
Sugere-se que a interação não linear ressonante envolvendo a maré diurna e a onda de 6,5 dias também contribui para a variabilidade da amplitude da maré diurna no verão na região mesosférica de São João do Cariri-PB. Entretanto, como a onda de 6,5 dias não é muito forte no verão e os espectros em wavelets mostram poucos períodos em que ela é significativa, sugere-se também que sua contribuição não seja tão importante como é a da QTDW na variabilidade da amplitude da maré diurna na região de estudo.

Através da Figura 34, componente zonal do vento, comparam-se os comportamentos das amplitudes da maré diurna e da onda de ~10 dias no período entre 05/Janeiro e 09/fevereiro de 2005 à 2008. Há indícios de correlação entre os comportamentos destas amplitudes nos anos de 2005 à 2007. Estes indícios são a modulação da amplitude da maré pela onda de ~10 dias. Esta última, quando identificada através do espectro em wavelets, apresenta energia significativa nos meses de janeiro e fevereiro de cada ano e, através da análise biespectral, encontram-se núcleos correspondentes à interação não linear ressonante entre a maré diurna e a onda de ~10 dias..



**Figura 34** – Comportamento das amplitudes da maré e da onda de 10 dias na componente zonal do vento de 05/janeiro a 09/fevereiro para os anos de 2005-2008.

Na Figura 35 tem-se a comparação entre os comportamentos das amplitudes da maré diurna e da onda de ~16 dias na componente zonal dos ventos para 15/dez/2004 a 14/fev/2005; 15/dez/2005 a 15/fev/2006; 10/jan a 05/mar/2007; e 10/jan a 25/mar/2008. Há indícios de que a amplitude da maré acompanha amplitude da onda de ~16 dias, ou seja, quando há aumento da amplitude da onda de ~16 dias, a amplitude da maré, em média, tende a acompanhar este aumento. Este tipo de comportamento corresponde à modulação da maré pela onda de ~16 dias. A onda de 16 dias, identificada através do espectro em wavelets, é muito intensa, principalmente, nos meses de janeiro e fevereiro dos anos estudados.



**Figura 35** – Comportamento das amplitudes da maré e da onda de 16 dias na componente zonal do vento nos intervalos de 15/dezembro a 14/fevereiro para os anos de 2004 a 2006 (topo) e, no intervalo entre 10/Janeiro a 25/fevereiro para os anos de 2007 e 2008 (base).

Picos para as periodicidades de ~22 horas e de ~27 horas, resultantes possivelmente da interação da maré diurna com as ondas de 10~dias e de ~16 dias e, foram identificados nos gráficos da PSD nos verões de 2004-2005 e 2006-2007. As análises biespectrais revelaram núcleos correspondentes à interação não linear ressonante entre a maré e a onda de ~16 dias. Assim, sugere-se que as ondas de ~10 dias e de ~16 dias também modulam a maré diurna e contribuem para sua variabilidade no verão na região MLT em São João do Cariri-PB.

As frequências das ondas secundárias resultantes da interação não linear ressonante entre a maré e a onda de ~10 dias ou com a de ~16 dias são muito próximas da frequência da própria maré e, portanto, constiu-se em mais uma dificuldade para se identificar exatamente

qual Onda Planetária interagiu com a maré. Portanto, é razoável sugerir que as oscilações secundárias com períodos de ~22 horas e de ~27 horas são resultantes da interação não linear ressonante da maré diurna e Ondas Planetárias na banda ~10-20 dias.

## 5.2.2. Estação de Outono

### 5.2.2.1. Espectros em wavelets para todos os outonos

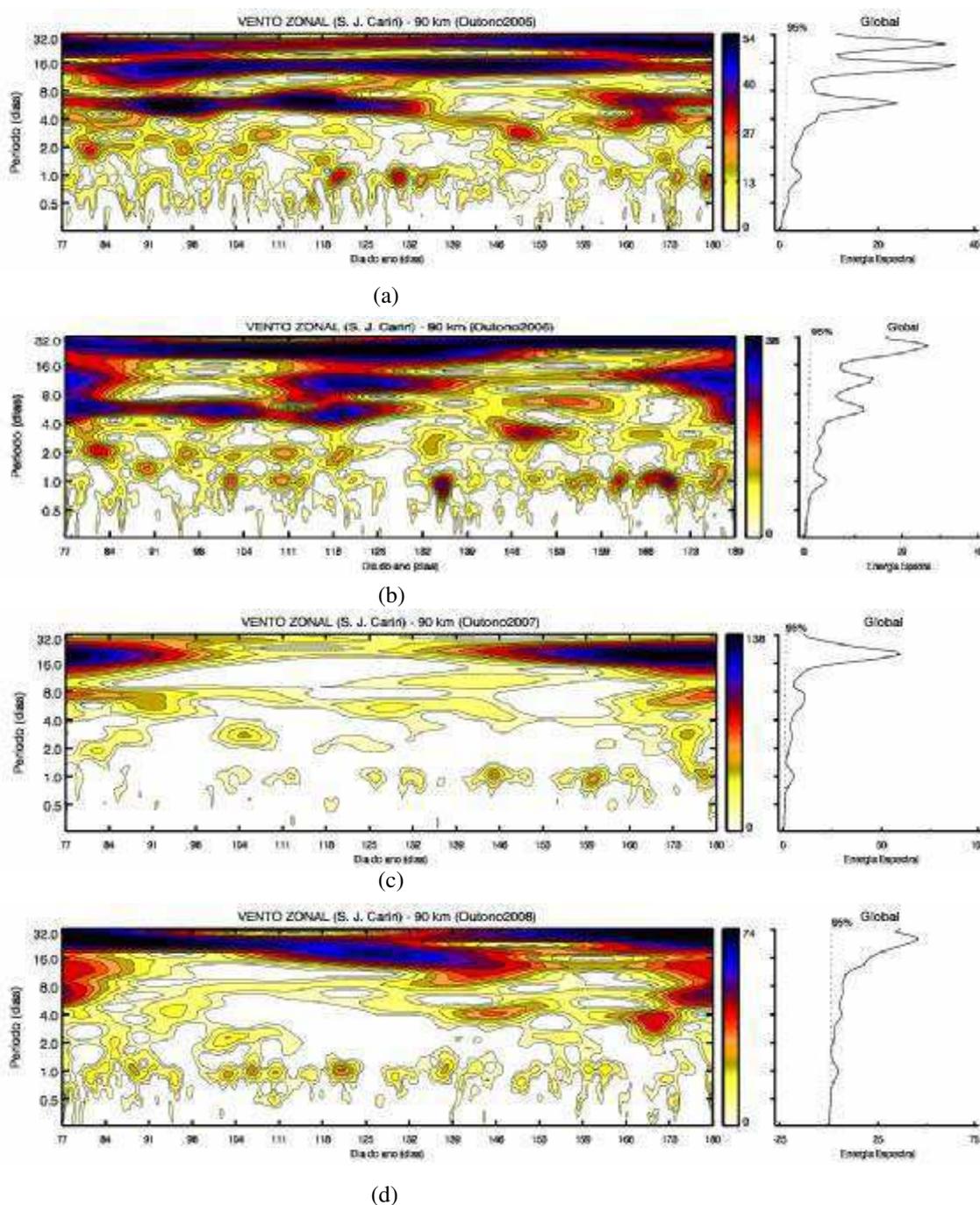
Na Figura 36 têm-se os espectros em wavelets, na componente zonal dos ventos, para os outonos entre 2005 e 2008. Através deles observa-se a presença das seguintes periodicidades com nível de significância acima de 95%: oscilações de ~27 dias, maré diurna, QTDW, oscilações de ~3-4 dias, ~5-7 dias e ~12-20 dias.

Em 2005, Figura 36(a), a oscilação de ~5-7 dias é muito intensa entre os dias 77 e 135 e entre os dias 159 e 180. A oscilação de ~3-4 dias está presente entre os dias 147 e 153 e entre os dias 159 e 180. Embora se identificando alguma energia espectral para a QTDW na maior parte da estação, nota-se pouca presença de núcleos intensos para esta oscilação. A maré diurna se revela com maior intensidade nos intervalos entre os dias 120 e 122 e entre os dias 129 a 131. A presença dos núcleos intensos da maré ocorre em intervalos nos quais a QTDW é menos intensa. Energias espectrais da maré semidiurna também são identificadas.

Em 2006, Figura 36(b), a oscilação de ~5-7 dias é muito intensa entre os dias 77 e 128, 110 e 139 e entre os dias 159 e 180. A oscilação de ~3-4 dias está presente entre os dias 142 e 153. Embora se identificando alguma energia espectral da QTDW, observam-se poucos núcleos intensos para esta periodicidade, a exemplo do núcleo entre os dias 88 a 85. A maré diurna se revela mais intensa em torno dos dias 135 e 162 e entre os dias 164 e 170. Os núcleos intensos para a maré ocorrem nos intervalos em que a QTDW é menos intensa.

Em 2007, Figura 36(c), identificam-se núcleos com energia intensa para as oscilações de ~27 dias e de ~12-20 dias nos intervalos entre os dias 77 e 100 e entre 139 e 180. Neste espectro observa-se a presença de um núcleo para a oscilação de ~8 dias entre os dias 77 e 94 e, ainda, de energias para a oscilação de ~5-7 dias, mas nenhum núcleo muito intenso para esta oscilação. Para a QTDW, núcleos intensos quase não são identificados e, apenas no intervalo entre os dias 77 e 84, tem-se um núcleo tênue que se estende e se mistura com um núcleo de ~3-4 dias. Apenas três núcleos mais intensos para a maré diurna são identificados em torno dos dias 145, 161 e 178.

Em 2008, Figura 36(d), identifica-se energia para ~27 dias durante toda a estação e para ~12-20 dias entre os dias 111 e 153 e entre os dias 166 e 180. Para a QTDW encontra-se um núcleo intenso entre os dias 99 e 111. A maré diurna apresenta núcleos mais intensos em torno do dia 88, entre os dias 100 e 125 e entre os dias 128 e 146. Dois núcleos intensos com período de ~3-4 dias estão presentes entre os dias 139 e 153 e entre os dias 166 e 173.



**Figura 36** - Espectro de energia em wavelets da componente zonal nos ventos meteorológicos do outono em São João do Cariri-PB. (a) 2005; (b) 2006; (c) 2007; (d) 2008 e da Energia Espectral Global em 90 km.

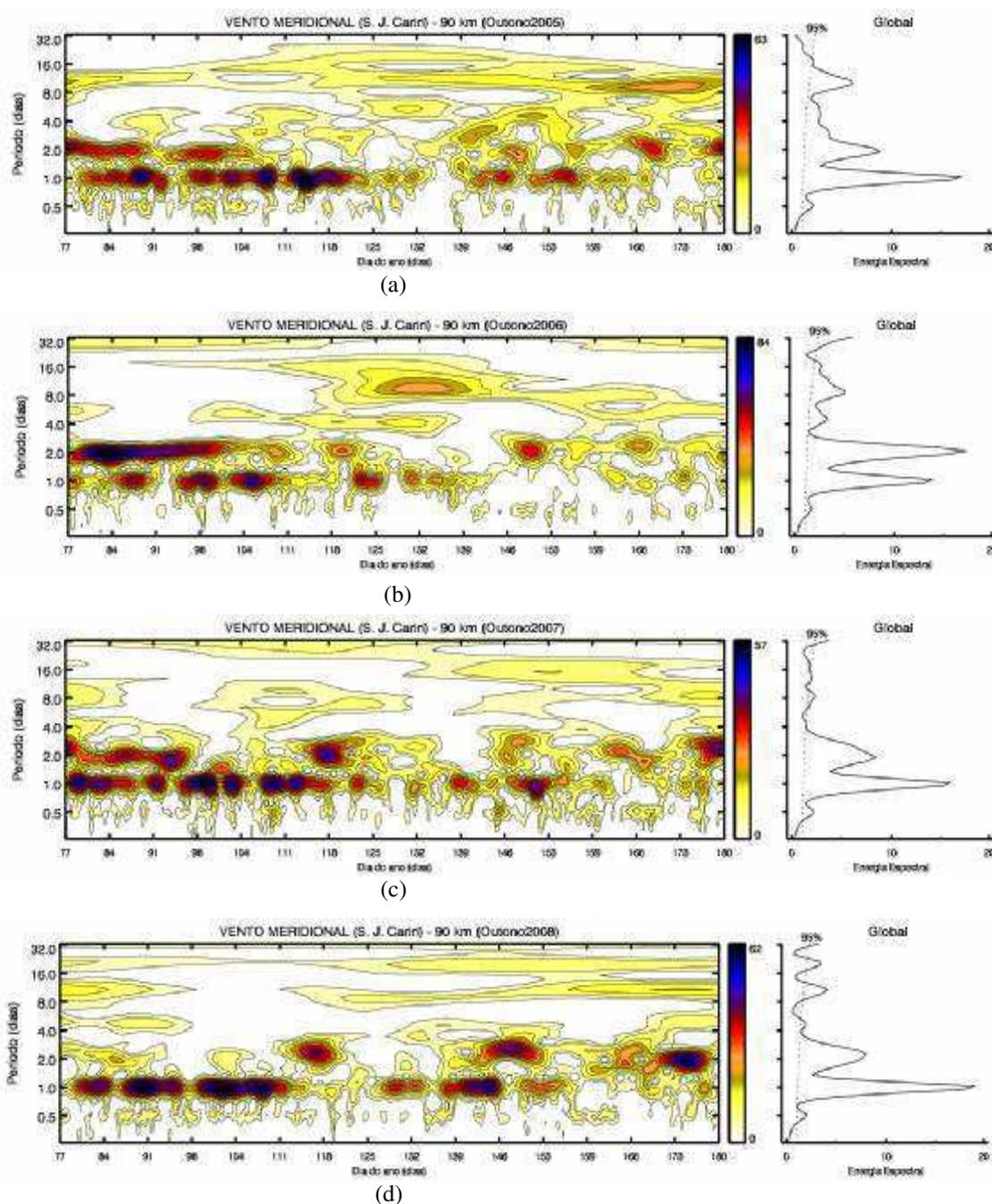
Na Figura 37(a), tem-se o espectro em wavelets na componente meridional do vento para o outono de 2005, observam-se núcleos muito intensos para a QTDW nos intervalos entre os dias 77 e 89, entre os dias 94 e 105 e em torno dos dias 148, 168 e 180. A maré diurna é bastante intensa nos intervalos entre os dias 79 e 93, entre os dias 97 a 121 e, menos intensa entre os dias 141 e 156. Identifica-se energia, durante toda a estação, para a periodicidade de ~10 dias. Esta oscilação é mais intensa entre os dias 165 e 176.

No outono de 2006, Figura 37(b), observam-se núcleos intensos para a QTDW entre os dias 77 e 111, em torno dos dias 110, 149 e 166. A maré diurna é muito intensa em torno dos dias 87 e 122 e no intervalo entre os dias 94 e 109. Identificam-se um núcleo intenso de energia para a periodicidade de ~10 dias no intervalo entre os dias 125 e 139.

No outono de 2007, Figura 37(c), observam-se núcleos intensos para a QTDW entre os dias 77 e 118, em torno dos dias 110, 162 e 178. A maré diurna é muito intensa no intervalo entre os dias 77 e 118 e em torno dos dias 110, 139 e 151.

No outono de 2008, Figura 37(d), observam-se núcleos intensos para a QTDW nos intervalos entre os dias 113 e 118, entre os dias 142 e 153 e entre dias 167 e 178. A maré diurna é muito intensa nos intervalos entre os dias 79 e 112, entre os dias 143 e 153 e entre os dias 163 e 179. Identifica-se um núcleo intenso de energia na periodicidade de ~10 dias entre os dias 125 e 139.

Excetuando-se o outono de 2006, a maré diurna é a oscilação mais intensa para as estações de outono estudadas. O intervalo de maior intensidade, para todos os anos, vai do início da estação até meados do mês de abril. A QTDW, com exceção do ano de 2008, é muito intensa no início dos outonos. Observa-se ainda que intervalos de QTDW intensas alternam-se com intervalos de maré fraca. Os períodos centrais para os núcleos da QTDW são encontrados com valores tanto ligeiramente acima como abaixo de 2 dias.

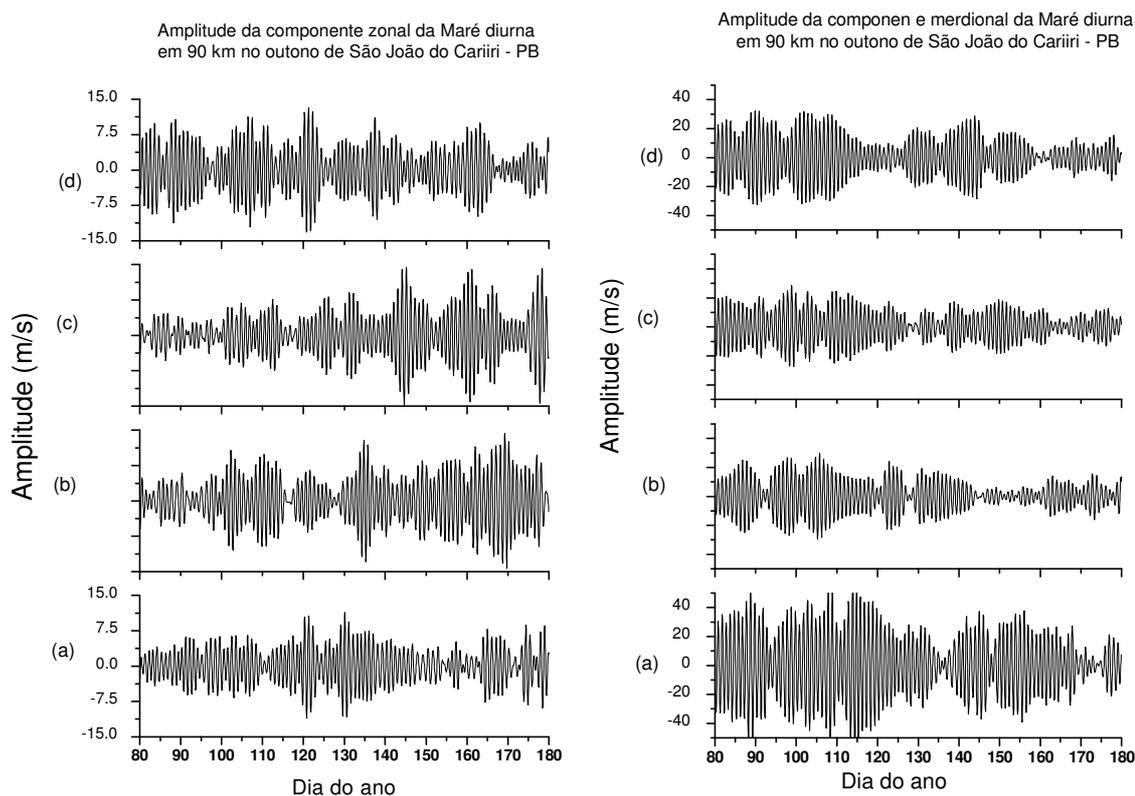


**Figura 37** - Espectro de energia em wavelets da componente meridional nos ventos do outono em São João do Cariri-PB. (a) 2005; (b) 2006; (c) 2007; (d) 2008 e da Energia Espectral Global em 90 km.

### 5.2.2.2. Análise dos dados filtrados

Na Figura 38, apresentam-se os resultados dos dados filtrados para a maré diurna nos ventos dos outonos estudados. Na componente zonal (à esquerda) as amplitudes da maré encontram-se em torno de 15 m/s, enquanto que na componente meridional ela atinge valores

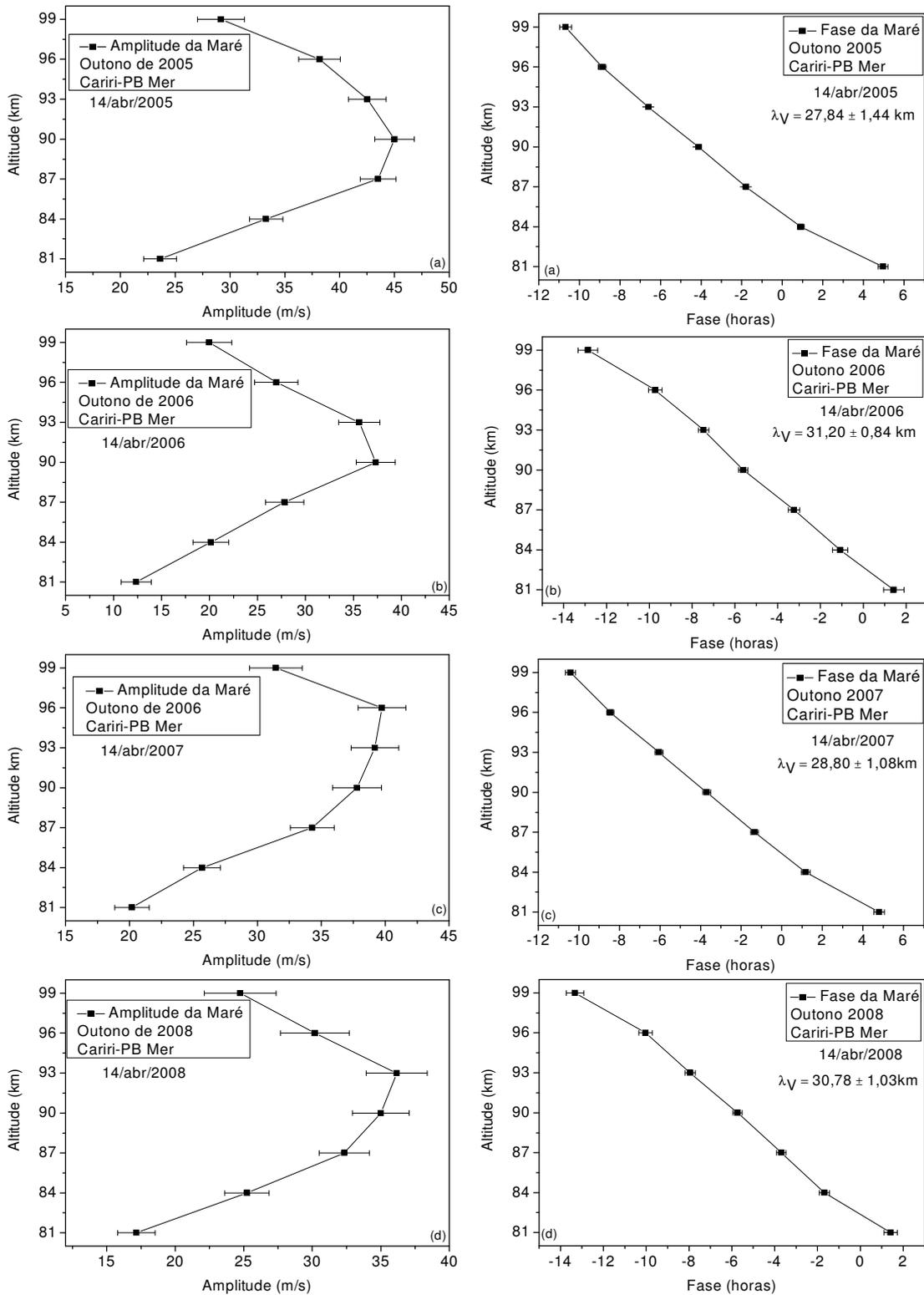
próximos a 40 m/s. Através dos gráficos observa-se que, na componente meridional, a maré é mais intensa no início da estação até meados de abril. Os observa-se também, para ambas componentes, que a maré apresenta modulação em amplitude.



**Figura 38** - Amplitudes da maré diurna no outono em São João do Cariri-PB (esquerda componente zonal e direita componente meridional) em 90 km. (a) 2005; (b) 2006; (c) 2007; (d) 2008

### 5.2.2.3. Perfis de amplitudes e fases

Na Figura 39, apresentam-se os perfis de amplitudes (à esquerda) e fases (à direita), para o dia 14 de abril, a partir do topo, de 2005 a 2008 na componente meridional. A amplitude da maré diurna é maior no outono de 2005 em que ela atinge aproximadamente o valor de 45 m/s em 90 km. Nos demais outonos, a amplitude da maré fica abaixo deste valor, mas ainda bem próximos dos 45 m/s. O fato de a amplitude da maré ser elevada gera um perfil de fases bem definido, o que é adequado para o cálculo do comprimento de onda vertical. Os valores calculados dos comprimentos de onda vertical da maré situam-se entre  $\lambda_v = 27,84 \pm 1,44 km$  para o outono de 2005 e  $\lambda_v = 31,20 \pm 0,84 km$  em 2006. Estes valores estão próximos daqueles da literatura. Observa-se ainda que os valores máximos das amplitudes, para esta componente, são atingidos em 90 km ou em altitudes acima deste valor.



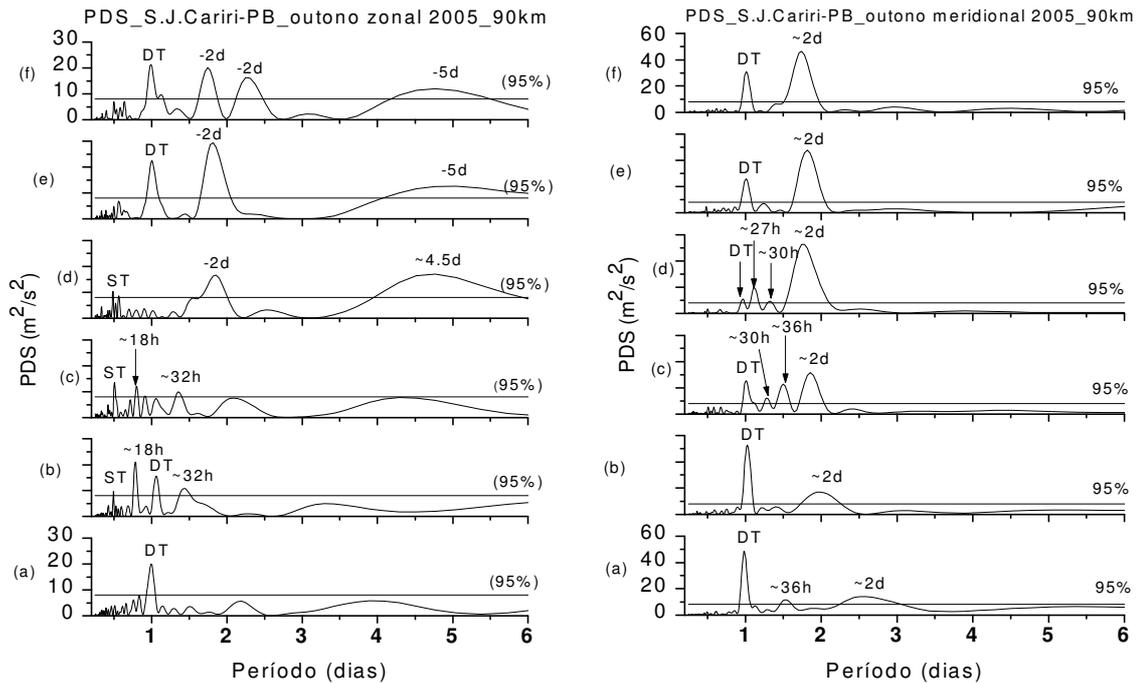
**Figura 39** - Perfis de amplitudes (esquerda) e fases (direita) da maré atmosférica meridional no outono em São João Cariri-PB. (a) 2005, (b) 2006, (c) 2007, (d) 2008.

#### 5.2.2.4. Densidade de Potência Espectral (PSD)

A Figura 40 mostra a PSD entre 23/março e 05/maio do outono de 2005. Na componente zonal, Figura 40 (esquerda), identificam-se os seguintes picos acima do nível de significância de 95%: maré diurna, maré semidiurna, QTDW, ~5 dias, ~18 horas e ~32 horas. O pico da maré diurna apresenta um valor significativo na primeira semana, Figura 40(a), depois vai diminuindo e na terceira e quarta semanas fica abaixo do nível de significância. Na quinta e sexta semanas, o pico assume novamente valores acima de 95%. A maré semidiurna apresenta inicialmente um pico abaixo do nível de significância e, a partir da segunda semana, o pico fica acima dos 95% e permanece até a quarta semana, Figura 40(d). Na quinta e sexta semanas ele fica no limite do nível de significância. O pico para a QTDW só fica acima do nível de significância a partir da quarta semana. Ele aumenta bastante na quinta semana e, na sexta semana, surgem dois picos para a QTDW. Na segunda e terceira semanas tem-se um pico intenso para a oscilação secundária de ~18 horas e outro para ~32 horas. Nesta PSD, a partir da terceira semana, Figura 40 (c), surge um pico intenso para ~5 dias. Este pico inicia-se com um período próximo de 4 dias que, depois, aumenta para próximo de 5 dias. A oscilação de ~18 horas (1,33ciclo/dia) é possível a partir da interação não linear ressonante por soma de frequências da maré diurna com uma periodicidade ~3-4 dias, enquanto que a periodicidade de ~32 horas (0,75 ciclo/dia) pode surgir da diferença de frequências entre estas duas ondas primárias. Observando-se o comportamento das duas oscilações primárias, verifica-se que no surgimento das duas oscilações secundárias, os picos da maré e da onda de ~5 dias estão abaixo do nível de 95%. Quando as duas oscilações secundárias desaparecem, os picos das oscilações primárias voltam a ficar acima do nível de significância. Isto sugere que na geração destas duas oscilações secundárias, tanto a energia da maré quanto da onda de ~5 dias são cedidas para produzir as ondas secundárias. Na quinta semana, Figura 40(e), tem-se ambas, maré e QTDW intensas. Na última semana, além da maré, têm-se dois picos para a QTDW, um centrado em ~1,75 dias e o outro em ~2,25 dias. O período da QTDW na quinta semana é de ~1,82 dias e, se esta oscilação interagir com a maré diurna, por subtração de frequências, gera a QTDW de período de ~2,2 dias e número de onda zonal 2.

Na Figura 40(direita), tem-se a PSD para componente meridional. Nela observa-se que a maré diurna é intensa e, depois, vai diminuindo até atingir, na quarta semana, Figura 40(d), o limite de 95% de significância. Entre a terceira e quarta semanas surgem quatro picos nas periodicidades de ~27 horas, ~30 horas, ~32 horas e de ~36 horas. Estas oscilações são possíveis através da interação não linear ressonante entre a maré diurna e oscilações com

periodicidades entre 3 e 7 dias, entretanto, nesta PSD não se observam picos intensos para as oscilações em questão, embora existam picos fracos referentes à energia destas oscilações.

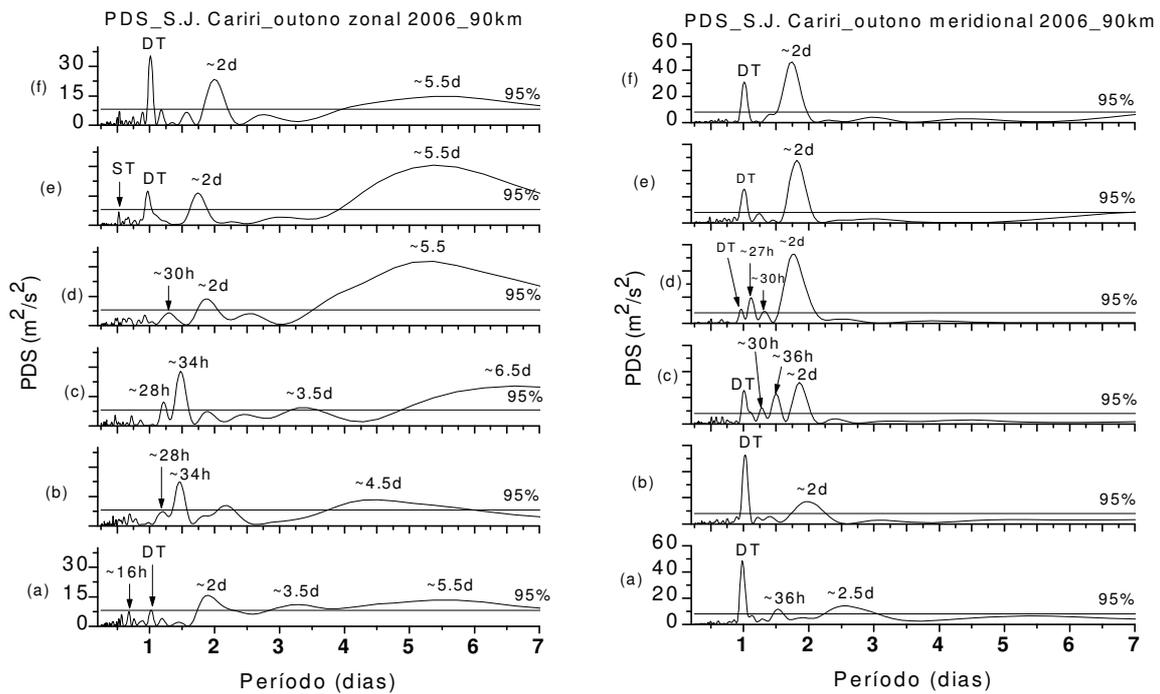


**Figura 40** - Periodograma de Lomb-Scargle, entre 23/mar e 05/mai, nos ventos meteorológicos do outono de 2005 em São João do Cariri-PB, em 90 km. Zonal (esquerda) e meridional (direita).

A Figura 41 mostra a PSD entre 23/março e 05/maio de 2006. Na componente zonal, Figura 41 (à esquerda), identificam-se picos acima do nível de significância de 95% para a maré diurna, QTDW, ~3,5 dias, ~4,5 dias, ~5,5 dias, ~16 horas, ~28 horas, ~30 horas e ~34 horas. O pico para a maré diurna torna-se significativo a partir da quinta semana, Figura 41(e). Na primeira semana, Figura 41(a), tem-se o pico de ~16 horas que pode ser originada da interação não linear ressonante entre a maré diurna e a QTDW. O pico para a oscilação de ~34 horas, Figura 41(c), pode resultar da interação não linear ressonante entre a maré diurna e a oscilação de ~3-4 dias. A oscilação de ~28 horas, Figura 41(c), pode resultar da interação não linear ressonante entre a maré diurna e a oscilação de ~5-7 dias. O pico para a oscilação entre 5-7 dias é bastante intenso, principalmente, na quarta e quinta semanas.

Na Figura 41(à direita) tem-se a PSD para componente meridional. Nele observa-se, inicialmente, o pico intenso para a maré diurna que, depois, diminui até atingir na quarta semana, Figura 41(d), um valor pouco acima do limite de 95%. Entre a primeira e quarta semanas surgem os picos nas periodicidades de ~27 horas, ~30 horas e em ~36 horas. Estas

oscilações são possíveis através da interação não linear ressonante entre a maré diurna e oscilações entre 3 e 5 dias. A oscilação de ~36 horas é possível pela subtração de frequências entre a maré diurna e a oscilação de período ~3-4 dias, Figura 41(a). Estas oscilações secundárias produzidas por interações não lineares ressonantes, envolvendo a maré diurna, acontecem quando a intensidade dos picos para maré diminui, sugerindo que nestas tríades a maré diurna atua como sumidouro de energia.

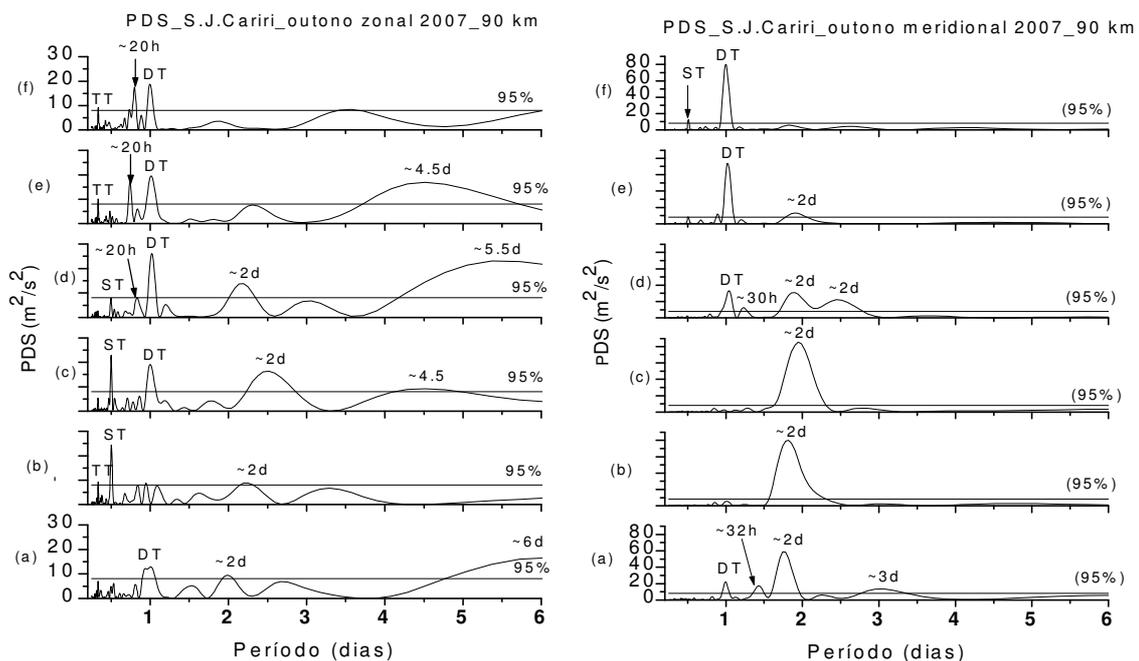


**Figura 41** - Periodograma de Lomb-Scargle, entre 23/mar e 05/mai, nos ventos meteorológicos do outono de 2006 em São João do Cariri-PB, em 90 km. Zonal (esquerda) e meridional (direita).

A Figura 42 mostra a PSD entre 23/março e 05/maio de 2007. Na componente zonal, Figura 42-esquerda, identificam-se picos acima do nível de significância de 95% para a maré diurna, maré semidiurna, maré terdiurna, QTDW, ~4,5 dias, ~5,5 dias e ~20 horas. O pico para a maré diurna fica abaixo de 95% na segunda semana, Figura 42(b), e neste intervalo tem-se a presença significativa de picos para os modos de marés semidiurna e terdiurna. Esta última pode resultar da interação não linear entre os modos de maré diurna e semidiurna. A oscilação de ~20 horas pode resultar da interação não linear ressonante entre a maré diurna e a oscilação de ~5-7 dias. A QTDW apresenta um pico pouco intenso na primeira semana que, depois, se amplia e atinge um valor mais intenso na terceira semana, Figura 42(c). A partir daí ele diminui até ficar abaixo do nível de significância na sexta semana, Figura 42(f). Na quinta

e sexta semanas têm-se novamente picos significativos para a maré terdiurna. Nestas semanas, o pico da maré semidiurna diminui, sugerindo que sua energia é cedida para a maré terdiurna através do processo de interação não linear ressonante com a maré diurna. Na última semana surge um pico de ~20 horas e o pico de ~4,5 dias desaparece e surge um pico de ~3,5 dias.

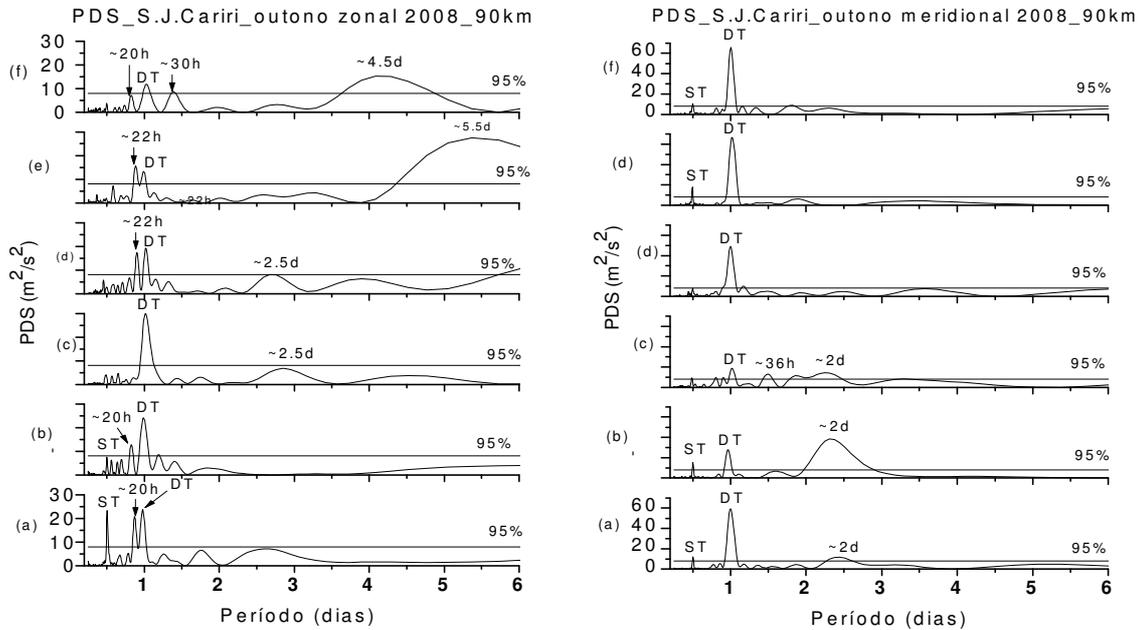
Na Figura 42-direita tem-se a PSD para componente meridional. Nele observa-se que a maré diurna está inicialmente acima do nível de significância e desaparece na segunda e terceira semanas e, a partir daí, ele aumenta até atingir um valor intenso na sexta semana, Figura 42(f). Na primeira semana, Figura 42(a), tem-se um pico de ~32 horas que, possivelmente, resulta da interação não linear ressonante entre a maré diurna e a oscilação de ~3-4 dias. O pico para QTDW é intenso na primeira semana e se amplifica na segunda e terceira semanas. Na quarta semana a QTDW se divide e surgem dois picos menos intensos. Na quinta semana, identifica-se um pico pouco intenso para a QTDW e um pico intenso para a maré diurna. Estes picos podem ser explicados considerando-se uma interação não linear ressonante entre as duas QTDW que, por soma das frequências, produz uma periodicidade de maré diurna que reforça a maré diurna já existente. Observa-se que, na sexta semana, o pico da maré se intensifica, enquanto que o pico da QTDW praticamente desaparece, Figura 42(d), sugerindo que a energia da QTDW é cedida para a maré diurna. A maré diurna possui maior frequência e, neste caso atua como um sumidouro da tríade ressonante.



**Figura 42** - Periodograma de Lomb-Scargle, entre 23/mar e 05/mai, nos ventos meteorológicos no outono de 2007 em S. J. Cariri-PB, em 90 km. Zonal (esquerda) e meridional (direita).

A Figura 43 mostra a PSD entre 23/março e 05/maio do outono de 2008. Na componente zonal, Figura 43 (à esquerda), identificam-se os seguintes picos acima do nível de significância: marés diurna, maré semidiurna, QTDW, ~4,5 dias, ~5,5 dias, ~20 horas, ~22 horas e ~30 horas. O pico para maré diurna inicia acima de 95% e aumenta até a terceira semana, Figura 43(c). Na primeira semana, o pico da maré semidiurna é bastante intenso e o pico para a maré diurna está misturado com um pico de ~20 horas. Neste intervalo tem-se a presença significativa dos modos de marés semidiurna e terdiurna. Esta última é resultado da interação não linear por soma das frequências entre os modos de maré diurna e semidiurna. A oscilação de ~20 horas resulta da interação não linear ressonante entre a maré diurna e a oscilação de ~5 dias. A QTDW apresenta um pico pouco intenso na primeira semana, depois ele se amplia e torna-se intenso na terceira semana, Figura 43(c). A partir daí ele volta a diminuir até ficar abaixo do nível de significância na sexta semana, Figura 43(f). Na quinta e sexta semanas têm-se novamente picos significativos para a maré terdiurna. Nestas semanas, o pico da maré semidiurna diminui, indicando que sua energia é cedida para a maré terdiurna.

Na Figura 43(direita), tem-se a PSD para componente meridional. Nela observa-se que o pico para a maré diurna está inicialmente acima do nível de significância e desaparece na segunda e terceira semanas e, a partir daí ele aumenta até tornar-se bastante intenso na sexta semana, Figura 43(f). Na primeira semana, Figura 43(a), tem-se um pico para ~32 horas que, possivelmente, é resultante da interação não linear ressonante entre a maré diurna e a oscilação de ~3 dias. O pico para QTDW é intenso na primeira semana e aumenta na segunda e terceira semanas. Na quarta semana a QTDW se divide e surgem dois picos menos intensos com períodos diferentes, mas próximos um do outro. Na semana seguinte, apenas identifica-se um pico pouco intenso para a QTDW, mas o pico para a maré diurna é bastante intenso. O pico para a QTDW vai diminuindo até atingir na quarta semana, Figura 43(d), um valor pouco acima do limite de 95% de significância. Entre a primeira e quarta semanas surgem picos para, respectivamente, as periodicidades de ~27 horas, ~30 horas e ~36 horas. Estas oscilações são possíveis através da interação não linear ressonante entre a maré diurna e oscilações com periodicidades entre 3 e 5 dias, entretanto, nesta PSD não se observa picos significativos para as oscilações primárias em questão.



**Figura 43** - Periodograma de Lomb-Scargle, entre 23/mar e 05/mai, nos ventos meteorológicos no outono de 2008 em S. J. Cariri-PB, em 90 km. Zonal (esquerda) e meridional (direita).

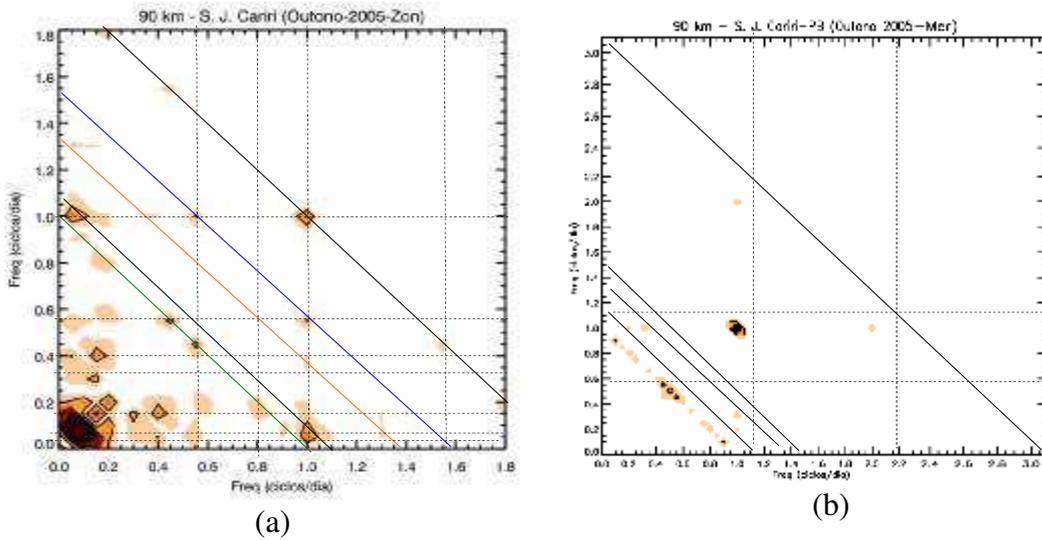
### 5.2.2.5. Análise Biespectral

A Figura 44 mostra os resultados das análises biespectrais para o outono de 2005. Na componente zonal, Figura 44(a), identificam-se os seguintes núcleos de interação não linear ressonante envolvendo a maré diurna:

- (a) (0,55; 1,0; 1,55)  $\Rightarrow$  QTDW, DT e ~16 horas
- (b) (0,2; 1,0; 1,2)  $\Rightarrow$  ~5 dias, DT e ~20 horas
- (c) (0,06; 0,94; 1,0)  $\Rightarrow$  ~16 horas, DT e ~26 horas
- (d) (0,45; 0,55; 1,0)  $\Rightarrow$  QTDW, QTDW e DT
- (e) (0,25; 0,75; 1,0)  $\Rightarrow$  ~3-4 dias, ~30 horas e DT
- (f) (0,1; 0,9; 1,0)  $\Rightarrow$  ~10 dias, ~27 horas e DT

Na componente meridional, Figura 44(b), identificam-se os seguintes núcleos:

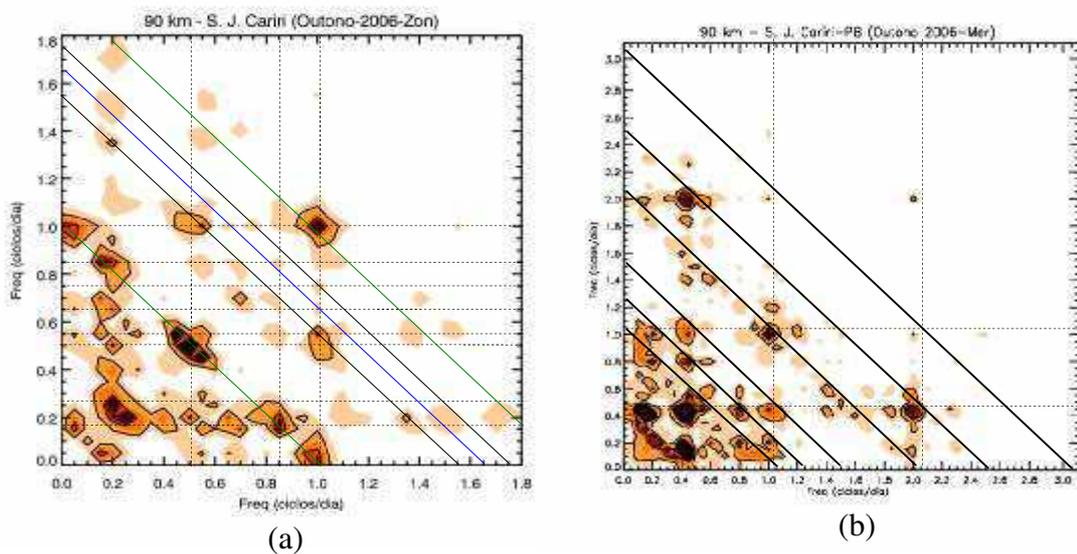
- (a) (1,0; 2,0; 3,0)  $\Rightarrow$  DT, ST e TT
- (b) (0,35; 1,0; 1,35)  $\Rightarrow$  ~3 dias, DT e ~18 horas
- (c) (0,2; 1,0; 1,2)  $\Rightarrow$  ~5-7 dias, DT e ~20 horas
- (d) (0,45; 0,55; 1,0)  $\Rightarrow$  QTDW, QTDW e DT
- (e) (0,2; 0,8; 1,0)  $\Rightarrow$  ~5-7 dias, ~30 horas e DT
- (f) (0,1; 0,9; 1,0)  $\Rightarrow$  ~10 dias, ~27 horas e DT



**Figura 44** - Análises biespectrais dos ventos meteorológicos no outono 2005, em São João do Cariri-PB, em 90 km. (a) Componente zonal, (b) componente meridional.

A Figura 45 mostra os resultados das análises biespectrais para o outono de 2006. Na componente zonal, Figura 45(a), identificam-se os seguintes núcleos de interação não linear ressonante envolvendo a maré diurna:

- (a) (0,55; 1,0; 1,55)  $\Rightarrow$  QTDW, DT e ~16 horas
- (b) (0,15; 0,85; 1,0)  $\Rightarrow$  ~5-7 dias, DT e ~28 horas
- (c) (0,06; 0,94; 1,0)  $\Rightarrow$  ~16 dias, DT e ~26 horas
- (d) (0,45; 0,55; 1,0)  $\Rightarrow$  QTDW, QTDW e DT



**Figura 45** - Análises biespectrais dos ventos meteorológicos no outono 2006, em São João do Cariri-PB, em 90 km. (a) Componente zonal, (b) componente meridional.

Na componente meridional, Figura 45(b), identificam-se os seguintes núcleos:

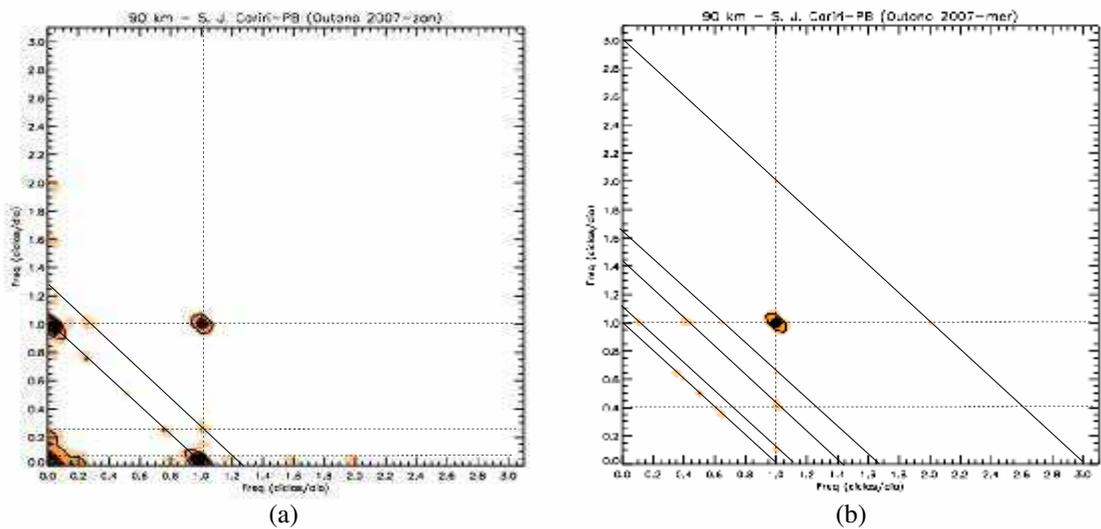
- (a) (1,0; 2,0; 3,0)  $\Rightarrow$  DT, ST e TT
- (b) (0,45; 2,0; 2,45)  $\Rightarrow$  QTDW, ST e ~9,8 horas
- (c) (0,5; 1,5; 2,0)  $\Rightarrow$  QTDW, ST e ~16 horas
- (d) (0,45; 1,0; 1,45)  $\Rightarrow$  QTDW, DT e ~16 horas
- (f) (0,2; 1,0; 1,2)  $\Rightarrow$  ~5 dias, DT e ~20 horas
- (g) (0,2; 0,8; 1,0)  $\Rightarrow$  ~5 dias, DT e ~30 horas

A Figura 46 mostra os resultados das análises biespectrais para o outono de 2006. Na componente zonal, Figura 46(a), identificam-se os seguintes núcleos de interação não linear ressonante envolvendo a maré diurna:

- (a) (0,25; 1,0; 1,25)  $\Rightarrow$  ~3-4 dias, DT e ~19 horas
- (b) (0,25; 0,75; 1,0)  $\Rightarrow$  ~3-4 dias, DT e ~32 horas
- (c) (0,06; 0,94; 1,0)  $\Rightarrow$  ~16 dias, DT e ~26 horas

Na componente meridional, Figura 46(b), identificam-se os seguintes núcleos:

- (a) (1,0; 2,0; 3,0)  $\Rightarrow$  DT, ST e TT
- (b) (0,45; 1,0; 1,45)  $\Rightarrow$  QTDW, DT e ~16 horas
- (c) (0,15; 1,0; 1,15)  $\Rightarrow$  ~5-7 dias, DT e ~20 horas
- (d) (0,35; 0,65; 1,0)  $\Rightarrow$  ~3 dias, DT e ~36 horas



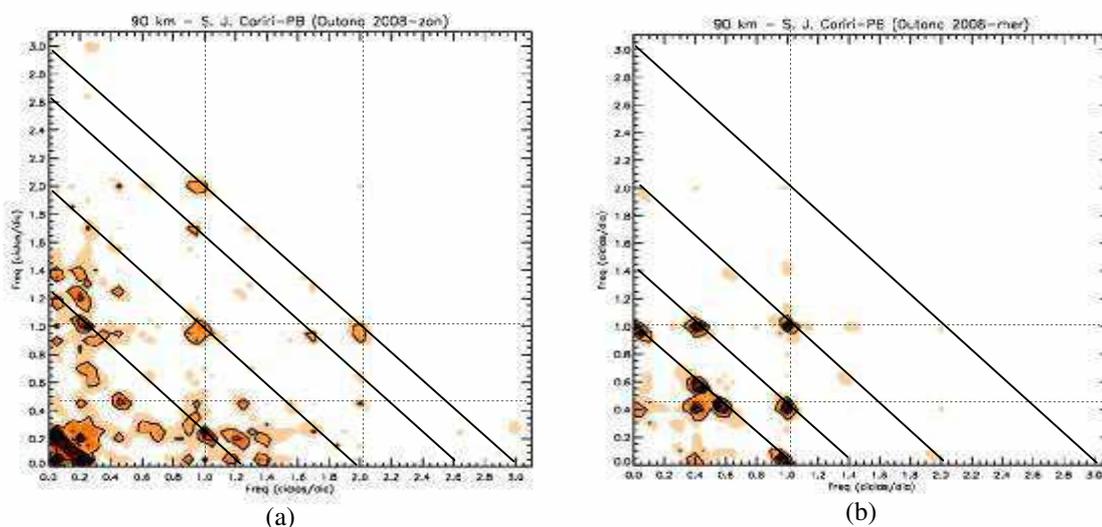
**Figura 46** - Análises biespectrais dos ventos meteorológicos no outono 2007, em São João do Cariri-PB, em 90 km. (a) Componente zonal, (b) componente meridional.

A Figura 47 mostra os resultados das análises biespectrais para o outono de 2008. Na componente zonal, Figura 47(a), identificam-se os seguintes núcleos de interação não linear ressonante envolvendo a maré diurna:

- (a) (1,0; 2,0; 3,0)  $\Rightarrow$  DT, ST e TT
- (b) (0,2; 1,0; 1,2)  $\Rightarrow$  ~5-7 dias, DT e ~20 horas
- (c) (0,3; 2,0; 1,7)  $\Rightarrow$  ~3-4 dias, ST e ~14 horas

Na componente meridional, Figura 47(b), identificam-se os seguintes núcleos:

- (a) (1,0; 2,0; 3,0)  $\Rightarrow$  DT, ST e TT
- (b) (0,4; 1,0; 1,4)  $\Rightarrow$  ~2,5 dias, DT e ~17 horas
- (c) (0,06; 0,94; 1,0)  $\Rightarrow$  ~16 dias, DT e ~25 horas
- (d) (0,4; 0,6; 1,0)  $\Rightarrow$  QTDW, QTDW e DT



**Figura 47-** Análises biespectrais dos ventos meteorológicos no outono 2008 em São João do Cariri-PB, em 90 km. (a) Componente zonal, (b) componente meridional.

Para a estação de outono, entre 2005 e 2008, os resultados das análises em wavelets revelaram a presença de densidade de energia espectral significativa nas frequências da maré diurna, QTDW e nas bandas: ~3-4 dias, ~5-7 dias, ~8-10 dias e de ~12-20 dias. As oscilações com menores frequências são mais pronunciadas na componente zonal, enquanto que as de maiores frequências são mais evidentes na componente meridional. Nesta estação, as energias tanto para a maré como para a QTDW são menos intensas que os valores encontrados durante as estações de verão. Isto é mais evidente na componente zonal, quando identificam-se intervalos nos quais não se registra a presença destas oscilações. Através dos Espectros

Globais de Energia, na componente meridional, identificam-se picos ligeiramente acima do nível de significância de 95% para a maré semidiurna.

Os dados dos ventos quando submetidos ao filtro Passa Banda, Figura 38, centrado na frequência da maré diurna, revelaram que a amplitude da maré, na componente zonal, apresenta valores máximos próximos de 15 m/s, enquanto que na componente meridional as amplitudes máximas ficam em torno de 40 m/s. O comportamento das amplitudes aponta que elas são moduladas por periodicidades correspondentes às Ondas Planetárias.

Os perfis de amplitudes e fases foram usados para estudar as características da maré diurna. Através destes perfis foi possível estimar os valores das amplitudes máximas atingidas pela maré, em qual altitude elas ocorrem e, ainda, estimar o comprimento de onda vertical. Os resultados obtidos revelaram que, na componente meridional, a maior amplitude é atingida em 90 km no outono de 2005. O fato de a amplitude maré ser elevada gera um perfil de fases bem definido e adequado para o cálculo do comprimento de onda vertical. Os valores encontrados situam-se entre  $27,84 \pm 1,44$  km (outono de 2005) até  $31,20 \pm 0,84$  km (outono de 2006).

As análises de Densidade de Potência Espectral, mostraram que, durante os outonos estudados, surgiram oscilações secundárias com periodicidades da maré terdiurna e outras periodicidades variando entre ~16 e ~36 horas. Na componente zonal, por exemplo, entre o final de março e início de abril de 2005, encontram-se dois picos de oscilações secundárias, em ~18 horas e outro em 32 horas. Estas oscilações possivelmente resultam, respectivamente, da interação não linear ressonante por soma das frequências da maré diurna e da oscilação de ~3-4 dias e por diferença desta frequências. Na componente meridional, neste mesmo intervalo de tempo, identificam-se picos significativos para oscilações secundárias de ~27 horas, ~30 horas e ~36 horas. Estas oscilações são possíveis através de: (i) ~27 horas pela subtração das frequências da maré diurna e da oscilação com período de ~8-10 dias; (ii) ~30 horas é possível por subtração das frequências da maré diurna e da oscilação com período de ~5-7 dias; e (iii) ~36 horas é possível através da subtração das frequências da maré diurna e da oscilação com período de ~3-4 dias. Durante o mês de abril de 2007, na componente zonal, identificam-se picos ligeiramente acima do nível de significância para a maré terdiurna.

Análises biespectrais revelaram interações da maré diurna com Ondas Planetárias cujas periodicidades variam entre entre 0,5 e 20 dias. Na tabela 09 apresenta-se um resumo dos episódios de interação não linear ressonante detectados nos outonos entre 2005 e 2008.

**Tabela 09.** Episódios identificados através da análise biespectral como interação não linear ressonante entre a maré diurna e outras ondas nos ventos meteorológicos em 90 km para os outonos de São João do Cariri - PB.

	Zonal						Meridional					
	Período das outras ondas (dias)						Período das outras ondas (dias)					
	0,5	2	3-4	5-7	10	12-20	0,5	2	3-4	5-7	10	12-20
2005	-	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	-
2006	-	Sim	-	Sim	-	Sim	Sim	Sim	-	Sim	-	-
2007	-	-	Sim	-	-	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	-	-
2008	Sim	-	Sim	Sim	-	-	Sim	Sim	-	-	-	Sim

A partir dos resultados das análises biespectrais apresentados na Tabela 09, verifica-se que, na componente zonal, os episódios com maior número de ocorrências de interação não linear ressonante com a maré diurna envolvem as Ondas Planetárias nas bandas de ~3-4 dias, ~5-7 dias e ~12-20 dias. Na componente meridional observa-se que a ocorrência de interação não linear ressonante mais frequente, entre a maré diurna e outras ondas, envolve a maré semidiurna, QTDW e ~ 5-7 dias.

A maré terdiurna é uma oscilação que pode ser gerada por soma de frequências da maré diurna e da maré semidiurna. Na componente zonal do outono 2007, os indícios de interação não linear ressonante entre os modos de marés ficam evidentes quando, através da PSD, observa-se que os picos significativos para a maré terdiurna no intervalo em que os picos, para maré diurna e para a maré semidiurna, diminuem de intensidade. Isto indica que suas energias são cedidas para a maré terdiurna. Este comportamento concorda com a discussão realizada por Raupp (2006) com relação ao processo de trocas de energias que, em tríades ressonantes, a onda de maior frequência atua como fonte ou sumidouro de energia. Neste caso a maré terdiurna atua como sumidouro. As periodicidades de ~20 horas a de ~36 horas podem ser explicadas considerando-se interações não lineares ressonantes entre a maré diurna e as Ondas Planetárias entre 2 e 20 dias.

Tokumoto (2007) encontrou que as interações não lineares entre a maré diurna e a semidiurna, quando ocorrem, produzem duas ondas secundárias: uma maré diurna e uma maré terdiurna. A maré terdiurna aparece muito fraca, porém, mostra uma distribuição sazonal nas amplitudes características, com picos próximos aos equinócios, tal qual a maré diurna, indicando que pode haver um reforço na amplitude da maré diurna primária pela maré diurna secundária. Em suas análises, ele verificou que há indícios maiores da interação não linear entre as componentes de marés, na camada centrada em 85 km e este mecanismo deve colaborar para a variabilidade dia-a-dia observada particularmente nos meses de abril, setembro e dezembro dos anos analisados.

Através das análises de Densidades Espectrais de Potência para o outono de 2007, na componente zonal, encontram-se picos para a maré terdiurna. Entretanto, nos outonos de 2008 encontram-se picos simultâneos da maré diurna, maré semidiurna e da QTDW. Estes picos se comportam da seguinte forma: as intensidades dos picos para a maré diurna e para a maré semidiurna são comparáveis à intensidade da QTDW, depois estes picos para as marés ocorrem simultaneamente, mas, com intensidades maiores que o pico para a QTDW. Estes comportamentos podem indicar interações entre estas oscilações primárias.

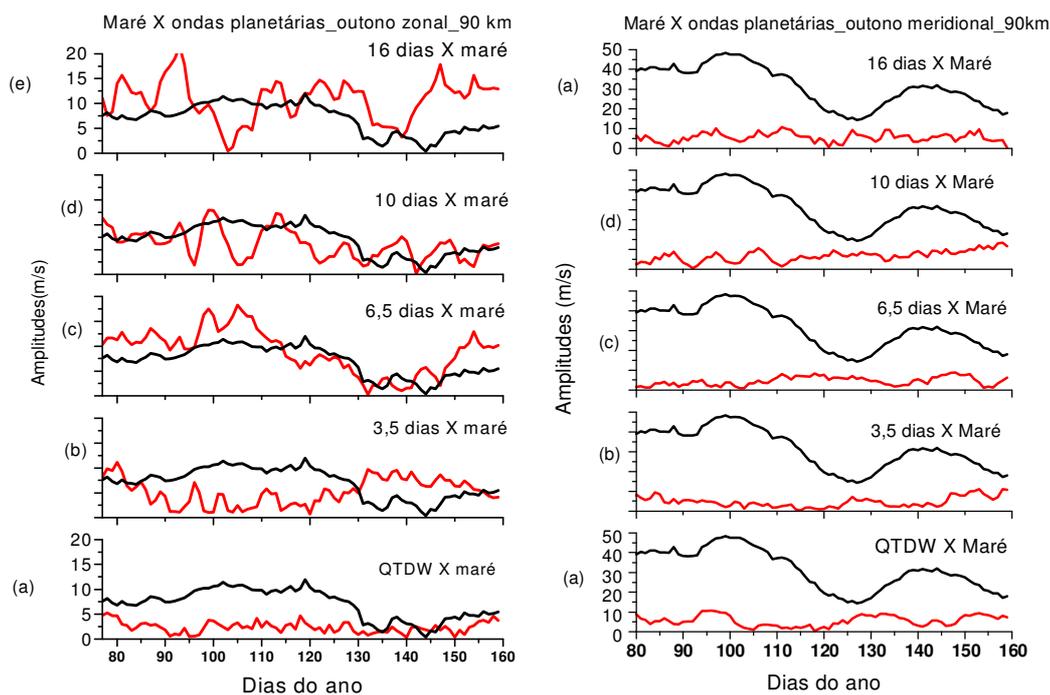
Em relação às Ondas Planetárias, Tokumoto (2007) concluiu que a QTDW é dominante na componente meridional do vento no verão, época em que a amplitude da maré diurna diminui, e isto é comportamento típico de interação não linear desta Onda Planetária com a maré. Ele concluiu também, através da análise espectral, que os casos de interação não linear entre estas ondas são raros e foram encontrados apenas em dois anos (2000 e 2003), na camada em 95 km. Por isso, ele sugere que a interação não linear entre onda de quase dois dias e a maré diurna não é um mecanismo importante para variabilidade da maré. Diferente dos resultados obtidos por Tokumoto em Cachoeira Paulista-SP, as análises das componentes dos ventos, em São João do Cariri-PB, apontam que a interação não linear ressonante envolvendo a maré diurna e a QTDW é um evento também presente nos outonos estudados. Esta interação acontece em ambas as componentes, zonal e meridional. Isto sugere que esta interação também é importante na variabilidade da amplitude na maré diurna, em períodos de Ondas Planetárias, na região mesosférica de São João do Cariri-PB no período analisado.

Na Figura 48 mostra-se, para ambas componentes, uma comparação entre as amplitudes médias da maré diurna em relação às Ondas Planetárias. Estes gráficos foram obtidos utilizando-se, para os cálculos, uma janela móvel de dados de 21 dias e passo de 15 dias. Inicialmente, observa-se que na componente zonal, Figura 48 (à esquerda), as Ondas Planetárias de ~3-4 dias, ~5-7 dias e de ~12-20 dias apresentam amplitudes iguais ou maiores que a amplitude da maré diurna. Amplitude da QTDW não varia muito e é menor que a amplitude da maré diurna. O comportamento da amplitude da maré diurna parece acompanhar o comportamento das amplitudes das ondas de ~10 dias e de ~6,5 dias. Por outro lado, a amplitude média da onda de ~3-4 dias apresenta um comportamento oposto ao amplitude da maré diurna. Observa-se que, entre os dias 80 e 130, a amplitude da maré se mostra sempre maior que a da onda de ~3-4 dias e, entre os dias 130 e 160, a amplitude da maré fica abaixo.

Na componente meridional, Figura 48 (à direita), observa-se que a amplitude da maré

é muito mais intensa que as amplitudes das outras ondas. Os valores baixos das amplitudes das Ondas Planetárias não permitem que se faça uma análise comparativa razoável entre os comportamentos das amplitudes da maré e destas ondas. Observa-se que, entre os dias 80 e 110, a amplitude média da maré é elevada e, a partir do dia 110, ela diminui até atingir, próximo ao dia 125, seu valor mínimo. A partir daí ela apresenta um novo pico menos intenso em torno do dia 140. Nota-se que no intervalo entre os dias 110 e 130, em que a amplitude da maré diminui para seu menor valor, as oscilações QTDW, de ~3-4 dias e de ~6,5 dias apresentam um pequeno aumento de suas amplitudes, sugerindo que a variação da amplitude da maré, neste intervalo, está sendo influenciada por estas oscilações.

Foi indentificada a interação não linear ressonante envolvendo os modos de marés diurna e semidiurna gerando a maré terdiurna. Este episódio concorda com resultados obtidos por Tokumoto (2007) em Cachoeira Paulista-SP. Esta interação, do ponto de vista de trocas de energias, indica que a maré terdiurna recebe energia das outras duas oscilações e, portanto, comporta-se como um sumidouro de energia. Verificou-se ainda, através das PSD, episódios em que picos para duas QTDW também foram detectadas simultaneamente e sugere-se que este fenômeno pode ser explicado através dos estudos de Palo *et al.* (2007).



**Figura 48-** Comparação entre as amplitudes médias da maré diurna (preto) e Ondas Planetárias (vermelho) no outono 2008 em São João do Cariri-PB, em 90 km. (à esquerda) zonal e (à direita) meridional.

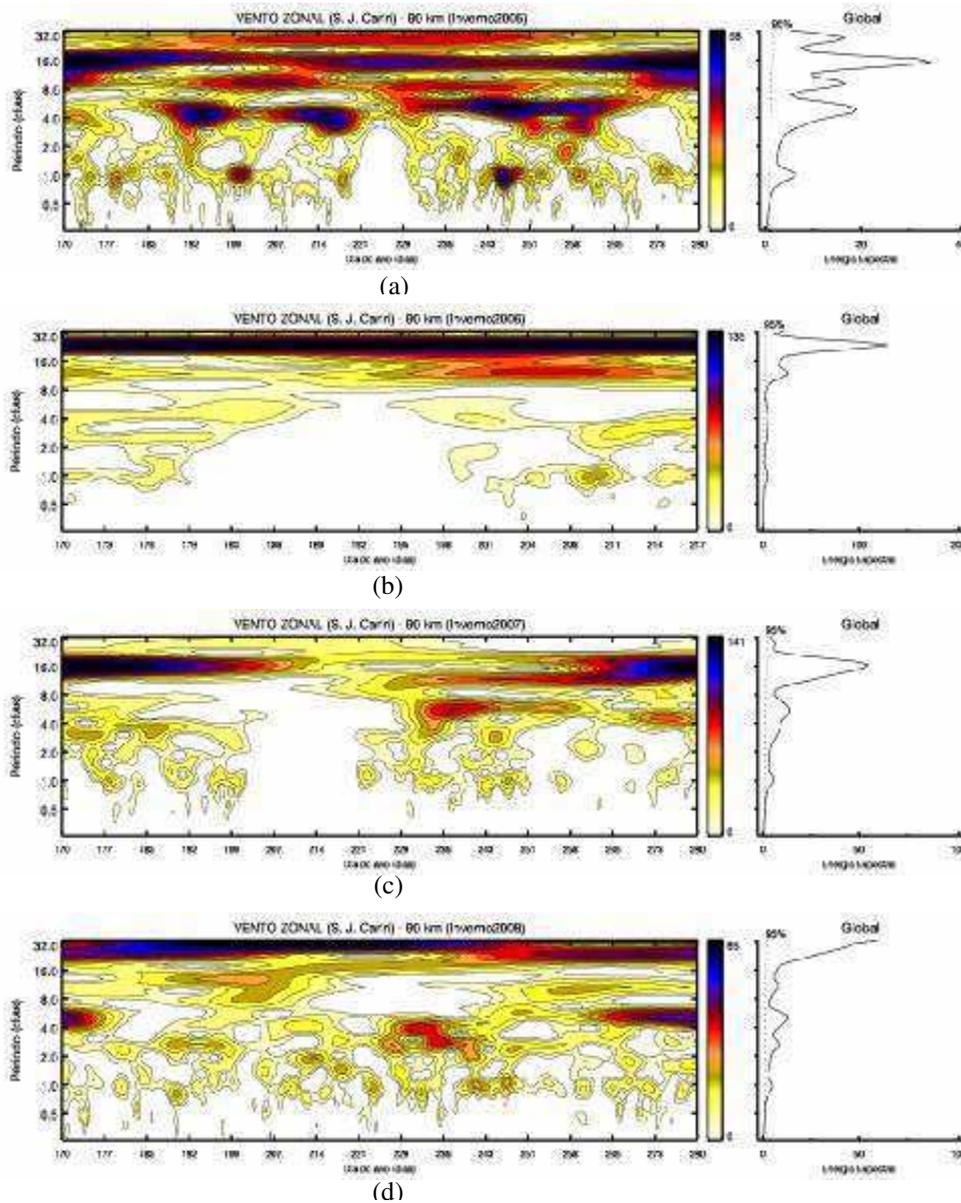
### 5.2.3. Estação de Inverno

#### 5.2.3.1. Espectro em wavelets

Na Figura 49 tem-se o espectro em wavelets do vento zonal, para os invernos dos anos de 2005 a 2008, em 90 km de altitude em São João do Cariri-PB. Nele observam-se densidades de energias mais intensas nas periodicidades de ~12-20 dias, ~8-10 dias, ~5-7 dias, ~3-4 dias, e menos intensas para QTDW e maré diurna. Na Figura 49(a), componente zonal do inverno de 2005, observa-se que a oscilação de ~12-20 dias é bastante intensa durante toda a estação; a oscilação de ~8-10 dias é mais intensa nos intervalos entre os dias 192 e 214 e entre os dias 225 e 251. A oscilação de ~5-7 dias é muito intensa no intervalo entre os dias 229 e 265. Para a periodicidade de ~3-4 dias, o intervalo de grande intensidade de energia espectral, encontra-se entre os dias 188 e 221. Para a maré diurna existe energia espectral durante quase toda a estação, mas apenas dois núcleos mais intensos estão presentes, um em torno do dia 200 e outro em torno do dia 246. Para QTDW, apenas um núcleo mais intenso encontra-se próximo ao dia 257.

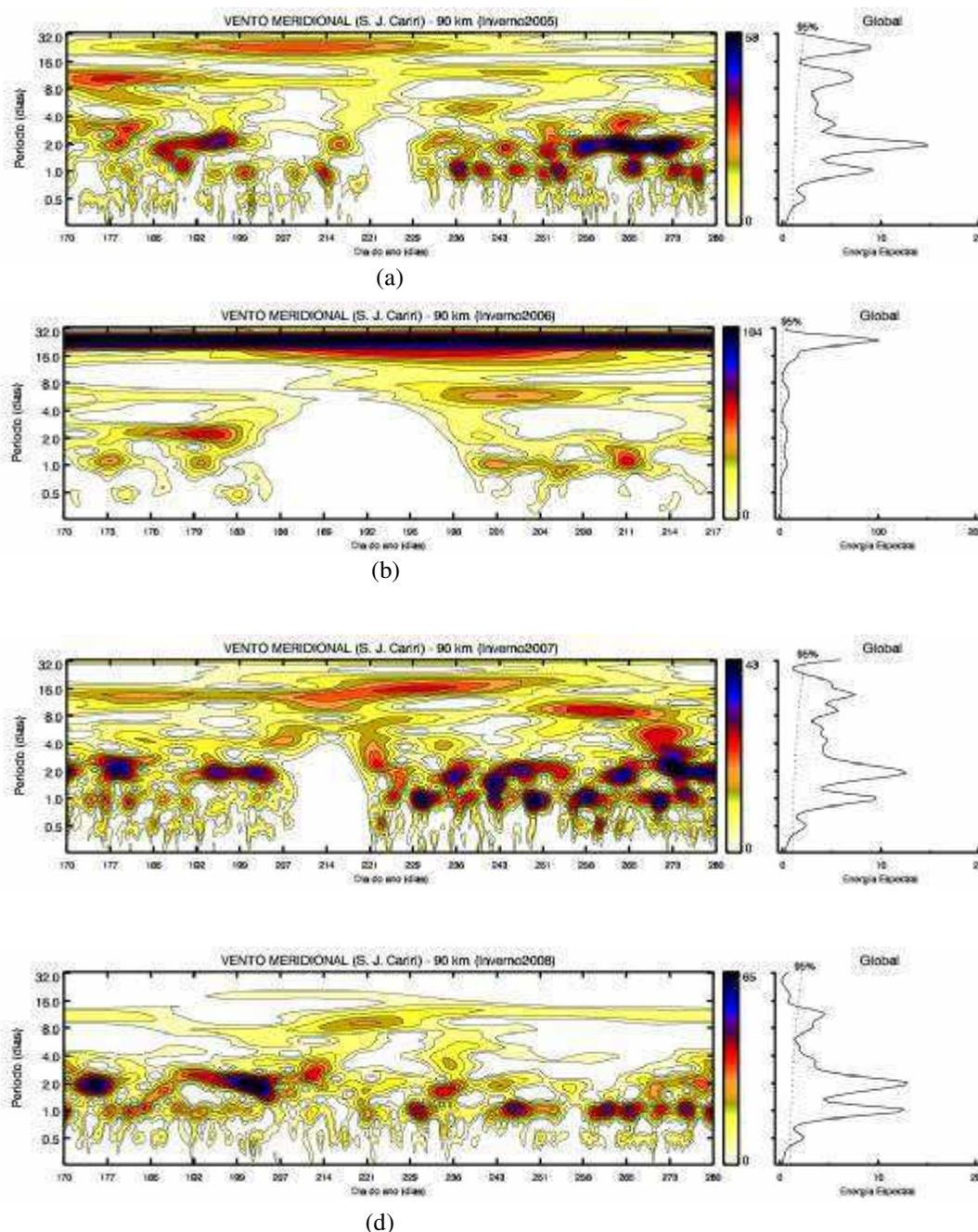
Na Figura 49(b), na componente zonal em 2006, os dados estão incompletos e, apenas têm-se dados de ventos meteorológicos entre os dias 170 (18/jun) ao dia 217 (04/ago). Neste intervalo identifica-se energia espectral intensa para oscilações de ~12-20 dias no intervalo entre os dias 198 e 214. Identifica-se alguma energia para as periodicidades de ~5-7 dias e de ~3-4 e um núcleo mais destacado para a maré diurna no intervalo entre os dias 208 e 212. Para o inverno de 2007, Figura 49(c), observa-se que a oscilação de ~12-20 dias é bastante intensa entre os dias 107 e 207 e entre os dias 236 e 280, A oscilação de ~5-7 dias apresenta densidade intensa de energia entre os dias 232 e 258 e entre os dias 270 e 280, Núcleos em destaque para a maré diurna e para a QTDW não foram identificados, embora exista energia espectral para estas periodicidades.

Para o inverno de 2008, Figura 49(d), destacam-se os núcleos para a periodicidade de ~5-7 dias entre os dias 170 e 177 e entre os dias 262 e 268. A periodicidade de ~3-4 dias mostra energia mais intensa entre os dias 229 e 239. As energias espectrais para a maré diurna e para a QTDW estão presentes com pouca intensidade.



**Figura 49** - Espectro de energia em wavelets da componente zonal do vento meteorológico do inverno (Cariri-PB) (a) 2005; (b) 2006; (c) 2007; (d) 2008 e da Energia Espectral Global em 90 km.

Na Figura 50(a), têm-se o espectro em wavelets para a componente meridional dos ventos do inverno de 2005, nele observa-se que periodicidades entre 8 e 16 dias são bastante intensas em praticamente toda estação. Periodicidades de ~3-4 dias são mais intensas nos intervalos entre os dias 177 e 183 e entre os dias 261 e 267. A QTDW apresenta energia espectral mais intensa nos intervalos entre os dias 185 e 198 e entre os dias 256 e 276. A maré diurna apresenta-se mais intensa em tornos dos dias 236, 254 e 266. Observa-se que existe anticorrelação entre as intensidades das energias da maré diurna e a QTDW. Alguma energia com nível de significância acima 95% é observada para a maré semidiurna.



**Figura 50** - Espectro de energia em wavelets da componente meridional do vento meteorológico do inverno (Cariri-PB) (a) 2005; (b) 2006; (c) 2007; (d) 2008 e da Energia Espectral Global em 90 km.

Na Figura 50(b) apresentam-se os resultados da análise em wavelets, para os dados de ventos, da componente meridional do inverno 2006. A série de dados desta estação está incompleta, apenas têm-se os dados de ventos entre os dias 170 (18/jun) ao dia 217 (04/ago). Entretanto, ainda é possível se observar energias intensas, no intervalo entre os dias 187 e 208, para oscilações de ~12-20 dias e para oscilações de ~5-7 dias no intervalo entre os dias

199 e 205. A QTDW apresenta energia intensa entre os dias 174 e 183 e, a maré diurna, é intensa em torno dos dias 173, 178, 201 e 211.

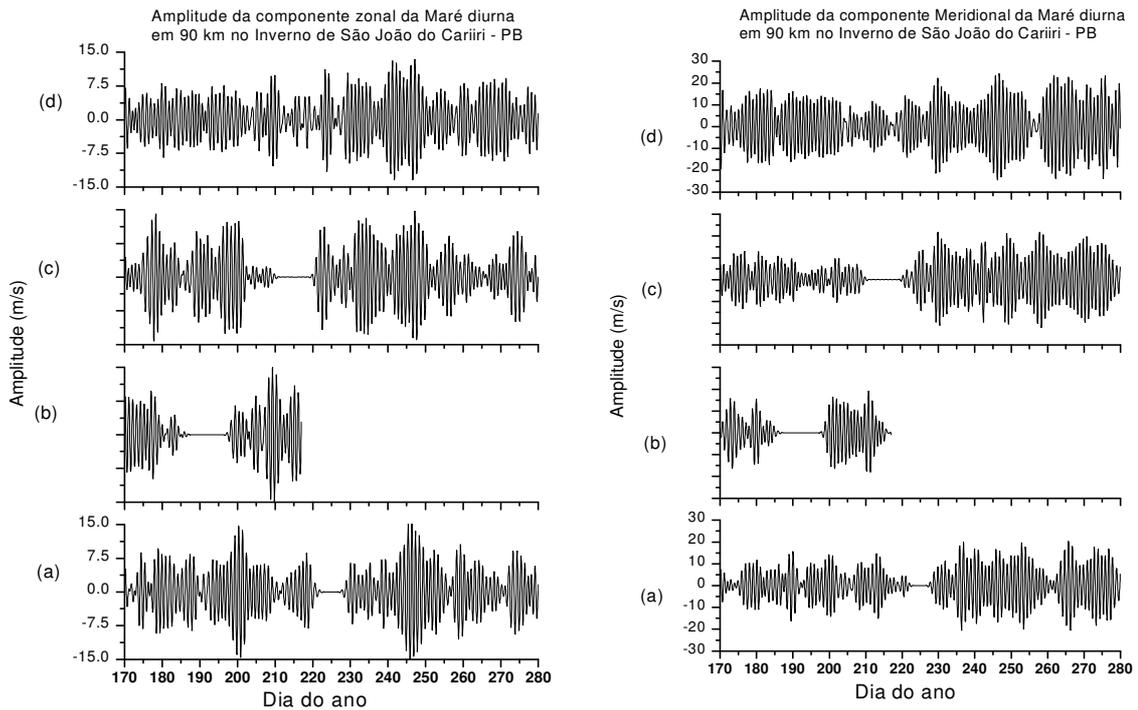
No inverno de 2007, Figura 50(c), encontram-se as periodicidades de ~12-20 dias entre os dias 209 e 247 e de ~8-10 dias entre os dias 251 e 269. Um núcleo intenso para ~5-7 dias encontra-se entre os dias 265 e 274. A QTDW é a periodicidade que apresenta mais núcleos intensos nesta estação, observam-se núcleos em torno do dia 178, entre os dias 192 e 206, em torno do dia 236, no intervalo entre os dias 239 e 255 e entre os dias 261 a 280, A maré diurna também apresenta vários núcleos muito intensos. Observam-se núcleos intensos em torno dos dias 230, 242, 250, 258, 271 e 274. Nota-se que existem intervalos em que as intensidades das energias da maré e da QTDW apresentam comportamento de anticorrelação e, em torno dos dias 242, 250 e 274, os núcleos destas duas oscilações se misturam. Em torno do dia 275 tem-se um núcleo cuja periodicidade se estende desde o período da maré até próximo de 7 dias. Dois núcleos para a maré semidiurna são identificados, um em torno do dia 222 e outro em torno do dia 260.

Para o inverno de 2008, Figura 50(d), observam-se as seguintes periodicidades intensas: ~12-20 dias, ~8-10 dias, ~3-4 dias. Para a QTDW, encontram-se núcleos intensos nos intervalos entre os dias 172 e 177, entre os dias 190 e 214 e em torno dos dias 234 e 278. A maré diurna apresenta vários núcleos intensos durante toda a estação, mas os núcleos mais intensos encontram-se em torno dos dias 179 e 230 e nos intervalos entre os dias 242 e 254, entre os dias 258 e 280. A maré semidiurna apresenta alguma energia, mas nenhum núcleo em destaque. Observa-se que, a partir do dia 185, tem-se inicialmente um núcleo para a maré diurna que se interliga com um núcleo de QTDW. O núcleo da QTDW, a partir do dia 207, se interliga com um núcleo da oscilação entre 3-4 dias o qual vai até o dia 214. Estas misturas entre os núcleos podem ser indícios de interação não linear entre estas oscilações.

### 5.2.3.2. Análise dos dados filtrados

A Figura 51 mostra o comportamento da amplitude da maré. Em 2006 os dados estão incompletos. Observa-se que a amplitude da maré não é muito elevada, atingido valores máximos abaixo 20 m/s na componente zonal e, na componente meridional, valores máximos em torno de 30 m/s. As amplitudes demonstram comportamentos de amplitude modulada. O inverno em que a maré apresenta maiores amplitudes, na componente zonal (à esquerda) é o

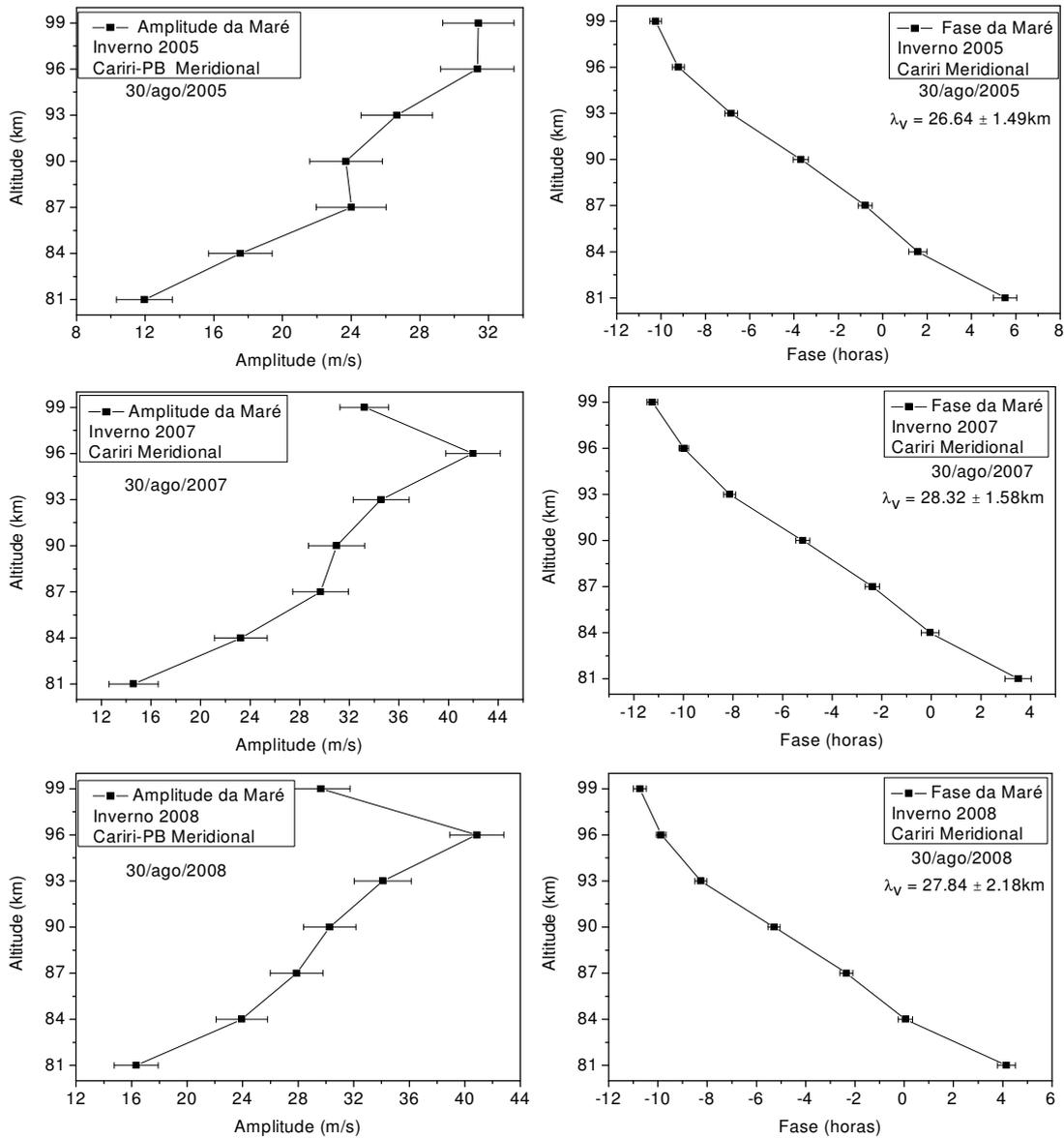
de 2007, Figura 51(c). Para a componente meridional (à direita) é o do ano de 2008, Figura 51(d). Os gráficos mostram que, na componente meridional, a maré é mais intensa a partir do meio da estação até o final dela. Na componente zonal, para todos os anos, verifica-se que entre os dias 240 e 250 a maré se apresenta com maior amplitude.



**Figura 51** - Amplitude das componentes da maré diurna no Inverno em Cariri-PB (esquerda componente zonal e direita componente meridional) em 90 km. (a) 2005; (b) 2006; (c) 2007; (d) 2008

### 5.2.3.3. Perfis de amplitudes e fases

A Figura 52 mostra os gráficos dos perfis de amplitudes e fases para a componente meridional para o dia 243 (30/Ago). Na Figura, à esquerda, observam-se que os valores máximos de amplitudes na componente meridional, em todos os anos, são atingidas para a altitude de 96 Km e o maior valor é de aproximadamente 42 m/s em 2007. Através dos gráficos das fases encontra-se que o comprimento de onda vertical está entre  $\lambda_v = 26,64 \pm 1,49 \text{ km}$  em 2005 e  $\lambda_v = 28.32 \pm 1,58 \text{ km}$  em 2007. Estes valores concordam bem com os resultados da literatura.



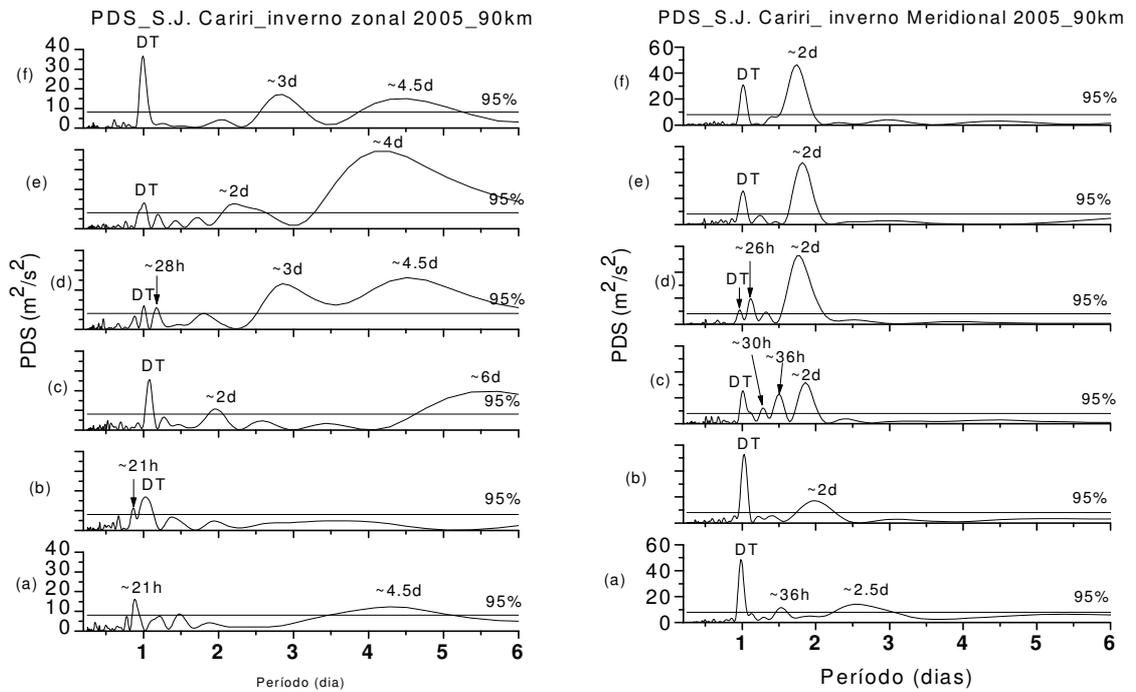
**Figura 52** - Perfis de amplitudes e fases da maré na componente meridional do vento meteorológico do inverno em S. J. Cariri-PB em 90 km (a) 2005; (b) 2006; (d) 2007; (d) 2008.

### 5.2.3.4. Densidade de Potência Espectral (PSD)

A Figura 53 mostra a PSD entre 18/jun e 08/ago do inverno de 2005. Na componente zonal, Figura 53 (à esquerda), identificam-se os seguintes picos acima do nível de significância de 95%: maré diurna, QTDW, ~3 dias, 4,5 dias, ~6,5 dias ~21 horas e ~28 horas. A maré diurna, na primeira semana, não apresenta pico significativo, Figura 53(a). Na segunda semana, o pico para a maré aumenta e fica bastante elevado na terceira semana. Na quarta e quinta semanas ele volta a diminuir e, na sexta semana ele volta a ficar intenso novamente. Na primeira e segunda semanas, surge um pico de ~21 horas. Este pico é possível

através da interação não linear ressonante, através da soma de frequências, da maré diurna e da onda de ~5-7 dias. Quando esta oscilação secundária desaparece os picos para as ondas primárias tornam-se bastante significativos, Figura 53(c). Na quarta semana, surge uma oscilação de ~28 horas. Ela se origina, possivelmente, da interação não linear ressonante, por subtração de frequências entre a maré diurna e a onda de ~5-7 dias. Isto pode explicar o desaparecimento do pico da oscilação de 6,5 dias e a redução do pico da maré, Figura 53(d). Na quarta semana surgem picos intensos para ~3 dias e outro para ~4,5 dias. Na semana seguinte, Figura 53(e), o pico de ~3 dias desaparece, o pico de ~4,5 dias se intensifica e surge um pico significativo para QTDW. Na sexta semana, Figura 53(f), o pico para a QTDW desaparece e surgem novamente picos menos intensos para ~3 dias e 4,5 dias.

Na Figura 53 (à direita), tem-se a PSD para a componente meridional, nele identificam-se os picos significativos para maré diurna, QTDW, ~2,5 dias, ~26, ~30 e ~36 horas. O pico para maré diurna é intenso na primeira semana, Figura 53(a). Identifica-se também um pico para ~36 horas e outro para ~2,5 dias. A oscilação secundária de ~36 horas pode resultar da interação não linear ressonante, por subtração de frequências, entre a maré diurna e ~2,5 dias. Na semana seguinte, Figura 53(b), tanto a maré como QTDW apresentam picos mais intensos e a oscilação secundária desaparece. Na terceira semana, Figura 53(c), o pico da maré volta a diminuir e surgem, além do pico da QTDW, picos para ~30 horas e ~36 horas e o período da QTDW fica abaixo de 2 dias. A oscilação secundária de ~30 horas é possível por interação não linear ressonante, por subtração de frequências, entre a maré diurna e uma oscilação de ~5-7 dias. Verifica-se que após o desaparecimento desta oscilação secundária, a intensidade do pico para a maré diurna aumenta. A partir da quarta semana, o pico para a QTDW permanece intenso e bem definido.

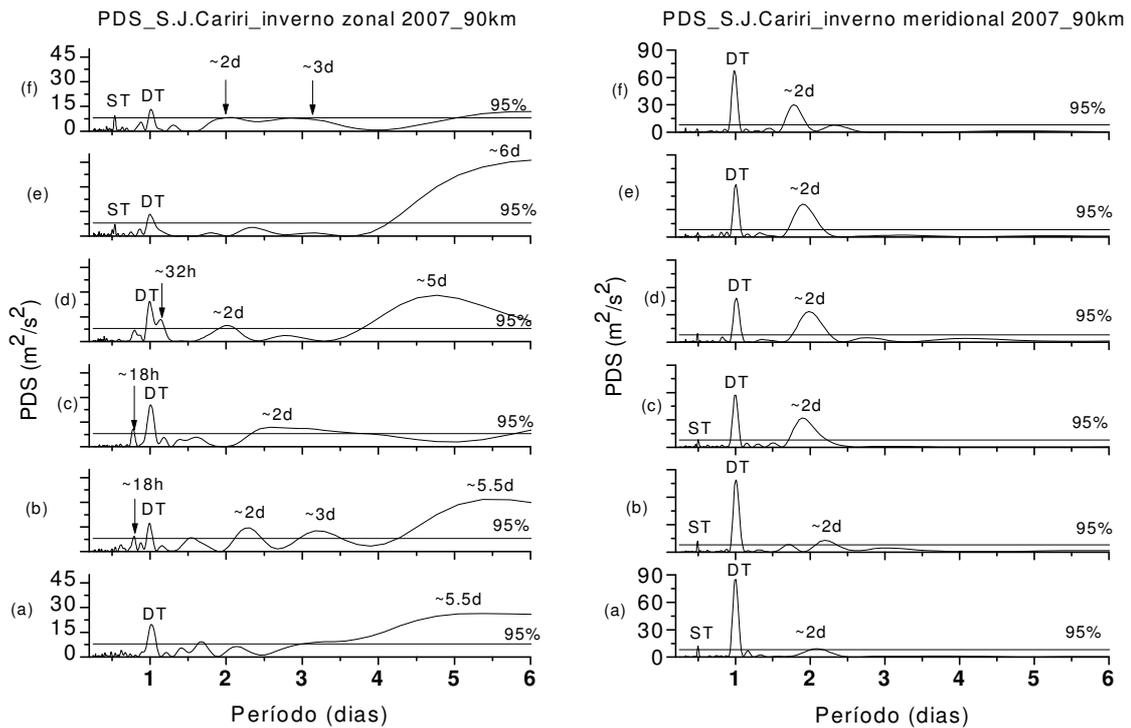


**Figura 53** - Periodograma de Lomb-Scargle, entre 18/jun e 08/ago, nos ventos meteorológicos do inverno de 2005 em São João do Cariri-PB, em 90 km. Zonal (esquerda) e meridional (direita).

Na Figura 54 tem-se a PSD entre 18/jun e 08/ago de 2007. Na componente zonal, Figura 54 (à esquerda), identificam-se os seguintes picos acima do nível de significância de 95%: maré diurna, QTDW, ~3 dias, ~5,5 dias, ~6,5 dias ~18 horas e ~32 horas. Inicialmente a maré diurna, na primeira semana, apresenta pico significativo, Figura 54(a). Na segunda semana, Figura 54(b), o pico para a maré diminui e surgem picos para ~18 horas. Esta oscilação secundária é possível, por adição das frequências, da maré diurna e da oscilação de ~3 dias. Na terceira semana, o pico para a oscilação de ~18 horas aumenta ligeiramente, o pico de ~3 dias desaparece e surge um pico muito alargado para a QTDW. Na quarta semana, o pico de ~18 horas fica abaixo do nível de significância e surge um pico de ~32 horas. Este último pico é possível através da interação não linear ressonante, por subtração de frequências entre a maré e a onda de ~5-7 dias. Na quinta e sexta semanas têm-se os picos para as marés semidiurna e diurna.

Na Figura 54 (à direita), tem-se a PSD para a componente meridional, nele identificam-se os picos significativos para maré diurna, maré semidiurna e QTDW. O pico para maré diurna é mais intenso na primeira semana, Figura 54(a) e menos intenso na quarta semana, Figura 54(d). A QTDW apresenta picos acima do nível de significância durante todo o intervalo. A maré semidiurna apresenta pico próximo do limite de significância a partir da

primeira até a quarta semana. Não se observa quaisquer outros picos secundários que possam ser identificados com resultado de interação não linear ressonante entre a maré e outras ondas.

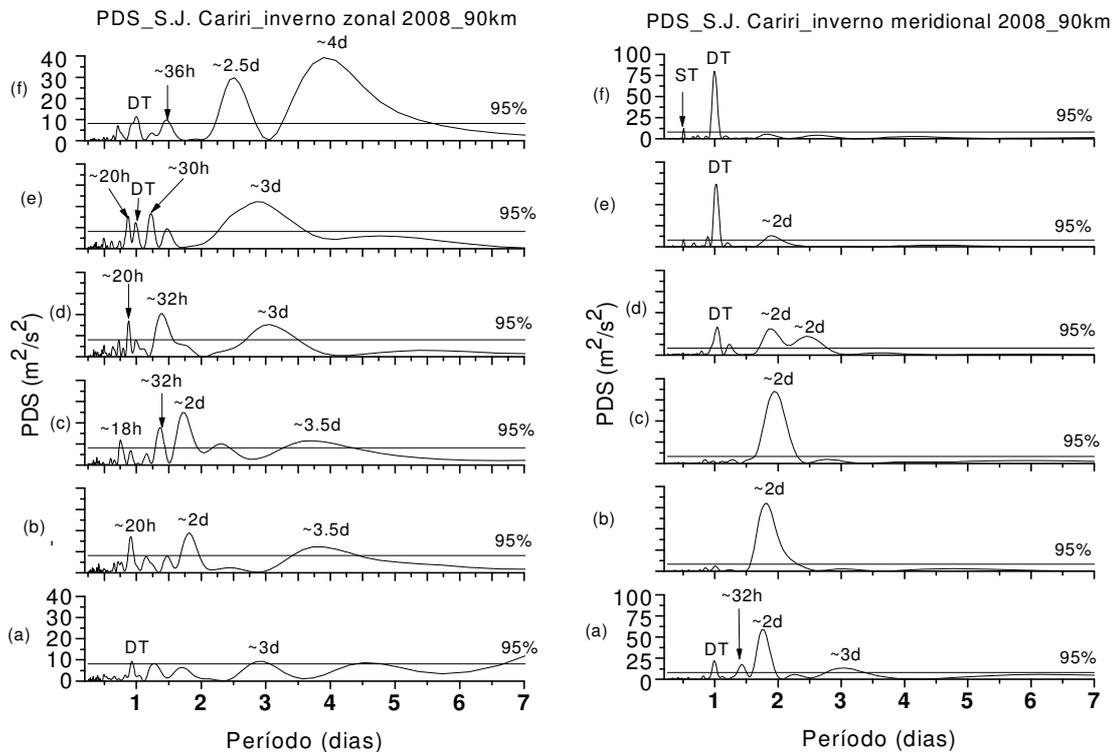


**Figura 54** - Periodograma de Lomb-Scargle, entre 18/jun e 08/ago, nos ventos meteorológicos do inverno de 2007 em São João do Cariri-PB, em 90 km. Zonal (esquerda) e meridional (direita).

A Figura 55 mostra a PSD entre 18/junho e 08/agosto de 2008. Na componente zonal, Figura 55 (à esquerda), identificam-se os seguintes picos acima do nível de significância de 95%: maré diurna, QTDW, 2,5 das, ~3,5 dias, 4 dias, ~18 horas, ~20 horas, ~30 horas, ~32 horas e ~36 horas. A maré diurna, na primeira semana, apresenta pico pouco intenso, Figura 55(a). Na segunda semana, Figura 55(b), o pico para a maré diminui e surge o pico para ~20 horas. Na terceira semana, Figura 55(c), o pico de ~20 horas desaparece e surgem os pico para ~32 horas e ~18 horas. Durante os intervalos em que os picos para estas oscilações secundárias surgem, o pico da maré praticamente desaparece e só reaparece com alguma significância na quinta e sexta semanas e, neste intervalo, surgem picos adicionais para as oscilações de ~30 horas, Figura 55(e), e de ~36 horas, Figura 55(f).

Na Figura 55 (à direita) tem-se a PSD para a componente meridional, nele identificam-se os picos significativos para maré diurna, maré semidiurna, QTDW, ~3 dias e ~32 horas. O pico para maré diurna é pouco intenso na primeira semana, Figura 55(a). Nesta primeira semana surge o pico de ~32 horas conjuntamente com picos para QTDW e ~3-4 dias. Depois

o pico da maré desaparece na segunda e terceira semanas, Figura 55(b) e 55(c), e neste intervalo apenas verificam-se picos intensos para a QTDW. Na quarta semana, Figura 55(d), a maré diurna apresenta um pico significativo e surgem dois picos, com periodicidades diferentes, para a QTDW. Na quinta e sexta semanas, Figuras 55(e) e 55(f), o pico da maré diurna torna-se bastante intenso, enquanto que os dois picos para a QTDW desaparecem. Este comportamento da QTDW e da maré sugere que as duas QTDW interagem não linearmente produzindo um modo de maré diurna que reforça a intensidade da maré diurna já existente.



**Figura 55** - Periodograma de Lomb-Scargle, entre 18/jun e 08/ago, nos ventos meteorológicos do inverno de 2008 em São João do Cariri-PB, em 90 km. Zonal (esquerda) e meridional (direita).

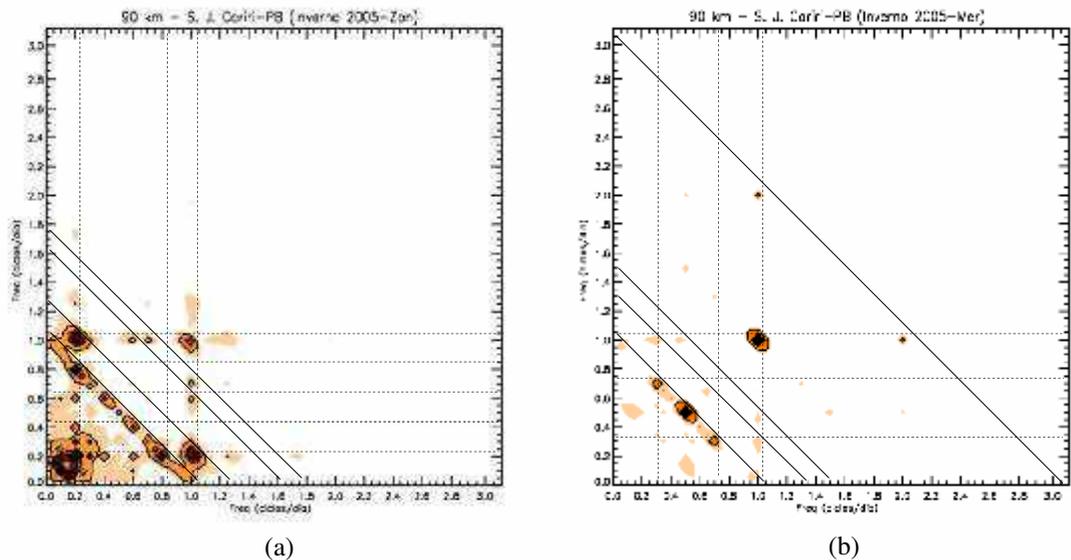
### 5.2.3.5. Análise Biespectral

A Figura 56 mostra os resultados das análises biespectrais para o inverno de 2005. Na componente zonal, Figura 56(a), identificam-se os seguintes núcleos de interação não linear:

- (a) (0,2; 0,8; 1,0)  $\Rightarrow$  ~5 dias, DT e ~30 horas
- (b) (0,4; 0,6; 1,0)  $\Rightarrow$  QTDW, DT e QTDW
- (c) (0,7; 1,0; 1,7)  $\Rightarrow$  QTDW, DT e ~14 horas
- (d) (0,2; 1,0; 1,2)  $\Rightarrow$  ~5 dias, DT e ~20 horas
- (e) (0,4; 0,6; 1,0)  $\Rightarrow$  QTDW, DT e QTDW

Na componente meridional, Figura 56(b), identificam-se os seguintes núcleos:

- (a)  $(0,3; 1,0; 1,3) \Rightarrow \sim 3\text{-}4$  dias, DT e  $\sim 18$  horas
- (b)  $(0,3; 0,7; 1,0) \Rightarrow \sim 3\text{-}4$  dias, DT e  $\sim 34$  horas
- (c)  $(0,45; 1,0; 1,45) \Rightarrow$  QTDW, DT e  $\sim 16$  horas
- (d)  $(0,06; 0,94; 1,0) \Rightarrow \sim 16$  dias, DT e DT
- (e)  $(1,0; 2,0; 3,0) \Rightarrow$  DT, ST e TT



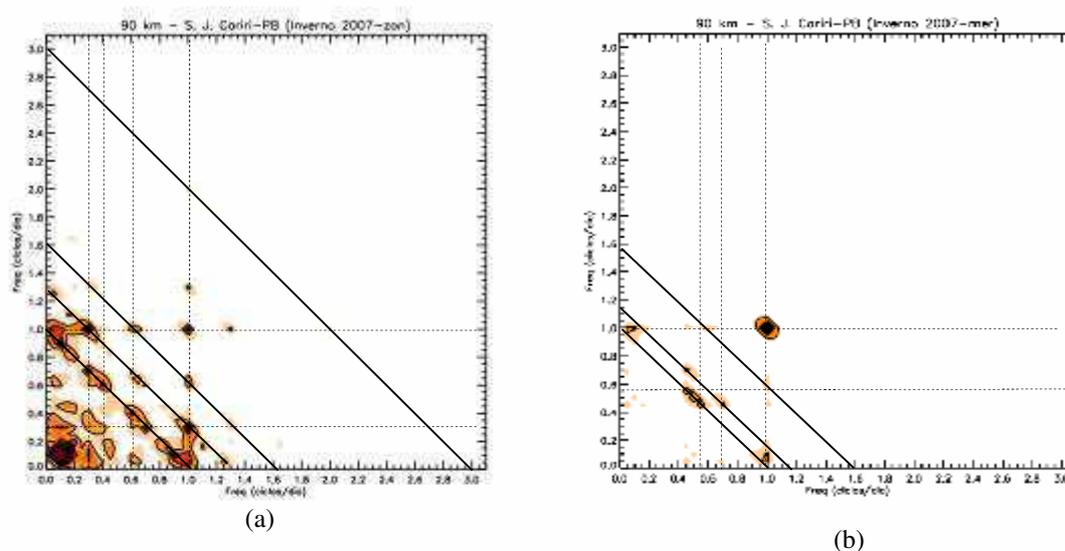
**Figura 56** - Análises biespectrais dos ventos meteoricos no inverno 2005 em São João do Cariri-PB, em 90 km. (a) Componente zonal, (b) componente meridional.

A Figura 57 mostra os resultados das análises biespectrais para o inverno de 2006. Na componente zonal, Figura 57(a), identificam-se os seguintes núcleos de interação não linear:

- (a)  $(0,1; 0,9; 1,0) \Rightarrow \sim 10$  dias, DT e  $\sim 27$  horas
- (b)  $(0,3; 1,0; 1,3) \Rightarrow \sim 3$  dias, DT e  $\sim 18$  horas
- (c)  $(0,3; 0,7; 1,0) \Rightarrow \sim 3$  dias, DT e  $\sim 34$  horas
- (d)  $(0,55; 1,0; 1,55) \Rightarrow$  QTDW, DT e  $\sim 16$  horas
- (e)  $(0,4; 0,6; 1,0) \Rightarrow$  QTDW, DT e QTDW
- (f)  $(1,0; 2,0; 3,0) \Rightarrow$  DT, ST e TT

Na componente meridional, Figura 57(b), tem-se os seguintes núcleos:

- (a)  $(0,06; 1,0; 1,06) \Rightarrow \sim 16$  dias, DT e DT
- (b)  $(0,45; 0,55; 1,0) \Rightarrow$  QTDW, DT e QTDW
- (c)  $(0,55; 1,0; 1,55) \Rightarrow$  QTDW, DT e  $\sim 16$  horas



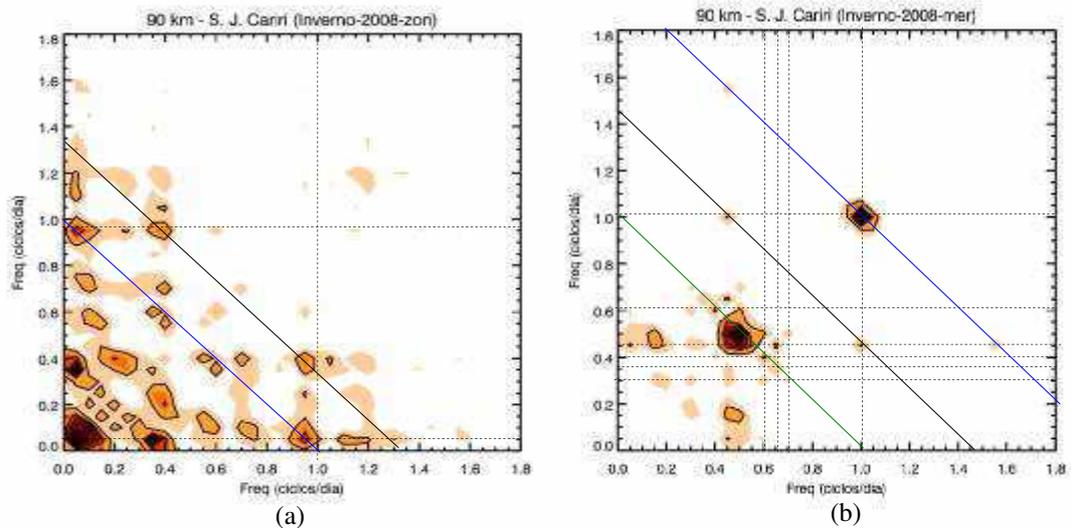
**Figura 57** - Análises biespectrais dos ventos meteorológicos no inverno 2007 em São João do Cariri-PB, em 90 km. (a) Componente zonal, (b) componente meridional.

A Figura 58 mostra os resultados das análises biespectrais para o inverno de 2005. Na componente zonal, Figura 58(a), identificam-se os seguintes núcleos de interação não linear :

- (a)  $(0,06; 0,94; 1,0) \Rightarrow \sim 16$  dias, DT e DT
- (b)  $(0,4; 0,6; 1,0) \Rightarrow$  QTDW, DT e QTDW
- (c)  $(0,4; 1,0; 1,4) \Rightarrow$  QTDW, DT e  $\sim 16$  horas

Na componente meridional, Figura 52(b), identificam-se os seguintes núcleos:

- (a)  $(0,4; 0,6; 1,0) \Rightarrow$  QTDW, DT e QTDW
- (b)  $(0,45; 1,0; 1,45) \Rightarrow$  QTDW, DT e  $\sim 16$  horas
- (c)  $(0,5; 2,0; 1,5) \Rightarrow$  QTDW, DT e  $\sim 16$  horas



**Figura 58** - Análises biespectrais dos ventos meteorológicos no inverno 2008 em São João do Cariri-PB, em 90 km. (a) Componente zonal, (b) componente meridional.

Os resultados das análises biespectrais revelaram interações da maré com Ondas Planetárias cujas periodicidades variam entre 0,5 e 20 dias. Na tabela 10 apresenta-se um resumo dos episódios de interação não linear ressonante detectados nos invernos entre 2005 e 2008, ressaltando-se que os dados para o inverno de 2006 não puderam ser analisados completamente.

**Tabela 10.** Episódios identificados através da análise biespectral como interação não linear ressonante entre a maré diurna e outras ondas nos ventos meteorológicos em 90 km para os invernos de São João do Cariri – PB.

	Zonal						Meridional					
	Período das outras ondas (dias)						Período das outras ondas (dias)					
	0,5	2	3-4	5-7	10	12-20	0,5	2	3-4	5-7	10	12-20
2005	-	Sim	-	Sim	-	-	Sim	Sim	Sim	-	-	Sim
2006	-	Sim	-	-	-	-	-	Sim <sup>9</sup>	-	-	-	-
2007	Sim	Sim	Sim	-	Sim	-	-	Sim	-	-	-	Sim
2008	-	Sim	-	-	-	Sim	-	Sim	-	-	-	-

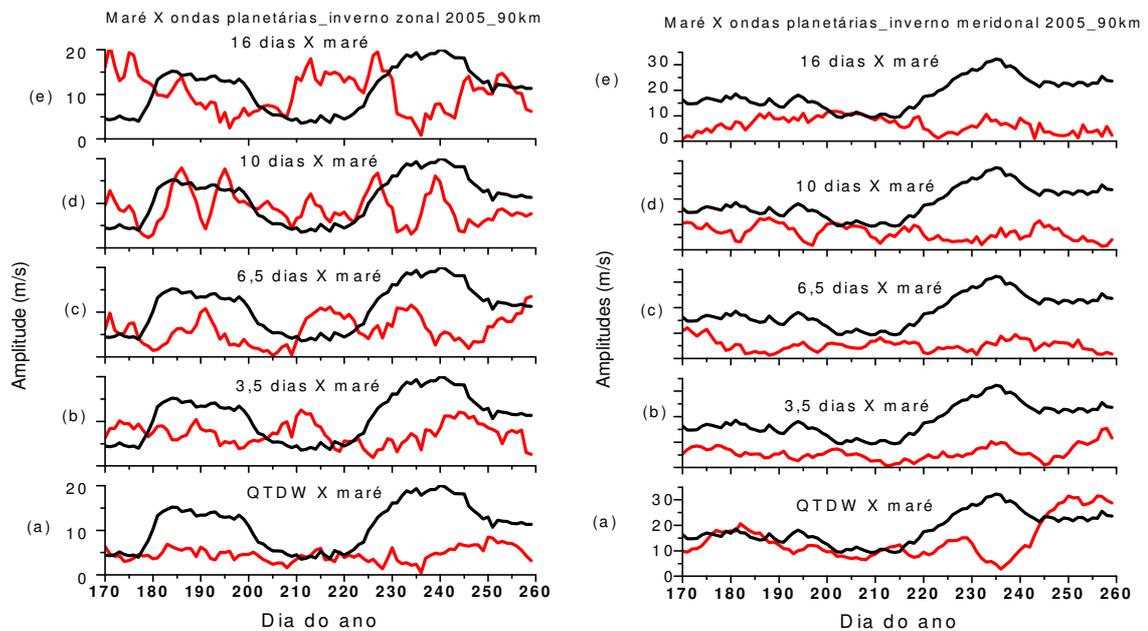
A partir dos resultados das análises biespectrais apresentados na Tabela 10 para os invernos entre os anos de 2005 e 2008, verifica-se que, em ambas componentes, o episódio com maior ocorrência de interação não linear ressonante com a maré diurna envolve apenas a QTDW e, apenas observam-se episódios esporádicos envolvendo outras Ondas Planetárias nas bandas de 3-4 dias, 5-7 dias e 12-20 dias.

<sup>9</sup> Embora a série de dados, para o inverno de 2006, não esteja completa para toda estação, os dados para junho-julho foram usado em um estudo de caso, discutido na sequência desta Tese, o qual revelou interação não linear entre estas ondas.

Na Figura 59, para ambas componentes, apresenta-se uma análise comparativa entre as amplitudes da maré diurna e das Ondas Planetárias com períodos de 2 a 20 dias no inverno de 2005. Os gráficos foram obtidos utilizando-se, para os cálculos, uma janela móvel de dados de 21 dias e com passo de 15 dias. Inicialmente, observa-se que na componente zonal, Figura 59-esquerda, as Ondas Planetárias de ~3-4 dias, ~5-7 dias e de ~12-20 dias apresentam amplitudes iguais ou maiores que a amplitude da maré diurna. Através deles verificam-se os seguintes comportamentos na componente zonal: (i) a amplitude média da QTDW se apresenta quase que sempre abaixo do valor da amplitude da maré mas seguindo a tendência desta última, entretanto, no intervalo entre os dias 210 a 220, ela assume um comportamento oposto ao apresentado pela amplitude média da maré, ou seja, enquanto a primeira diminui, a segunda aumenta. Este comportamento também é apresentado para as Ondas Planetárias nas bandas de ~3-4 dias, ~5-7 dias e de ~12-20 dias. Em relação a onda planetária de ~8-10 dias, o comportamento da amplitude da maré segue o comportamento da amplitude desta onda planetária. Nestes casos verifica-se também que as amplitudes destas Ondas Planetárias são comparativamente iguais ou maiores que as amplitudes médias da maré. Em ambas as situações, o comportamento da amplitude da maré parece ser modulada pelo comportamento das amplitudes destas Ondas Planetárias e, isto, aponta para eventos de interação não linear ressonante envolvendo estas Ondas Planetárias e a maré diurna.

Na componente meridional, apenas a QTDW apresenta amplitude média mais próxima da amplitude da maré diurna, enquanto que as demais oscilações apresentam amplitudes menores que as da maré diurna. O comportamento das amplitudes médias das oscilações de maiores frequências, especificamente ~5-7 dias, ~8-10 dias e ~12-20 dias parece não exercer influências sobre a amplitude da maré diurna, mas, o comportamento da amplitude da QTDW, no intervalo que começa em torno do dia 230, é oposto ao da maré, assumido inclusive valores acima dos valores da maré diurna. Observando-se o comportamento da amplitude média da oscilação de ~3-4 dias, parece que ela acompanha a amplitude da maré durante boa parte da estação e, no intervalo entre os dias 190 e 210, estas oscilações apresentam comportamentos opostos para suas amplitudes.

De forma geral, as amplitudes médias da maré e das Ondas Planetárias de ~2-20 dias apresentam comportamentos que guardam algum compromisso entre elas e, isto, pode ser indício de que elas estão interagindo não linearmente.



**Figura 59-** Comparação entre as amplitudes médias da maré diurna (preto) e Ondas Planetárias (vermelho) no inverno 2005 em São João do Cariri-PB, em 90 km. (esquerda) zonal e (direita) meridional.

Através das análises de Densidade de Potência Espectral (PSD) para os invernos de 2005, 2007 e 2008, na componente zonal, encontram-se picos para oscilações secundárias nas periodicidades entre ~16 horas e ~36 horas. Estas oscilações podem ser explicadas admitindo-se que elas são resultantes da interação não linear ressonante entre a maré diurna e Ondas Planetárias com períodos entre 2-20 dias conforme já discutido anteriormente. Nas PSD para a componente meridional encontra-se que, excetuando-se o inverno de 2005 em que as oscilações secundárias entre ~20 horas e ~36 horas estão presentes, o principal episódio de interação não linear ocorre entre tríades ressonantes envolvendo a maré diurna e duas QTDW. Isto se revela através das modificações das intensidades dos picos para estas oscilações, das modificações dos períodos da QTDW e pela não identificação de outras ondas secundárias. Isto sugere a geração da segunda QTDW propagando-se para leste conforme discutido por Palo *et al.* (2006). Portanto, as análises biespectrais dos ventos, em São João do Cariri-PB, apontam que a interação não linear ressonante envolvendo a maré diurna e a QTDW é um evento significativo para os invernos estudados. Esta interação não linear ressonante é importante na variabilidade da amplitude na maré diurna, em períodos de Ondas Planetárias, na região mesosférica de São João do Cariri-PB.

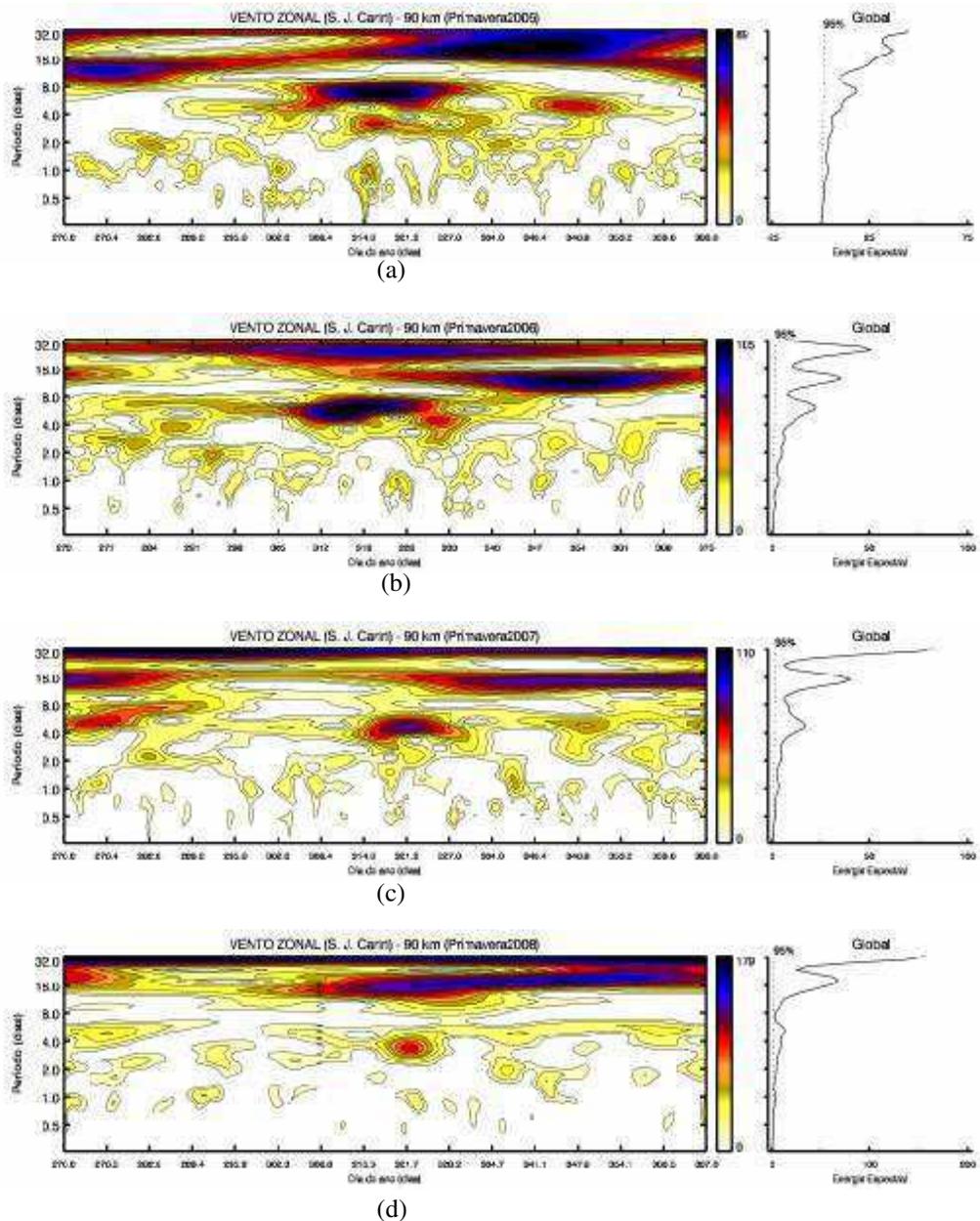
## 5.2.4. Estação de Primavera

### 5.2.4.1. Espectro em wavelets

Na Figura 60 tem-se o espectro em wavelets obtido para o vento zonal, durante a estação de primavera entre os anos de 2005 e 2008, em São João do Cariri-PB. Nele observam-se as periodicidades muito intensas de ~12-20 dias, ~8-10 dias, ~5-7 dias, ~3-4 dias, e menos intensa para QTDW e para a maré diurna. Na Figura 60(a), primavera de 2005, observa-se que a oscilação de ~16 dias é bastante intensa durante toda a estação; a oscilação de ~8-10 dias é mais intensa no intervalo entre os dias 270 e 286. A oscilação de ~5-7 dias é muito intensa no intervalo entre os dias 308 e 327 e entre 341 e 349. Para a periodicidade de ~3-4 dias o intervalo de grande intensidade encontra-se entre os dias 313 e 324. Para a maré diurna existe energia espectral para boa parte da estação, mas apenas dois núcleos mais intensos estão presentes, um em torno do dia 302 e outro em torno do dia 314. Para QTDW, apenas dois núcleos mais intensos, um em torno do dia 282 e outro em torno do dia 335.

Na Figura 60(b), para a primavera de 2006, identifica-se energia espectral intensa para ~12-20 dias, principalmente a partir do dia 319 até o final da estação. Identifica-se um núcleo muito intenso para ~5-7 dias no intervalo entre os dias 314 e 331. Entre o dia 328 e 335 tem-se um núcleo de ~3-4 dias. Energia espectral para a QTDW é observada, mas verifica-se apenas um núcleo mais destacado em torno do dia 293. Para a maré diurna, no intervalo de estudo, verifica-se pouca energia e nenhum núcleo muito intenso. Entretanto, ressalta-se que a série de dados está incompleta conforme foi informado no capítulo da metodologia.

Para a primavera de 2007, Figura 60(c), observa-se que a oscilação de ~12-20 dias é bastante intensa no intervalo entre os dias 270 a 289 e a partir do dia 308 até o final da estação. Para a oscilação de ~3-4 dias existe um núcleo que se inicia no dia 318 até o dia 325. Tanto a QTDW quanto a maré diurna não apresentam núcleos intensos.



**Figura 60** - Espectro de energia em wavelets da componente zonal do vento meteorológico da primavera (Cariri-PB) (a) 2005; (b) 2006; (c) 2007; (d) 2008 e da Energia Espectral Global em 90 km.

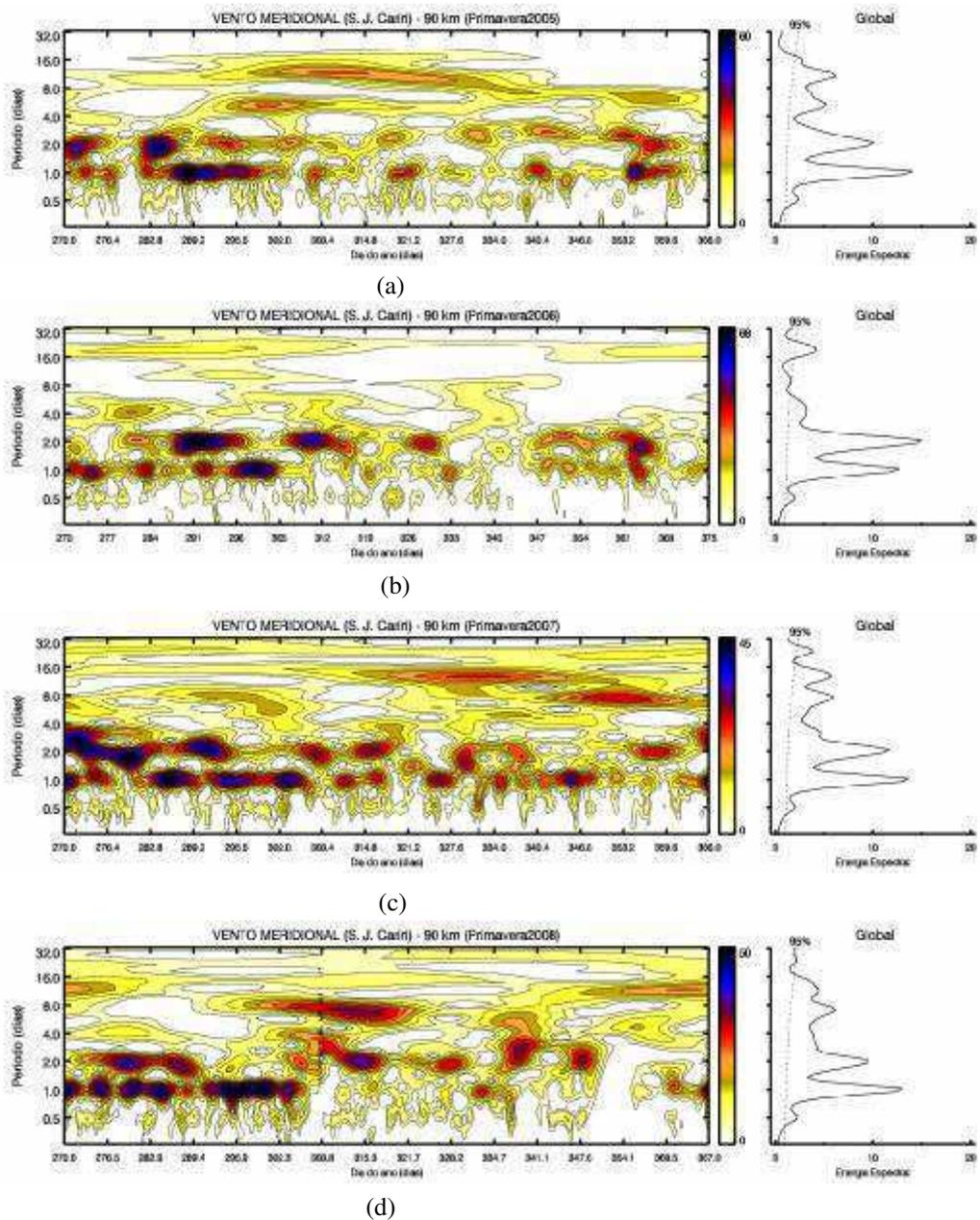
Na Figura 61, têm-se os espectros para o inverno na componente meridional. Para o ano de 2005, Figura 61(a), observa-se que periodicidades entre 8 e 16 dias são intensas no intervalo entre os dias 302 e 327. Periodicidades entre 5 e 7 dias são intensas no intervalo entre os dias 295 e 306. A QTDW apresenta vários núcleos intensos, com destaque para os núcleos entre os dias 270 e 276 e entre os dias 281 e 286. A maré diurna se apresenta mais intensa nos intervalos entre os dias 286 e 297 e entre os dias 353 e 361. Observa-se que existem intervalos de anticorrelação entre as intensidades das energias da maré diurna e a QTDW. Os núcleos da QTDW e da maré diurna se interligam nos intervalos em torno dos

dias 272, 282 e 356. Alguma energia com nível de significância acima 95% é observada para a maré semidiurna.

No inverno de 2007, Figura 61(b), encontra-se alguma energia espectral para a periodicidade de ~12-20 dias durante toda a estação. Um núcleo para energia espectral de ~3-4 dias encontra-se entre os dias 278 e 284. A QTDW apresenta núcleos mais intensos nos intervalos entre os dias 270 e 282, entre os dias 288 e 285 e em torno do dia 364, além de outros núcleos menos intensos. Observam-se núcleos mais intensos, para a maré diurna, em torno dos dias 274, 284, 292 e no intervalo entre os dias 298 e 304. Os núcleos para a QTDW e para a maré diurna se interligam em torno do dia 364.

A Figura 61(c) mostra os resultados da análise em wavelets na componente meridional para 2007. No gráfico observam-se as periodicidades intensas de ~12-20 dias no intervalo entre os dias 323 e 340; ~8-10 dias no intervalo entre os dias 343 e 359. A QTDW mostra densidade de energia mais intensa entre os dias 270 e 295. Observa-se que o primeiro núcleo da QTDW se mistura com uma periodicidade de ~3-4 dias no intervalo entre os dias 270 e 275. Para a maré diurna identificam-se vários núcleos mais intensos, principalmente nos intervalos em torno dos dias 270 e 306. Os núcleos da QTDW e da maré diurna se interligam entre os dias 270 e 282.

Para 2008, Figura 61(d), observam-se as seguintes periodicidades intensas: dois períodos de ~12-20 dias, um no início e outro no final da estação e um de ~5-7 dias entre os dias 297 e 322. Núcleos de ~3-4 dias são observados em torno dos dias 308, 338 e 348. Para a QTDW, encontram-se núcleos intensos nos intervalos entre os dias 270 e 289, entre os dias 303 e 317 e em torno dos dias 348. A maré diurna apresenta vários núcleos durante toda a estação, mas os núcleos mais intensos encontram-se entre os dias 270 e 305. A maré semidiurna apresenta alguma energia, mas nenhum núcleo intenso. A QTDW e a maré diurna, além de apresentarem intervalos de anticorrelação entre as intensidades de seus núcleos, entre o dia 278 e o dia 282, eles se interligam.

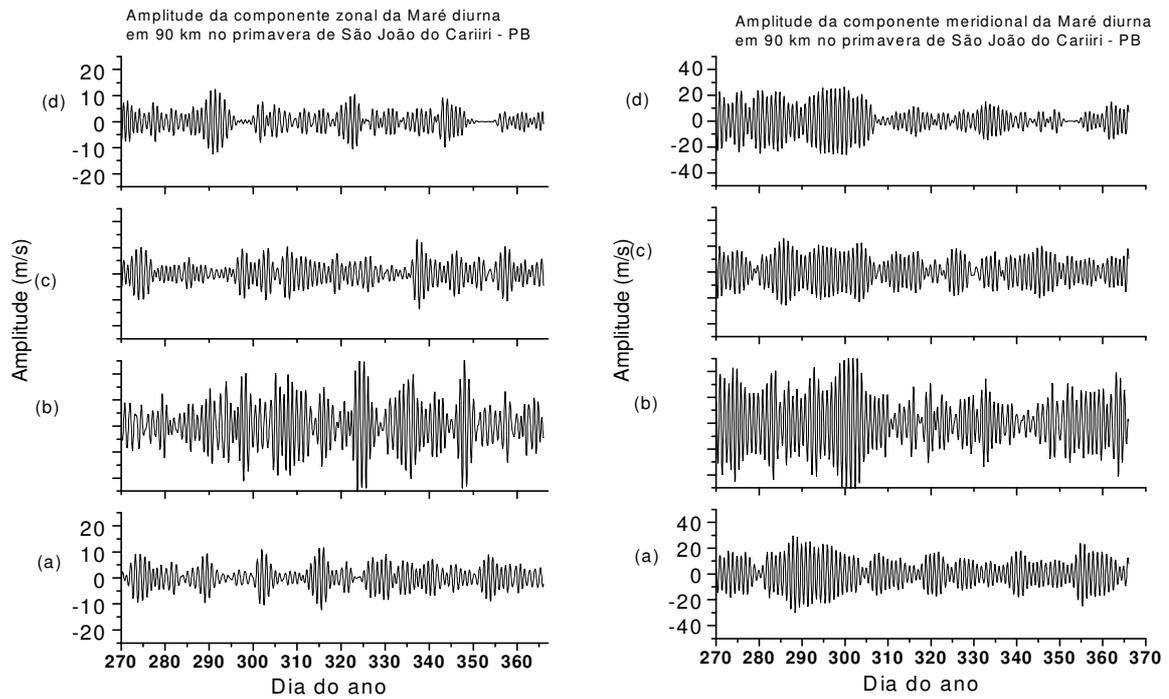


**Figura 61** - Espectro de energia em wavelets da componente meridional do vento meteorológico da primavera (Cariri-PB) (a) 2005; (b) 2006; (c) 2007; (d) 2008 e da Energia Espectral Global em 90 km.

### 5.2.4.2. Análise dos dados filtrados

As Figuras 62 mostram os resultados dos dados filtrados para a maré diurna nas primaveras de 2005 a 2008. Observa-se que as amplitudes moduladas da maré são menos intensas na componente meridional e, nesta componente, a primavera para a qual as amplitudes desta oscilação são mais intensas é a de 2006, Figura 62(b) (à esquerda), cujo valor máximo encontra-se em torno de 20 m/s. Para a componente meridional, a primavera de 2006, Figura 62(b) (à direita), é aquela que apresenta também a maior amplitude em torno de

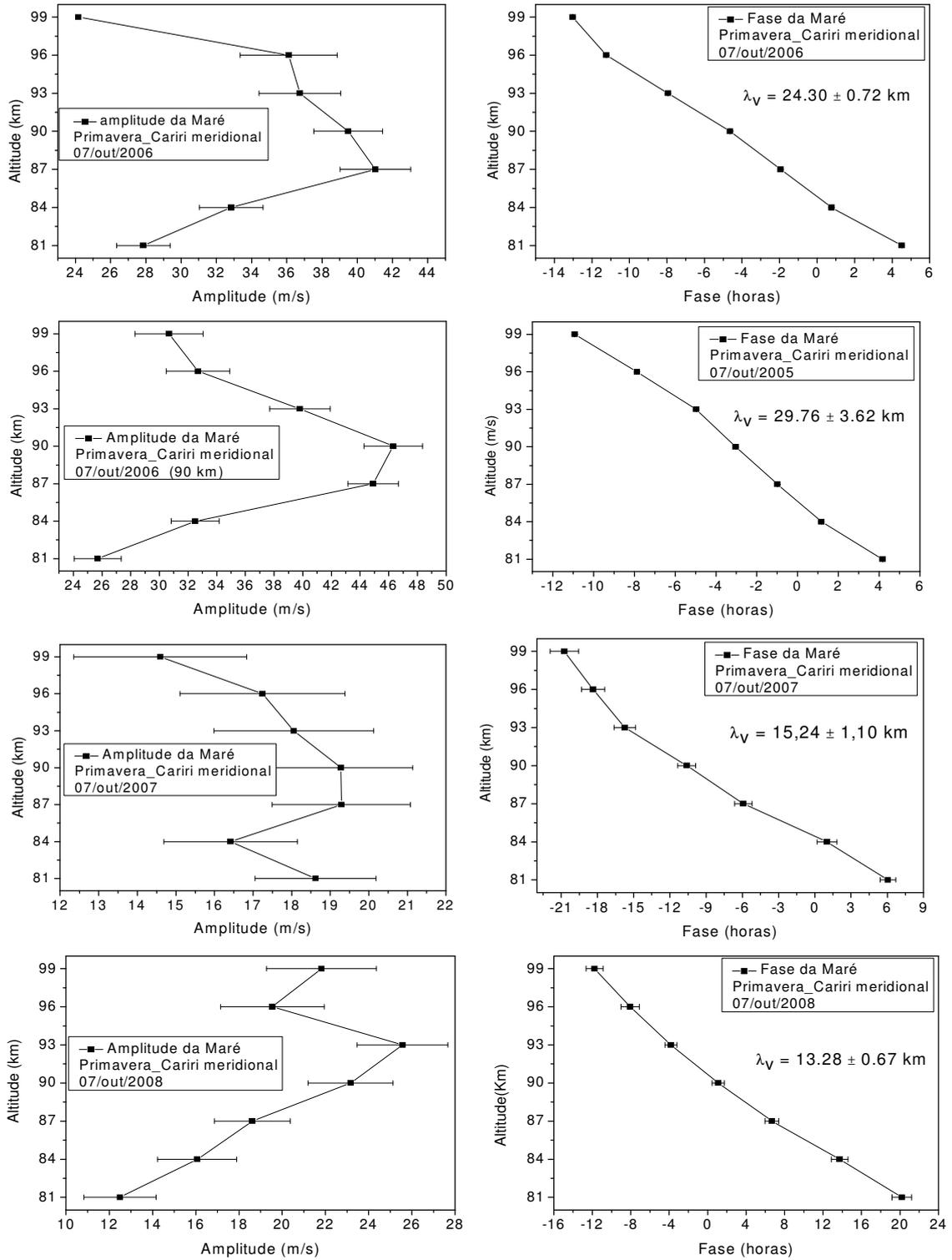
40 m/s. Um comportamento bastante evidente é a amplitude mais intensa da maré na primeira metade da estação.



**Figura 62** - Espectro de Energia em Ondas de Energia da componente meridional do vento meteorológico da primavera (Cariri-PB) (a) 2005; (b) 2006; (c) 2007; (d) 2008 e da Energia Espectral Global em 90 km.

### 5.2.4.3. Perfis de amplitudes e fases

Na Figura 63, para os perfis de amplitude e fases da maré na componente meridional no dia 281 (07/out), encontra-se que o comprimento de onda vertical, para a maré diurna, situa-se entre  $\lambda_v = 13,28 \pm 0,67 \text{ km}$  em 2008, Figura 63(d)-direita, e  $\lambda_v = 29,76 \pm 3,62 \text{ km}$  em 2006, Figura 63(b). Este último resultado concorda com a literatura e demonstra que para amplitudes elevadas, o perfil de fases é bem definido permitindo um cálculo mais preciso do comprimento de onda. Os perfis de amplitudes mostram que a maior amplitude, em 90 km, é atingida na primavera de 2006 em torno de 46 m/s, Figura 63(b) (à esquerda), enquanto que a menor amplitude é atingida em 2007 e seu valor pouco acima de 19 m/s, Figura 63(c). Os valores dos comprimentos de onda vertical para os anos de 2007 e 2008 estão muito distantes daqueles valores encontrados na literatura.

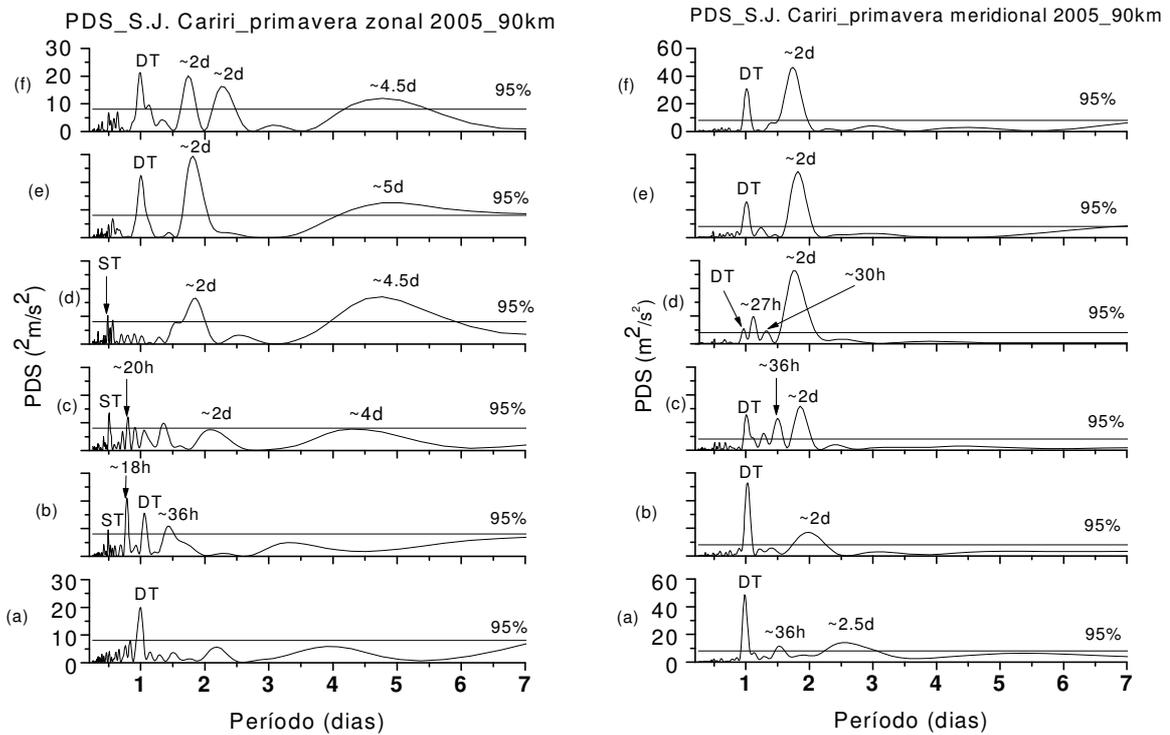


**Figura 63** - Espectro de Energia em Ondas da componente meridional do vento meteorológico da primavera (Cariri-PB) (a) 2005; (b) 2006; (d) 2007; (d) 2008 em 90 km.

#### 5.2.4.4. Densidade de Potência Espectral (PSD)

A Figura 64 mostra a PSD entre 26/setembro e 14/novembro de 2005. Na componente zonal, Figura 64(à esquerda), identificam-se os seguintes picos acima do nível de significância de 95%: maré diurna, maré semidiurna, QTDW, ~4 dias, ~18 horas, ~20 horas e ~36 horas. O pico para maré diurna, na primeira semana, é intenso, Figura 64(a). Na segunda semana, Figura 64(b), o pico para a maré diminui e surgem picos para ~18 horas e ~36 horas e, nesta semana o pico para maré semidiurna torna-se significativo. Na terceira semana, Figura 64(c), o pico para a maré diurna desaparece e os picos para ~32 horas e ~18 horas desaparecem e, nesta semana, surgem os picos de ~20 horas, de ~3-4 dias e o pico para a maré semidiurna aumenta. Na primeira e na segunda semana, os picos para ~3-4 dias encontram-se abaixo do nível de significância de 95%. O pico para a QTDW só se torna significativo a partir da terceira semana e aumenta para a quarta e quinta semanas, Figura 64(d) e (e). Na sexta semana, Figura 64(f), o pico intenso da QTDW diminui e surge mais um pico para a QTDW. O pico para a maré semidiurna diminui na quarta semana e desaparece para a quinta e sexta semanas. O pico para a oscilação de ~3-4 dias permanece significativo entre a terceira e a sexta semana, mas o período se modifica passando para ~4,5 dias, ~5 dias e voltando para ~4,5 dias.

Na Figura 64 (à direita), tem-se a PSD para a componente meridional, nele identificam-se os picos significativos para maré diurna, QTDW, ~2,5 dias, ~27 horas, ~30 horas e ~36 horas. O pico para maré diurna é intenso na primeira e segunda semana, diminui na terceira e, praticamente, desaparece na quarta semana, Figuras 64(a), (b), (c) e (d). Na primeira semana surge o pico de ~32 horas conjuntamente com pico para ~2,5 dias. O pico da maré volta a ser intenso na quinta e sexta semanas, Figuras 64(e) e (f). Neste mesmo intervalo, dentre as oscilações, apenas verificam-se picos intensos para a QTDW. Na terceira semana surge novamente o pico para ~36 horas e na quarta surgem os picos de ~27 horas e ~30 horas. Observa-se que, quando os picos para as oscilações secundárias de ~27 horas, ~30 horas e ~36 horas, o pico para a maré diurna sempre diminui. Isto é mais um indício de que a interação não linear ressonante envolvendo a maré diurna é um provável mecanismo de geração destas oscilações secundárias e que nestas tríades ressonantes a maré comporta-se como fonte de energias para as outras oscilações.

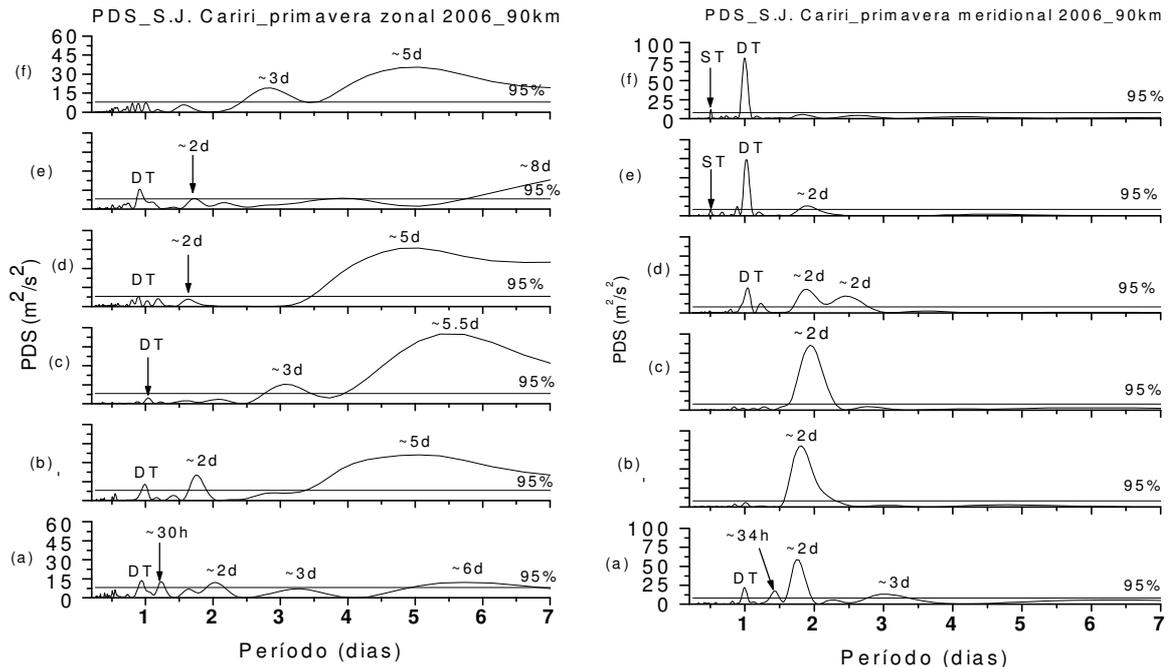


**Figura 64** - Periodograma de Lomb-Scargle, entre 26/set e 14/nov, nos ventos meteorológicos da primavera de 2005 em São João do Cariri-PB, em 90 km. Zonal (esquerda) e meridional (direita).

A Figura 65 mostra a PSD entre 26/outubro a 14/dezembro de 2006. Na componente zonal, Figura 65(à esquerda), identificam-se os seguintes picos acima do nível de significância de 95%: maré diurna, QTDW, 2,5 dias, ~3 dias, ~5-7 dias e ~30 horas. O pico para a maré diurna, próximo ao limiar de 95%, é significativo na primeira, na segunda e na quinta semanas, Figura 65(a), (b) e (e). O pico para oscilação secundária de ~30 horas surge apenas na primeira semana. Observa-se que, no momento em que a oscilação secundária desaparece, o pico para a onda de ~5-7 dias aumenta.

Na Figura 65(à direita) tem-se a PSD para a componente meridional, nele identificam-se os picos significativos para maré diurna, maré semidiurna, QTDW, ~3 dias e ~34 horas. O pico para maré diurna é significativo na primeira semana, Figura 65(a), na segunda e terceira semanas, Figuras 65(b) e (c), ele desaparece e volta a ser significativo a partir da quarta semana, Figura 65(d). Na primeira semana surge o pico de ~34 horas. Quando o pico para ~34 horas desaparece, também desaparece o pico para ~3-4 dias. O pico para a onda de QTDW é muito intenso entre a primeira e terceira semanas, mas na quarta semana, este pico diminui e surge outro pico correspondendo a uma QTDW. Na quinta semana, Figura 65(e), o pico da

QTDW diminui e na sexta semana, Figura 65(f), ele desaparece e, neste mesmo intervalo, o pico para a maré diurna aumenta significativamente. Estes comportamentos apontam que a interação não linear entre a maré e a QTDW reforça a intensidade da maré. Na quinta e sexta semana surge o pico para a maré semidiurna no limite de significância de 95%.

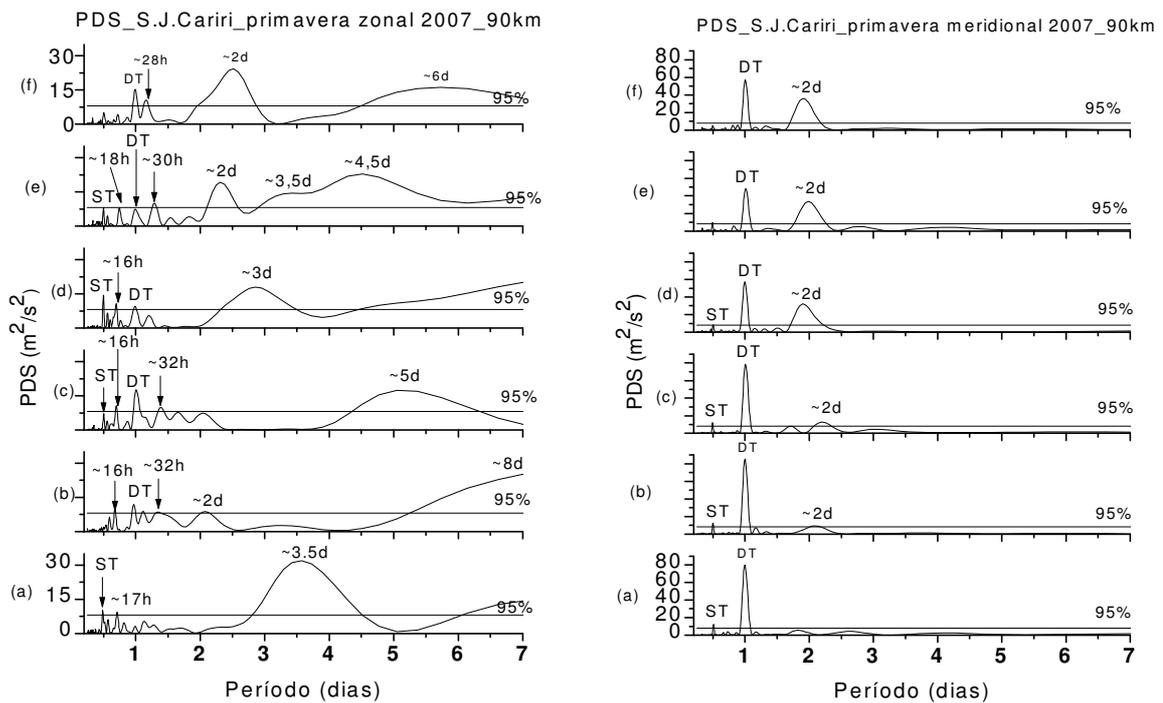


**Figura 65** - Periodograma de Lomb-Scargle, entre 26/out a 14/dez, nos ventos meteorológicos da primavera de 2006 em São João do Cariri-PB, em 90 km. Zonal (esquerda) e meridional (direita).

A Figura 66 mostra a PSD entre 26/out e 14/dez de 2007. Na componente zonal, Figura 66(à esquerda), identificam-se os seguintes picos acima do nível de significância para maré diurna, maré semidiurna, QTDW, ~3-4 dias, 5-7 dias, ~8 dias, ~16 horas, ~18 horas, ~28 horas, ~30 horas e ~32 horas. O pico para maré diurna, a partir da segunda semana, se apresenta pouco intenso, Figura 66(b), e permanece assim até a sexta semana, Figura 66(f). O pico para a oscilação secundária de ~16 horas está presente entre a primeira e quarta semanas, Figuras 66(a), (b), (c) e (d). O pico para a onda de ~32 horas esta presente na segunda e terceira semanas. Na quinta semana, observam-se os picos para as oscilações de ~18 horas e de ~30 horas e, na sexta semana, Figura 66(f), surge apenas um pico secundário de ~28 horas. Picos para a maré semidiurna estão presentes na primeira semana e entre a terceira e quinta semanas. Nota-se que enquanto o pico para a onda secundária de ~16 horas esta presente, tanto o pico para a maré como o pico para a QTDW não são intensos. Isto se deve ao fato de que a oscilação de ~16 horas é resultante da interação entre a maré diurna e a QTDW e a

energia desta duas oscilações primárias é cedida para a onda secundária. Enquanto o pico para a oscilação secundária de ~32 horas está presente, picos para a oscilação de ~4 dias não são intensos, isto se justifica porque a oscilação ~32 horas resulta da subtração das frequências da maré diurna e da onda de ~4 dias e, esta última, cede energia neste processo. Na quinta semana, Figura 66(e), tem-se os picos de ~18 horas resultante da interação por soma das frequências da maré diurna e da onda ~3 dias, e a oscilação secundária de ~30 horas é resultante da interação por subtração de frequências destas duas ondas primárias. Observa-se que o pico para ~3 dias diminui na semana em que os picos para as duas oscilações secundárias surgem. Na sexta semana, Figura 66(f), surge o pico para ~28 horas. Esta oscilação secundária é resultante da interação não linear ressonante por soma das frequências da maré diurna e a da oscilação de ~5-7 dias.

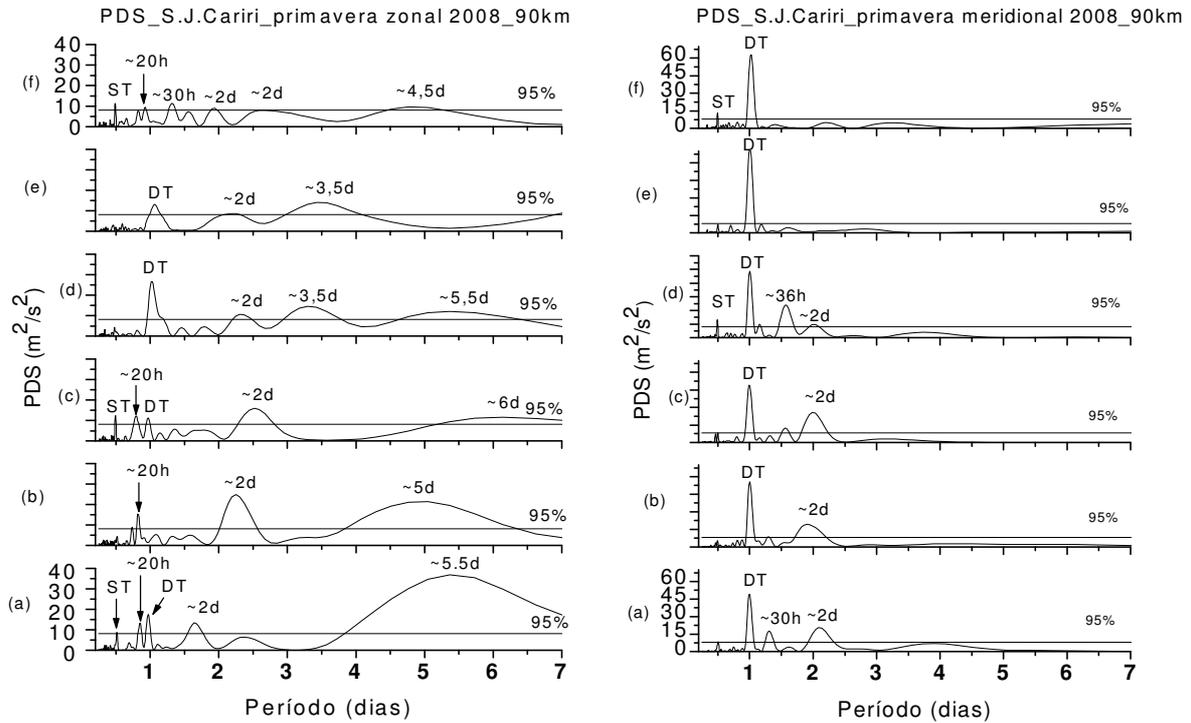
Na Figura 66(direita) tem-se a PSD para a componente meridional, nele identificam-se os picos significativos para maré diurna, maré semidiurna e QTDW. Não se observa picos para oscilações secundárias resultante da interação não linear entre a maré e Ondas Planetárias.



**Figura 66** - Periodograma de Lomb-Scargle, entre 26/out a 14/dez, nos ventos meteorológicos da primavera de 2007 em São João do Cariri-PB, em 90 km. Zonal (esquerda) e meridional (direita).

A Figura 67 mostra a PSD entre 26/out e 14/dez de 2008. Na componente zonal, Figura 67(à esquerda), identificam-se picos acima do nível de significância para a maré diurna, maré semidiurna, QTDW, ~3-4 dias, ~5-7 dias, ~20 horas e ~30 horas. Os picos para a maré diurna permanecem acima do nível de significância no intervalo entre a primeira e quinta semanas, Figuras 67(a), (b), (c), (d) e (f). Entre a primeira e terceira semana o pico para a maré é pouco intenso e surge pico para ~20 horas. Esta oscilação secundária é resultado por adição das frequências da maré diurna e da onda de ~5 dias, e a energia destas oscilações primárias são transferidas para a oscilação ~20 horas, e isto é corroborado com a diminuição do pico para a oscilação 5-7 dias, que é bastante intenso na primeira semana, mas também diminui para as duas semanas subsequentes. Este mesmo comportamento é observado na sexta semana, Figura 67(f), que apresenta também um pico para a oscilação de ~30 horas, resultante da interação por subtração de frequências entre a maré e a onda de ~5-7 dias. Picos significativos para maré semidiurna surgem na primeira, terceira e sexta semanas. A QTDW está presente em praticamente todo o intervalo analisado, entretanto. Os picos mais intensos ocorrem na segunda e terceira semanas. Na sexta semana observam-se dois picos, com períodos ligeiramente diferentes, que correspondem à QTDW e o pico para maré diurna não é significativo.

Na Figura 67(à direita), tem-se a PSD para a componente meridional, nele identificam-se picos significativos para maré diurna, maré semidiurna, QTDW, ~30 horas e ~32 horas. O pico para maré diurna é intenso durante todo o intervalo analisado. Picos para a QTDW estão presentes entre a primeira e quarta semanas, Figura 67(b), (b), (c) e (d). Na quinta e sexta semanas, Figura 67(e) e 67(f), o pico para maré diurna se amplifica. Na primeira semana surge o pico de ~30 horas, este pico é resultante da interação não linear ressonante por subtração das frequências da maré diurna e da onda de ~5 dias. Na quarta semana surge o pico de ~36 horas, resultante da interação por subtração de frequências entre a maré diurna e a onda de ~3 dias. Picos para a maré semidiurna pouco acima do nível de significância são encontrados na quarta e sexta semana e não se observa indícios de interação linear.



**Figura 67** - Periodograma de Lomb-Scargle, entre 26/out a 14/dez, nos ventos meteorológicos da primavera de 2008 em São João do Cariri-PB, em 90 km. Zonal (esquerda) e meridional (direita).

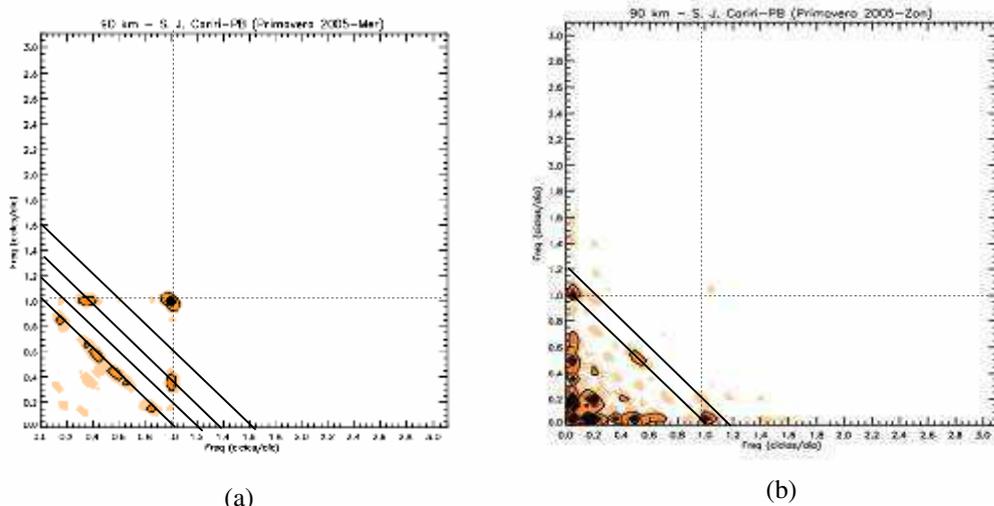
### 5.2.4.5. Análise Biespectral

A Figura 68 mostra os resultados das análises biespectrais para a primavera de 2005. Na componente zonal, Figura 68(a), identificam-se os seguintes núcleos de interação não linear ressonante envolvendo a maré diurna:

- (a)  $(0,15; 0,85; 1,0) \Rightarrow \sim 6,5$  dias, DT e  $\sim 28$  horas
- (b)  $(0,4; 0,6; 1,0) \Rightarrow$  QTDW, DT e QTDW
- (c)  $(0,4; 1,0; 1,4) \Rightarrow$  QTDW, DT e  $\sim 16$  horas
- (d)  $(0,55; 1,0; 1,55) \Rightarrow$  QTDW, DT e  $\sim 16$  horas

Na componente meridional, Figura 68(b), identificam-se os seguintes núcleos:

- (a)  $(0,2; 1,0; 1,2) \Rightarrow \sim 5$  dias, DT e  $\sim 20$  horas
- (b)  $(0,06; 1,0; 1,06) \Rightarrow \sim 16$  dias, DT e DT



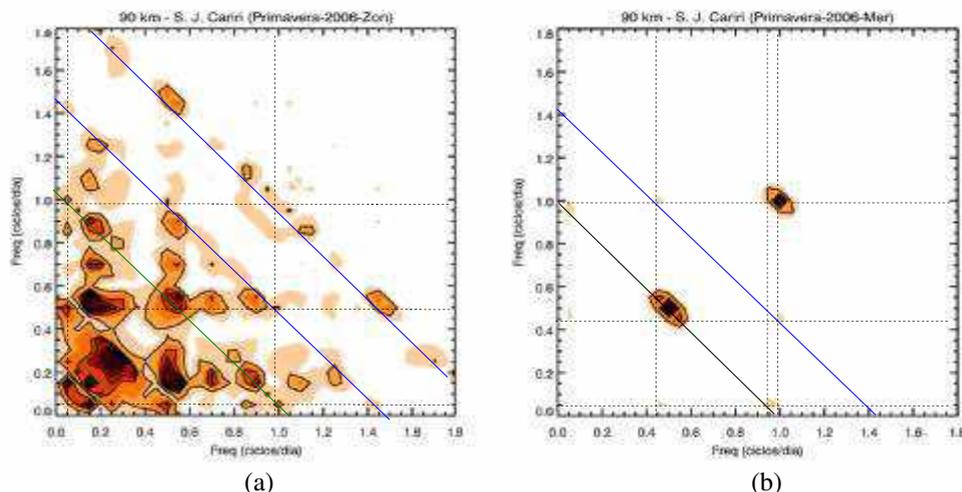
**Figura 68** - Análises biespectrais dos ventos meteorológicos na primavera 2005, em São João do Cariri-PB, em 90 km. (a) Componente zonal, (b) componente meridional.

Na componente zonal da primavera de 2006, Figura 69(a), identificam-se os seguintes núcleos de interação não linear ressonantes envolvendo a maré diurna:

- (a) (0,06; 1,0; 1,06) ⇒ ~16 dias, DT e DT
- (b) (0,15; 0,85; 1,0) ⇒ ~6,5 dias, DT e ~28 horas
- (c) (0,5; 1,0; 1,5) ⇒ QTDW, DT e ~16 horas

Na componente meridional, Figura 69(b), identificam-se os seguintes núcleos:

- (a) (0,06; 0,94; 1,0) ⇒ ~16 dias, DT e DT
- (b) (0,45; 0,55; 1,0) ⇒ QTDW, DT, QTDW
- (c) (0,5; 1,0; 1,5) ⇒ QTDW, DT e ~16 horas



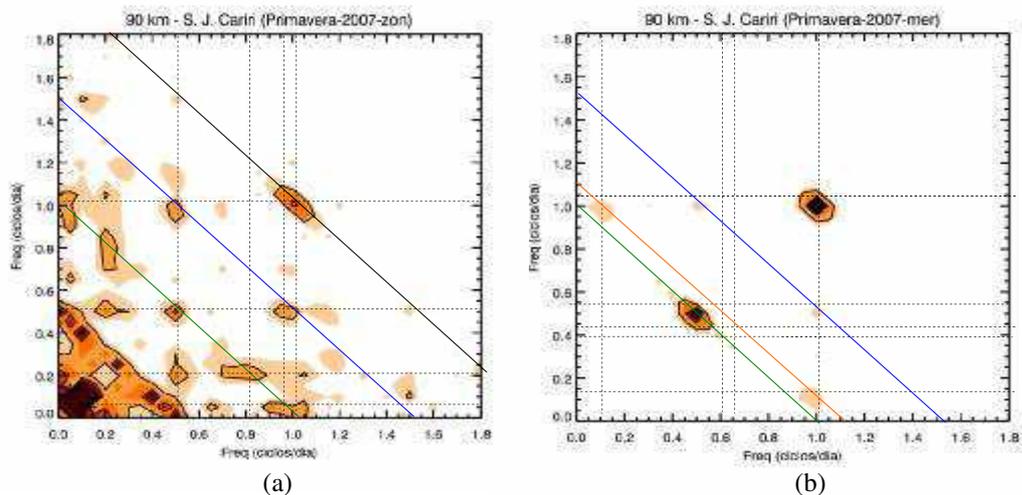
**Figura 69** - Análises biespectrais dos ventos meteorológicos na primavera 2006 em São João do Cariri-PB, em 90 km. (a) Componente zonal, (b) componente meridional

Na componente zonal da primavera de 2007, Figura 70(a), identificam-se os seguintes núcleos de interação não linear ressonante envolvendo a maré diurna:

- (a)  $(0,06; 0,94; 1,0) \Rightarrow \sim 16$  dias, DT e DT
- (b)  $(0,2; 0,8; 1,0) \Rightarrow$  QTDW, DT e QTDW
- (c)  $(0,5; 1,0; 1,5) \Rightarrow$  QTDW, DT e  $\sim 16$  horas
- (d)  $(0,5; 2,0; 1,5) \Rightarrow$  QTDW, ST e  $\sim 16$  horas

Na componente meridional, Figura 70(b), identificam-se os seguintes núcleos:

- (a)  $(0,15; 0,85; 1,0) \Rightarrow \sim 6,5$  dias, DT e  $\sim 28$  horas
- (b)  $(0,4; 0,6; 1,0) \Rightarrow$  QTDW, DT, QTDW
- (c)  $(0,5; 1,0; 1,5) \Rightarrow$  QTDW, DT e  $\sim 16$  horas

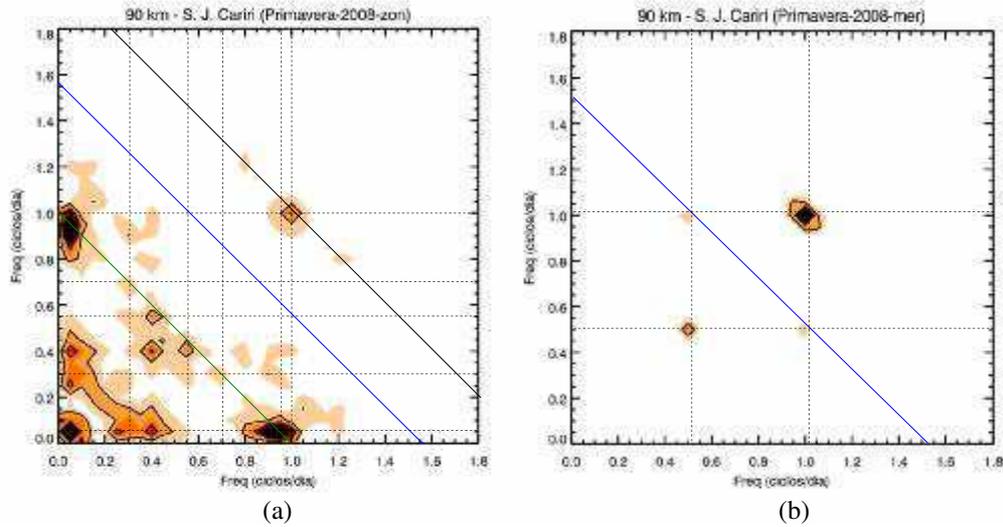


**Figura 70** - Análises biespectrais dos ventos meteorológicos na primavera 2007 em São João do Cariri-PB, em 90 km. (a) Componente zonal, (b) componente meridional

A Figura 71 mostra os resultados das análises biespectrais para a primavera de 2008. Na componente zonal, Figura 71(a), são identificados os seguintes núcleos de interação não linear ressonante envolvendo a maré diurna:

- (a)  $(0,06; 0,94; 1,0) \Rightarrow \sim 16$  dias, DT e DT
- (b)  $(0,45; 0,55; 1,0) \Rightarrow$  QTDW, DT, QTDW
- (c)  $(0,3; 0,7; 1,0) \Rightarrow \sim 3$  dias, DT e  $\sim 34$  horas
- (d)  $(0,5; 1,0; 1,5) \Rightarrow$  QTDW, DT e  $\sim 16$  horas

Na componente meridional, Figura 71(b), identifica-se apenas o seguinte núcleo de interação não linear ressonante envolvendo a maré: (0,5; 1,0; 1,5) ⇒ QTDW, DT e ~16 horas



**Figura 71** - Análises biespectrais dos ventos meteorológicos na primavera 2008 em São João do Cariri-PB, em 90 km. (a) Componente zonal, (b) componente meridional

Através das análises em wavelets e do Espectro Global de Energia identificou-se oscilações primárias, com nível de significância acima de 95%, nas periodicidades da maré diurna, maré semidiurna e Ondas Planetárias com períodos variando entre ~2 dias e ~20 dias. Componentes espectrais secundárias com períodos entre ~12 e ~36 horas foram identificadas nos resultados obtidos através da PSD. Na tabela 11 apresenta-se um resumo dos episódios, de interação não linear ressonante, detectados através das análises biespectrais nas primaveras entre 2005 e 2008. Os dados para o inverno de 2006 não puderam ser analisados, pois não estavam totalmente completamente disponíveis.

**Tabela 11.** Episódios identificados através da análise biespectral como interação não linear ressonante entre a maré diurna e outras ondas nos ventos meteorológicos em 90 km para as primaveras de São João do Cariri – PB.

	Zonal						Meridional					
	Período das outras ondas (dias)						Período das outras ondas (dias)					
	0,5	2	3-4	5-7	10	12-20	0,5	2	3-4	5-7	10	12-20
2005	-	Sim	-	Sim	-	-	-	Sim	-	Sim	-	-
2006	-	Sim	-	Sim	-	Sim	-	Sim	-	-	-	Sim
2007	Sim	Sim	-	-	-	Sim	Sim	Sim	-	Sim	-	Sim
2008	-	Sim	Sim	-	-	Sim	-	Sim	-	Sim	-	-

A partir dos resultados das análise biespectrais apresentados na Tabela 11 para as primaveras entre os anos de 2005 e 2008, verifica-se que, em ambas componentes, o episódio de interação não linear ressonante de maior ocorrência com a maré diurna envolve a QTDW.

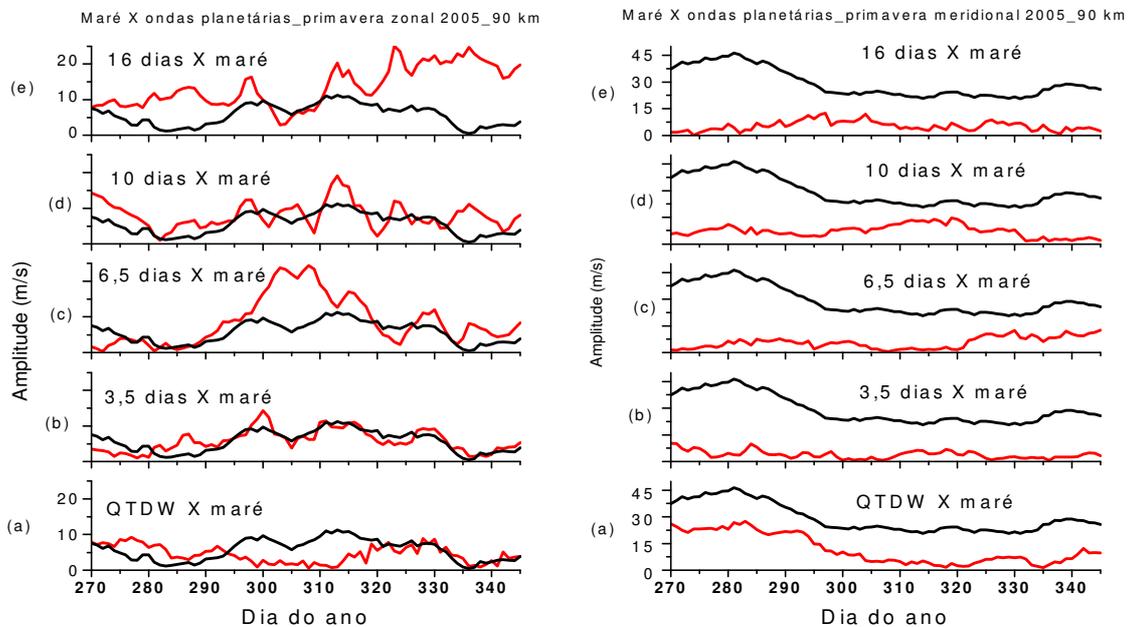
Episódios envolvendo a maré e outras periodicidades de Ondas Planetárias apontam que, na componente zonal, a oscilação ~12-20 dias é importante, enquanto que na componente meridional a mais importante é a de ~5-7 dias. Interações envolvendo a maré diurna e a maré semidiurna ocorrem em ambas as componentes na primavera de 2007.

Na Figura 72, para ambas as componentes, apresenta-se uma análise comparativa entre as amplitudes da maré diurna e das Ondas Planetárias com períodos de 2 a 20 dias na primavera de 2005. Os gráficos foram obtidos utilizando-se, para os cálculos, uma janela móvel de dados de 21 dias e passo de 15 dias. Inicialmente, observa-se que na componente zonal, Figura 72 (à esquerda), as Ondas Planetárias de ~3-4 dias e ~8-10 apresentam amplitudes iguais ou maiores que a amplitude da maré diurna. Através deles verificam-se os seguintes comportamentos na componente zonal: (i) a amplitude média da QTDW se apresenta com valores próximos da amplitude média da maré. Observa-se que, nos intervalos entre os dias 270 e 295 e entre o dia 320 até o final da estação, a amplitude média da QTDW acompanha a amplitude da maré, mas, entre os dias 295 e 320 elas apresentam comportamentos opostos; (ii) A onda de ~12-20 dias, entre os dias 300 até o final da estação, apresenta amplitude bem maior do que a da maré e exibe comportamento oposto ao comportamento da amplitude da maré, indicando possível interação não linear ressonante entre elas; (iii) a amplitude médias para a oscilação de ~3-4 dias, parece acompanhar o comportamento médio da amplitude da maré, excetuando-se o intervalo entre os dias 285 e 300, em que a amplitude desta oscilação apresenta dois pequenos picos. Entretanto, parece que os picos da onda de ~3-4 dias não influenciam o comportamento exibido pela amplitude média maré. Mas, no mesmo intervalo, a onda de ~16 dias também apresenta dois picos; (iv) a oscilação de ~8-10 dias apresenta picos em sua amplitude média, mas parece que a amplitude da maré não sofre influência significativa dos picos desta oscilação; e (v) o comportamento da oscilação de ~5-7 dias no intervalo entre, aproximadamente os dias 300 e 310 exibe amplitude muito elevada e também dois picos. A amplitude média da maré acompanha o comportamento destes dois picos e, o perfil da amplitude da maré, nos outros intervalos da estação, exibe amplitude média comparável a da oscilação de ~5-7 dias.

Na componente meridional, apenas a QTDW apresenta amplitude média mais próxima da amplitude da maré diurna, enquanto que as demais oscilações apresentam amplitudes bem menores. As amplitudes médias das oscilações de maiores frequências, especificamente ~5-7 dias, ~8-10 dias, parecem exercer alguma influência sobre a amplitude da maré diurna. A amplitude da oscilação de ~5-7 dias, no intervalo entre os dias 320 e 335, exibe um pequeno

pico e, durante a existência deste pico, a amplitude da maré apresenta comportamento oposto ao do pico. A oscilação de ~8-10 dias, no intervalo entre os dias 300 e 330, também exibe um pico que apresenta comportamento oposto ao comportamento da amplitude média da maré. O comportamento da amplitude média da QTDW parece guiar o comportamento da amplitude média da maré, pois seus perfis são muito próximos e, possivelmente esta oscilação é a mais importante na variabilidade da amplitude da maré diurna durante a primavera de 2005.

De forma geral, as amplitudes médias da maré e das Ondas Planetárias de ~2-20 dias apresentam comportamentos que guardam algum compromisso entre elas. É possível entender este compromisso, em primeira aproximação, como uma modulação da amplitude da maré diurna pelas Ondas Planetárias e, isto, pode ser considerado como indício de interação não linear ressonante entre estas ondas.

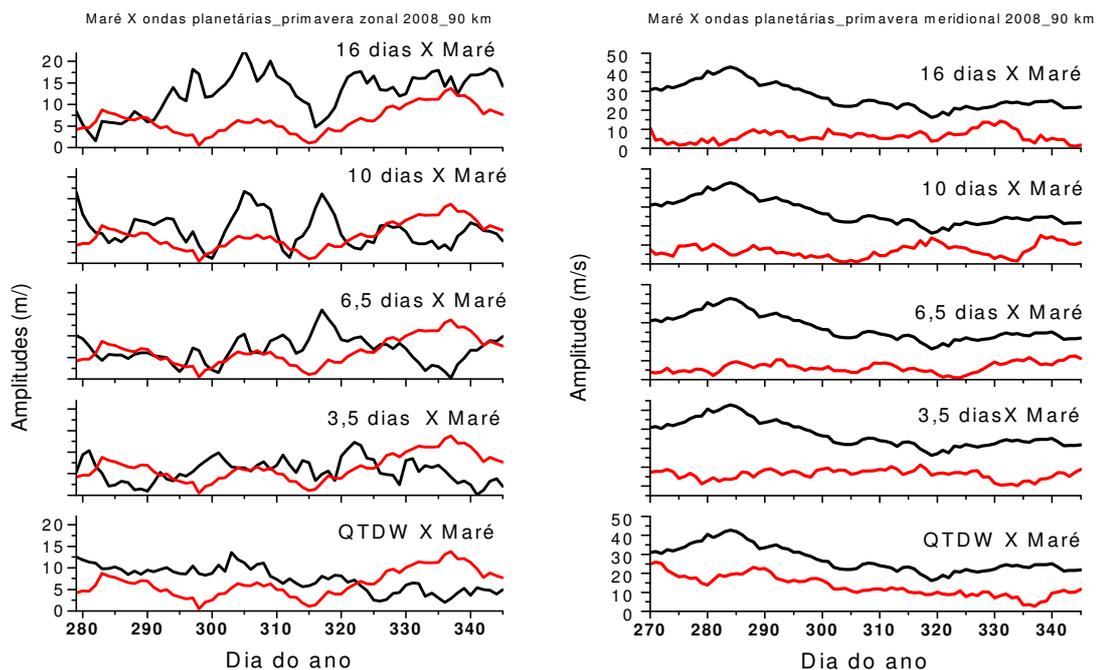


**Figura 72-** Comparação entre as amplitudes médias da maré diurna (preto) e Ondas Planetárias (vermelho) na primavera de 2005 em São João do Cariri-PB, em 90 km. (esquerda) zonal e (direita) meridional.

A Figura 73 representa os mesmos gráficos da Figura 72, mas para a primavera de 2007. Os comportamentos das amplitudes médias das oscilações na componente meridional, Figura 73 (à direita), são bastantes semelhantes aos comportamentos obtidos para o inverno de 2007. A amplitude média da maré é sempre maior que das Ondas Planetárias e a amplitude média da QTDW apresenta valores mais próximos da maré.

Na componente zonal, Figura 73 (à esquerda), observa-se que: (i) a amplitude da

QTDW, no intervalo entre os dias 270 e 325, é sempre menor que a da maré. A amplitude da QTDW, no intervalo entre os dias 330 e 340, aumenta enquanto que a amplitude da maré diminui; (ii) amplitude da oscilação de ~3-4 dias tem comportamento oposto ao da maré e seus valores de pico, entre os dias 280 e 300, alternam para acima e para baixo em relação à maré. No restante do intervalo o comportamento de ambas parece concordar; (iii) a amplitude da oscilação de 6,5 dias, a partir do dia 315 até o final da estação, apresenta comportamento em oposição ao da maré. Entre os dias 315 e 325 sua amplitude média é maior que a da maré e, no restante do intervalo, ela se apresenta abaixo; (iv) a oscilação de ~10 dias apresenta, pelos menos, cinco intervalos de intensificações. Nos intervalos entre os dias 285 e 310, o comportamento da amplitude média da maré acompanha o comportamento da amplitude da onda de ~10 dias, entretanto, a partir do dia 310, a maré se amplifica enquanto que a onda de ~10 dias sofre alterações aumentando e diminuído de valor. Mas, isto, parece não influenciar o comportamento da amplitude da maré; (v) A amplitude média da onda de ~16 dias, entre os dias 300 e 335, parece determinar o comportamento da amplitude média da maré diurna. Observa-se que, entre os dias 298 e 315, a amplitude da maré se intensifica e, neste mesmo intervalo, a amplitude da onda de 16 dias também se amplifica e exibe dois picos os quais não se revelam na amplitude da maré. Entre os dias 315 e 337 a maré volta a se amplificar e, neste intervalo, a amplitude da onda de 16 dias é bastante elevada.



**Figura 73-** Comparação entre as amplitudes médias da maré diurna (preta) e Ondas Planetárias (vermelha) na primavera de 2007, em São João do Cariri-PB, em 90 km. (esquerda) zonal e (direita) meridional.

Embora não conclusivos, pois tratam-se de resultados diagnósticos de relações qualitativas entre os comportamentos das amplitudes médias das oscilações estudadas, é possível, através das análises comparativas entre as amplitudes médias, sugerir que as Ondas Planetárias: QTDW, ~3-4 dias, ~5-7 dias e ~12-20 dias influenciam o comportamento da amplitude da maré diurna na componente zonal, enquanto que, na componente meridional as influências mais pronunciadas são da QTDW e da oscilação de ~5-7 dias.

Através das análises de Densidades Espectrais de Potência (PSD) para as primaveras de 2005, 2007 e 2008, na componente zonal, encontram-se picos para oscilações secundárias para periodicidades entre ~16 horas e ~36 horas. Sugere-se que estas oscilações são resultados da interação não linear ressonante entre a maré diurna e Ondas Planetárias com períodos entre 2-20 dias. Na PSD para a componente meridional encontra-se que, excetuando-se a primavera de 2005 em que as oscilações secundárias entre ~20 horas e ~36 horas estão presentes, a principal incidência de interação não linear ressonante ocorre com tríades envolvendo a maré diurna e duas QTDW. Isto se revela através das modificações das intensidades dos picos para estas oscilações, das modificações dos períodos da QTDW e pela não identificação de outras ondas secundárias. Isto sugere a presença da segunda QTDW propagando-se para leste semelhante ao que foi proposto e discutido por Palo *et al.* (2007).

Portanto, as análises dos ventos na primavera entre 2005 e 2008, em São João do Cariri-PB, apontam que as interações não lineares ressonantes da maré diurna com a QTDW, e com as Ondas Planetárias de ~5-7 dias e de ~12-20 dias são os eventos mais importantes na variabilidade da amplitude na maré diurna, em períodos de Ondas Planetárias, na região mesosférica de São João do Cariri-PB.

### **5.3. Observações de episódios de interação não linear ressonante entre modos de marés e Ondas Planetárias presentes nos ventos meteóricos de Cachoeira Paulista-SP.**

As discussões, apresentadas a seguir, são baseadas nos resultados das análises em wavelets, Espectro Global de Energia, Densidade de Potência Espectral (PSD) e análise Biespectral dos ventos meteóricos, obtidos em Cachoeira Paulista-SP em 90 km de altitude, para as quatro estações do ano entre 2004 e 2008. Como não é o objeto principal de investigação nesta Tese, detalhes gráficos e todas as análises realizadas com estes dados de ventos de Cachoeira Paulista-SP foram remetidas para o Anexo B. A idéia de incluir estes resultados tem a finalidade de relacioná-los com resultados obtidos por Tokumoto (2007),

observá-los quão próximos ou distantes os mesmos estão dos resultados obtidos para São João do Cariri-PB e tentar acrescentar aspectos novos com esta pesquisa.

As oscilações mais importantes identificadas através das análises em wavelets foram a maré diurna, maré semidiurna e Ondas Planetárias com períodos variando entre 2 e 20 dias. Interações não lineares ressonantes foram observadas envolvendo a maré diurna e as Ondas Planetárias. Na Tabela 12 apresenta-se um resumo geral das possíveis oscilações secundárias, resultantes de interações não lineares, encontradas em Cachoeira Paulista-SP, para todas as estações do ano no período de estudo e as possíveis ondas primárias que as produziram.

**Tabela 12.** Resumo dos episódios identificados, através da análise biespectral, como interação não linear ressonante entre modos de maré e Ondas Planetárias nos ventos meteorológicos para as estações do ano, em Cachoeira Paulista-SP, entre 2004 e 2008 para 90 km de altitude.

Ondas Primárias		Interação com a maré diurna ( $\omega_1 = 1$ )				Interação com a maré semidiurna ( $\omega_1 = 2$ )			
		Produtos da soma		Produtos da subtração		Produtos da soma		Produtos da subtração	
Freq. (cpd)	Período	$\omega_1 + \omega_2$ (cpd)	Período	$\omega_1 - \omega_2$ (cpd)	Período	$\omega_1 + \omega_2$ (cpd)	Período	$\omega_1 - \omega_2$ (cpd)	Período
2	12h	3,0	8 h	1,0	~24h	-	-	-	-
1	24h	2,0	12h	-	-	3,0	~8h	-	-
0,5	48h	~1,5	~16h	~0,5	~48h	-	-	1,5	~16h
~0,3	~3 d	~1,3	~18,6h	~0,7	~34h	-	-	1,71	~14h
~0,2	~5 d	~1,2	~20h	~0,8	~30h	-	-	1,8	~13,3h
~0,15	~6,5 d	~1,15	~21h	~0,85	~28h	-	-	-	-
~0,1	~10 d	~1,1	~22h	~0,9	~27h	2,1	~11,5h	-	-
~0,06	~16 d	~1,06	~23h	~0,94	~25h	-	-	-	-

Legenda: cpd = ciclos por dia; d = dias e h = horas

### 5.3.1 Discussões dos resultados para os Verões entre 2004 e 2008

Nas Tabelas 13 e 14, apresenta-se o resumo dos episódios de interação não linear ressonante envolvendo os modos de marés diurna, semidiurna e Ondas Planetárias que foram detectados através de análise biespectral para os verões de 2004 a 2008, em Cachoeira Paulista-SP, em 90 km de altitude. Através da Tabela 13, verifica-se, para o verão 2004-2005 (denominado de verão 2005), na componente zonal, tem-se interações da maré diurna com a maré semidiurna, QTDW, ~3-4 dias, ~5-7 dias e de ~12-20 dias. Excetuando-se a maré semidiurna, interações não lineares ressonantes da maré diurna com QTDW, ~3-4 dias, ~5-7 dias e ~12-20 dias foram detectadas nos verões de 2005-2006 (verão 2006) e 2007-2008 (verão 2008). Os dados do verão de 2006-2007 (verão 2007) não estão disponíveis.

Presença de energia espectral intensas para as periodicidades entre 1 e 20 dias, na componente zonal, foram detectadas através da análise em wavelets e, também, alguns episódios de energia espectral para a maré semidiurna. Para a componente meridional,

episódios de interação não linear da maré diurna com a QTDW são os eventos detectados mais frequentes em todos os verões. Além destes episódios, detecta-se também interação da maré diurna com periodicidades de ~3-4 dias em 2006 e 2008 e com ~12-20 dias em 2005 e 2008. Através da Tabela 14, observa-se que, para o verão 2005, na componente zonal, tem-se interações da maré semidiurna com as periodicidades da maré diurna, QTDW, ~3-4 dias, ~5-7 dias e de ~12-20 dias, mas são eventos isolados.

**Tabela 13.** Episódios identificados através da análise biespectral como interação não linear ressonante entre a maré diurna e outras ondas nos ventos meteorológicos em 90 km para os verões de Cachoeira Paulista – SP.

	Zonal						Meridional					
	Período das outras ondas (dias)						Período das outras ondas (dias)					
	0,5	2	3-4	5-7	10	12-20	0,5	2	3-4	5-7	10	12-20
2005	Sim	Sim	Sim	Sim	-	Sim	Sim	Sim	-	Sim	-	Sim
2006	-	Sim	Sim	Sim	-	Sim	-	Sim	Sim	-	Sim	-
2007	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2008	-	Sim	Sim	Sim	-	Sim	-	Sim	Sim	-	-	Sim

**Tabela 14.** Episódios identificados através da análise biespectral como interação não linear ressonante entre a maré semidiurna e outras ondas nos ventos meteorológicos em 90 km para os verões de Cachoeira Paulista – SP.

	Zonal						Meridional					
	Período das outras ondas (dias)						Período das outras ondas (dias)					
	1	2	3-4	5-7	10	12-20	1	2	3-4	5-7	10	12-20
2005	Sim	Sim	-	Sim	-	-	-	Sim	-	-	-	-
2006	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2007	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2008	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

As análises de Densidade de Potência Espectral (PSD) também apontam para existências das interações apresentadas nas Tabelas 12, 13 e 14. Através destas análises foram identificados picos para oscilações secundárias nas periodicidades entre ~16 horas e ~32 horas. Os resultados das análises dos dados de ventos meteorológicos de Cachoeira Paulista-PB, entre os anos de 2004 e 2008, para a estação de verão em 90 km de altitude, permitem colocar os seguintes aspectos:

(i) Através dos espectros em wavelets, os núcleos para a QTDW se mostraram bastante intensos, em ambas as componentes, em todos os janeiros investigados. Ela é mais intensa na componente meridional que na zonal. A maré diurna é um evento mais intenso e regular a partir do mês de fevereiro até o final do verão. Em ambas componentes, mas, de forma mais intensa, na componente zonal, detectam-se periodicidades de ~27 dias, periodicidades entre ~12-20 dias, ~8-10 dias e de ~5-7 dias. É possível se observar núcleos referentes à oscilação de ~3-4 dias e ainda a presença menos intensa da maré semidiurna.

(ii) Através dos resultados das análises biespectrais e das PSD encontra-se que a interação não linear ressonante entre a maré diurna e a QDTW é o evento de maior ocorrência e mais importante para a variabilidade da amplitude da maré em ambas as componentes dos ventos meteorológicos do verão. Eventos de interação não linear envolvendo as marés, diurna e semidiurna, resultando na maré terdiurna não se revelaram regulares e frequentes e, quando detectados, os picos para maré terdiurna, sempre se encontram abaixo do nível de significância de 95%. A exceção acontece para os eventos ocorridos no verão de 2004-2005 (verão 2005) em que o pico da maré terdiurna aparece acima, mas muito próximo ao limite do nível de significância.

(iii) Interações envolvendo marés e periodicidades em torno de ~3-4 dias, ~5-7 dias, ~8-10 dias e ~12-20 dias foram detectados. Estas interações produzem, de forma geral, ondas secundárias com periodicidades entre ~18 horas e ~32 horas. Destaque para a oscilação de ~20 horas, possivelmente resultante da interação entre a maré diurna e a onda de ~5-7 dias que foram detectadas em todos os verões estudados. Outras interações envolvendo as demais periodicidades foram detectadas, mas não se apresentaram com regularidade. Eventos esporádicos de interações não lineares envolvendo ondas secundárias e produzindo ondas terciárias foram também detectados, mas não serão apreciadas aqui.

### 5.3.2 Discussões dos resultados para os outonos entre 2005 e 2008

Nas Tabelas 15 e 16 apresenta-se um resumo das possíveis interações não lineares entre maré diurna e semidiurna e Ondas Planetárias identificadas para os outonos em Cachoeira Paulista-SP. Os resultados das análises nos dados de ventos meteorológicos desta localidade, entre os anos de 2005 e 2008, em 90 km de altitude, permitem colocar os seguintes aspectos:

(i) Através dos espectros em wavelets, os núcleos para a QTDW se mostram pouco intensos, em ambas as componentes, sendo que na componente zonal esta periodicidade é mais frequente e mais significativa que na meridional em todos os outonos investigados. A maré diurna é um evento mais intenso e regular a partir do mês de março (início do outono) e vai até meados do mês de maio, principalmente na componente meridional. Na componente zonal, foram detectadas densidades de energias espectrais para periodicidades de ~27 dias, ~12-20 dias, ~8-10 dias e de ~5-7 dias. É possível se observar alguns núcleos referentes à oscilação de ~3-4 dias e ainda a presença menos intensa da maré semidiurna.

(ii) Através dos resultados das análises biespectrais e das PSD encontra-se que a interação não linear ressonante entre a maré diurna e a QTDW é um evento que ocorre, mas, não apresentam uma regularidade. Eventos de interação não linear envolvendo as marés, diurna e semidiurna, resultando na maré terdiurna também foram encontrados e são mais regulares e freqüentes nesta estação que os verificados para os verões. Também foram identificados eventos de interações não lineares ressonantes, dos modos de marés com Ondas Planetárias de períodos de ~3-4 dias, ~6,5 dias e ~10 dias. Quando os picos para maré semidiurna são detectados, as intensidades deles estão próximas do nível de significância estabelecido. Estes últimos juntamente com os eventos de interações não lineares envolvendo marés e QTDW se constituem nos eventos responsáveis pela variabilidade das amplitudes da maré diurna nos outonos de Cachoeira Paulista-SP entre 2005 e 2008 na altitude de 90 km.

**Tabela 15.** Episódios identificados através da análise biespectral como interação não linear ressonante entre a maré diurna e outras ondas nos ventos meteorológicos em 90 km para os outonos de Cachoeira Paulista – SP.

	Zonal						Meridional					
	Período das outras ondas (dias)						Período das outras ondas (dias)					
	0,5	2	3-4	5-7	10	12-20	0,5	2	3-4	5-7	10	12-20
2005	Sim	-	-	-	-	-	Sim	-	-	Sim	-	-
2006	-	-	-	-	Sim	-	Sim	-	Sim		Sim	-
2007	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2008	-	Sim	Sim	-	-	-	Sim	-	-	-	-	-

**Tabela 16.** Episódios identificados através da análise biespectral como interação não linear ressonante entre a maré semidiurna e outras ondas nos ventos meteorológicos em 90 km para os outonos de Cachoeira Paulista – SP.

	Zonal						Meridional					
	Período das outras ondas (dias)						Período das outras ondas (dias)					
	1	2	3-4	5-7	10	12-20	1	2	3-4	5-7	10	12-20
2005	Sim	Sim	-	Sim	-	-	Sim	Sim	-	Sim	-	-
2006	-	-	-	-	Sim		Sim	-	-	-	-	-
2007	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2008	-	-	-	-	-	-	Sim	-	-	-	-	-

### 5.3.3 Discussões dos resultados para os Invernos entre 2005 e 2008

As análises em wavelets dos dados de ventos para as primaveras entre 2005 e 2008, em Cachoeira Paulista-SP, revelaram a presença de energia espectral intensa para periodicidades entre 1 e 20 dias, na componente zonal e, também, alguns episódios de energia espectral para a maré semidiurna. Através das Tabelas 17 e 18, que mostram o resumo dos eventos detectados de interações não lineares ressonantes entre maré diurna com a maré semidiurna e com Ondas Planetárias, verifica-se que, na componente zonal, tem-se interações da maré diurna com as periodicidades da maré semidiurna, QTDW, ~3-4 dias, ~5-7 dias e de

~12-20 dias. Excetuando-se interações não lineares ressonantes com a onda de ~8-10 horas, observa-se que as interações da maré diurna com as periodicidades da QTDW, ~3-4 dias, ~5-7 dias e de ~12-20 dias foram detectadas em praticamente todos os invernos estudados. Através da Tabela 18, verifica-se que, para todos os invernos, a maré semidiurna participa, na componente zonal, de interação não linear ressonante com a maré diurna. Isto fica evidente com a detecção, através da PSD, de picos para a maré terdiurna, concordando com a proposta de que esta oscilação pode ser produzida pela interação não linear entre esta duas oscilações.

**Tabela 17.** Episódios identificados através da análise biespectral como interação não linear ressonante entre a maré diurna e outras ondas nos ventos meteorológicos em 90 km para os invernos de Cachoeira Paulista – SP.

	Zonal						Meridional					
	Período das outras ondas (dias)						Período das outras ondas (dias)					
	0.5	2	3-4	5-7	10	12-20	0.5	2	3-4	5-7	10	12-20
2005	Sim	Sim	Sim	-	-	Sim	-	Sim	Sim	Sim	-	Sim
2006	-	Sim	Sim	-	-	Sim	-	Sim	-	Sim	-	Sim
2007	Sim	Sim	-	Sim	-	Sim	Sim	-	-	-	-	Sim
2008	Sim	Sim	-	Sim	-	Sim	-	Sim	Sim	Sim	-	-

**Tabela 18.** Episódios identificados através da análise biespectral como interação não linear ressonante entre a maré semidiurna e outras ondas nos ventos meteorológicos em 90 km para os invernos de Cachoeira Paulista – SP.

	Zonal						Meridional					
	Período das outras ondas (dias)						Período das outras ondas (dias)					
	1	2	3-4	5-7	10	12-20	1	2	3-4	5-7	10	12-20
2005	Sim	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2006	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2007	Sim	-	-	-	-	-	Sim	-	-	-	-	-
2008	Sim	-	-	-	-	-						

Os resultados obtidos de interação não linear entre os modos de marés diurna e semidiurna na componente meridional dos ventos, tanto para os outonos como para os invernos em Cachoeira Paulista-SP, parecem concordar com os resultados obtidos por Tokumoto (2007) ao concluir que: as interações não lineares entre a maré diurna e a semidiurna, quando ocorrem, produzem duas ondas secundárias: uma maré diurna e uma maré terdiurna. Esta última aparece muito fraca, porém, mostra uma distribuição sazonal nas amplitudes características, com picos próximos aos equinócios.

#### 5.3.4. Discussões dos resultados para as Primaveras entre 2005 e 2008

Os resultados das interações não lineares ressonantes durante as primaveras entre os anos de 2005 e 2008 estão resumidos na Tabela 19. A partir destes resultados, observa-se que as interações não lineares ressonantes da maré diurna com a maré semidiurna não aparecem.

Na componente zonal, as interações da maré com QTDW com as periodicidades de ~5-7 dias e de ~12-20 dias, são os processos que dominam em todas as primaveras estudadas. As demais interações são eventos isolados. Na componente meridional, a maré diurna interage com as periodicidades maré semidiurna, QTDW e ~5-7 dias, nas primaveras de 2005 e de 2007. As outras interações são também episódios isolados. Presença de energia espectral intensa para periodicidades entre ~5 e 10 dias, na componente zonal, foram detectadas através da análise em wavelets e, também, energia espectral para a maré diurna. Para a QTDW se identifica energia espectral em ambas as componentes. Através da PSD identificam-se picos para a maré terdiurna. As análises biespectrais para as primaveras entre 2005 e 2008 mostram que as interações não lineares entre a maré diurna e a QTDW é o evento mais regular de interação não linear em ambas as componentes dos ventos analisados.

**Tabela 19.** Episódios identificados através da análise biespectral como interação não linear ressonante entre a maré diurna e outras ondas nos ventos meteorológicos em 90 km para as primaveras de Cachoeira Paulista – SP.

	Zonal						Meridional					
	Período das outras ondas (dias)						Período das outras ondas (dias)					
	0,5	2	3-4	5-7	10	12-20	0,5	2	3-4	5-7	10	12-20
2005	-	Sim	-	-	-	Sim	Sim	Sim	-	Sim	Sim	-
2006	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2007	-	Sim	Sim	Sim	-	Sim	-	Sim	Sim	-	-	-
2008	Sim	Sim	-	Sim	Sim	-	Sim	Sim	-	Sim	-	-

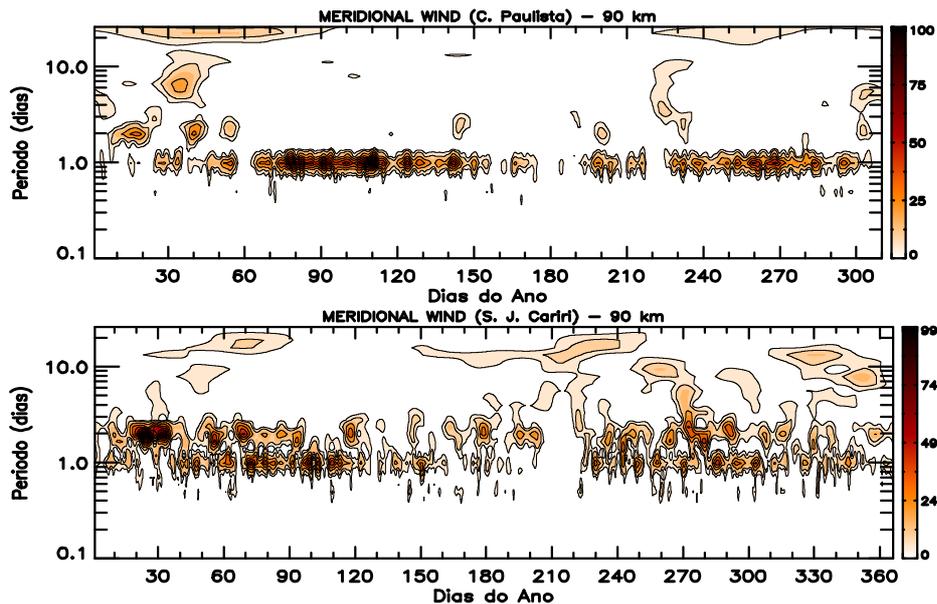
#### 5.4. Evidências de interação não linear entre a maré diurna e a QTDW em Cachoeira Paulista-SP e São João do Cariri-PB: Um estudo de caso

Como parte das investigações, da variabilidade da amplitude da maré diurna, realizou-se um estudo de caso sobre a interação não linear ressonante entre a maré diurna e a QTDW. Para esta investigação usou-se a série de dados de ventos meteorológicos, em 90 km de altitude, de São João do Cariri-PB e de Cachoeira Paulista-SP para o ano de 2008. Para avaliar a distribuição temporal do espectro de frequências, foi empregada a transformada em wavelets de Morlet. As amplitudes e as estruturas de fases referentes a estas oscilações foram obtidas através de análise harmônica. Os dados de ventos foram também submetidos a uma análise de Lomb-Scargle. Através da análise biespectral foram identificados os possíveis eventos de interação não linear ressonante entre a maré atmosférica diurna e a QTDW.

Analisando-se os resultados dos espectros em wavelets da Figura 74 para ambas as localidades, observa-se a presença de energia espectral referente à maré diurna no intervalo entre os dias 180 e 220 de 2008. Também está presente energia espectral para QTDW. Em

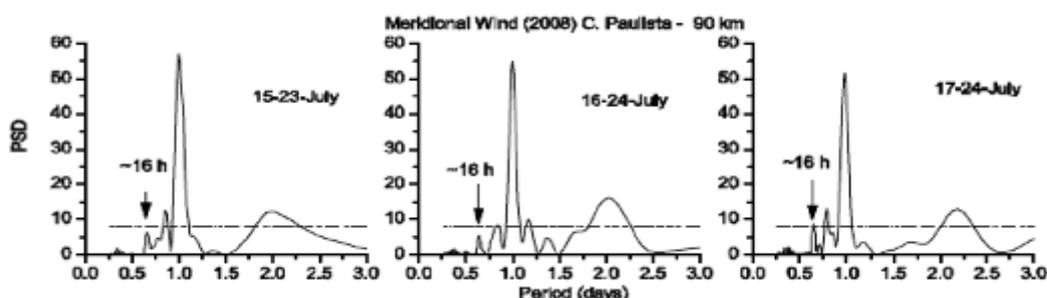
Cachoeira Paulista-SP, Figura 74 (topo), núcleos bem definidos para a QTDW são observados em torno dos dias 15, 40, 55 150 e 200. Ainda observam-se outras oscilações com períodos maiores e menores que o da maré diurna e da QTDW. No intervalo entre os dias 23 e 48 observa-se uma forte oscilação com período em torno de 6,5 dias. Em torno do dia 225 encontra-se um núcleo correspondendo à oscilação com período de  $\sim 4$  dias. Na Figura 74 (base) tem-se o espectro em wavelets para a componente meridional dos ventos de São João do Cariri-PB. Observa-se a presença da QTDW ao longo de toda série e, mais significativamente, entre os dias 10 e 90 e entre os dias 220 e 300.

Nos dois espectros em wavelets observa-se, com energia bastante intensa, a presença da maré diurna durante praticamente todo o ano de 2008. Por outro lado, observa-se também um gap em que a maré não aparece significativa. Este gap, em Cachoeira Paulista, encontra-se entre os dias 180 e 220 e, em S. J. Cariri, entre os dias 180 e 225. Esta ausência da maré nestes intervalos motivou a realização deste estudo de caso. Para isso trabalhou-se com um segmento da série de dados que corresponde ao intervalo de junho a julho de 2008. Os resultados mais significativos destas análises aconteceram para a componente meridional dos ventos, principalmente, de Cachoeira Paulista. Assim, optou-se por priorizar a apresentação e a discussão dos resultados na componente meridional para Cachoeira Paulista.



**Figura 74** - Transformada em wavelets do vento meridional para Cachoeira Paulista-SP (topo) e S. J. do Cariri-PB (base) em 2008, na altitude de 90 km. Destaca-se a presença da maré diurna e da onda de quase dois dias no intervalo entre os dias 180 e 220 em 90 km de altura.

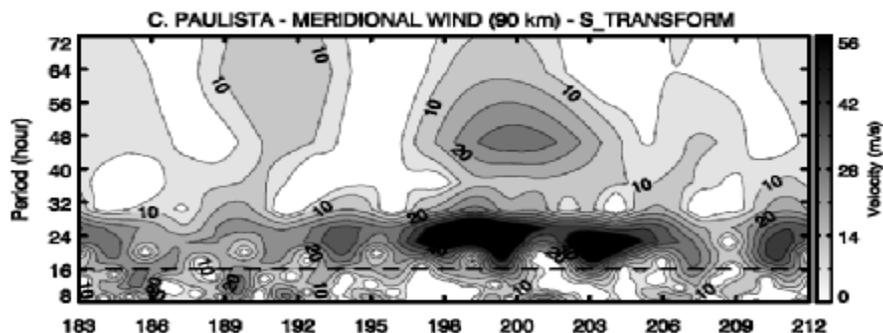
A presença dos núcleos de QTDW em torno do intervalo de estudo incentiva a busca de detalhes sobre as frequências das oscilações presentes nos ventos. Assim, os dados foram submetidos a uma análise de Lomb-Scargle. O resultado da PSD obtida para os ventos de Cachoeira Paulista, Figura 75, mostra picos significativos para a maré diurna, para QTDW e para ~16 horas entre os dias 15 e 24 de julho.



**Figura 75** - Densidade de Potência Espectral (Power Spectral Density - PSD) para C. Paulista-SP (julho de 2008). Destaque para a presença de picos referentes a maré diurna (DT), onda de quase 2 dias e uma oscilação de ~16 horas.

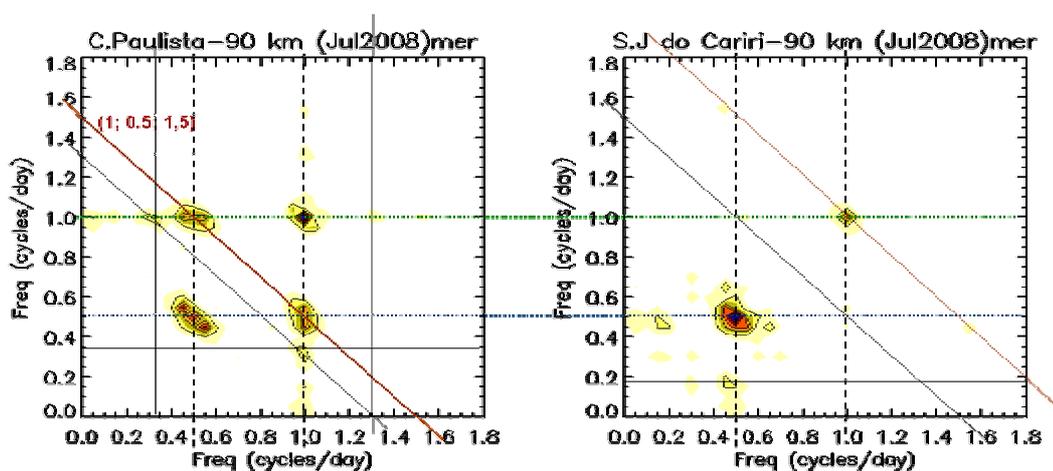
Através dos cálculos da interação não linear da maré diurna com QTDW, utilizando-se a equação (8), obtém-se uma frequência secundária que, devido à soma das frequências das ondas primárias, resulta numa oscilação cujo período corresponde a uma onda de ~16 horas.

Para refinar a análise submeteu-se os dados de vento meridional de Cachoeira Paulista à transformada S, Figura 76. Neste espectro, tem-se nas ordenadas as periodicidades em horas, nas abscissas tem-se os dias do ano e uma escala de cinza para indicar a intensidade da periodicidade. Através dele é possível se observar, além da presença de núcleos da maré diurna e da QTDW, detalhes da oscilação de ~16 horas detectada na PSD. Nota-se um núcleo de 16 horas bem intenso no intervalo entre os dias 198 e 202.



**Figura 76** - Transformada S do vento Meridional para C. Paulista-SP no intervalo de junho – julho de 2008. Observa-se a presença intensa de oscilações com períodos de ~16 horas

Os resultados da análise biespectral, Figura 77, mostram significativos núcleos referentes a interação não linear entre a maré diurna e a QTDW. Observa-se que a intersecção entre a linha referente a maré diurna (1,0 ciclo/dia) com a QTDW (0,5 ciclo/dia) gera dois núcleos mais intensos no biespectro para Cachoeira Paulista-SP. Ao traçar a reta que une o centro destes dois núcleos, encontra-se, com o prolongamento da reta, o ponto que indica uma oscilação de ~16 horas (1,5 ciclo/dia). Para São João do Cariri-PB, esses núcleos são mais tênues, mas é possível também observá-los. Assim, como indicado no biespectro para Cachoeira Paulista, encontra-se a tríade ressonante (1; 0,5; 1,5), concordando com os indícios de interação não linear ressonante entre estas ondas como, por exemplo, os encontrados nos estudos de Spizzichino (1969), Teitelbaum e Vial (1991) e Pancheva (2006).



**Figura 77** - Resultado da análise biespectral para o vento meridional em julho de 2008, na altura de 90 km, em Cachoeira Paulista-SP (esquerda) e São João do Cariri-PB (direita).

A amplitude da maré diurna revelou uma variabilidade periódica associada com a ocorrência de Ondas Planetárias. Evidências de interação não linear entre a maré diurna e QTDW foram observadas no mês de julho de 2008 produzindo uma onda de ~16 horas, com presença mais intensa na componente meridional do vento meteorológico de Cachoeira Paulista-SP e de menor intensidade em São João do Cariri-PB.

Através da análise da Densidade Espectral de Potência (PSD) entre os dias 15 e 24 em julho de 2008, observa-se a presença de picos para uma oscilação de ~16 horas, que sugere ser devido a interação não linear entre a maré diurna e QTDW. A análise biespectral mostra que existem núcleos decorrentes da interação não linear ressonante devido ao tripleto: maré diurna, QTDW e a onda de ~16 horas (1; 0,5; 1,5). Isto reforça a interpretação de que a maré e a QTDW interagem não linearmente, durante o intervalo de tempo usado para as análises neste estudo, na região mesosférica de Cachoeira Paulista-SP e São João do Cariri-PB.

### 5.5. Dinâmica da MLT equatorial durante SSW de 2005-2006

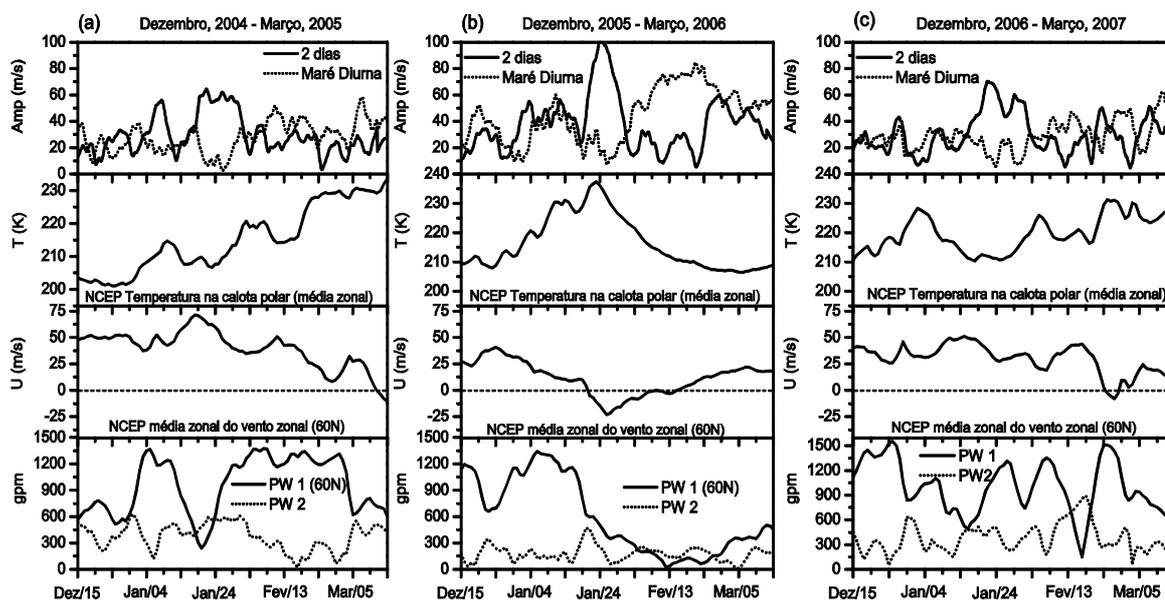
Resultados das análises dos espectros dos ventos mesosféricos obtidos sobre São João do Cariri-PB revelaram que a região MLT apresentou comportamento dinâmico distinto durante o verão austral de 2005-2006. Chama a atenção o fato de as componentes, diurna e semidiurna, das Marés Atmosféricas e da QTDW apresentarem amplitudes bastante elevadas no verão de 2006, principalmente entre janeiro e março. Durante o mesmo período foi observado um dos mais intensos eventos de Aquecimento Abrupto da Estratosfera (SSW) polar do Hemisfério Norte. Para investigar se as amplitudes mais elevadas das marés e da QTDW, observadas em janeiro-março de 2006, estão associadas com o evento de SSW intenso (major), parâmetros estratosféricos representativos da região de altas latitudes do Hemisfério Norte foram analisadas juntamente com os dados do radar meteorológico obtidos em S. João do Cariri-PB.

Para estudar a evolução da estrutura vertical das perturbações, as séries de ventos foram submetidas à análise harmônica supondo a presença de oscilações, nos ventos, com períodos semidiurno, diurno e de 2 dias. As análises foram processadas no modo de janela móvel com tamanho de 4 dias e passo de 1 hora, e os resultados foram suavizados mediante o emprego de média móvel de 24 horas.

Na Figura 78 estão representados os gráficos das amplitudes da maré diurna e da QTDW obtidas para a componente meridional dos ventos meteorológicos sobre Cariri na altitude de 90 km (primeiro gráfico de cima para baixo), as temperaturas do NCEP (média zonal) para latitudes na calota polar (segundo gráfico), como também a média zonal do vento zonal (terceiro gráfico) e as amplitudes para a altura geopotencial para os números de onda zonal 1 (PW1) e 2 (PW2) para a latitude de 60°N (gráfico inferior), no nível de pressão de 10 hPa, referente ao período de dezembro-março de 2004-2005 (Figura 78a), 2005-2006 (Figura 78b) e 2006-2007 (Figura 78c), respectivamente.

Analisando a Figura 78a percebe-se que a evolução temporal da amplitude da QTDW na componente meridional dos ventos, revela dois máximos em janeiro de 2005, em que a amplitude do segundo pico alcança amplitudes próximas de 60 m/s. A maré diurna torna-se mais intensa após a amplitude da QTDW decair no segundo pico, e alcança valores próximos a 50 m/s. Para o mesmo período, os parâmetros estratosféricos da região da calota polar do hemisfério norte apresentaram comportamento compatível com um SSW fraco (menor), em que a temperatura zonal média no nível de pressão de 10 hPa, para latitudes entre 60°N e

90°N, manifestou eventos moderados de Aquecimento Abrupto da Estratosfera, o que foi seguido por uma diminuição da velocidade do escoamento oeste-leste do vento zonal médio em 60°N. As amplitudes para a altura geopotencial referente ao número de onda zonal 1 da componente de Fourier em 10 hPa e 60°N indicam dois episódios de intensificação, em que o primeiro tem início no final de dezembro de 2004 e o segundo se inicia após 20 de janeiro, se estendendo até aproximadamente o dia 5 de março.



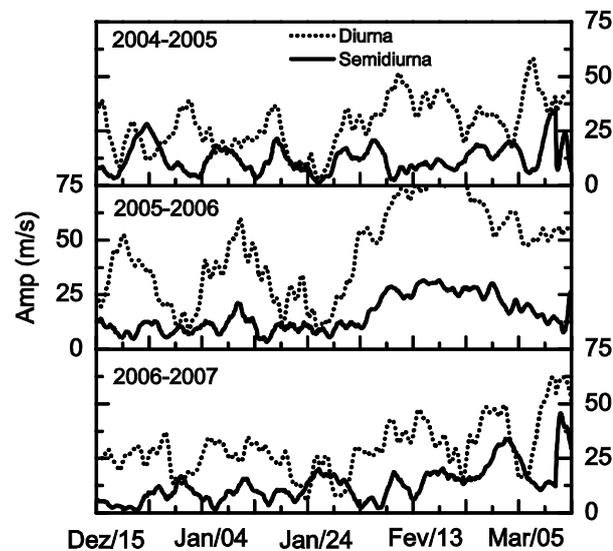
**Figura 78** - Amplitudes para a maré diurna e onda QTDW nos ventos da componente meridional na altitude de 90 km observados em Cariri (primeiro gráfico a partir do topo), temperatura zonal média (NCEP) na calota polar - na direção do pólo a partir de 60°N - (segundo gráfico) e média zonal do vento zonal (terceiro gráfico), e amplitudes das ondas 1-2 na altura do geopotencial em 60°N, no nível de pressão de 10 hPa, para (a) 2004-2005, (b) 2005-2006 e (c) 2006-2007.

Para o verão austral de 2005-2006, as amplitudes referentes à maré diurna e a QTDW alcançaram valores bem maiores do que os usualmente observados em outros períodos. As oscilações de QTDW na componente zonal também foram intensas no mesmo período, porém as amplitudes alcançaram valores inferiores aos da componente do vento meridional. As amplitudes da QTDW alcançaram valores de 100 m/s em torno do dia 27 de janeiro e a amplificação durou até o dia 3 de fevereiro, enquanto que as amplitudes da maré diurna apresentaram uma taxa de crescimento de  $3,4 \text{ ms}^{-1}/\text{dia}$ , logo após a QTDW maximizar, e assumiram valores superiores a 80 m/s em torno do dia 20 de fevereiro de 2006. Durante o mesmo período, a Estratosfera da calota polar do hemisfério norte apresentou comportamento compatível com aquecimento abrupto intenso, em que a temperatura zonal média no nível de

pressão de 10 hPa alcançou valores próximos de 235 K em torno do dia 23 de janeiro, justamente quando o escoamento zonal médio inverteu sua direção oeste-leste para leste-oeste, característico de SSW intenso (major). As amplitudes para a altura geopotencial para o número de onda zonal 1 em 10 hPa e 60°N foram intensas até 16 de janeiro. Após o evento de SSW, ocorreu um rápido decréscimo nos valores de amplitudes de PW1. Ao analisar a evolução da estratopausa durante o SSW intenso (major) em 2006, Manney *et al.* (2008) verificaram que o vórtice polar estratosférico quebrou por volta do dia 16 de janeiro.

O comportamento da dinâmica da região MLT equatorial durante o período entre dezembro de 2006 e março de 2007 foi caracterizado por amplitudes da maré diurna e da QTDW que alcançaram a mesma magnitude que aquelas observadas durante o verão austral de 2004-2005. As amplitudes da QTDW começam a crescer após 13 de janeiro, chegando a alcançar 65 m/s por volta do dia 24 e passa a decrescer após 1° de fevereiro. A maré diurna experimenta amplificações após o evento principal da QTDW, e assume valores máximos de amplitude próximos de 50 m/s. Antes de 20 de fevereiro, os parâmetros estratosféricos apresentaram características de eventos de SSW fraco (minor), como pode ser visto na Figura 78c. Contudo, os campos estratosféricos revelam a ocorrência de um evento curto de aquecimento, no qual o escoamento zonal médio inverteu sua direção oeste-leste para leste-oeste em torno do dia 24 de fevereiro.

Na Figura 79 são representadas as amplitudes da maré semidiurna na componente meridional dos ventos em 90 km de altitude obtidos sobre São João do Cariri, durante os três períodos de verão considerados neste estudo. A partir da figura, é possível verificar variações no tempo nas amplitudes da maré semidiurna, as quais alcançam valores máximos superiores a 30 m/s. A variabilidade da maré semidiurna durante o verão austral de 2004-2005 apresenta modulação em periodicidade de quase 13 dias na amplitude entre meados de dezembro e início de fevereiro. No verão seguinte (2005-2006) é possível observar que as amplitudes da maré semidiurna apresentam um comportamento distinto, com intensificação centrada em 10 de janeiro, porém, a partir de 3 de fevereiro, as amplitudes crescem numa taxa de 3,5 ms<sup>-1</sup>/dia assumindo valores de aproximadamente 32 m/s. Após 15 de fevereiro as amplitudes decrescem numa taxa de 0,8 ms<sup>-1</sup>/dia. Examinando os comportamentos das marés, diurna e semidiurna, pode-se verificar que as variações no tempo de ambas as componentes, após o pico de amplitude da QTDW, apresentam evolução similares nas amplitudes. Durante o verão austral de 2006-2007, as variações nas amplitudes da maré semidiurna indicam modulação de aproximadamente 14 dias entre o final de dezembro e início de março.



**Figura 79** – Amplitudes da maré semidiurna na componente meridional dos ventos na altitude de 90 km obtidos em Cariri durante 2004-2005 (gráfico do topo), 2005-2006 (gráfico do meio) e 2006-2007 (gráfico inferior). As amplitudes da maré diurna (linha pontilhada) também estão representadas para referência.

Analisando-se os resultados obtidos para os três períodos de verão austral investigados, percebe-se que a dinâmica de marés e da QTDW na região MLT de São João do Cariri PB, apresenta comportamento distinto durante janeiro-fevereiro de 2006, quando dinâmica da Estratosfera na calota polar do Hemisfério Norte foi caracterizada pela ocorrência de um evento SSW intenso (major). Na ocasião, as amplitudes da QTDW na região MLT equatorial (aproximadamente 90 km de altitude) aumentaram seguindo o aumento de temperatura da Estratosfera da calota polar do Hemisfério Norte, em conjunto com a redução do escoamento oeste-leste em 10 hPa, cuja reversão para direção leste-oeste ocorreu justamente quando as amplitudes da QTDW alcançaram valores máximos. Durante esse período, os valores máximos de amplitude da QTDW foram cerca de 55% maiores do que os valores estimados em janeiro-fevereiro de 2005 e de 2007. As amplitudes das marés diurna e semidiurna experimentaram intensificação justamente após o início da fase de enfraquecimento da QTDW. As amplitudes das componentes diurna e semidiurna das marés alcançaram máximos de 80 m/s e de 30 m/s, respectivamente, cerca de 25 dias após a QTDW atingir seu pico. Em janeiro-fevereiro de 2006 a maré diurna foi cerca de 50% mais intensa do que no mesmo período de 2005 e de 2007. Estudos da dinâmica da MLT sobre Tirunelveli (8,7°N) apontam que as amplitudes da maré diurna e da QTDW nos ventos obtidos através de radar MF entre janeiro-março de 1995 foram cerca de duas vezes mais intensas do que as observadas em janeiro-março de 1996 (Gurubaran et al., 2001). Aqui, chama-se a atenção

para uma possível relação entre evento de SSW intenso (major) e atividade mais intensa das ondas, maré e QTDW, observada em janeiro-março de 1995, fato não mencionado pelos autores. Durante o período de janeiro-março de 2005 foi observado evento de aquecimento Abrupto intenso na Estratosfera da calota polar, porém em 1996 não foi verificado evento de SSW intenso, o que reforça a interpretação de uma associação entre a ocorrência de SSW intenso e a intensificação não usual das ondas de marés e de QTDW na região MLT equatorial durante o verão austral de 2005-2006.

## 6 - CONCLUSÕES

Nesta Tese foram utilizadas as séries de dados de ventos meteorológicos, de São João do Cariri-PB e de Cachoeira Paulista-SP, obtidas entre os anos de 2004 e 2008. Estas séries foram divididas em séries correspondentes a cada estação do ano. As investigações foram realizadas através de análises espectrais em wavelets, análises de dados obtidos através de Filtros Passa-Banda, dos perfis de amplitude e fase das ondas obtidas por Análise Harmônica, da Densidade de Potência Espectral (PSD) e da Análise Biespectral.

Estas análises permitiram identificar a presença intensa de densidades de energia nas periodicidades de maré diurna, maré semidiurna e nas bandas de Ondas Planetárias (QTDW, ~3-4 dias, ~5-7 dias, ~8-10 dias e ~12-20 dias). As análises de perfis de amplitude e fase permitiram identificar as altitudes em que a amplitude da maré diurna atinge seus valores máximos e, através dos perfis de fases, foram calculados os comprimentos de onda vertical para o modo de maré diurna e para a QTDW, os quais concordaram com os valores encontrados na literatura.

As análises em wavelets e as PSD, permitiram localizar e identificar os picos, das oscilações primárias e secundárias, com níveis de significância acima de 95%, como também os episódios de anticorrelação entre a amplitude da maré diurna e a amplitude da QTDW. Foram observadas alterações no período da QTDW quando os episódios de anticorrelação de amplitudes entre ela e a maré existiam. Através dos biespectros, se observou que existem interações não lineares ressonantes entre a maré diurna e as periodicidades das Ondas Planetárias. Estas interações não lineares provocam a modulação da amplitude da maré atmosférica pelas Ondas Planetárias e, como consequência deste processo, são produzidas duas bandas de frequências, uma correspondente à soma das frequências da maré e das Ondas Planetárias e a outra correspondente a subtração destas frequências. Estas bandas resultantes correspondem às componentes espectrais que não são previstas pela teoria clássica que explica a origem das ondas atmosféricas.

As periodicidades secundárias mais importantes observadas, resultantes do processo de interação não linear ressonante entre modos de marés e as Ondas Planetárias com períodos entre ~2-20 dias, possuem períodos que vão desde ~8 horas até períodos de ~36 horas. Os biespectros obtidos mostraram, além das interações envolvendo a maré e as ondas primárias, interações não lineares ressonantes envolvendo a maré atmosférica e ondas secundárias, resultando em ondas terciárias. Estas últimas não foram analisadas nesta pesquisa. As

interações não lineares entre as Marés Atmosféricas e as Ondas Planetárias podem gerar uma cascata de ondas secundárias e terciárias (ex. Palo *et al.*, 1999). Os episódios, de interação não linear ressonante, envolvendo modos de marés e ondas secundárias, em São João do Cariri-PB e Cachoeira Paulista-SP, que foram identificados através das análises biespectrais, para efeitos de registro estão resumidos nas tabelas 20 e 21 a seguir.

**Tabela 20.** Episódios de interação não linear envolvendo modos de marés e ondas secundárias, em São João do Cariri-PB, nos ventos meteóricos em 90 km.

	Verão		Outono	
	Zonal	Meridional	Zonal	Meridional
2005	(0,7; 1,0; 1,7) (0,2; 2,0; 2,2)			
2006	(0,75; 1,0; 1,75) (1,0; 1,55; 2,55)			
2007				
2008	(0,8; 1,0; 1,8)			
	Inverno		Primavera	
	Zonal	Meridional	Zonal	Meridional
2005	(0,7; 1,0; 1,7)			
2006				
2007				
2008				

**Tabela 21.** Episódios de interação não linear envolvendo modos de marés e ondas secundárias, em Cachoeira Paulista-SP, nos ventos meteóricos em 90 km.

	Verão		Outono	
	Zonal	Meridional	Zonal	Meridional
2005				
2006	(1,0; 1,35; 2,35) (1,0; 1,55; 2,55)			(1,0; 1,3; 2,3)
2007				(1,0; 1,2; 2,2)
2008				
	Inverno		Primavera	
	Zonal	Meridional	Zonal	Meridional
2005	(0,7; 1,0; 1,7) (0,8; 1,0; 1,8) (1,0; 1,2; 2,2)			
2006	(0,65; 1,0; 1,65)			
2007	(0,8; 1,0; 1,8) (1,0; 1,2; 2,2)		(1,0; 1,2; 2,2)	
2008	(1,0; 1,2; 2,2)	(1,0; 1,45; 2,45)	(0,1; 2,0; 2,1) (1,0; 1,2; 2,2)	(0,8; 1,0; 1,8)

As análises em wavelets, Densidade Espectral de Potência e análise biespectral aplicadas aos dados de ventos meteóricos, em Cachoeira Paulista-SP, revelaram que a interação não linear ressonante da maré diurna com a QTDW é um evento que, excetuando-se os outonos, foram encontradas durante todas as outras estações.

Para os verões, entre 2004 e 2008, a interação não linear entre a maré diurna e a QTDW foi observada em ambas componentes e em todos os anos. Na componente zonal,

foram também observadas interações não lineares ressonantes envolvendo a maré e as periodicidades de Ondas Planetárias nas bandas de 3-4 dias, de ~5-7 dias e de ~12-20 dias. Para a componente meridional, identificou-se também interações da maré diurna com as periodicidades de ~3-4 dias e de ~12-20 dias, portanto, a variabilidade da amplitude da maré diurna, em Cachoeira Paulista-SP, durante os verões entre 2004 e 2008, sofre influência das Ondas Planetárias que, através de interações não lineares ressonantes, modulam a amplitude da maré e produzem componentes espectrais que não são explicadas através da teoria clássica aplicadas às ondas atmosféricas. Dentre as Ondas Planetárias com períodos entre 2 e 20 dias, a QTDW é a oscilação mais ativa neste processo de interação não linear com a maré atmosférica nos verões estudados.

Ao se aplicar as mesmas análises aos dados referentes aos outonos entre 2005 e 2008, não foram revelados quaisquer processos de interação não linear ressonante que possa ser considerado como sendo determinante para a modulação da amplitude da maré atmosférica em períodos de Ondas Planetárias em ambas as componentes. Apenas na componente meridional, identifica-se que a interação não linear ressonante entre os modos de marés diurna e semidiurna, gerando a maré terdiurna, se constitui no principal processo que contribui para variabilidade da amplitude da maré atmosférica durante os outonos de 2005 e 2008 em Cachoeira Paulista-SP. Outros processos de interação não linear ressonante envolvendo a maré diurna e Ondas Planetárias foram identificados, como por exemplo a interação com as periodicidades QTDW, ~3-4 dias e ~5-7 dias, encontradas no outono de 2005, mas que não se repetem nos outonos subsequentes. Isto sugere que estes eventos foram esporádicos e que não se constituem nos principais responsáveis pela modificação da amplitude da maré atmosférica durante todos os outonos estudados, em Cachoeira Paulista, entre 2005 e 2008.

As análises para as estações de inverno e de primavera revelaram que as periodicidades da maré semidiurna, das Ondas Planetárias (QTDW, ~5-7 dias e de ~12-20 dias), interagem não linearmente com a maré diurna, modulando sua amplitude e gerando as componentes espectrais: maré terdiurna e oscilações com períodos entre ~16 horas e ~36 horas. Particularmente, destacam-se as oscilações secundárias de ~20 horas e de ~30 horas, resultante respectivamente, pela soma das frequências da onda planetária de ~5-7 dias e da maré diurna e pela subtração destas frequências. Periodicidades semelhantes foram identificadas por Pancheva (1999).

A maré terdiurna que surge da interação entre os modos de marés diurna e semidiurna é um evento que ocorre com certa frequência nas estações de outono, inverno e primavera.

Estes resultados concordam com os resultados obtidos por Tokumoto (2007), principalmente, com relação a maré terdiurna. Em suas análises ele verificou que há indícios maiores da interação não linear, entre as componentes de marés, na camada centrada em 85 km e este mecanismo deve colaborar para a variabilidade dia-a-dia observada na maré diurna, particularmente, nos meses de abril, setembro e dezembro dos anos analisados. Como os meses de abril, setembro e dezembro fazem parte, respectivamente, do outono, do inverno e da primavera, os resultados obtidos por Tokumoto (2007) e os resultados obtidos nesta Tese para Cachoeira Paulista em relação à maré terdiurna apontam na mesma direção.

Os resultados obtidos das análises realizadas, apontam que a interação não linear ressonante é um fenômeno bastante importante na variabilidade da amplitude da maré em períodos de Ondas Planetárias, e que se reflete na modulação da amplitude da maré por periodicidades destas Ondas Planetárias. Estas interações explicam as presenças, através das análises realizadas, de componentes espectrais não previstas pela teoria corrente. Os resultados obtidos concordam com estudos, por exemplo, teóricos (Teitelbaum *et al.*, 1989) e experimentais (Teitelbaum and Vial, 1991; Pancheva *et al.*, 2002) os quais propõem a interação não linear ressonante entre Marés Atmosféricas e Ondas Planetárias como mecanismo de variabilidade da amplitude da maré.

Neste processo de interação não linear ressonante, destaca-se que a interação da maré diurna com a QTDW é o evento de maior incidência detectado, em ambas localidades, em praticamente todas as estações estudadas entre os anos de 2004 e 2008. Os trabalhos de Walterscheid e Vincent (1996), Palo *et al.* (1999; 2007) e McCormack, *et al.* (2010), deram suporte para explicar o possível surgimento, simultâneo, de duas QTDW conforme foi observado através das análises realizadas nesta Tese. Para os verões, particularmente, em São João do Cariri-PB, foi observado também o fenômeno de “locked phase” cuja a origem pode ser explicada através de interações não lineares ressonantes entre os modos de marés e a QTDW envolvendo um processo de ressonância paramétrica.

Outra linha sugerida como fator importante nos processos envolvidos na variabilidade da amplitude da maré em curto período, está relacionada com eventos de Aquecimento Abrupto Estratosféricos (SSW). Os resultados das análises dos espectros dos ventos mesosféricos obtidos sobre São João do Cariri-PB revelaram que a região MLT apresentou comportamento dinâmico distinto durante o verão austral de 2005-2006. Chamou a atenção o fato de as componentes, diurna e semidiurna, das Marés Atmosféricas e da QTDW apresentarem amplitudes elevadas no verão de 2006, principalmente entre janeiro e março.

Durante o mesmo período foi observado um dos mais intensos eventos de Aquecimento Abrupto da Estratosfera polar do Hemisfério Norte. Para investigar se as amplitudes mais elevadas das marés e da QTDW, observadas em janeiro-março de 2006, estavam associadas com o evento de SSW intensos, os parâmetros estratosféricos representativos da região de altas latitudes do Hemisfério Norte foram analisadas juntamente com os dados do radar meteorológico de São João do Cariri-PB.

Analisando os resultados obtidos para os três períodos de verão austral investigados, percebe-se que a dinâmica de marés e da QTDW na região MLT de São João do Cariri PB, apresentou comportamento distinto durante janeiro-fevereiro de 2006, quando dinâmica da Estratosfera na calota polar do Hemisfério Norte foi caracterizada pela ocorrência de um evento SSW intenso. Na ocasião, as amplitudes da QTDW na região MLT equatorial (Aproximadamente 90 km de altitude) aumentaram seguindo o aumento de temperatura da Estratosfera da calota polar do Hemisfério Norte, em conjunto com a redução do escoamento oeste-leste em 10 hPa, cuja reversão para direção leste-oeste ocorreu justamente quando as amplitudes da QTDW alcançaram valores máximos. Durante esse período, os valores máximos de amplitude da QTDW foram cerca de 55% maiores do que os valores estimados em janeiro-fevereiro de 2005 e de 2007. As amplitudes das marés diurna e semidiurna experimentaram intensificação justamente após o início da fase de enfraquecimento da QTDW. As amplitudes das componentes diurna e semidiurna das marés alcançaram máximos de 80 m/s e de 30 m/s, respectivamente, cerca de 25 dias após a QTDW atingir seu pico. Em janeiro-fevereiro de 2006 a maré diurna foi cerca de 50% mais intensa do que no mesmo período de 2005 e de 2007. Estudos da dinâmica da MLT sobre Tirunelveli (8,7°N) apontam que as amplitudes da maré diurna e da QTDW nos ventos obtidos através de radar MF entre janeiro-março de 1995 foram cerca de duas vezes mais intensas do que as observadas em janeiro-março de 1996 (Gurubaran et al., 2001). Sugere-se uma possível relação entre eventos de SSW intensos e atividade mais intensa das ondas, maré e QTDW, observada em janeiro-março de 1995, fato não mencionado pelos autores. Durante o período de janeiro-março de 2005 foi observado evento de aquecimento Abrupto intenso na Estratosfera da calota polar, porém em 1996 não foi verificado evento de SSW intenso, o que reforça a interpretação de uma associação entre a ocorrência de SSW intenso e a intensificação não usual das ondas de marés e de QTDW na região MLT equatorial durante o verão austral de 2005-2006. Esta intensificação das amplitudes das marés e das QTDW favorecem aos processos de interação não linear ressonantes entre estas duas oscilações na região de estudo desta Tese.

Ainda, com relação as oscilações secundárias, identificou-se que as periodicidades observadas encontram-se entre ~16 horas e ~36 horas e, isto, concorda com as possíveis periodicidades resultantes da interação não linear ressonante envolvendo os modos de marés diurna e semidiurna e as Ondas Planetárias com períodos entre 2 e 20 dias, particularmente, em relação as oscilações de ~20 horas e de ~30 horas, as quais foram também observadas por Pancheva (1999) usando uma série de dados de ventos horários meteorológicos na altitude de 95 km em Yambol (42,5°N, 26,6°E). Os resultados das análises dos dados, nesta Tese, sugerem que o mecanismo responsável pela geração das oscilações de ~20 e ~30 horas, obtidas em São João do Cariri-PB, é a interação não linear ressonante entre a maré diurna e a periodicidade de ~5-7 dias. As oscilações secundárias com períodos ~18 e ~32 horas, que foram observadas, surgem da interação não linear ressonante entre Ondas Planetárias com período ~3-4 dias e a maré diurna. Na região equatorial, as Ondas Planetárias de ~3-4 dias são ondas ultra-rápidas de Kelvin. Utilizando dados de ventos meteorológicos de São João do Cariri-PB em 2005, Alves (2007) realizou um estudo para estas ondas. Ele identificou 4 episódios intensos para esta oscilação e, considerando-se os períodos de identificação destas ondas, cada um dos episódios corresponde a uma das estações do ano de 2005. Nas análises biespectrais e nas PSD de 2005, em São João do Cariri-PB, foram observados picos referentes a estas oscilações secundárias e núcleos de interação não linear que envolvem a maré e a oscilação de ~3-4 dias. Esta interação não linear é importante na região equatorial devido ao fato de que as ondas ultra-rápidas de Kelvin são oscilações características desta região.

Através das análises das PSDs foi possível observar resultados em que as intensidades de picos simultâneos, das ondas participantes de uma mesma tríade ressonante, sofrem modificações. Estas modificações apontam que quando o pico da oscilação de maior frequência se intensifica, os picos das outras duas oscilações diminuem e vice-versa. Estes processos, de intensificação e de diminuição dos picos, estão relacionados com as trocas de energias entre as ondas da tríade ressonante. É razoável pensar que a onda secundária obtém sua energia a partir das energias das outras duas ondas primárias. Entretanto, foram observados episódios de interação não linear ressonante, geradores da onda secundária por subtração das frequências das ondas primárias, que picos das ondas primárias se intensificam enquanto interagem. Para tentar explicar estes comportamentos recorreu-se aos estudos realizados por Raupp (2006). Ele, partindo do princípio de que a amplitude de uma onda está de alguma forma diretamente relacionada com sua energia, determinou uma relação para o princípio da conservação da energia, com isso, obteve relações gerais para a energia que

envolve ondas que interagem num determinado tripleto ressonante. Ele encontrou que o modo com maior frequência absoluta numa determinada tríade ressonante é sempre o modo mais “energeticamente ativo”, ou seja, sempre age como fonte ou sumidouro de energia para os outros dois membros da tríade. Os resultados de Raupp, juntamente com as observações dos comportamentos dos picos, permitem sugerir que as trocas de energias, nas tríades ressonantes identificadas nesta Tese, concordam com os resultados teóricos obtidos por ele. Entretanto, como não foi o foco da pesquisa, entende-se que é preciso realizar estudos observacionais mais específicos sobre o tema, principalmente, quando a maior frequência da tríade atua como sumidouro de energia.

Embora as análises desenvolvidas, nesta Tese, tiveram como foco principal a variabilidade da amplitude da maré atmosférica na região MLT em São João do Cariri-PB, realizou-se análises semelhantes com os dados de ventos meteóricos obtidos em Cachoeira Paulista-SP, entre 2004 e 2008. Para comparar os resultados obtidos nas duas localidades, fez-se referências ao trabalho desenvolvido por Tokumoto (2007) que utilizou seis anos de dados coletados pelo radar meteórico SKiYMET, na região de 80 - 100 km de altitude sobre Cachoeira Paulista-SP, para estudar a variabilidade sazonal e a variabilidade dia-a-dia da maré diurna. Neste trabalho, ele concluiu que as interações não-lineares entre a maré diurna e a semidiurna, quando ocorreram, produziram duas ondas secundárias: uma maré diurna e uma maré terdiurna. Esta última apareceu muito fraca, porém, mostrou uma distribuição sazonal nas amplitudes características, com picos próximos aos equinócios, tal qual a maré diurna, indicando que pode haver um reforço na amplitude da maré diurna primária pela maré diurna secundária presente na interação não linear ressonante. Em suas análises ele verificou que há indícios maiores da interação não linear, entre as componentes de marés, na camada centrada em 85 km e este mecanismo deve colaborar para a variabilidade dia-a-dia observada particularmente nos meses de abril, setembro e dezembro dos anos analisados.

Em relação às Ondas Planetárias, Tokumoto (2007) concluiu que: (i) a QTDW é dominante na componente meridional do vento no verão, época em que a amplitude da maré diurna diminui; (ii) através da análise espectral, que os casos de interação não linear entre a maré diurna e a QTDW são raros e foram encontrados apenas em dois anos 2000 e 2003, na camada em 95 km; (iii) a interação não linear entre a maré diurna e a QTDW não é um mecanismo importante para variabilidade da maré e; (iv) não há predomínio da QTDW na componente zonal do vento e, em seu lugar, aparecem ondas de períodos mais longos e, quando aparecem, interagem não linearmente com a maré diurna.

Os resultados de interação não linear ressonante entre a maré diurna e a QTDW, em São João do Cariri-PB e em Cachoeira Paulista-SP, indicam que esta interação acontece em todas as estações dos anos entre 2004 e 2008. Estes resultados diferem daqueles obtido por Tokumoto (2007), entretanto eles concordam quanto a predominância da QTDW na componente meridional dos ventos. Então, sugere-se que a interação não linear ressonante entre a maré diurna e a QTDW é um evento muito importante para a variabilidade da amplitude da maré em períodos de Ondas Planetárias nestas localidades, principalmente em São João do Cariri-PB.

Quanto aos episódios de interação não linear entre a maré diurna e a maré semidiurna, gerando a maré terdiurna, foi encontrado em Cachoeira Paulista uma quantidade maior de eventos que os encontrados em São João do Cariri-PB, mas em quantidade insuficiente para se estabelecer uma concordância entre os episódios de Cachoeira Paulista-SP no período analisado por Tokumoto (2007) e os obtidos nesta Tese. Entretanto, pode-se indicar que os resultados obtidos de interação não linear entre os modos de marés diurna e semidiurna na componente meridional dos ventos, tanto para os outonos, para os invernos, como para as primaveras, em Cachoeira Paulista-SP, parecem concordar com os resultados obtidos por Tokumoto (2007) ao concluir que: as interações não lineares entre a maré diurna e a semidiurna, quando ocorrem, produzem duas ondas secundárias: uma maré diurna e uma maré terdiurna. Esta última aparece muito fraca, porém, mostra uma distribuição sazonal nas amplitudes características, com picos próximos aos equinócios. Quanto existência da interação não linear ressonante, na componente zonal, entre as marés e as Ondas Planetárias, os dois estudos concordam, entretanto, destaca-se que interações não lineares entre a maré diurna e ondas de ~3-4 dias também foram encontradas em Cachoeira Paulista-SP, mas a interação entre a maré diurna e a QTDW é predominante.

Assim, após as investigações e análises desenvolvidas nesta Tese, encontrou-se evidências de que a variabilidade da amplitude da maré em períodos de Ondas Planetárias, em 90 km de altitude, na região de São João do Cariri-PB, é fortemente vinculada á dois mecanismos: (a) aos processos de interações não lineares ressonantes entre a Maré Atmosférica e as Ondas Planetárias, particularmente à QTDW e, também, (b) à influência dos eventos de Aquecimentos Abruptos Estratosféricos intensos (SSW major) sobre a Maré Atmosférica e as Ondas Planetárias na Região de São João do Cariri-PB.

## Sugestões e questões para pesquisas futuras

Os processos de trocas de energias entre as componentes participantes de tríades ressonantes são importantes, entretanto, encontra-se poucos estudos sobre este tema na região MLT equatorial. Portanto, é importante a realização de estudos observacionais orientados para as trocas de energias entre estas ondas em tríades ressonantes na região MLT equatorial.

A partir dos dados de temperaturas do SABER e da distribuição destes dados sobre o globo, abrem-se muitas possibilidades para se investigar os parâmetros (por exemplo: número de onda e direção de propagação) das componentes espectrais secundárias geradas por interação não linear entre os modos de marés e as Ondas Planetárias na região MLT equatorial. Particularmente, estes estudos podem ampliar as informações sobre as ondas secundárias que foram identificadas em São João do Cariri-PB e em Cachoeira Paulista-SP.

O SSW intenso afeta as amplitudes das marés e das QTDW na região equatorial. É muito importante se identificar quais mecanismos estão envolvidos nesta correlação entre SSW intenso e modificação das amplitudes da maré e da QTDW na região equatorial. Estes eventos de SSW também são importantes nos processos de interação não linear ressonante entre os modos de marés e Ondas Planetárias em regiões distintas da região equatorial?

O fenômeno de Locked Phase, discutido por Walterscheid e Vincent (1996) para explicar o comportamento regular da QTDW, após o solstício de verão no Hemisfério Sul, também apresenta-se regular em Cachoeira Paulista-SP? Qual a influência deste fenômeno no comportamento da amplitude da maré nesta localidade? Ainda com relação ao Locked Phase, qual o mecanismo que funciona como gatilho para que o modo de maré (1, 6) seja gerado através interação não linear ressonante da QTDW com a maré diurna e não com a maré semidiurna e vice-versa? Estas são questões interessantes que necessitam de respostas.

Nas pesquisas desta Tese foram detectados episódios de interações não lineares entre a maré atmosférica e as ondas ultra-rápidas de Kelvin, então, em que medida esta interação é importante para a variabilidade da amplitude da maré na região equatorial? Alguns episódios desta interação também foram identificados na componente meridional da maré e outros na latitude de Cachoeira Paulista. Sendo as ondas ultra-rápidas de Kelvin um fenômeno da região equatorial, como explicar estas interações?

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALVES, E. O. **Identificação de Ondas Atmosféricas Ultra-Rápidas de Kelvin nos ventos meteorológicos da Alta Mesosfera Equatorial sobre São João do Cariri-PB (7,4°S; 36,5°O)**. Dissertação de Mestrado em Meteorologia – UACA - UFCG. Campina Grande - PB. 2007.
- ANDREWS, D. G.; HOLTON, J. R. and LEOVY, C. B. **Middle atmosphere dynamics**. Orlando: Academic press, 1987. v. 489p.
- BATISTA, P. P.; CLEMESHA, B. R.; TOKUMOTO, A. S. and LIMA, L. M. Structure of the mean winds and Tides in the meteor region over Cachoeira Paulista, Brazil (22,7°S, 45°W) and its comparison with models. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 66, n. 6-9, 2004.
- BEARD, A. G.; MITCHELL, N. J.; WILLIAMS, P. J. S. and KUNITAKE, M. Non-linear interactions between tides and planetary waves resulting in periodic tidal variability. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 61, n. 5, p. 363-376, Mar. 1999.
- BEARD, A. G.; WILLIAMS, P. J. S.; MITCHELL, N. J. and MULLER, H.G. A spectral climatology of planetary and tidal variability. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 63, p. 801-811. 2001.
- BEER, T. **Atmospheric waves**. London: Adam Hilder, 1975. v. 300p.
- BERNARD, R. Variability of the semi-diurnal tide in the upper mesosphere. **Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics**, v. 43, n. 7, p. 663-674, July 1981.
- BLOOMFIELD, P. **Fourier analysis of time series: an introduction**. New York: John Wiley & Sons, 1976. 258p.
- BOLZAN, M. Análise da transformada em ondeletas aplicada em sinal geofísico. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 26, p. 37-41, 2004. 62
- BURRAGE, M. D.; HAGAN, M. E.; SKINNER, W. R.; WU, D. L. and HAYS, P. B. Long-term variability in the solar diurnal tide observed by HRDI and simulated by the GSWM. **Geophys. Res. Lett.**, 22, 2641- 2644. 1995.
- CHANG, L. C.; PALO, S. E and LIU, H., Short-term variability in the migrating diurnal tide caused by interaction with the quasi 2 day wave. **Journal of Geophysical Research**. Vol. 116, D12112, DOI: 10.1029/2010JD014996, 2011.
- CHAPMAN, S. and LINDZEN, R. S. **Atmospheric tides**, Dordrecht: D. Reidel Publishing Company, 1970, 200p.
- CHUI, C. K. An introduction to wavelets. In: Chui, C. K. (ed.) **Wavelets analysis and its applications**. San Diego: Academic Press, 1992. v. 1, p. 266.
- CLARK, R. R. and BERGIN, J. S. Bispectral analysis of mesosphere winds. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 59, n. 6, p. 629-639, Apr. 1997.
- CLARK, R.; BURRAGE, M.; FRANKE, M.; MANSON, A.; MEEK, C.; MITCHELL, N. and MULLER, H. Observations of 7-d planetary waves with MLT radars and the UARS-HRDI

instrument. **Atmos. Sol. Terr. Phys.**, v. 64, p. 1217–1228, 2002.

COLL, M. A. and FORBES, J. M. Nonlinear interactions in the upper atmosphere: The  $s = 1$  and  $s = 3$  non-migrating semidiurnal tides. **Journal of Geophysical Research**, Vol. 107, N<sup>o</sup>. A8, 1157, 10, 1029/2001JA900179, 2002.

DEBNATH, L. **Nonlinear Water Waves**. Academic Press, Inc. USA, 1984.

CEPLECHA, Z.; BOROVICKA, J.; ELFORD, W. G.; REVELLE, D. O.; HAWKES, R. L.; PORUBCAN, V. and SIMEK, M. Meteor phenomena and bodies. **Space Science Reviews**, v. 84, n. 3-4, p.327-471, Apr. 1998.

DOMARACKI, A. and LOESCH, A. Nonlinear interactions among equatorial waves. **Journal Atmospheric Sciences**. Vol. 34, p. 486-498. 1976.

ECKERMANN, S. D.; RAJOPADHYAYA, D. K. and VINCENT, R. A. Intraseasonal wind variability in the equatorial mesosphere and lower thermosphere: Long-term observations from the central Pacific. **J. Atmos. Sol. Terr. Phys.**, 59, 603–627. 1997.

ESLER, J.G. and SCOTT, R.K. Excitation of transient Rossby waves on the stratospheric polar vortex and the barotropic sudden warming. **J. Atmos. Sci.** 62, 3661–3682. **Doi:10.1175/JAS3557.1**. 2005.

ESPY, P. J.; STEGMAN, J. and WITT, G. Interannual variations of the quasi-16-day oscillation in the polar summer mesospheric temperature. **Journal of Geophysical Research**, v. 102, n. D2, p. 1983-1990, Jan. 1997.

FORBES, J. M. and VINCENT, R. A. Effects of mean winds and dissipation on the diurnal propagating tide: An analytic approach, **Planetary Space Science.**, 37(2), 197– 209. 1989.

FORBES, J. M.; GU, J. and MIYAHARA, S. On the interactions between gravity waves and the diurnal propagating tide. **Planetary Space Science**, v. 39, p. 1249 - 1257, 1991.

FORBES, J. M. Tidal and planetary waves. In: Johnson, R. M.; Killeen, T. L., (ed.) The upper mesosphere and lower thermosphere: a review of experiment and theory geophysical monograph. Washington: **American Geophysical Union**. p. 67-87. 1995.

FORBES, J. M., HAGAN, M. E.; ZHANG, X. and HAMILTON, K. Upper atmosphere tidal oscillations due to latent heat release in the tropical troposphere, **Ann. Geophys.**, 15, 1165–1175. 1997.

FRITTS, D. C. and VINCENT, R. A. Mesospheric momentum flux studies at Adelaide, Australia: Observations and a gravity wave-tidal interaction model, **J. Atmos. Sci.**, 44, 605–619. 1987.

FRITTS, D. C. and ISLER, J. R. Mean motions and tidal and two-day structure and variability in the mesosphere and lower thermosphere over Hawaii, **J. Atmos. Sci.**, 51, 2145–2264. 1994.

GELLER, M. A.; YUDIN, V. A.; KHATTATOV, B. V. and HAGAN, M. E. Modeling the diurnal tide with dissipation derived from UARS/HRDI measurements. **Ann. Geophysicae** 15, p. 1198 -1204. 1997.

GONCHARENKO, L. and ZHANG, S.R. Ionospheric signatures of sudden stratospheric warming: ion temperature at middle latitude. **Geophys. Res. Lett.** 35, L21103. **Doi:**10.1029/2008GL035684. 2008.

GURUBARAN, S. and RAJARAM, R. Long-term variability in the mesospheric tidal winds observed by MF radar over Tirunelveli (8,7°N, 77.8°E), **Geophys. Res. Letts.**, 26, 1113 – 1116. 1999.

GURUBARAN, S., SRIDHARAN, S., RAMKUMAR, T.K. and RAJARAM, R. The mesospheric quasi-2-day wave over Tirunelveli (8,7°N). **J. Atmos. Sol. Terr. Phys.** 63, 975-985, **Doi:**10.1016/S1364-6826(01)00016-5. 2001.

GURUBARAN, S.; RAJARAM, R.; NAKAMURA, T. and TSUDA, T. Interannual variability of diurnal tides in the tropical mesopause region: A signature of the El Niño-Southern Oscillation (ENSO), **Geophys. Res. Lett.**, 32, L13805, **Doi:** 10.1029/2005GL022928. 2005.

HAGAN, M. E.; FORBES, J. M. and VIAL, F. On modeling migrating solar tides. **Geophysical Research Letters**, v. 22, n. 8, p. 893-896, Apr. 1995.

HAGAN, M. E. Comparative effects of migrating solar sources on tidal signatures in the middle and upper atmosphere, **J. Geophys. Res.**, 101, 21.213– 21.222. 1996.

HAGAN, M. E.; BURRAGE, M. D.; FORBES, J. M.; HACKNEY, J.; RANDEL, W. J. and ZHANG, X. GSWM-98: Results for migrating solar tides, **J. Geophys. Res.**, 104, 6813–6827. 1999.

HAGAN, M. E. and FORBES, J. M. Migrating and nonmigrating diurnal tides in the middle and upper atmosphere excited by tropospheric latent heat release. **Journal of Geophysical Research**, v. 107, n. D24, p. ACL 6-1. Art. No. 4754, Dec. 2002.

HAMILTON, K. Latent heat release as a possible forcing mechanism for atmospheric tides, **Mon. Weather Rev.**, 109, 3 –17. 1981.

HAYS, P. B.; WU, D.; BURRAGE, M. D.; GELL, D. A.; GRASSL, H.; LIEBERMAN R. S.; MARSHALL, A. R.; MORTON, Y. T.; ORTLAND, D. and SKINNER, W. R. Observations of the diurnal tide from space, **J. Atmos. Sci.**, 51. 3077–3093. 1994.

HINES, C. O. The upper atmosphere in motion. In: Hines, C. O. (ed.) Washington, D.C.: **American Geophysical Union**, 1974. v. 18, p. 14-58. Geophysical monograph

HIROTA, I. Kelvin waves in the equatorial middle atmosphere observed with Nimbus 5 SCR. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 36, n. 2, p. 217-222, Feb. 1979.

HOCKING, W. K.; THAYAPARARI, T.; and JONES, J. Meteor decay and their use in determining a diagnostic mesospheric temperature-pressure parameter: methodology and one year of date. **Geophysical Researcher Letters**, vol. 24, No. 23, pages 2977-2980, December 1997.

HOLTON, J.R.,. The influence of gravity wave breaking on the general circulation of the middle atmosphere. **J. Atmos. Sci.** 40, 2497-2507. 1983

HOLTON, J. R. **An introduction to dynamic meteorology**. 4. ed. San Diego: Academic Press, 2004. v. 535p.

HONG, S. S. and WANG, P. H. On the thermal excitation of atmospheric tides, **Bull. Geophys.**, 19, 56– 84. 1980,

HORINOUCI, T. and YODEN, S. Propagation of waves excited by localized episodic heating in the tropics and their effect on the middle atmosphere: comparison between two QBO phases. **Journal of the Meteor. Society of Japan**, v. 75, n. 3, p. 641-656, June 1997.

HORNES, J. H. and BALIUNAS, S. L. A Prescription for period analysis of unevenly sampled times series. **The Astrophysical Journal**, 302: 757-763. 1986.

JACOBI, C.; SCHMINDER, R. and KÜRSCHNER, D. Non-linear interaction of the quasi 2-day wave and long-term oscillations in the summer midlatitude mesopause region as seen from LF D1 wind measurements over Central Europe (Collm, 52°N, 15°E). **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 60, n. 12, p. 1175-1175, Dec. 1998.

KISHORE, P.; NAMBOOTHIRI, S.; IGARASHI, K.; GURUBARAN, S.; SRIDHARAN, S.; RAJARAM, R. and VENKAT, M. Mf radar observations of 6,5-day wave in the equatorial mesosphere and lower thermosphere. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 66, p. 507515, 2004.

KODERA, K. Influence of stratospheric sudden warming on the equatorial troposphere. **Geophys. Res. Lett.** 33, L06804, **Doi:**10.1029/2005GL024510, 2006.

KOVALAM, S.; VINCENT, R.; REID, I.; TSUDA, T.; NAKAMURA, T.; OHNISHI, K.; NURYANTO, A. and WIRYOSUMARTO, H. Longitudinal variations in planetary wave activity in the equatorial mesosphere. **Earth Planets Space**, v. 51, p. 665–674, 1999.

KUMAR, P. and FOUFOULA-GEORGIOU, E. Wavelet analysis for geophysical applications. **Reviews of Geophysics**, v. 35, n. 4, p. 385-412, 1997.

KUMAR, K. K.; DEEPA, V.; ANTONITA, T. M.; and RAMKUMAR, G. Meteor radar observations of short-term tidal variabilities in the low-latitude mesosphere lower thermosphere: Evidence for nonlinear wave-wave interactions. **Journal of Geophysical Research**, Vol. 113, D16108, **Doi:**10.1029/2007JD009610, 2008.

LABITZKE, K. Temperature changes in the mesosphere and stratosphere connected with circulation changes in winter. **J. Atmos. Sci.** 29, 756-766. 1972.

LIEBERMAN, R. S. and LEOVY, C. B. A numerical model of nonmigrating diurnal tides between the surface and 65 km, **J. Atmos. Sci.**, 52, 389–409. 1995.

LIEBERMAN, R. S.; RIGGIN, D. M.; ORTLAND, D. A.; NESBITT, S. W. and VINCENT, R. A. Variability of mesospheric diurnal tides and tropospheric diurnal heating during 1997–1998, **J. Geophys. Res.**, 112. D20110 **Doi:** 10.1029/2007JD008578. 2007.

LIEBERMAN, R. S.; ORTLAND, D. A. and YAROSH, E. S. Climatology and interannual variability of diurnal water vapor heating, **J. Geophys. Res.**, 108(D3), 4123, **Doi:**10.1029/2002JD002308. 2003.

LIEBERMAN, R. S.; OBERHEIDE, J.; HAGAN, M. E.; REMSBERG, E. E. and GORDLEY, L. L. Variability of diurnal tides and planetary waves during November 1978–May 1979, **J. Atmos. Sol. Terr. Phys.**, 66, 517– 528. 2004.

LIMA, L. M. **Observações de Ondas Planetárias na região da mesopausa equatorial e de baixas latitudes do hemisfério sul.** 2004. 245p. Tese de Doutorado em Geofísica Espacial - INPE, São José dos Campos - SP. 2004.

LIMA, L. M; BATISTA, P. P.; CLEMESHA, B. R. and TAKAHASHI, H. The 6,5-day Oscillations Observed in Meteor Winds over Cachoeira Paulista (22.7°S). **Advances in Space Research**, v. 36, n. 11. p. 2212-2217, Dec. 2005.

LIMA, L. M, MEDEIROS, A. F., BURITI, R. A., BATISTA, P. P., CLEMESHA B. R. and TAKAHASHI, H. Mesospheric 2-day waves observed simultaneously in the equatorial and low latitudes regions of Brazil. **Revista Brasileira de Geofísica**. Vol. 25(Supl. 2), 2007a.

LIMA, L. M.; PAULINO, A. R. S; MEDEIROS, A. F.; BURITI, R. A.; BATISTA, P. P.; CLEMESHA, B. R. and TAKAHASHI, H. First observations of the diurnal and semidiurnal oscillations in the mesospheric winds over São João do Cariri-PB, Brazil. **Rev. Bras. Geofísica**, Suplemento 2 , 2007b.

LIMA, L. M.; ALVES, E. O.; MEDEIROS, A. F.; BURITI, R. A.; BATISTA, P. P.; CLEMESHA, B. R. and TAKAHASHI, H. 3-4 day Kelvin waves observed in the MLT region at 7.4° S, Brazil. **Geofísica Internacional** 47 (3), 153-160, 2008.

LIMA, L.M.; ALVES, E.O.; BATISTA, P.P.; CLEMESHA, B.R.; MEDEIROS, A.F.; and BURITI, R.A. Sudden stratospheric warming effects on the mesospheric tides and 2-day wave dynamics at 7°S. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**. 2011. **Doi:**10,1016/j.jastp.2011.02.01 .in: [www.elsevier.com/locate/jastp](http://www.elsevier.com/locate/jastp).

LIMPASUVAN, V., THOMPSON, D.W.J. and HARTMANN, D.L. The life cycle of Northern Hemisphere sudden stratospheric warming. **J. Clim.** 17, 2584–2596. **Doi:**10,1175/1520-0442(2004)017<2584:TLCOTN>2.0.CO;2. 2004.

LINDZEN, R. S. Effect of daily variations in cumulonimbus activity on the atmospheric semidiurnal tide, **Mon. Weather Rev.**, 106, 526–533. 1978.

LINDZEN, R. S. Atmospheric Tides, **Ann. Rev. Earth Planet. Sci.** 7, 199–225. 1979

LINDZEN, R. S. and HONG, S. Effects of mean winds and horizontal temperature gradients on solar and lunar semidiurnal tides in the atmosphere. **J. Atmos. Sci.**, 31. 1421–1466. 1974.

LIU, H.-L. and ROBLE, R. G. A study of a self-generated stratospheric sudden warming and its mesospheric–lower thermospheric impacts using the coupled TIME-GCM/CCM3. **J. Geophys. Res.** 107 (D23), 4695. **Doi:**10.1029/ 2001JD001533. 2002

LIU, H.-L.; LI, T.; SHE, C.-Y.; OBERHEIDE, J.; WU, Q.; HAGAN, M. E.; XU, J.; ROBLE, R. G.; MLYNCZAK, M. G.; and RUSSELL, J. M. Comparative study of short-term diurnal tidal variability. **Journal of Geophysical Research**, Vol. 112, D18108, **Doi:**10,1029/2007JD008542, 2007.

LOMB, N. R. Least-squares frequency analysis of unequally spaced data. **Astrophysics and**

**Space Science**, v.39, n. 2, p. 447-462, Feb. 1976.

LONGUET-HIGGINS, M. S. The eigenfunctions of Laplace's tidal equations over a sphere. **Philosophical Transactions of the Royal Society of London**, v. 262, n. A1132, p. 511-607, Feb. 1968.

LUO, Y.; MANSON, A. H.; MEEK, C. E.; MEYER, C. K. and FORBES, J. M. The quasi 16-day oscillations in the mesosphere and lower thermosphere at Saskatoon (52°N, 107°W), 1980-1996. **Journal of Geophysical Research**, v. 105, n. D2, p. 2125-2138, Jan. 2000.

LUO, Y.; MANSON, A. H.; MEEK, C. E.; THAYAPARAN, T.; MACDOUGALL, J.; and HOCKING, W. K. The 16-day wave in the mesosphere and lower thermosphere: simultaneous observations at Saskatoon (52°N, 107°W) and London (43°N, 81°W), Canada. **Journal of Atmos. and Solar-Terrestrial Physics**, v. 64, n. 8-11, p. 1287-1307, May 2002a.

LUO, Y.; MANSON, A. H.; MEEK, C. E.; MEYER, C. K.; BURRAGE, M. D.; FRITTS, D. C.; HALL, C. M.; HOCKING, W. K.; MACDOUGALL, J.; RIGGIN, D. M. and VINCENT, R. A. The 16-day planetary waves: multi-MF radar observations from the arctic to equator and comparisons with the HRDI measurements and the GSWM modeling results. **Annales Geophysicae**, v. 20, n. 5, p. 691-709, May 2002b.

MADDEN R.A. and JULIAN, P. Further evidence of global scale, 5-day pressure waves. **Atmos. Sci.**, v. 29, p. 1464-1469, 1972.

MANNEY, G.L., KRÜGER, K., PAWSON, S., MINSCHWANER, K., SCHWARTZ, M.J., DAFFER, W.H., LIVESEY, N.J., MLYNCZAK, M.G., REMSBERG, E.E., RUSSELL, J.M. and WATERS, J.W. The evolution of the stratopause during the 2006 major warming: Satellite data and assimilated meteorological analyses. **J. Geophys. Res.** 113, D11115, [Doi:10.1029/2007JD009097](https://doi.org/10.1029/2007JD009097). 2008.

MANSON, A. H.; MEEK, C. E.; GREGORY, J. B. and CHAKRABARTY, D. K. Fluctuations in tidal (24-, 12-h) characteristics and oscillations (8-h -5-d) in the mesosphere and lower thermosphere (70 - 110 km): Saskatoon (52°N, 107°W), 1979- 1981. **Planet. Space Sci.**, 30, 1283- 1294. 1982.

MANSON, A. H.; MEEK, C. E.; TEITELBAUM, H.; VIAL, F.; SCHMINDER, R.; KÜRSCHNER, D.; SMITH, M. J.; FRASER, G. J. and CLARK, R. R. Climatology of semidiurnal and diurnal tides in the middle atmosphere (70-100 km) at middle latitudes (40-55°). **J. Atmos. Terr. Phys.**, 51, 579-593, 1989.

MATSUNO, T. Quasi-geostrophic motions in the equatorial area. **Journal of Meteorological Society of Japan**, v. 44, n. 1. p. 25-42, 1966.

MAYR, H. G.; MENGEL, J. G. and CHAN, K. L. Equatorial oscillations maintained by gravity waves as described with the Doppler spread parameterization: I. Numerical experiments, **J. Atmos. Sol. Terr. Phys.**, 60,181-199. 1998.

MCCORMACK, J. P.; ECKERMANN, S. D.; HOPPEL K. W.; and VINCENT R. A. Amplification of the quasi-two day wave through nonlinear interaction with the migrating diurnal tide. **Geophysical Res. Letters**, Vol. 37, L16810, [Doi:10.1029/2010GL043906](https://doi.org/10.1029/2010GL043906), 2010.

MCKINLEY, D. W. R. **Meteor science and engineering**. New York: McGraw-Hill,

1961.309p.

MCLANDRESS, C. and WARD, W. E. Tidal/gravity wave interactions and their influence on the large-scale dynamics of the middle atmosphere: Model results, **J. Geophys. Res.**, 99, 8139–8155. 1994.

MCLANDRESS, C. The seasonal variation of the propagating diurnal tide in the mesosphere and lower thermosphere. part I: The role of gravity waves and planetary waves, **J. Atmos. Sci.**, 59, 893–906. 2002a.

MCLANDRESS, C. The seasonal variation of the propagating diurnal tide in the mesosphere and lower thermosphere. part II: The role of tidal heating and zonal mean winds, **J. Atmos. Sci.**, 59, 907–922. 2002b.

MEYER, C. K. Gravity wave interactions with the diurnal propagating tide, **J. Geophys. Res.**, 104, 4223–4239. 1999.

MITCHELL, N. J.; MIDDLETON, H. R.; BEARD, A. G.; WILLIAMS, P. J. S. and MULLER, H. G. The 16-day planetary wave in the mesosphere and lower thermosphere. **Annales Geophysicae**, v. 17, n. 11, p. 1447-1456, Nov. 1999.

MIYOSHI, Y. Numerical simulation of the 5-day and 16-day waves in the mesopause region. **Earth, Planets and Space**, v. 51, n. 7-8, p. 763-784, July 1999.

MIYAHARA, S.; YOSHIDA, Y. and MIYOSHI, Y. Dynamic coupling between the lower and upper atmosphere by tides and gravity waves. **Journal of Atmospheric Terrestrial-Physics**, v. 55, n. 3, p. 10-39-1053, Feb. 1993.

MIYAHARA, S.; MIYOSHI, Y. and YAMASHITA, K. Variations of migrating and non-migrating tides simulated by the middle atmosphere circulation model at Kyushu University, **Adv. Space. Res.**, 24, 1549–1558. 1999.

MORETTIN, P. A. **Ondas e ondaletas: da análise de Fourier à análise de ondaletas**. São Paulo: EDUSP, 1999. 272p.

MASSEBEUF, M.; BENARD, R.; FELLOUS, J. and GLASS, M. Simultaneous meteor radar observations at Monpazier (France, 44°N) and Punta (Puerto Rico, 18°). ii-mean zonal wind and long period waves. **J. Atmos. Terr. Phys.**, v. 43, p. 535–542, 1981.

NAKAMURA, T.; FRITTS, D. C.; ISLER, J. R.; TSUDA, T.; VINCENT, R. A. and REID, I. M. Short-period fluctuations of the diurnal tide observed with low-latitude MF and meteor radars during CADRE: Evidence for gravity wave/tidal interactions, **J. Geophys. Res.**, 102, 225–26, 238. 1997.

ORTLAND, D. A. and ALEXANDER, M. J. Gravity wave influence on the global structure of the diurnal tide in the mesosphere and lower thermosphere, **J. Geophys. Res.**, 111. A10S10, **Doi:** 10.1029/2005JA011467. 2006.

PALO, S. E.; ROBLE, R. G. and HAGAN, M. E. Simulation of the quasi two-day wave using the TIME-GCM: Dynamical effects in the middle atmosphere. **Earth Planets Space**, 51. 629–647. 1999.

PALO, S. E.; FORBES, J. M.; ZHANG, X.; RUSSELL, J. M. and MLYNCZAK, M. G. An eastward propagating two-day wave: Evidence for nonlinear planetary wave and tidal coupling in the mesosphere and lower thermosphere. **Geophysical Research Letters**, Vol. 34, L07807, **Doi:** 10.1029/2006GL027728. 2007.

PANCHEVA, D. Evidence for nonlinear coupling of planetary wave and tides in the lower thermosphere over Bulgaria. **J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.**, 62, 115–132, 2000.

PANCHEVA, D.; MERZLYAKOV, E.; MITCHELL, N. J.; PORTNYAGIN, Y.; MANSON, A. H.; JACOBI, C.; MEEK, C. E.; LUO, Y.; CLARK, R. R.; HOCKING, W. K.; MACDOUGALL, J.; MULLER, H. G.; KURSCHNER, D.; JONES, G. O. L.; VINCENT, R. A.; REID, I. M.; SINGER, W.; IGARASHI, K.; FRASER, G. I.; FAHRUTDINOVA, A. N.; STEPANOV, A. M.; POOLE, L. M. G.; MALINGA, S. B.; KASHCHEYEV B. L. and OLEJNIKOV, A. N. Global-scale tidal variability during the PSMOS campaign of June – August 1999: Interaction with planetary waves. **J. Atmos. Sol. Terr. Phys.**, 64, 865–896. 2002.

PANCHEVA, D. Quasi 2-day wave and tidal variability observed over Ascension Island during January/February 2003. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, 68. 390–407. 2006.

PLUMB, R. A.; VINCENT, R. A. and CRAIG, R. L. The quasi-two-day event of January 1984 and its impact on the mean mesospheric circulation. **Journal of the Atmospheric Sciences**, vol. 44. n.20, p. 330-336, 1987.

RANDEL, W. Global normal-mode Rossby wave observed in stratospheric ozone data. **Atmos. Sci.**, v. 50, p. 406–420, 1993.

RAUPP, C. F. M. **Interação não-linear entre ondas atmosféricas: Um possível mecanismo para a conexão Trópicos-Extratropicos em Baixa-Frequência**. Tese de Doutorado. Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, USP. São Paulo-SP. 2006.

RIGGIN, D. M.; FRITTS, D. C.; TSUDA, T.; NAKAMURA, T. and VINCENT, R. A. Radar observations of a 3-day Kelvin wave in the equatorial mesosphere. **Journal of Geophysical Research**, v. 102, n. D22, p. 26141-26157, Nov. 1997.

ROSENLOF, K. H. and THOMAS, R. J. Five-day mesospheric waves observed in the solar mesospheric explorer ozone. **Journal of Geophysical Research**, v. 95, p.895–899 1990.

SALBY, M. and ROPER, R. Long-period oscillations in the meteor region. **Atmos. Sci.**, v. 37, p. 237–244, 1980.

SALBY, M. L. The 2-day wave in the middle atmosphere - observations and theory. **Journal of Geophysical Research**, v. 86, n. C10, p. 9654-9660, Oct. 1981.

SALBY, M. L.; HARTMANN, D. L.; BAILEY, P. L. and GILLE, J. C. Evidence for equatorial Kelvin modes in Nimbus7 LIMS. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 41. n. 2, p. 220-235, Jan. 1984.

SALBY, M. L. and, CALLAHAN, P. F. Interaction of the 2-day wave with Solar Tides **Journal of Geophysical Research**, VOL.113, D14121. 2008.

SATHISHKUMAR, S.; SRIDHARAN, S. and JACOBI, C. Dynamical response of low latitude middle atmosphere to major sudden stratospheric warming events. **J. Atmos. Sol. Terr. Phys.** 71. 857–865. **Doi:**10.1016/j.jastp.2009.04.002. 2009.

SCARGLE, J. D. Studies in astronomical time series analysis. II - Statistical aspects of spectral analysis of unevenly spaced data. **Astrophysical Journal**, v. Part 1. v. 263, n. 2, p. 835-853, Dec. 1992.

SCHOEBERL, M. R., 1978. Stratospheric warmings: observations and theory. **Rev. Geophys.** 16, 521–538. **Doi:**10.1029/RG016i004p00521.

SINGER, W.; HOFFMANN, P.; MANSON, A. H.; MEEK, C. E.; SCHMINDER, R.; KUERSCHNER, D.; KOKIN, G. A.; KNYAZEVA, A. K.; PORTNYAGIN, Y. I.; MAKAROV, A. N.; FAKHRUTDINOVA, V. V.; SIDOROV, G.; CEVOLANI, H. G.; MULLER, N. A.; KAZIMIROVSKY, E. S.; GAIDUKOV, V. A.; CLARK, R. R.; CHEBOTAREV, R. P. and KARADJAEV, Y. The wind regime of the mesosphere and lower thermosphere during the DYANA campaign-I. Prevailing winds, **J. Atmos. Terr. Phys.**, 56, 1717–1729, 1994.

SHEPHERD, M. G.; WU, D. L.; FEDULINA, I. N.; GURUBARAN, S.; RUSSELL, J. M.; MLYNCZAK M.G. and SHEPHERD, G. G. Stratospheric warming effects on the tropical mesospheric temperature field. **J. Atmos. Sol. Terr. Phys.** 69, 2309–2337. **Doi:** 10.1016/j.jastp.2007.04.009. 2007.

SISKIND, D. E. and COY, L. Observations of stratospheric warmings and mesospheric coolings by the TIMED SABER instrument. **Geophys. Res. Lett.** 32, L09804, **Doi:**10.1029/2005GL022399, 2005.

SPIZZICHINO, A. Étude des interactions entre les différents composants du vent dans la haute atmosphère (Deuxième partie: Quelques données sur la propagation des ondes atmosphériques). **Annales de Géophysique**, t, 25, fasc. 4., p 755 a 771. 1969 (a).

SPIZZICHINO, A. Étude des interactions entre les différents composants du vent dans la haute atmosphère (Troisième partie: Théorie des interactions non linéaires entre les ondes atmosphériques). **Annales de Géophysique**, t, 25, fasc. 4., p 773 a 783. 1969(b).

SRIDHARAN, S.; SATHISHKUMAR, S. and GURUBARAN, S. Variabilities of mesospheric tides and equatorial electrojet strength during major stratospheric warming events. **Ann. Geophys.** 27, 4125–4130, **Doi:**10.5194/angeo-27-4125-2009.

TALAAT, E. R.; YEE, J. H. and ZHU, X. Observations of the 6,5-day wave in the mesosphere and lower thermosphere. **J. Geophys. Res.**, 106, 20 715–20 724. 2001.

TEITELBAUM, H.; VIAL, F.; MANSON, A. H.; GIRALDEZ, R.; and MASSEBOEUF, M. Non-linear interaction between the diurnal and semidiurnal tides: terdiurnal and diurnal secondary waves. **Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics**, v. 51. n. 7-8, p. 627-634, July-Aug. 1989.

TEITELBAUM, H. and VIAL, F. On tidal variability induced by nonlinear interaction with planetary waves. **J. of Geophysical Research**, v. 96, n. A8, p. 14,169-14,178, Aug. 1991.

THAYAPARAN, T; HOCKING, W. K.; MacDOUGALL, J.; MANSON, A. H. and MEEK,

C. E. Simultaneous observations of the 2-day wave at London (43°N, 81°W) and Saskatoon (52°N, 107°W) near 91 km altitude during the two years of 1993 and 1994. **Ann. Geophysicae** 15, 1324-1339, 1997.

TIMMERMANS, R. M. A. **Studies of atmospheric dynamics from space**. Doctor Thesis. Library Technische Universiteit Eindhoven, 2005.

TOKUMOTO, A. S. **Variabilidade de Maré Diurna na Região de 80-100 km de Altitude sobre Cachoeira Paulista (22,7° S; 45° O)**. Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Geofísica Espacial. INPE. São José dos Campos-SP. 2007.

TORRENCE, C. and COMPO, G. P. A practical guide to wavelet analysis. **Bulletin of the American Meteorological Society**. V. 79, n1. p. 61-78, 1998.

TSUDA, T.; KATO, S.; MANSON, A. H. and MEEK, C. E. Characteristics of semidiurnal tides observed by the Kyoto meteor radar and Saskatoon medium-frequency radar. **J. Geophys. Res.**, 93, 7027-7036. 1988.

TSUDA, T.; OHNISHI, K.; ISODA, F.; NAKAMURA, T.; VINCENT, R. A.; REID, I. M.; HARIJONO, S. W. B.; SRIBIMAWATI, T.; NURYANTO, A. and WIRYOSUMARTO, H. Coordinated radar observations of atmospheric diurnal tides in equatorial regions, Earth, **Planets and Space**, 51. 579-592. 1999.

VINCENT, R. A. MF/HF radar measurements of the dynamics of the mesopause region a review. **J. Atmos. Terr. Phys**, v. 46, p. 961-974, 1984.

VINCENT, R. A. Long-period motions in the equatorial mesosphere. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 55, n. 7, p. 1067-1080, June 1993.

VINEETH, C.; PANT, T.K.; KUMAR, K.K.; RAMKUMAR, G. and SRIDHARAN, R. Signatures of low latitude-high latitude coupling in the tropical MLT region during sudden stratospheric warming. **Geophys. Res. Lett.** 36, L20104. **Doi:**10.1029/2009GL040375. 2009b.

VOLLAND, H. **Atmospheric Tidal and Planetary Waves**. London: Kluwer Academic Publishers. 1988.

ZHANG, X.; FORBES, J. M. and HAGAN, M. E.: Longitudinal variation of tides in the MLT region: Tides driven by tropospheric net radiative heating. **Journal of Geophysical Research-Space Physics**, 115, A06316, 10.1029/2009JA014897. 2010.

WALLACE, J. M. and KOUSKY, V. E. Observational evidence of Kelvin waves in the tropical stratosphere. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v.25, p. 900-907, 1968.

WALTERSCHEID, R. L. Inertio-gravity wave induced accelerations of mean flow having an imposed periodic component: Implications for tidal observations in the meteor region. **J. of Geophysical Research** 86(C10): 1981. **Doi:** 10.1029/OJGREAO00086000C10009698000001. ISSN: 0148-0227.

WALTERSCHEID, R. L. and VINCENT, R. A. Tidal generation of the phase-locked 2-day wave in the southern hemisphere summer by wave-wave interactions. 1996). **Journal of Geophysical Research**, v. 101. n. D21. p. 26,567-26,576, Nov. 1996.

WILLIAMS, C. R. and AVERY, S. K. Analysis of long-period waves using the mesosphere stratosphere-troposphere radar at Poker Flat, Alaska. **Journal of Geophysical Research**, v. 97, n. D18, p. 855-861, Dec. 1992.

WU, D.; HAYS, P. and SKINNER, W. Observations of the 5-day wave in the mesosphere and lower thermosphere. **Journal of Geophysical Research**, v. 21, p. 2733–2736, 1994.

YOSHIDA, S.; TSUDA, T.; SHIMIZU, A. and NAKAMURA, T. Seasonal variations of 3.0~3.8-day ultra-fast Kelvin waves observed with a meteor wind radar and radiosonde in Indonesia. **Earth Planets Space**, v. 51, n. 7-8, p. 675-684, July 1999.

YOUNGER, P. T. and MITCHELL, N. J. Waves with period near 3 days in the equatorial mesosphere and lower thermosphere over Ascension Island. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 68, n. 3-5, p. 369-378, 2006.

## ANEXOS-A

### Trabalhos publicados/apresentados a partir das investigações desta Tese

III Simpósio Brasileiro de Geofísica Espacial e Aeronomia – SBGEA-2010

01 a 03 de setembro de 2010 – Búzios – RJ

#### **1: Evidências de Interação não linear entre a Maré Atmosférica e a Onda de Quase Dois Dias em Cachoeira Paulista-SP e São João do Cariri-PB: Um estudo de caso.**

ALVES, E. O. [1,2]<sup>10</sup>; LIMA, L. M. [1,2]; MEDEIROS, A.F. [3], BATISTA, P. P. [4];  
CLEMESH, B. R. [4]

[1] Departamento de Física, CCT/UEPB. Campina Grande - PB, Brasil.

[2] Programa de Pós-Graduação da UACA, CTRN/UFCEG. Campina Grande - PB, Brasil.

[3] Unidade Acadêmica de Física, CTRN/UFCEG. Campina Grande - PB, Brasil.

[4] INPE - São José dos Campos - SP, Brasil.

### RESUMO

Neste trabalho realizou-se um estudo da interação não linear entre ondas atmosféricas. Particularmente, tratou-se de um estudo de caso da interação não linear entre a maré atmosférica diurna e a onda de quase dois dias (onda de 2 dias). Os dados utilizados foram obtidos de radar meteorológico no período de julho de 2008 em duas localidades: São João do Cariri-PB e Cachoeira Paulista-SP. A transformada de ondaletas de Morlet foi aplicada para investigar as perturbações ondulatorias observadas nos ventos neutros da região próxima a mesopausa das localidades em questão. As amplitudes e as estruturas de fases referentes a estas oscilações foram obtidas através de análise harmônica. O processo em questão é não estacionário e, como a análise biespectral retém informações da fase e, através dela, é possível identificar processos de interação não linear que podem gerar acoplamentos de fase, então, essa análise foi também usada na pesquisa. Observaram-se indícios de interação não linear entre diferentes frequências e evidências significativas de oscilações com período em torno de 16 horas.

---

<sup>10</sup> Autor para contato: Edvaldo de O. Alves ([eoalves@uepb.edu.br](mailto:eoalves@uepb.edu.br) ; [caboco@uol.com.br](mailto:caboco@uol.com.br))

(Article in press -Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics)

(journal homepage: [www.elsevier.com/locate/jastp](http://www.elsevier.com/locate/jastp)):

## **2: Sudden stratospheric warming effects on the mesospheric tides and 2-day wave dynamics at 7°S**

L. M. Lima<sup>a,\*</sup>, E. O. Alves<sup>a</sup>, P. P. Batista<sup>b</sup>, B. R. Clemesha<sup>b</sup>, A. F. Medeiros<sup>c</sup>, R. A. Buriti<sup>c</sup>

<sup>a</sup>*Dep. Física, Universidade Estadual de Paraíba, UEPB, 58.109-790, Campina Grande-PB, Brazil*

<sup>b</sup>*Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, INPE, Brazil*

<sup>c</sup>*Universidade Federal de Campina Grande, UFCG, Brazil*

### **Abstract**

The equatorial mesospheric dynamics has been investigated during austral summers of 2004-2005, 2005-2006 and 2006-2007 from meteor radar measurements obtained at São João do Cariri, Brazil (7,4°S, 36,5°W), together with stratospheric northern hemisphere polar parameters. Some recent studies have demonstrated coupling between high latitude northern hemisphere major sudden stratospheric warming (SSW) events and mesospheric-ionospheric disturbances, including the equatorial region. Here we have analyzed the tides, quasi-two-day planetary wave and mean local zonal wind variability in the equatorial upper mesosphere and lower thermosphere (MLT) region during three austral summers and found that mesospheric dynamics at 7°S is affected during the major SSW event. The more intense tides and quasi-two-day wave amplitudes during major SSW event are suggestive of an association between them and the high planetary wave activity in the northern stratospheric winter.

\*Corresponding author

Email addresses: [lmlima@uepb.edu.br](mailto:lmlima@uepb.edu.br) (L. M. Lima), [eoalves@uepb.edu.br](mailto:eoalves@uepb.edu.br) (E. O. Alves), [ppbatista@laser.inpe.br](mailto:ppbatista@laser.inpe.br) (P. P. Batista),

[brc@laser.inpe.br](mailto:brc@laser.inpe.br) (B. R. Clemesha), [afragoso@df.ufcg.edu.br](mailto:afragoso@df.ufcg.edu.br) (A. F. Medeiros), [rburiti@df.ufcg.edu.br](mailto:rburiti@df.ufcg.edu.br) (R. A. Buriti)

## ANEXOS-B

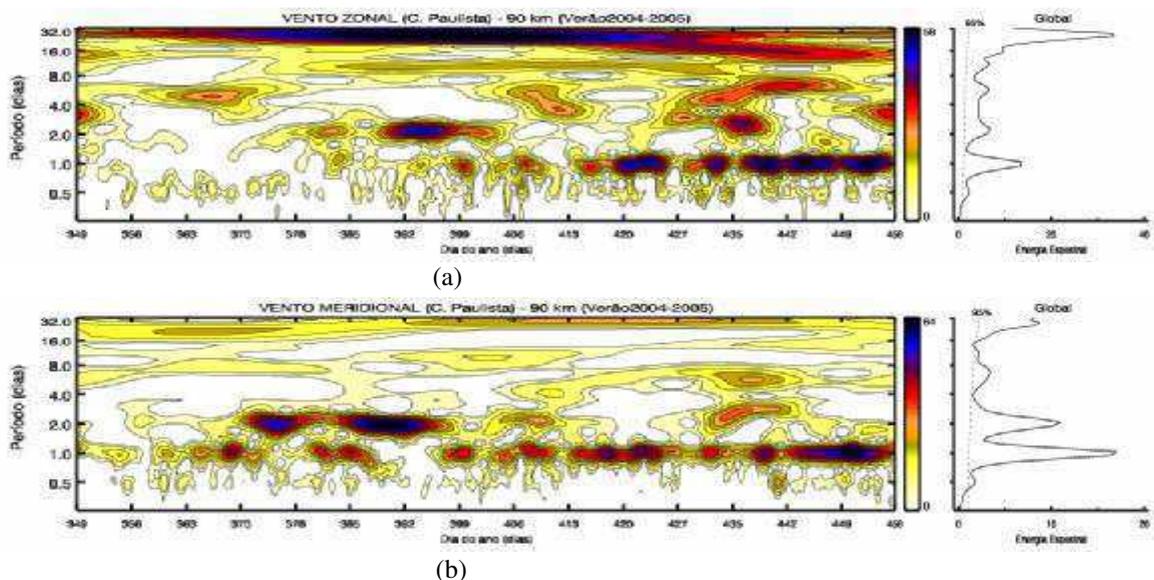
### Observações de episódios de interação não linear ressonante entre modos de marés e Ondas Planetárias presentes nos ventos meteorológicos em Cachoeira Paulista-SP.

A seqüência de resultados apresentada a seguir refere-se às análises em wavelets, Espectro Global de Energia, Densidade de Potência Espectral (PSD) e Análise Biespectral dos ventos meteorológicos, obtidos em Cachoeira Paulista-SP, para as quatro estações do ano entre 2004 e 2008.

#### 1. Estação de Verão

##### 1.1. Verão 2004-2005

Na Figura 80 estão representados os espectros em wavelets nas componentes zonal, Figura 80(a), e meridional, Figura 80(b), dos ventos meteorológicos de Cachoeira Paulista-SP na altitude de 90 km para o verão que se inicia em 2004.



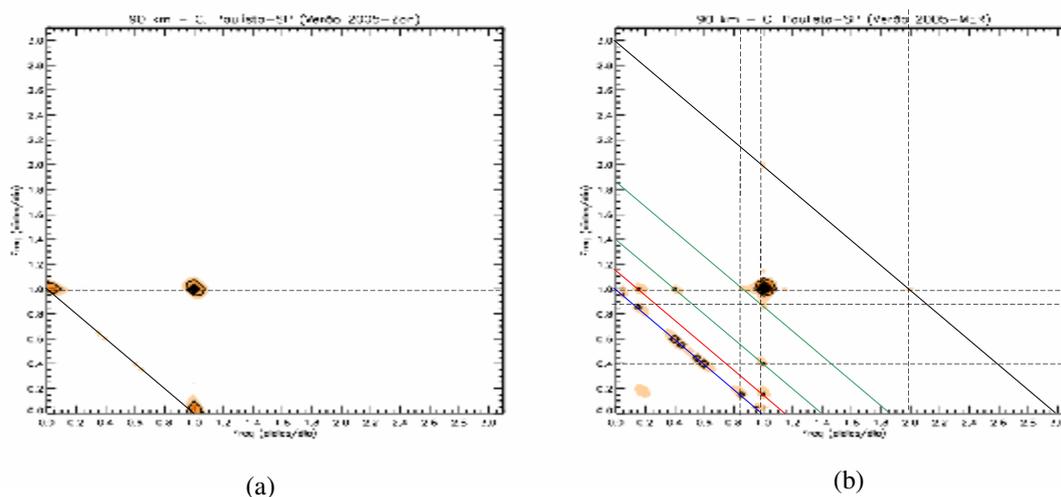
**Figura 80** – Espectros de energia em wavelets do vento meteorológico no verão 2005, em Cachoeira Paulista-SP, para 90 km de altitude. (a) zonal; (b) meridional; e da Energia Espectral Global (direita).

Em ambas as componentes, meridional e zonal, observam-se núcleos intensos para a QTDW e, principalmente, para maré diurna. Na componente zonal, Figura 80(a), existe densidade de energia intensa nas periodicidades de ~27 dias, de ~12-20 dias e de ~5-7 dias. É possível se observar presença de energia para a maré semidiurna. Na componente meridional, Figura 80(b), as oscilações com periodicidades maiores que a periodicidade da QTDW são

menos intensas que as da componente zonal. Nos intervalos entre os dias 388 e 404 na componente zonal, e entre os dias 370 e 398 na componente meridional, observa-se a presença intensa da QTDW e, nestes mesmos intervalos, os núcleos referentes à maré diurna são menos intensos. A QTDW se mostra mais intensa, em ambas componentes, no mês de janeiro. A maré diurna é um evento mais intenso e regular a partir do mês de fevereiro até o final da estação.

Através dos resultados da análise biespectral para a componente zonal, Figura 81(a), observam-se núcleos correspondentes as frequências, em ciclos por dia, para as tríades, (0,06; 0,94; 1,0), (0,4; 0,6; 1,0) e (0,35; 0,65; 1,0) que correspondem às interações ressonantes entre as ondas: (1) ~16 dias e duas marés diurnas; (2) duas QTDW e a maré diurna; e (3) ~3-4 dias, ~36 horas e a maré diurna.

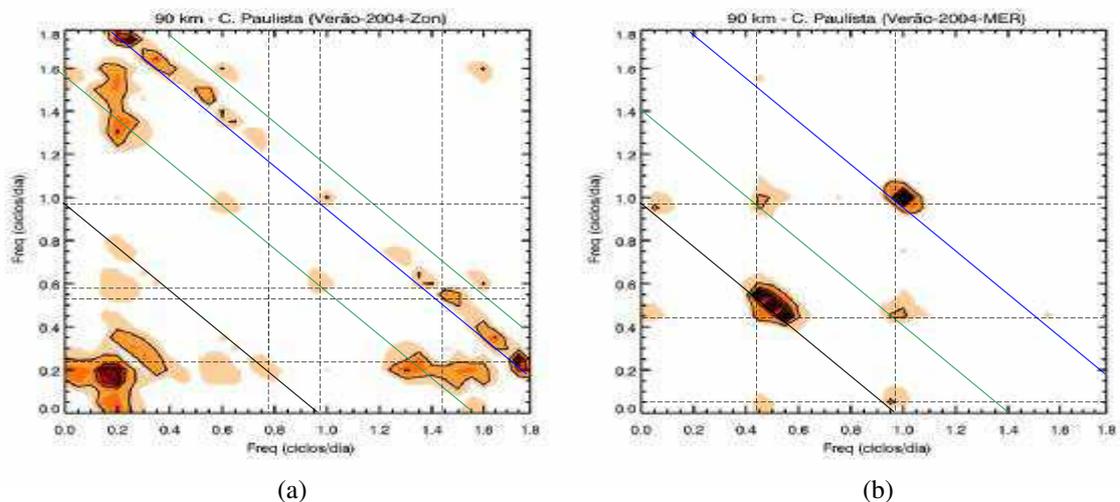
Observa-se que na componente meridional, Figura 81(b), existe um núcleo correspondente a tríade (0,45; 1,0; 1,45) que pode ser interpretada como uma interação não linear ressonante entre a QTDW e a maré diurna resultando na onda de ~16 horas. Ainda, nesta figura, observam-se as seguintes tríades (0,15; 0,85; 1,0), (0,4; 0,6; 1,0), (0,45; 0,55; 1,0), (0,2; 1,0; 1,2) (0,9; 1,0; 1,9) e (1,0; 2,0; 3,0). Estas tríades podem ser interpretadas como interações não lineares ressonantes entre, respectivamente, as oscilações: (1) 6,5 dias, ~30 horas e maré diurna; (2) duas QTDW de períodos ligeiramente diferentes e maré diurna; (3) 6,5 dias, maré diurna e ~20 horas; (4) duas periodicidades de marés diurnas e maré semidiurna; e (5) maré diurna, maré semidiurna e maré terdiurna.



**Figura 81** – Análise biespectral, com limite das frequências ampliados, para as componentes do vento meteorológico no verão 2005, em Cachoeira Paulista – SP, em 90 km de altitude. (a) zonal; (b) meridional.

Na Figura 82 são mostrados também os resultados da análise biespectral para os ventos meteorológicos de Cachoeira Paulista-SP para o verão 2004, mas com a redução dos limites de frequências para melhorar a resolução. Na componente zonal, Figura 82(a), observam-se os seguintes núcleos de interações não lineares ressonantes: (0,2; 0,8; 1,0), (0,6; 1,6; 1,0), (0,2; 1,8; 2,0) e (0,4; 1,6; 2,0). Estas tríades correspondem, respectivamente, as seguintes interações: (1) ~5 dias, ~30 horas e maré diurna; (2) QTDW, ~16 horas e maré diurna; (3) ~5 dias, ~13 horas e maré semidiurna; e (4) QTDW, ~16 horas e maré semidiurna.

Na componente meridional, Figura 82(b), encontram-se os núcleos: (0,06; 0,94; 1,0), (0,45; 1,45; 1,0); (0,45; 0,55; 1,0); e (0,4; 1,6; 2,0), correspondendo às seguintes interações: (1) ~16 dias e duas marés; (2) QDTW, ~16 horas e maré diurna; (3) duas QTDW e maré diurna; e (4) QTDW, ~16 horas e maré semidiurna.



**Figura 82** – Análise biespectral para as componentes do vento meteorológico no verão 2005, em Cachoeira Paulista – SP, para 90 km de altitude. (a) zonal; (b) meridional;

Na Figura 83 apresenta-se, através do periodograma de Lomb-Scargle, a Densidade de Potência Espectral (PSD), no intervalo entre os dias 25/dez/2004 e 25/jan/2005. Cada gráfico corresponde a uma série de dados com 7 dias (1 semana) de comprimento. Para a componente zonal, Figura 83(a), observam-se os seguintes picos de densidade de energia acima do nível de significância de 95%: maré semidiurna, ~16 horas, 20 horas, maré diurna, QTDW e ~3,5 dias. O comportamento do pico referente à maré semidiurna, inicialmente apresenta-se com intensidade abaixo do nível de significância, em seguida ele se intensifica e volta a diminuir no final do período considerado. Neste mesmo intervalo, a QTDW apresenta um pico muito intenso e depois vai diminuindo até ficar abaixo do nível de significância. Por outro lado, o

pico da maré diurna é inicialmente intenso, depois ele aumenta um pouco e, em seguida, diminui, mas mantendo-se sempre acima do nível de significância. Durante todo período considerado, identifica-se um pico de ~16 horas e outro de ~20 horas e, este último, aumenta com o passar do tempo. Considerando-se as ondas primárias (maré, QTDW e ~3-4 dias), e o comportamento destas ondas ao longo do período, sugere-se que os picos relevantes correspondentes às ondas secundárias (~16 horas e ~20 horas) presentes na PSD são resultantes das possíveis interações:

- (1) ~16h → DT e QTDW → (soma das frequências)
- (2) ~16h → ST e QTDW → (subtração das frequências)
- (3) ~20h → DT e ~5-7 dias → (soma das frequências)

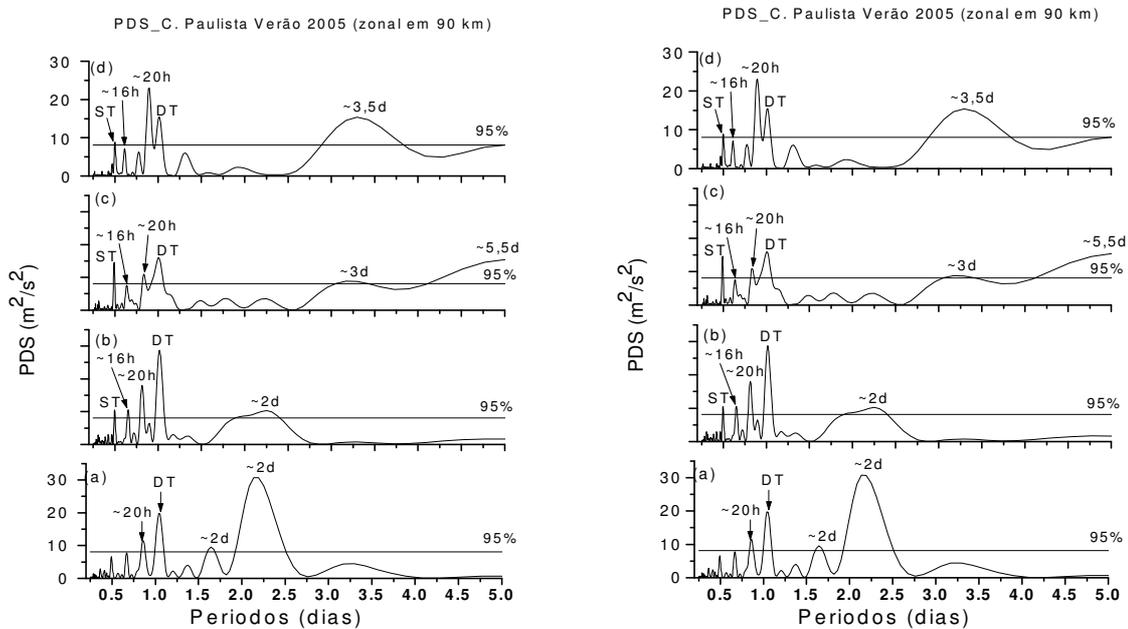
Como a análise biespectral não mostra quaisquer núcleos significativos que indiquem a interação não linear entre a maré semidiurna e a QTDW é razoável supor que esta onda de ~16 horas é mais provável resultar da interação não linear entre a maré diurna e a QTDW.

Na Figura 83(b) tem-se a PSD para a componente meridional, nela observam-se picos referentes às periodicidades: maré semidiurna, ~16 horas, ~20 horas, maré diurna, ~27 horas, ~32 horas, QTDW e ~3-4 dias. As oscilações secundárias (~16, ~20, ~27 e ~32 horas) são resultantes possivelmente das seguintes interações ressonantes entre as ondas primárias:

- (1) ~16h → DT e QTDW → (soma das frequências)
- (2) ~20h → DT e ~ 5-7 dias → (soma das frequências)
- (3) ~27h → DT e ~ 8-10 dias → (subtração das frequências)
- (4) ~32h → DT e ~ 3-4 dias → (subtração das frequências)

O biespectro da Figura 82(b) mostra um núcleo muito tênue para a tríade ressonante maré diurna, maré semidiurna e maré terdiurna. Todos os periodogramas de Lomb-Scargle para o período (aqui apenas apresentado a PSD entre 25/dez/2004 e 25/jan/2005) não mostraram um pico significativo para a maré terdiurna. Isto é um indício de que esta interação, embora existindo, não é tão significativa neste período.

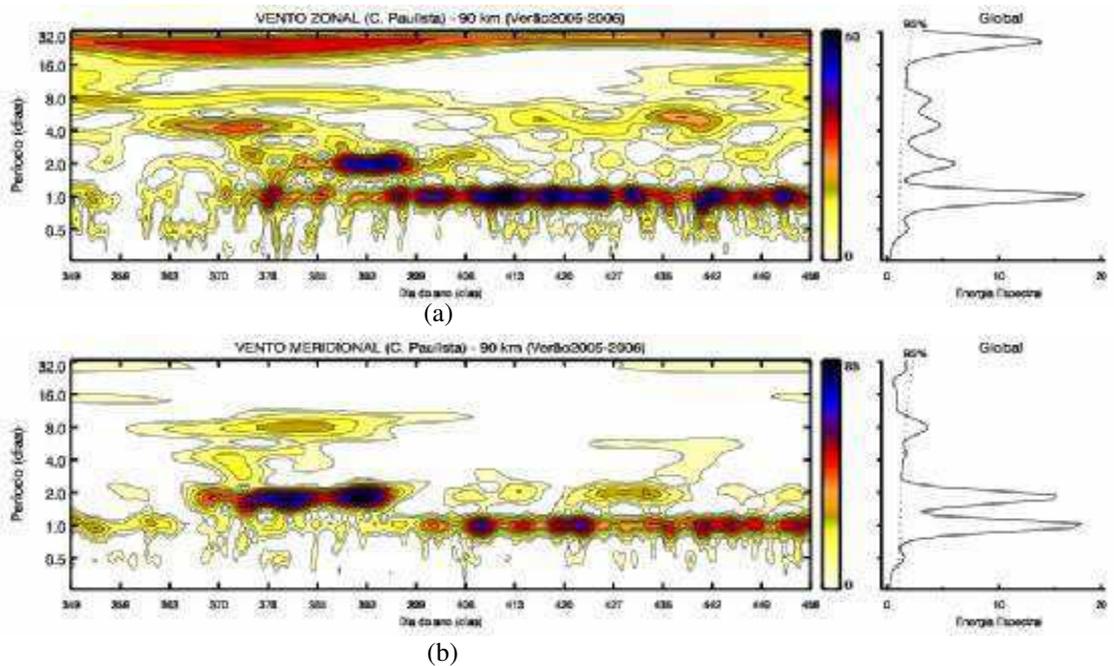
Os picos significativos referentes às oscilações secundárias de ~20 horas, ~27 horas e ~30 horas, detectadas através da PSD, concordam com núcleos, de interação não linear, detectados através do biespectro e que envolvem a maré diurna e periodicidades de Ondas Planetárias presentes nas componentes dos ventos meteorológicos de Cachoeira Paulista-SP.



**Figura 83** – Periodograma de Lomb-Scargle (PSD) para as componentes do vento meteorológico no verão 2005 em C. Paulista-SP para 90 km de altitude. (a) zonal; (b) meridional. Cada gráfico corresponde a uma semana (07 dias) de dados no intervalo entre os dias 25/dez/2004 e 25/jan/2005.

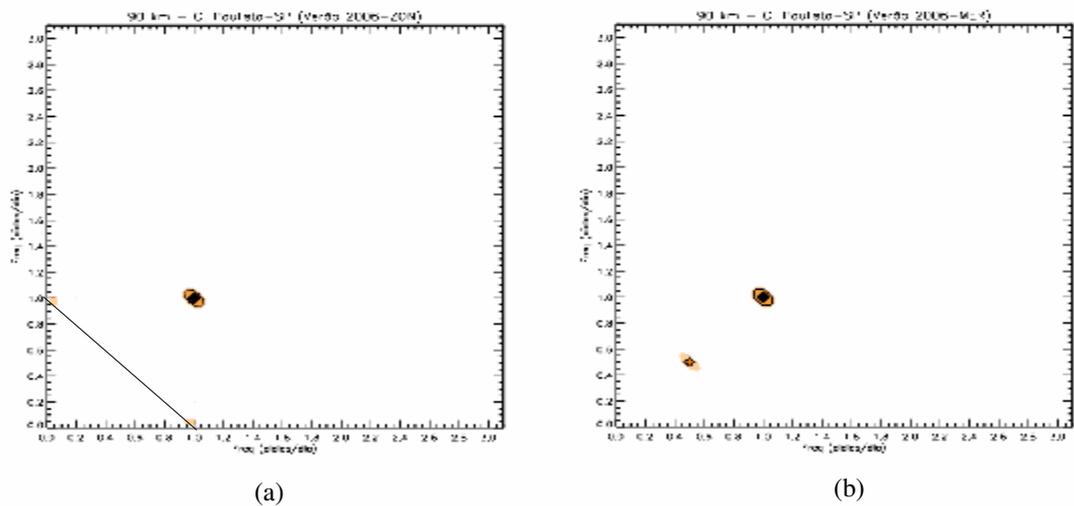
## 1.2. Verão 2005-2006

Os resultados da análise em wavelets mostrados na Figura 84 referem-se ao verão iniciado em 2005. Nele verifica-se, em ambas componentes, a presença de núcleos intensos para a QTDW e, principalmente, para maré diurna. Na componente zonal, Figura 84(a), existem, também, periodicidades próximas de 27 dias, periodicidades de ~8-10 dias e alguma energia de ~5-7 dias. Não se observa praticamente quaisquer energias para estas periodicidades na componente meridional. É possível se observar ainda a presença menos intensa da maré semidiurna. Na componente meridional, Figura 84(b), as oscilações de periodicidades maiores que a QTDW aparecem menos intensa que na componente zonal. Nos intervalos entre os dias 388 e 400 para a componente zonal e entre os dias 370 e 396 para a meridional observa-se a presença forte da QTDW e, nestes mesmos intervalos, os núcleos referentes à maré diurna se apresentam menos intensos. A QTDW se mostra mais intensa, em ambas componentes, no mês de janeiro. A maré diurna é um evento mais intenso e regular a partir do mês de fevereiro até o final da estação de verão.

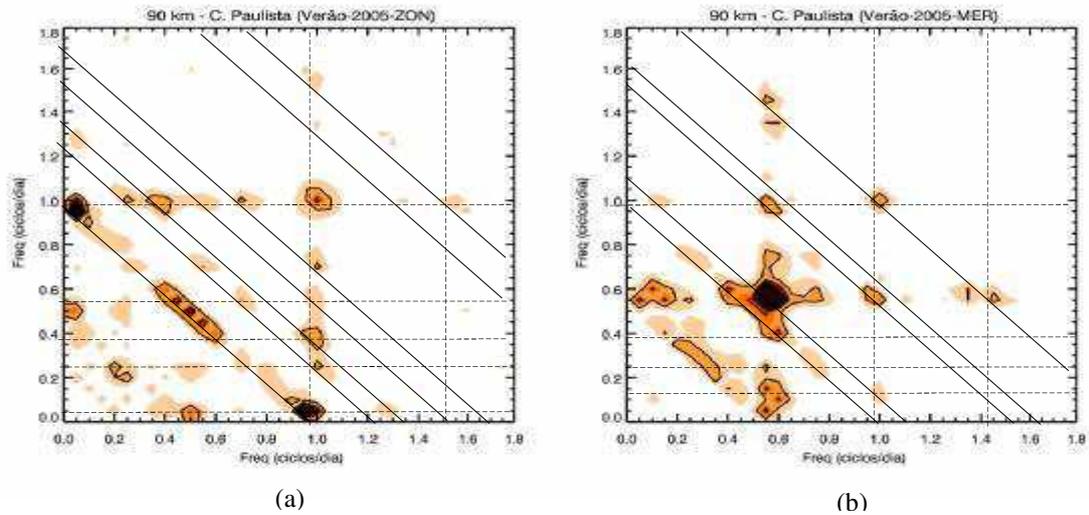


**Figura 84** – Espectros de energia em wavelets do vento meteorológico no verão 2006, em Cachoeira Paulista-SP, para 90 km de altitude. (a) zonal; (b) meridional; e da Energia Espectral Global (direita).

Nos resultados da análise biespectral, mostrados através das Figuras 85 e 86, identificam-se os núcleos de possíveis interações não lineares envolvendo maré atmosférica: (a) na componente zonal tem-se, em ciclos por dia, (0,06; 0,94; 1,0), (0,25; 1,0; 1,25), (0,4; 1,0; 1,4), (0,55; 1,0; 1,55), (0,7; 1,0; 1,7), (1,0; 1,35; 2,35), (1,0; 1,55; 2,55); (b) e na componente meridional tem-se (0,25; 0,75; 1,0), (0,1; 1,0; 1,1), (0,65; 1,0; 1,65), (0,4; 0,6; 1,0), (0,55; 1,0; 1,55).



**Figura 85** – Análise biespectral para as componentes do vento meteorológico no verão 2006 em C. Paulista - SP para 90 km de altitude. (a) zonal; (b) meridional.

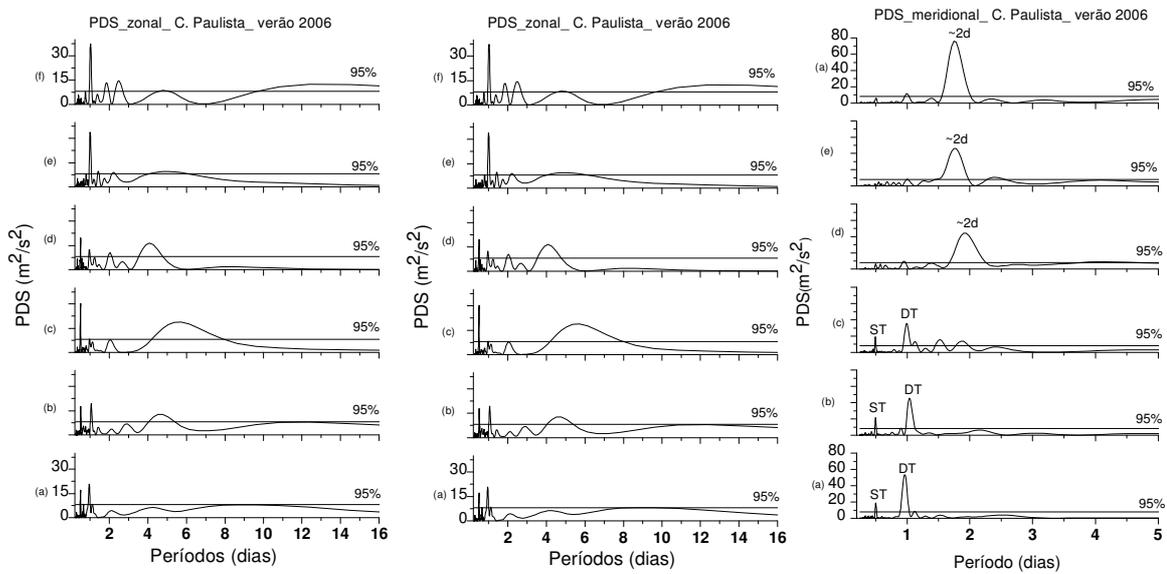


**Figura 86** – Análise biespectral para as componentes do vento meteorológico no verão 2006 em C. Paulista - SP para 90 km de altitude. (a) zonal; (b) meridional.

Na PSD, Figura 87, encontram-se picos significativos na componente meridional, para a maré diurna, maré semidiurna, QTDW, ~3-5 dias, ~5-7 dias e ~12-20 dias. Na componente zonal encontram-se picos para maré diurna, maré semidiurna e QTDW. Picos secundários abaixo do nível de significância de 95% são identificados para ~16 horas, maré semidiurna, ~20 horas e ~30 horas. Estas oscilações são possíveis através de interações não lineares ressonantes da seguinte forma:

- (1) ~8h (TT)  $\rightarrow$  ST e DT  $\rightarrow$  (soma das frequências)
- (2) ~16h  $\rightarrow$  ST e QTDW  $\rightarrow$  (subtração das frequências)
- (3) ~16h  $\rightarrow$  DT e QTDW  $\rightarrow$  (soma das frequências)
- (4) ~20h  $\rightarrow$  DT e ~5-7 dias  $\rightarrow$  (soma das frequências)
- (5) ~30h  $\rightarrow$  DT e ~3-5 dias  $\rightarrow$  (subtração das frequências)

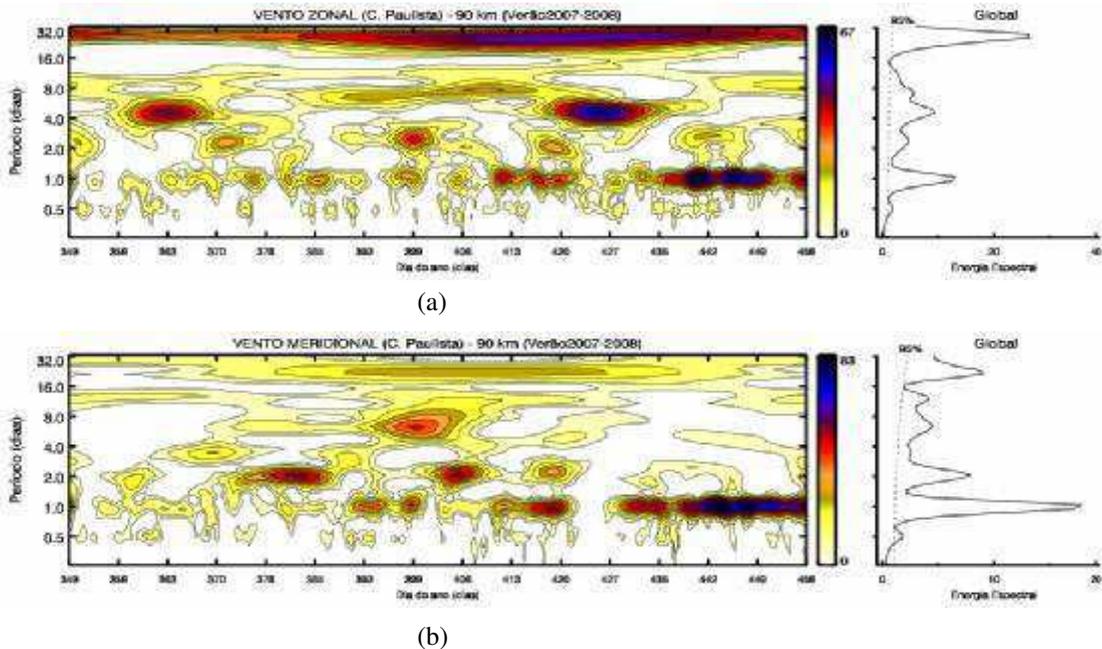
Como a análise biespectral não revelou quaisquer núcleos significativos que indiquem a interação não linear entre a maré semidiurna e a QTDW é mais razoável supor que a onda de ~16 horas é resultante da interação não linear ressonante entre a maré diurna e a QTDW. O biespectro na Figura 86 não aponta um núcleo para a tríade ressonante maré diurna, maré semidiurna e maré terdiurna. Todos os periodogramas de Lomb-Scargle para o período não mostraram um pico significativo para a maré terdiurna.



**Figura 87** –Periodograma de Lomb-Scargle para as componentes do vento meteorológico no verão 2006 em C. Paulista - SP para 90 km de altitude. (esquerda) e (centro) zonal; (direita) meridional. Cada gráfico corresponde a uma semana (07 dias) de dados no intervalo entre o dia 15/dez/2005 e 25/jan/2006.

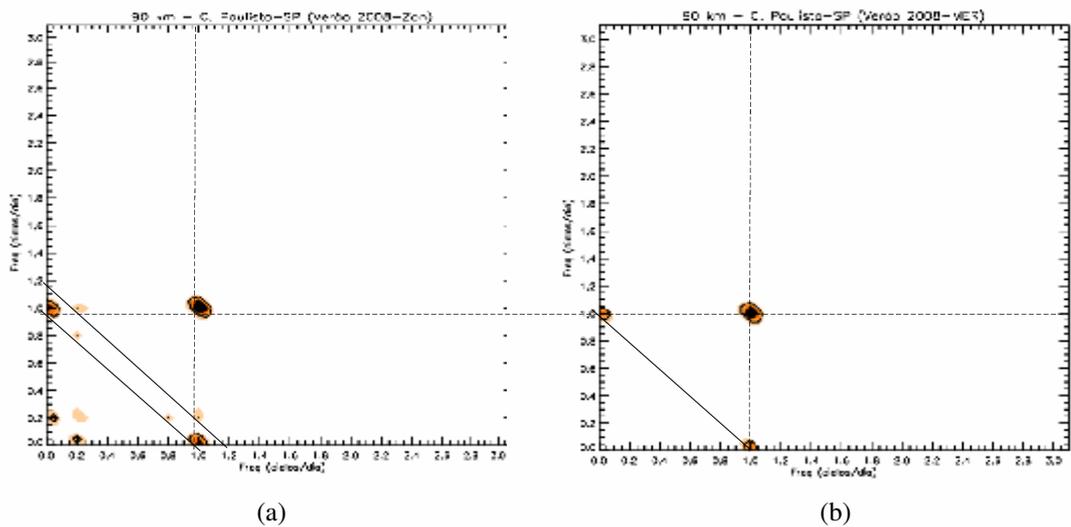
### 1.3. Verão 2007-2008

Os resultados da análise em wavelets mostrados na Figura 88 referem-se ao verão iniciado em 2007. Nele verifica-se de forma semelhante aos verões anteriores, em ambas componentes, a presença de núcleos intensos para a QTDW e para maré diurna. Na componente zonal, Figura 88(a), existem também periodicidades de ~27 dias, de ~8-10 dias e energias em torno de ~5-7 dias. Novamente observa-se a presença menos intensa da maré semidiurna. Na componente meridional, as oscilações de periodicidades maiores que a QTDW aparecem menos intensa que na componente zonal. Nos intervalos entre os dias 357 e 370 e entre os dias 417 e 435, para o componente zonal, observam-se dois núcleos intensos para a periodicidade de ~5-7 dias e, nestes intervalos, tanto a maré diurna como a QTDW são menos intensas. Ainda nesta componente encontram-se períodos de alternância da intensidade da maré com a QTDW. Para a componente meridional, Figura 88(b), entre os dias 362 e 408, observa-se a presença intensa de energia na periodicidade de ~5-7 dias. Nesta mesma componente, novamente, repetem-se as alternâncias de intensidades entre a maré diurna e QTDW. A QTDW se mostra mais intensa, em ambas componentes, no mês de janeiro. A maré diurna é um evento mais intenso e regular a partir do mês de fevereiro até o final da estação de verão.

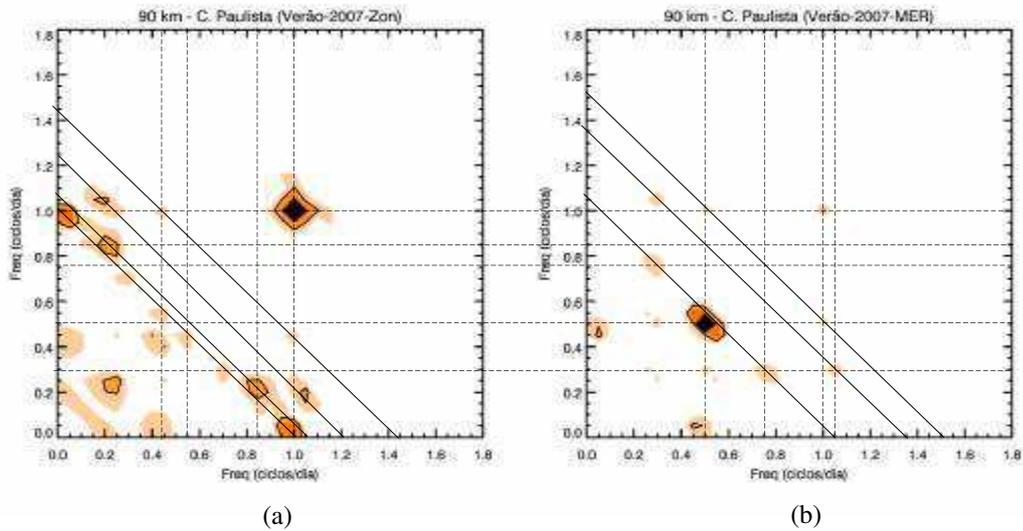


**Figura 88** – Espectros de energia em wavelets do vento meteorológico no verão 2007, em Cachoeira Paulista-SP, para 90 km de altitude. (a) zonal; (b) meridional; e da Energia Espectral Global (direita).

Nas Figuras 89 e 90 têm-se os resultados das análises biespectrais para o verão 2008. Neles identificam-se os seguintes núcleos de possíveis interações não lineares envolvendo maré atmosférica: (a) na componente zonal tem-se (0,06; 0,94; 1,0), (0,2; 1,0; 1,2), (0,25; 0,8; 1,05), (0,45; 1,0; 1,45), (0,3; 0,75; 1,05), (0,45; 0,55; 1,0); (b) e na componente meridional tem-se (0,06; 0,94; 1,0), (0,5; 1,0; 1,5), (0,3; 1,0; 1,3).

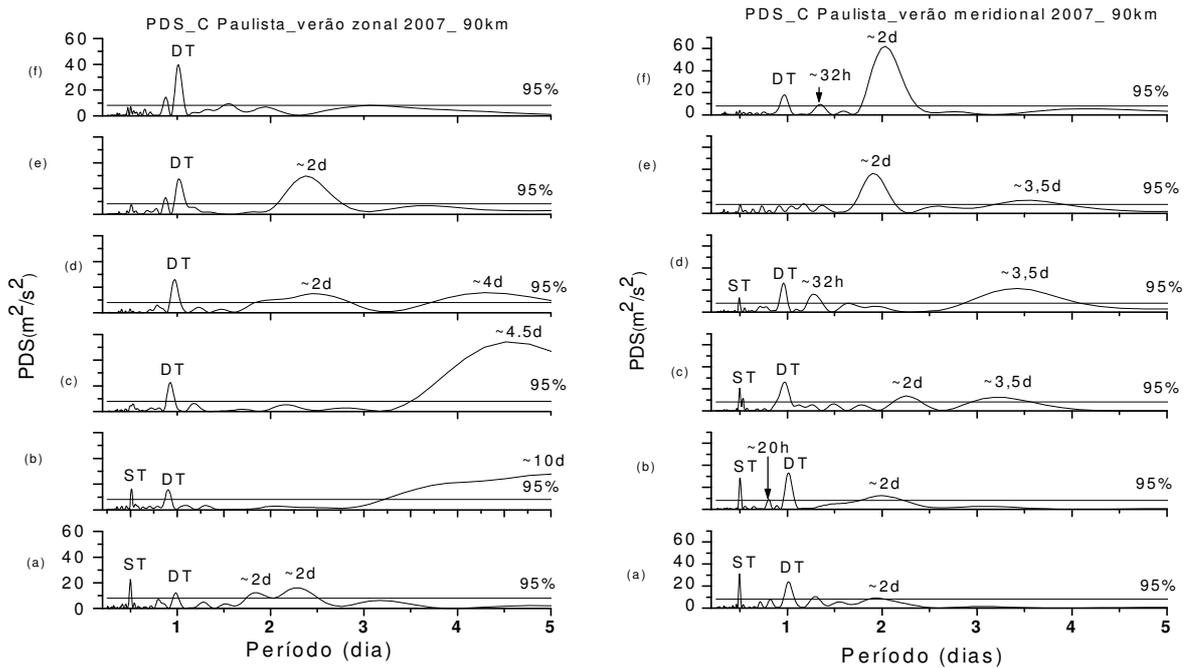


**Figura 89** – Análise biespectral para as componentes do vento meteorológico no verão 2007, em Cachoeira Paulista – SP, para 90 km de altitude. (a) zonal; (b) meridional.



**Figura 90** – Análise biespectral para as componentes do vento meteorológico no verão 2007 em C. Paulista - SP para 90 km de altitude. (a) zonal; (b) meridional.

Os núcleos observados apontam interações não lineares ressonantes que produzem oscilações secundárias com periodicidades de ~16 horas, ~20 horas e ~32 horas. As PSD para este período estão representadas na Figura 91 e, dentre as oscilações secundárias encontradas nas tríades, na componente meridional, observam-se picos acima do nível de significância para as oscilações de ~20 horas e ~32 horas.



**Figura 91** –Periodograma de Lomb-Scargle para as componentes do vento meteorológico no verão 2007, em Cachoeira Paulista – SP, para 90 km de altitude. (esquerda) zonal e (direita) meridional. Cada gráfico corresponde a uma semana (07 dias) de dados no intervalo entre os dias 15/dez/2007 e 25/jan/2008.

Os resultados obtidos das análises para interação não linear ressonante entre a maré e Ondas Planetárias, presentes nas componentes zonal e meridional dos ventos meteorológicos em Cachoeira Paulista-SP para a estação de verão, apontam o surgimento das periodicidades secundárias de ~16h, ~20h e ~30h e, com menor quantidade de casos detectados e com baixas intensidades, eventos referentes à maré terdiurna (TT).

A partir da análise biespectral, estas periodicidades encontradas apontam que as possíveis interações não lineares ressonantes são:

- (1) ~8 horas (TT) → ST e DT → (soma das frequências)
- (2) ~16 horas → DT e QTDW → (soma das frequências)
- (3) ~20 horas → DT e ~5–7 dias → (soma das frequências)
- (4) ~30 horas → DT e ~3–5 dias → (subtração das frequências)

No verão observa-se que a amplitude da maré sofre variações em períodos de Ondas Planetárias, as quais são atribuídas ao processo de interação não linear ressonante. Verifica-se também, de forma acentuada, a alternância de intensidades entre a maré diurna e a QTDW e, isto, reforça os indícios da interação não linear entre estas oscilações. Dos resultados para os eventos de interação não linear ressonante envolvendo as marés diurna, semidiurna e terdiurna, verifica-se que esta interação não é um fenômeno regular e, portanto, sugere-se que esta ressonância é de menor importância para a variabilidade da amplitude da maré.

Outra interação importante para a variabilidade da maré é a interação com a oscilação de ~5-7 dias, a qual faz surgir a onda secundária de ~20 horas. Embora, com menor frequência de ocorrências que aquela envolvendo a maré e a QTDW, a interação da maré com a periodicidade de ~3-4 dias também contribui para a variabilidade da maré. Alguns eventos de periodicidades observadas nas análises biespectrais sugerem ser resultantes de interações não lineares entre a maré e as ondas secundárias. Como exemplo pode-se citar as tríades ressonantes: (1,0; 1,35; 2,35) e (1,0; 1,55; 2,55), Figura 86(b), na componente meridional do verão 2006. Elas, possivelmente, surgem através das seguintes duas etapas:

- (1) DT e ~3-4 dias (soma de frequências) → ~18 horas  
DT e a onda secundária de ~1,35 dias (soma de frequências) → ~10 horas
- (2) DT e QTDW (soma de frequências) → ~16 horas  
DT e a onda secundária de ~1,55 dias (soma de frequências) → ~9 horas

Embora estas possíveis tríades tenham sido identificadas através da análise biespectral, picos significativos referentes a elas não foram detectados através da PSD. Os resultados das análises biespectrais revelaram interações da maré com Ondas Planetárias cujas periodicidades variam entre 0,5 e 20 dias. Nas Tabelas 01 e 02 apresenta-se um resumo dos episódios de interação não linear ressonante detectados nos verões estudados entre 2004 e 2008.

**Tabela 22.** Episódios identificados através da análise biespectral como interação não linear ressonante entre a maré diurna e outras ondas nos ventos meteorológicos em 90 km para os verões de Cachoeira Paulista – SP.

	Zonal						Meridional					
	Período das outras ondas (dias)						Período das outras ondas (dias)					
	0,5	2	3-4	5-7	10	12-20	0,5	2	3-4	5-7	10	12-20
2005	Sim	Sim	Sim	Sim	-	Sim	Sim	Sim	-	Sim	-	Sim
2006	-	Sim	Sim	Sim	-	Sim	-	Sim	Sim	-	Sim	-
2007	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2008	-	Sim	Sim	Sim	-	Sim	-	Sim	Sim	-	-	Sim

**Tabela 23.** Episódios identificados através da análise biespectral como interação não linear ressonante entre a maré semidiurna e outras ondas nos ventos meteorológicos em 90 km para os verões de Cachoeira Paulista – SP.

	Zonal						Meridional					
	Período das outras ondas (dias)						Período das outras ondas (dias)					
	1	2	3-4	5-7	10	12-20	1	2	3-4	5-7	10	12-20
2005	Sim	Sim	-	Sim	-	-	-	Sim	-	-	-	-
2006	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2007	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2008	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Os resultados das análises dos dados de eventos meteorológicos de Cachoeira Paulista-PB, entre os anos de 2004 e 2008, para a estação de verão em 90 km de altitude, permitem colocar os seguintes aspectos:

(i) Através dos espectros em wavelets observa-se que os núcleos para a QTDW se mostram bastante intensos, em ambas componentes, em todos os janeiros investigados. Ele é mais intenso na componente meridional que na zonal. A maré diurna é um evento mais intenso e regular a partir de fevereiro até o final do verão. Em ambas as componentes, mais intensamente na componente zonal, detectam-se periodicidades próximas de 27 dias, ~12-20 dias, ~8-10 dias e de ~5-7 dias. É possível se observar ainda núcleos referentes à oscilação de ~3-4 dias e também a presença menos intensa da maré semidiurna.

(ii) Através dos resultados das análises biespectrais e das PSD encontra-se que a interação não linear ressonante entre a maré diurna e a QTDW é o evento de maior ocorrência e mais importante para a variabilidade da amplitude da maré em ambas as componentes dos

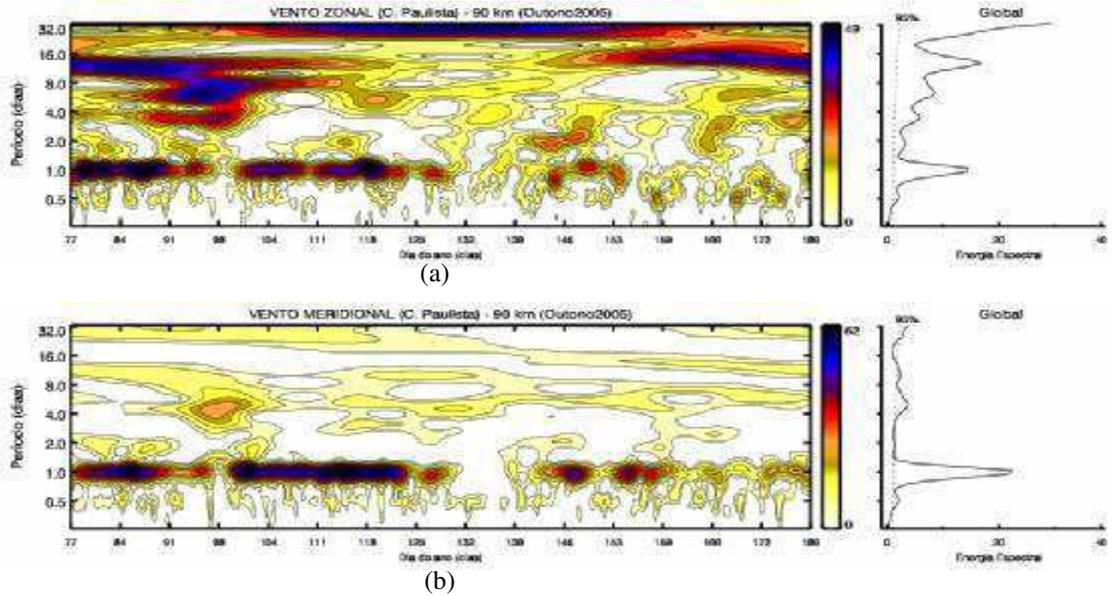
ventos na estação de verão. Eventos de interação não linear envolvendo as marés, diurna e semidiurna, resultando na maré terdiurna não se revelaram regulares e frequentes. Quando detectados, as intensidades da maré terdiurna não foram encontradas acima do nível de significância de 95%, exceto para os eventos ocorridos no verão de 2005-2006 (verão 2005) em que o pico da maré terdiurna aparece muito próximo ao limite do nível de significância.

(iii) Interações não lineares ressonantes envolvendo marés e periodicidades de ~3-4 dias, ~5-7 dias, ~8-10 dias e ~12-20 dias foram detectadas. Estas interações produzem, de forma geral, ondas secundárias com periodicidades entre ~18 e ~32 horas. Destaque para a oscilação de ~20 horas, resultante, por soma das frequências, da interação não linear entre a maré diurna e a onda de ~5-7 dias as quais foram detectadas em todos os verões estudados e, em menor quantidade de detecções, da oscilação de ~30 horas resultante da subtração entre estas ondas primárias. As demais periodicidades foram detectadas, mas não foram regulares para todos os verões

## **2. Estação de outono**

### **2.1. Outono 2005**

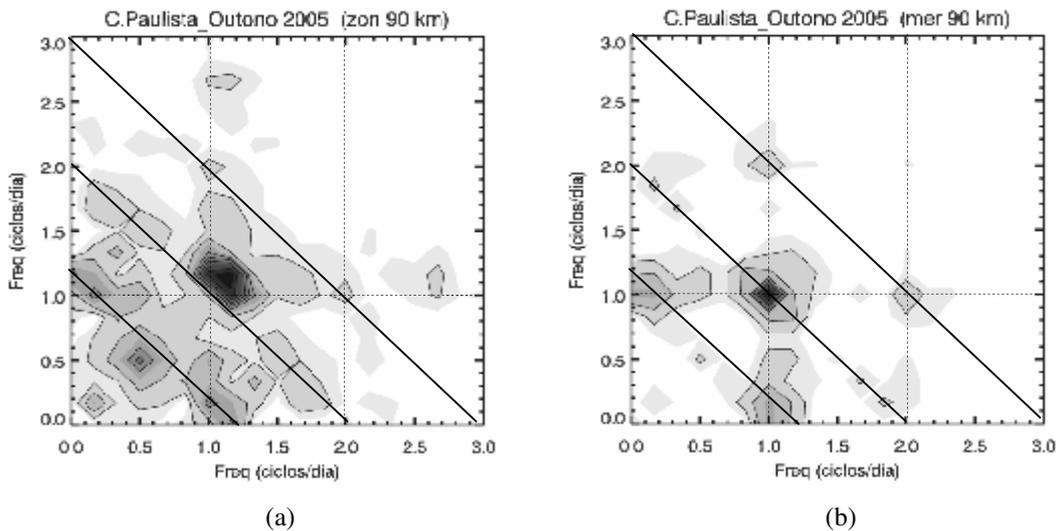
Os resultados da análise em wavelets na Figura 92 referem-se ao outono de 2005. Nele verifica-se, em ambas componentes, a presença de núcleos intensos para maré diurna. Na componente zonal, Figura 92(a), observa-se densidade de energia nas periodicidades de ~27 dias, ~8-10 dias, ~5-7 dias e ~3-4 dias. No intervalo entre aproximadamente os dias 87 e 100, observam-se núcleos intensos de ~3-4 dias e ~5-7 dias e, neste intervalo, a maré diurna se apresenta fraca, mostrando evidências de anticorrelação entre elas. Na componente meridional, Figura 92(b), apenas a maré se revela com grande intensidade. As demais oscilações apresentam apenas alguma energia. É possível se observar ainda a presença menos intensa da maré semidiurna. Nesta estação, para a QTDW, em ambas componentes, embora exista densidade de energia espectral, verificam-se poucos núcleos intensos comparativamente com a maré e, isto, constata-se também através do espectro global de energia. A maré diurna é um evento mais intenso e regular a partir do início do outono e continua até o início do mês de maio por volta do dia 130, No intervalo entre aproximadamente os dias 94 e 100, observa-se o núcleo de ~3-4 dias, intervalo em que a maré diurna se apresenta fraca.



**Figura 92** – Espectros de energia em wavelets do vento meteorológico no outono 2005 em C. Paulista-SP para 90 km de altitude. (a) zonal; (b) meridional; e da Energia Espectral Global (direita).

Na Figura 93, encontra-se o biespectro para o outono 2005, nele observam-se núcleos referentes à interação não linear envolvendo modos de marés. Na componente zonal, Figura 93(a), as possíveis tríades ressonantes são:

- (a) (0,2; 1,0; 1,2)  $\Rightarrow$  ~5 dias, DT e ~20 horas
- (b) (0,25; 1,75; 2,0)  $\Rightarrow$  ~4 dias, ST e ~13,7 horas
- (c) (0,5; 1,5; 2,0)  $\Rightarrow$  QTDW, ST e ~16 horas
- (d) (1,0; 2,0; 3,0)  $\Rightarrow$  DT, ST e TT

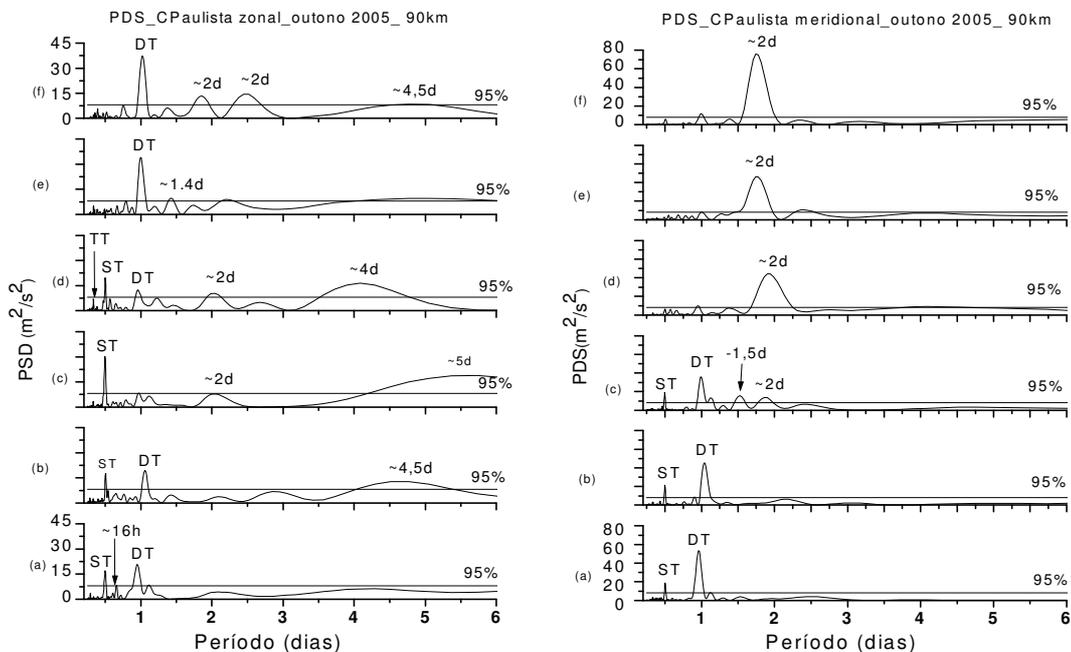


**Figura 93** – Análise biespectral para as componentes do vento meteorológico no outono 2005 em C. Paulista - SP para 90 km de altitude. (a) zonal; (b) meridional.

Na componente meridional, Figura 93(b), as possíveis tríades ressonantes são:

- (a) (0,15; 1,0; 1,15)  $\Rightarrow$   $\sim$ 6,5 dias, DT e  $\sim$ 21 horas
- (b) (0,15; 1,85; 2,0)  $\Rightarrow$   $\sim$ 6,5 dias, ST e  $\sim$ 13 horas
- (c) (0,5; 1,5; 2,0)  $\Rightarrow$  QTDW, ST e  $\sim$ 16 horas
- (d) (1,0; 2,0; 3,0)  $\Rightarrow$  DT, ST e TT

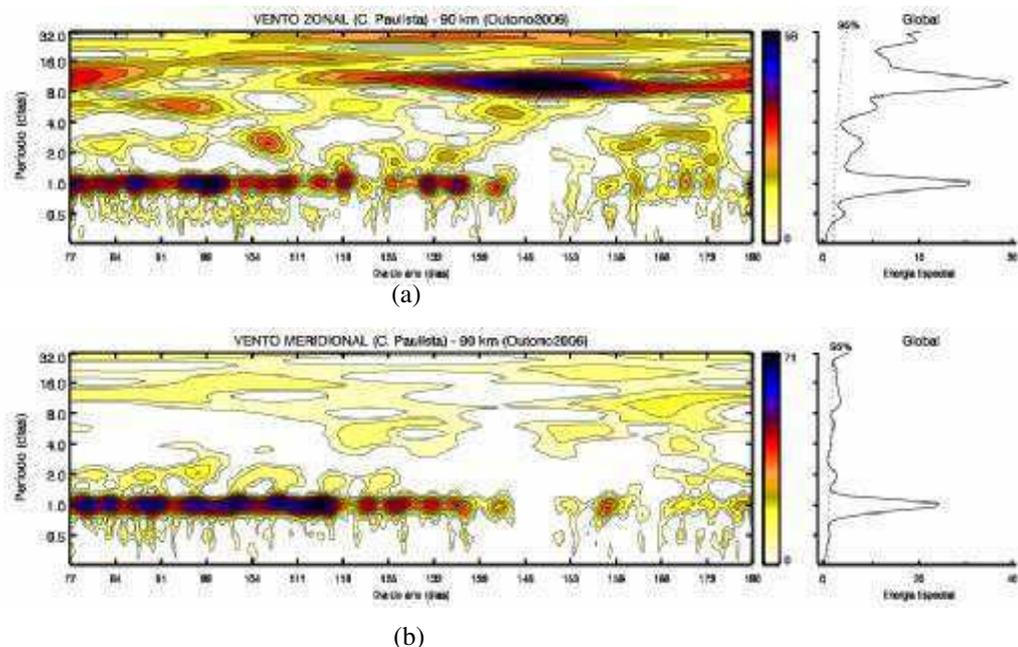
Os periodogramas de Lomb-Scargle, no intervalo entre os dias 18/mar e 28/abr/2005, encontram-se na Figura 94. Para a componente zonal, Figura 94(a), observam-se picos para maré terdiurna e de  $\sim$ 16 horas em períodos que a maré semidiurna é significativa. Os comportamentos do período e da intensidade da QTDW e da maré diurna indicam que estas ondas secundárias são resultantes da interação da maré semidiurna com, respectivamente, a QTDW e com a maré diurna. Nesta componente têm-se picos para oscilações de  $\sim$ 4 dias Na Figura 94(b), para a componente meridional



**Figura 94** – Periodograma de Lomb-Scargle para as componentes do vento meteorológico no outono de 2005 em C. Paulista-SP para 90 km de altitude. (Esquerda) zonal; (direita) meridional. Cada gráfico corresponde a uma semana (07 dias) de dados no intervalo entre os dias 18/mar e 28/abr/2005.

## 2.2. Outono 2006

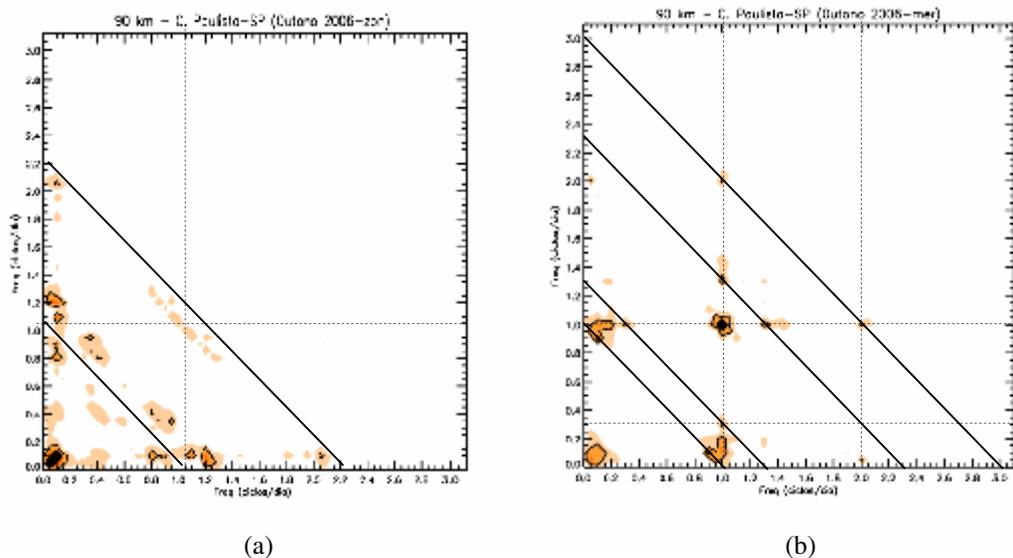
Neste outono, a QTDW não se mostra muito intensa. Em ambas componentes, embora existindo densidade espectral de energia para esta oscilação, verificam-se poucos núcleos intensos comparativamente com a maré, como se pode constatar através do espectro de energia global da Figura 95. A maré diurna é um evento muito intenso e regular a partir do início do outono e continua até meados do mês de maio em torno do dia 139, depois ela se enfraquece. Na componente zonal, Figura 95(a), no intervalo entre os dias 104 e 109, verifica-se um núcleo intenso referente à QTDW. Entre o dia 111 e até o final da estação existe um núcleo muito forte de periodicidade de ~10 dias. Entre os dias 87 e 100, existe um núcleo referente a uma oscilação de ~6,5 dias. Na componente meridional, Figura 95(b), apenas a maré diurna se apresenta bastante intensa. Em ambas as componentes têm-se alguma energia referente à maré semidiurna.



**Figura 95** – Espectros de energia em wavelets do vento meteorológico no outono 2006 em C. Paulista-SP para 90 km de altitude. (a) zonal; (b) meridional; e da Energia Espectral Global (direita).

Através do biespectro da Figura 96, para o outono de 2006. Na componente zonal, Figura 96(a), as possíveis tríades ressonantes são:

- (a) (0,1; 0,9; 1,0)  $\Rightarrow$  ~10 dias, DT e ~21 horas
- (b) (0,1; 2,0; 2,1)  $\Rightarrow$  ~10 dias, ST e ~11 horas



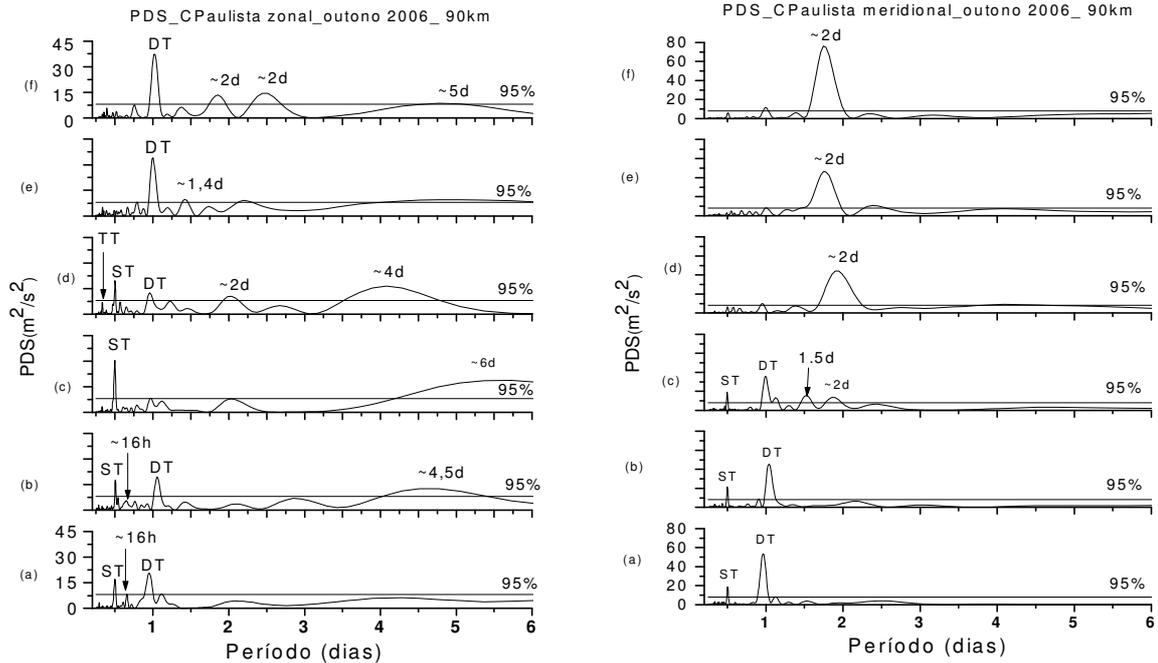
**Figura 96** – Análise biespectral para as componentes do vento meteorológico no outono 2006 em C. Paulista - SP para 90 km de altitude. (a) zonal; (b) meridional.

Na componente meridional, Figura 96(b), identificam-se as possíveis tríades:

- (a)  $(0,1; 0,9; 1,0) \Rightarrow \sim 10$  dias, DT e  $\sim 21$  horas
- (b)  $(0,3; 1,0; 1,3) \Rightarrow \sim 3-4$  dias, DT e  $\sim 18$  horas
- (c)  $(1,0; 1,3; 2,3) \Rightarrow$  DT,  $\sim 18$  horas e  $\sim 10$  horas
- (d)  $(1,0; 2,0; 3,0) \Rightarrow$  DT, ST e TT

Os periodogramas de Lomb-Scargle (PSD), no intervalo entre os dias 18/mar e 28/abr/2005, encontram-se na Figura 97. Para a componente zonal, Figura 97(a), encontram-se picos de ondas secundárias referentes à maré terdiurna e também à  $\sim 16$  horas em períodos que o pico para maré semidiurna é bastante significativo. O comportamento do período e da intensidade, da QTDW e da maré diurna, indica que estas ondas secundárias são resultantes da interação da maré semidiurna com, respectivamente, a QTDW e com a maré diurna. Na terceira e quarta semana, o comportamento do pico da maré semidiurna quando comparado com a maré diurna indica que estas oscilações interagem não linearmente. Picos referentes às oscilações QTDW,  $\sim 4$  dias e de  $\sim 6,5$  dias também estão presentes. Na Figura 97(b), tem-se a PSD para a componente meridional. Nele se identificam picos significativos para maré diurna, maré semidiurna e para a QTDW. Entretanto, não se encontram picos significativos referentes á ondas secundárias resultantes de interação não linear ressonante entre estas oscilações.

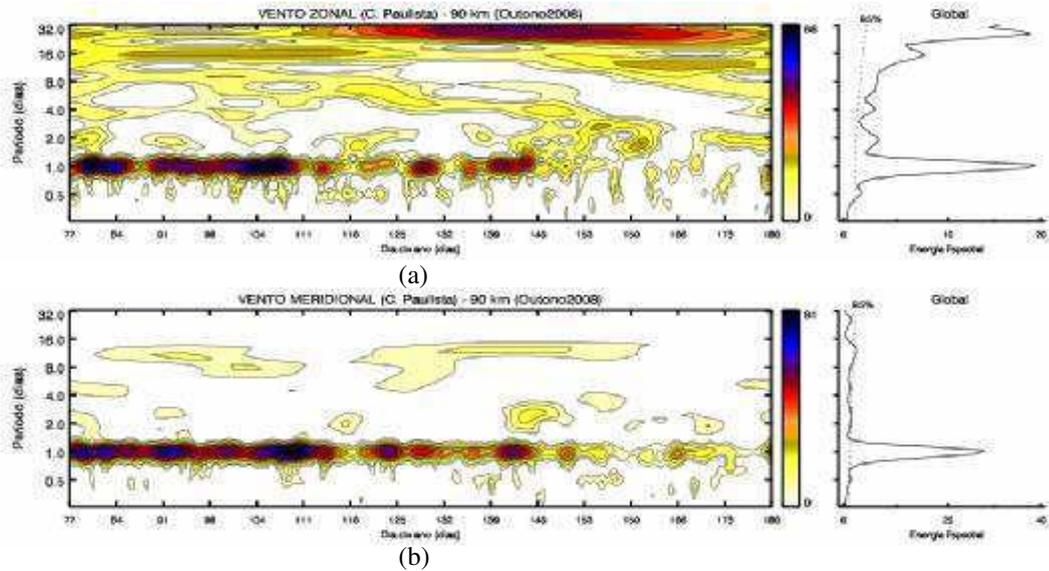
Nota-se que o pico da QTDW, a partir da quarta semana, se amplifica e, neste intervalo, os picos para os modos de marés desaparecem, sugerindo que as energias destes dois modos são absorvidas pela QTDW.



**Figura 97** – Periodograma de Lomb-Scargle para as componentes do vento meteorológico no outono de 2006 em C. Paulista - SP para 90 km de altitude. (a) zonal (b) meridional. Cada gráfico corresponde a uma semana (07 dias) de dados no intervalo entre os dias 18/mar e 28/abr/2006.

### 2.3. Outono 2008

Em ambas componentes observam-se núcleos intensos para a maré diurna do início da estação até meados do mês de maio. Na componente zonal, Figura 98(a), existe núcleos para as periodicidades de 27 dias, entre 12-20 dias e de 5-7 dias. É possível se observar a presença da maré semidiurna. Atividades da QTDW com alguma significância estão entre os dias 146 e 162. Na componente meridional, Figura 98(b), as oscilações com periodicidades maiores que a maré diurna apresentam pouca atividade. Nos intervalos entre os dias 140 e 151, observa-se a presença da QTDW. A maré semidiurna é um evento pouco intenso. Observa-se ainda que, no intervalo entre os dias 80 e 104 e no intervalo entre os dias 120 e 160, existe o núcleo referente à periodicidade de ~10 dias e que, no espectro global de energia, esta oscilação encontra-se praticamente no limiar do nível de significância adotado.

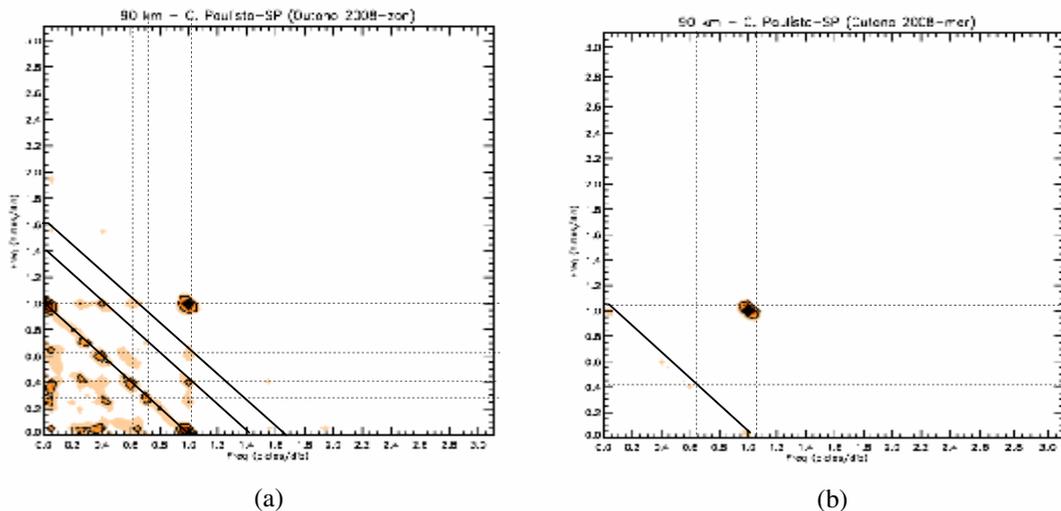


**Figura 98** – Espectros de energia em wavelets do vento meteorológico no outono 2008 em C. Paulista-SP para 90 km de altitude. (a) zonal; (b) meridional; e da Energia Espectral Global (direita).

A análise biespectral para a componente zonal, Figura 99(a), revela as tríades:

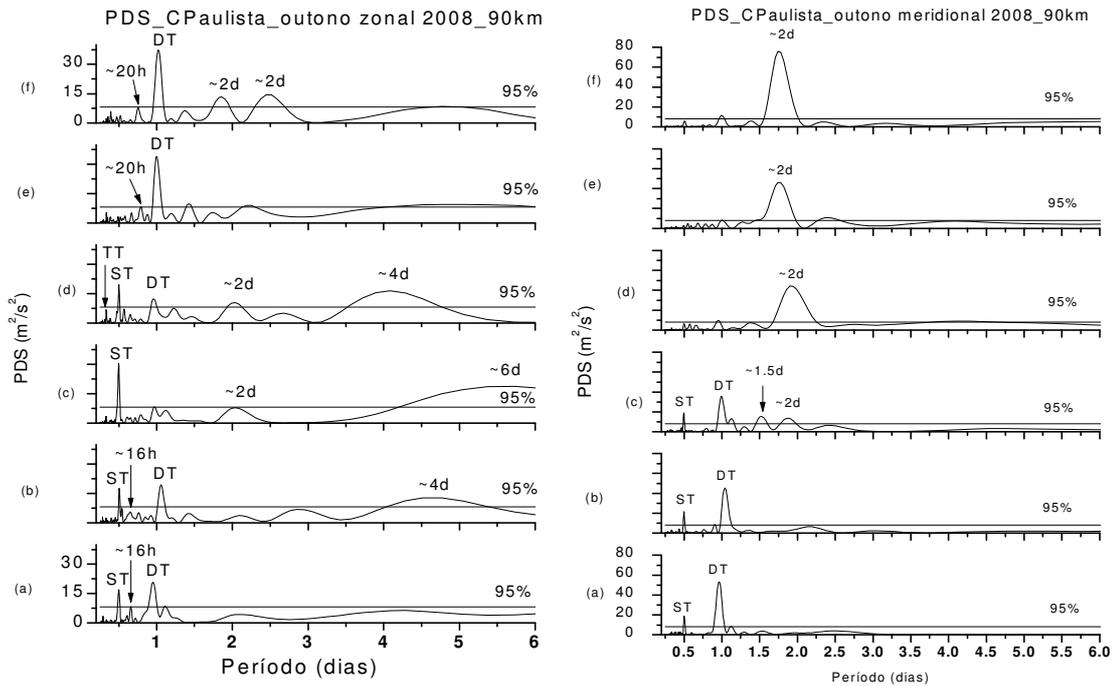
- (a) (0,6; 1,0; 1,6) ⇒ QTDW, DT e ~15 horas
- (b) (0,3; 0,7; 1,0) ⇒ ~(3-4) dias, DT e ~34 horas
- (c) (0,4; 0,6; 1,0) ⇒ QTDW, DT e QTDW

Na componente meridional, Figura 99(b), se identifica apenas a tríade ressonante (0,4; 0,6; 1,0) ⇒ QTDW, DT e QTDW



**Figura 99** – Análise biespectral para as componentes do vento meteorológico no outono 2008, em Cachoeira Paulista – SP, para 90 km de altitude. (a) zonal; (b) meridional.

Os periodogramas de Lomb-Scargle, no intervalo entre os dias 18/mar e 28/abr/2005, encontram-se na Figura 100.



**Figura 100** – Periodograma de Lomb-Scargle para as componentes do vento meteorológico no outono de 2008 em C. Paulista - SP para 90 km de altitude. (Esquerda) zonal (direita) meridional. Cada Gráfico corresponde a uma semana (07 dias) de dados no intervalo entre os dias 18/mar e 28/abr/2008.

Para a componente zonal, Figura 100(a), encontram-se picos referentes à maré terdiurna, ~16 horas e ~20 horas em intervalos em que as marés diurna e semidiurna são bastante intensas. Identifica-se também mais de um pico para a QTDW e os comportamentos do período e da intensidade da QTDW e das marés diurna e semidiurna indicam que estas ondas interagem não linearmente. Picos para ~4 dias e ~6,5 dias também são identificados. Na Figura 100(b), tem-se o periodograma para a componente meridional. Nele se identificam picos significativos da maré diurna, da maré semidiurna e da QTDW. Entretanto, não se encontram picos significativos referentes às ondas secundárias. Nota-se que o pico da QTDW, a partir da quarta semana, se amplifica e, neste intervalo, os picos para os modos de marés desaparecem. Sugerindo que as energias destes dois modos são absorvidas pela QTDW.

Os resultados das análises dos dados de interação não lineares ressonantes encontrados nos ventos meteorológicos de Cachoeira Paulista-PB, entre os anos de 2004 e 2008, para a estação de outono em 90 km de altitude, permitem colocar os seguintes aspectos:

- (i) Nos espectros em wavelets, os núcleos para a QTDW se mostram pouco intensos,

em ambas componentes, sendo que na componente zonal esta periodicidade é mais frequente e mais significativa que na meridional em todos os outonos investigados. A maré diurna é um evento mais intenso e regular a partir do mês de março e vai até meados do mês de maio, principalmente na componente meridional. Na componente zonal detectaram-se densidades de energias espectrais para periodicidades de ~27 dias, ~12-20 dias, ~8-10 dias e de ~5-7 dias. É possível se observar alguns núcleos referentes à oscilação de ~3-4 dias e ainda a presença menos intensa da maré semidiurna.

(ii) Através dos resultados das análises biespectrais e das PSD encontra-se que a interação não linear ressonante entre a maré diurna e a QDTW é um evento que ocorre, mas, não apresenta uma regularidade.

(iii) Eventos de interação não linear envolvendo as marés, diurna e semidiurna, resultando na maré terdiurna, também foram encontrados e são mais regulares e frequentes que aqueles verificados para os verões estudados. Também foram identificados eventos de interações não lineares ressonantes, dos modos de marés com Ondas Planetárias de períodos de ~3-4 dias, ~6,5 dias e de ~10 dias.

Quando os picos para maré semidiurna são detectados, as intensidades deles estão próximas ao nível de significância estabelecida. Portanto, os eventos de interação não linear da maré diurna com a maré semidiurna e com a QTDW se constituem nos eventos mais importantes para a variabilidade das amplitudes da maré diurna nos outonos, em Cachoeira Paulista-SP, entre 2005 e 2008, na altitude de 90 km.

**Tabela 24.** Episódios identificados através da análise biespectral como interação não linear ressonante entre a maré diurna e outras ondas nos ventos meteorológicos em 90 km para os outonos de Cachoeira Paulista – SP.

	Zonal						Meridional					
	Período das outras ondas (dias)						Período das outras ondas (dias)					
	0,5	2	3-4	5-7	10	12-20	0,5	2	3-4	5-7	10	12-20
2005	Sim	-	-	-	-	-	Sim	-	-	Sim	-	-
2006	-	-	-	-	Sim	-	Sim	-	Sim		Sim	-
2007	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2008	-	Sim	Sim	-	-	-	Sim	-	-	-	-	-

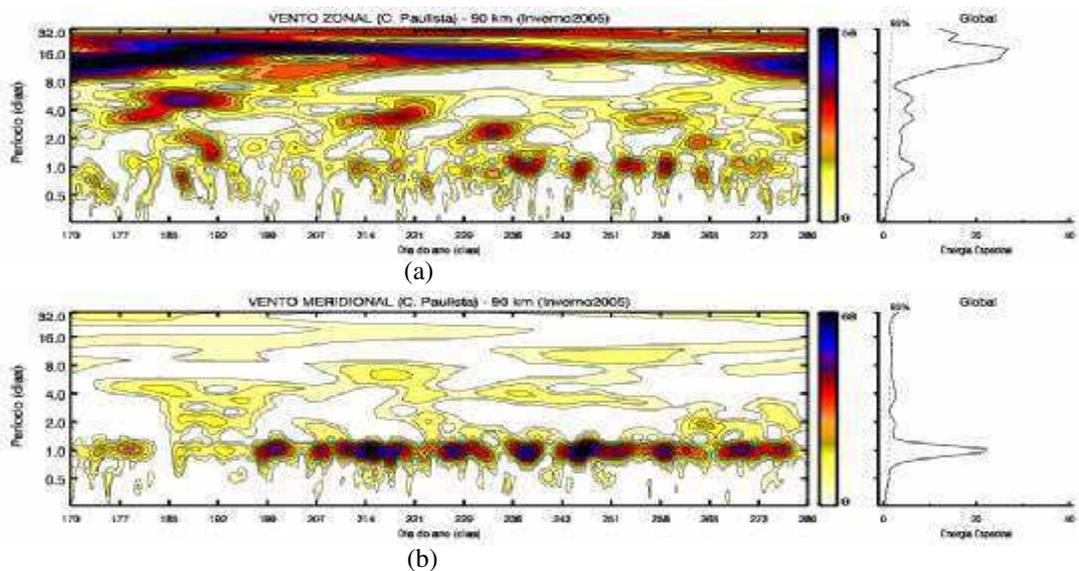
**Tabela 25.** Episódios identificados através da análise biespectral como interação não linear ressonante entre a maré semidiurna e outras ondas nos ventos meteorológicos em 90 km para os outonos de Cachoeira Paulista – SP.

	Zonal						Meridional					
	Período das outras ondas (dias)						Período das outras ondas (dias)					
	1	2	3-4	5-7	10	12-20	1	2	3-4	5-7	10	12-20
2005	Sim	Sim	-	Sim	-	-	Sim	Sim	-	Sim	-	-
2006	-	-	-	-	Sim		Sim	-	-	-	-	-
2007	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2008	-	-	-	-	-	-	Sim	-	-	-	-	-

### 3. Estação de Inverno

#### 3.1. Inverno 2005

Os resultados das análises em wavelets para o inverno de 2005 na componente zonal, Figura 101(a), revelaram núcleos bastante intensos para as periodicidades de 27 dias, de ~12-20 dias, de ~8-10 dias, de 5-7 dias e de ~3-4 dias. A maré diurna exibe núcleos mais intensos em torno dos dias 239, 246, 254 e 259. Nos intervalos entre os dias 187 e 192 e entre os dias 229 e 236 observa-se a presença mais intensa da QTDW. Observam-se dois núcleos intensos, de ~0,7 dias, em torno dos dias 187 e 223. Na componente meridional, Figura 101(b), as oscilações, com periodicidades maiores que a da maré diurna, exibem núcleos pouco intensos. Verifica-se que, a partir do dia 197 (15/jul) até o final do inverno, a maré diurna é o evento mais intenso e regular desta estação. Em torno do dia 265, observa-se que existe um núcleo mais destacado da QTDW e uma diminuição da intensidade da maré diurna. É possível se observar também alguma energia referente à maré semidiurna.



**Figura 101** – Espectros de energia em wavelets do vento meteorológico no inverno de 2005 em C. Paulista-SP para 90 km de altitude. (a) zonal; (b) meridional; e da Energia Espectral Global

Os resultados da análise biespectral para a componente zonal, Figura 102(a), revelam os seguintes núcleos para tríades ressonantes envolvendo modos de marés e Ondas Planetárias:

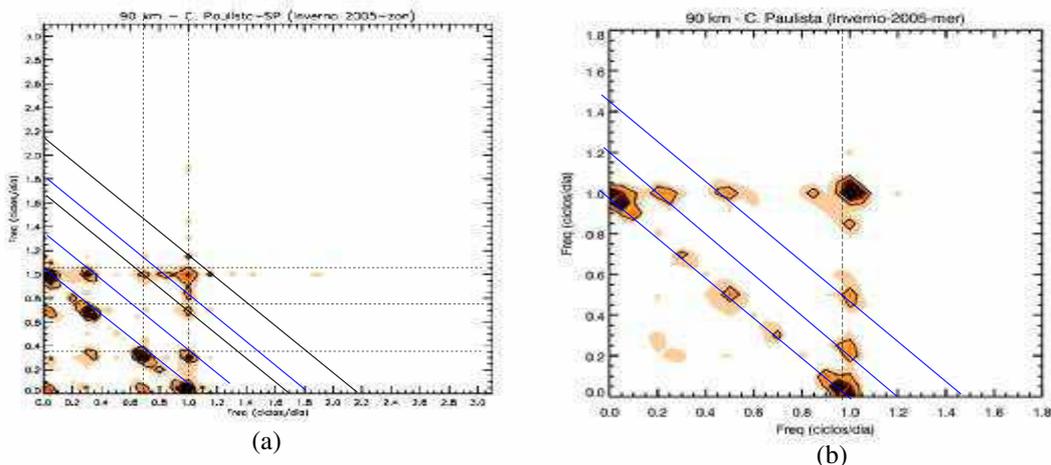
(a) (0,7; 1,0; 1,7)  $\Rightarrow$  ~34 horas, DT e ~14 horas

(b) (0,3; 1,0; 1,3)  $\Rightarrow$  ~(3-4) dias, DT e ~18 horas

- (c) (0,3; 0,7; 1,0)  $\Rightarrow$   $\sim$ (3-4) dias, DT e  $\sim$ 34 horas  
 (d) (0,4; 0,6; 1,0)  $\Rightarrow$  QTDW, DT e QTDW  
 (e) (0,8; 1,0; 1,8)  $\Rightarrow$   $\sim$ 30 horas, DT e 13,3 horas  
 (f) (0,06; 0,94; 1,0)  $\Rightarrow$   $\sim$ 16 dias e DT  $\rightarrow$  DT  
 (g) (1,0; 1,2; 2,2)  $\Rightarrow$  DT,  $\sim$ 11 horas e  $\sim$ 20 horas

Na componente meridional, Figura 102(b), se identifica os seguintes núcleos:

- (a) (0,5; 1,0; 1,5)  $\Rightarrow$  QTDW, DT e  $\sim$ 16 horas  
 (b) (0,2; 1,0; 1,2)  $\Rightarrow$   $\sim$ 5 dias, DT e  $\sim$ 20 horas  
 (c) (0,06; 0,94; 1,0)  $\Rightarrow$   $\sim$ 16 dias, DT e DT  
 (d) (0,3; 0,7; 1,0)  $\Rightarrow$   $\sim$ 3-4 dias e DT  $\rightarrow$   $\sim$ 34 horas

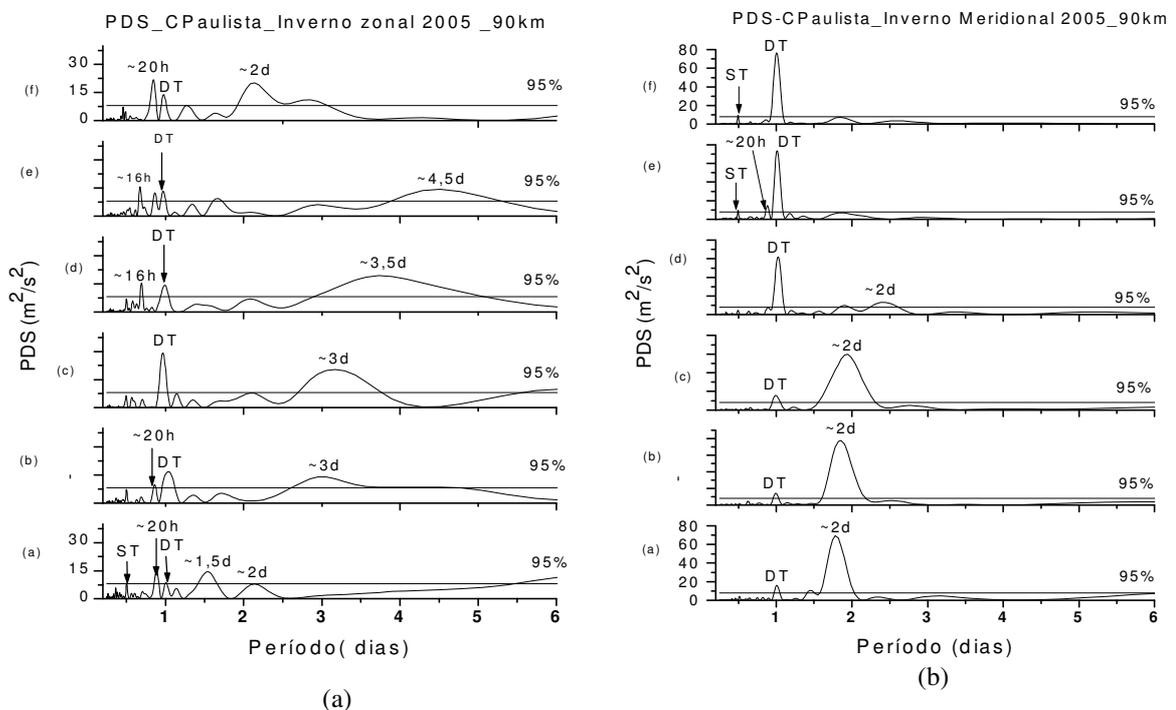


**Figura 102** – Análise biespectral para as componentes do vento meteorológico no inverno de 2005 em C. Paulista - SP para 90 km de altitude. (a) zonal; (b) meridional.

Na Figura 103, têm-se as PSD para o inverno de 2005. Na componente zonal, Figura 103(a), os seguintes picos são identificados: maré semidiurna, maré diurna, QTDW,  $\sim$ 3-4 dias,  $\sim$ 16 horas,  $\sim$ 20 horas e  $\sim$ 36 horas. Observando-se os picos na PSD, verifica-se que tanto a QTDW como a maré semidiurna encontra-se sempre próximo ao limiar do nível de significância. O comportamento dos picos para maré diurna e QTDW mostra anticorrelação de amplitudes indicando possível interação não linear entre elas. Na primeira semana, não se tem picos para a onda de  $\sim$ 3-4 dias, mas surgem as oscilações de  $\sim$ 20 horas e de  $\sim$ 36 horas. Estas oscilações secundárias são possíveis através da interação não linear ressonante entre a onda  $\sim$ 3-4 dias e a maré diurna. Observa-se ainda que quando ocorre a elevação da intensidade do pico da onda de  $\sim$ 3-4 dias o pico da onda de  $\sim$ 20 horas desaparece e vice versa.

Na última semana, observam-se dois picos da QTDW. Verifica-se que os picos para a maré são alargados a exemplo da terceira semana. Picos para outras ondas secundárias não foram identificados com níveis significativos de energia.

Na componente meridional, Figura 103(b), identificam-se picos para maré semidiurna, maré diurna, QTDW e ~20 horas. Nas três primeiras semanas os picos referentes à maré diurna não são intensos e, contrariamente para a QTDW, os picos são intensos e seus períodos e larguras se modificam. A partir da quarta semana a QTDW diminui e a maré diurna aumenta e, surgem picos para ~20 horas e para maré semidiurna. A oscilação de ~20 horas pode resultar da interação não linear ressonante entre a maré diurna e a onda de ~3-4 dias.



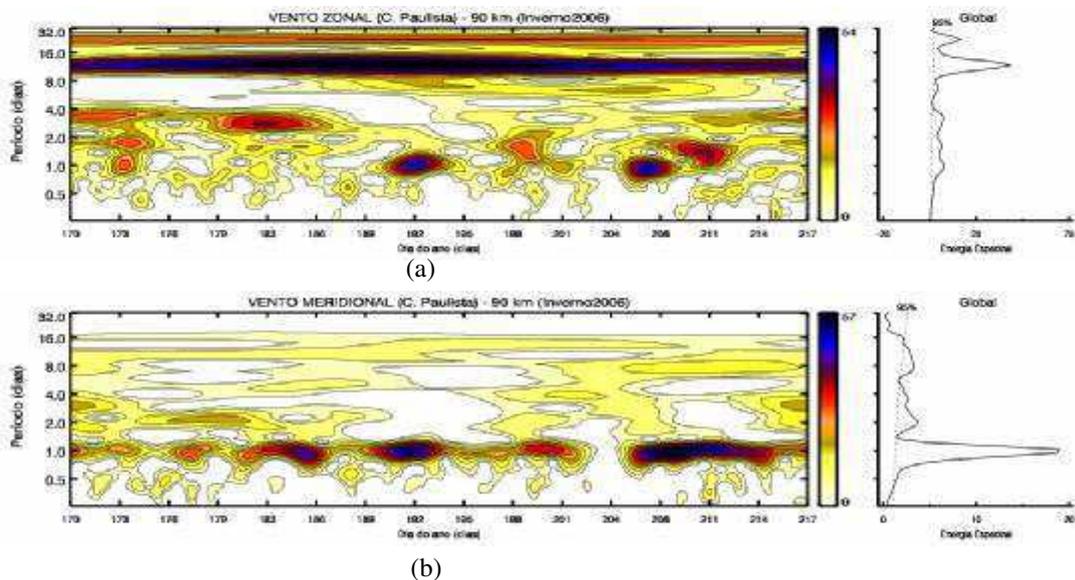
**Figura 103** – Periodograma de Lomb-Scargle para as componentes do vento meteorológico no inverno de 2005 em C. Paulista - SP para 90 km de altitude. (Esquerda) zonal e (direita) meridional. Cada Gráfico corresponde a uma semana (07 dias) de dados no intervalo entre os dias 30/Jul e 10/set/2005.

### 3.2. Inverno 2006

A Figura 104 mostra os resultados das análises espectrais em wavelets para o inverno de 2006. Neste inverno os dados não estão completos, eles correspondem apenas ao intervalo entre o dia 170 (18/jun/2006) e o dia 217 (04/ago/2006). Na componente zonal, Figura 104(a), identificam-se núcleos para as periodicidades de ~27 dias, entre ~12-20 dias, para todo intervalo de dados. Identificam-se também os núcleos para ~8-10 dias no intervalo que vai do dia 186 até o final do período. Tem-se energia intensa para ~3-4 dias no intervalo entre os

dias 170 e 186. A maré diurna exibe núcleos mais intensos em torno do dia 173 e nos intervalos entre os dias 190 e 194 e entre os dias 205 e 209. Nos intervalos em torno dos dias 173, 199 e 211 observam-se núcleos intensos da QTDW.

Na componente meridional, Figura 104(b), as oscilações, com periodicidades maiores que a da maré diurna, exibem núcleos pouco intensos. Observa-se que, a partir do dia 197 (15/jul) até o final do intervalo de dados, a maré diurna apresenta-se alternando entre núcleos intensos e núcleos fracos. No intervalo entre os dias 176 e 181, verifica-se que existe um núcleo mais destacado da QTDW.



**Figura 104** – Espectros de energia em ondaletas do vento meteorológico no inverno de 2006 em C. Paulista-SP para 90 km de altitude. (a) zonal; (b) meridional; e da Energia Espectral Global (direita).

Os resultados da análise biespectral para a componente zonal, Figura 105(a), revelam os seguintes núcleos para tríades ressonantes envolvendo modos de marés e Ondas Planetárias:

- (a) (0,65; 1,0; 1,65)  $\Rightarrow$  ~36 horas e DT e ~14,4 horas
- (b) (0,06; 0,94; 1,0)  $\Rightarrow$  ~16 dias, DT e DT
- (c) (0,3; 0,7; 1,0)  $\Rightarrow$  ~ 3,5 dias, DT e ~34 horas
- (d) (0,45; 1,0; 1,45)  $\Rightarrow$  QTDW, DT e ~16 horas
- (e) (0,4; 0,6; 1,0)  $\Rightarrow$  QTDW, DT e QTDW

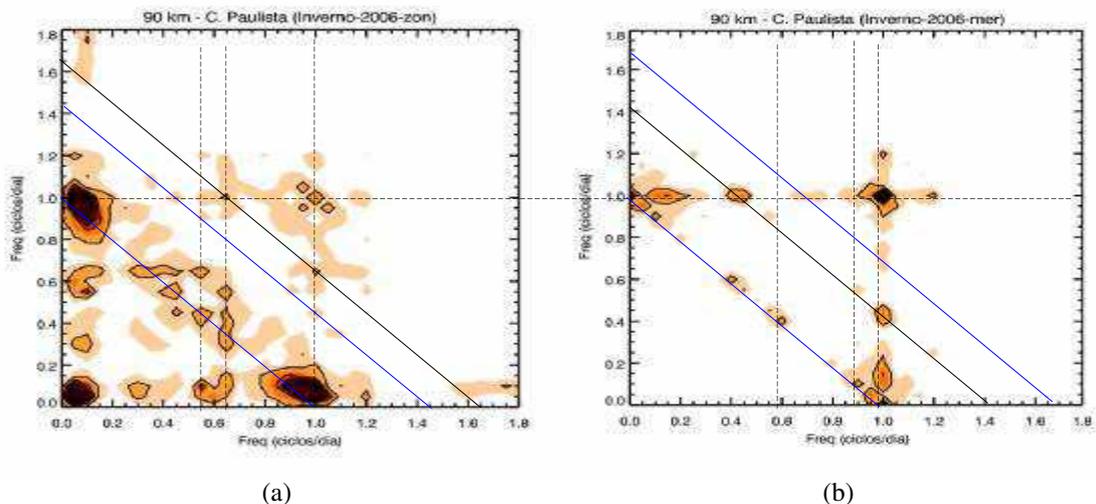
Na componente meridional, Figura 105(b), identificam-se as tríades:

- (a) (0,45; 1,0; 1,45)  $\Rightarrow$  QTDW, DT e ~16 horas

(b) (0,15; 1,0; 1,15)  $\Rightarrow$  ~5-7 dias, DT e ~21 horas

(c) (0,06; 0,94; 1,0)  $\Rightarrow$  ~16 dias, DT e DT

(d) (0,4; 0,6; 1,0)  $\Rightarrow$  QTDW, DT e QTDW

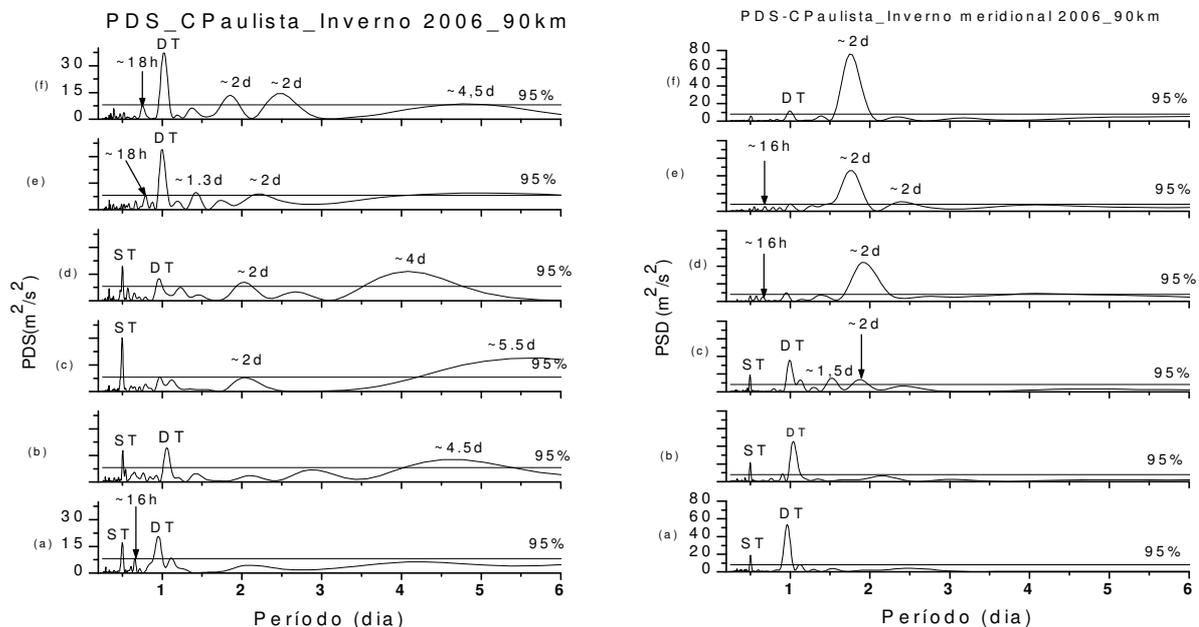


**Figura 105** – Análise biespectral para as componentes do vento meteorológico no inverno de 2006 em C. Paulista - SP para 90 km de altitude. (a) zonal; (b) meridional.

Na Figura 106, têm-se as PSD para o inverno de 2006. Na componente zonal, Figura 106(a), os seguintes picos são identificados: maré semidiurna, maré diurna, QTDW, ~3-4 dias, 5-7 dias, ~16 horas, ~18 horas e ~30 horas. Observando-se os picos na PSD, verifica-se que os picos para a QTDW encontram-se inicialmente abaixo do limiar do nível de significância em seguida ele aumenta um pouco e, na última semana, surgem duas periodicidades referentes a esta oscilação. Os picos para maré semidiurna são intensos nas primeiras quatro semanas e ficam abaixo do nível de significância nas duas últimas. No espectro em wavelets, Figura 104(a), para o início da estação, os núcleos da maré e da QTDW se interligam mostrando interação entre eles. Na quinta semana, surgem dois picos, um para ~18 horas e outro em ~30 horas, neste intervalo a onda de ~3-4 dias desaparece e a maré se amplifica. As oscilações de ~18 e ~30 horas podem surgir da interação não linear ressonante entre a maré e a onda de ~3-4 dias.

Na componente meridional, Figura 106(b), identificam-se picos para maré semidiurna, maré diurna, QTDW ~16 horas e ~36 horas. Destaca-se que nas três primeiras semanas os picos referentes aos modos de maré semidiurna e diurna estão acima do nível de significância, sendo que o pico para a maré diurna é mais intenso que a semidiurna.

O pico para QTDW, nas primeiras duas semanas, está abaixo do nível de 95%. A partir da terceira semana ele se amplifica. Neste mesmo intervalo os picos dos modos de marés praticamente desaparecem e surge um pico de ~16 horas. Duas possibilidades são possíveis para o surgimento desta oscilação secundária: a interação não linear ressonante por soma de frequências entre a maré diurna e a QTDW e, por subtração de frequências, entre a maré semidiurna e a QTDW. Devido ao surgimento de um segundo pico para a QTDW, possivelmente através da subtração das frequências da maré diurna e da QTDW, então se sugere que a onda de ~16 horas deve ocorrer pela interação não linear ressonante entre estas duas últimas oscilações.

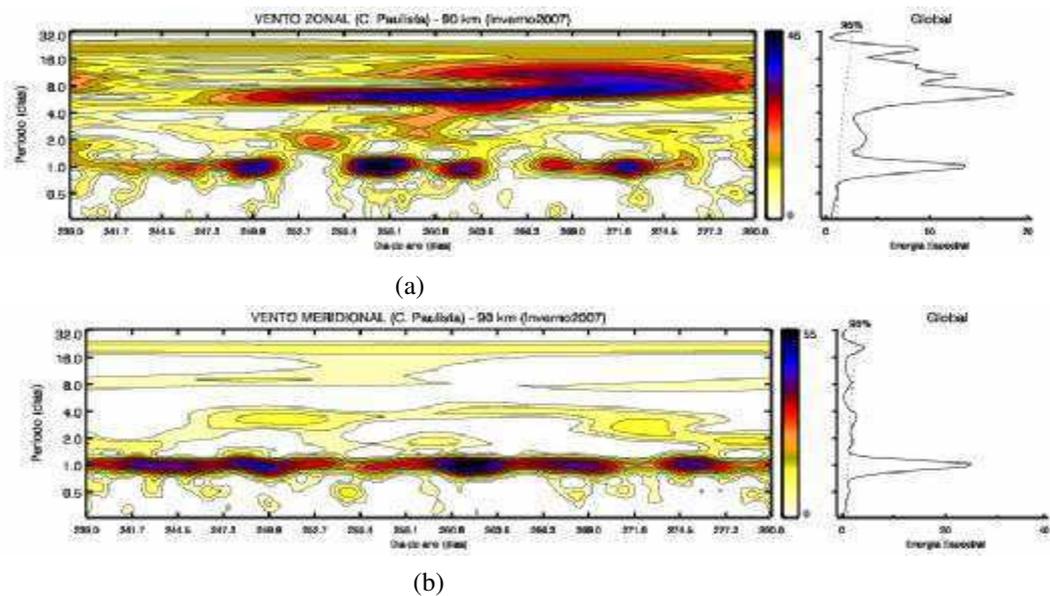


**Figura 106** – Periodograma de Lomb Scargle para as componentes do vento meteorológico no inverno de 2006 em C. Paulista - SP para 90 km de altitude. (a) zonal e (b) meridional. Cada gráfico corresponde a uma semana (07 dias) de dados no intervalo entre os dias 23/jun e 04/ago/2006.

### 3.3. Inverno 2007

A Figura 107 mostra os resultados das análises espectrais em wavelets para o inverno de 2007. Neste inverno os dados disponíveis não estão completos, eles correspondem apenas ao intervalo entre os dias 239 (26/ago/2007) e 280 (06/out/2006). Na componente zonal, Figura 107(a), identifica-se: núcleo para a periodicidade de ~27 dias; núcleo intenso para ~12-20 dias entre os dias 264 e 277; núcleo intenso para a oscilação de ~5-7 dias entre os dias 248 e 277. Para a QTDW encontra-se um núcleo intenso no intervalo entre os dias 252 e 255. Neste mesmo intervalo, a energia para maré diurna é fraca, e nos intervalos entre os dias 244 e 251, 255 e 264 e entre 267 e 276, a maré se apresenta com as maiores intensidades.

Na componente meridional, Figura 107(b), as oscilações com periodicidades maiores que a da maré diurna exibem núcleos fracos. Observa-se que a densidade de energia para a maré diurna é intensa durante todo intervalo de dados analisados.



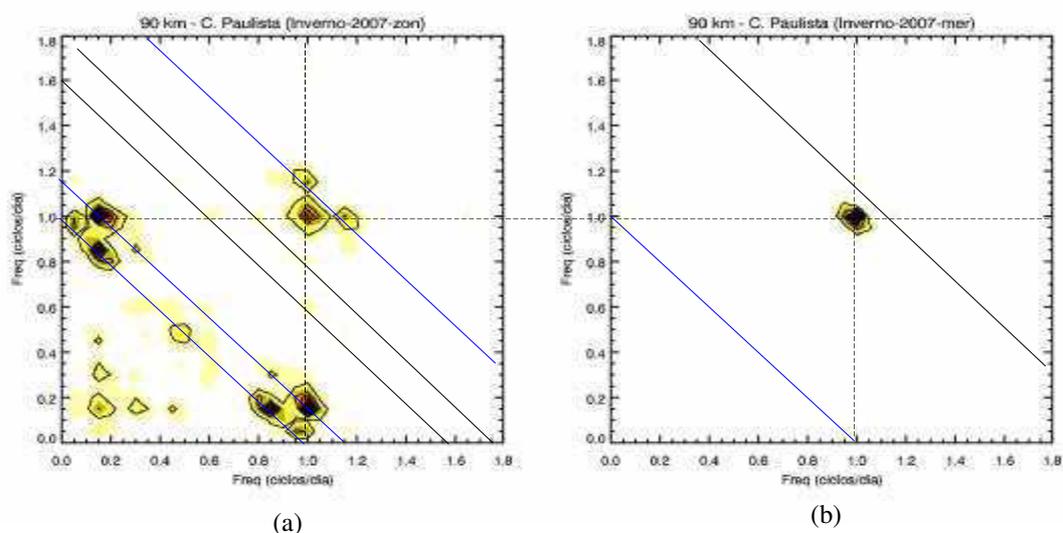
**Figura 107** – Espectros de energia em ondaletas do vento meteorológico no inverno de 2007 em C. Paulista-SP para 90 km de altitude. (a) zonal; (b) meridional; e da Energia Espectral Global (direita).

Os resultados da análise biespectral para a componente zonal, Figura 108(a), revelam as seguintes tríades ressonantes envolvendo modos de marés e Ondas Planetárias:

- (a) (0,6; 1,0; 1,6)  $\Rightarrow$  QTDW, DT e  $\sim$ 15 horas
- (b) (0,06; 0,94; 1,0)  $\Rightarrow$   $\sim$ 12-20 dias, DT e DT
- (c) (0,15; 1,0; 1,15)  $\Rightarrow$   $\sim$ 5-7 dias, DT e  $\sim$ 21 horas
- (d) (0,15; 0,85; 1,0)  $\Rightarrow$   $\sim$ 5-7 dias, DT e  $\sim$ 32 horas
- (e) (0,8; 1,0; 1,8)  $\Rightarrow$   $\sim$ 13,3 horas, DT e  $\sim$ 30 horas
- (f) (1,0; 1,2; 2,2)  $\Rightarrow$  DT,  $\sim$ 11 horas e  $\sim$ 20 horas

Na componente meridional, Figura 108(b) tem-se as seguintes tríades ressonantes:

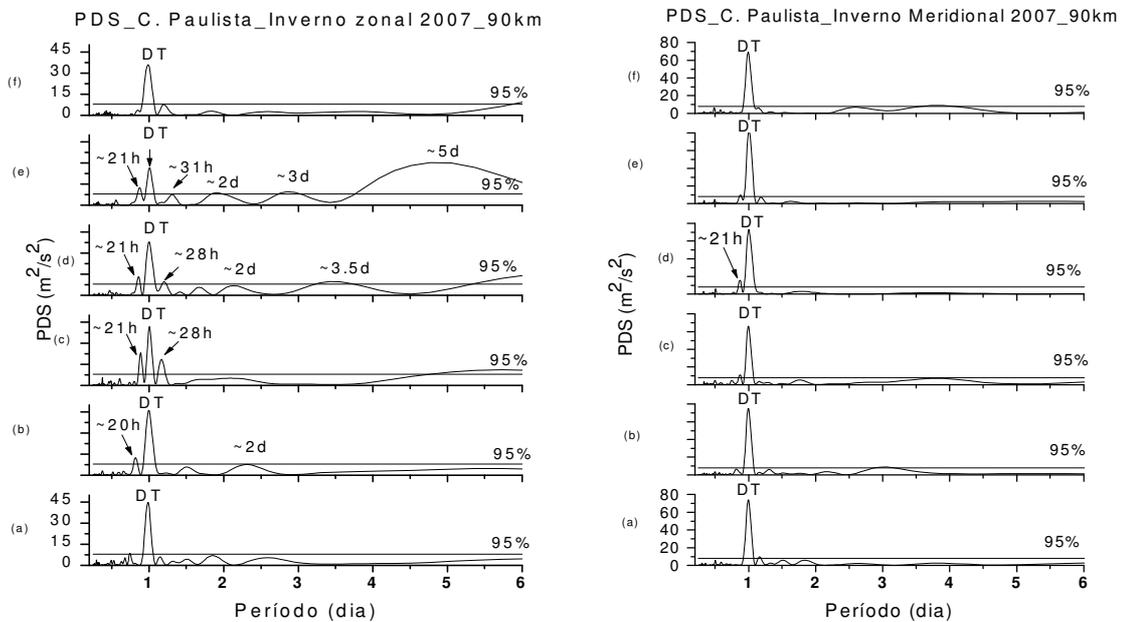
- (a) (0,06; 0,94; 1,0)  $\Rightarrow$   $\sim$ 12-20 dias e DT e DT
- (b) (1,0; 1,2; 2,2)  $\Rightarrow$  DT,  $\sim$ 11 horas e  $\sim$ 20 horas



**Figura 108** – Análise biespectral para as componentes do vento meteorológico no inverno de 2007 em C. Paulista - SP para 90 km de altitude. (a) zonal; (b) meridional.

Na Figura 109, têm-se as PSD para o inverno de 2007. Para a componente zonal, Figura 109(a), os seguintes picos são identificados: maré diurna, QTDW, ~3-4 dias, ~5-7 dias, ~20 horas, ~28 horas e ~30 horas. Os picos para QTDW estão abaixo do nível de significância durante todo o intervalo de análise. Uma estrutura de picos que se repete nas PSD, entre a segunda e a quinta semana, é o que se refere a maré diurna com dois picos secundários em torno do seu período central. Estes picos secundários têm periodicidades entre ~20 horas e ~30 horas. Eles são possíveis através da interação não linear ressonante da maré diurna com a oscilação de ~5-7 dias. O espectro em wavelets mostra energia intensa para oscilações nesta periodicidade. O biespectro também mostra núcleos referentes a estas interações.

Para a componente meridional, Figura 109(b), identificam-se picos significativos apenas para a maré diurna e para ~20 horas. Núcleos referentes à interação não linear ressonante que resultam na onda de ~30 horas não aparecem no biespectro, entretanto, no espectro em wavelets existe alguma energia para oscilação com período de ~5-7 dias.

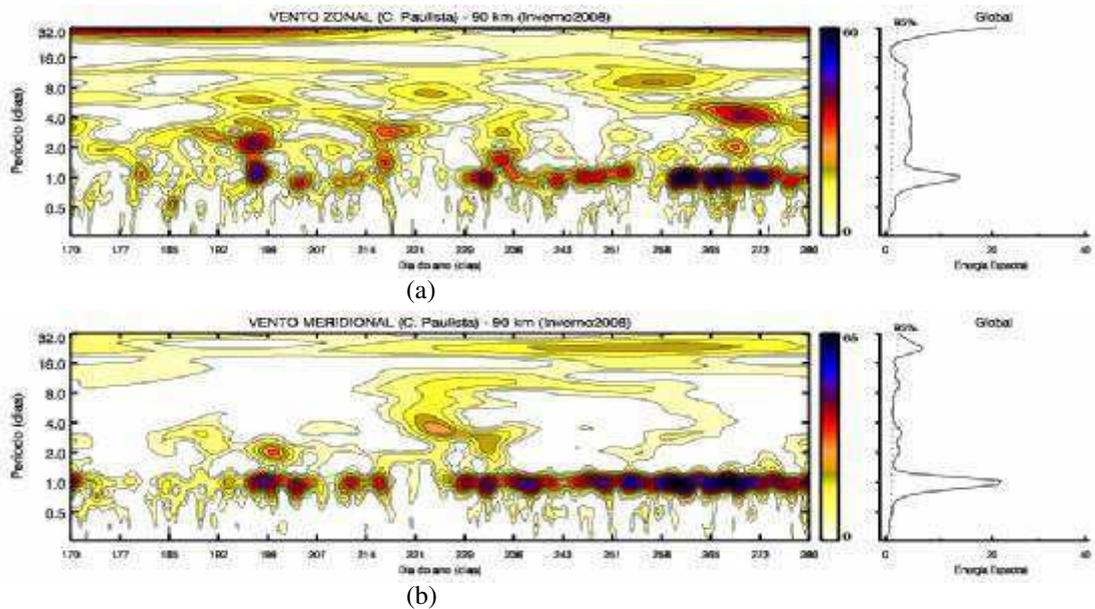


**Figura 109** – Periodograma de Lomb-Scargle para as componentes do vento meteorológico no inverno de 2007 em C. Paulista-SP para 90 km de altitude. (a) zonal e (b) meridional. Cada gráfico corresponde a uma semana (07 dias) de dados no intervalo entre os dias 23/jul e 06/ago/2007.

### 3.4. Inverno 2008

Através da Figura 110 têm-se os resultados das análises em wavelets para o inverno de 2008. Na componente zonal, Figura 110(a), identifica-se: núcleo para as periodicidades de ~27 dias, ~12-20 dias, para ~8-10 dias no intervalo entre os dias 243 e 269, e núcleos intensos para a QTDW em torno do dia 194 e do dia 269. Identificam-se também dois núcleos intensos para a periodicidade de ~3-4 dias, um em torno do dia 217 e outro em torno do dia 269. O primeiro destes núcleos mostra que a onda de ~3-4 dias parece interagir com a maré diurna visto que, os núcleos referentes a estas oscilações se interligam. A maré diurna é fraca no início da estação e, depois, em torno do dia 197 exibe um núcleo muito forte. A maré exibe sua mais alta intensidade entre os dias 229 e 253 e do dia 259 até o final da estação. Identifica-se pouca energia referente à maré semidiurna.

Na componente meridional, Figura 110(b), as oscilações, com periodicidades maiores que a da maré, exibem núcleos pouco intensos. Observa-se que a intensidade da maré diurna é elevada a partir do dia 195 até o dia 217. Depois, entre os dias 218 e 228 ela enfraquece e, no restante da estação ela se apresenta mais intensa e regular. Identificam-se núcleos da QTDW em torno do dia 199 e da oscilação de ~3-4 dias no intervalo entre os dias 221 e 236.



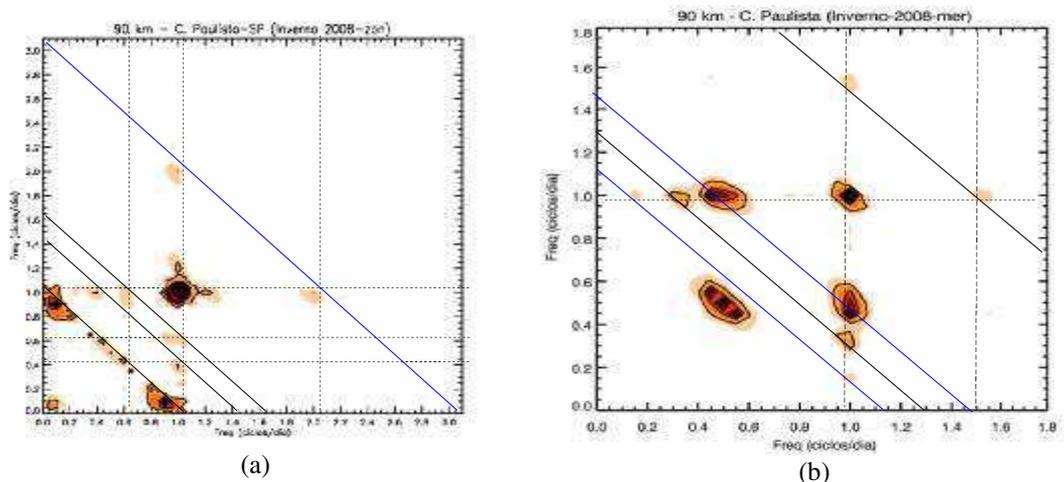
**Figura 110** – Espectros de energia em ondaletas do vento meteorológico no inverno de 2008 em C. Paulista-SP para 90 km de altitude. (a) zonal; (b) meridional; e da Energia Espectral Global (direita).

Os resultados da análise biespectral para a componente zonal, Figura 111(a), revelam os seguintes núcleos para tríades ressonantes envolvendo modos de marés e Ondas Planetárias:

- (a) (0,6; 1,0; 1,6)  $\Rightarrow$  QTDW, DT e  $\sim$ 16 horas
- (b) (0,4; 1,0; 1,4)  $\Rightarrow$  QTDW, DT e  $\sim$ 17 horas
- (c) (0,4; 0,6; 1,0)  $\Rightarrow$   $\sim$  QTDW, DT e QTDW
- (d) (0,2; 0,8; 1,0)  $\Rightarrow$   $\sim$ 5 dias, DT e  $\sim$ 30 horas
- (e) (0,06; 0,94; 1,0)  $\Rightarrow$   $\sim$ 16 dias, DT e DT
- (f) (1,0; 1,2; 2,2)  $\Rightarrow$  DT,  $\sim$ 20 horas e  $\sim$ 11 horas
- (g) (1,0; 2,0; 3,0)  $\Rightarrow$  DT, ST e TT

Na componente meridional, Figura 111(b) tem-se as seguintes tríades ressonantes:

- (a) (0,5; 1,0; 1,5)  $\Rightarrow$  QTDW e DT  $\rightarrow$   $\sim$ 16 horas
- (b) (1,0; 1,45; 2,45)  $\Rightarrow$  DT e  $\sim$ 16 horas  $\rightarrow$   $\sim$ 9,7 horas
- (c) (0,15; 1,0; 1,15)  $\Rightarrow$   $\sim$ 5-7 dias e DT  $\rightarrow$   $\sim$ 21 horas
- (d) (0,3; 1,0; 1,3)  $\Rightarrow$   $\sim$ 3-4 dias e DT  $\rightarrow$   $\sim$ 18 horas



**Figura 111** – Análise biespectral para as componentes do vento meteorológico no inverno de 2008, em Cachoeira Paulista – SP, para 90 km de altitude. (a) zonal; (b) meridional.

Na Figura 112, têm-se as PSD para o inverno de 2008. Na componente zonal, Figura 112(a), os seguintes picos são identificados: maré diurna, maré semidiurna, maré terdiurna, QTDW, ~3-4 dias, ~5-7 dias, ~16 horas, ~18 horas, ~28 horas e ~32 horas. Os picos para QTDW nas duas primeiras semanas estão abaixo do nível de significância. A partir da terceira semana o pico se intensifica e na última semana surgem dois picos para a QTDW. Na primeira semana surge um pico de ~16 horas que, com base na análise biespectral, se atribui à interação não linear ressonante entre a maré diurna e a QTDW. Na quarta semana surge um pico para a maré terdiurna, e o pico da maré semidiurna diminui. Estes comportamentos são um indício de que esta oscilação secundária é resultante da interação não linear ressonante da maré semidiurna com a maré diurna. Na quinta e sexta semanas surgem picos de ~32 horas e de ~18 horas que são resultantes da interação não linear entre a maré diurna e a oscilação de ~3-4 dias. Na última semana surgem dois picos da QTDW de períodos ligeiramente diferentes que podem resultar da interação não linear ressonante da maré diurna e da QTDW.

Na componente meridional, Figura 112(b), identificam-se picos significativos apenas para a maré diurna, QTDW e ~16 horas. Os picos para a QTDW, nas três primeiras semanas, estão abaixo do nível de significância e, a partir da quarta semana, estes picos ficam um pouco acima do nível de significância. O pico para a maré semidiurna encontra-se sempre abaixo do nível de significância. O pico da maré diurna diminui na segunda e terceira semanas e volta a crescer a partir da quarta semana, atingindo intensidade máxima na última semana. Identificam-se núcleos para a onda de ~16 horas gerada, provavelmente, através da interação não linear ressonante entre o modo de maré diurna e a QTDW, pois esta oscilação secundária existe em intervalos em que o modo de maré semidiurna não é significativo.



Os resultados das análises dos dados de ventos meteorológicos de Cachoeira Paulista-PB, entre os anos de 2004 e 2008, para a estação de inverno em 90 km de altitude, permitem colocar os seguintes aspectos:

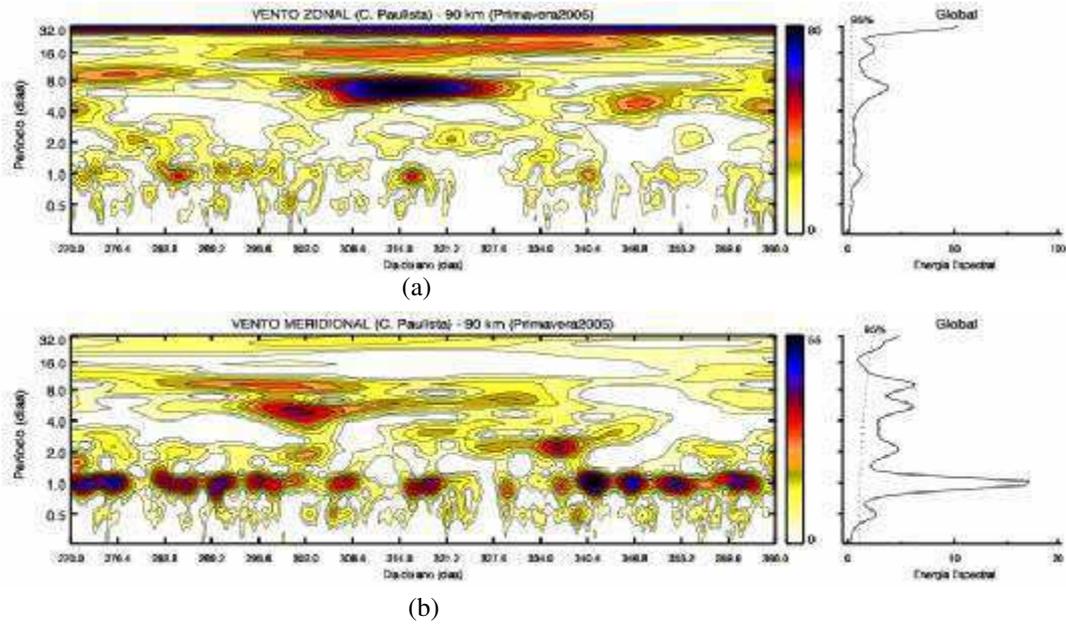
Através dos espectros em wavelets, para a componente meridional, observam-se que os núcleos para a QTDW não se mostram intensos, apenas exibem alguma energia espectral. A maré diurna é um evento mais intenso e regular a partir da metade do inverno e permanece com núcleos intensos até o final desta estação. Na componente zonal, detecta-se densidade de energia espectral para periodicidades: de ~27 dias, ~12-20 dias, ~8-10 dias e de ~5-7 dias. É possível se observar ainda núcleos referentes à oscilação de ~3-4 dias. Na componente meridional, estas periodicidades não aparecem intensas.

Através dos resultados das análises biespectrais e das PSD encontra-se evidências da interação não linear ressonante entre a maré diurna e a QTDW. Eventos de interação não linear ressonante envolvendo os modos de marés, diurna e semidiurna, resultando na maré terdiurna também foram identificados. Quando os picos para maré semidiurna são detectados, as intensidades deles estão próximas do nível de significância de 95%. Eventos de interações não lineares ressonantes, dos modos de marés com Ondas Planetárias de períodos de ~3-4 dias, ~6,5 dias e ~10 dias, também foram detectados para todos os invernos. Estes últimos juntamente com os eventos de interações não lineares envolvendo marés e QTDW se constituem nos eventos responsáveis pela variabilidade das amplitudes da maré diurna nos invernos, em Cachoeira Paulista-SP, entre 2005 e 2008 na altitude de 90 km.

## **4. Estação de primavera**

### **4.1. Primavera 2005**

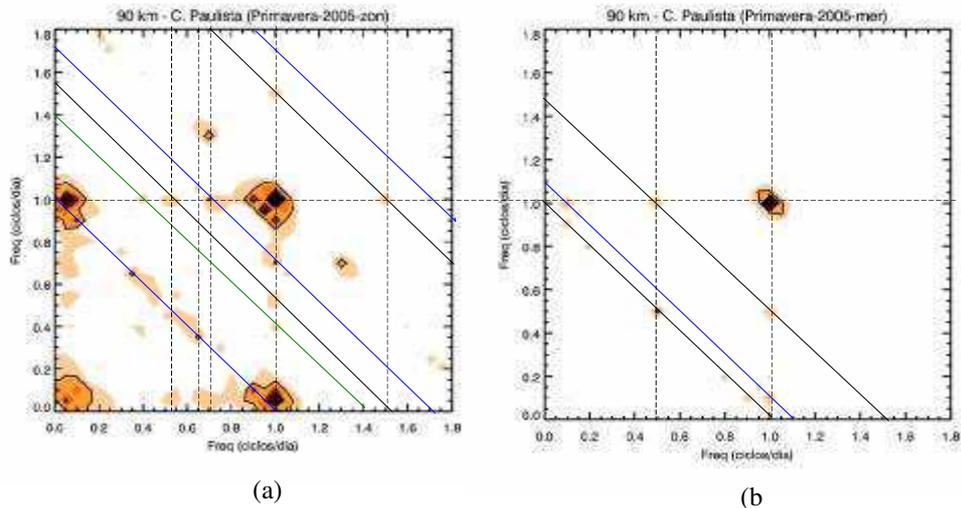
Na Figura 113(a), através do espectro em wavelets, para a componente zonal dos ventos, na primavera de 2005, observa-se que as densidades de energias tanto para os modos de marés quanto para a QTDW não são intensos e apenas identificam-se poucos núcleos para maré diurna. Por outro lado, observa-se um núcleo intenso para a periodicidade de ~5-7 dias entre aproximadamente os dias 302 e 330. Este núcleo também está presente na componente meridional, Figura 113(b), porém, menos intenso. Ainda, na componente zonal, observa-se energia intensa para ~12-20 dias entre os dias 295 e 346, e também um núcleo de ~3-4 entre os dias 343 e 353. Na componente meridional, observa-se um núcleo para a QTDW entre os dias 334 e 340 e energia para a maré diurna em praticamente toda a estação.



**Figura 113** – Espectros de energia em wavelets do vento meteorológico na primavera de 2005 em C. Paulista-SP para 90 km de altitude. (a) zonal; (b) meridional; e da Energia Espectral Global (direita).

A análise biespectral para a componente zonal, Figura 114(a), revela os seguintes núcleos para tríades ressonantes envolvendo modos de marés e Ondas Planetárias:

- (a) (0,06; 1,0; 1,06)  $\Rightarrow$  ~16 dias, DT e DT
- (b) (0,45; 0,55; 1,0)  $\Rightarrow$  QTDW, DT e QTDW
- (c) (0,55; 1,0; 1,55)  $\Rightarrow$  QTDW, DT e ~16 horas
- (d) (0,9; 1,0; 1,9)  $\Rightarrow$  ~27 horas, DT e ~12,6 horas



**Figura 114** – Análise biespectral para as componentes do vento meteorológico na primavera de 2005 em C. Paulista - SP para 90 km de altitude. (a) zonal; (b) meridional.

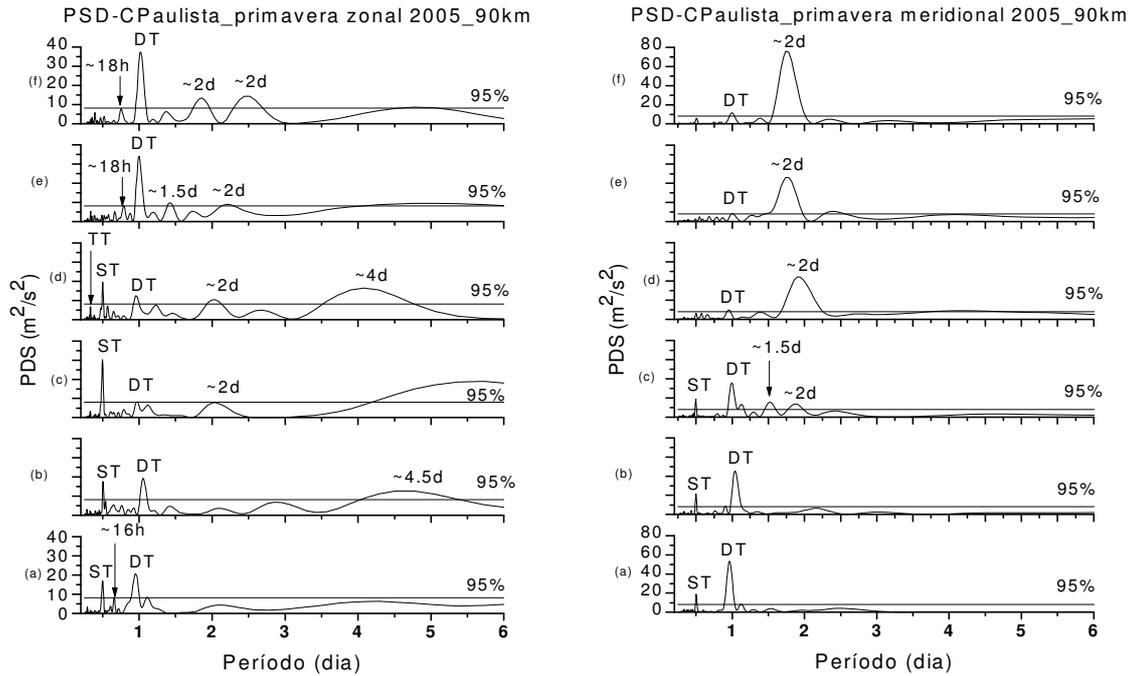
Na componente meridional, Figura 114(b) tem-se as seguintes tríades ressonantes:

- (a) (0,5; 1,0; 1,5)  $\Rightarrow$  QTDW, DT e  $\sim$ 16 horas
- (b) (0,2; 0,8; 1,0)  $\Rightarrow$   $\sim$ 5 dias, DT e  $\sim$ 30 horas
- (c) (0,1; 1,0; 1,1)  $\Rightarrow$   $\sim$ 8-10 dias, DT e  $\sim$ 22 horas
- (d) (0,1; 0,9; 1,0)  $\Rightarrow$   $\sim$ 8-10 dias, DT e  $\sim$ 27 horas

Na Figura 115, tem-se a PSD para a primavera de 2005. Nela identificam-se picos para maré diurna, maré semidiurna, maré terdiurna,  $\sim$ 18 horas,  $\sim$ 36 horas, QTDW,  $\sim$ 3-4 dias e  $\sim$ 5-7 dias. Verifica-se que o pico para a maré diurna, na primeira semana encontra-se com intensidade acima do nível de significância, nesta mesma semana, Figura 115(a) (à esquerda), têm-se também os picos significativos para  $\sim$ 16 horas e para a maré semidiurna. Na segunda semana, Figura 115(b) (à esquerda), o pico de  $\sim$ 16 horas diminui muito, enquanto que os picos das marés semidiurna e diurna permanecem, aproximadamente, com a mesma intensidade. Na terceira semana, Figura 115(c) (à esquerda), o pico da maré diurna diminui enquanto que o pico para a maré semidiurna aumenta e, na semana seguinte, Figura 115 (d), surge um pico para a maré terdiurna, enquanto que os picos para as marés semidiurna e diurna apresentam-se pouco intensos. Na quinta semana, os picos das marés terdiurna e semidiurnas desaparecem, enquanto que o pico da maré diurna se amplifica. Este processo descrito sugere que a maré diurna interage não linearmente com a maré semidiurna e gera, por soma das frequências, o modo de maré terdiurna. Estas duas oscilações também interagem, por subtração de frequências, gerando um modo de maré diurna que reforça a maré diurna já existente, pois, na quinta semana, observa-se um pico muito intenso para a maré diurna e nenhum pico referente aos outros modos da maré. Na última semana, além do pico muito intenso para a maré diurna, observam-se também dois picos, com períodos diferentes, para a QTDW. Observa-se ainda um pico para  $\sim$ 18 horas e outro para  $\sim$ 4 dias. Os dois picos da QTDW podem ser gerados, por subtração de frequências entre a própria QTDW e a maré diurna, enquanto que o pico para  $\sim$ 18 horas pode ser gerado pela interação não linear entre a maré diurna e a oscilação de  $\sim$ 3-4 dias.

Na componente meridional, Figura 115 (à direita), observa-se o comportamento interessante dos picos para as três oscilações presentes nesta PSD. Nas três primeiras semanas, Figuras 155 (a), (b) e (c) (à direita), tem-se picos intensos para a maré semidiurna e maré diurna. Na terceira semana, surgem também dois picos, um em  $\sim$ 36 horas e outro para QTDW. Da quarta até a sexta semana, os picos para os modos de marés desaparecem,

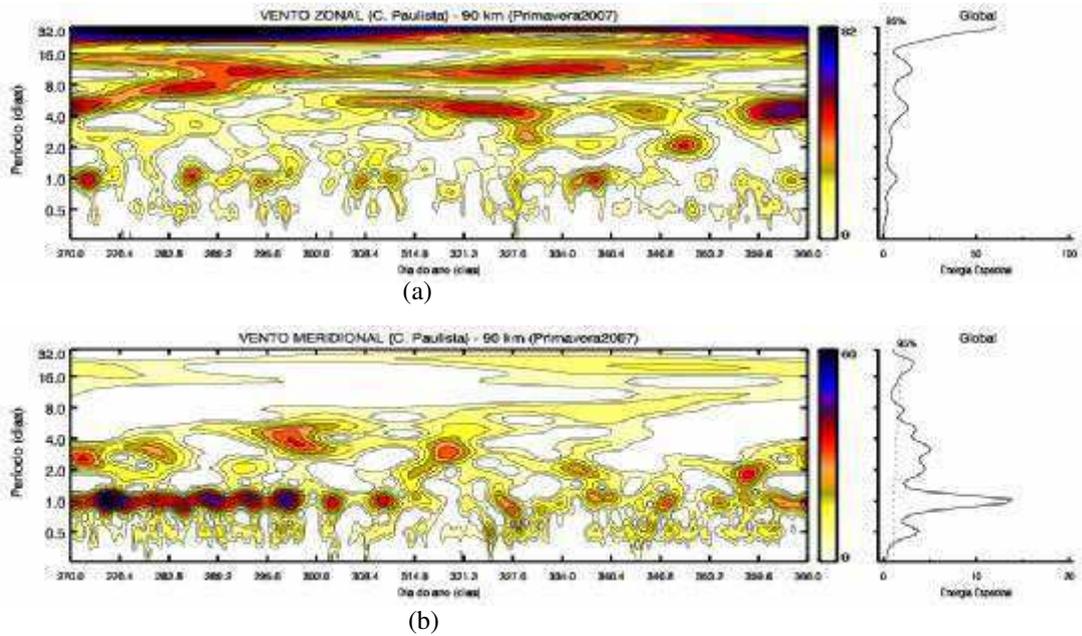
enquanto que os picos para a QTDW se intensificam muito. Neste processo, parece que a maré diurna cede sua energia, através da interação não linear, para a QTDW e gera outra QTDW que ajuda a intensificar a primeira QTDW. Provavelmente os modos de marés semidiurna e diurna são responsáveis pela produção da maré que interage com a QTDW de modo a intensificá-la. A análise biespectral, na componente meridional, mostra a tríade ressonante (0,45; 0,55; 1,0).



**Figura 115** – Periodograma de Lomb Scargle para as componentes do vento meteorológico na primavera de 2005 em C. Paulista - SP para 90 km de altitude. (a) zonal (b) meridional. Cada gráfico corresponde a uma semana (07 dias) de dados no intervalo entre os dias 26/set e 7/nov/2005.

## 4.2. Primavera 2007

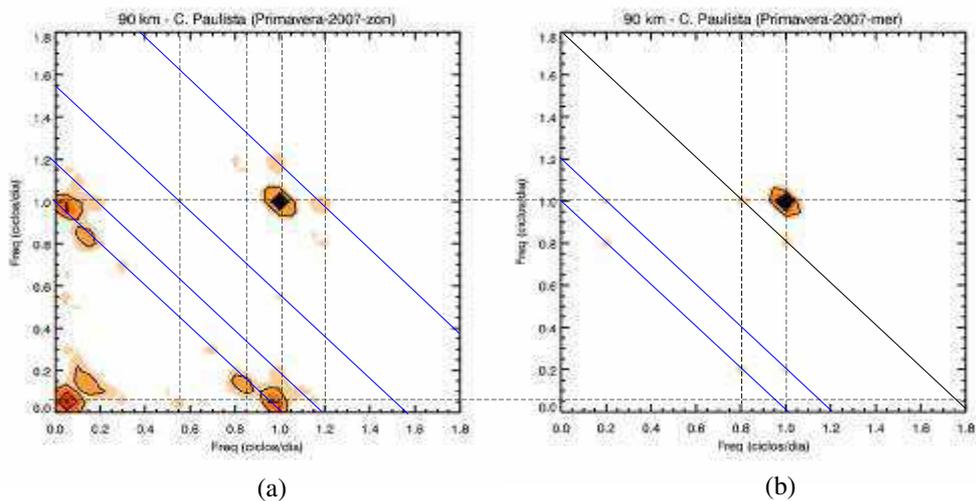
Na Figura 116 (a) tem-se o espectro em wavelets, para a componente zonal dos ventos, da primavera de 2007. Através dele, observa-se que as densidades de energias tanto para os modos de marés quanto para a QTDW não são intensos e apenas identificam-se alguns núcleos para maré diurna. Por outro lado, observa-se um núcleo muito intenso relativo á periodicidade de ~5-7 dias entre os dias 304 e 330 e outro entre os dias 356 e 366. Ainda na componente zonal observa-se energia intensa em ~12-20 dias na maior parte desta primavera, e também alguma energia para ~3-4 dias. Na componente meridional, Figura 116(b) a maré é muito intensa na primeira metade da primavera, diminuindo para o restante da estação. Nesta componente observa-se um núcleo intenso para a QTDW entre os dias 334 e 340. Detecta-se também alguma energia para a maré semidiurna.



**Figura 116** – Espectros de energia em ondaletas do vento meteorológico na primavera de 2007 em C. Paulista-SP para 90 km de altitude. (a) zonal; (b) meridional; e da Energia Espectral Global (direita).

A análise biespectral para a componente zonal, Figura 117(a), revela os seguintes núcleos para tríades ressonantes envolvendo modos de marés e Ondas Planetárias:

- (a) (0,06; 0,94; 1,0)  $\Rightarrow$  ~16 dias, DT e DT
- (b) (0,15; 0,85; 1,0)  $\Rightarrow$  ~5-7 dias, DT e ~28 horas
- (c) (0,2; 1,0; 1,2)  $\Rightarrow$  ~5 dias, DT e ~20 horas
- (d) (0,55; 1,0; 1,55)  $\Rightarrow$  QTDW, DT e ~16 horas
- (e) (1,0; 1,2; 2,2)  $\Rightarrow$  DT, ~20 horas e ~11 horas



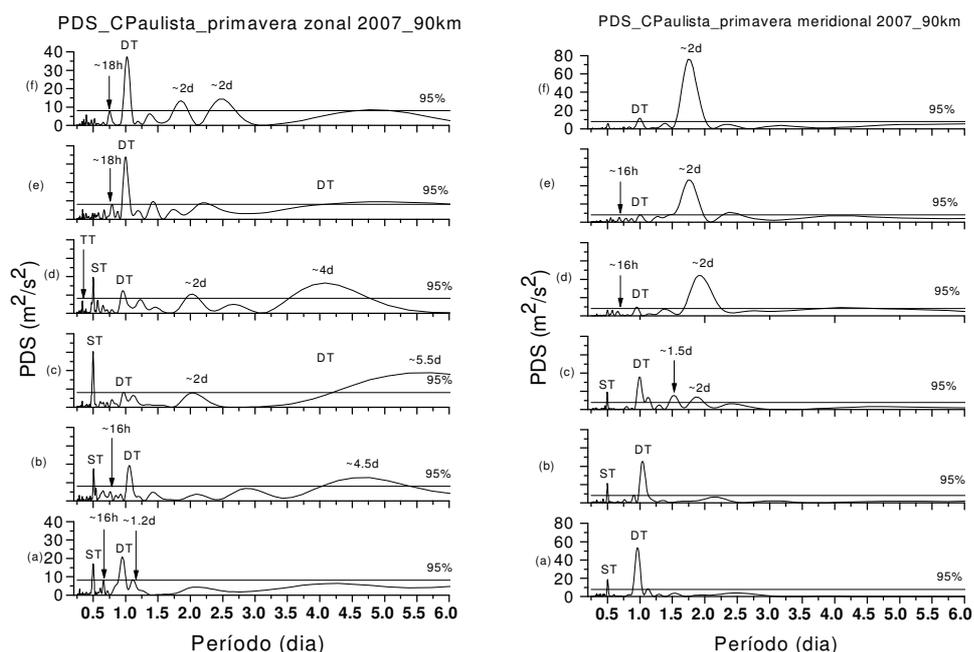
**Figura 117** – Análise biespectral para as componentes do vento meteorológico na primavera de 2007 em C. Paulista - SP para 90 km de altitude. (a) zonal; (b) meridional.

Na componente meridional, Figura 117(b) tem-se:

- (a) (0,5; 1,0; 1,5)  $\Rightarrow$  QTDW, DT e  $\sim$ 16 horas
- (b) (0,2; 0,8; 1,0)  $\Rightarrow$   $\sim$ 5-7 dias, DT e  $\sim$ 30 horas
- (c) (0,2; 1,0; 1,2)  $\Rightarrow$   $\sim$ 5-7 dias, DT e  $\sim$ 20 horas
- (d) (0,8; 1,0; 1,8)  $\Rightarrow$   $\sim$ 30 horas, DT e  $\sim$ 13,3 horas

Na Figura 118, tem-se a PSD para a componente zonal da primavera 2007. Observam-se picos intensos para as periodicidades: maré diurna, maré semidiurna, maré terdiurna,  $\sim$ 16 horas,  $\sim$ 18 horas, QTDW e  $\sim$ 3-4 dias. Observa-se que os comportamentos dos picos da maré diurna e da maré semidiurna, sugerem que estas oscilações interagem não linearmente produzindo o modo de maré terdiurna e intensificando o modo de maré diurna. Observa-se também que a maré diurna interagem não linearmente com a QTDW, produzindo a oscilação de  $\sim$ 16 horas e produzindo outra QTDW e, ainda interage não linearmente com a periodicidade entre 3 e 5 dias gerando as periodicidades de  $\sim$ 18 horas e de  $\sim$ 30 horas.

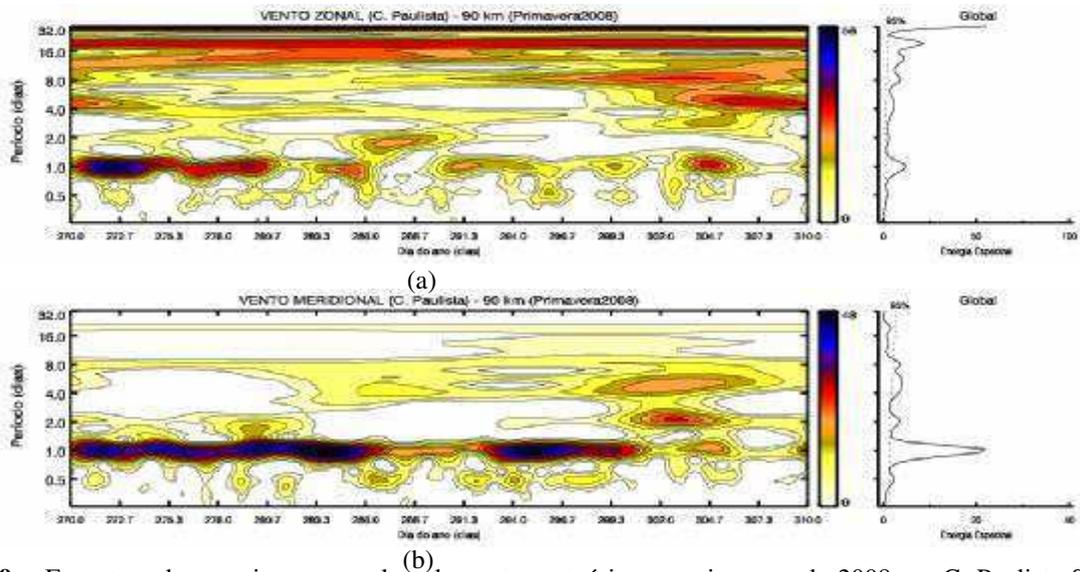
Na componente meridional, o comportamento das periodicidades maré diurna, maré semidiurna e QTDW é bastante semelhante ao comportamento descrito para esta componente na primavera de 2005. As marés semidiurna e diurna interagem e a maré diurna é intensificada, enquanto que a QTDW se amplifica através da interação com a maré diurna.



**Figura 118** – Periodograma de Lomb Scargle para as componentes do vento meteorológico na primavera de 2007 em C. Paulista - SP para 90 km de altitude. (a) zonal (b) meridional. Cada gráfico corresponde a uma semana (07 dias) de dados no intervalo entre os dias 26/set e 7/nov/2005.

### 4.3. Primavera 2008

Os dados para a primavera de 2008 não estão completos, mas é possível observar nas análises em wavelets, Figura 119, que a maré diurna se mostra intensa no início da estação em ambas as componentes zonal, Figura 119(a), e meridional, Figura 119(b). Na componente zonal, identifica-se energia espectral para as periodicidades de 12-20 dias para toda a série analisada, energia intensa para ~5-7 dias entre os dias 302 e 310. Identifica-se um núcleo para a QTDW entre os dias 283 e 291. Na componente meridional, encontram-se energias intensas para as periodicidades de ~3-4 dias entre os dias 300 e 306, para a QTDW entre os dias 301 e 305 e, ainda, energia muito intensa para a maré diurna entre os dias 270 e 301.



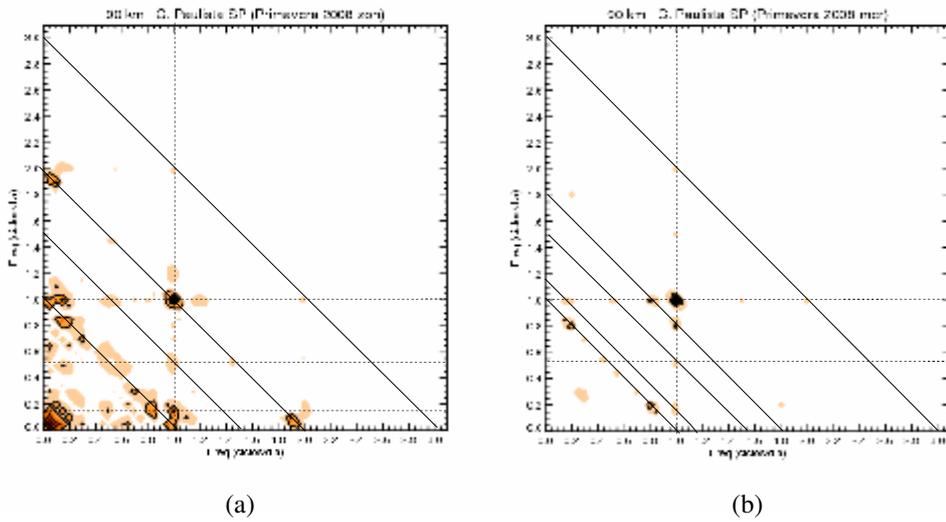
**Figura 119** – Espectros de energia em wavelets do vento meteorológico na primavera de 2008 em C. Paulista-SP para 90 km de altitude. (a) zonal; (b) meridional; e da Energia Espectral Global (direita).

A análise biespectral para a componente zonal, Figura 120(a), revela os seguintes núcleos para tríades ressonantes envolvendo modos de marés e Ondas Planetárias:

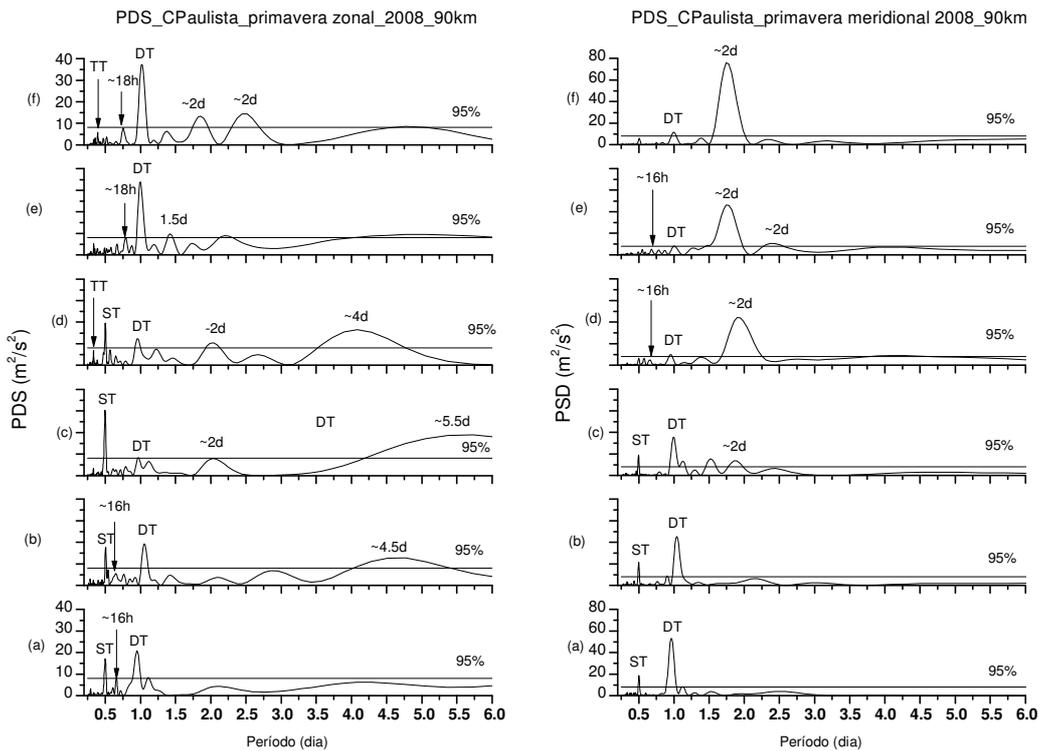
- (a) (0,06; 0,94; 1,0)  $\Rightarrow$  ~16 dias, DT e DT
- (b) (0,2; 0,8; 1,0)  $\Rightarrow$  ~5 -7 dias, DT e ~30 horas
- (c) (0,5; 1,0; 1,5)  $\Rightarrow$  QTDW, DT e ~16 horas
- (d) (1,0; 1,2; 2,2)  $\Rightarrow$  DT, ~20 horas e ~11 horas
- (e) (1,0; 2,0; 3,0)  $\Rightarrow$  DT, ST e TT
- (f) (0,1; 2,0; 2,1)  $\Rightarrow$  ~10 dias, ST e ~11,5 horas
- (g) (0,2; 1,0; 1,2)  $\Rightarrow$  ~5 -7 dias, DT e ~20 horas

Na componente meridional, Figura 120(b), têm-se os seguintes núcleos:

- (a) (0,8; 1,0; 1,8) ⇒ ~30 horas, DT e ~13,3 horas
- (b) (0,2; 0,8; 1,0) ⇒ ~5 -7 dias, DT e ~30 horas
- (c) (0,5; 1,0; 1,5) ⇒ QTDW, DT e ~16 horas
- (d) (1,0; 2,0; 3,0) ⇒ DT, ST e TT
- (e) (0,2; 1,0; 1,2) ⇒ ~5 -7 dias, DT e ~20 horas



**Figura 120**– Análise biespectral para as componentes do vento meteorico na primavera de 2008 em C. Paulista - SP para 90 km de altitude. (a) zonal; (b) meridional.



**Figura 121** – Periodograma de Lomb Scargle para as componentes do vento meteorico na primavera de 2008 em C. Paulista - SP para 90 km de altitude. (a) zonal (b) meridional. Cada gráfico corresponde a uma semana (07 dias) de dados no intervalo entre os dias 24/set e 5/nov/2008.

Na Tabela 28, apresenta-se um resumo dos episódios identificados através da análise biespectral como interação não linear ressonante entre modos da maré e outras ondas nos ventos meteorológicos em 90 km para as primaveras de Cachoeira Paulista – SP.

**Tabela 28.** Episódios identificados através da análise biespectral como interação não linear ressonante entre a maré diurna e outras ondas nos ventos meteorológicos em 90 km para as primaveras de Cachoeira Paulista – SP.

	Zonal						Meridional					
	Período das outras ondas (dias)						Período das outras ondas (dias)					
	0,5	2	3-4	5-7	10	12-20	0,5	2	3-4	5-7	10	12-20
2005	-	Sim	-	-	-	Sim	Sim	Sim	-	Sim	Sim	-
2006	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2007	-	Sim	Sim	Sim	-	Sim	-	Sim	Sim	-	-	-
2008	Sim	Sim	-	Sim	Sim	-	Sim	Sim	-	Sim	-	-

Os resultados das análises dos dados de eventos meteorológicos de Cachoeira Paulista-PB, entre os anos de 2004 e 2008, para a estação de primavera em 90 km de altitude, permitem colocar os seguintes aspectos:

(i) Através dos espectros em wavelets, os núcleos para a QTDW se mostram pouco intensos em ambas componentes, sendo que na componente zonal a QTDW é mais frequente e mais significativa que na meridional em todas as primaveras investigadas. A maré diurna é um evento mais intenso e regular nos meses iniciais da primavera. Na componente zonal, detectam-se densidade de energia para periodicidades de ~27 dias, ~12-20 dias, ~8-10 dias e de ~5-7 dias. É possível se observar ainda núcleos referentes à oscilação de ~3-4 dias e ainda a presença menos intensa da maré semidiurna.

(ii) Através das análises biespectrais e das PSD encontra-se que a interação não linear ressonante entre a maré diurna e a QTDW é um evento que ocorre, mas, não é o único que contribui para a variabilidade da amplitude da maré em ambas as componentes dos ventos meteorológicos desta estação. Eventos de interação não linear, envolvendo as marés diurna e semidiurna, resultando na maré terdiurna, foram detectados. Quando os picos para maré semidiurna são detectados as intensidades deles estão próximas ao nível de significância. Eventos de interações não lineares ressonantes, dos modos de marés com Ondas Planetárias de períodos de ~3-4 dias, ~6,5 dias e ~10 dias, também foram detectados para todas as primaveras investigadas. Estes últimos juntamente com os eventos de interações não lineares envolvendo marés e QTDW se constituem nos eventos principais responsáveis pela variabilidade das amplitudes da maré diurna em períodos de ondas planetárias nas primaveras de Cachoeira Paulista-SP entre 2005 e 2008 na altitude de 90 km.