



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

INPE-5222-TDL/437

ANÁLISE DE DISTÚRBIOS ONDULATÓRIOS DE LESTE SOBRE O
OCEANO ATLÂNTICO EQUATORIAL SUL.

Chou Sin Chan

Dissertação de Mestrado em Meteorologia, orientada por Nelson J. Ferreira, aprovada
em 29 de agosto de 1990.

INPE
São José dos Campos
1990



PALAVRAS CHAVES/KEY WORDS

AUTORES
AUTHORS

Ondas de Leste
Distúrbios equatoriais

AUTORIZADA POR/AUTHORIZED BY

Ralf Gjelow
Pres. Cons. Pós-Grad.

AUTOR RESPONSÁVEL
RESPONSIBLE AUTHOR

Chou Sin Chan

DISTRIBUIÇÃO/DISTRIBUTION

INTERNA / INTERNAL
 EXTERNA / EXTERNAL
 RESTRITA / RESTRICTED

REVISADA POR / REVISED BY

Nelson F. Ferreira

CDU/UDC

551.5

DATA / DATE

Dezembro de 1990

TÍTULO/TITLE	PUBLICAÇÃO Nº PUBLICATION NO
	INPE-5222-TDL/437
ANÁLISE DE DISTÚRBIOS ONDULATÓRIOS DE LESTE SOBRE O OCEANO ATLÂNTICO EQUATORIAL SUL	
AUTORES/AUTHORSHIP	Chou Sin Chan

ORIGEM
ORIGIN

PG/DSM

PROJETO
PROJECT

MET

Nº DE PAG.
NO OF PAGES

134

ÚLTIMA PAG.
LAST PAGE

A. 6

VERSÃO
VERSION

Nº DE MAPAS
NO OF MAPS

RESUMO - NOTAS / ABSTRACT - NOTES

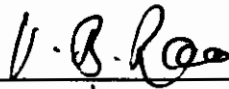
Analisa-se as características ondulatórias básicas dos distúrbios equatoriais de leste sobre o Oceano Atlântico Equatorial Sul, próximo à costa da América do Sul, durante o First GARP (Global Atmospheric Research Program) Global Experiment (FGGE). Foram utilizados dados do National Meteorological Center (NMC) e dados de radiação de onda longa (ROL). Análises de diagramas tipo "Hovmoller" da componente meridional do vento revelam distúrbios ondulatórios se propagando para oeste com velocidade de fase entre 10 a 12 m/s, período entre 5 a 6 dias, e comprimento de onda de 4800 km a 6200 km. Há sinais de distúrbios durante todo o ano. No outono ocorrem as ondas mais curtas, enquanto no inverno ocorrem as ondas mais longas. As análises mostram distúrbios em ROL com períodos entre 10 a 30 e entre 30 a 60 dias. Os espectros de potência da componente meridional do vento apresentam picos no intervalo de 3 a 5 dias em 5 S. Estes picos se destacam mais na estações de outono e inverno, em torno de 20 W e 25 W. Os espectros cruzados indicam ondas se propagando para oeste com a velocidade de 9,5 m/s e comprimento de onda de 3300 km durante o trimestre MAM, e velocidade de 15 m/s e comprimento de 5200 km durante o trimestre JJA.

OBSERVAÇÕES/REMARKS

Dissertação de mestrado em Meteorologia, aprovado em 28 de agosto de 1990.


Aprovada pela Banca Examinadora
em cumprimento a requisito exigido
para a obtenção do Título de Mestre
em Meteorologia

Dr. Vadlamudi Brahamananda Rao



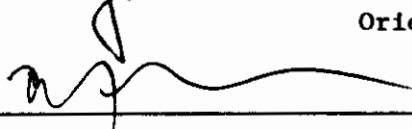
Presidente

Dr. Nelson Jesus Ferreira



Orientador

Dr. Prakki Satyamurty




Orientador

Drª Mary Toshie Kayano



Membro da Banca

Dr. Ernesto dos Santos Caetano Neto



Membro da Banca
-convidado-

Candidata: Chou Sin Chan

São José dos Campos, 29 de agosto de 1990

à mamãe e papai Chou

Agradecimentos

Imensamente, ao Dr. Nelson Jesus Ferreira e ao Dr. Prakki Satyamurti pela orientação e apoio imprescindíveis na realização deste trabalho,

Aos Drs. V. B. Rao, e Ernesto dos Santos C. Neto, e Dra. Mary T. Kayano pelas valiosas sugestões,

Em especial, ao Dr. João Antônio Lorenzetti, por ceder o programa de análise espectral e também contribuir com vários comentários e sugestões,

Ao Ademir Fernando Morelli e a Jacqueline Georgette Sire pela valiosa ajuda na estruturação e montagem da versão final deste trabalho

Ao Manoel A. Gan pelas especificações e leitura dos dados utilizados neste trabalho,

Ao pessoal da computação, plantonistas e operadores pelos eficientes serviços prestados,

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq, que me proporcionou o suporte financeiro durante a execução deste trabalho,

A todos amigos que de alguma maneira colaboraram direta ou indiretamente neste trabalho.

ABSTRACT

Using the National Meteorological Center (NMC) daily data and Outgoing Longwave Radiation data (OLR), this study focus on the main features of wave disturbances over the Equatorial Atlantic Ocean, vicinity of South America, during the First GARP Global Experiment (FGGE). Hovmoller diagrams and spectrum analysis of the meridional component of wind at 850 hPa are used to estimate the time scale and the propagation features of wave disturbances. Analysis of Hovmoller diagrams reveal, throughout the year, the existence of waves propagating westward with a period of 5-6 days, phase speed of 10-12 m/s, and wavelength of about 4800-6200 km. During the southern autumn, the waves are relatively short while during the southern winter the waves are relatively long. Also during these seasons the amplitude of the waves are relatively larger than during the other seasons. These disturbances are only weakly observed in OLR data, while disturbances of 10-30 days and 30-60 days period were more evident. Power spectra of meridional wind component show peaks between 3-5 days over the Atlantic Ocean at 5°S. These peaks are more prominent during autumn and winter and at about 20°W and 25°W. Cross spectra indicate waves travelling westwards at speed of 9.5 m/s and wavelength of 3300 km during southern autumn, and at phase speed of 15 m/s and wavelength of about 5200 km during southern winter.

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
LISTA DE FIGURAS	XIII
LISTA DE TABELAS	XIX
LISTA DE SÍMBOLOS	XXI
<u>CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO</u>	1
1.1 - Revisão Bibliográfica	3
<u>CAPÍTULO 2 - DADOS UTILIZADOS E METODOLOGIA</u>	11
2.1 - Dados utilizados	11
2.2 - Metodologia	11
2.2.1 - Diagramas longitude versus tempo	12
2.2.2 - Análise espectral	13
2.2.2.1 - Fundamentos da análise espectral	13
<u>CAPÍTULO 3 - RESULTADOS</u>	37
3.1 - Campo médio do vento em 850 hPa	37
3.2 - Diagramas longitude versus tempo	45
3.3 - Estimativas de espectros de potência	74
3.4 - Características ondulatórias básicas dos distúrbios	80
<u>CAPÍTULO 4 - CONCLUSÕES e CONSIDERAÇÕES FINAIS</u>	96
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	100
APÊNDICE A - TRANSFORMADA RÁPIDA DE FOURIER (FFT - Fast Fourier Transform).....	A.1

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
1.1 - Composição temporal de um distúrbio de leste	2
1.2 - Modelo conceitual de onda de leste: linhas de corrente (linhas sólidas) do escoamento nos altos níveis e isóbaras (linhas tracejadas) dos baixos níveis. Adaptado de Riehl (1945)	4
2.1 - Funções janelas: versões (A) temporal e (B) espectral. Adaptado de Lorenzetti (1976), pp 47	29
2.2 - Efeito de sobreposição ("aliasing") resultante de baixa taxa de amostragem. Círculos pequenos indicam pontos amostrados. Adaptado de Blackman e Tukey (1958), pp 31.....	30
3.1 - Campo médio do vento em 850 hPa, nos trimestres: (A) DJF, (B) MAM, (C) JJA e (D) SON do ano FGGE..	39
3.2 - Diagramas longitude versus tempo de desvios da componente meridional do vento, em relação à média do trimestre, filtrados para o intervalo de 2 a 10 dias, para (A)DJF, (B) MAM, (C) JJA e (D) SON, do nível 850 hPa, ao longo do equador. Estão plotados somente os desvios positivos. Intervalo dos contornos: 1 m/s.....	43
3.3 - Diagramas longitude versus tempo de desvios da radiação de onda longa, em relação à média do trimestre, filtrados para o intervalo de 2 a 10 dias, para (A) DJF, (B) MAM, (C) JJA e (D) SON, ao longo do equador. Estão plotados somente os desvios negativos. Intervalo dos contornos: 10 W/m ²	59
3.4 - Diagramas longitude versus tempo de simulação de uma onda de comprimento L=5000 km e velocidade de fase c = -10m/s com resolução (A) dx=250 km e dt=12h e (B) dx=750 km e dt = 24h.....	69

- 3.5 - Diagramas longitude versus tempo de simulação de um pacote de ondas de comprimentos: 5000, 4000 e 3000 km e velocidade de fase $c = -10$ m/s com resolução (A) $\Delta x = 250$ km e $\Delta t = 12$ h e (B) $\Delta x = 750$ km e $\Delta t = 24$ h..... 71
- 3.6 - Diagramas longitude versus tempo e desvios da vorticidade relativa, em relação à média do trimestre, filtrados para o intervalo de 2 a 10 dias, para MAM, ao longo da latitude de $2,50^{\circ}$ S, no nível de 850 hPa. Estão plotados somente os desvios negativos. Intervalo dos contornos: $(1 \times 10^{-6})/s$ 72
- 3.7 - Estimativas de espectro de potência suavizado de desvios da componente meridional do vento, em relação à média de cada trimestre, do nível de 850 hPa e latitude de $5,00^{\circ}$ S, de (A) DJF, (B) MAM, (C) JJA e (D) SON. Eixo das ordenadas em escala logarítmica. Unidade das ordenadas: $m^2 \text{ dia}/s^2$. O intervalo de confiança para os picos significativos estão plotados no gráfico na banda entre 3 a 5 dias..... 76
- 3.8 - Distribuição horizontal das estimativas dos espectros de potência, integradas no intervalo de período entre 3 a 5 dias, para (A) componente meridional e (B) componente zonal do vento em 850hPa, durante MAM. Intervalo dos contornos: $0,2 m^2/s^2$ 83
- 3.9 - Distribuição horizontal das estimativas dos espectros de potência, integradas no intervalo de período entre 3 a 5 dias, para (A) componente meridional e (B) a componente zonal do vento em 850hPa, durante MAM. Intervalo dos contornos: $0,2 m^2/s^2$ 84
- 3.10 - Distribuição horizontal das estimativas dos espectros de potência, integradas no intervalo de período entre 3 a 5 dias, para (A) componente meridional e (B) componente zonal do vento em 850hPa, durante JJA. Intervalo dos contornos: $0,2 m^2/s^2$ 86

3.11 - Distribuição horizontal das estimativas dos espectros de potência, integradas no intervalo de período entre 3 a 5 dias, da (A) componente meridional e (B) componente zonal do vento em 850hPa, durante SON. Intervalo dos contornos: 0,2m ² /s ²	87
3.12 - Distribuição horizontal das estimativas dos espectros de potência, integradas no intervalo de período entre 3 a 5 dias, da temperatura do ar em 850hPa, durante (A) MAM e (B) JJA. Intervalo dos contornos: 0,2oC ²	89
3.13 - Distribuição horizontal de médias da coerência ao quadrado e diferenças de fase, entre as séries de v do ponto eq.,22,5oW e o campo de v, em relação ao intervalo de período entre 3 a 5 dias, no nível de 850 hPa, durante (A) MAM e (B) JJA. Intervalo dos contornos de coerência ao quadrado: 0,3. Intervalo dos contornos de diferença de fase: 30o	93
A.1 - Gráfico para o algoritmo FFT, N = 4. Adaptado de Brigham, 1974)	A.6

LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
2.1 - Exemplos de janelas espectrais. Razão de variância e graus de liberdade. T é o tamanho da amostra e M o ponto de truncamento da função. Adaptado de Lorenzetti (1976), pp 50	30
3.1 - Análise dos diagramas longitude versus tempo ...	46
3.2 - Características básicas dos distúrbios ao longo do equador.....	48
3.3 - Variância e variância filtrada da componente meridional do vento, para o filtro de 2 a 10 dias, para os trimestres: (A) DJF, (B) MAM, (C) JJA, (D) SON	53
3.4 - Variância e variância filtrada da componente zonal do vento, para o filtro de 2 a 10 dias, para MAM.....	57
3.5 - Variância e variância filtrada da temperatura do ar, para o filtro de 2 a 10 dias, para MAM...	58
3.6 - Variância e variância filtrada de radiação de onda longa, para o filtro de 2 a 10 dias, para os trimestres: (A) DJF, (B) MAM, (C) JJA, (D) SON	62
3.7 - Variância e variância filtrada de radiação de onda longa, para o filtro de 5 a 10 dias, para os trimestres: (A) DJF, (B) MAM, (C) JJA, (D) SON	64
3.8 - Variância e porcentagem de variância filtrada para diferentes intervalos de período utilizando dados de ROL (janeiro a novembro de 1979), ao longo equador.....	67
3.9 - Variância e variância filtrada de vorticidade relativa, para o filtro de 2 a 10 dias, para MAM	73

LISTA DE SÍMBOLOS

a_m, b_m, R_m, c_m	- coeficientes da série de Fourier
c	- velocidade de fase da onda
c_g	- velocidade das ondas de gravidade pura
$c_{xx}(u)$	- função autocovariância da série x com diferença no tempo de u
$c_{xy}(u)$	- função covariância das séries x e y com diferença no tempo de u
$C_{xx}(f)$	- espectro de potência de $x(t)$
$C'_{xx}(f)$	- estimador do espectro de potência de $x(t)$
$C_{xy}(f)$	- espectro cruzado de $x(t)$ e $y(t)$
$C'_{xy}(f)$	- estimador do espectro cruzado de $x(t), y(t)$
$\text{Coh}^2(f)$	- espectro de coerência ao quadrado
D_{Ndt}	- função janela temporal com truncamento Ndt
E	- Esperança matemática
f	- frequência
$F_x(f)$	- espectro de fase da onda de $x(t)$
k	- número de onda adimensional
$k_{xy}(f)$	- co-espectro
L	- comprimento de onda
m	- número de ordem do harmônico
$m_{xy}(f)$	- espectro de amplitudes
N	- tamanho das séries discretas
p	- nível de probabilidade
Q_{Ndt}	- função janela espectral
β	- parâmetro de Rossby
ρ	- nível de confiança
v	- graus de liberdade

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Ventos de leste, muita umidade e intensa atividade convectiva são alguns dos ingredientes que caracterizam a atmosfera tropical. A liberação de calor latente nessas regiões é uma importante fonte de energia para a manutenção da circulação geral da atmosfera. Portanto, conhecer melhor a dinâmica dos fenômenos meteorológicos nos trópicos é vital para uma melhor compreensão da circulação geral da atmosfera e, conseqüentemente, para o aprimoramento dos modelos de previsão de tempo.

Os movimentos na atmosfera tropical se desenvolvem em várias escalas de espaço e tempo, desde a convecção cumulus até a oscilação quase-bienal, porém, a escala da convecção é predominante. O estudo destes fenômenos de tão variadas escalas tem sido bastante limitado pela escassez e baixa freqüência de observações meteorológicas nos trópicos. Ainda hoje, há grandes áreas onde dados adicionais seriam bastante úteis para melhor definir as características dos fenômenos de tempo da região. Deparamos ainda com a falta de organização dos padrões de nebulosidade, tornando difícil a definição de modelos sinóticos para os trópicos.

Uma classe de fenômeno de tempo nos trópicos, caracterizado por distúrbios nos ventos de leste, vem sendo estudada a mais de quarenta anos, tendo como precursor o modelo de onda de leste idealizado por Riehl (1945). A maior parte dos trabalhos nessa área enfocou a dinâmica e estrutura dos distúrbios tropicais que atuam nos oceanos Pacífico e Atlântico Norte. Pouca atenção foi dada ao papel desses sistemas nas regiões equatoriais do

Atlântico Sul, particularmente nas vizinhanças da América do Sul.

Examinando imagens de satélites meteorológicos, pode-se observar, por vezes, distúrbios equatoriais sobre o Oceano Atlântico Tropical Sul alcançando a costa norte e nordeste do Brasil. Em algumas situações, esses distúrbios estão associados com forte convecção e alto teor de umidade (Fig. 1.1).

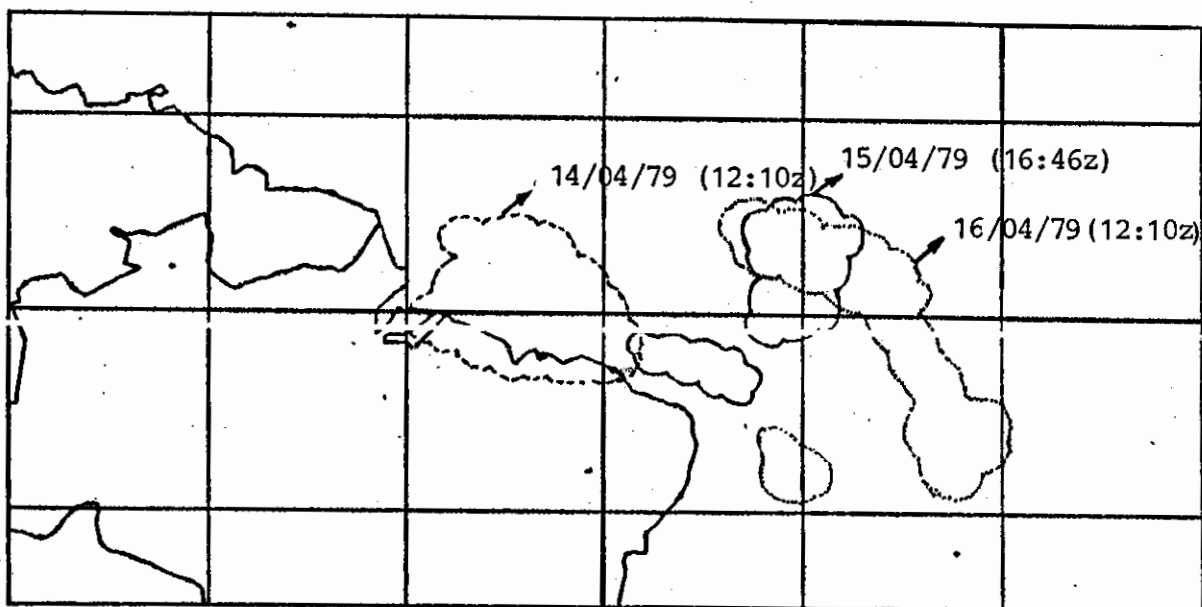


Fig. 1.1 - Composição temporal de um distúrbio de leste.

Este trabalho propõe-se a investigar distúrbios ondulatórios sobre o Oceano Atlântico Equatorial Sul, na vizinhança das regiões norte e nordeste do Brasil, utilizando a técnica de análises espectral e espectral cruzada. Ênfase será dada às análises das características, estrutura e variação sazonal desses distúrbios.

A seguir, apresenta-se a bibliografia dos principais estudos realizados sobre distúrbios de leste sobre os oceanos tropicais. No segundo capítulo apresenta-se a metodologia utilizada na análise dos distúrbios e, introduz-se alguma teoria básica sobre análises espectral e espectral cruzada. No terceiro capítulo são mostrados os campos do escoamento médio em 850 hPa e os resultados das análises. As conclusões e sugestões são apresentadas no capítulo 4.

1.1 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Riehl (1945) observou, na região do Caribe, oscilações nos campos de pressão e vento se deslocando para oeste, dentro da corrente de leste do estado básico, na baixa troposfera (fig. 1.2). A partir destas observações, Riehl desenvolveu o modelo das ondas de leste, que apresentam velocidade de fase de $6^\circ \text{long}/\text{dia}$, período de 3 a 4 dias e comprimento horizontal de 2000 a 3000 km. Nos baixos níveis, ocorre tempo bom associado à subsidência a oeste do cavado e mau tempo a leste do cavado. Na baixa troposfera, a onda se move mais lentamente que a corrente básica, e possui um núcleo de ar mais frio que a vizinhança. A intensidade máxima da onda se dá em torno de 700 a 500 hPa e a inclinação é para leste com a altura.

Palmer (1952), postulou o modelo de ondas equatoriais como perturbações ondulatórias na corrente de leste convergente nas latitudes próximas ao equador. Palmer acreditava que estas ondas eram características do Oceano Pacífico Oeste, mas não definiu nenhum padrão de nebulosidade típico.

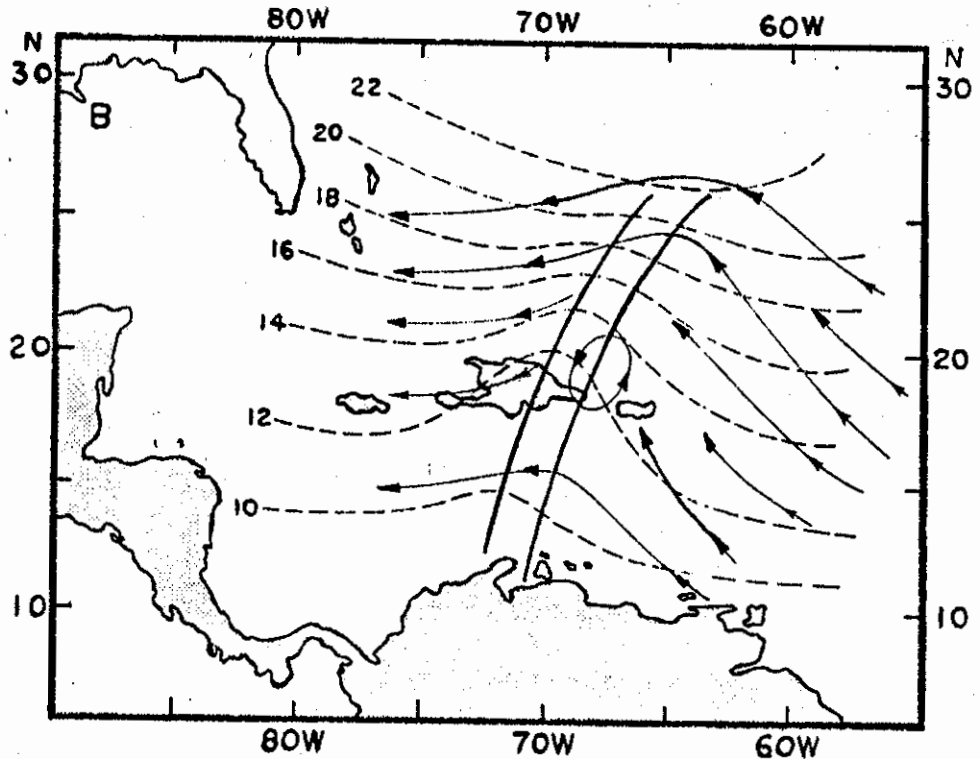


Fig. 1.2 - Modelo conceitual de uma onda de leste: linhas de corrente (linhas sólidas) do escoamento nos altos níveis e isóbaras (linhas tracejadas) dos baixos níveis. Adaptado de Riehl (1945).

Merritt (1964), questionou o modelo de Riehl para descrever os distúrbios ondulatórios nos trópicos e sugeriu substituir o termo ondas por perturbações de leste. Utilizando imagens de satélite da região do Atlântico, classificou os distúrbios de acordo com a forma e intensidade da nebulosidade em 5 distribuições de nebulosidade distintas:

1. Distúrbios fracos lineares;
2. Distúrbios moderados, com a nebulosidade se distribuindo como um semi-vórtice;
3. Distúrbios moderadamente intensos, nebulosidade distribuída de forma vortical;
4. Distúrbios intenso, nebulosidade tipo vórtice;
5. Distúrbios na alta troposfera.

Simpson et al. (1968), encontraram padrões de nebulosidade tipo "V" invertido associados a distúrbio ao norte da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT). Este padrão foi observado cruzando o Atlântico por até uma semana. De acordo com Simpson, os sistemas sinóticos tropicais podem ser classificados nos seguintes estágios: onda tropical, distúrbio tropical e depressão tropical.

Atkinson (1971), classificou os sistemas tropicais em três amplos grupos: ondas, vórtices e distúrbios lineares. Os distúrbios lineares se referem a linhas de cisalhamento (uma zona estreita onde ocorre mudança abrupta da componente do vento paralela a esta zona), e assíntotas de confluência como as que ocorrem no cavado equatorial provocadas pelos ventos alísios dos dois hemisférios.

Barrett (1974), por sua vez, baseando-se nas imagens de satélite, classificou os distúrbios tropicais em lineares e circulares. Os distúrbios lineares podem estar organizados zonalmente, como a ZCIT, meridionalmente, como as ondas de leste, ou obliquamente.

Chang (1970), através de um método objetivo utilizando composição temporal de faixas latitudinais de imagens obtidas por satélite meteorológico, detectou características ondulatórias dos aglomerados convectivos sobre o Pacífico Tropical. Não houve a preocupação em classificar os aglomerados em padrões de nebulosidade. A velocidade de propagação dos aglomerados foi estimada em 9m/s.

As técnicas de análise espectral e composição ("compositing") têm sido bastante utilizadas como técnicas alternativas ao estudo de caso na

investigação das características de distúrbios ondulatórios na região tropical.

Yanai et al.(1968) aplicaram a técnica da análise espectral utilizando a componente meridional do vento em vários níveis de altitude sobre o Oceano Pacífico Tropical, entre abril e julho de 1962. Os resultados indicaram a predominância de distúrbios com período em torno de 4 dias na troposfera baixa. A partir da análise espectral cruzada, estimou-se um comprimento de onda em torno de 6000 km, muito maior que o do modelo de onda de leste de Riehl (1945). Sugeriu-se também que estes distúrbios da baixa troposfera não estão relacionados com os que ocorrem em níveis mais altos.

Wallace e Chang (1969) estenderam o estudo de Yanai et al. (1968) às outras variáveis (temperatura, umidade relativa e pressão à superfície) obtidas de diferentes estações meteorológicas localizadas no Oceano Pacífico Tropical. Os resultados desse estudo revelam que: a) grande parte da variância da umidade relativa está associada a distúrbios de período maior que 3 dias, sugerindo que esta variável é fortemente influenciada por distúrbios de escala sinótica; b) a componente meridional do vento apresenta um pico de energia nas oscilações com período entre 4 a 5 dias; e c) estas oscilações apresentam comprimento de onda em torno 3000 km.

Nitta et al.(1985) e Nitta e Takayabu (1985) fizeram análises de espectro de potência, de trajetória e de composições, com dados do FGGE em pontos de grade, produzidos pelo European Center for Medium Range Weather Forecast (ECMWF), para estudar os distúrbios ondulatórios na baixa troposfera de três regiões tropicais: Pacífico Oeste, Pacífico Leste, continente africano, Atlântico Norte. Sobre o Oceano Pacífico, os resultados mostraram que

a interação entre as ondas do Pacífico Oeste com o cavado de altos níveis do Pacífico Central é uma condição de intensificação dos tufões.

Tai e Ogura (1987), empregaram a análise espectral utilizando o método da máxima entropia, e a técnica de composição no estudo de distúrbios tropicais sobre a região leste do Pacífico. Os valores não diferem muito dos resultados obtidos pelo método espectral convencional. A taxa de crescimento das ondas do Pacífico Leste foi menor que a de outras regiões, o que sugere que estas ondas são menos ativas no Pacífico Leste do que em outras regiões do Pacífico.

A estrutura das ondas Africanas apresenta algumas diferenças com relação a das ondas do Pacífico e do Caribe. Na baixa troposfera, as ondas africanas se deslocam mais rapidamente que a corrente básica de leste, que se intensifica com a altura. O jato de leste africano é importante na origem destas ondas devido à combinação de instabilidade barotrópica e baroclínica ao sul do jato (Reed et al., 1988).

Reed et al. (1988), analisando o espectro de potência da componente meridional do vento em 850 hPa sobre a África, encontraram picos de energia nos períodos de 3 a 5 dias. As ondas apresentaram comprimento em torno de 2500 km e velocidade de fase de 8 m/s.

As ondas africanas observadas sobre o oceano são mais curtas que aquelas sobre o continente (Reed et al., 1977). Há duas trajetórias sobre o continente, uma em torno de 20°N e outra em aproximadamente 12°N , e somente uma trajetória sobre o oceano. Estes resultados sugerem que o enfraquecimento das ondas sobre o Atlântico pode estar relacionado com o ar frio sobre o oceano e o

enfraquecimento do jato na troposfera média (Nitta et al., 1985; Reed et al., 1988).

Segundo Riehl (1979), o desenvolvimento de ondas nos ventos de leste requer uma corrente de leste profunda, estendendo-se da baixa até a alta troposfera, semelhante às ondas que se desenvolvem nos ventos de oeste nos extratropicos. Devido à assimetria na circulação geral, os ventos de oeste do Hemisfério Sul se encontram mais próximos do equador. Supunha-se que estes ventos de oeste, relativamente fortes, que invadem os trópicos, inibissem o desenvolvimento de ondas nos ventos de leste. Por esta razão, Riehl acreditava que as ondas de leste devem ser um fenômeno, predominantemente, do Hemisfério Norte. Nenhum dos autores citados acima encontraram sobre o Atlântico sul sinais de distúrbios ondulatórios comparáveis aos dos outros oceanos.

Entretanto, examinando a composição temporal de faixas de imagens obtidas por satélite no Oceano Atlântico Tropical, Yamazaki e Rao (1977) notaram, durante o inverno do Hemisfério Sul, aglomerados de nebulosidade propagando-se de leste para oeste. Eles observaram aproximadamente 20 linhas de aglomerados durante os três meses analisados. Estes aglomerados apresentam velocidade média de 10m/s e comprimento de onda de 4000 km. Eles observaram também que estas linhas se propagavam da longitude de 10°E até aproximadamente 40°W. Num estudo teórico, Yamazaki (1975) obteve resultados comparáveis aos observacionais, e constatou que na região do Oceano Atlântico adjacente à costa Nordeste do Brasil, há condições de ocorrer instabilidade barotrópica no escoamento de leste.

Neiya (1975) utilizou dados da análise tropical do NMC e de algumas estações de radiossondagem sobre a região do Atlântico Equatorial Sul e litoral norte e nordeste do Brasil para aplicar as análises espectral e espectral cruzada. Apesar dele ter levantado a possibilidade de a escassez de dados ter afetado os resultados, encontrou distúrbios se propagando de leste para oeste sobre o Atlântico. Estas ondas apresentaram período entre 4 a 6 dias, comprimento em torno de 6000 km e velocidade de fase de 11° long./dia. Estas características se assemelham àquelas encontradas por Yamazaki (1975). Os distúrbios apresentaram também inclinação na horizontal na direção NW-SE e na vertical inclinavam-se para leste.

O efeito vale-montanha tem forte influência na precipitação no interior do Nordeste do Brasil, e quando associado a sistemas que se propagam de leste para oeste e produz convergência necessária para gerar a convecção (Ramos, 1975).

Em um estudo climatológico realizado com dados de radiossondagens das estações de Manaus e Belém, Kayano (1979) notou variações quase-periódicas na direção do vento e na umidade relativa. A periodicidade de 3 a 5 dias levou a acreditar na existência de ondas de leste sobre a região Amazônica.

Liebmann e Hendon (1990) fizeram estudo dos distúrbios sinóticos ao longo do equador e encontraram picos próximos de quatro dias nos espectros de potência da componente meridional do vento em 850 hPa. O padrão de correlação entre a componente zonal de um ponto de grade e o campo da componente meridional resultou numa estrutura semelhante a das ondas mistas de Rossby-gravidade sobre o Oceano Atlântico.

No estudo dos modelos sinóticos tropicais, há opiniões e interpretações diferentes, por vezes de dados iguais. Não existe ainda uma teoria consagrada que explique os processos físicos de desenvolvimento dos distúrbios nos trópicos como a teoria quase-geostrófica aplicada aos distúrbios das latitudes médias.

CAPÍTULO 2

DADOS UTILIZADOS e METODOLOGIA

2.1 - DADOS UTILIZADOS

Neste estudo foram utilizados dados diários (00 e 12 UTC) de vento e temperatura do ar produzidos pelo NMC, e dados de ROL derivados de satélites meteorológicos. As análises do NMC fazem parte de um dos conjuntos de dados globais obtidos para dar suporte ao FGGE. Estes dados cobrem o período de dezembro de 1978 a novembro de 1979. As variáveis estão em pontos de grade com espaçamento de $2,5^{\circ} \times 2,5^{\circ}$ (latitude x longitude), no nível de 850 hPa.

A região de estudo localiza-se entre $22,5^{\circ}\text{N}$ a $22,5^{\circ}\text{S}$ e 0° a 85°W . Os horários em que não havia dados, foram preenchidos através de interpolação linear no tempo com os dados anteriores e posteriores àquele horário.

Foram utilizados também dados diários de ROL (período noturno e diurno), obtidos por satélites de órbita polar da série NOAA, para o período de janeiro a novembro de 1979. Estes dados apresentam resolução espacial $7,5^{\circ} \times 7,5^{\circ}$, estendem-se de $37,5^{\circ}\text{N}$ a $37,5^{\circ}\text{S}$ e de 95°W a $2,5^{\circ}\text{E}$. Os dados de dezembro de 1978 não estavam disponíveis. Os pontos da grade em que faltavam dados foram preenchidos pelo mesmo procedimento de interpolação linear temporal aplicados ao conjunto de dados de vento e temperatura do NMC.

2.2 - METODOLOGIA

Cada variável foi agrupada em quatro conjuntos associados a trimestres ou estações do ano: dezembro, janeiro e fevereiro (DJF); março, abril e maio

(MAM); junho, julho e agosto (JJA) e setembro, outubro e novembro (SON). A série temporal de cada variável em cada ponto de grade foi construída de desvios da média temporal de cada trimestre ou estação. Ao se tratar as quatro estações como conjuntos de dados independentes, a oscilação anual, ou outro tipo de oscilação atmosférica de frequência muito baixa, não influencia as análises em questão.

No caso dos dados de ROL, o conjunto de DJF foi o menor devido à falta de dados de ROL em dezembro, portanto, a média deste período foi calculada somente com dois meses: janeiro e fevereiro.

Uma vez construída as séries temporais das variáveis nos diversos pontos de grade, as análises procederam-se em duas etapas. A primeira etapa se baseou na detecção subjetiva dos distúrbios sobre Atlântico Sul Tropical e em parte do continente da América do Sul. A segunda etapa consistiu na confirmação da presença destes distúrbios através dos picos nos espectros de potência. Em seguida, foram estimadas as características ondulatórias dos distúrbios.

2.2.1 - DIAGRAMAS LONGITUDE VERSUS TEMPO

Inicialmente foram construídos diagramas longitude versus tempo, do tipo "Hovmöller", para desvios da componente meridional do vento, desvios de vorticidade relativa, e desvios de ROL em latitudes próximas ao equador. As anomalias de vorticidade relativa foram obtidas por diferenças finitas através da expressão: $\delta v' / \delta x - \delta u' / \delta y$, onde $\delta x = \delta y = (2 \times 2,5 \times 110)$ km.

A seguir foram traçados sobre os diagramas padrões de isolinhas inclinadas de desvios da variável, estas linhas indicam o sentido de deslocamento das anomalias com tempo. Pode-se estimar visualmente o período,

a velocidade de propagação e comprimento de onda da perturbação para cada estação do ano.

A freqüência pode ser obtida contando-se o número de perturbações que se deslocaram para oeste e dividindo-o pela duração de cada trimestre. O inverso deste resultado é o período da onda. A velocidade de propagação é obtida diretamente da inclinação das isolinhas (graus de latitude / tempo). O comprimento de onda, L , é estimado pela relação $L = c T$, onde c é a velocidade de fase e T , o período da onda.

2.2.2 - ANÁLISE ESPECTRAL

A segunda etapa consiste em aplicar a técnica de análise espectral nas séries temporais. A análise espectral consiste essencialmente em classificar um grupo de sinais de acordo com um intervalo de freqüência. Pode-se retirar informações bastante úteis de um conjunto de dados com ruídos quando se procura as taxas médias de flutuação ou as freqüências dominantes da série temporal de uma variável.

As séries temporais meteorológicas são compostas de diversas oscilações. É de interesse para a meteorologia separar estas oscilações em componentes regulares e irregulares, e então analisar estas componentes individualmente.

2.2.2.1 - Fundamentos da análise espectral

As propriedades ondulatórias das séries temporais podem ser analisadas através de duas técnicas: a análise harmônica ou análise de Fourier e a análise espectral. A análise harmônica é empregada em estudos de fenômenos de flutuações regulares, especialmente quando apresentam periodicidades conhecidas. Em caso de

periodicidades desconhecidas, a análise espectral é mais adequada. Ambas as técnicas baseiam-se em teorias da estatística e da série de Fourier.

i) Série de Fourier

Seja $x(t)$ uma variável periódica de período T representável por uma série de Fourier. Tem-se:

$$x(t) = a_0 + \sum_{m=1}^{\infty} [a_m \cos(2\pi mt/T) + b_m \text{sen}(2\pi mt/T)] \quad (2.1)$$

onde $1/T$ = freqüência fundamental da série

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_0^T x(t) dt \quad (2.2)$$

$$a_m = \frac{2}{T} \int_0^T x(t) \cos(2\pi mt/T) dt \quad (2.3)$$

$$b_m = \frac{2}{T} \int_0^T x(t) \text{sen}(2\pi mt/T) dt \quad (2.4)$$

para $m = 1, 2, \dots$

A quantidade m é chamada de número do harmônico, ou número de onda. É uma medida do número de ciclos que ocorrem no intervalo do período fundamental, T .

A série de Fourier pode ter outras representações, como por exemplo:

$$x(t) = a_0 + \sum_{m=1}^{\infty} R_m \cos(2\pi mt/T + \phi_m), \quad \text{ou} \quad (2.5)$$

$$x(t) = \sum_{m=1}^{\infty} c_m \exp(i2\pi mt/T) \quad (2.6)$$

R_m e c_m são as amplitudes, e m é a fase de ordem m , definidas por:

$$R_m^2 = a_m^2 + b_m^2 \quad (2.7)$$

$$\phi_m = - \arctan (b_m / a_m) \quad (2.8)$$

$$c_m = \frac{1}{T} \int_0^T x(t) \exp (-i2\pi mt/T) dt \quad (2.9)$$

ii) Representação integral de Fourier

Substituindo (2.9) em (2.6), a forma complexa da série de Fourier, tem-se:

$$x(t) = \sum_{m=1}^{\infty} \left[\frac{1}{T} \int_0^T x(t') \exp(-i2\pi mt'/T) dt' \right] \exp(i2\pi mt/T) \quad (2.10)$$

Nota-se que à medida que aumenta o tamanho da série, a separação entre os harmônicos diminui. Portanto, da relação $T = 1/f$, quando $T \rightarrow \infty$, f se torna infinitamente pequeno, $f \rightarrow \delta f$. O termo $2\pi m/T$ se torna uma variável contínua. A somatória em m torna-se uma integral em f . Assim,

$$x(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \left[\int_{-\infty}^{\infty} x(t') \exp(-i2\pi ft') dt' \right] \exp(i2\pi ft) df \quad (2.11)$$

O termo entre colchetes definido por:

$$x(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \exp(-i2\pi ft) dt \quad (2.12)$$

é a transformada de Fourier de $x(t)$, representada também por:

$$X(f) = \text{TF}[x(t)]$$

A equação (2.10) fica na forma:

$$x(t) = \int_{-\infty}^{\infty} X(f) \exp(i2\pi ft) df, \quad (2.13)$$

que é a representação integral de Fourier para uma função não-periódica.

iii) Série de Fourier finita e discreta

Seja $x(t)$ uma variável observada a intervalos constantes de tempo dt , durante um período T . Tem-se então $N (=T/dt)$ valores distintos de $x(t)$, onde $t = r dt$. A série de Fourier pode ser escrita na forma (Lorenzetti, 1976)

$$x(r dt) = A_0 + 2 \sum_{m=1}^{n-1} \{ A_m \cos(2\pi f m t) + B_m \sin(2\pi f m t) \} + A_n \cos(2\pi f n t) \quad (2.14)$$

onde $n = N/2$ e $f = 1/Ndt$

ou então:

$$x_r = A_0 + 2 \sum_{m=1}^{n-1} \{ A_m \cos(2\pi m r/N) + B_m \sin(2\pi m r/N) \} + A_n \cos(2\pi n r/N) \quad (2.15)$$

onde $r = -n, \dots, 0, 1, \dots, n-1$. A origem é tomada no centro da série, e assume-se que N é um número par.

Os coeficientes da série, A_m e B_m podem ser obtidos multiplicando a equação (2.15) por $\cos(2\pi mr/N)$ ou $\sin(2\pi mr/N)$, somando em r e levando em conta as propriedades de ortogonalidade das funções seno e cosseno. Resulta em

$$A_m = \frac{1}{T} \sum_{r=-n}^{n-1} x_r \cos(2\pi mr/N) \quad (2.16)$$

$$B_m = \frac{1}{T} \sum_{r=-n}^{n-1} x_r \sin(2\pi mr/N) \quad (2.17)$$

onde $m = 0, \dots, n$

Para o último termo $m = n$, teremos sempre $B_n = 0$, pois $\sin(2\pi nr/N) = \sin(2\pi N/2 r/N) = 0$ para qualquer r , e.

$$A_n = \frac{1}{T} \sum_{r=-n}^{n-1} x_r (-1)^r$$

pois $\cos(2\pi N/2 r/N) = \cos(\pi r) = \pm 1$.

A_0 representa o valor médio da série.

Caso N seja ímpar, o último termo das expressões (2.16) e (2.17) será $n = (N-1)/2$. O somatório em r será de $-n$ a n , e m vai de 0 a n . Ao final, a série será composta sempre de N coeficientes, incluindo o termo a_0 .

A série de Fourier finita e discreta pode se apresentar nas seguintes formas :

$$x_r = R_0 + 2 \sum_{m=1}^{n-1} R_m \cos(2\pi mr/N + \phi_m) + R_n \cos(2\pi nr/N) \quad (2.18)$$

$$x_r = \sum_{m=-n}^{n-1} S_m \exp(i2\pi mr/N) \quad (2.19)$$

onde R_m e m possuem as mesmas definições das expressões (2.7) e (2.8), respectivamente, e

$$S_m = \frac{1}{N} \sum_{r=-n}^{n-1} x_r \exp(-i2\pi mr/N) \quad (2.20)$$

tendo $m = -n, \dots, 0, 1, \dots, n-1$. Devido a propriedades periódicas das N amostras, pode-se ter também $m = 0, \dots, N-1$.

A resolução em frequência equivale a $f = 1/2 \delta t$, pois para resolver a onda de menor período são necessários dois intervalos δt . Acima deste valor de frequência não faz sentido levar adiante o cálculo discreto. Isto também é conhecida como frequência de Nyquist.

supondo que a série x_r tenha média nula, $R_0 = 0$, e tomando o quadrado médio da equação (2.18), tem-se o equivalente à variância da série, assim:

$$\frac{1}{N} \sum_{r=-n}^{n-1} x_r^2 = 2 \sum_{m=1}^{n-1} R_m^2 + R_n^2 = (\sigma_x)^2 \quad (2.21)$$

Nota-se, portanto, que a variância da série x_r pode ser decomposta em contribuições devido a cada harmônico. Traçando-se num gráfico a variância em função da frequência, obtém-se o periodograma.

A análise harmônica consiste basicamente em determinar os coeficientes A_m 's e B_m 's e, em seguida, calcular a fração da variância total correspondente a cada harmônico. Observa-se pela eq.(2.21) que a fração da variância total correspondente a cada harmônico, exceto o último, é dada pela relação: $2 (R_m)^2 / (\sigma_x)^2$, sendo para o último: $(R_n)^2 / (\sigma_x)^2$.

O cálculo dos coeficientes pelas expressões (2.16) e (2.17), ou pela (2.20) envolve muito tempo de computação, devido aos somatórios de senos e cossenos, e torna-se impraticável quando a série é muito longa. Cooley e Tukey (1965) desenvolveram o algoritmo FFT (Fast Fourier Transform) que reduz bastante o tempo de processamento, por isso este algoritmo também é utilizado neste trabalho (Apêndice A).

iv) Transformada de Fourier discreta

Suponha $x(t)$ um conjunto finito e discreto, compreendido no intervalo $(-Ndt, Ndt)$, então a expressão (2.12) terá a forma,

$$X'(f) = dt \sum_{r=-N}^N x_r \exp(-i2\pi fr dt) \quad (2.22)$$

$X'(f)$ equivale a $x(f)$ quando se supõe que $x(t)=0$ em $|t| > Ndt$. Esta hipótese equivale a multiplicar $x(t)$ por uma função de truncamento, $D_{Ndt}(t)$, por exemplo, uma função retangular da forma

$$D_{Ndt} = \begin{cases} 1, & |t| \leq Ndt \\ 0, & |t| > Ndt \end{cases} , e \quad (2.23)$$

Então:

$$X'(f) = TF (x(t) \times D_{Ndt}) \quad (2.24)$$

Pelas propriedades da transformada de Fourier, pode-se escrever a expressão (2.24) na forma:

$$X'(f) = TF (x(t)) * TF (D_{Ndt}(t)) \quad (2.25)$$

onde '*' indica a convolução das duas funções.

A convolução de duas funções $f(t)$ e $g(t)$, representada por $(f * g)$, é definida por (Butkov, 1978),

$$(f * g) = \int_0^t f(s) g(t-s) ds \quad (2.26)$$

Pode-se definir uma função $Q_{Ndt}(t)$ a partir da Transformada de Fourier de $D_{Ndt}(t)$, isto é:

$$Q_{Ndt}(t) = TF [D_{Ndt}(t)] \quad (2.27)$$

Então a expressão (2.25) fica:

$$X'(f) = X(f) * Q_{Ndt}(f) \quad (2.28)$$

O uso da função de truncamento será novamente abordado no item (vii).

v) Espectro de potência

O espectro de potência estabelece a relação entre os quadrados dos coeficientes de cada componente harmônico e a variância total da série.

Dividindo-se um conjunto de dados em subconjuntos e submetendo-se estes subconjuntos a uma análise harmônica, os espectros de cada subconjunto podem apresentar grandes diferenças nas amplitudes de harmônicos iguais. Entretanto, os espectros suavizados dos subconjuntos devem ser semelhantes entre si, supondo-se uma série estacionária, isto é, as propriedades estatísticas da série não variam de um subconjunto para outro.

Na análise espectral a atenção está voltada para a distribuição de amplitudes, o ângulo de fase é questão secundária. Em ciências atmosféricas, embora, em geral, se conheça o período fundamental (por exemplo, um

ano), por vezes, a análise harmônica não é suficiente devido aos fenômenos cíclicos que aparecem e desaparecem e que não são necessariamente harmônicos do período fundamental. Esta quase-periodicidade nas séries temporais atmosféricas afeta os ângulos de fase, que, conseqüentemente, podem vir a alterar as amplitudes dos harmônicos.

Pelo fato de o ângulo de fase não ser importante na análise espectral, isto torna este tipo de análise um instrumento poderoso na detecção de fenômenos quase-periódicos, que aparecem como picos significativos nos espectros de potência. A fase relativa pode ser recuperada posteriormente através da análise espectral cruzada (Essenwanger, 1976).

Há duas maneiras de se obter o espectro de potência suavizado: suavizando as amplitudes dos harmônicos, ou fazendo a análise harmônica do autocorrelograma.

vi) Função autocovariância

Um processo estocástico $x(t)$ é dito estacionário, se somente se,

$$E [|x(t)|^2] < +\infty, \quad \forall t \in \mathbb{R} \quad (2.29)$$

$$E [x(t) x(t+u)] = c(u), \quad \forall t \text{ e } u \in \mathbb{R} \quad (2.30)$$

onde $E [.]$ representa a esperança matemática. A expressão (2.30) indica que $E [X(t) X(t+u)]$ é função somente de u .

Suponha que os processos sejam estacionários e tenham média nula, a função $c(u)$ equivale a função autocovariância $\Gamma_{xx}(u)$, definida por:

$$\Gamma_{xx}(u) = E \{ [x(t) - \mu(t)] [x(t+u) - \mu(t+u)] \} \quad (2.31)$$

onde $\mu(t) = E [x(t)]$.

Assim, o estimador da função autocovariância será

$$c_{xx}(u) = \frac{1}{T} \int_0^{t-u} x(t) x(t+u) dt \quad (2.32)$$

onde u equivale ao atraso no tempo.

Um estimador não tendencioso será da forma

$$c_{xx}(u) = \frac{1}{T - u} \int_0^{t-u} x(t) x(t+u) dt \quad (2.33)$$

A função autocorrelação equivale à função autocovariância normalizada pela variância da amostra. O autocorrelograma é um gráfico obtido da função autocorrelação versus u .

Considerando um conjunto de dados discretos, de período fundamental T , faz-se $u = s dt$, sendo s um número inteiro. A função autocovariância mede correlação no seguinte sentido: se um sinal flutua lentamente, em média, então duas amostras sucessivas, x_r e x_{r+1} , terão aproximadamente o mesmo valor e o produto será positivo. Então, em média, para $s=1$, $c_{xx}(s=1)$ será positivo. Portanto, se um sinal flutua rapidamente, as duas amostras podem ter sinais iguais ou diferentes, e em média, assume-se o somatório do produto próximo de zero, assim os valores

não são correlacionados. Para $s = 0$, $C_{XX}(0)$ equivale à variância da amostra.

A vantagem do uso da função autocovariância no estudo da análise espectral, se deve ao fato de que a transformada desta função equivale a obter o estimador do espectro de potência que se procura.

A transformada de Fourier da função autocovariância pode ser expressa por:

$$C_{XX}(f) = \sum_{s=-\infty}^{\infty} c_{XX}(s) \exp(-i2\pi fs \, dt) \quad (2.34)$$

Como pode-se verificar a seguir, existe uma relação simples entre $C_{XX}(f)$ e a transformada de Fourier discreta da série de dados, $X(f)$ (Schwartz, 1975).

Tomando a função autocovariância escrita na forma:

$$c_{XX}(s) = \frac{1}{T} \sum_{r=-\infty}^{\infty} x_r x_{r+s} \quad (2.35)$$

e substituindo-se a expressão (2.35) em (2.34), tem-se:

$$C_{XX}(f) = \sum_{s=-\infty}^{\infty} \frac{1}{T} \sum_{r=-\infty}^{\infty} x_r x_{r+s} \exp(-i2\pi fs \, dt) \quad (2.36)$$

Multiplicando-se (2.36) por $\exp(i2\pi fr \, dt)$ x $\exp(-i2\pi fr \, dt)$, obtém-se

$$C_{XX}(f) = \frac{1}{T} \sum_{r=-\infty}^{\infty} x_r \exp(i2\pi fr \, dt) \sum_{s=-\infty}^{\infty} x_{r+s} \exp(-i2\pi f(r+s)dt)$$

Fazendo $s + r = m$, e trocando o índice do somatório por m , tem-se:

$$C_{XX}(f) = \frac{1}{T} \sum_{r=-\infty}^{\infty} x_r \exp(i2\pi fr dt) \sum_{m=-\infty}^{\infty} x_m \exp(-i2\pi fm dt) e$$

$$C_{XX}(f) = \frac{1}{T} X^*(f) X(f) \quad (2.37)$$

onde ' * ' denota complexo conjugado, e

$$C_{XX}(f) = \frac{|X(f)|^2}{T} = \sum_{s=-\infty}^{\infty} c_{XX}(s) \exp(-i2\pi fs dt) \quad (2.38)$$

verifica-se então pela expressão (2.38) que $C_{XX}(f)$ pode ser calculado diretamente pela TF dos dados ou pela TF da função autocovariância.

$C_{XX}(f)$ resultante da expressão (2.38) é designado estimador do espectro natural ou do espectro amostral, e é equivalente ao conjunto de amplitudes obtidas pela análise de Fourier da série.

vii) Estimador suavizado

O estimador do espectro amostral, não é um estimador consistente, pois conforme $T \rightarrow \infty$, a variância cresce, embora o viés diminua assintoticamente. Viés é definido como a diferença entre o valor esperado da estimativa e o valor real. É possível controlar a variância de maneira a se obter valores satisfatórios de variância, viés e tamanho da amostra, T . O estimador do espectro obtido a partir deste processo tem o nome de estimador suavizado.

Um estimador suavizado do espectro é definido por

$$C_{XX}'(f) = C_{XX}(f) * Q_M(f), \quad (2.39)$$

onde $C_{XX}(f)$ é o estimador natural do espectro, e

$$Q_M(f) = TF [D_M(s)] \quad (2.40)$$

e $s = 0, \dots, M$, sendo M o ponto de truncamento da função $D_M(s)$, definido no item (2.2.2.1-iv).

Assim, o viés da estimativa, $V(f)$ é dado por

$$V(f) = C'_{XX}(f) - C_{XX}(f)$$

Uma forma equivalente a expressão (2.39) é:

$$C_{XX}'(f) = TF [c_{XX}(s) \times D_M(s)] \quad (2.41)$$

As expressões (2.39) e (2.41) são duas formas distintas para se obter o espectro suavizado. A primeira chama-se método direto e a segunda indireto.

O método indireto requer o cálculo prévio da função autocovariância, para M termos, sendo $M < N$. Uma vez que $c_{XX}(u)$ pode assumir valores negativos, a restrição de $C_{XX}(f) > 0$, não garante que a estimativa $C'_{XX}(f)$ seja positiva. Este é o principal inconveniente deste método. Para amenizar este problema, deve-se escolher $(T-u)/u$ o maior possível e tomar a média do maior número possível de estimativas de espectro de potências para reduzir a variância (Geçkinli e Yavuz, 1983).

O método direto faz a análise de Fourier da série, e em seguida, faz-se a convolução com a função $Q_M(f)$.

A função $D_M(s)$ tem as seguintes propriedades:

1. $D_M(s)$ é par,
2. $D_M(0) = 1$, e
3. $D_M(s) = 0$ $|s| > M$, $M \leq T$

Algumas propriedades da função $Q_M(f)$ são:

1. $Q_M(f)$ é par
2. $\int_{-\infty}^{\infty} Q_M(f) df = D_M(0) = 1$.

$D_M(s)$ é chamado de janela temporal, enquanto que $Q_M(f)$ é a janela espectral.

Pode-se fazer uma analogia do uso da janela espectral com o problema de se utilizar uma distribuição de intensidade para uma antena, de maneira que a maior parte da radiação da antena se concentre num feixe (Blackman e Tukey, 1958).

As janelas mais conhecidas são: a retangular, a de Bartlett, a de Hanning, a de Hamming, a de Parzen, e a de Tukey. Nas figuras 2.1.A e 2.1.B são mostradas as versões temporal e espectral de algumas destas janelas. Neste trabalho foi utilizada a janela de Tukey, cuja expressão pode ser encontrada na tabela 2.1.

A convolução de duas funções equivale a uma média móvel ponderada de uma das funções, sendo a outra a função peso. Por exemplo, em (2.39), $C_{XX}(f)$ poderia ser a função da qual obtém-se a média ponderada e $Q_M(f)$ seria a

função peso. Pode-se constatar a analogia, baseando-se na definição da expressão (2.26) e na propriedade:

$$(f * g) = (g * f)$$

Então a convolução de $C_{XX}(f)$ e $Q_M(f)$ pode ser expressa na forma:

$$Q_M(f) * C_{XX}(f) = \int_{-1/M}^{1/M} Q_M(q) C_{XX}(f-q) dq \quad (2.42)$$

Verificando o comportamento das janelas pela figura 2.1 (Lorenzetti, 1976), em determinadas freqüências em que coincide um pico afastado do espectro com o lóbulo lateral de uma janela espectral, o valor do estimador suavizado na freqüência em que está centrada a janela poderá ser bastante prejudicada. Este fenomeno se chama fuga ("leakage"). As janelas de Parzen e Tukey são preferidas, por terem amplitudes menores nos lóbulos laterais.

Um cuidado especial deve-se ter ao trabalhar com dados discretos. Quando se toma um intervalo de amostragem δt grande, o espaçamento na freqüência, δf , se aproxima. A convolução do espaçamento f com a função $X(f)$ produz sobreposição no espectro, isto é, surgem picos fictícios em freqüências mais baixas do espectro devido a baixa taxa de amostragem. Este fenômeno chama-se sobreposição ("aliasing"). A figura 2.2 mostra como um sinal de freqüência alta (maior que a freqüência de Nyquist) pode aparecer como um sinal de baixa freqüência (Blackman e Tukey, 1958; Brigham, 1974). Ao se usar a janela retangular com $M = T$, é equivalente a obter-se o estimador do espectro amostral, ou natural. Com exceção da janela retangular, as outras janelas diferem pouco entre

si. A questão crucial é a escolha do ponto de truncamento
M. A razão de variância definida por:

$$\frac{\text{var} \{ C'_{XX}(f) \}}{\{ E[C_{XX}(f)] \}^2} \quad (2.43)$$

representa a quantidade que o espectro suavizado foi reduzida do espectro amostral, esta razão é proporcional a M/T.

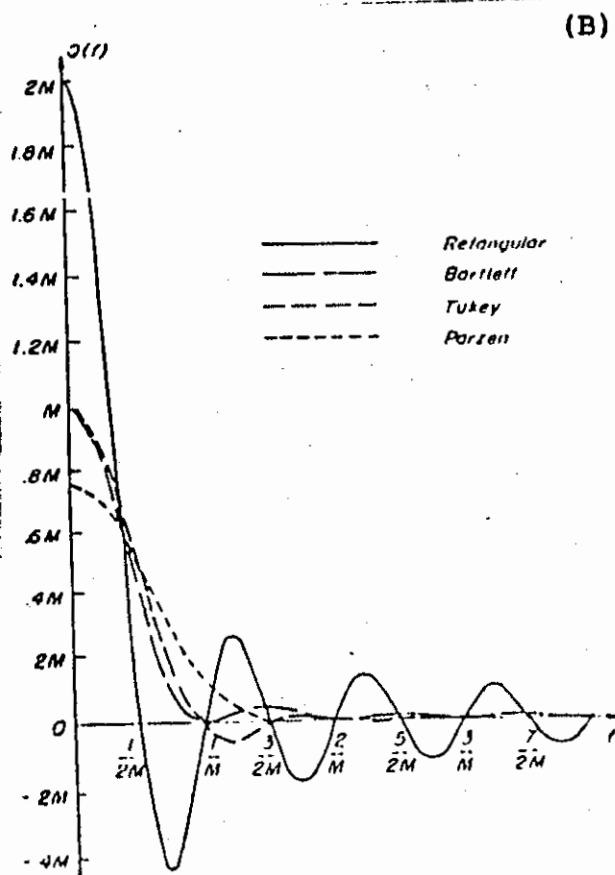
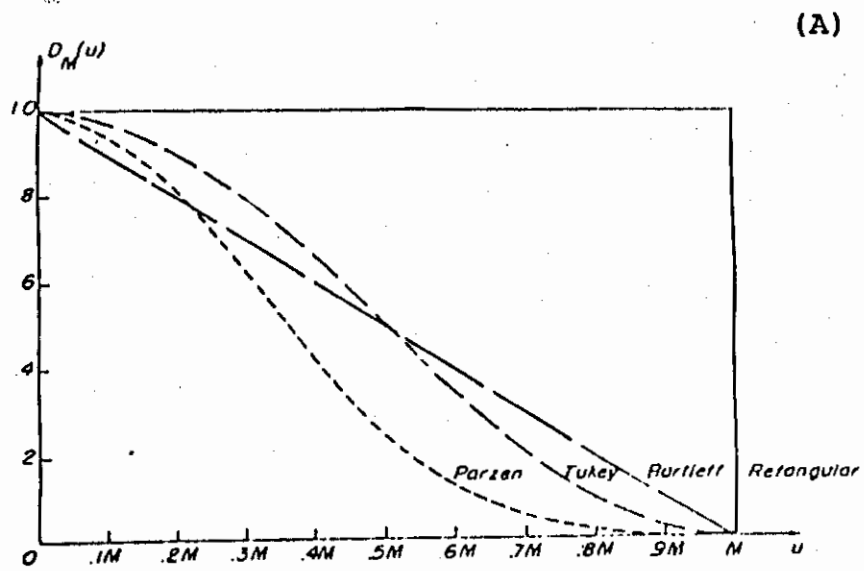


Fig. 2.1 - Funções janelas: versões (A) temporal e (B) espectral. Adaptado de Lorenzetti (1976), pp 47.

Tabela 2.1 - Exemplos de janelas espectrais. Razão de variância e graus de liberdade. T é o tamanho da amostra e M o ponto de truncamento da função. Adaptado de Lorenzetti (1976), pp 50.

TIPO	FUNÇÃO JANELA ESPECTRAL	RAZÃO DE VARIÂNCIA	GRAUS DE LIBERDADE
Retangular	$2M \frac{\text{sen } 2\pi fM}{2\pi fM}$	$2 \frac{M}{T}$	$\frac{T}{M}$
Bartlett	$M \left(\frac{\text{sen } \pi fM}{\pi fM} \right)^2$	$0.67 \frac{M}{T}$	$3 \frac{T}{M}$
Tukey	$M \left(\frac{\text{sen } 2\pi fM}{2\pi fM} \frac{1}{1 - (2\pi fM)^2} \right)$	$0.75 \frac{M}{T}$	$2.67 \frac{T}{M}$
Parzen	$\frac{3}{4} M \left(\frac{\text{sen } (\pi fM/2)}{\pi fM/2} \right)^4$	$0.54 \frac{M}{T}$	$3.71 \frac{T}{M}$

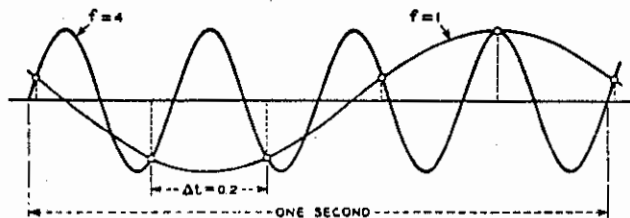


Fig. 2.2 - Efeito de sobreposição ("aliasing") resultante de baixa taxa de amostragem. Circulos pequenos indicam pontos amostrados. Adaptado de Blackman e Tukey (1958), pp 31.

Verifica-se pela tabela 2.1 que a razão de variância e o número de graus de liberdade podem ser controlados pela relação M/T. Baseando-se no método de fechamento de janela, adotou-se $M = 17$. Este método consiste em construir estimadores suavizados para M cada vez menor, até que se obtenha um espectro onde os picos se mantêm estáveis, do ponto de vista estatístico.

viii) Intervalo de confiança

Supondo que $x(t)$ tem distribuição gaussiana, pode-se mostrar que $C'_{xx}(f)$ tem aproximadamente a distribuição de uma qui-quadrada, do tipo χ^2_ν , onde ν é o número de graus de liberdade associado a cada função janela (Lorenzetti, 1976), e

$$a = \frac{E [C'_{xx}(f)]}{\nu} \quad (2.44)$$

Escolhendo-se ρ o nível de confiança, o intervalo de confiança é obtido pelas expressões:

$$\frac{C'_{xx}(f)}{\chi^2_\nu [1 - \rho/2]} \quad , \quad \frac{C'_{xx}(f)}{\chi^2_\nu [\rho/2]} \quad (2.45)$$

O intervalo de confiança, dado pelas expressões acima, tem o inconveniente de ser função da frequência. Entretanto, se for aplicado o logaritmo neste intervalo, e traçado o estimador do espectro num gráfico de ordenada logarítmica, obtém-se para o intervalo:

$$\log C'_{xx}(f) + \log \frac{\nu}{\chi^2_\nu (1-\rho/2)} \quad , \quad \log C'_{xx}(f) + \log \frac{\nu}{\chi^2_\nu (\rho/2)} \quad (2.46)$$

O intervalo de confiança dessa forma, pode ser representado através de uma única linha vertical. Para um M menor, o número de graus de liberdade aumenta, e os picos no espectro se tornam mais confiáveis.

ix)- Espectro cruzado

Quando duas séries de dados que contêm periodicidades são bem correlacionadas, é interessante saber se a correlação se deve a oscilações de alta ou baixa frequência. Por vezes, estas duas séries podem estar correlacionadas positivamente em baixas frequências e negativamente em altas frequências, o somatório pode se cancelar e as séries estarão aparentemente não correlacionadas (Panofsky e Brier, 1968; Essenwanger, 1976).

A partir do espectro cruzado pode-se medir a correlação em função da frequência. Considere dois processos estocásticos $x(t)$ e $y(t)$ estacionários e de média nula. Análogo ao espectro de potência, aplicado a uma variável, o espectro cruzado $C_{xy}(f)$ dos dois processos é obtido da transformada de Fourier da função covariância $c_{xy}(u)$. O espectro cruzado pode ser definido por

$$C_{xy}(f) = \text{TF} [c_{xy}(u)] \quad (2.47)$$

onde:

$$C_{xy}(u) = E [x(t)y(t+u)] \text{ ou } C_{yx}(u) = E [y(t)x(t+u)] \quad (2.48)$$

Seguem-se algumas propriedades do espectro cruzado:

1. $C_{xy}(-u) = C_{yx}(u)$
2. $C_{xy}(-f) = C_{yx}(f)$
3. $C_{xy}(f)$ é, geralmente, complexo.

Em decorrência da terceira propriedade, pode-se escrever o espectro cruzado na forma composta por uma parte real e uma imaginária. Assim,

$$C_{xy}(f) = k_{xy}(f) + iq_{xy}(f) \quad (2.49)$$

A parte real, $k_{xy}(f)$, é chamada de co-espectro, e a parte imaginária, $q_{xy}(f)$, de espectro em quadratura. O espectro cruzado pode ser obtido diretamente dos dados, de forma análoga ao estimador do espectro de potência dado pela equação (2.37), isto é,

$$C_{xy}(f) = \frac{1}{T} X^*(f) Y(f) \quad (2.50)$$

Suponha que a função covariância, $c_{xy}(u)$, seja composta pela soma de uma função par e uma função ímpar, o co-espectro resulta da transformada cosseno da parte par da função covariância, enquanto que o espectro em quadratura se obtém da transformada seno da parte ímpar.

Para séries finitas e discretas, tem-se $u = s \delta t$, a parte par da função covariância, $c_{co}(s)$, pode ser obtida da média das funções $c_{xy}(-s)$ e $c_{xy}(s)$.

$$c_{co}(s) = (c_{xy}(s) + c_{xy}(-s)) / 2 \quad (2.51)$$

e a função ímpar, $c_{qu}(s)$, pode ser obtida pela expressão:

$$c_{qu}(s) = (c_{xy}(-s) - c_{xy}(s)) / 2 \quad (2.52)$$

Portanto, substituindo as expressões (2.51) e (2.52) nas (2.16) e (2.17), respectivamente, tem-se assim, as formas finitas e discretas do co-espectro e do espectro em quadratura. O período estará reduzido de N para $2M$, onde M é o valor máximo que s assume. Assim:

$$k_{xy}(f) = \frac{2}{M} \sum_{s=1}^{M-1} c_{co}(s) \cos(\pi fs/M) \quad (2.53)$$

$$q_{xy}(f) = \frac{2}{M} \sum_{s=1}^{M-1} c_{qu}(s) \sin(\pi fs/M) \quad (2.54)$$

Os picos no co-espectro indicam regiões de alta correlação, positiva ou negativa, conforme o sinal do co-espectro. Estes estimadores do espectro cruzado são suavizados pelo mesmo processo descrito em (vii).

Reescrevendo (2.49) na forma exponencial, tem-se

$$C_{xy}(f) = m_{xy}(f) \exp(iw_{xy}(f)) \quad (2.55)$$

onde $m_{xy}^2(f) = k_{xy}^2(f) + q_{xy}^2(f)$, é o espectro de amplitudes, e $w_{xy}(f) = \arctan(q_{xy}(f)/k_{xy}(f))$, é o espectro de diferença de fases.

Através do espectro de diferença de fases recupera-se a fase relativa das componentes harmônicas entre as duas séries. Pode-se demonstrar escrevendo $X(f)$ e $Y(f)$ na forma exponencial:

$$X(f) = |X(f)| \exp(iF_X(f))$$

$$Y(f) = |Y(f)| \exp(iF_Y(f)) \quad (2.58)$$

Então (2.50) pode ser reescrito na forma:

$$C_{xy}(f) = \frac{1}{T} |X(f) Y(f)| \exp[i(F_X(f) - F_Y(f))] \quad (2.59)$$

Assim,

$$m_{xy}(f) = \frac{1}{T} |X(f) Y(f)| \quad (2.60)$$

$$w_{xy}(f) = F_x(f) - F_y(f) \quad (2.61)$$

A fase indica o tempo em que ocorreu o máximo da onda. Se a diferença de fase é positiva, isto é, $w_{xy}(f) > 0$, então uma crista ocorre na série $Y(t)$ em instantes antes de ocorrer na série $X(t)$, e vice versa, no caso de $w_{xy}(f) < 0$. Portanto, a diferença de fases, pode fornecer o sentido de propagação da fase da onda.

Uma outra informação fornecida pelo espectro cruzado é o espectro de coerência, ou simplesmente coerência. Ela é equivalente ao espectro cruzado de amplitudes normalizado pelos espectros de potências das duas séries, é definida por

$$\text{Coh}^2(f) = \frac{m_{xy}'(f)^2}{C'_{xx}(f) C'_{yy}(f)} \quad (2.62)$$

A coerência pode ser chamada mais adequadamente de coerência ao quadrado.

Verifica-se que Coh^2 assume valores entre 0 a 1, e é análogo ao coeficiente de correlação linear, exceto que a coerência é função da frequência. O limite de confiança do espectro de coerência pode ser dado pela esperança,

$$E [\text{Coh}^2] = [1 - p^{1/(v-1)}]^{1/2} \quad (2.63)$$

onde p é o nível de probabilidade, e v o número de graus de liberdade.

CAPÍTULO 3

RESULTADOS

As análises a seguir basearam-se em dados ao nível de 850 hPa, pois foi observado que os distúrbios tropicais de leste adquirem maior intensidade na baixa troposfera (Riehl, 1945). Sobre as regiões dos oceanos tropicais, onde os dados são escassos, os dados de vento de 850 hPa são mais confiáveis que de outras variáveis, pois neste nível se concentra a maior parte das informações de vento da baixa troposfera derivados de imagens de satélite (Nitta et al., 1985; Tai e Ogura, 1987).

Antes de se investigar as características dos distúrbios de leste que cruzam o Oceano Atlântico Equatorial, é importante conhecer o estado básico do escoamento onde ocorrem estes distúrbios.

3.1 - CAMPO MÉDIO DO VENTO EM 850 hPa

Supondo o campo médio do vento equivalente ao estado básico, passa-se para descrição do campo do vento (figura 3.1) obtido da média dos dados diários das 00 e 12 UTC, em 850 hPa, de cada um dos quatro trimestres do ano: DJF, MAM, JJA e SON.

Em DJF, os alísios atingem perpendicularmente as costas leste do Nordeste do Brasil e do território do Amapá. O vento penetra no Amapá com a velocidade de aproximadamente 9 m/s, e mantém esta intensidade por 10° de longitude para oeste sobre o continente. Na parte norte do Nordeste do Brasil, o vento sopra de sul-sudeste paralelo à costa. Ao norte da Bacia Amazônica, o vento zonal médio de leste apresenta forte cisalhamento meridional, este cisalhamento é observado durante todo o ano. Ao penetrar no interior do continente, o vento desvia-

se gradativamente para o sul devido à presença dos Andes. Após se curvar anticiclonicamente na região central da Bacia Amazônica, o vento se dirige para o sul, para uma região de convergência, conhecida como Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS).

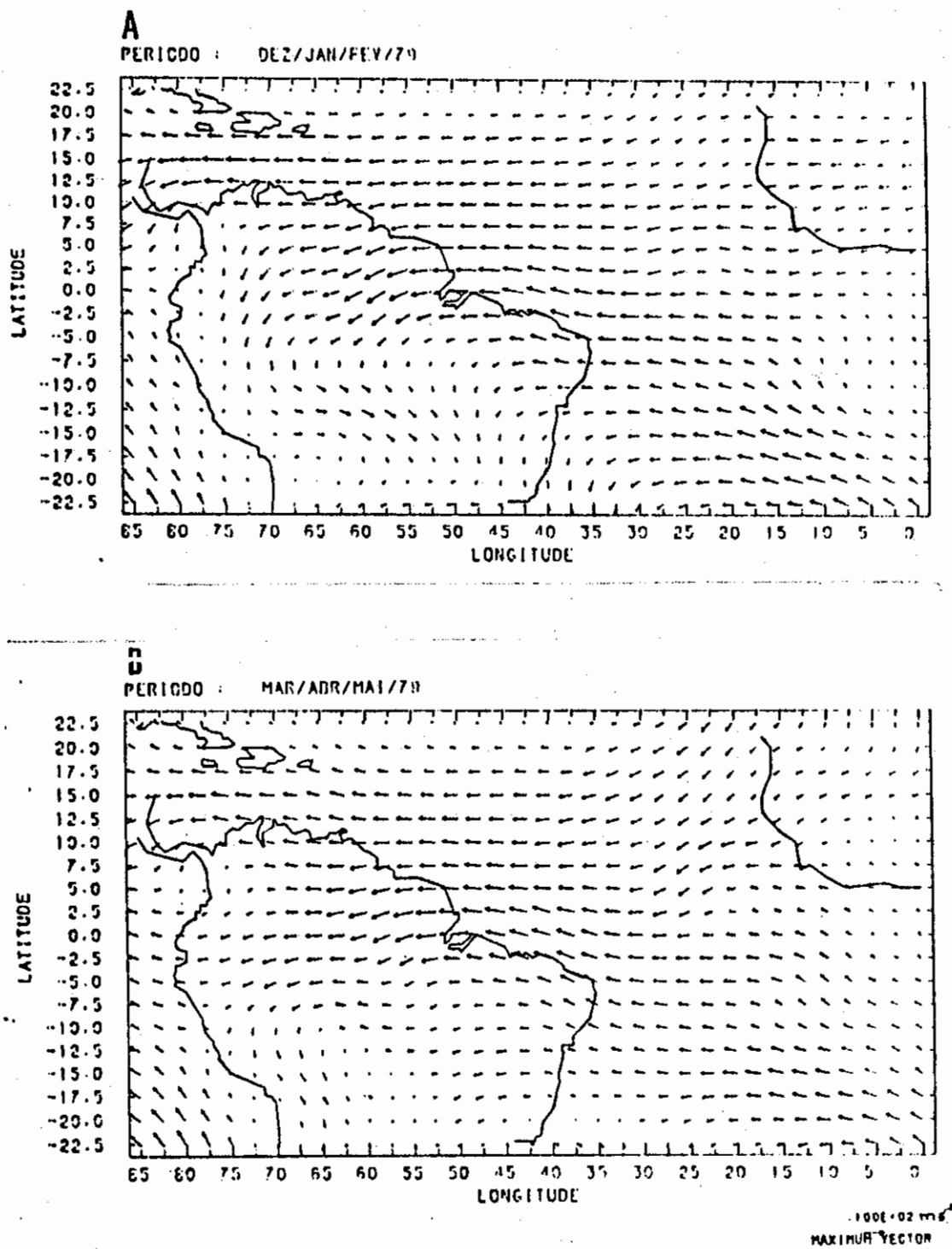
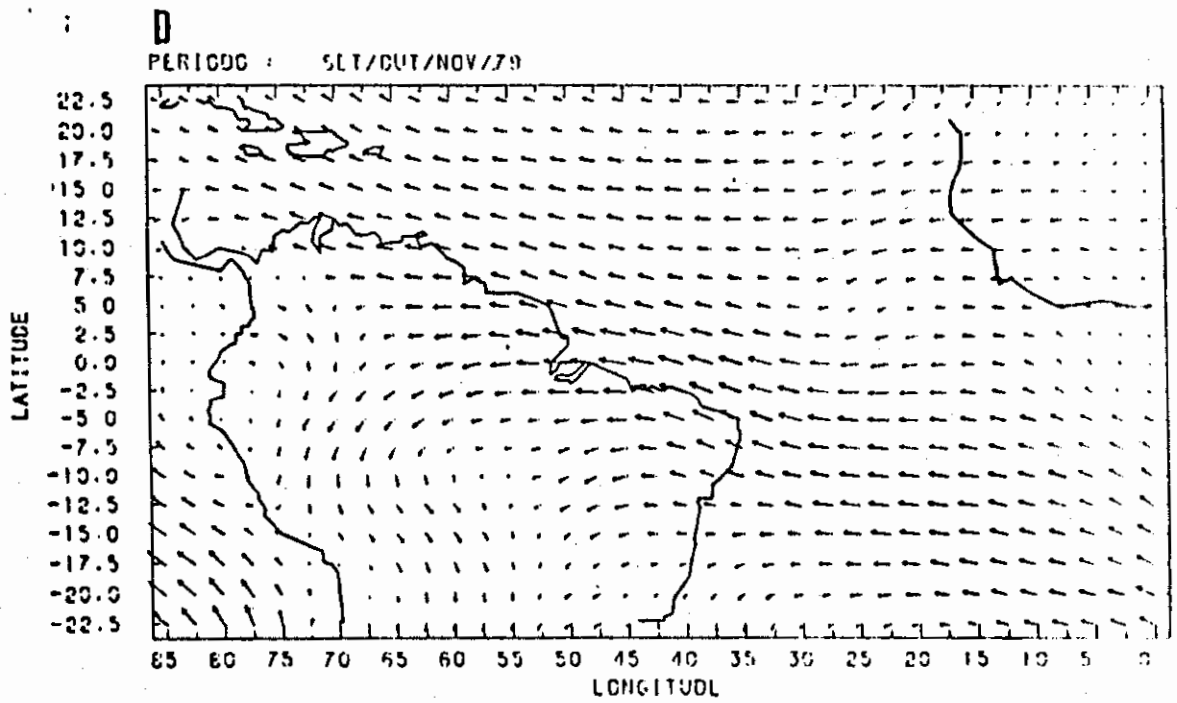
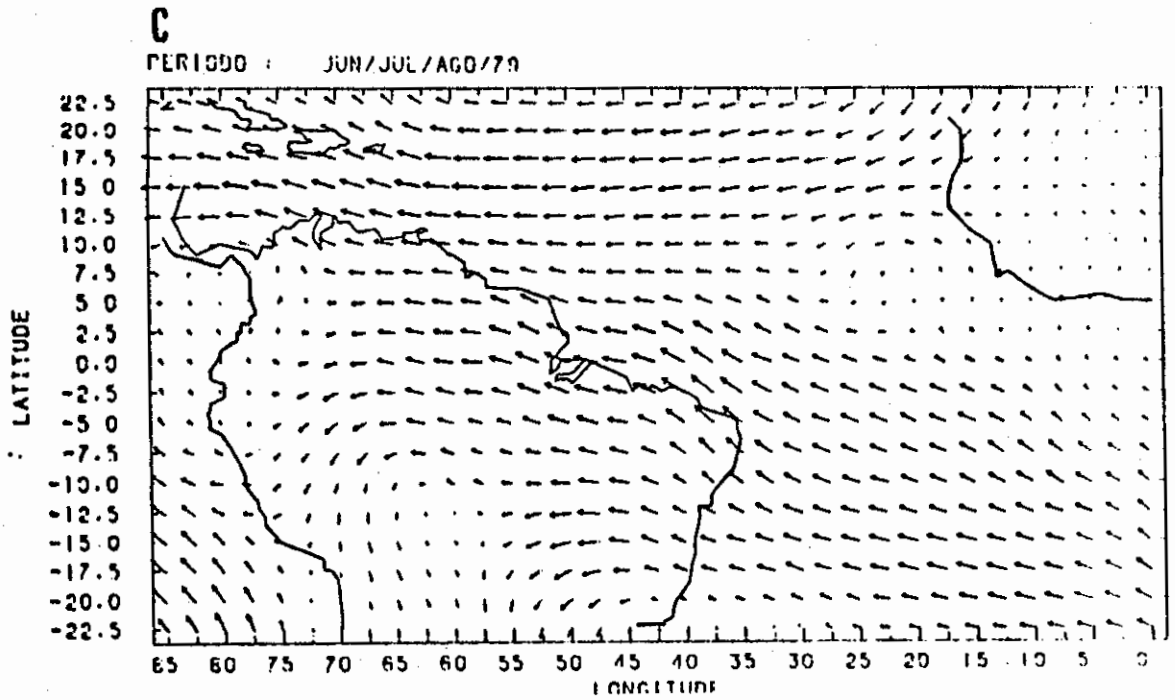


Fig. 3.1 - Campo médio do vento em 850 hPa, nos trimestres:
(A) DJF, (B) MAM, (C) JJA e (D) SON do ano FGGE.
(continua)



100E 02 M/S
MAXIMUM VECTOR

Fig. 3.1 - (conclusão)

Em MAM, a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), embora menos intensa que no verão, se encontra na sua posição mais ao sul (Lobo, 1982) e o Oceano Atlântico Tropical Sul está relativamente mais quente. No Hemisfério Norte, os alísios de nordeste se intensificam, enquanto que os alísios de sudeste, que atingem a costa leste do Nordeste do Brasil são os mais fracos do ano. Os ventos mantêm-se paralelos à costa norte do Nordeste do Brasil até o território do Amapá, onde penetram no continente perpendicularmente à costa, e permanecem fortes, próximo ao equador até aproximadamente 60°W . Na parte central da Amazônia, o vento executa um giro anticiclônico e converge ao sul. Entretanto, nesta época do ano, já não se consegue mais observar a ZCAS. A alta subtropical está localizada mais a leste do que em DJF.

Durante JJA, a ZCIT migra para sua posição mais ao norte (Lobo, 1982). Neste período os alísios de nordeste se afastam do continente sul americano, permitindo que os alísios de sudeste estendam-se mais para o Hemisfério Norte, aumentando a faixa latitudinal dos ventos de sudeste sobre o Atlântico Equatorial. Os alísios de sudeste são intensos, principalmente na região leste do Nordeste do Brasil neste trimestre. O cisalhamento meridional do vento médio sobre a Amazônia é menor, pois os ventos de leste, mais intensos, penetram sobre uma porção relativamente maior do continente. Na parte leste do continente, o vento forte estende-se para oeste até aproximadamente $52,5^{\circ}\text{W}$, para sul, até $17,5^{\circ}\text{S}$, e na parte norte da Amazônia, estende-se até cerca de 70°W . O anticiclone subtropical está deslocado para oeste, em direção ao continente.

Em SON, os ventos apresentam um enfraquecimento sobre a região em estudo, em particular na parte sul e no interior do continente. O escoamento torna-

se mais zonal do que em JJA. Os alísios de nordeste estão mais fracos que os alísios de sudeste. Na parte norte da Amazônia, os ventos de leste perdem intensidade a oeste de 60oW, e então, giram anticiclonicamente sobre a região central da Amazônia. O anticiclone subtropical afasta-se do continente, posicionando-se na região central do oceano. Há indícios de formação da ZCAS nesta estação, o que completa o ciclo anual.

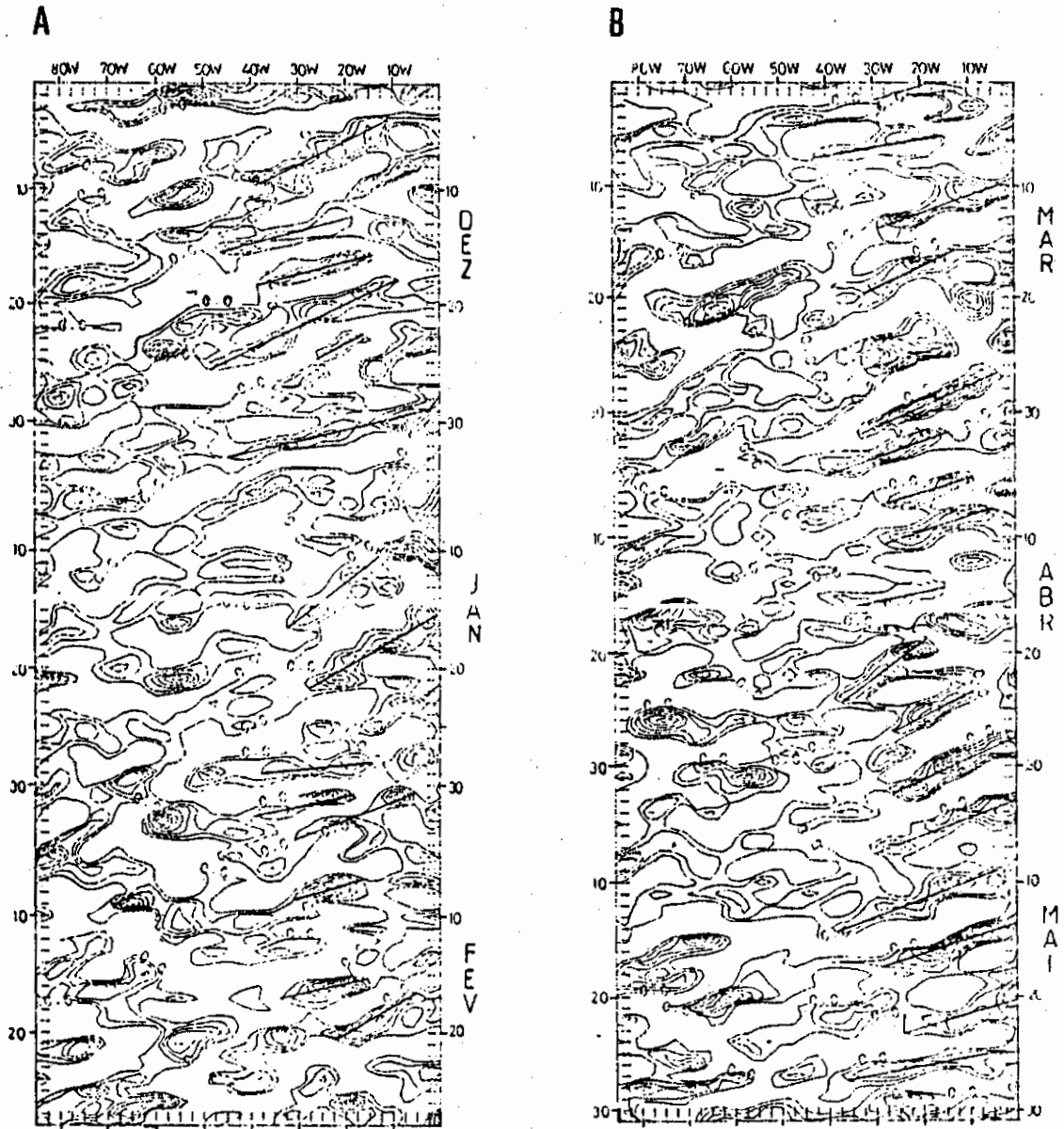


Fig. 3.2 - Diagramas longitude versus tempo de desvios da componente meridional do vento, em relação à média do trimestre, filtrados para o intervalo de 2 a 10 dias, para (A) DJF, (B) MAM, (C) JJA e (D) SON, do nível de 850 hPa, ao longo do equador. Estão plotados somente os desvios positivos. Intervalo dos contornos: .1 m/s.
(conclusão)

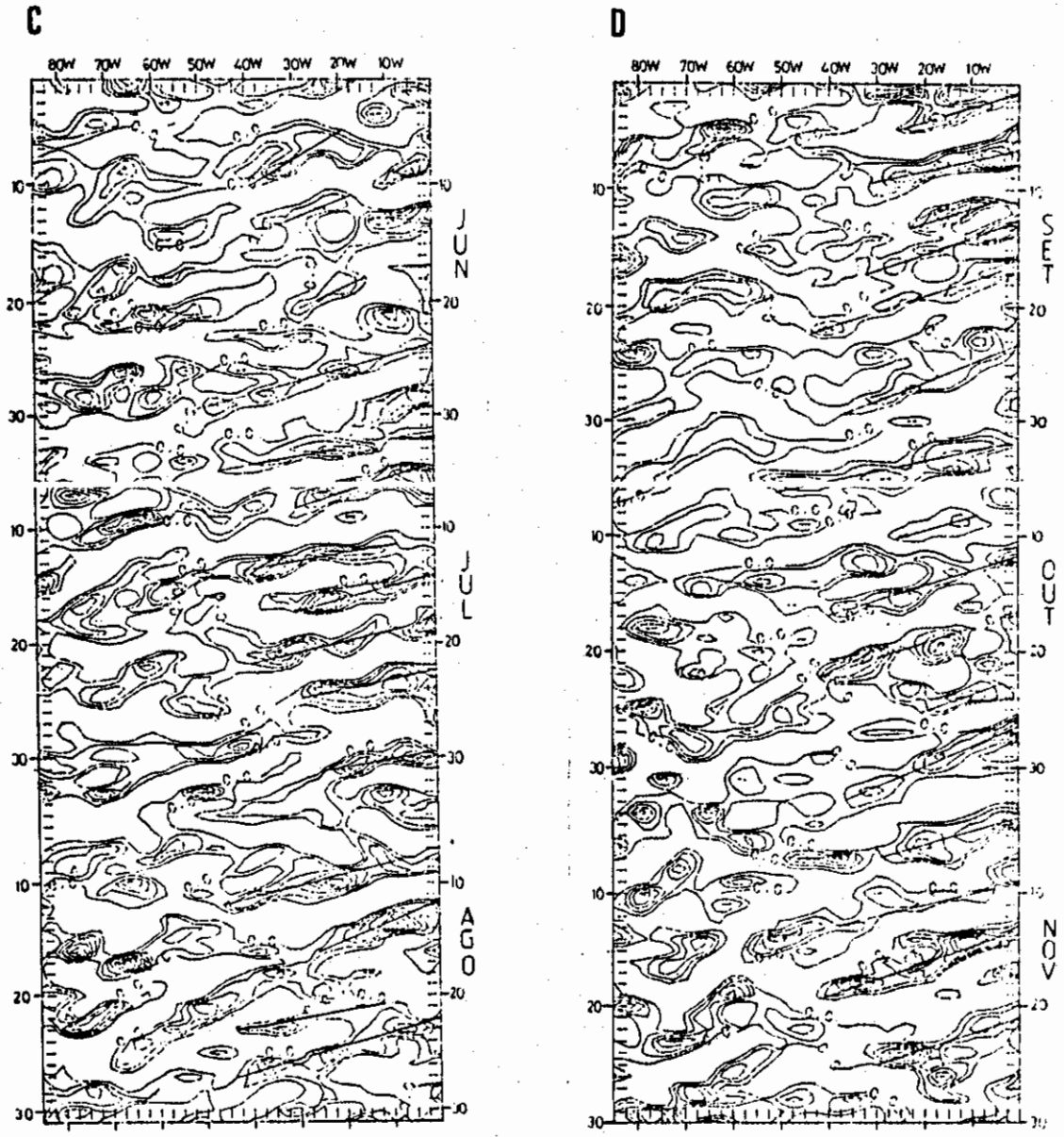


Fig. 3.2 - (conclusão)

3.2 - DIAGRAMAS LONGITUDE VERSUS TEMPO

Os diagramas longitude versus tempo são úteis para identificar as características básicas dos distúrbios ondulatórios, tal como a direção e velocidade de propagação, e o comprimento de onda. A propagação para oeste desses distúrbios pode ser verificada através das isolinhas de desvios da componente meridional do vento, cuja inclinação indica a velocidade de propagação de fase do distúrbio ondulatório. O período da onda é estimado contando-se o número de isolinhas de anomalias cruzando a longitude de 20°W sobre o Oceano Atlântico, durante cada trimestre.

Devido à presença de distúrbios se originando em diferentes longitudes e com diferentes durações, adotou-se como critério para definir os distúrbios deste estudo, aqueles que surgiram sobre o Oceano Atlântico a leste de 20°W e cruzaram esta longitude ao se propagarem de leste para oeste, em direção à costa do Nordeste do Brasil.

Foram analisadas seções longitude versus tempo da componente meridional do vento em 850 hPa, ao longo das latitudes 0° , $2,5^{\circ}\text{S}$ e $5,0^{\circ}\text{S}$. Estes diagramas revelam a presença de distúrbios quase periódicos, cruzando o Oceano Atlântico Tropical Sul no sentido leste-oeste, durante todo ano do FGGE. Uma análise preliminar destes distúrbios indica que eles apresentam, um período em torno de 6 dias. Buscando um refinamento das isolinhas, os diagramas foram suavizados como mostram as figuras 3.2.A-D.

Nestes diagramas são representados desvios em relação à média trimestral da componente meridional do vento ao longo do equador. As séries desta variável foram filtradas de maneira a conservar somente distúrbios com

periodicidade entre 2 a 10 dias. O filtro utilizado consistiu em expandir a série temporal de cada ponto de grade ao longo do equador numa série de Fourier, e recompor a série somando os termos harmônicos referentes às frequências que se desejava reter na análise. Em seguida, foram calculadas as médias diárias desses dados filtrados e, finalmente, plotados nos diagramas somente os valores positivos dessas médias, indicando a frente do distúrbio. Estes distúrbios foram observados ao longo das três latitudes.

A tabela 3.1 mostra a análise dos diagramas obtidos pelo procedimento descrito acima. A coluna à esquerda mostra a data inicial e final dos distúrbios, a coluna do meio mostra a posição longitudinal inicial e final, e a coluna da direita, a velocidade de fase obtida dividindo a extensão longitudinal pela duração em dias.

TABELA 3.1 - ANÁLISE DOS DIAGRAMAS LONGITUDE VERSUS TEMPO

Variável: componente meridional do vento Latitude: equador (A) Trimestre: DJF		
DURAÇÃO	EXTENSÃO LONGITUDINAL ($^{\circ}$ W)	VELOCIDADE DE FASE ($^{\circ}$ long./dia)
4 - 9/dez	10,0 - 40,0	6,0
13 - 15	17,5 - 47,5	10,0
16 - 18	15,0 - 37,5	11,3
18 - 25	10,0 - 50,0	5,7
23 - 25	15,0 - 25,0	5,0
29 - 2/jan	2,5 - 45,0	10,6
11 - 16	12,5 - 32,5	4,0
15 - 22	0,0 - 30,0	4,3
27 - 29	15,0 - 37,5	11,3
30 - 1/fev	20,0 - 40,0	10,0
31 - 3	5,0 - 30,0	5,0
7 - 9	15,0 - 30,0	7,5
15 - 17	15,0 - 32,5	8,8
17 - 21	5,0 - 25,0	5,0

(continua)

Tabela 3.1 - Continuação

Variável: componente meridional do vento Latitude: equador (B) Período: MAM		
DURAÇÃO	EXTENSÃO LONGITUDINAL ($^{\circ}$ W)	VELOCIDADE DE FASE ($^{\circ}$ long./dia)
5 - 7/mar	17,5 - 42,5	12,5
10 - 14	5,0 - 30,0	6,3
16 - 20	5,0 - 32,5	6,9
24 - 27	12,5 - 32,5	6,7
27 - 1/abr	2,5 - 32,5	6,0
1 - 4	17,5 - 40,0	7,5
4 - 7	7,5 - 27,5	6,7
7 - 10	5,0 - 27,5	7,5
14 - 16	15,0 - 35,0	10,0
19 - 24	15,0 - 37,5	4,5
24 - 27	10,0 - 27,5	5,8
27 - 2/mai	0,0 - 27,5	5,5
3 - 8	0,0 - 27,5	5,5
9 - 14	5,0 - 37,5	6,5
13 - 17	0,0 - 27,5	6,9
20 - 23	0,0 - 25,0	8,3
25 - 28	2,5 - 45,0	14,2
Variável: componente meridional do vento Latitude: equador (C) Período: JJA		
DURAÇÃO	EXTENSÃO LONGITUDINAL ($^{\circ}$ W)	VELOCIDADE DE FASE ($^{\circ}$ long./dia)
5 - 10/jun	17,5 - 40,0	4,5
11 - 13	17,5 - 32,5	7,5
18 - 21	12,5 - 30,0	5,8
24 - 29	0,0 - 50,0	10,0
2 - 5/jul	12,5 - 45,0	10,8
5 - 8	0,0 - 30,0	10,0
11 - 14	7,5 - 42,5	11,7
14 - 17	0,0 - 30,0	10,0
19 - 22	7,5 - 37,5	10,0
22 - 25	0,0 - 30,0	10,0
29 - 31	0,0 - 22,5	11,3
8 - 12/ago	0,0 - 45,0	11,3
12 - 16	0,0 - 27,5	6,9
20 - 23	15,0 - 42,5	9,2
22 - 27	0,0 - 42,5	8,5

(Continua)

Tabela 3.1 - conclusão

Variável: componente meridional do vento Latitude: equador (D) Período: SON		
DURAÇÃO	EXTENSÃO LONGITUDINAL (°W)	VELOCIDADE DE FASE (°long./dia)
2 - 5/set	0,0 - 25,0	8,3
7 - 10	2,5 - 32,5	10,0
11 - 13	5,0 - 22,5	8,9
13 - 17	0,0 - 32,5	8,1
16 - 22	0,0 - 45,0	7,5
23 - 29	0,0 - 35,0	5,8
2 - 6/out	2,5 - 52,5	12,5
8 - 10	7,5 - 25,0	8,8
12 - 17	0,0 - 40,0	8,0
18 - 22	10,0 - 42,5	8,1
23 - 25	5,0 - 20,0	7,5
27 - 2/nov	0,0 - 45,0	9,0
4 - 7	0,0 - 30,0	10,0
9 - 15	5,0 - 57,5	8,8
13 - 19	0,0 - 42,5	7,1
21 - 25	0,0 - 30,0	7,5

A tabela 3.2 resume as características ondulatórias básicas médias dos distúrbios.

**TABELA 3.2 - CARACTERÍSTICAS BÁSICAS MÉDIAS DOS DISTÚRBIOS
AO LONGO DO EQUADOR**

trimestre	no. de eventos	período (dias)	velocidade de fase (m/s)	comprimento de onda (km)
DJF	14	6	10	5200
MAM	17	5	11	4800
JJA	15	6	12	6200
SON	16	6	11	5700

Em MAM ocorre um número maior de distúrbios se propagando sobre o Atlântico Equatorial, com 17 eventos, seguido de SON com 16 eventos, depois JJA com 15, e por último DJF, com 14. Em DJF, apesar de se poder notar padrões de propagação de isolinhas, estas linhas se

apresentam com falhas e muito desorganizadas, o que dificulta bastante a análise. Nos demais períodos, os padrões de propagação podem ser constatados mais facilmente, principalmente em MAM e JJA, quando se observam maiores desvios de vento meridional. Este fato sugere a presença de distúrbios mais ativos nestas duas épocas do ano.

O período da onda é estimado em torno de 5 a 6 dias, tendo MAM apresentado período de 5 dias, o mais curto em relação aos outros trimestres.

As velocidades de fase das ondas variam em torno de 10-12 m/s. Em DJF, as fases se propagam mais lentamente apresentando velocidade média de 10 m/s, enquanto que em JJA as ondas são mais rápidas, com velocidade em torno de 12 m/s. As ondas de comprimento mais curto ocorrem em MAM, 4800 km. Em contrapartida, em JJA, quando a ZCIT está deslocada mais para o Hemisfério Norte, as ondas são mais longas, e se propagam mais rapidamente.

O fato das ondas mais rápidas serem as mais longas se deve ao uso da relação: $L = c T$, aplicada a uma onda não-dispersiva. É uma simplificação usual ao se fazer este tipo de análise, embora as ondas meteorológicas sejam, naturalmente, dispersivas. Como o período das ondas permaneceu quase constante de um trimestre para o outro, resultou em ondas mais curtas se propagando mais lentamente e as ondas mais longas se propagando mais rapidamente. Neste estudo a periodicidade estimada dos distúrbios, bem como o comprimento de onda médio, são comparáveis aos valores encontrados por Neiva (1975), que aplicou outra técnica.

A região em torno de $40^{\circ}W$, como pode ser observada nos diagramas (fig. 3.2), marca bem o local onde

as ondas provenientes do Atlântico, aparentemente, se enfraquecem. Este enfraquecimento pode ocorrer devido ao deslocamento meridional do distúrbio durante sua trajetória. Condições ambientais desfavoráveis ao desenvolvimento do distúrbio, como, por exemplo, divergência de umidade, pode também resultar em enfraquecimento. Entretanto, em outro trecho do percurso, o distúrbio pode encontrar condições mais propícias e se reorganizar. A oeste de 50°W , notam-se ondas mais curtas propagando-se no sentido leste-oeste. Estas ondas parecem se originar na parte central da Bacia Amazônica. Observa-se, por vezes, que bandas de isolinhas inclinadas, tendem a surgir cada vez mais a leste com o passar do tempo. Este fato sugere que, a fase das ondas se propaga para oeste, enquanto a sua energia, isto é, o grupo de ondas se propaga para leste. Pode-se observar este comportamento, por exemplo, na figura 3.2.B, entre os dias 21 de março e 3 de abril de 1979, entre as longitudes 40°W e 0° .

É importante verificar se a parte dos distúrbios periódicos retida no filtro de 2 a 10 dias, é significativa quando comparada aos outros distúrbios que podem existir na região. Para isso, supõe-se, inicialmente, que as amplitudes dos distúrbios se distribuem em quantidades iguais em todas as freqüências, isto é, que os distúrbios possuem um espectro semelhante ao de um ruído branco. Então, a relação entre o número de harmônicos utilizados após o filtro e o número de harmônicos da série completa, fornece a porcentagem de variância esperada para o espectro de ruído branco no intervalo do período filtrado.

As tabelas 3.3 a 3.7 e 3.9 apresentam, da esquerda para direita, na segunda coluna a variância da série completa, na terceira coluna, a variância correspondente aos harmônicos retidos após o filtro, e na

quarta coluna, a razão entre a variância filtrada e a variância da série integral, expressa em porcentagem. A variância filtrada foi calculada a partir das amplitudes ao quadrado da série de Fourier integradas no intervalo de 2 a 10 dias, e a variância da série completa foi obtida do quadrado do desvio padrão da série completa.

A porcentagem de variância esperada para o espectro de ruído branco no intervalo de 2 a 10 dias para as séries das diferentes variáveis de cada trimestre foi estimada em torno de 40%.

Verifica-se pelas tabelas 3.3.A a 3.3.D, que a componente meridional do vento, apresenta ao longo de quase todas longitudes, porcentagens maiores que 40%. As porcentagens se tornam mais significativas no período de JJA e MAM, principalmente sobre o Oceano Atlântico, quando chegam a representar, por vezes, 60% da variância total da série. Portanto, o espectro de distúrbios da componente meridional, no período de 2 a 10 dias não é branco.

A componente zonal do vento apresentou, em geral, para o intervalo de período de 2 a 10 dias, porcentagens de variância menores que a componente meridional, durante os quatro trimestres do ano, isto se deve, ao fato de a componente meridional do vento possuir mais informação do comportamento ondulatório dos distúrbios. O período de MAM apresentou porcentagens de variância, na componente zonal do vento maiores que os outros trimestres (tabela 3.4). As séries de temperatura do ar apresentam porcentagens de variância para este intervalo de período bem menor que as outras duas variáveis (tabela 3.5).

A Radiação de Onda Longa foi também empregada como uma variável alternativa no estudo de distúrbios ondulatórios nos trópicos. Nas figuras 3.3.A-D

estão plotados os desvios de ROL ao longo do equador, para cada trimestre do ano. Os desvios foram filtrados pelo mesmo procedimento aplicado à componente meridional do vento. A baixa resolução espacial dos dados de ROL (grade $7,5^\circ \times 7,5^\circ$) prejudicou a análise dos distúrbios, ainda assim, puderam-se extrair algumas informações interessantes destes diagramas. Estão plotados nos diagramas os valores negativos de desvios de ROL para indicar a presença de nebulosidade mais profunda que a situação média de cada trimestre.

A nebulosidade de DJF apresenta, na região em torno de 20°W , propagação para oeste com periodicidade em torno de 7 dias. O período MAM, é o que apresenta a nebulosidade mais profunda dos quatro trimestres, que pode ser verificada pelos valores mais negativos dos desvios de ROL (fig.3.3.B). Esta nebulosidade mais profunda concorda com os períodos de maior atividade convectiva e maior precipitação do ano nesta região (Hoeflich, 1984). Ela pode estar associada à presença da ZCIT, que em MAM se posiciona, em média, em torno de 0° a 5°N (Lobo, 1982). Nota-se nos trimestres MAM e SON, algumas isolinhas de anomalias de ROL se propagando de oeste para leste, por exemplo entre os dias 13 e 21 de abril, ou entre 8 e 15 de novembro.

TABELA 3.3 - VARIÂNCIA E VARIÂNCIA FILTRADA DA COMPONENTE MERIDIONAL DO VENTO, PARA O FILTRO DE 2 A 10 DIAS, PARA OS TRIMESTRES: DJF, MAM, JJA E SON

A) Trimestre: DJF			
No. de harmônicos retidos no filtro: 37			
No. total de harmônicos da série: 90			
Porcentagem de variância esperada: 41,1%			
LONGITUDE	VARIÂNCIA (m ² s ⁻²)	VARIÂNCIA FILTRADA (m ² s ⁻²)	RAZÃO (%)
85,0 W	7,3	3,2	44,4
82,5 W	7,6	3,8	50,6
80,0 W	10,1	4,9	48,3
77,5 W	13,7	5,1	37,3
75,0 W	11,8	4,8	40,5
72,5 W	8,3	4,1	49,4
70,0 W	7,7	2,8	36,7
67,5 W	9,7	3,9	40,3
65,0 W	11,6	5,4	46,4
62,5 W	10,4	4,4	42,4
60,0 W	11,0	3,8	34,2
57,5 W	15,1	5,7	37,6
55,0 W	15,9	6,9	43,4
52,5 W	11,5	4,9	42,7
50,0 W	8,1	2,9	36,4
47,5 W	6,3	2,5	38,9
45,0 W	5,2	2,4	46,2
42,5 W	5,8	2,5	43,7
40,0 W	6,3	3,0	46,7
37,5 W	6,5	3,4	52,8
35,0 W	6,8	3,5	51,6
32,5 W	6,8	3,6	52,6
30,0 W	7,8	3,5	44,9
27,5 W	11,4	4,6	40,3
25,0 W	14,4	5,9	41,0
22,5 W	14,2	6,4	45,3
20,0 W	11,5	6,4	56,2
17,5 W	8,8	4,8	55,2
15,0 W	8,8	4,2	47,8
12,5 W	9,4	4,6	49,3
10,0 W	8,5	4,6	54,9
7,5 W	7,8	4,9	62,5
5,0 W	8,1	4,6	56,5
2,5 W	8,4	4,3	50,9
0,0 W	7,7	4,3	55,7

Tabela 3.3 - Continuação

B) Trimestre: MAM			
No. de harmônicos retidos no filtro: 37			
No. total de harmônicos da série: 92			
Porcentagem de variância esperada: 40,2%			
LONGITUDE	VARIÂNCIA (m^2s^{-2})	VARIÂNCIA FILTRADA (m^2s^{-2})	RAZÃO (%)
85,0 W	8,2	3,7	45,8
82,5 W	8,6	3,9	45,7
80,0 W	8,9	4,0	45,3
77,5 W	9,8	4,9	49,8
75,0 W	11,4	5,2	45,6
72,5 W	11,5	4,8	41,5
70,0 W	11,4	5,0	43,4
67,5 W	11,5	5,7	49,8
65,0 W	10,6	5,6	52,9
62,5 W	9,4	4,7	49,7
60,0 W	7,8	4,0	50,5
57,5 W	7,5	3,8	49,5
55,0 W	8,5	3,6	42,6
52,5 W	8,4	2,8	33,0
50,0 W	7,3	2,4	32,2
47,5 W	5,3	2,2	41,7
45,0 W	4,2	1,7	40,8
42,5 W	5,6	2,2	38,8
40,0 W	5,9	2,4	40,2
37,5 W	5,0	2,2	44,0
35,0 W	4,5	2,4	51,9
32,5 W	4,9	2,4	49,1
30,0 W	7,2	3,6	50,4
27,5 W	10,5	5,5	51,8
25,0 W	12,8	7,2	56,6
22,5 W	14,8	9,4	63,7
20,0 W	16,8	10,0	59,4
17,5 W	15,6	8,1	51,7
15,0 W	12,0	6,9	57,6
12,5 W	11,8	6,5	54,7
10,0 W	13,5	6,2	45,8
7,5 W	13,3	6,0	44,7
5,0 W	14,0	4,8	34,4
2,5 W	16,0	5,3	33,4
0,0 W	14,8	5,4	36,5

Tabela 3.3 - Continuação

C) Trimestre: JJA			
No. de harmônicos retidos no filtro: 37			
No. total de harmônicos da série: 92			
Porcentagem de variância esperada: 40,2%			
LONGITUDE	VARIÂNCIA (m^2s^{-2})	VARIÂNCIA FILTRADA (m^2s^{-2})	RAZÃO (%)
85,0 W	7,9	4,5	57,3
82,5 W	7,4	3,4	45,8
80,0 W	8,2	3,2	39,8
77,5 W	10,2	4,3	42,4
75,0 W	12,4	4,9	39,7
72,5 W	10,8	4,5	42,0
70,0 W	9,6	4,5	47,3
67,5 W	11,6	5,6	48,2
65,0 W	13,5	6,0	44,5
62,5 W	13,1	4,7	35,8
60,0 W	10,3	3,8	36,9
57,5 W	10,6	2,1	32,2
55,0 W	11,3	3,2	28,0
52,5 W	9,2	3,3	35,8
50,0 W	8,3	3,3	39,1
47,5 W	7,2	2,9	39,9
45,0 W	5,3	2,2	40,8
42,5 W	5,0	2,4	47,8
40,0 W	6,3	3,1	49,4
37,5 W	6,8	3,3	48,4
35,0 W	5,9	3,5	59,8
32,5 W	5,2	3,4	65,5
30,0 W	5,7	3,3	58,1
27,5 W	7,6	4,6	60,2
25,0 W	9,0	5,6	62,3
22,5 W	9,3	5,7	61,0
20,0 W	9,6	5,4	56,4
17,5 W	9,0	4,6	51,3
15,0 W	7,8	4,4	56,4
12,5 W	9,2	5,3	57,7
10,0 W	11,8	5,9	50,5
7,5 W	12,3	6,4	52,1
5,0 W	11,3	6,5	58,0
2,5 W	9,8	5,9	59,6
0,0 W	10,1	5,4	53,2

Tabela 3.3 - Conclusão

D) Trimestre: SON			
No. de harmônicos retidos no filtro: 37			
No. total de harmônicos da série: 91			
Porcentagem de variância esperada: 40,7%			
LONGITUDE	VARIÂNCIA (m ² s ⁻²)	VARIÂNCIA FILTRADA (m ² s ⁻²)	RAZÃO (%)
85,0 W	12,3	3,8	30,4
82,5 W	10,1	3,3	32,6
80,0 W	9,6	3,6	37,5
77,5 W	11,6	4,5	39,3
75,0 W	9,9	3,8	38,6
72,5 W	9,1	3,0	33,0
70,0 W	10,3	3,3	32,2
67,5 W	9,4	4,1	43,4
65,0 W	8,3	4,8	57,3
62,5 W	7,8	3,9	50,7
60,0 W	7,4	3,4	46,0
57,5 W	5,2	2,4	49,8
55,0 W	6,7	3,2	47,2
52,5 W	6,7	2,8	41,5
50,0 W	5,8	2,3	40,1
47,5 W	4,7	2,2	46,0
45,0 W	4,2	1,9	46,5
42,5 W	4,6	1,9	41,5
40,0 W	5,2	2,1	40,4
37,5 W	5,9	2,5	42,8
35,0 W	6,2	2,7	43,7
32,5 W	6,2	3,1	50,2
30,0 W	5,8	3,3	57,5
27,5 W	5,9	3,1	52,0
25,0 W	7,2	3,6	50,3
22,5 W	8,4	4,3	51,3
20,0 W	9,3	5,2	55,9
17,5 W	9,3	6,1	65,0
15,0 W	10,2	6,0	58,6
12,5 W	10,7	5,0	46,2
10,0 W	9,5	4,5	46,9
7,5 W	9,0	4,6	51,5
5,0 W	8,6	4,4	51,5
2,5 W	8,2	4,9	59,4
0,0 W	8,8	5,7	64,1

TABELA 3.4 VARIÂNCIA E VARIÂNCIA FILTRADA DA COMPONENTE ZONAL DO VENTO, PARA O FILTRO DE 2 A 10 DIAS, PARA MAM

No. de harmônicos retidos no filtro: 37 No. total de harmônicos da série: 92 Porcentagem de variância esperada: 40,2%			
LONGITUDE	VARIÂNCIA (m ² s ⁻²)	VARIÂNCIA FILTRADA (m ² s ⁻²)	RAZÃO (%)
85,0 W	11,7	4,6	39,3
82,5 W	14,0	5,5	39,3
80,0 W	13,5	5,2	38,5
77,5 W	15,2	6,2	40,4
75,0 W	14,8	5,6	37,8
72,5 W	12,2	4,6	37,4
70,0 W	11,4	4,6	40,0
67,5 W	13,1	5,4	41,0
65,0 W	13,9	5,5	40,0
62,5 W	13,6	5,6	41,4
60,0 W	13,3	5,8	43,8
57,5 W	11,4	5,4	47,2
55,0 W	8,5	4,4	51,4
52,5 W	6,5	3,1	48,8
50,0 W	5,7	2,4	41,5
47,5 W	6,6	3,0	45,6
45,0 W	7,5	4,1	55,0
42,5 W	7,4	4,4	59,6
40,0 W	7,1	3,9	55,9
37,5 W	7,0	3,3	47,8
35,0 W	6,9	2,9	41,5
32,5 W	7,4	3,3	44,9
30,0 W	9,9	5,1	51,7
27,5 W	15,3	7,8	51,1
25,0 W	21,0	10,3	49,0
22,5 W	23,7	11,6	49,0
20,0 W	22,3	11,4	50,9
17,5 W	19,7	10,3	52,6
15,0 W	19,8	10,3	52,3
12,5 W	22,6	12,0	52,9
10,0 W	24,9	12,9	51,7
7,5 W	25,1	11,4	45,5
5,0 W	21,4	8,4	39,0
2,5 W	16,6	5,3	31,8
0,0 W	15,4	3,4	22,0

TABELA 3.5 - VARIÂNCIA E VARIÂNCIA FILTRADA DA TEMPERATURA DO AR, PARA O FILTRO DE 2 A 10 DIAS, PARA MAM

No. de harmônicos retidos no filtro: 37 No. total de harmônicos da série: 92 Porcentagem de variância esperada: 40,2%			
LONGITUDE	VARIÂNCIA (K ²)	VARIÂNCIA FILTRADA (K ²)	RAZÃO (%)
85,0 W	1,6	0,8	49,2
82,5 W	1,5	0,8	49,0
80,0 W	2,6	1,4	54,9
77,5 W	3,9	1,7	45,4
75,0 W	5,6	2,3	42,0
72,5 W	6,6	2,6	39,1
70,0 W	5,2	2,1	39,7
67,5 W	4,4	1,8	40,1
65,0 W	3,8	1,4	36,0
62,5 W	3,7	1,1	29,2
60,0 W	4,2	1,2	27,5
57,5 W	4,4	1,3	28,9
55,0 W	2,9	0,8	27,5
52,5 W	1,6	0,5	32,6
50,0 W	1,6	0,8	46,9
47,5 W	1,9	0,9	47,9
45,0 W	2,0	0,8	41,0
42,5 W	1,8	0,7	37,1
40,0 W	1,8	0,7	40,2
37,5 W	1,7	0,7	43,2
35,0 W	1,5	0,6	40,9
32,5 W	1,4	0,5	38,6
30,0 W	1,4	0,6	40,5
27,5 W	1,3	0,6	43,1
25,0 W	1,2	0,5	46,4
22,5 W	1,1	0,5	47,5
20,0 W	1,1	0,5	46,7
17,5 W	1,0	0,5	48,3
15,0 W	1,0	0,5	49,7
12,5 W	1,0	0,5	50,2
10,0 W	1,2	0,5	45,2
7,5 W	1,4	0,6	38,6
5,0 W	1,2	0,5	38,8
2,5 W	0,8	0,4	52,4
0,0 W	0,9	0,5	58,2

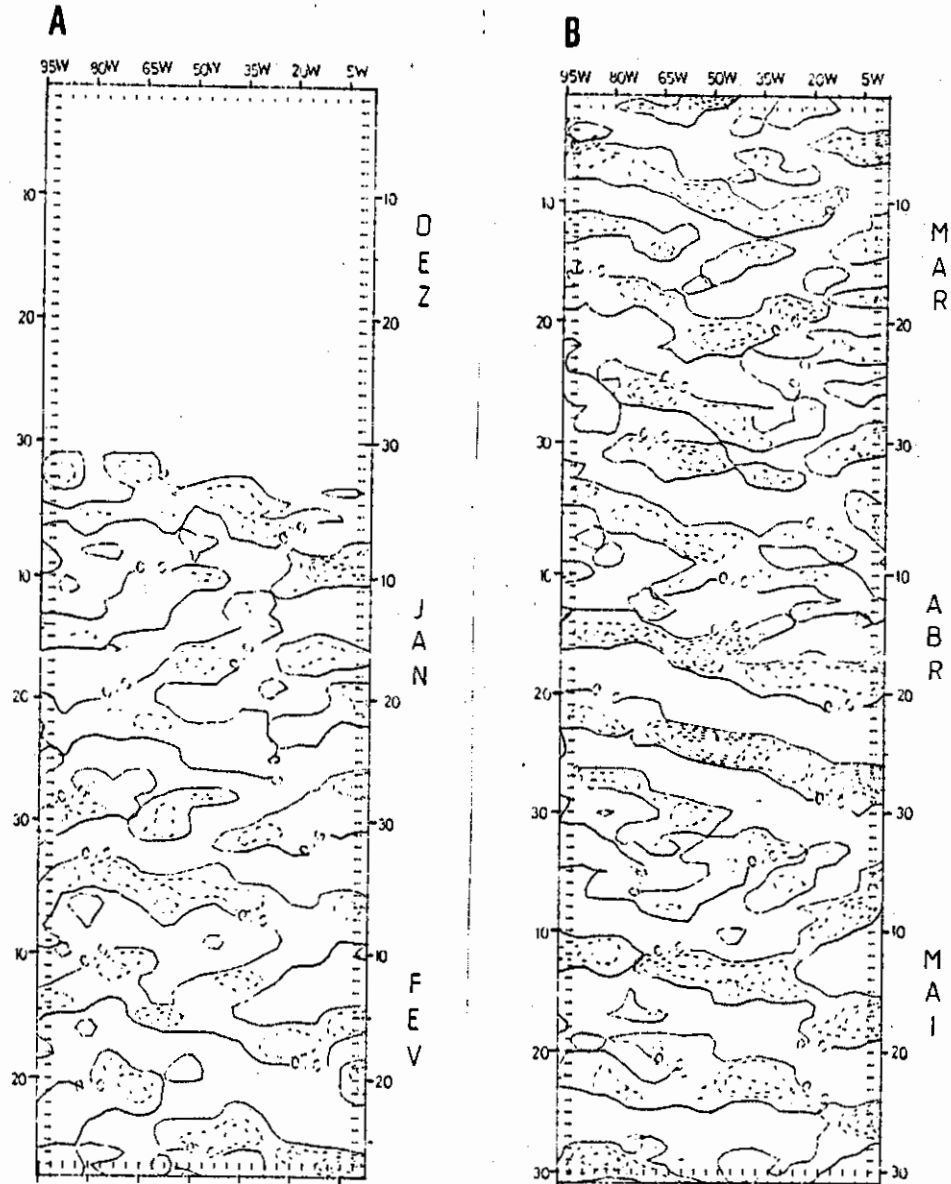


Fig. 3.3 - Diagramas longitude versus tempo de desvios da radiação de onda longa, em relação à média do trimestre, filtrados para o intervalo de 2 a 10 dias, para (A) DJF, (B) MAM, (C) JJA e (D) SON, ao longo do equador. Estão plotados somente os desvios negativos. Intervalo dos contornos: 10 W/m^2 .

(continua)

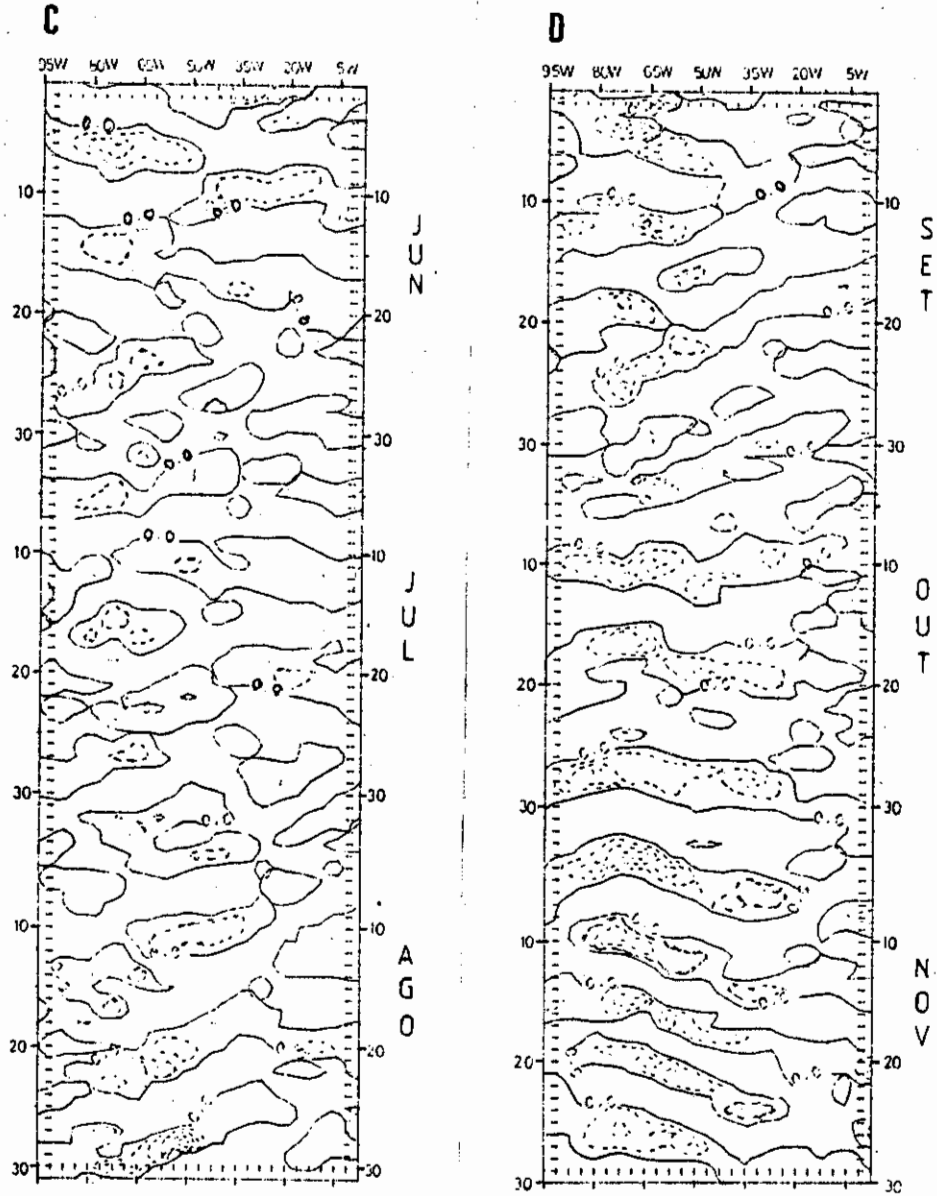


Fig. 3.3 - (conclusão)

O trimestre JJA apresenta a nebulosidade mais baixa, indicando menor atividade convectiva durante o inverno do Hemisfério Sul. Nos trimestres JJA e SON, a nebulosidade sobre o oceano é, mais baixa do que sobre o continente, enquanto em DJF e MAM, não há grande diferença na intensidade da nebulosidade sobre as duas superfícies.

Ao se calcular a porcentagem da variância da série resultante do filtro de 2 a 10 dias sobre os dados de ROL (tabelas 3.6.A-D), observa-se em todos os trimestres porcentagem da variância, em geral, abaixo de 40%, indicando aparentemente que neste intervalo de período não há distúrbios oscilatórios importantes. Entretanto, ao se diminuir o intervalo do filtro de 2 a 10 dias para 5 a 10 dias, as porcentagens de variância com periodicidade entre 5 a 10 dias se sobressaem bastante (tabela 3.7.A-D). Isto mostra que a periodicidade de 6 a 7 dias, encontrada nas análises dos diagramas longitude versus tempo de ROL, existe e é significativa.

Calcularam-se, então, as porcentagens de variância de ROL para diversos intervalos de periodicidade (tabela 3.8), tomando a série completa dos dados de ROL, de janeiro a novembro de 1979. A porcentagem de variância abaixo do valor esperado para o espectro de ruído branco para distúrbios com período entre 1 a 5 dias é confirmada nesta tabela. Da mesma forma pode-se verificar a importância dos distúrbios entre 5 a 10 dias. Neste caso ao se considerar os 11 meses, o tamanho da série aumenta, e a resolução espectral melhora. Pode-se então notar um fato interessante: distúrbios com periodicidades entre 10 a 30 e entre 30 a 60 dias, juntos contêm cerca de 30% da variância total, enquanto que a variância esperada do ruído branco é de cerca de 8%. Estes resultados sugerem a existência de oscilações com período entre 10 a 60 dias bastante significativas na região equatorial do Oceano Atlântico e América do Sul.

TABELA 3.6 VARIÂNCIA E VARIÂNCIA FILTRADA DA RADIAÇÃO DE ONDA LONGA, PARA O FILTRO DE 2 A 10 DIAS, PARA O TRIMESTRES: DJF, MAM, JJA E SON

A) Trimestre: DJF			
No. de harmônicos retidos no filtro: 24			
No. total de harmônicos da série: 59			
Porcentagem de variância esperada: 40,7%			
LONGITUDE	VARIÂNCIA (W^2_{m-2}) ²	VARIÂNCIA FILTRADA (W^2_{m-2}) ²	RAZÃO (%)
95,0 W	249,4	55,9	22,4
87,5 W	261,5	76,2	29,1
80,0 W	372,8	72,4	19,4
72,5 W	959,6	127,5	13,3
65,0 W	874,7	158,2	18,1
57,5 W	551,7	127,8	23,2
50,0 W	684,4	131,1	19,2
42,5 W	621,8	94,4	15,2
35,0 W	427,0	185,8	43,5
27,5 W	190,1	77,3	40,7
20,0 W	227,0	90,3	39,8
12,5 W	275,0	113,5	41,3
5,0 W	470,5	170,6	36,3
2,5 E	886,2	330,9	37,3
B) Trimestre: MAM			
No. de harmônicos retidos no filtro: 37			
No. total de harmônicos da série: 92			
Porcentagem de variância esperada: 40,2%			
LONGITUDE	VARIÂNCIA (W^2_{m-2}) ²	VARIÂNCIA FILTRADA (W^2_{m-2}) ²	RAZÃO (%)
95,0 W	278,3	44,7	16,0
87,5 W	325,4	112,4	34,5
80,0 W	396,3	136,4	34,4
72,5 W	694,2	158,7	22,9
65,0 W	660,4	243,7	36,9
57,5 W	724,5	294,6	40,7
50,0 W	825,7	326,0	39,5
42,5 W	821,2	268,8	32,7
35,0 W	746,9	218,0	29,2
27,5 W	591,0	178,2	30,2
20,0 W	355,2	139,9	39,4
12,5 W	374,1	122,3	32,7
5,0 W	809,1	233,6	28,9
2,5 E	1242,8	432,2	34,8

Tabela 3.6 - Conclusão

C) Trimestre: JJA			
No. de harmônicos retidos no filtro: 37			
No. total de harmônicos da série: 92			
Porcentagem de variância esperada: 40,2%			
LONGITUDE	VARIÂNCIA ($W^2 m^{-2}$) ²	VARIÂNCIA FILTRADA ($W^2 m^{-2}$) ²	RAZÃO (%)
95,0 W	53,1	17,8	33,6
87,5 W	80,8	19,7	24,3
80,0 W	289,4	78,7	27,2
72,5 W	437,5	172,3	39,4
65,0 W	425,2	111,3	26,2
57,5 W	601,1	140,7	23,4
50,0 W	379,4	110,5	29,1
42,5 W	194,6	64,8	33,3
35,0 W	207,4	72,9	35,1
27,5 W	99,0	37,0	37,4
20,0 W	134,4	47,1	35,0
12,5 W	148,6	32,2	21,7
5,0 W	106,4	26,3	24,7
2,5 E	154,7	51,7	37,5
D) Trimestre: SON			
No. de harmônicos retidos no filtro: 37			
No. total de harmônicos da série: 91			
Porcentagem de variância esperada: 40,7%			
LONGITUDE	VARIÂNCIA ($W^2 m^{-2}$) ²	VARIÂNCIA FILTRADA ($W^2 m^{-2}$) ²	RAZÃO (%)
95,0 W	66,0	24,7	37,5
87,5 W	165,4	66,3	40,1
80,0 W	510,1	181,6	35,6
72,5 W	885,3	363,4	41,0
65,0 W	932,7	351,2	37,7
57,5 W	802,4	246,4	30,7
50,0 W	488,5	146,0	29,9
42,5 W	183,0	58,0	31,7
35,0 W	238,4	86,8	36,4
27,5 W	175,9	69,3	39,4
20,0 W	73,2	27,1	37,1
12,5 W	46,1	12,9	27,9
5,0 W	63,5	18,8	29,6
2,5 E	154,2	65,0	42,2

TABELA 3.7 - VARIÂNCIA E VARIÂNCIA FILTRADA DA RADIAÇÃO
DE ONDA LONGA, PARA O FILTRO DE 5 A 10 DIAS,
PARA OS TRIMESTRES: DJF, MAM, JJA E SON

A) Trimestre: DJF			
No. de harmônicos retidos no filtro: 6			
No. total de harmônicos da série: 59			
Porcentagem de variância esperada: 10,2%			
LONGITUDE	VARIÂNCIA ($W^2 m^{-2}$) ²	VARIÂNCIA FILTRADA ($W^2 m^{-2}$) ²	RAZÃO (%)
95,0 W	249,4	34,6	13,9
87,5 W	261,5	36,7	14,1
80,0 W	372,8	39,2	10,5
72,5 W	959,6	85,5	8,9
65,0 W	874,7	100,6	11,5
57,5 W	551,7	78,0	14,1
50,0 W	684,4	72,7	10,6
42,5 W	621,8	56,5	9,1
35,0 W	427,0	140,7	32,9
27,5 W	190,1	51,7	27,2
20,0 W	227,0	64,9	28,6
12,5 W	275,0	75,8	27,6
5,0 W	470,5	104,5	22,2
2,5 E	886,2	207,8	23,5

tabela 3.7 - Continuação

B) Trimestre: MAM			
No. de harmônicos retidos no filtro: 9			
No. total de harmônicos da série: 92			
Porcentagem de variância esperada: 9,8%			
LONGITUDE	VARIÂNCIA (W^2m^{-2}) ²	VARIÂNCIA FILTRADA (W^2m^{-2}) ²	RAZÃO (%)
95,0 W	278,3	16,6	6,0
87,5 W	325,4	72,3	22,2
80,0 W	396,3	75,8	19,1
72,5 W	694,2	51,4	7,4
65,0 W	660,4	106,1	16,1
57,5 W	724,5	169,3	23,4
50,0 W	825,7	218,2	26,4
42,5 W	821,2	159,4	19,4
35,0 W	746,9	88,6	11,9
27,5 W	591,0	103,7	17,5
20,0 W	355,2	42,8	12,1
12,5 W	374,1	71,2	19,0
5,0 W	809,1	111,2	13,7
2,5 E	1242,8	235,0	18,9
C) Trimestre: JJA			
No. de harmônicos retidos no filtro: 9			
No. total de harmônicos da série: 92			
Porcentagem de variância esperada: 9,8%			
LONGITUDE	VARIÂNCIA (W^2m^{-2})	VARIÂNCIA FILTRADA (W^2m^{-2})	RAZÃO (%)
95,0 W	53,1	11,6	21,8
87,5 W	80,8	13,2	16,4
80,0 W	289,4	42,5	14,7
72,5 W	437,5	82,3	18,8
65,0 W	425,2	61,9	14,5
57,5 W	601,1	77,9	13,0
50,0 W	379,4	51,1	13,5
42,5 W	194,6	40,8	21,0
35,0 W	207,4	48,0	23,1
27,5 W	99,0	22,8	23,1
20,0 W	134,4	24,8	18,5
12,5 W	148,6	15,6	10,5
5,0 W	106,4	13,1	12,3
2,5 E	164,7	29,6	17,9

Tabela 3.7 - Conclusão

D Trimestre: SON			
No. de harmônicos retidos no filtro: 9			
No. total de harmônicos da série: 91			
Porcentagem de variância esperada: 9,9%			
LONGITUDE	VARIÂNCIA ($W^2 m^{-2}$)	VARIÂNCIA FILTRADA ($W^2 m^{-2}$)	RAZÃO (%)
95,0 W	66,0	18,9	28,6
87,5 W	165,4	49,7	30,0
80,0 W	510,1	129,1	25,3
72,5 W	885,3	260,0	29,4
65,0 W	932,7	216,5	23,2
57,5 W	802,4	161,6	20,1
50,0 W	488,5	81,6	16,7
42,5 W	183,0	26,1	14,2
35,0 W	238,4	50,8	21,3
27,5 W	175,9	37,6	21,4
20,0 W	73,2	13,1	17,9
12,5 W	46,1	5,7	12,3
5,0 W	63,5	8,4	13,3
2,5 E	154,2	12,2	22,0

TABELA 3.8 - VARIÂNCIA E PORCENTAGEM DE VARIÂNCIA FILTRADA PARA DIFERENTES INTERVALOS DE PERÍODO UTILIZANDO DADOS DE ROL (JANEIRO A NOVEMBRO DE 1979), AO LONGO DO EQUADOR.

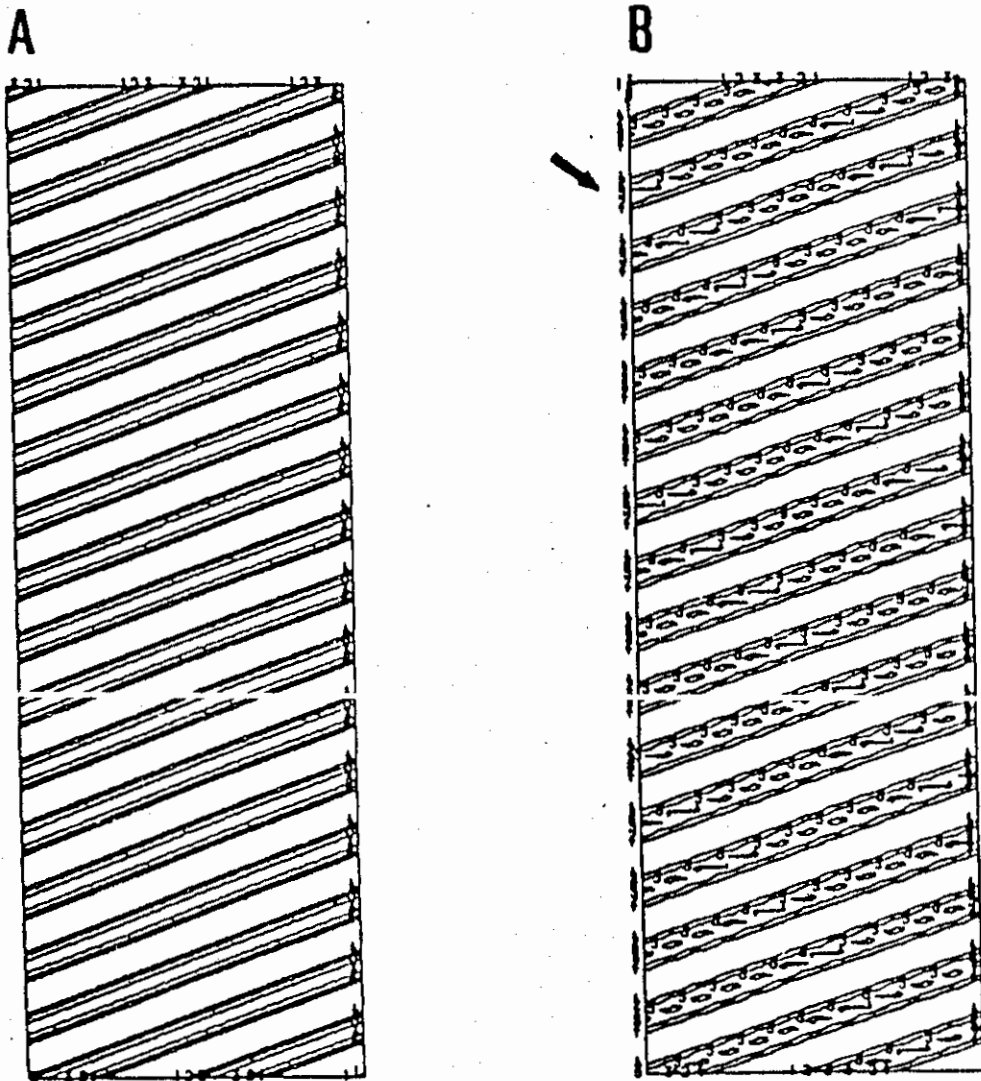
LONG.	VARIÂNCIA (W^2_{m-2})	PORCENTAGEM DE VARIÂNCIA					
		INTERVALO DE PERÍODO (DIAS)					
		1,0 a 2,0	2,0 a 5,0	5,1 a 9,8	10,2 a 27,8	30,4 a 55,7	66,8 a 334
95,0 W	153,3	22,6	8,5	12,8	22,9	17,6	14,5
87,5 W	203,1	25,3	10,8	20,0	21,2	13,0	8,3
80,0 W	393,7	29,9	10,7	18,8	18,9	9,9	7,7
72,5 W	722,5	38,1	10,6	17,4	16,8	8,9	7,5
65,0 W	707,7	36,7	12,9	16,5	18,2	10,2	5,4
57,5 W	681,2	30,1	11,8	17,5	20,1	11,4	8,2
50,0 W	585,9	27,6	11,9	17,8	19,7	10,5	12,5
42,5 W	439,5	29,7	11,2	16,8	23,9	8,8	9,3
35,0 W	403,3	24,6	13,1	19,5	26,8	10,7	5,4
27,5 W	271,5	32,3	12,3	20,7	17,6	12,8	4,1
20,0 W	194,9	34,4	18,8	16,0	12,9	15,7	1,8
12,5 W	205,1	29,8	11,0	18,7	22,3	14,9	3,0
5,0 W	352,6	27,6	11,3	18,2	28,3	12,1	2,6
2,5 E	588,3	34,2	10,5	23,0	18,1	11,0	3,2
VARIÂNCIA ESPERADA (%)		50,0	30,2	9,6	6,6	1,8	1,5

Nota-se a baixa frequência dos distúrbios observados pelos diagramas de ROL (fig.3.3) quando comparados aos diagramas da componente meridional do vento. Os distúrbios ondulatórios na componente meridional ocorrem durante todo ano, entretanto, é necessário outro mecanismo conjuntamente a estas oscilações para amplificar o distúrbio e produzir convecção profunda.

Aparentemente, deste grupo de dados, ROL não se apresentou como um bom parâmetro para o estudo de distúrbios de alta frequência, ou pelo menos de distúrbios de frequência menor que 5 dias. A comparação entre os diagramas de vento com os de ROL não é simples, pois o vento é uma medida pontual, enquanto que ROL é uma medida

volumétrica. No caso de ROL não se pode precisar a altura de onde emerge a radiação, de forma que as medidas provêm tanto dos baixos níveis quanto dos altos níveis. O vento é obtido nos pontos no nível de 850 hPa. O uso ROL é agravado pela baixa resolução espectral deste conjunto de dados ($7,5^{\circ} \times 7,5^{\circ}$).

Devido a baixa frequência apresentada nos diagramas de ROL, e por vezes das aparentes propagações para leste, realizaram-se simulações de ondas para verificar a ocorrência de "aliasing", isto é, frequências altas representadas nos diagramas como frequências baixas decorrentes da baixa resolução espacial e temporal. Inicialmente foi simulada uma onda de características especificadas, e depois a resolução foi degradada através de média no espaço e no tempo. Procedimento semelhante é aplicado aos dados de ROL quando são interpolados em pontos de grade, após serem obtidos do satélite. A onda teve as seguintes características: $L=5000$ km, $c=-10$ m/s. A resolução inicial era de $dx=250$ km e $dt=12$ h (figura 3.4.A). Após as médias, utilizando três pontos no espaço e dois no tempo, a resolução foi reduzida para $dx=750$ km. Como era de se esperar pelo cálculo da média, a amplitude da onda foi reduzida. Então surge um padrão sutilmente anômalo se propagando para leste, como estão indicando as setas na figura 3.4.B.

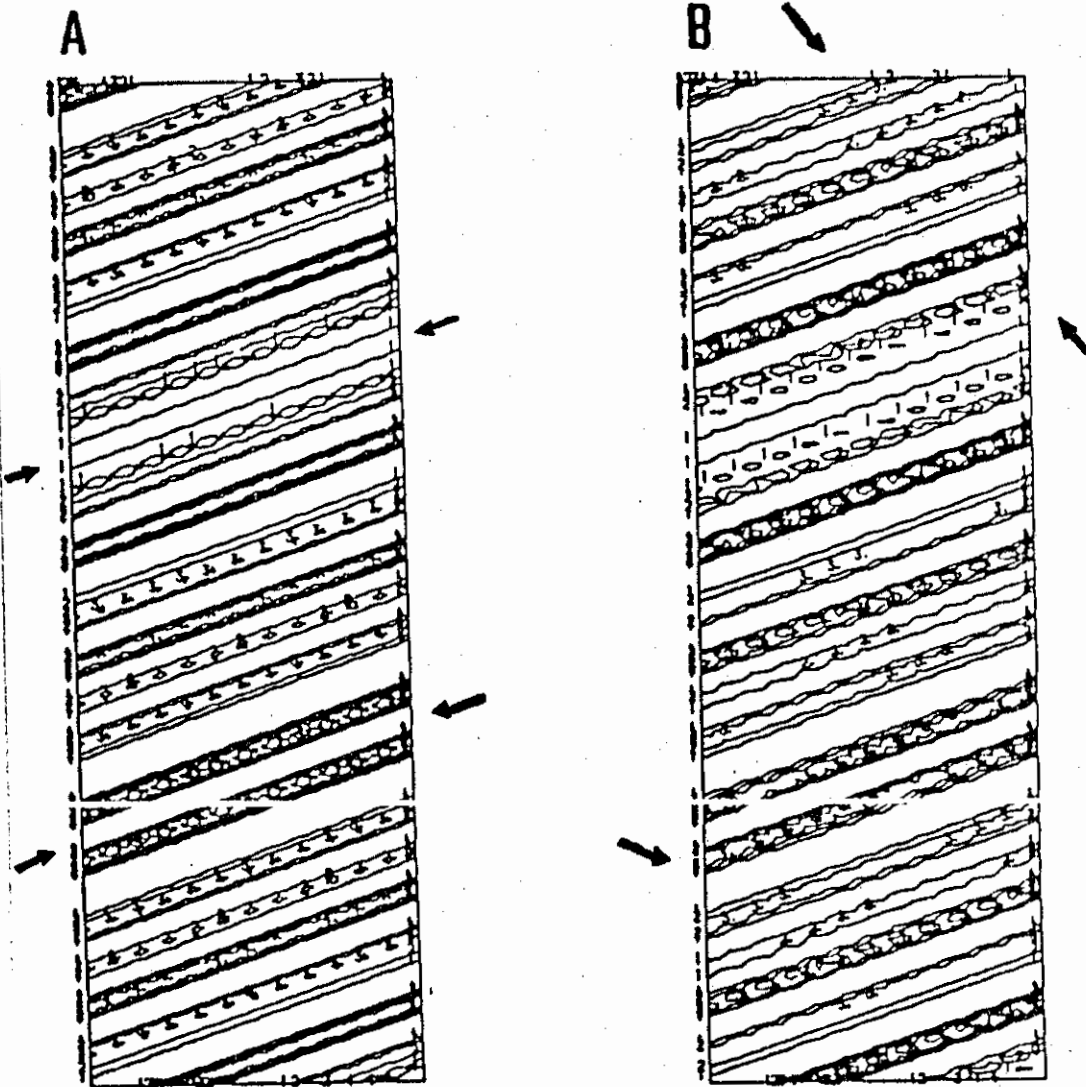


Linha	Contorno
1	0,0
2	0,4
3	0,8

Fig. 3.4 - Diagramas longitude versus tempo de simulação de uma onda de comprimento $L = 5000$ km e velocidade de fase $c = -10$ m/s com resolução (A) $dx = 250$ km e $dt = 12$ h e (B) $dx = 750$ km e $dt = 24$ h

O teste anterior foi realizado com uma única onda. Entretanto, na atmosfera são observados pacotes de ondas se propagando. Realizou-se uma segunda simulação com um pacote de ondas de diferentes comprimentos: 5000 km, 4000 km e 3000 km; todas propagando para leste com a velocidade igual a 10m/s. A figura 3.5.A mostra o pacote de ondas com a resolução inicial. As regiões de cristas e cavados permanecem na mesma longitude, sem apresentar deslocamento para leste ou oeste com o tempo, isto é, o pacote de ondas é estacionário. Entretanto, após reduzir a resolução para 750 km e 24h, algumas cristas e cavados se propagam ligeiramente para leste (figura 3.5.B). Isto sugere que as propagações para leste observadas nos diagramas Hovmoller de ROL podem ter sido provocadas pela baixa resolução nestes dados.

A existência de distúrbios ondulatórios se propagando de leste para oeste sobre o Atlântico Tropical Sul durante o ano, pode ser verificada nos diagramas longitude versus tempo de desvios de vorticidade relativa filtrados para o intervalo de período entre 2 a 10 dias (figura 3.6). Entretanto, as isolinhas de desvios de vorticidade relativa apresentam-se um pouco mais desorganizadas quando comparadas com as linhas de desvios do vento meridional. Isto se deve ao fato de a vorticidade ser uma variável derivada do vento e, conseqüentemente, sua série temporal tende a ser mais ruidosa. Apesar destes diagramas de vorticidade terem se mostrado de difícil análise, as altas porcentagens de variância (tabela 3.9) confirmam a existência de distúrbios oscilatórios no intervalo de período entre 2 a 10 dias sobre a região equatorial do Oceano Atlântico e América do Sul.



Linha	Contorno
1	0,0
2	-0,6
3	-1,2
4	-1,8

Fig. 3.5 - Diagramas longitude versus tempo de simulação de um pacote de ondas de comprimentos: 5000, 4000 e 3000 km e velocidade de fase $c = -10$ m/s com resolução (A) $dx = 250$ km e $dt = 12$ h e (B) $dx = 750$ km e $dt = 24$ h

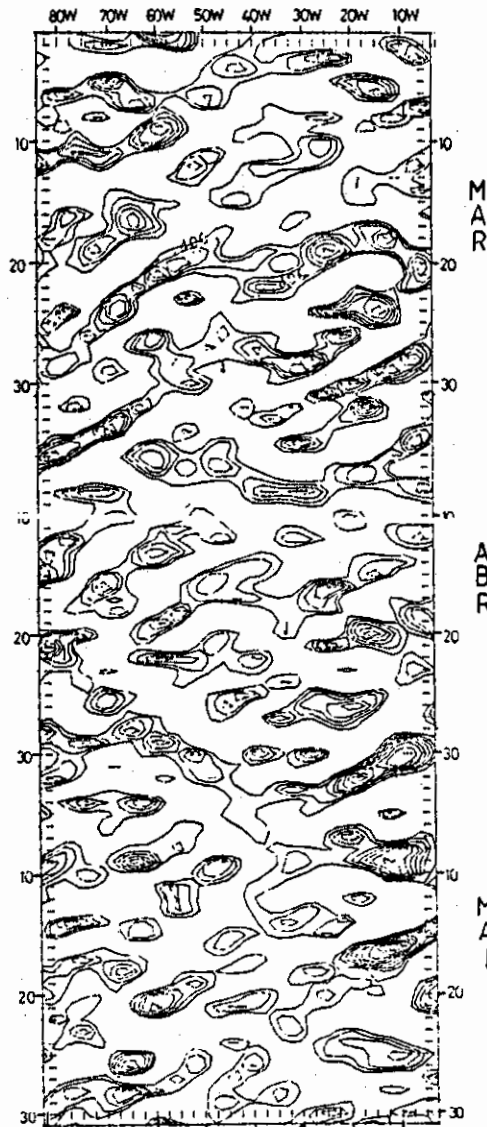


Fig. 3.6 - Diagramas longitude versus tempo de desvios da vorticidade relativa, em relação à média do trimestre, filtrados para o intervalo de 2 a 10 dias, para MAM, ao longo da latitude de $2,5^{\circ}\text{S}$, no nível de 850 hPa. Estão plotados somente os desvios negativos. Intervalo dos contornos: $(1 \text{ E-6})/\text{s}$.

TABELA 3.9 - VARIÂNCIA E VARIÂNCIA FILTRADA DA VORTICIDADE RELATIVA, PARA O FILTRO DE 2 A 10 DIAS, PARA MAM

No. de harmônicos retidos no filtro: 37 No. total de harmônicos da série: 92 Porcentagem de variância esperada: 40.2%			
LONGITUDE	VARIÂNCIA (1E-12s ⁻²)	VARIÂNCIA FILTRADA (1E-12s ⁻²)	RAZÃO (%)
82,5 W	89,0	53,7	60,4
80,0 W	95,3	62,5	65,5
77,5 W	104,3	61,5	59,0
75,0 W	94,6	46,6	49,3
72,5 W	78,7	37,2	47,3
70,0 W	95,3	50,4	52,9
67,5 W	133,3	72,4	54,3
65,0 W	142,3	71,5	50,2
62,5 W	134,0	68,2	50,9
60,0 W	139,1	76,6	55,1
57,5 W	120,2	69,1	57,4
55,0 W	92,2	47,4	51,4
52,5 W	88,1	39,6	44,9
50,0 W	74,8	29,3	39,2
47,5 W	87,7	33,0	37,6
45,0 W	91,7	37,1	40,4
42,5 W	51,1	23,1	45,2
40,0 W	45,5	25,0	54,9
37,5 W	55,0	30,1	54,8
35,0 W	51,5	25,0	48,6
32,5 W	58,2	30,6	52,6
30,0 W	72,3	36,1	49,9
27,5 W	96,6	49,9	51,6
25,0 W	123,6	69,0	55,8
22,5 W	127,4	66,5	52,2
20,0 W	117,5	72,3	61,5
17,5 W	151,9	95,5	62,9
15,0 W	238,2	108,4	45,5
12,5 W	257,3	125,7	48,9
10,0 W	221,6	117,8	53,1
7,5 W	242,5	93,6	38,6
5,0 W	211,0	81,3	38,5
2,5 W	128,7	55,5	43,1

3.3 - ESTIMATIVAS DE ESPECTROS DE POTÊNCIA

Com o intuito de identificar espectralmente a banda de frequências em que ocorrem os distúrbios entre as longitudes 0° e $80^{\circ}W$, ao longo da latitude de $5^{\circ}S$, durante o ano do FGGE, foram obtidos espectros de potência médios suavizados da componente meridional do vento. As figuras 3.7.A-D mostram estas estimativas para os quatro trimestres do ano.

Cada série temporal possui o tamanho de n dados, sendo: $n=180$ em DJF, $n=184$ em MAM e JJA, e $n=182$ em SON. Os espectros de potência médios foram obtidos da média dos espectros suavizados, que por sua vez foram calculados a partir de $(n-128)$ subconjuntos formados da série temporal original. Cada subconjunto é uma série composta por segmentos de 128 pontos da série completa. Estas séries não são filtradas. A função janela foi truncada em $M=17$ para proporcionar espectros mais suavizados e consistentes.

A ordenada está traçada em escala logarítmica para facilitar o cálculo e plotagem dos intervalos de confiança. Para uma análise direta da periodicidade do distúrbio, foi colocado o período na abscissa com a escala em dias.

Embora o espectro suavizado de cada ponto seja construído a partir da média dos $(n-128)$ espectros suavizados do mesmo ponto, preferiu-se manter, para simplificação, o critério de nível de significância para um único espectro. Portanto, para um nível de confiança $\rho = 0,10$, e o número de graus de liberdade $\nu = 20$, tem-se o seguinte intervalo de confiança para os espectros, obtido pela expressão (2.46):

$$\log C'_{XX}(f) + \log 0,64, \log C'_{XX}(f) + \log 1,83 \quad (3.1)$$

As análises baseam-se em espectros suavizados da componente meridional do vento. O emprego da componente meridional apresenta vantagens sobre a componente zonal do vento, pois da primeira pode-se extrair mais informações do comportamento ondulatório dos distúrbios (exceto no caso de ondas de Kelvin), como foi constatado anteriormente (Nitta et al., 1985). A componente zonal representa melhor a circulação média de grande escala. As estimativas do espectro de potência da componente zonal contêm mais energia nas baixas frequências. As estimativas dos espectros de temperatura do ar, T , são de baixíssima energia, pois nos trópicos a variabilidade espacial ou temporal da temperatura do ar é pequena.

Observa-se nos espectros de potência da componente meridional do vento a existência de picos significativos, isto é, picos que satisfazem o critério de não conter o dobro do intervalo de confiança, o nível médio de energia mínima do espectro ("background").

Segue-se uma análise dos espectros da componente meridional, observando-se a evolução dos picos durante o ano.

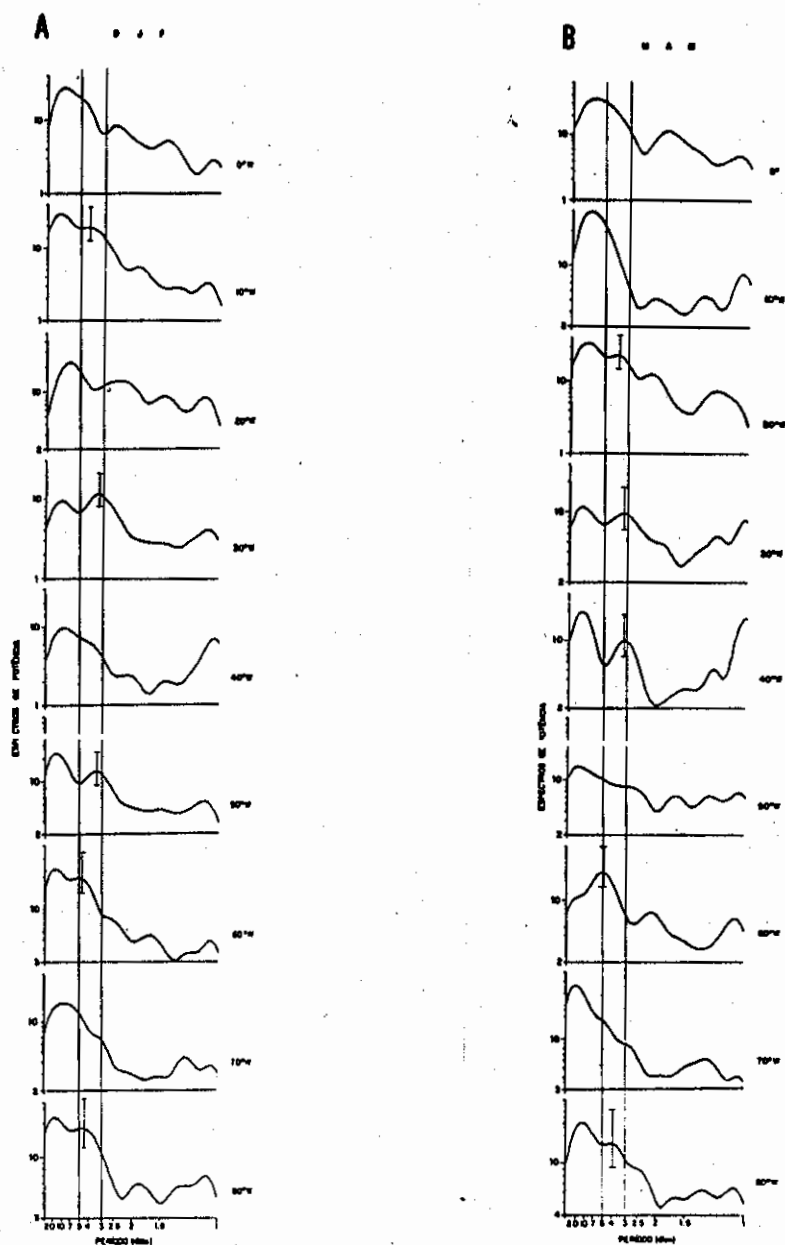
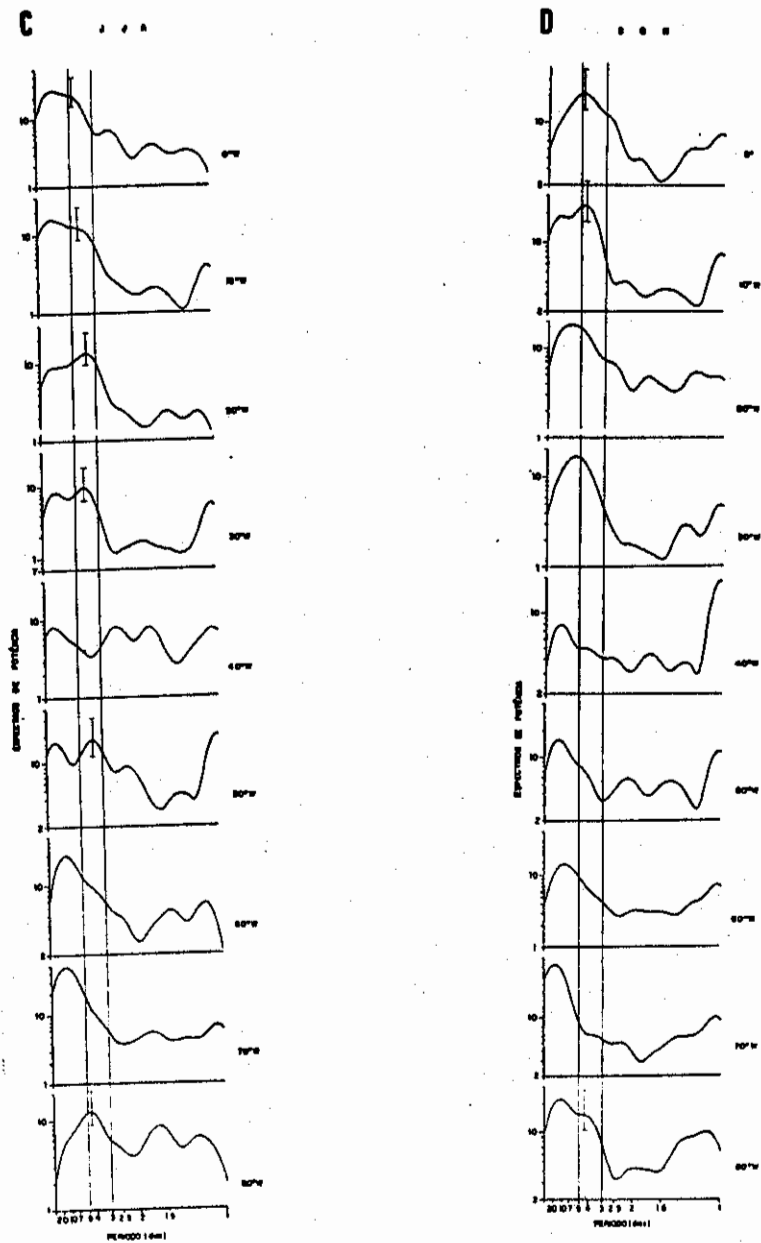


Fig. 3.7 - Estimativas de espectro de potência suavizado de desvios da componente meridional do vento, em relação à média de cada trimestre, do nível de 850 hPa e latitude de $5,0^{\circ}\text{S}$, de (A) DJF, (B) MAM, (C) JJA e (D) SON. Eixo das ordenadas em escala logarítmica. Unidade das ordenadas: $\text{m}^2 \text{ dia}/\text{s}^2$. O intervalo de confiança para os picos significativos estão plotados no gráfico na banda entre 3 a 5 dias.

(continua)



DJF

Durante o verão, os espectros de potência da componente meridional apresentam alguma variabilidade longitudinal nas frequências em que ocorreram os picos de energia.

Observa-se nos espectros de potência que picos de energia entre 10 a 20 dias estão presentes nesta latitude entre as longitudes 0° e 80°W .

Distúrbios com período de 4 a 5 dias possuem energia significativa sobre o oceano entre 0° e 10°W , e sobre o continente entre 60°W e 80°W . Estes distúrbios podem estar associados àqueles observados nos diagramas longitude versus tempo de DJF.

O pico de energia em 1 dia, referente ao ciclo diurno, é observado somente em 40°W , que é um ponto sobre o continente que se encontra bem próximo à costa.

MAM

Nesta época do ano, os perfis espectrais apresentam igualmente um certa variabilidade longitudinal ao longo da latitude de 5°S . Observam-se, entretanto, algumas semelhanças de uma longitude para outra na bandas de frequência em que ocorrem os picos de energia.

Uma boa parte da energia dos distúrbios está contida em períodos maiores que 3 dias. Verifica-se na figura 3.7.B, a presença de picos, por exemplo, em torno de 10 dias em várias longitudes referentes aos distúrbios de baixa frequência. Estes picos no período de 10 dias sofrem atenuação a oeste de 40°W , e volta a se amplificar sobre o continente, em aproximadamente 80°W .

O espectro de potência da componente meridional em 50°W se aproxima ao de um ruído branco. Salvo o pico em 20 dias, a energia se distribui quase igualmente em todas as outras frequências. Os diagramas longitude versus tempo também indicaram a desorganização destes distúrbios próxima a esta longitude.

O pico entre 3 a 5 dias define-se melhor entre as longitudes 20°W e 40°W , enquanto em 60°W , o pico tende para 5 dias. Os períodos estimados espectralmente são os menores que aqueles estimados pelos diagramas.

É interessante notar o aumento de energia para o período de 1 dia entre as longitudes 30°W e 40°W . Esta periodicidade, equivalente ao ciclo diurno, pode estar associado ao efeito da brisa, visto que entre as duas longitudes está contida a interface oceano-continente.

JJA

Uma variação longitudinal dos perfis espectrais também ocorreram nesta época do ano. Entre as longitude de 0° e 70°W , nota-se a permanência de distúrbios de período longo, em torno de 10 a 20 dias.

Os distúrbios de período de 3 a 5 dias possuem mais energia sobre o oceano, entre 0° e 30°W . Estes distúrbios podem estar associados às chuvas de inverno que ocorrem ao longo do litoral do Nordeste do Brasil. Sobre o continente, distúrbios neste intervalo de período sofrem muitas variações na intensidade da energia dos espectros. Observa-se que em torno de 40°W , a energia associada aos distúrbios com esta periodicidade diminui bastante, e volta a aumentar em torno de 50°W . Entre 60°W e 70°W , apesar de os espectros conterem uma quantidade razoável de energia,

não há picos marcantes. Em 80°W , aparece um pico próximo de 5 dias, que pode ter como causas, forçantes locais.

O ciclo diurno é notável entre as longitudes de 30°W e 50°W . Nesta época do ano, a ZCIT se encontra mais ao norte (Lobo, 1982). o anticiclone subtropical está mais intenso, e conseqüentemente os ventos alísios de sudeste estão mais fortes e penetram no continente. Neste caso os efeitos da brisa deslocam-se para o interior, em áreas mais afastadas da costa do que em MAM.

SON

Os espectros de potência deste período de transição mostram-se um pouco diferentes dos espectros de outros períodos. Por exemplo, não são observados sobre o oceano picos de energia em períodos mais longos que 10 dias, e os picos em torno de 5 a 7 dias são mais comuns. Os picos de 5 a 7 dias estão provavelmente associados aos distúrbios observados nos diagramas Hovmoller. Sobre o oceano, ocorre uma ausência de picos significativos nas frequências maiores, excetuando picos em bandas de frequência referente ao ciclo diurno, entre 0° e 10°W . Entretanto, sobre o continente, verificam-se picos entre 10 a 15 dias. O ciclo diurno está presente ao longo de todas longitudes, exceto em 20°W . Este ciclo é marcante principalmente em torno de 40°W . Os demais picos não se apresentam suficientemente significativos.

3.4 - CARACTERÍSTICAS ONDULATÓRIAS BÁSICAS DOS DISTÚRBIOS

Uma vez constatada através dos perfis de espectro de potência a existência de distúrbios entre 3 a 5 dias, em alguns períodos do ano pode-se inferir certas características dos distúrbios através da distribuição

especial dos espectros de potência da série de cada ponto e dos espectros de potência cruzados.

Amplitudes dos distúrbios de 3 a 5 dias

A distribuição horizontal do espectro de potência de uma certa variável, num certo intervalo de frequência, nos fornece uma visão espacial da amplitude do distúrbio neste dado intervalo de frequência.

Em cada ponto de grade foi obtido um espectro de potência médio calculado a partir da média de dois espectros de potência do mesmo ponto. Um dos espectros foi construído a partir da série completa do ponto de grade com os 128 valores iniciais da série e o outro espectro foi obtido com os 128 últimos valores da mesma série. Uma vez calculado o espectro suavizado médio, integrou-se, em seguida, as estimativas deste espectro no intervalo de frequências correspondente a 3,1 a 4,9 dias.

Em DJF, observa-se que sobre o oceano Atlântico, ao longo do equador, a amplitude do distúrbio na componente meridional do vento apresenta variação longitudinal, alternando núcleos de máximos (regiões hachuradas) e mínimos de potência (fig. 3.8.A). A medida em que se desloca para o litoral norte da região Nordeste do Brasil, a amplitude decai, apresentando um núcleo de valores mínimos bem definido ao longo do litoral. Nota-se um núcleo de máxima amplitude sobre o Atlântico, ao sul do equador. Nesta mesma região, o campo de espectro de potência da componente zonal apresenta valores cada vez menores à medida que se aproxima do continente (fig. 3.8.B).

Em MAM, a energia associada às oscilações da componente meridional com período, em torno de 3 a 5 dias, se concentra sobre o oceano Atlântico equatorial, onde o valor máximo do espectro de potência se localiza no ponto

eq., 22,5 W (figura 3.9.A). A partir deste ponto observa-se um forte decaimento em direção ao continente sul americano e um decaimento mais suave para leste. É marcante a simetria da amplitude do distúrbio do Atlântico em torno do equador. A amplitude deste distúrbio na componente zonal (figura 3.9.B) apresenta ainda alguma simetria em torno do equador. É interessante notar que a energia do distúrbio se distribui nas duas componentes do vento em quantidades relativamente comparáveis. Sobre o litoral norte e nordeste do Brasil persiste uma região com menores amplitudes, o que pode indicar mudanças nas características das ondas durante seu deslocamento para oeste. Neste caso pode ocorrer um decréscimo de amplitude do distúrbio a oeste de 30°W, ou então uma variação no período da onda, com a proximidade do continente. As mudanças nas características das ondas pode resultar em vazamento da energia, isto é, das amplitudes maiores, para frequências fora do intervalo estudado.

PERIODO : DEZ/JAN/FEY/79

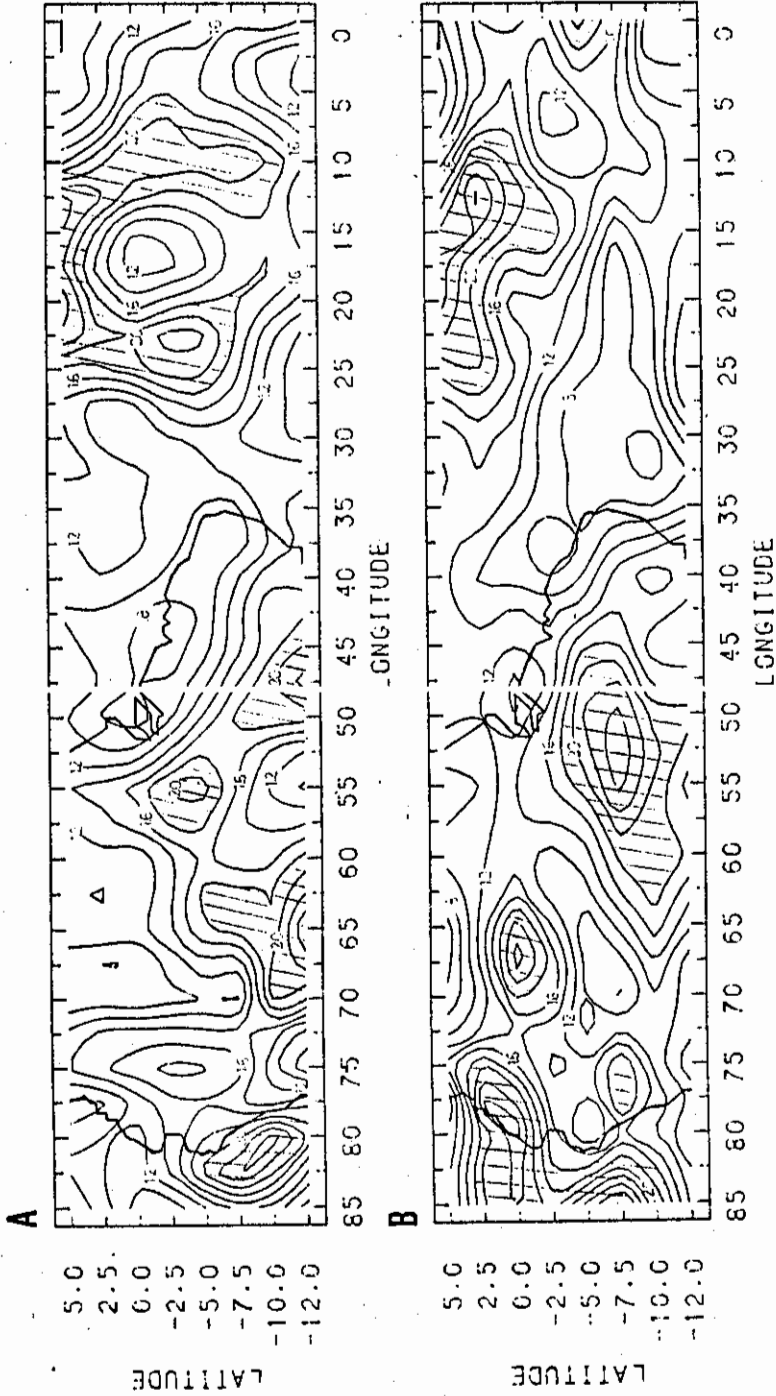


Fig. 3.8 - Distribuição horizontal das estimativas dos espectros de potência, integradas no intervalo de período entre 3 a 5 dias, para (A) a componente meridional e (B) a componente zonal do vento em 850 hPa, durante DJF. Intervalo dos contornos: 0,2m²/s².

PERÍODO : MAR/ABR/MAI/79

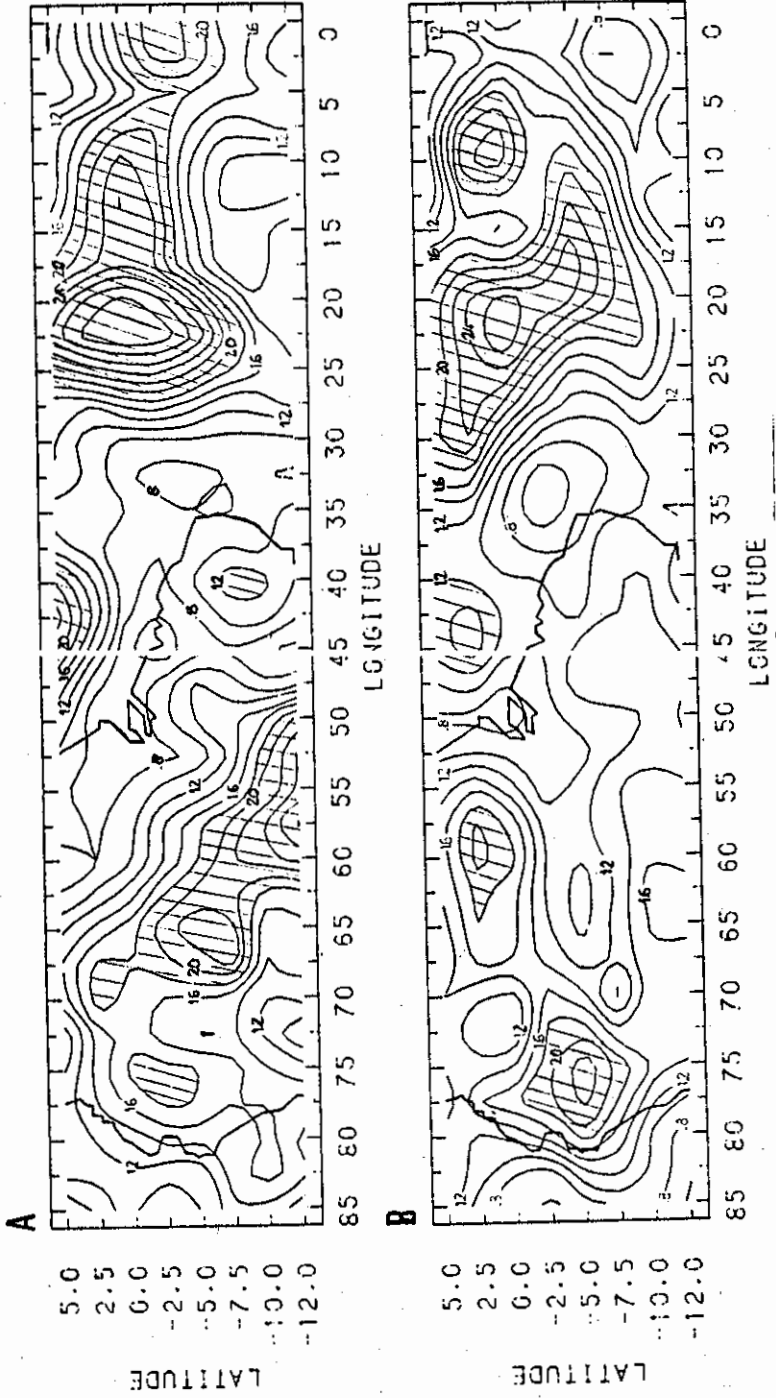


Fig. 3.9 - Distribuição horizontal das estimativas dos espectros de potência, integradas no intervalo de período entre 3 a 5 dias, para (A) a componente meridional e (B) a componente zonal do vento em 850 hPa, durante MAM. Intervalo dos contornos: $0,2m^2/s^2$.

Observa-se sobre o continente, no campo do espectro da componente meridional do vento, um núcleo de máxima amplitude com orientação NW-SE, aparentemente se estendendo para latitudes maiores.

A figura 3.10.A, de JJA, mostra um campo de espectros da componente meridional diferente dos trimestres anteriores. A região de maiores amplitudes do distúrbio sobre o Atlântico se localiza ao norte do equador. Este núcleo, nesta época do ano, pode estar associado às ondas de leste que se propagam sobre o Oceano Atlântico Tropical Norte. As amplitudes apresentam um decaimento bem forte em direção ao Hemisfério Sul, atingindo o mínimo na parte norte e leste do Nordeste do Brasil que pode sugerir uma região de desorganização de ondas. A figura 3.10.B mostra curiosamente que os distúrbios na componente zonal possuem mais energia sobre o continente do que sobre o oceano, durante o inverno do Hemisfério Sul.

Em SON, as amplitudes dos distúrbios das componentes zonal e meridional sobre a região equatorial do oceano Atlântico e da América do Sul (figura 3.11.A e 3.11.B) são as menores do ano. Amplitudes pequenas nesta época do ano também foram observadas nas análises dos diagramas de longitude versus tempo. Sobre o oceano Atlântico, pode-se ainda verificar, no campo da componente meridional, um núcleo de amplitude maior entre $22,5^{\circ}\text{W}$ e $27,5^{\circ}\text{W}$, na latitude de $2,5^{\circ}\text{N}$. As oscilações nos distúrbios de 3 a 5 dias na componente zonal estão concentradas sobre o continente, onde se destaca a região entre 60°W e 55°W ao sul de 10°S devido a grande amplitude do distúrbio com esta periodicidade. Isto ocorre em ambas componentes do vento.

PERIGDO : JUN/JUL/AGG/79

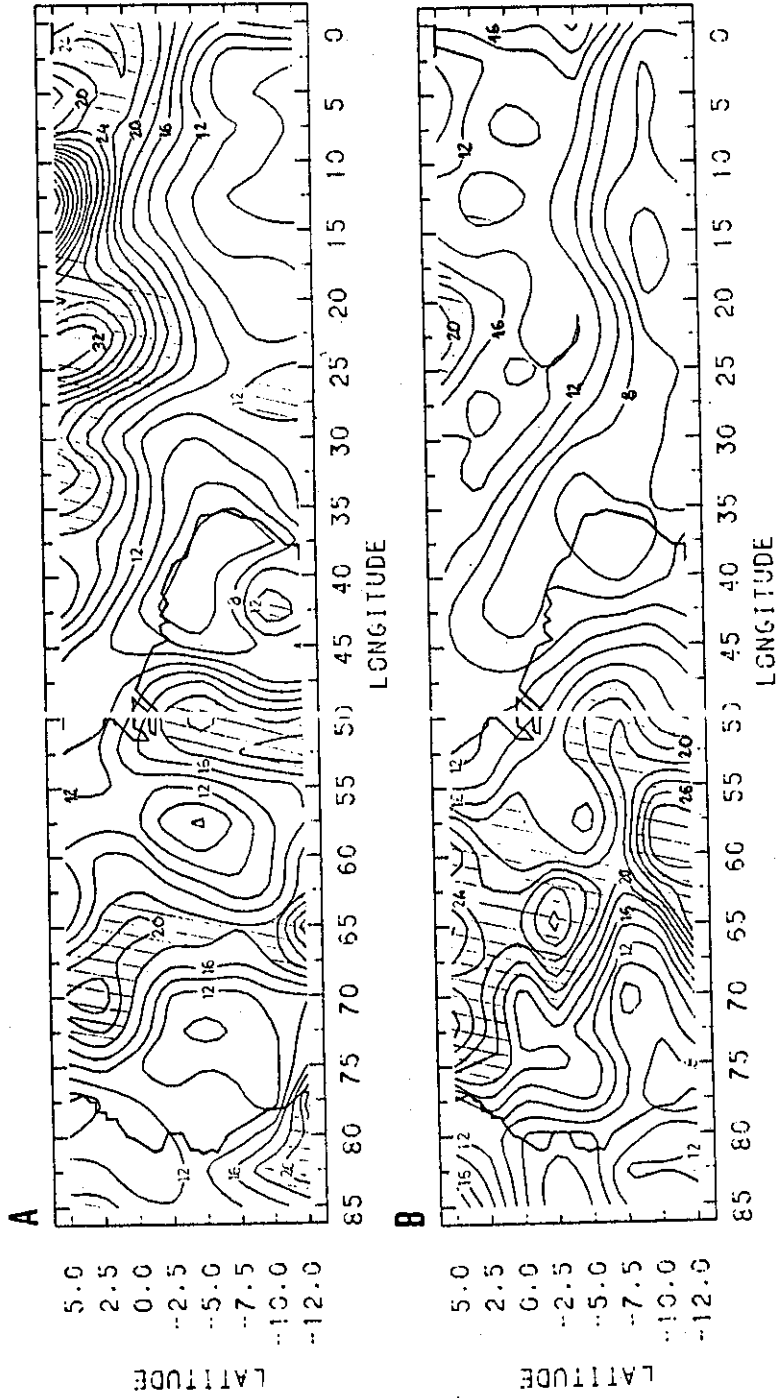


Fig. 3.10 - Distribuição horizontal das estimativas dos espectros de potência, integradas no intervalo de período entre 3 a 5 dias, para (A) a componente meridional e (B) a componente zonal do vento em 850 hPa, durante JJA. Intervalo dos contornos: 0,2m²/s².

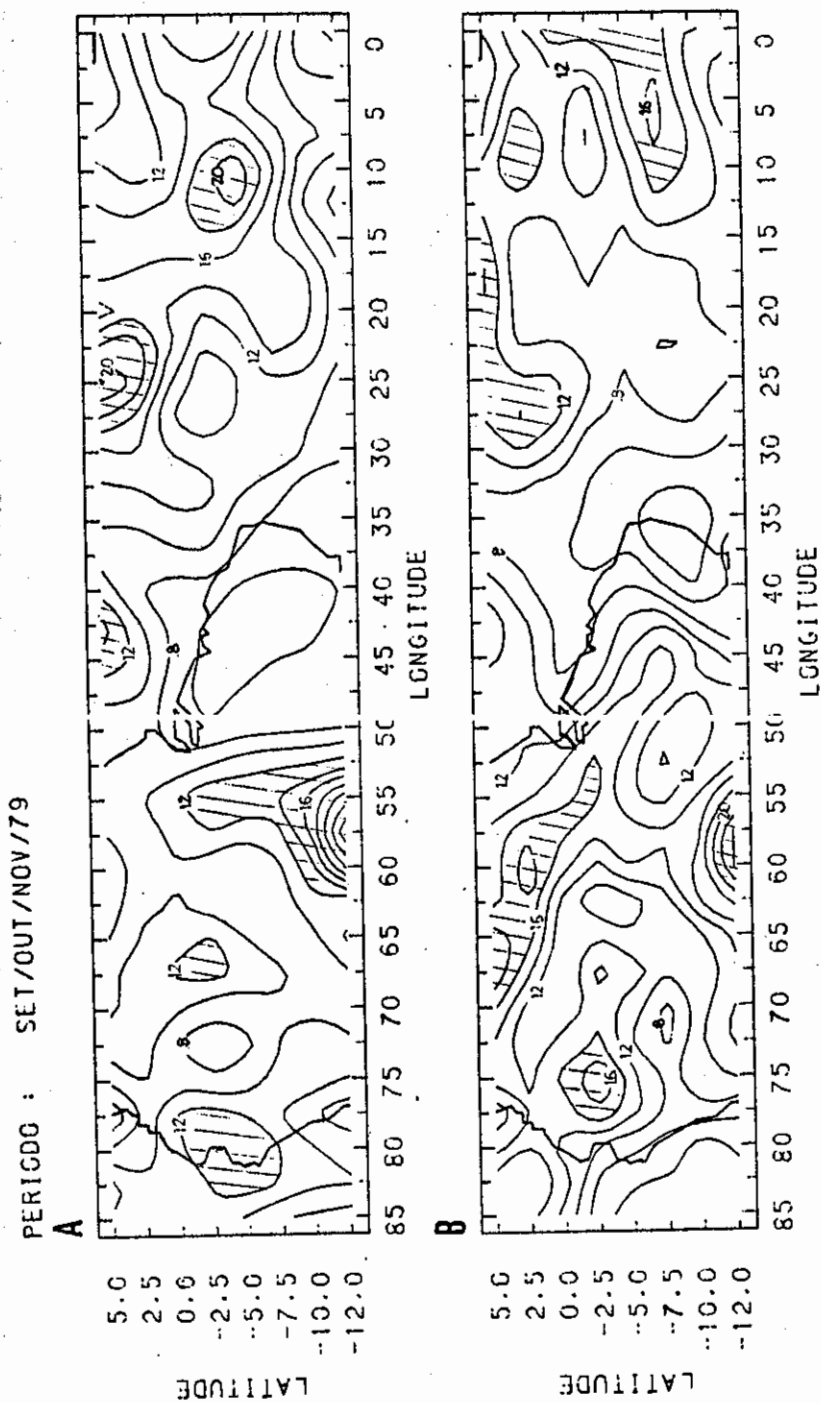


Fig. 3.11 - Distribuição horizontal das estimativas dos espectros de potência, integradas no intervalo de período entre 3 a 5 dias, para (A) a componente meridional e (B) a componente zonal do vento em 850 hPa, durante SON. Intervalo dos contornos: $0,2m^2/s^2$.

A região de máxima amplitude parece apresentar uma variação na posição em torno do equador de um trimestre para outro. Esta marcha anual da região de máxima amplitude pode fornecer indícios da forçante destas ondas, uma possibilidade seria aquecimento da superfície do mar por radiação solar.

Os campos dos espectros de potência da temperatura (figura 3.12) em 850 hPa, apresentam muitas características semelhantes nos diversos trimestres. As oscilações na temperatura sobre o oceano Atlântico possuem amplitudes muito pequenas, isto é devido à influência da temperatura da água do mar cujas variações são também muito pequenas e lentas. A amplitude dos distúrbios na temperatura cresce sobre o continente.

Comprimento de onda e velocidade de fase

Os trimestres MAM e JJA foram escolhidos para as análises das características ondulatórias básicas dos distúrbios por terem apresentado, tanto pela análise dos diagramas quanto pela análise espectral, distúrbios de sinais oscilatórios mais evidentes no período em torno de 5 dias. Para verificarmos a relação de efeito e causa entre os distúrbios observados em pontos diferentes, pode-se utilizar a coerência ao quadrado como uma medida desta relação.

A coerência é calculada através do espectro cruzado dada pela expressão (2.62). É necessário escolher um ponto de referência, por exemplo, um ponto onde ocorreu maior amplitude do distúrbio de período entre 3 a 5 dias. Neste caso, cruza-se a série da componente meridional do vento deste ponto com as séries do campo da mesma variável.

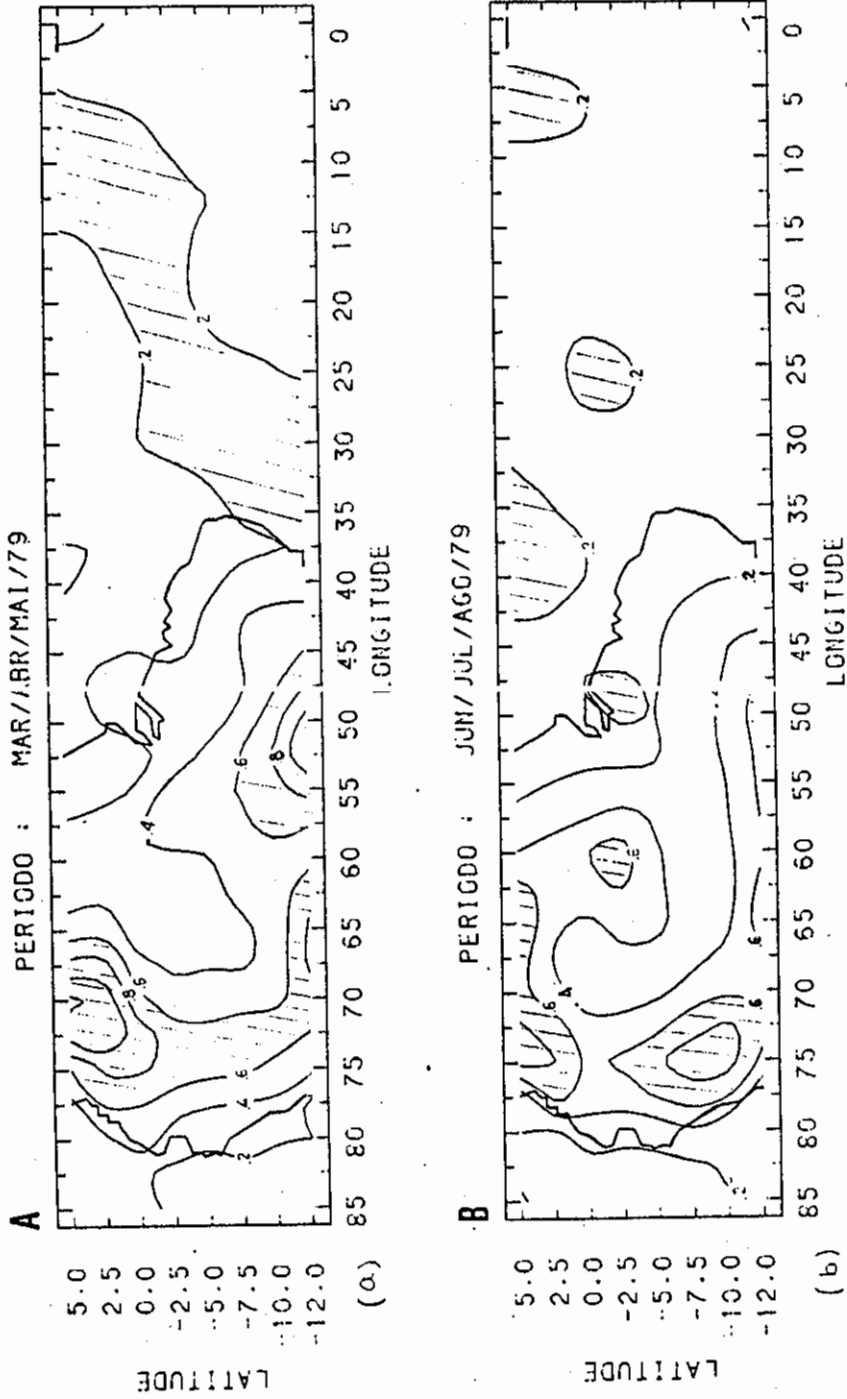


Fig. 3.12 - Distribuição horizontal das estimativas dos espectros de potência, integradas no intervalo de período entre 3 a 5 dias, da temperatura do ar em 850 hPa, durante (A) MAM e (B) SON. Intervalo dos contornos: 0,20C2.

O espectro cruzado médio foi obtido pelo mesmo procedimento de integração utilizado para se obter o espectro de potência médio de uma única série.

Aplicando o teste de significância ao espectro cruzado médio, supondo que foi obtido somente de uma série, os valores de coerência acima de 0,3 são considerados significativos, a um nível de probabilidade de 85%, e com o número de graus de liberdade igual a 20. O nível de confiança 0,3 foi obtida pela expressão (2.63).

A diferença de fase, dada pela expressão (2.57), indica o sentido da propagação do distúrbio. Pode-se também inferir o comprimento da onda a partir da diferença de fase. Se a diferença de fase entre o ponto de referência e um segundo ponto a leste é positiva, isto indica, por exemplo, que uma crista passa antes no ponto a leste e depois no ponto de referência, ou melhor, a fase da onda se propaga de leste para oeste.

Foram calculadas as médias das estimativas dos espectros de coerência e de diferença de fase, em relação ao período de 3 a 5 dias. Em seguida plotou-se num mapa valores de coerência média maiores que 0,3 e diferenças de fase médias entre 90 e -90. Embora, neste caso a coerência média aumenta o número de graus de liberdade, e conseqüentemente, a probabilidade de ocorrer valores de coerência acima de 0,3, preferiu-se, por razões de simplificação, superestimar os erros e manter o critério de nível de significância para uma única frequência, considerando uma única série. A frequência adotada se refere ao período central da banda em 4 dias.

MAM

Em MAM, tomou-se como referência o ponto eq., $25,0^{\circ}\text{W}$. Verifica-se nas figura 3.13.A que na região onde ocorrem valores significativos de coerência, as fases apresentam um padrão mais organizado. As coerências significativas se estendem aproximadamente entre 15°W e $32,5^{\circ}\text{W}$.

A $8,5$ a leste do ponto de referência as diferenças de fase chegam a 90 , e a $6,5$ a oeste deste ponto, as diferenças chegam a -90 . Isto indica que estas ondas se propagam de leste para oeste e que o comprimento de onda é estimado em 30 de longitude, ou em torno de 3300 km. Nota-se então, que a leste do ponto de referência o comprimento de onda é um pouco mais longo que a oeste. Este fato reforça a idéia de que as características das ondas estejam passando por mudanças à medida que elas se deslocam de leste para oeste.

A velocidade de fase destas ondas pode ser estimada pela relação: $c = L / T$, onde c é a velocidade de fase, L é o comprimento de onda e T o período da onda. Tomando-se o valor central do intervalo, o período de 4 dias, e o comprimento de onda de 3300 km, a velocidade de fase é estimada em, aproximadamente, $9,5\text{m/s}$.

Os parâmetros básicos da onda: comprimento, velocidade de fase e período da onda, que foram estimados espectralmente são menores que os valores obtidos dos diagramas longitude versus tempo.

JJA

A figura 3.13.B mostra o campo de coerência e a fase para o período JJA. O ponto de referência escolhido foi eq., $22,5^{\circ}\text{W}$. As coerências mais

significativas ocorrem, aproximadamente, entre 5°W e $32,5^{\circ}\text{W}$, ao sul do equador.

O sinal das diferenças de fase indica que as ondas deste trimestre se propagam de leste para oeste, semelhante a MAM. Nota-se que, ao contrário de MAM, as ondas a leste do ponto de referência são mais curtas que a oeste. As diferenças de fase chegam a -60 a cerca de 9 do ponto de referência, e chegam a 90 a 10 a leste do ponto. Isto equivale a um comprimento de onda em torno de 6000 km a oeste do ponto e em torno de 4400 km a leste do ponto, resultando num comprimento médio de 5200 km. Este fato sugere que as ondas de MAM e JJA sejam produzidas em condições distintas.

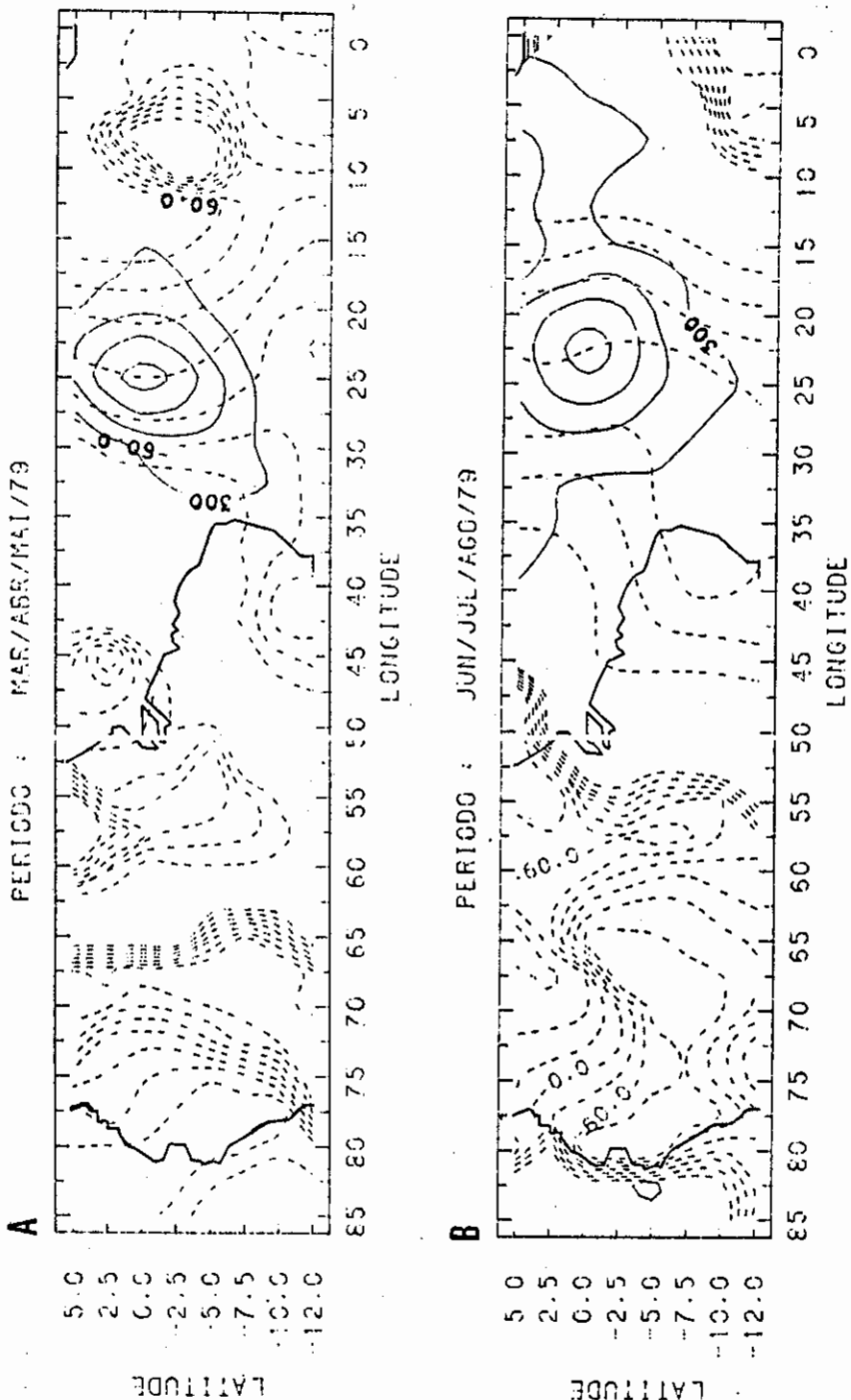


Fig. 3.13 - Distribuição horizontal de médias da coerência ao quadrado e diferenças de fase entre as séries de v do ponto de referência e o campo de v, em relação ao intervalo de período entre 3 a 5 dias, no nível de 850 hPa, durante (A) MAM, ponto de referência: eq.,250W; e (B) JJA, ponto de referência: eq.,22,50W. Intervalo dos contornos de coerência ao quadrado: 0,3. Intervalo dos contornos de diferença de fase: 30o.

Para um comprimento de onda de 5200 km, a velocidade de fase foi estimada em torno de 15 m/s. Este valor é maior que o calculado através dos diagramas. Por outro lado, o comprimento de onda calculado espectralmente, apresenta-se menor que o valor do diagrama.

Matsuno (1966) obteve uma relação de dispersão para ondas equatoriais, numa atmosfera barotrópica divergente. Esta relação na forma adimensional é dada por:

$$w^2 - k^2 + k/w = 2n + 1 \quad n = -1, 0, 1, 2, \dots \quad (3.2)$$

onde w e k são, respectivamente, a frequência angular e o número de onda adimensionais. Considerando a velocidade de fase da onda de gravidade pura, c_g ($\approx 280 \text{ ms}^{-1}$), e o parâmetro de Rossby, β ($\approx 2,29 \times 10^{-11} \text{ m}^{-1}\text{s}^{-1}$), a escala de comprimento horizontal é dada por $(c_g \beta)^{1/2}$, e a escala de tempo por $(c_g \beta)^{-1/2}$. É interessante verificar que ao se introduzir os números de onda característicos das ondas de MAM e JJA na solução da relação (3.2), para $n = 0$, isto é, para uma solução do tipo onda de Rossby-gravidade,

$$w = -k/2 + \{ (k/2)^2 + 1 \}, \text{ para } k \geq 1/2 \quad (3.3)$$

obteve-se velocidades de fase de 13,4 m/s para MAM, e 14,9 m/s para JJA. Estes valores concordam bem com aqueles obtidos espectralmente, tendo as ondas de JJA apresentado melhor ajuste.

É curioso notar que, apesar de os campos de coerência apresentarem simetria em torno do equador, em nenhum dos dois campos observa-se o decaimento acentuado em direção aos pólos como aqueles descritos por Nitta (1970) sobre o Pacífico. Ao contrário de Nitta, os distúrbios possuem um padrão aproximadamente circular. O valor aparentemente baixo da coerência sugere que estas ondas se

formam e desaparecem nas vizinhanças da região em estudo, e possuem comportamento não muito regular.

CAPÍTULO 4

CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Análises dos diagramas longitude versus tempo da componente meridional do vento, durante o FGGE, revelam a presença de distúrbios ondulatórios se propagando de leste para oeste sobre o Oceano Atlântico, próximo à costa da América do Sul. Nestas análises os distúrbios apresentam periodicidade de 5 a 6 dias.

Nos trimestres MAM e JJA, as ondas apresentaram amplitudes maiores e propagação de fases de forma mais organizada. Entretanto, nestes dois períodos os resultados apresentam características opostas. Em JJA as ondas são mais longas (em torno de 6200 km) e rápidas (velocidade de fase de 12 m/s), enquanto que em MAM as ondas são curtas (em torno de 4800 km) e lentas (velocidade de 11 m/s).

Os resultados obtidos pelos diagramas longitude versus tempo da componente meridional do vento apresentam, em geral, periodicidades maiores que os resultados da análise espectral. A análise pelos diagramas envolve mais erros, pois o critério de definição do distúrbio é subjetivo. O período da onda depende fortemente do número de eventos que ocorreram nos diagramas. O número de eventos variou pouco de um trimestre para outro, entre 14 a 17. A velocidade de fase, por sua vez, depende da inclinação das isolinhas de anomalias, entretanto nem sempre os distúrbios se propagavam linearmente com o tempo, acarretando em dificuldades para se estimar a velocidade de fase.

O filtro de 2 a 10 dias aplicado às séries das componentes meridional e zonal do vento e temperatura do ar dos diagramas Hovmoller, reteve somente 40% da variância destas séries. Sobre o Oceano Atlântico a razão de variância da componente meridional apresentou-se acima de 40%, indicando que os contornos desta variável nos diagramas não são compostos somente de ruídos. A componente zonal do vento apresentou razões de variância menor que a componente meridional, entretanto, as razões eram próximas e maiores que o valor esperado. As séries da temperatura do ar foram as mais ruidosas no intervalo de 2 a 10 dias, pois apresentaram razões de variância menores que 40%. Portanto, a componente zonal e a temperatura do ar, comparado à componente meridional, não são bons indicadores de distúrbios entre 2 a 10 dias.

Um certo cuidado deve ser tomado com os resultados de ROL, pois apesar de as séries filtradas para 5 a 10 dias terem apresentado razões de variância acima do valor esperado, este valor representa somente 10% da variância total. A baixa resolução dos dados também pode ter afetado os resultados. Portanto, o conjunto de dados de ROL não se apresentou apropriado para o estudo de distúrbios de leste de período de 5 a 6 dias. Contudo, a análise harmônica revelou a existência de distúrbios de 10 a 30 e de 30 a 60 dias ao longo do equador entre 0° e 85° W.

A análise dos distúrbios via diagramas longitude versus tempo é uma técnica de investigação preliminar quando há suspeitas de características ondulatórias nas anomalias. A análise espectral é uma técnica mais adequada quando as suspeitas são confirmadas e se deseja conhecer em mais detalhes o comportamento ondulatório dos distúrbios.

O espectro de potência da componente meridional do vento ao longo de 5°S , indicou mais claramente a existência de distúrbios com período entre 3 a 5 dias durante os trimestres MAM e JJA. Em DJF, estes distúrbios parecem ocorrer somente entre 0° e 10°W , sobre o oceano. O pico no espectro relativo ao ciclo diurno é marcante, principalmente na região entre o continente e o oceano, podendo estar associado ao efeito da brisa.

Análise do espectro cruzado resultou: em MAM, em ondas de comprimentos de 3300 km se propagando com velocidade aproximada de 9,5 m/s; e em JJA, em ondas de 5200 km se propagando com velocidade de 15m/s.

As características ondulatórias dos distúrbios, obtidas através de ambas análises, via diagrama longitude versus tempo e via espectros de potência, resultaram em ondas curtas se propagando mais lentamente e ondas longas mais rapidamente. Estes resultados se devem ao uso da relação linear de fase: $c = L/T$, aplicada a uma onda não dispersiva.

Os parâmetros básicos das ondas de MAM, e principalmente de JJA, se ajustam bem à solução de ondas equatoriais do tipo Rossby-gravidade, obtida por Matsuno (1966).

A distribuição horizontal dos espectros de potência para o intervalo de 3 a 5 dias mostrou que as ondas atingem amplitudes máximas em torno de 20°W e 25°W , indicando uma região de desenvolvimento máximo destas ondas. A posição de maior amplitude dos distúrbios passou por uma nítida variação sazonal, começando em DJF ao sul do equador, em MAM, exatamente sobre o equador, em JJA, bem ao norte do equador, e em SON começou a voltar para o Hemisfério Sul com amplitudes bem menores. Esta variação sazonal na posição de máxima amplitude sugere haver alguma

relação com o mecanismo de formação e manutenção destas ondas.

No litoral norte do Nordeste do Brasil encontrou-se uma região de amplitudes mínimas dos distúrbios de 3 a 5 dias. Isto pode indicar que nesta região as ondas estão se desintensificando, ou que as suas características ondulatórias estão se alterando durante seu trajeto.

A estrutura, bem como os mecanismos dinâmicos (de formação e manutenção) associados a estas ondas não estão claros. A extensão deste tipo de análises para outros níveis de altitude pode fornecer informações sobre a estrutura vertical destas ondas. Correlações entre as componentes zonal e meridional do vento e temperatura do ar pode ajudar a compreender a origem e energética destas ondas. Estudos de carácter observacional são necessários para verificar o tipo de tempo que acompanha estas ondas. Os resultados obtidos neste trabalho se referem ao ano de 1979. Utilizando dados de outros anos e verificando a persistência destes distúrbios, pode-se realizar uma climatologia.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ATKINSON, G.D. Forecaster's guide to tropical meteorology. United States Air Force. Air Weather Service, 1971. (Technical Report 240).
- BARRETT, E.C. Climatology from satellites. Methuen & Co, 1974.
- BLACKMAN, R.B.; TUKEY, J.N. The measurement of power spectra from the point of view of communications engineering. New York, Dover Publications Inc., 1958.
- BRIGHAM, E.O. The fast Fourier transform. New Jersey, Prentice Hall Inc., 1974.
- BUTKOV, E. Física Matemática. Rio de Janeiro, Editora Guanabara Dois S.A.. 1978.
- CAVALCANTI, I.F.A. Um estudo sobre interações entre sistemas de circulação de escala sinótica e circulações locais. São José dos Campos, INPE, 1982. (INPE-2494-TDL/097).
- CHANG, C.P. Westward propagating cloud patterns in the tropical Pacific as seen from time-composite satellite photographs. Journal of Atmospheric Science, 133-138, 1970.
- COOLEY, J.W.; TUKEY, J.W. An algorithm for the machine calculation of complex Fourier series. Mathematics of Computation, 19(90): 1965.
- ESSENWANGER, O.M. Elements of Statistical Analysis. In: General Climatology: World Survey of Climatology. Elsevier, 1976. V.12, pt. 1B.

- GEÇKINLI, N. C.; YAVUZ, D. Discrete Fourier transformation and its applications to power spectra estimation. In: Studies in electrical electronic engineering. Amsterdam, Holanda, Elsevier Scientific Publishing Company, 1983. v. 8.
- HOEFLICH, O. Climate of South Atlantic Ocean. In: Climates of the Oceans: World Survey of Climatology. Elsevier, 1984. v. 15.
- KAYANO, M.T. Um estudo climatológico e sinótico utilizando dados de radiossondagem (1968-1976) de Manaus e Belém. São José dos Campos. INPE, 1979. 111p. (INPE-1559-TDL/013).
- LIEBMANN, B.; HENDON, H. Synoptic-scale disturbances near the Equator. Journal of the Atmospheric sciences, 47(12):1463-1479, jun, 1990
- LOBO, P.R.V. Um estudo climatológico da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) e sua influência sobre o Nordeste do Brasil. São José dos Campos, 1982. 93 p. (INPE-2534-TDL/101).
- LORENZZETTI, J.A. Aplicação da técnica de análise espectral cruzada ao estudo da correlação entre as oscilações do nível do mar observadas em Cananéia e Bom Abrigo. (Dissertação de mestrado) - Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1976. 118p.
- MATSUNO, T. Quasi-geostrophic motions in the equatorial area. Journal of the Meteorological Society of Japan, 44(1):25-42, Fev. 1966.
- MENDES DE CARVALHO, M.J.S. Simulação da agitação irregular: Técnicas matemáticas. (Tese apresentada a concurso de Especialista do) - Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, 1973.

- MERRITT, E.S. Easterly waves and perturbations: a reappraisal. Journal of Applied Meteorology, 3:367-382, 1964.
- WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION (WMO). Climatic Change: report of working group of the comission for climatology. Geneva, WMO, 1966. 79p. (WMO Technical Note N.79/WMO-NO.195.TP.100)
- MUENCH, H.S. On the dynamics of the wintertime stratosphere circulation. Journal of Applied Meteorology, 22:349-360, 1965.
- NEIVA, E.J.F. An investigation of wave-type disturbances over the Tropical South-Atlantic. (Tese de mestrado) - Naval Post Graduate School, Monterey, California, USA. 1975.
- NITTA, T. Statistical study of tropospheric wave disturbances in the Tropical Pacific region. Journal of the Meteorological Society of Japan, 48(1):47-60, 1970.
- NITTA, T. A Global analysis of the lower tropospheric disturbances in the tropics during the northern summer of the FGGE year. Part I: Global features of the disturbances. Journal of the Meteorological Society of Japan, 63(1):1-19, Fev. 1985.
- NITTA, T.; TAKAYABU, Y. Global analysis of the lower tropospheric disturbances in the tropics during the northern summer of the FGGE year. Part II: Regional characteristics of the disturbances. Pageoph, 123:272-292, 1985.
- NORQUIST, D.; RECKER, E.E.; REED, R.J. The energetics of African Wave disturbances as observed during phase III of GATE. Monthly Weather Review, 105:334-342, 1977.

- PALMER, C.E. Tropical meteorology. Quarterly Journal of Royal Meteorological Society, 78:126-163, 1952.
- PANOFSKY, H.A.; BRIER, G.W. Some applications of Statistics to meteorology. Penn, Univ. Park. Penn., Penn State Univ. 1968. 224p.
- RAMOS, R.P.L. Precipitation characteristics in the Northeast Brazil dry region. Journal of Geophysical Research, 80(12):1665-1678, abr. 1975.
- REED, R.J.; KLINKER, E.; HOLLINGSWORTH, A. The structure and characteristics of African easterly wave disturbances as determined from the ECMWF Operational Analysis/Forecast System. Meteorol. Atmos. Phys., 38:22-33, 1988.
- RIEHL, H. Waves in the easterlies and the polar front in the tropics. Chicago, Univ. of Chicago, Dept. of Meteorology, 1945. 79 p. (misc. rept. 17).
- RIEHL, H. Climate and weather in the tropics. Academic Press, 1979. 611p.
- ROSENTHAL, S. L. Some estimates of power spectra of large scale disturbances in low latitudes. Journal of Meteorology, 17:259-263, Jun. 1960.
- SCHWARTZ, M. Signal processing: discrete spectral, analysis detection and estimation. New York, McGraw-Hill Inc., 1975.
- SIKDAR, D.N.; ELSNER, J.B. Intra-seasonal variability of rainfall and atmospheric energetics over northeast Brazil during the rainy season of 1979. Tellus, 39A:49-60, 1987.
- SIMPSON, R.H.; FRANK, N.; SHIDELER, D.; JOHNSON, H.M. The Atlantic Hurricane Season of 1967. Monthly Weather Review, 96:251-259, 1968.

TAI, K.S.; OGURA, Y. An observational study of easterly waves over the Eastern Pacific in the northern summer using FGGE data. Journal of Atmospheric Science, 44(2):339-361, Jan. 1987.

WALLACE, J.M.; CHANG, C.P. Spectrum analysis of large scale wave disturbances in the tropical lower troposphere. Journal of Atmospheric Science, 26:1010-1025, Sep. 1969.

YAMAZAKI, Y. Estudos teóricos e sinóticos dos distúrbios tropicais. São José dos Campos, INPE, 1975. (INPE-624-LAFE).

YAMAZAKI, Y.; RAO, V.B. Tropical cloudiness over South Atlantic Ocean. Journal of the Meteorological Society of Japan, 55(2):205-207, 1977.

YANAI, M. et al. Power spectra of large scale disturbances over the Tropical Pacific. Journal of the Meteorological Society of Japan, 46(4):308-323, 1968.

APÊNDICE A

TRANSFORMADA RÁPIDA DE FOURIER (FFT - Fast Fourier Transform)

A transformada rápida de Fourier é um algoritmo desenvolvido para calcular eficientemente a transformada de Fourier discreta e a transformada inversa de Fourier discreta.

Considere a transformada de Fourier discreta (Brigham, 1974):

$$X(n) = \sum_{k=0}^{N-1} x_0(k) \exp(-i2\pi nk/N), \quad n=0,1,\dots,N-1 \quad (\text{A.1})$$

Fazendo $N = 4$ e $W = \exp(-i2\pi/N)$, a expressão acima pode ser descrita por um sistema de equações, ou em forma matricial:

$$\begin{bmatrix} X(0) \\ X(1) \\ X(2) \\ X(3) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} W & W & W & W \\ W & W & W & W \\ W & W & W & W \\ W & W & W & W \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_0(0) \\ x_0(1) \\ x_0(2) \\ x_0(3) \end{bmatrix} \quad (\text{A.2})$$

ou de forma mais compacta,

$$X(n) = W^{nk} x_0(k) \quad (\text{A.3})$$

Como W e, possivelmente, $x_0(k)$ são complexos, verifica-se que a expressão A.2 possui N^2 multiplicações e $N(N-1)$ adições com números complexos. A eficiência do algoritmo FFT está em reduzir o número de multiplicações e adições ao calcular funções trigonométricas repetidas em uma única vez. Por exemplo, a

A.2

função $\cos[4(2\pi/9)]$ ocorre quando $n=1, k=4$; $n=2, k=2$; $n=4$ e $k=1$.

Um algoritmo FFT mais conhecido requer que o tamanho da amostra seja $N = 2^m$. Adotando-se $m=2$, pode-se aplicar este FFT na A.2.

Considere as seguintes propriedades de W :

- (1) $W = W$, onde $nk \bmod N = \text{resto da divisão } nk/N$
- (2) $W = -W$
- (3) $W = 1$

Aplicando as propriedades (1) e (3), reescreve-se A.2:

$$\begin{bmatrix} X(0) \\ X(1) \\ X(2) \\ X(3) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & W^1 & W^2 & W^3 \\ 1 & W^2 & W^0 & W^2 \\ 1 & W^3 & W^2 & W^1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_0(0) \\ x_0(1) \\ x_0(2) \\ x_0(3) \end{bmatrix} \quad (\text{A.4})$$

Escreve-se n em número binário e inverte-se a ordem dos dígitos binários. Os números formados da inversão dos dígitos binários são colocados em ordem crescente no vetor, portanto:

$$\mathbf{X}(n) = [X(0), X(1), X(2), X(3)]$$

fica $\mathbf{X}(n)' = [X(0), X(2), X(1), X(3)]$.

O segundo passo consiste em fatorar a matriz quadrada em m matrizes $N \times N$, na forma $\mathbf{X}_m = \mathbf{W}_m \dots \mathbf{W}_2 \mathbf{W}_1$

A.3

x_0 , então:

$$\begin{bmatrix} X(0) \\ X(2) \\ X(1) \\ X(3) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & W^0 & 0 & 0 & 1 & 0 & W^0 & 0 \\ 1 & W^2 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & W^0 \\ 0 & 0 & 1 & W^1 & 1 & 0 & W^2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & W^3 & 0 & 1 & 0 & W^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_0(0) \\ x_0(1) \\ x_0(2) \\ x_0(3) \end{bmatrix} \quad (\text{A.5})$$

O produto das duas matrizes à direita de A.5 resulta num vetor coluna $x_1(k)$ da forma:

$$\begin{bmatrix} x_1(0) \\ x_1(1) \\ x_1(2) \\ x_1(3) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & W^0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & W^0 \\ 1 & 0 & W^2 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & W^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_0(0) \\ x_0(1) \\ x_0(2) \\ x_0(3) \end{bmatrix} \quad (\text{A.6})$$

Os elementos $x_1(0)$ e $x_1(1)$ são determinados por uma multiplicação e uma adição

$$x_1(0) = x_0(0) + W^0 x_0(2)$$

Os elementos $x_{dp1}(2)$ e $x_1(3)$ podem ser determinados utilizando a propriedade (2), tem-se que:

$$\begin{aligned} x_1(2) &= x_0(0) + W^2 x_0(2) \\ &= x_0(0) - W^0 x_0(2) \end{aligned}$$

Necessita-se somente de uma adição e nenhuma multiplicação, pois $W^0 x_0(2)$ foi calculado anteriormente.

Portanto, o vetor coluna $x_1(k)$ é obtido de duas multiplicações e quatro adições.

A.4

Continuando o cálculo de A.5, tem-se que:

$$\begin{bmatrix} X(0) \\ X(2) \\ X(1) \\ X(3) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_2(0) \\ x_2(1) \\ x_2(2) \\ x_2(3) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & w^0 & 0 & 0 \\ 1 & w^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & w^1 \\ 0 & 0 & 1 & w^3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(0) \\ x_1(1) \\ x_1(2) \\ x_1(3) \end{bmatrix} \tag{A.7}$$

Igualmente, $x_2(0)$ é determinado por uma multiplicação e uma adição

$$x_2(0) = x_1(0) + w^0 x_1(1)$$

O elemento $x_2(1)$ é calculado por uma adição, pois $w^0 = -w^2$, $x_2(2)$ é determinado por uma multiplicação e uma adição, e $x_2(3)$, por uma única adição pelas mesmas razões.

$X(n)$ requer o total de quatro multiplicações e oito adições pela expressão A.5, enquanto que o cálculo de $X(n)$ pela expressão A.2 requer dezesseis multiplicações e doze adições. A eficiência do algoritmo pode ser constatada pela redução do número de multiplicações que controla fortemente o tempo de computação.

Para facilitar a visualização da fatoração das matrizes constrói-se um gráfico composto de linhas cheias e tracejadas e nodos. Os nodos são dispostos em N linhas numeradas de 0 a $N-1$, e em $m+1$ colunas, numeradas de 0 a m . Os elementos $x_1(0)$ e $x_1(2)$, por exemplo, são calculados, simultaneamente, somente pelos nodos $x_0(0)$ e $x_0(2)$, como está esquematizado na figura A.1. Os elementos $x_1(0)$ e $x_1(2)$ são chamados pares de nodos e seus resultados são guardados no espaço de memória ocupado anteriormente

A.5

por $x_0(0)$ e $x_0(2)$, portanto, este algoritmo não necessita de memória adicional.

O valor de w^p , no nodo da linha k e coluna c , é obtido da seguinte maneira: escreve-se k em numeração binária com m bits, desloca-se o número binário de $(m-c)$ bits para direita e preenche-se com zeros os bits restantes a esquerda. Finalmente, inverte-se a ordem dos bits. O número resultante dos bits invertidos é o valor de p .

Cada par de nodo é calculado pelo par de equações:

$$\begin{aligned}x_c(k) &= x_{c-1}(k) + w^p x_{c-1}(k+N/2^c) \\x_c(k+N/2^c) &= x_{c-1}(k) - w^p x_{c-1}(k+N/2^c)\end{aligned}\quad (\text{A.8})$$

A expressão acima é iterada até chegarmos a $c=m$. O último passo consiste em reordenar os resultados.

Este algoritmo pode ser usado no cálculo da transformada inversa substituindo os w^p 's pelos complexos conjugados e multiplicando o resultado por $1/N$.

O algoritmo FFT descrito acima foi desenvolvido por Cooley e Tukey (1965).

A.6

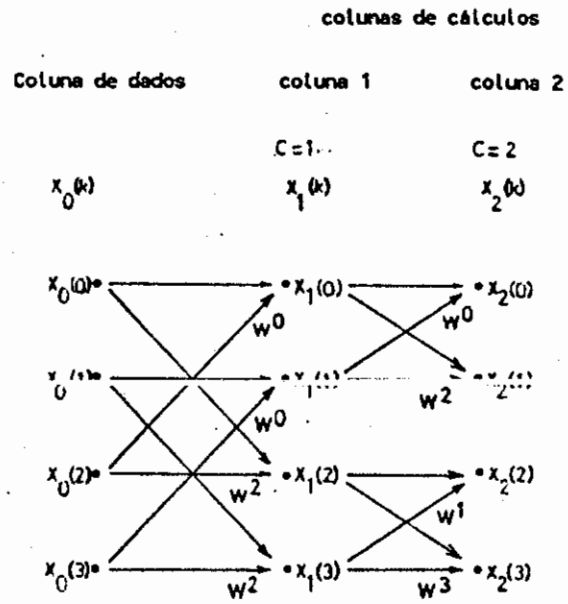


Fig. A.1 - Gráfico para o algoritmo FFT, N=4. Adaptado de Brigham (1974).