

MODULAÇÃO DO CICLO ANUAL DE VARIÁVEIS DE SUPERFÍCIE EM SÃO LUÍS (MARANHÃO) POR OSCILAÇÕES DE BAIXA FREQUÊNCIA

ROBERTO LAGE GUEDES^{1,*}, MARCOS DAISUKE OYAMA¹, RITA VALÉRIA ANDREOLI²,
MARY TOSHIE KAYANO² e MARIA APARECIDA SENAUBAR ALVES¹

¹Centro Técnico Aeroespacial, Instituto de Aeronáutica e Espaço, Divisão de Ciências Atmosféricas,
Praça Mal. do Ar Eduardo Gomes, 50, 12228-904, São José dos Campos, SP.

²Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos,
Av. dos Astronautas, 1.758, 12227-010, São José dos Campos, SP.

*Correspondência. Tel.: (12) 3947-4589, Fax: (12) 3947-4551

*E-mail: roblg@iae.cta.br.

Recebido Junho 2005 - Aceito Fevereiro 2006

RESUMO

Analisou-se a modulação do ciclo anual de variáveis de superfície – precipitação (*PRP*), pressão ao nível médio do mar (*PNM*), temperatura do ar (*T*), temperatura do ponto de orvalho (*Td*), e componentes zonal (*U*) e meridional (*V*) do vento – para São Luís (Maranhão, Brasil; 02°35'S, 44°14'W, 54 m), no período de 1951 a 1991, por meio da transformada de ondeleta. A potência do ciclo anual foi associada à banda de 0,7 a 1,2 anos. Houve modulação do ciclo anual por frequências mais baixas para todas as variáveis. Para *PRP*, *T* e *U*, o período estudado foi dividido em dois: anterior (posterior) a 1960, com ciclo anual mais fraco (forte). Durante período posterior a 1960, houve modulação decadal para *T*, e interanual e decadal para *PRP* e *U*. A modulação interanual estaria associada à variabilidade interanual do índice Nino3.4; a decadal, à modulação na mesma escala da potência média entre 2 e 8 anos do Nino3.4 (DNino). Para a *PNM*, houve modulação predominantemente interanual durante o período estudado, e essa modulação estaria associada à variabilidade interanual do Nino3.4. Para *Td* e *V*, houve modulação decadal durante o período estudado, e a modulação de *Td* (*V*) esteve em fase (fora de fase) com a modulação decadal de DNino.

Palavras-chave: modulação, transformada de ondeleta, ciclo anual, São Luís.

ABSTRACT: MODULATION OF THE ANNUAL CYCLE OF SURFACE VARIABLES BY LOW FREQUENCY OSCILLATIONS FOR SÃO LUÍS (MARANHÃO, BRAZIL)

The modulation of the annual cycle of surface variables – precipitation (*PRP*), sea level pressure (*SLP*), air temperature (*T*), dew point temperature (*Td*), and zonal (*U*) and meridional (*V*) wind – for São Luís (Maranhão, Brazil; 02° 35'S, 44° 14'W, 54 m), from 1951 to 1991, was analysed by using the wavelet transform. The annual cycle wavelet power was evaluated over the 0.7-1.2 yr band. Low-frequency modulation of the annual cycle was found for all variables. For *PRP*, *T* and *U*, the studied period was divided into two: before (after) 1960, when the annual cycle was weaker (stronger). After 1960, decadal modulation was found for *T*; and decadal and interannual modulation, for *PRP* and *U*. The interannual modulation might be related to the Nino3.4 index interannual variability; the decadal, to the modulation on the same timescale of the Nino3.4 index wavelet power averaged over the 2-8 yr band (DNino). For *SLP*, marked interannual modulation was found during the studied period, and it might be related to the Nino3.4 index interannual variability. For *Td* and *V*, decadal modulation was found during the studied period, and the modulation of *Td* (*V*) was in phase (out of phase) with the decadal modulation of DNino.

Keywords: modulation, wavelet transform, annual cycle, São Luís.

1. INTRODUÇÃO

A estação de São Luís localizada a $02^{\circ}35'S$, $44^{\circ}14'W$ e a 54 m de altitude na costa norte da América do Sul, no estado do Maranhão (Brasil), está sob a influência de vários fenômenos atmosféricos. Dentre estes fenômenos podem ser citados: os vórtices ciclônicos da alta troposfera (Gan e Kousky, 1986; Kayano et al., 1997; Ramirez et al., 1999; Silva e Satyamurty, 2004), os distúrbios ondulatórios de leste (Liebmann e Hendon, 1990; Ramos et al., 2004), a brisa e as linhas de instabilidade (Cohen et al., 1995), a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) (Molion e Bernardo, 2002; Coelho et al., 2004). Esses fenômenos são responsáveis pela variabilidade do clima em várias escalas temporais (interdiurna, intra-sazonal, interanual, decadal, etc.) observadas nas variáveis meteorológicas desta estação. O conhecimento tanto dos fenômenos quanto das variabilidades a eles associadas é muito importante para que as operações de lançamento de foguetes, realizadas no Centro de Lançamento de Alcântara (CLA, distante cerca de 20 km de São Luís), possam ser planejadas e executadas com precisão e segurança.

Nas séries mensais de variáveis, normalmente, uma parte substancial da variância encontra-se no ciclo anual. Um procedimento comum consiste em remover a variância associada a este ciclo, de forma a permitir que outras flutuações presentes na série temporal tornem-se mais claras e estatisticamente significativas. Um aspecto importante que se perde na remoção do ciclo anual é a modulação de sua potência por frequências mais baixas. Por exemplo, um sinal periódico com uma certa frequência (f_0) pode ter a sua potência variando em uma frequência mais baixa ($f_1 < f_0$); diz-se que a frequência f_1 modula o sinal (em f_0) (Figura 1). Para sinais geofísicos, o conceito de modulação tem sido aplicado em diversos estudos (p.ex., Andreoli et al., 2004). A análise de séries temporais de temperatura da superfície do mar (TSM) do Pacífico Equatorial tem mostrado que a potência do ciclo anual (POTCA) de TSM possui modulação interanual (Gu e Philander, 1995; Kim e Chung, 2001), decadal (Setoh et al., 1999) e interdecadal (Xue et al., 2003). A modulação interanual da POTCA parece estar associada à própria variabilidade interanual de TSM, i.e., aos eventos de El-Niño e La-Niña (Gu e Philander, 1995).

Para o clima do Nordeste brasileiro (NEB), há um grande número de trabalhos sobre a variabilidade interanual de precipitação (Hastenrath e Kaczmarczyk, 1981; Datsenko et al., 1995; Kane e Trivedi, 1988; Andreoli et al., 2004). No entanto, a modulação da POTCA da precipitação no NEB por variabilidade de mais baixa frequência ainda não foi caracterizada observacionalmente. Considerando que o ciclo anual de TSM é o fator que mais contribui para a POTCA de precipitação (Biasutti et al., 2003), pode-se conjecturar que

a POTCA de precipitação deve apresentar (da mesma forma que a TSM) modulações por oscilações de frequências mais baixas.

O objetivo deste trabalho é caracterizar a modulação de baixa frequência da POTCA de variáveis de superfície em São Luís. As variáveis a serem usadas são: precipitação, vento (zonal e meridional), temperatura do ar, temperatura do ponto de orvalho e pressão ao nível do mar e estão descritas na seção 2. Para caracterizar a modulação da POTCA, utiliza-se a transformada de ondeleta (TO). A TO é uma ferramenta estatística que permite decompor o sinal em tempo e escala, e vem sendo muito utilizada atualmente para estudar sinais geofísicos (p.ex., Gu e Philander, 1995; Datsenko et al., 1995; Torrence e Compo, 1998; Setoh et al., 1999; Andreoli et al., 2004; Guedes et al., 2005). A metodologia está descrita na seção 3. Os resultados: climatologia das variáveis de superfície, análise da TO aplicada às séries temporais e modulações da POTCA encontram-se na seção 4, e as conclusões estão na seção 5.

2. DADOS

Os dados utilizados neste trabalho são séries mensais de precipitação acumulada (PRP) e médias mensais de pressão ao nível médio do mar (PNM), temperatura do ar (T), temperatura do ponto de orvalho (Td) e componentes zonal (U) e meridional (V) do vento de São Luís do período de janeiro de 1951 a outubro de 1991.

As observações meteorológicas de superfície passaram por uma análise de consistência, considerando-se a faixa de aceitabilidade de cada parâmetro e o inter-relacionamento dos diferentes parâmetros analisados com respeito à situação meteorológica presente no momento da observação. Estes critérios de consistência foram propostos por Filippov (1968) e adaptados às condições dos dados de aeródromos do Brasil por Smidt (1975). As séries mensais foram disponibilizadas pela Divisão de Ciências Atmosféricas, Instituto de Aeronáutica e Espaço, Centro Técnico Aeroespacial.

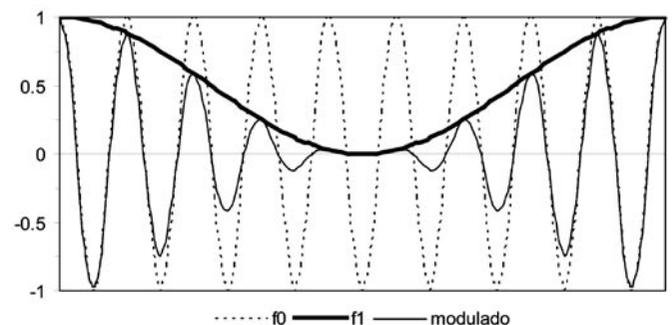


Figura 1 – Sinal periódico para uma frequência (f_0) modulado por uma frequência mais baixa ($f_1 < f_0$).

3. METODOLOGIA

Para cada variável, a série temporal é pré-processada em 3 etapas. 1) calculam-se a média (μ) e o desvio padrão (σ) considerando todos os dados que compõem a série temporal (490 valores mensais); 2) adimensionalizam-se os valores mensais da série temporal pela média e pelo desvio padrão utilizando $x' = (x - \mu)/\sigma$, onde x' (x) é o dado adimensionalizado (valor mensal); 3) retira-se a tendência linear da série temporal adimensional.

Faz-se a decomposição das séries adimensionais por meio da TO [Eq. 2 de Torrence e Compo, 1998 (TC98), p. 64]. A ondeleta de Morlet, escolhida como ondeleta-mãe, é uma função periódica (no tempo) cuja amplitude é modulada por uma gaussiana (no tempo) (Eq. 1 de TC98, p.63). Essa ondeleta é adequada para descrever oscilações suaves como as encontradas nos dados geofísicos utilizados neste trabalho, e seu uso está discutido em diversos estudos (p.ex., Foufoula-Georgiou e Kumar, 1994; Lau e Weng, 1995; Torrence e Compo, 1998; Chapa et al., 1998).

A TO pode ser utilizada como um filtro passa banda que possui uma função resposta conhecida (a função de ondeleta). Desta forma, é possível reconstruir a série original fazendo a deconvolução ou o filtro inverso. Usando esse processo, o sinal referente ao ciclo anual é obtido reconstruindo as séries temporais numa banda que caracteriza o ciclo anual (Eq. 29 de TC98, p.74, onde j_1 e j_2 se referem aos limites da banda que caracteriza o ciclo anual). Essa banda é obtida por meio do espectro de potência global das variáveis de superfície de São Luís. O espectro de potência global (Eq. 22 de TC98, p.72) é a média da potência de ondeleta no tempo e é similar ao espectro de potência de Fourier.

Posteriormente é feita a reconstrução das séries na banda do ciclo anual com a finalidade de se investigar a modulação da potência de forma mais detalhada. Também é feita a reconstrução das séries na escala interanual; para tal, utilizam-se como limites os mínimos do espectro de potência global entre 2 e 8 anos.

Para caracterizar a modulação da POTCA por oscilações de mais baixa frequência, utiliza-se a série temporal da média em escala da potência da ondeleta (MEPO) (Torrence e Compo, 1998). Em um dado instante, a MEPO consiste na média da potência de ondeleta entre duas escalas (Eq. 24 de TC98, p.73); no presente trabalho, esse intervalo de escalas corresponde à banda que caracteriza o ciclo anual.

4. RESULTADOS

4.1. Climatologia

As características climatológicas em São Luís foram obtidas para subsidiar a discussão dos resultados utilizando TO. As climatologias confirmam resultados anteriores (Rao e

Hada, 1990; Fisch, 1997; Guedes e Machado, 1997; Coutinho, 1999; Pereira et al., 2002).

- A *PRP* mostra o máximo entre os meses de março e abril (estação chuvosa) e os menores valores em setembro e outubro quando ocorre o período mais seco do ano (Figura 2). Além disso, os meses de maior (menor) *PRP* coincidem com os que têm maior (menor) desvio padrão em relação à média.
- A *T* e a *Td* apresentam pouca variação anual (menor que 2°C). Em geral, os meses com menor (maior) *T* coincidem com os de maior (menor) *PRP* e *Td*. Os valores de desvio padrão de *T* e *Td* mantêm-se quase constantes ao longo de todo o ano (em torno de 1°C).
- Praticamente durante todo o ano, *U* é de leste (negativo), com maiores (menores) magnitudes e desvios padrão durante o período seco (chuvoso). *V* é predominantemente de norte ao longo do ano e os poucos casos de ventos de sul ocorrem principalmente em junho. *V* tem mínima magnitude em junho, no fim da estação chuvosa, e máxima magnitude em outubro (período seco). Similarmente a *U*, o desvio padrão da *V* tem seu máximo (mínimo) na estação seca (chuvosa).
- É aparente uma defasagem da relação entre *PRP* máxima (mínima) e *PNM* mínima (máxima). De fato, a *PNM* apresenta um máximo em julho e o mínimo em novembro e dezembro. Em consequência, a correlação linear entre *PRP* e *PNM* climatológicas tem máximo valor absoluto e é de -0,64 (significativo ao nível de confiança de 95%) quando a série de *PNM* antecede a de *PRP* de 3 a 4 meses (Figs 2a e 2b).

4.2. Aplicação da transformada de ondeleta e escolha da banda

A TO é aplicada a todas variáveis de superfície apresentada na seção 2. A Figura 3 mostra o espectro global TO de *Td* em números de desvios padrões ao quadrado (NDP^2). Como esperado, o ciclo anual contém a maior parte da variância, embora outras variabilidades (p.ex., a interanual) estejam também presentes, mas não apresentam significância estatística (para torná-las significativas, é necessário remover o ciclo anual). A potência associada ao ciclo anual é restrita à banda de 0,7 a 1,2 anos, que é a mesma proposta por Gu e Philander (1995). O espectro global das demais variáveis também apresenta maior variância entre 0,7 e 1,2 anos (não mostrado). Por isso, esta banda (de 0,7 a 1,2 anos) é escolhida para caracterizar o ciclo anual.

A Figura 4 mostra as correlações entre a série de *PRP* reconstruída na banda de 0,7 a 1,2 anos e as séries das demais variáveis reconstruídas nessa mesma banda para defasagens de 0 a 12 meses. As séries das variáveis atmosféricas antecedem a série de *PRP*. As máximas correlações absolutas são significativas ao nível de confiança de 95%. O ciclo anual da *PRP*, *Td*,

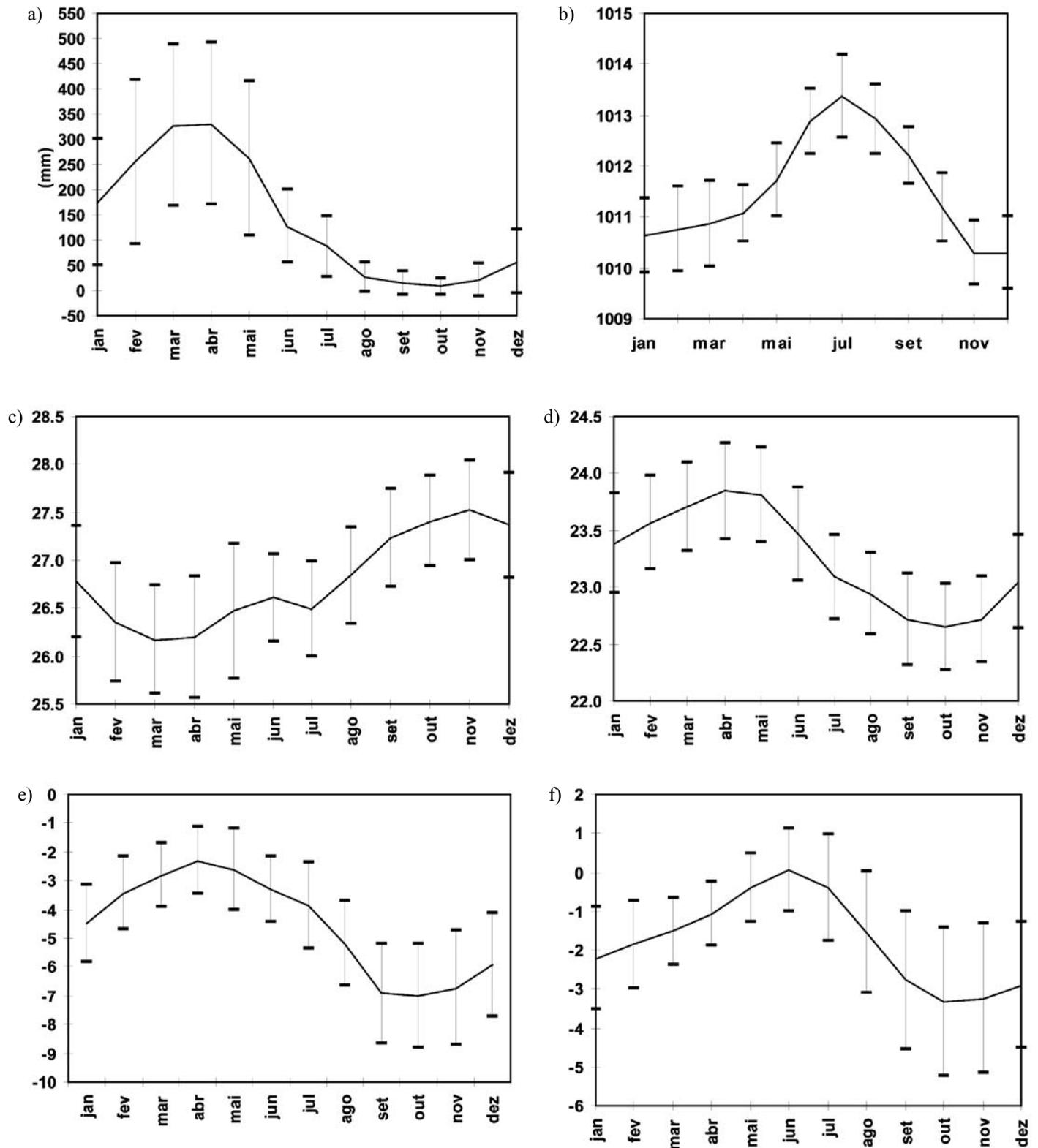


Figura 2 – (a) Distribuição média mensal da precipitação em mm, (b) pressão ao nível médio do mar em hPa, (c) temperatura do ar em °C, (d) temperatura do ponto de orvalho em °C, (e) componente zonal do vento em $m s^{-1}$ e (f) componente meridional em $m s^{-1}$. As barras verticais representam o desvio padrão.

e U encontram-se praticamente em fase. Os ciclos anuais da V , PNM e T estão defasados cerca de 2 meses, de 3 a 4 meses e de 6 a 7 meses, respectivamente, em relação ao ciclo anual de PRP . Assim, as variações no ciclo anual são responsáveis pelas defasagens encontradas na climatologia das variáveis de superfície.

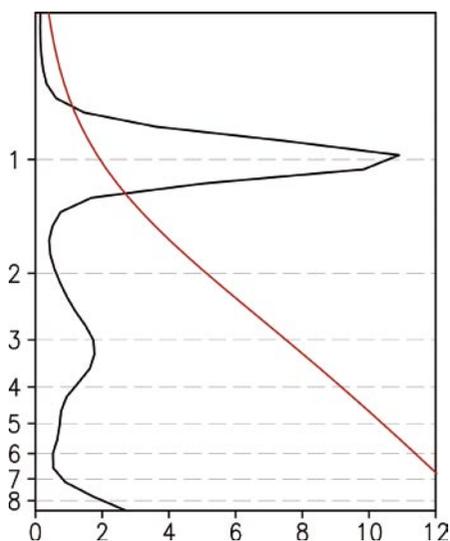


Figura 3 – Espectro de potência global da transformada da ondeleta em números de desvios padrões ao quadrado (NDP^2) da série total para a temperatura do ponto de orvalho (Td). A curva vermelha contínua delimita a significância estatística ao nível de confiança de 95%.

4.3. Modulação da Potência do Ciclo Anual

A modulação da potência do ciclo anual (POTCA) é mostrada na Figura 5. Para cada variável de superfície, o painel superior mostra a série reconstruída entre 0,7 e 1,2 anos em função

do ano (abscissas) e do mês (ordenadas); o painel inferior, a média em escala (de 0,7 a 1,2 anos) da potência de ondeleta (MEPO). Se não houvesse modulação da POTCA, então as isolinhas do painel superior seriam horizontais – i.e., para um dado mês, valor constante ao longo dos anos – e, no painel inferior, a MEPO seria constante ao longo dos anos. Para todas as variáveis, as isolinhas do painel superior se fecham em torno de máximos e mínimos, e a MEPO apresenta extremos (máximos e mínimos) locais ao longo dos anos. Logo, para todas as variáveis, há modulação da POTCA por frequências mais baixas.

A modulação da POTCA se manifesta da seguinte forma: para os anos de maior amplitude do ciclo anual (sombreado no painel superior da Figura 5), obtém-se máximos de MEPO (painel inferior). Por exemplo, para a PRP (Figura 5a), o ciclo anual mostra-se mais intenso (amplitudes e MEPO máximas) nos anos em torno de 1968, 1974, 1980 e 1985. O intervalo de tempo entre máximos de MEPO consecutivos é de 5 a 6 anos; isso sugere que a PRP possui uma modulação interanual. Por outro lado, para a Td (Figura 5e), a modulação parece ser decadal (máximos de MEPO em 1958, 1972 e 1983) embora a modulação interanual esteja também presente (máximos de MEPO em 1953 e 1987 que caracterizam uma modulação interanual com os anos de 1958 e 1983, respectivamente). Utilizando o mesmo raciocínio para as demais variáveis, pode-se concluir que PRP , PNM e U (mais) interanual, enquanto T , Td e V possuem modulação (mais) decadal.

As componentes do vento horizontal (U e V) possuem modulação predominante da POTCA em escalas diferentes. Uma explicação seria a seguinte: U estaria mais relacionada à circulação de Walker e, portanto, refletiria a variabilidade interanual associada ao ENSO, enquanto V estaria mais relacionada à circulação de Hadley e, portanto, refletiria as variações decadais da Oscilação do Atlântico Norte.

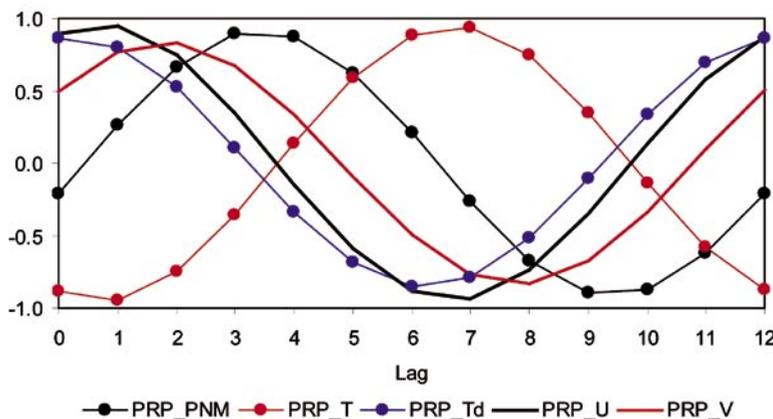


Figura 4 – Coeficientes de correlação entre a série reconstruída de precipitação (PRP) e as séries reconstruídas de pressão ao nível médio do mar (PNM), temperatura do ar (T), temperatura do ponto do orvalho (Td), componente zonal do vento (U) e da componente meridional do vento (V). Valores acima do módulo 0,072 são significativos usando-se uma distribuição de t de Student com um intervalo de confiança de 95%.

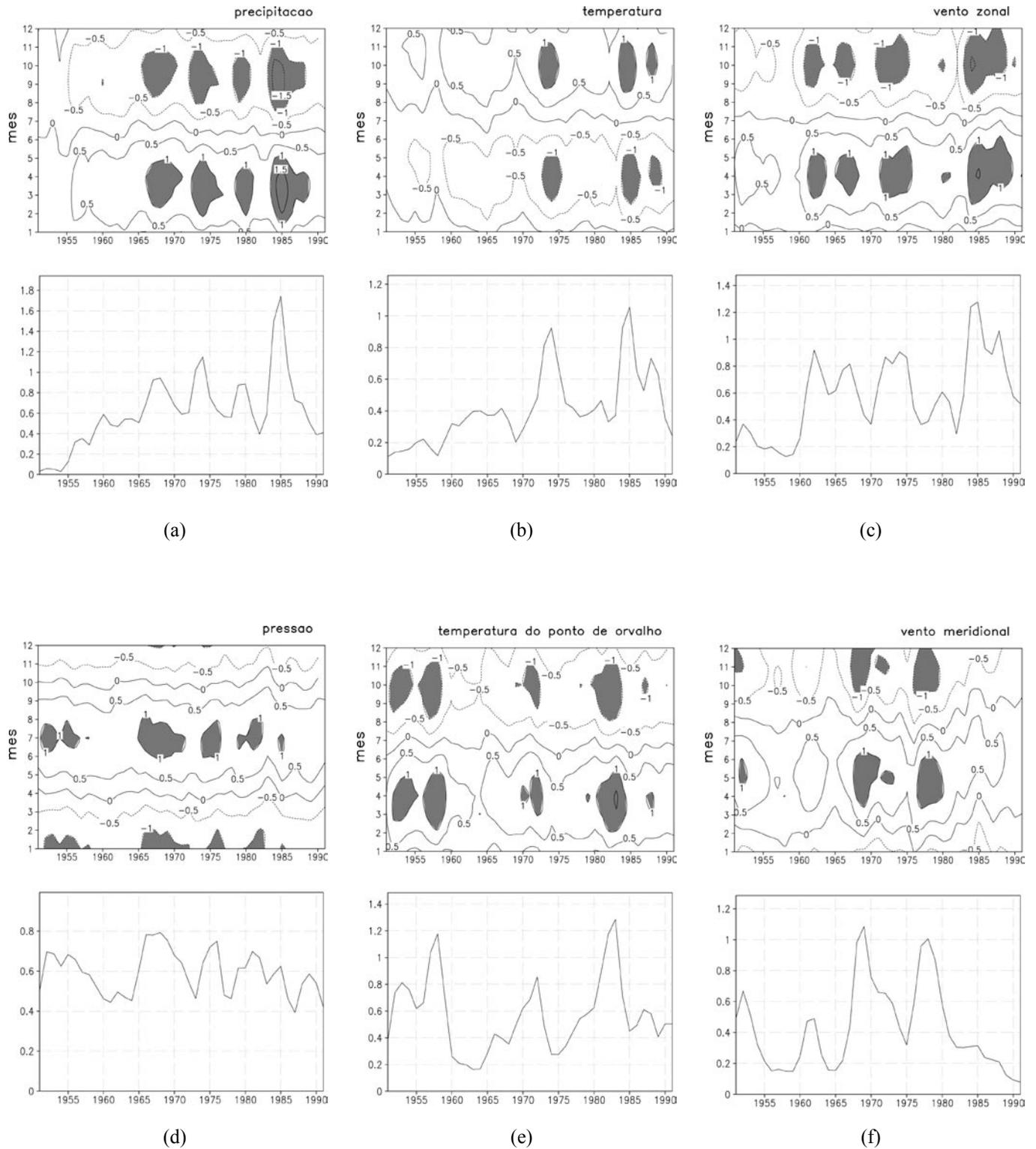


Figura 5 – Séries reconstruídas para os diferentes parâmetros (painel superior) e a média em escala da potência da ondeleta (MEPO) (*scale-averaged wavelet power*) em números de desvios padrões (NDP) da série total (painel inferior), para os períodos de 0.7 e 1.2 anos. Os valores da MEPO no painel inferior são médias anuais. As variáveis são **(a)** precipitação, **(b)** temperatura do ar, **(c)** componente zonal do vento, **(d)** PNM, **(e)** temperatura do ponto de orvalho e **(f)** componente meridional do vento.

Uma questão é se a modulação da POTCA de uma dada variável estaria relacionada à sua própria variabilidade em frequências mais baixas; p.ex., a variabilidade interanual da *PRP* estaria modulando o ciclo anual da *PRP*? Para responder a essa questão, utiliza-se a MEPO (entre 0,7 e 1,2 anos) e o sinal reconstruído em frequências mais baixas. Devido ao tamanho da série (41 anos), a reconstrução é feita somente na escala interanual, i.e., de 2 a 8 anos. A aparente modulação da POTCA pelo sinal interanual é encontrada somente para a *PRP* (Figura 6). O coeficiente de correlação linear entre MEPO e sinal reconstruído na escala anual para a *PRP* é igual a 0,54 e significativo no nível de confiança de 95% (para as demais variáveis, os valores do coeficiente de correlação linear são menores e não são mostrados).

Uma explicação para a modulação da POTCA de *PRP* pela variabilidade interanual da própria *PRP* encontra-se a seguir. Por um lado, Marques et al. (1984) mostraram que, na estação chuvosa (seca) do NEB, ocorre convergência (divergência) em baixos níveis. Esse comportamento está associado a uma convergência (divergência) de umidade na estação chuvosa (seca) do NEB (Rao et al., 1996). Por outro lado, anomalias de convergência em baixa frequência (p.ex., na escala interanual) no NEB podem ser consideradas como forçantes praticamente constantes ao longo do ano (de forma semelhante a Gu e Philander, 1995, que consideraram uma anomalia de vento constante atuando durante todo o ano).

– Uma anomalia de divergência levaria a menos *PRP* na estação chuvosa, pois diminuiria a convergência de massa e umidade sobre o NEB, mas não teria impacto na estação seca, pois a

anomalia de divergência estaria se somando à divergência característica da estação seca.

– Uma anomalia de convergência levaria a um aumento de *PRP* na estação chuvosa, pois aumentaria a convergência de massa e umidade sobre o NEB, mas não teria impacto na estação seca, pois a anomalia de convergência somente diminuiria a divergência característica da estação seca.

Logo, uma anomalia anual de divergência (convergência) levaria a redução (aumento) de *PRP* na estação úmida, mas não teria impactos na estação seca. Os impactos de anomalias positivas e negativas de convergência na *PRP* da estação chuvosa no NEB estão discutidos em Marques et al. (1984).

De forma simplificada, o ciclo anual de precipitação pode ser representado na forma (p.ex., Spiegel, 1981, p.131):

$$PRP_i = A_0 + A_1 \sin\left(\frac{2\pi i}{12}\right),$$

onde *i* refere-se ao mês (1 a 12); e *A*₀ e *A*₁ correspondem às amplitudes da média e do primeiro harmônico, respectivamente. Uma anomalia anual de convergência (divergência) implica no aumento (na diminuição) da média anual de *PRP*, i.e., de *A*₀; para manter a precipitação próxima de zero na estação seca, é necessário aumentar (diminuir) a amplitude do primeiro harmônico, i.e., de *A*₁, o que significa um ciclo anual mais (menos) intenso, pois a POTCA está relacionado a *A*₁². Portanto, uma anomalia de convergência (divergência) na escala interanual, que pode ser aproximada como uma forçante constante durante todo o ano, leva a um ciclo anual de *PRP* mais (menos) intenso

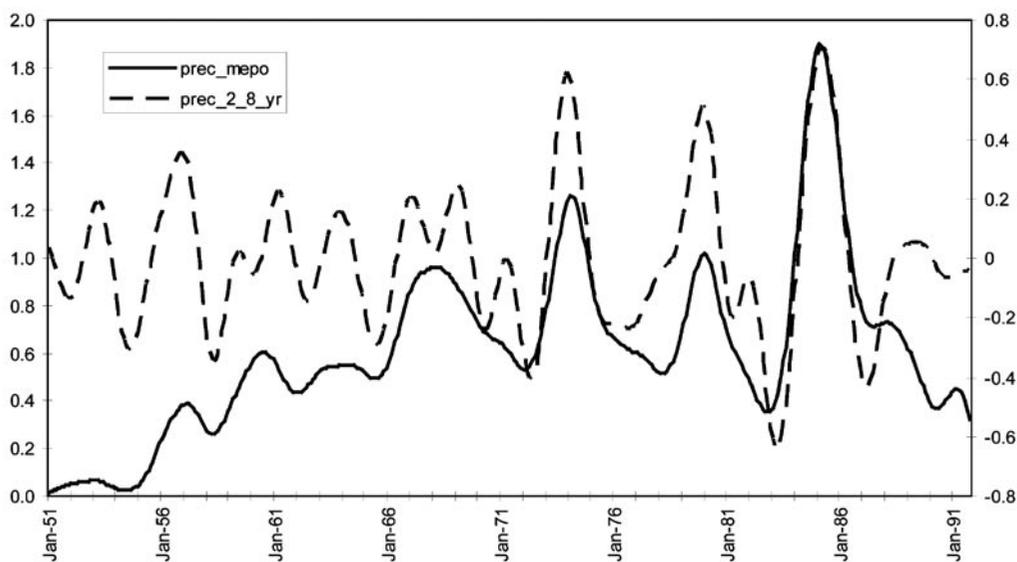


Figura 6 – Média em escala da potência de ondeleta (MEPO) (*scale-averaged wavelet power*) entre 0,7 e 1,2 anos (*prec_mepo*, linha contínua, eixo à esquerda) e série reconstruída entre 2 e 8 anos (*prec_2_8_yr*, linha tracejada, eixo à direita) em número de desvios padrões (NDP) da série total para a precipitação.

devido à restrição física de que a precipitação da estação seca é sempre pequena. A explicação apresentada aqui é semelhante ao mecanismo de feedback entre convergência atmosférica e aquecimento diabático proposto por Zebiak (1986).

A modulação da POTCA pode também estar associada a variabilidades de baixa frequência no Pacífico e Atlântico tropical. Inicialmente, analisam-se as escalas mais longas, i.e., decadal e interdecadal.

- Consistentemente com trabalhos anteriores (Torrence e Compo, 1998, p.73; Setoh et al., 1999), a MEPO na banda de 2 a 8 anos do índice Nino3.4 (MEPONino) mostra uma modulação decadal e interdecadal: notam-se baixos valores antes de 1960, e maiores valores a partir de 1960 com máximos em 1969-1975 (D1) e 1982-1990 (D2) (Figura 7). Isso significa uma maior ocorrência de extremos de ENSO, i.e., maior variabilidade interanual do Pacífico equatorial central e leste, a partir de 1960.
- O índice de dipolo do Atlântico (DTNS) apresenta fraca (forte) variabilidade decadal de 1940-1960 (1960-1990) (Andreoli et al., 2004, p.340). No período de maior variabilidade decadal (a partir de 1960), a série reconstruída de DTNS em 8-15 anos apresenta maiores (menores) valores em 1968 e 1980 (1972 e 1986) (Figura 7).

Estas características dos índices do Pacífico e Atlântico tropical motivam dividir o período total de estudo (1951 a 1991) em dois períodos: antes (após) de 1960, quando os índices Nino3.4 e DTNS apresentam variabilidade decadal menos (mais) pronunciada. No período posterior a 1960, os menores valores de DTNS em 8-15 anos (1972 e 1986) estão associados à modulação decadal da MEPONino (máximos em D1 e D2, respectivamente). A mudança de período em

1960 não coincide com as mudanças de fase interdecadal do índice PDO (Pacific Decadal Oscillation), que ocorreram em 1925, 1947 e 1977 (Mantua et al., 1997), mas parece estar associada à mudança de fase da oscilação bidecadal (10-30 anos) do índice NPI (North Pacific Index) para a primavera boreal (Minobe, 1999).

A POTCA é maior (menor) no período posterior (anterior) a 1960 para *PRP*, *T* e *U*. Para estas variáveis, no período posterior a 1960:

- Picos de MEPO de grande magnitude ocorrem em D1 e D2, indicando não somente a modulação decadal da POTCA, mas também que esta modulação pode estar relacionada à modulação decadal da MEPONino (pois os períodos D1 e D2 correspondem a máximos de MEPONino).
- Para *PRP* e *U*, há outros picos que conferem o caráter interanual à modulação da POTCA. Estes picos são analisados posteriormente.

Para as demais variáveis, i.e., aquelas que não apresentam características distintas de POTCA antes e depois de 1960, nota-se que a modulação de POTCA de *Td (V)* está em fase (fora de fase) com a modulação decadal do MEPONino. Para a *PNM*, há um mínimo de MEPO em D1 e D2, mas há outros extremos de MEPO comparáveis aos mínimos em D1 e D2; isso ratifica que a modulação da POTCA não é predominantemente decadal.

Para as variáveis *PRP*, *U* e *PNM*, o caráter interanual da modulação parece resultar de uma modulação interanual substancial sobreposta à modulação decadal.

- A modulação interanual da POTCA para *PRP* e *U* parece estar associada à maior ocorrência de eventos de ENSO a partir de 1960. Picos (máximos) de MEPO coincidem com mínimos

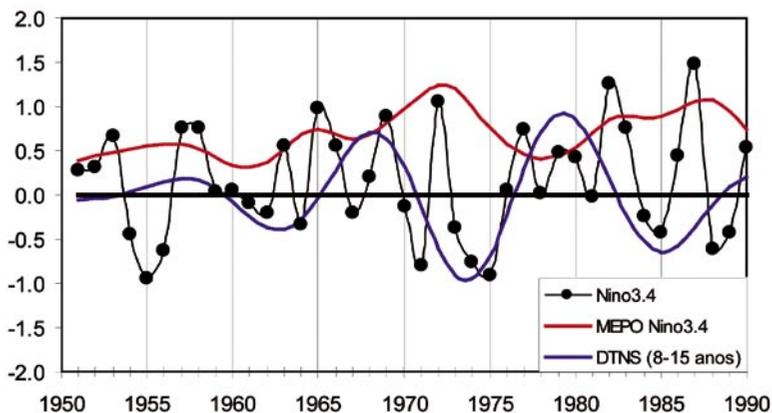


Figura 7 – Série anual do índice Nino3.4, da média em escala da potência de ondeleta (MEPO) (“scale-averaged wavelet power”) do índice Nino3.4 para a banda de 2 a 8 anos (em número de desvios padrões), e da reconstrução do índice de dipolo do Atlântico tropical entre os períodos de 8 e 15 anos.

de Nino3.4 (La-Nina). Por exemplo, máximos de MEPO coincidem com mínimos de Nino3.4 em 1967, 1974-75 e 1985 (há também um máximo de MEPO em 1980-81 associado a um mínimo de Nino3.4 em 1981, mas esse mínimo é pouco pronunciado e o valor do índice Nino3.4 não caracteriza um evento de La-Nina). Para a *PRP*, a relação entre máximo de MEPO e La-Nina pode ser explicada utilizando o mecanismo proposto anteriormente: em anos de La-Nina (mínimo de Nino3.4), haveria uma anomalia anual de convergência sobre o NEB que levaria a um ciclo anual mais intenso (MEPO maior).

– Para a *PNM*, a relação entre máximo de MEPO e mínimo de Nino3.4 pode ser notada em vários anos do período em estudo (p.ex., 1955, 1975, 1985 e 1990).

Portanto, para a *PRP* e *U* (*PNM*), a modulação interanual de POTCA parece estar associada à variabilidade interanual do Nino3.4 a partir de 1960 (para todo o período). Além disso, para *PRP* e *U*, os picos em D1 e D2, que caracterizam a modulação decadal, são em geral maiores que os demais picos; logo, o papel da modulação decadal da MEPONino deve ser o de aumentar a magnitude dos picos de POTCA em D1 e D2 (p.ex., 1974 e 1985).

5. CONCLUSÕES

Analisou-se a modulação do ciclo anual das variáveis de superfície – precipitação (*PRP*), pressão ao nível médio do mar (*PNM*), temperatura do ar (*T*), temperatura do ponto de orvalho (*Td*), e componentes zonal (*U*) e meridional (*V*) do vento – para a região de São Luís, Maranhão, Brasil, no período de 1951 a 1991, por meio da transformada de ondeleta (Torrence e Compo, 1998). Como esperado, para todas as variáveis, o ciclo anual congrega grande parte da variância. Com base nos espectros de potência global, a potência do ciclo anual (POTCA) foi associada à banda de 0,7 a 1,2 anos, que é a mesma proposta por Gu e Philander (1995).

Houve modulação da POTCA por frequências mais baixas para todas as variáveis. A modulação da POTCA pela variabilidade interanual da própria variável ocorreu somente para a *PRP*. Neste caso, o mecanismo físico seria semelhante ao feedback entre convergência atmosférica e aquecimento diabático proposto por Zebiak (1986).

Para *PRP*, *T* e *U*, notou-se a existência de dois períodos distintos (dentro do período de estudo, i.e., de 1951 a 1991): anterior a 1960, com menores valores de POTCA; e posterior a 1960, com maiores valores. No período posterior a 1960, houve modulação decadal para *PRP*, *T* e *U*, e interanual para *PRP* e *U*. A modulação interanual estaria associada à variabilidade interanual do índice Nino3.4; a decadal, à modulação decadal

da potência média na banda de 2 a 8 anos do índice Nino3.4 (MEPONino). Para *PRP* e *U*, o papel da modulação decadal da MEPONino seria o de aumentar a magnitude dos picos de POTCA em 1974 e 1985.

Para a *PNM*, houve modulação predominantemente interanual para todo o período de estudo, e essa modulação estaria associada à variabilidade interanual do índice Nino3.4.

Para *Td* e *V*, houve modulação decadal para todo o período de estudo. A modulação de *Td* (*V*) está em fase (fora de fase) em relação à modulação decadal da MEPONino.

Por fim, recomenda-se que a análise do ciclo anual seja estendida a outras regiões a fim de identificar, de forma mais abrangente, as relações entre a POTCA e a variabilidade da temperatura da superfície do mar dos oceanos Pacífico e Atlântico tropical.

6. AGRADECIMENTOS

Agradecemos aos Drs. C. Torrence e G. P. Compo por disponibilizarem os programas de análise de ondeleta <<http://paos.colorado.edu/research/wavelets/>>.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANDREOLI, R.V.; KAYANO, M.T.; GUEDES, R.L.; OYAMA, M.D.; ALVES, M.A.S.: A Influência da Temperatura da Superfície do Mar dos Oceanos Pacífico e Atlântico na Variabilidade de Precipitação em Fortaleza. **Rev. Bras. Meteor.**, v.19, n.3, p.337-344, 2004.
- BIASUTTI M., BATTISTI D.S., SARACHIK E.S. The Annual Cycle over the Tropical Atlantic, South America, and Africa. **J. Climate**, v. 16, p.2491-2508, 2003.
- COELHO, M.S.; GAN, M.A.; CONFORTE, J.C. Estudo da variabilidade da posição e da nebulosidade associada a ZCIT do Atlântico, durante a estação chuvosa de 1998 e 1999 no Nordeste do Brasil. **Rev. Bras. Meteor.**, v.19, n.1, p.23-34, 2004.
- COHEN, J.C.P.; SILVA DIAS, M.A.F.; NOBRE, C.A. Environmental Conditions Associated with Amazonian Squall Lines: A Case Study. **Mon. Wea. Rev.**, v.123, n.11, p.3163-3174, 1995.
- CHAPA, S.R.; RAO, V.B.; PRASAD, G.S.S.D. Application of wavelet Transform to Meteosat Derived Cold Cloud Index Data Over South America. **Mon. Wea. Rev.**, v.126, p.2466-2481, 1998.

- COUTINHO, E.C. Estudo dos Ventos na Região do Centro de Lançamento de Foguetes de Alcântara (CLA). 1999. Dissertação (Mestrado em Meteorologia)-Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1999.
- DATSENKO, N.M.; ALVES, J.M.B.; REPELLI, C.A. Variações Pluviométricas no Nordeste Brasileiro: Comparações com Mudanças Climáticas Globais. **Rev. Bras. Meteor.**, v.10, n.2, p.42-47, 1995.
- FILIPPOV, V. Quality control procedures for meteorological data. **WMO - Planning Report N.26**, 1968.
- FISCH, G. Ventos em Altitude na Costa Litorânea do Maranhão. **Boletim de Monitoramento Hidroclimático**, v.2, p.43-47, 1997.
- FOUFOULA-GEORGIOU, E.; KUMAR, P. **Wavelets in Geophysics: Wavelet Analysis and Its Applications**. San Diego: Academic Press, 1994.
- GAN, M.A.; KOUSKY, V.E. Vórtices Ciclônicos da Alta Troposfera no Oceano Atlântico Sul. **Rev. Bras. Meteor.**, v.1, p.19-28, 1986.
- G U, D.; PHILANDER, G.H. Secular Changes of Annual and Interannual Variability in the Tropics during de Past Century. **J. Climate**, v.8, p.864-876, 1995.
- GUEDES, R.L.; MACHADO, L.A.T. Características Médias da Cobertura de Nuvens Sobre a América do Sul com Base em Imagens do GOES-E/ISCCP: Julho de 1987 a Junho de 1988. **Rev. Bras. Meteor.**, v.12, n.1, p.1-19, 1997.
- GUEDES, R.L.; ANDREOLI, R.V.; KAYANO, M.T.; OYAMA, M.D.; ALVES, M.A.S. Série Temporal de Precipitação Mensal de Fortaleza, Brasil: Comparação entre Observações e Dados de Reanálise do NCEP/NCAR. **Rev. Bras. Meteor.**, v.20, n.1, p.83-92, 2005.
- HASTENRATH, S.; KACZMARCZYK, E.B. On Spectra and Coherence of Tropical Climate Anomalies. **Tellus**, v.33, n.5, p.453-462, 1981.
- KANE, R.P.; TRIVEDI, N.B. Spectral Characteristics of the Annual Rainfall Series for Northeast Brazil. **Climate Change**, v.13, p.317-336, 1988.
- KAYANO, M.T.; FERREIRA, N.J.; RAMÍREZ, M.C.V. Summer Circulation Patterns Related to the Upper Tropospheric Vortices over the Tropical South Atlantic. **Meteorol. Atmos. Phys.**, v.64, 203-213, 1997.
- KIM, K.-Y.; CHUNG, C. On the Evolution of the Annual Cycle in Tropical Pacific. **J. Climate**, v.14, n.5, p.991-994, 2001.
- LAU, K.-M.; WENG, H. Climate Signal Detection Using Wavelet Transform: How to make a Time Series Sing. **Bull. Amer. Meteor. Soc.**, v.76, n.12, p.2391-2402, 1995.
- LIEBMANN, B.; HENDON, H.H. Synoptic-Scale Disturbances near the Equator. **J. Atmos. Sci.**, v.47, n.12, p.1463-1479, 1990.
- MANTUA, N.J.; HARE, S.R.; ZHANG, Y.; WALLACE, J.M.; FRANCIS, R.C. A Pacific Interdecadal Climate Oscillation with Impacts on Salmon Production. **Bull. Amer. Meteor. Soc.**, v.78, n.6, p.1069-1079, 1997.
- MARQUES, V.S.; RAO, V.B.; MOLION, L.C.B. Inter-annual and Seasonal Variations in the Structure and Energetics of the Atmosphere over Northeast Brazil. **Tellus**, v.35A, p.136-148, 1984.
- MINOBE, S. Resonance in bidecadal and pentadecadal climate oscillations over the North Pacific: Role in climatic regime shifts. **Geophys. Res. Lett.**, v.26, n.7, p.855-858, 1999.
- MOLION, L.C.B.; BERNARDO, S.O. Uma Revisão da Dinâmica das Chuvas no Nordeste Brasileiro. **Rev. Bras. Meteor.**, v.17, n.1, p.1-10, 2002.
- PEREIRA, E.I.; MIRANDA, I.; FISCH, G.F.; MACHADO, L.A.T.; ALVES, M.A.S. Atlas Climatológico do Centro de Lançamento de Alcântara. **Relatório de desenvolvimento**. ACA/RT-01/01, Centro Técnico Aeroespacial, São José dos Campos, 2002.
- RAMIREZ, M.C.V.; KAYANO, M.T.; FERREIRA, N.J. Statistical analysis of upper tropospheric vortices in the vicinity of northeast Brazil during the 1980-1999 period. **Atmosfera**, v.12, p.75-88, 1999.
- RAO, V.B.; HADA, K. Characteristics of Rainfall over Brazil: Annual Variations and Connections with the Southern Oscillations. **Theor. Appl. Climatol.**, v.42, p.81-91, 1990.

- RAO, V.B.; CAVALCANTI, I.F.A.; HADA, K. Annual variation of rainfall over Brazil and water vapor characteristics over South America. **J. Geophys. Res.**, v.101, n.D21, p.26539-26551, 1996.
- TORRENCE, C.; COMPO, G.P. A Practical Guide to Wavelet Analysis. **Bull. Amer. Meteor. Soc.**, v.79, n.1, p.61-78, 1998.
- RAMOS, A.M.; VEIGA, J.A.P.; CONDE, F.C.; SIQUEIRA, J.R. Análise de Distúrbios de Leste na Operação Norte I do Projeto Programa Nacional de Avaliação do Potencial dos Recursos Vivos na Zona Econômica Exclusiva (REVIZEE). In: Congresso Brasileiro de Meteorologia, 13., 2004, Fortaleza. **Anais**. Sociedade Brasileira de Meteorologia, 2004.
- SETOH, T.; IMAWAKI, S.; OSTROVSKII, A.; UMATANI, S. Interannual Variations of ENSO Signals and Annual Cycles Revealed by Wavelet Analysis. **J. Oceanogr.**, v.55, p.385-394, 1999.
- SILVA, L.A.; SATYAMURTY, P. Relação entre Características do Vórtice Ciclônico de Altos Níveis (VCAN) e a Precipitação Observada na Região Oeste do Nordeste do Brasil. In: Congresso Brasileiro de Meteorologia, 13., 2004, Fortaleza. **Anais**. Sociedade Brasileira de Meteorologia, 2004.
- SMIDT, J. **Processamento de dados meteorológicos - Curso CG18 - Preparação e processamento de dados meteorológicos**. MAer, DEPV, IPV, São José dos Campos, 1975.
- SPIEGEL, M.R. **Manual de Fórmulas e Tabelas Matemáticas**. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1981. 270p.
- XUE Y.; SMITH, T.M.; REYNOLDS, R.W. Interdecadal Changes of 30-Yr SST Normals During 1871-2000. **J. Climate**, v.16, n.10, p.1601-1612, 2003.
- ZEBIAK, S.E. Atmospheric Convergence Feedback in a Simple Model for El Niño. **Mon. Wea. Rev.**, v.114, p.1263-1271, 1986.