

Análise de variabilidade intrasazonal e interanual da precipitação no vale do Itajaí com a transformada de ondaletas

¹Mônica R. Mitterstein* & ¹Dirceu L. Severo

1. Departamento de Física, Centro de Ciências Exatas e Naturais. Universidade Regional de Blumenau, Antônio da Veiga, 140, 89010-971, Blumenau, SC. severo@furb.br

**Bolsista programa PIBIC/CNPq 2006/2007. monica_mitterstein@hotmail.com*

Resumo: Uma análise espectral, via Transformada de Ondaletas, foi implementada para identificar periodicidades nas escalas sub-mensal, sazonal e interanual em registros de precipitação, pressão atmosférica e temperatura do ar no Vale do Itajaí. Na escala interanual foi identificada uma tendência positiva robusta de cerca de 200 mm nos totais anuais de precipitação nos últimos 30 anos a qual persiste mesmo extraindo-se os eventos El Niño de 1983 e 1998. As oscilações na pressão atmosférica e temperatura do ar apresentam diferentes periodicidades para o inverno e verão. No inverno, as oscilações apresentam períodos em torno de 7,5 dias e no verão períodos de cerca de 13 dias. Estas diferenças sugerem que no inverno os sistemas frontais dominam as mudanças de tempo enquanto no verão, o período um pouco mais longo indica sistemas mais persistentes, provavelmente associados à atividade da Alta da Bolívia e da Baixa do Chaco, que modulam as condições atmosféricas durante o verão da América do Sul. Nas séries de precipitação, as oscilações com períodos entre 10 e 50 dias também foram observadas. Estas oscilações mostraram-se bastante persistentes, particularmente em torno da escala de 20-30 dias.

Palavras-chave: Análise espectral; Ondaletas; Precipitação; Variações climáticas; Temperatura; Pressão atmosférica.

1. Introdução

A variabilidade climática tem exercido diferentes influências no desenvolvimento das civilizações ao longo dos séculos. Secas e inundações freqüentemente devastam plantações, destroem cidades provocando vultosos prejuízos econômicos e até mortes de seres humanos. Registros arqueológicos têm fornecido muitos exemplos de sociedades que colapsaram abruptamente devido às mudanças ambientais. O fim da civilização dos Acadianos, antigos habitantes da atual Síria, a cerca de 4.200 anos esteve associada a um episódio de seca muito intensa. O colapso de outras culturas, como a dos Maias, na América Central, também se acredita esteja associado a eventos de secas prolongadas. O Sahara já foi uma região caracterizada por um ecossistema de savana, hábil para atividades agrícolas há cerca de 20.000 anos, mas devido à variabilidade climática tornou-se o ambiente árido e estéril que persiste até hoje (Alverson et al., 2001). Há indícios de que a parte central do

deserto do Atacama (norte do Chile) desfrutou, em muitos períodos no passado, condições propícias à vida, tendo grande abundância de gramíneas, macrofloras e roedores.

A possibilidade de mudanças climáticas globais, geradas pela ação antropogênica, juntamente com a variabilidade natural, tem motivado a realização de pesquisas climáticas contemporâneas. A identificação dos fenômenos atmosféricos associados aos ciclos da variabilidade natural é importante para a formulação de modelos numéricos que descrevam o clima regional. Estudos da variabilidade intrasazonal (fenômenos com duração entre 10 e 90 dias) revelaram que o sinal de baixa freqüência da Oscilação de Madden-Julian (OMJ) é o de maior importância na faixa tropical, modulando a atividade convectiva, principalmente na região da Indonésia, Oceano Pacífico Equatorial Central e nas regiões Nordeste e Sudeste do Brasil (Madden e Julian, 1971;1972; Weickmann, 1983; Kousky e Kayano, 1994; Madden e Julian, 1994; Liebmann et al., 1999; Marton, 2000; Vitorino, 2002). No entanto,

fenômenos tipicamente das escalas intrasazonais de frequências mais altas (de 15 a 25 dias) também parecem influenciar de modo significativo as condições atmosféricas em latitudes subtropicais nas quais se encontram localizadas as regiões Sul e Sudeste do Brasil. No caso de séries de dados meteorológicos medidos sobre o Sul do Brasil, as principais oscilações estão associadas a sistemas atmosféricos que atuam sobre a América do Sul dos quais se destacam a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), os Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis (VCAN) e os Sistemas Frontais (SF). A Transformada de Ondeletas (TO) possui propriedades matemáticas capazes de quantificar as relações tempo-escala em séries temporais e no campo das geociências, tem estimulado muitas pesquisas. Obregon (2001) utilizou a TO para estudar o comportamento da precipitação sobre a América do Sul tentando associar o comportamento temporal desta variável com as mudanças climáticas. No estudo de Obregon (2001) foram utilizadas poucas séries de precipitação localizadas no estado de Santa Catarina. Por isto, o presente trabalho é inovador no sentido de avaliar numa escala espacial muito mais detalhada, o comportamento atmosférico associado às variabilidades intrasazonais e interanuais, no Vale do Itajaí.

2. Material e Métodos

Neste estudo foram utilizados dados de precipitação diária do Vale do Itajaí cedidos pela Agência Nacional de Águas (ANA). Também foram utilizados dados de temperatura e pressão atmosférica coletados pela estação meteorológica da FURB. As séries de precipitação diária passaram por uma análise de consistência para identificação de erros e, a seguir, foram construídas as séries de totais mensais e totais anuais.

Utilizou-se a Análise de Agrupamentos (AA) para classificar os postos pluviométricos do Vale do Itajaí quanto ao comportamento espacial semelhante. A AA permite a exploração do comportamento das séries temporais onde as variáveis classificatórias são inicialmente separadas em grandes grupos utilizando para isso uma medida de similaridade ou distância.

Ao tentar agrupar observações pluviométricas, não é possível estabelecer a priori o número ideal de grupos a serem formados. Por isso, os métodos não-hierárquicos não são adequados, já que sua aplicação exigiria um número grande de tentativas para encontrar o número exato de agrupamentos. Assim, adotou-se o método

hierárquico aglomerativo ou método de Ward. Nesse método, a formação dos agrupamentos em cada estágio da hierarquia é avaliada pela soma dos quadrados dos desvios em relação ao centro de gravidade dos grupos. O método de Ward pode ser considerado uma generalização multidimensional do modelo da Análise de Variância que pode ser resumido como:

$$\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 = \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^{n_k} (x_i - \bar{x}_k)^2 + \sum_{k=1}^K n_k (\bar{x}_k - \bar{x})^2$$

(a) (b) (c)

Onde (a) é a soma do quadrado dos desvios das observações em relação à média geral, (b) é a soma do quadrado dos desvios das observações dentro de cada grupo, em relação à média do grupo para todos os grupos e (c) é a soma do quadrado dos desvios das observações em cada grupo, com respeito à média geral. Além disso, é a média geral, a média do grupo k e x_i é o valor de uma dada observação. Como variáveis classificatórias foram utilizadas as médias mensais e anuais da precipitação, além da altitude e coordenadas geográficas de cada posto pluviométrico.

Na análise de séries temporais há, basicamente, dois enfoques utilizados. Em ambos, o objetivo é construir modelos para as séries, com propósitos determinados. No primeiro enfoque, a análise é feita no domínio temporal e os modelos propostos são modelos paramétricos (com um número finito de parâmetros). No segundo, a análise é conduzida no domínio das frequências e os modelos propostos são modelos não-paramétricos. No domínio de frequências tem-se a análise espectral, que tem inúmeras aplicações em ciências físicas e engenharia e que consiste em decompor a série dada em componentes de frequência, onde a existência do espectro é a característica fundamental. A Análise de Fourier ou Análise Harmônica é apropriada para analisar processos estacionários. Porém, para processos não estacionários e processos com características especiais, outros sistemas ortogonais podem ser úteis, como por exemplo, as Ondeletas. A TO é uma ferramenta que permite detectar, analisar e caracterizar as escalas temporais de oscilações não-estacionárias.

A TO é robusta (Maraun e Kurths, 2004), pois a resolução temporal é ajustada intrinsecamente para as escalas (períodos) desejadas. Assim, para cada escala, obtém-se uma resolução temporal ótima.

A TO (indicada por $W_i(s)$) no tempo $t_i = i\Delta t$ sobre uma escala s para uma série temporal $x_j = x(t_j)$ de comprimento N com um intervalo amostral Δt pode ser interpretada como uma extensão da Transformada de Fourier (TF) discreta, dada por $F(\omega) = \sum_j x_j e^{i\omega t_j}$. A TO

substitui a exponencial periódica $e^{i\omega t_j}$ (onde ω é a frequência) por uma ondaleta localizada $\Psi(t_j - t_i, s)$ em torno do tempo t_i e comprimida na escala s desejada. Assim, uma série temporal pode ser decomposta na escala e no tempo da seguinte forma:

$$W_i(s) = \sum_{j=0}^{N-1} x_j \Psi[(j-1)\Delta t, s] \quad (2.2)$$

A ondaleta $\Psi(t_j - t_i, s)$ é uma versão de uma ondaleta-mãe que sofreu uma dilatação e uma translação e é normalizada por um fator $c(s)$, que resulta em:

$$\Psi(t_j - t_i, s) = c(s) \Psi_0\left(\frac{t_j - t_i}{s}\right) \quad (2.3)$$

Em (2.2) Ψ_0 representa a ondaleta de Morlet, a qual é definida como:

$$\Psi_0(\theta) = \pi^{-\frac{1}{4}} e^{i\omega_0 \theta} e^{-\frac{\theta^2}{2}} \quad (2.4)$$

onde θ e ω_0 são parâmetros adimensionais. O

envelope gaussiano $e^{-\frac{\theta^2}{2}}$ posiciona a ondaleta no tempo e a resolução tempo/escala é ajustada por ω_0 . Para valores altos de ω_0 , a resolução da escala aumenta enquanto a resolução temporal diminui, e vice-versa. A frequência de Fourier f e a escala s da ondaleta não são recíprocas diretas e para obter uma relação próxima é necessário refazer a escala do resultado da TO por um fator que depende da ondaleta. Para a ondaleta de Morlet, a relação entre o período de Fourier e a escala da ondaleta é demonstrada por Torrence e Compo (1998):

$$\frac{1}{f} = \frac{4\pi s}{\omega_0 + \sqrt{2 + \omega_0^2}} \quad (2.5)$$

Na equação (2.5), fazendo $\omega_0 = 6$, o produto $s \cdot f$ é aproximadamente igual a 1, ou seja, a escala da ondaleta é aproximadamente igual à frequência obtida pela TF.

Ainda seguindo os conceitos da Análise de Fourier, define-se o espectro de potências da TO da função de autocorrelação (WPS) a qual, de acordo com o Teorema de Wiener-Khinchin, é dada por:

$$WPS_i(s) = \langle W_i(s) W_i^*(s) \rangle \quad (2.6)$$

Ou seja, o espectro de potências da TO é o valor esperado do produto da TO ($W_i(s)$) e o seu conjugado ($W_i^*(s)$).

3. Resultados e Discussão

Neste trabalho foram utilizadas as séries temporais da precipitação dos 41 postos pluviométricos mostrados na Figura 1.

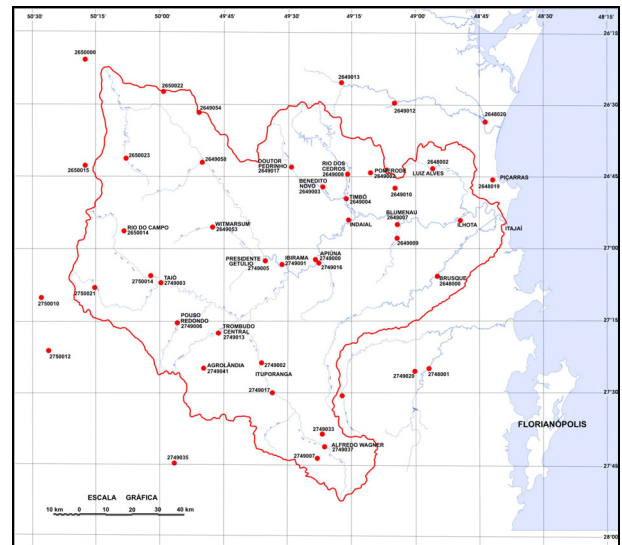


Figura 1. Localização dos postos pluviométricos. Os círculos preenchidos em vermelho indicam a posição de cada posto.

Na AA foram identificadas cinco regiões homogêneas quanto ao comportamento espacial da precipitação no Vale do Itajaí. Estas regiões estão representadas na Figura 2. Nota-se um padrão claro na distribuição da precipitação, com uma orientação no sentido leste-oeste das regiões homogêneas a qual pode indicar a influência da maritimidade e continentalidade sobre a distribuição da precipitação na região do Vale do Itajaí. No grupo 1 encontram-se os postos pluviométricos localizados na parte leste e parte do Médio Vale do Itajaí, e regiões adjacentes. O

grupo 2 inclui a região central e parte da região norte enquanto no grupo 3 encontram-se os postos pluviométricos representativos do Alto Vale. No grupo 4 estão inseridos os postos pluviométricos localizados no extremo-oeste e contornos da bacia. No grupo 5 foram classificadas apenas 3 estações pluviométricas, duas delas no extremo sul, próximo ao município de Alfredo Wagner e a outra em Rio do Campo. A caracterização deste último grupo não pode ser determinada e é possível que seja resultado de problemas nos dados.

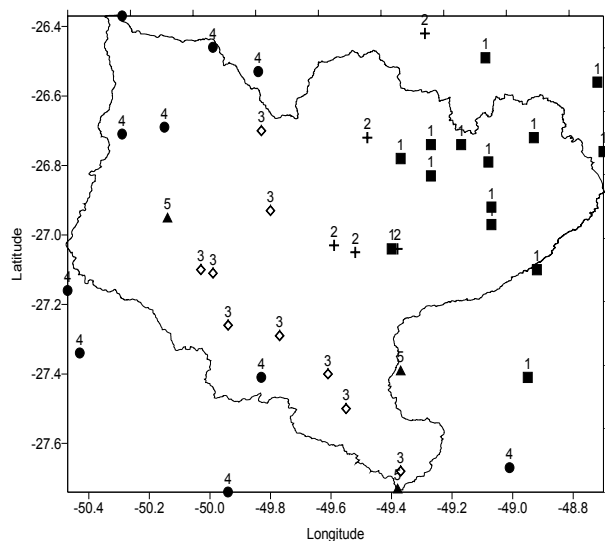


Figura 2. Regiões homogêneas. Os números indicam as cinco diferentes regiões homogêneas no Vale do Itajaí e adjacências.

A climatologia mensal da precipitação no Vale do Itajaí, para a maioria das séries temporais analisadas, apresenta dois períodos chuvosos com a predominância da precipitação na estação de verão. Na figura 3 são os gráfico com a distribuição climatológica mensal da precipitação para as séries pluviométricas representativas das cinco regiões homogêneas. Nota-se nestes gráficos que o verão é a estação mais chuvosa enquanto que a primavera representa um máximo secundário. O mês de outubro é o mês mais chuvoso da primavera enquanto que os meses de janeiro e fevereiro são os mais chuvosos do ano. Os meses mais secos do ano são os meses de abril e de agosto.

A análise da variabilidade interanual da precipitação do Vale do Itajaí mostrada na figura 4 revelou algumas informações importantes. São observadas flutuações nos totais anuais da precipitação que parecem indicar oscilações não periódicas com alguns ciclos de cerca de 3-6 anos identificáveis na distribuição da precipitação. Também é possível extrair destes diagramas informações a respeito de anos anormalmente secos ou chuvosos. Nota-se claramente que em

1983 a precipitação registrada esteve bem acima dos demais valores, estando relacionada aos eventos chuvosos ocasionados pelo fenômeno El-Niño de 1982-1983. A inclusão da linha de tendência nos gráficos da figura 4 mostra tendência positiva nos totais anuais da precipitação para o período analisado, principalmente a partir da década de 1950. Em algumas das séries, o acréscimo na quantidade anual de precipitação é superior a 200 mm.

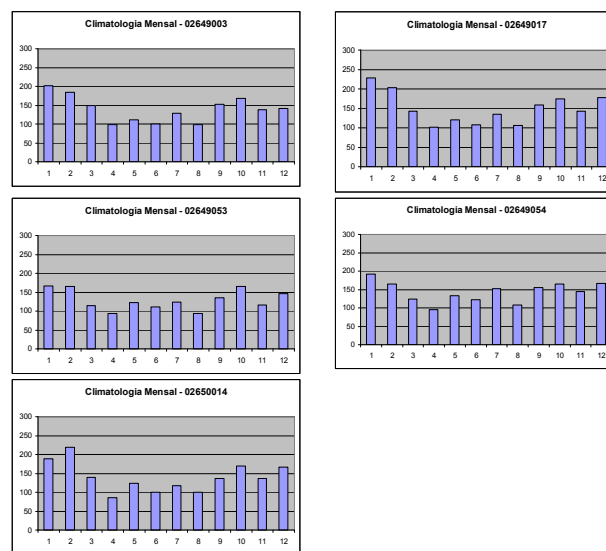


Figura 3. Climatologia mensal para séries de precipitação representativas das cinco regiões homogêneas do Vale do Itajaí.

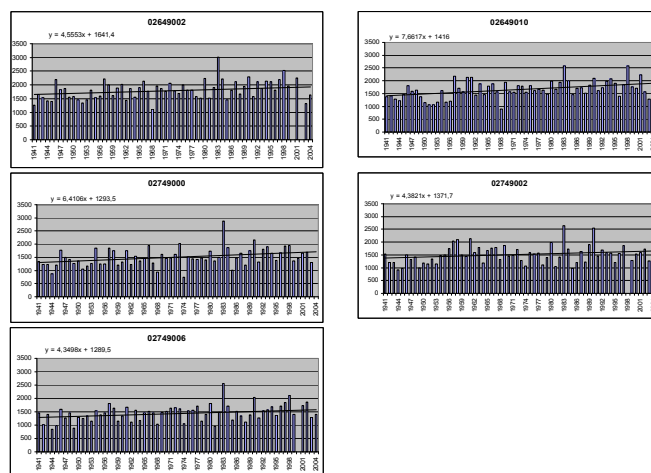


Figura 4 - Distribuição anual da precipitação e linha de tendência para as séries de precipitação representativas das cinco regiões homogêneas do Vale do Itajaí.

A fim de avaliar melhor a possibilidade da existência de tendências de longo prazo nas séries de totais anuais de precipitação foi feita uma análise adicional para as séries temporais que apresentavam no mínimo 30 anos de registros sem falhas. Para o período de 1941 a 1970 foram obtidas doze séries temporais apropriadas. Para facilitar a visualização do impacto do aumento da

precipitação com o tempo, foram feitos gráficos da evolução das médias de 30 anos para cada uma destas séries temporais. Na figura 5, cada uma das colunas representa a média de 30 anos iniciando no período de 1941 a 1970, em seguida no período de 1942 a 1971 e assim, sucessivamente até o período de 1975 a 2004. Nota-se claramente nesta figura, que na maioria das séries analisadas houve aumento na precipitação média, da ordem de 200 mm por ano, a partir da década de 1970. Deve-se ressaltar que mesmo extraindo-se os eventos extremos de 1983 e 1984 (os quais causaram grandes inundações no Vale do Itajaí), esta tendência positiva persistiu.

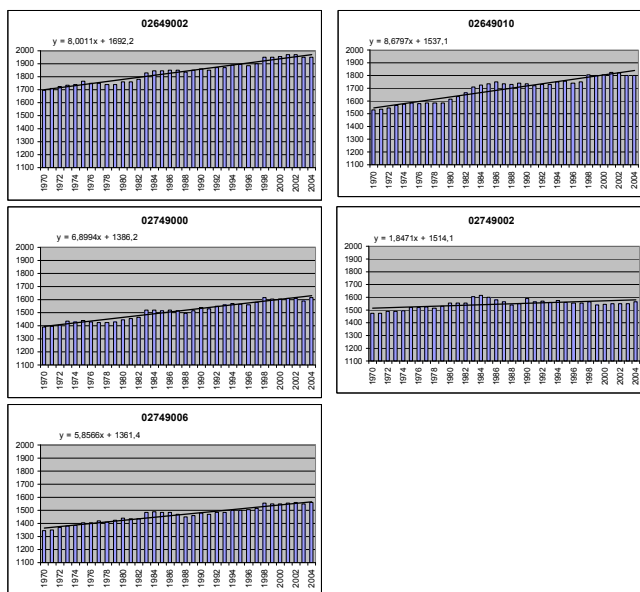


Figura 5 - Distribuição temporal das médias de 30 anos para a precipitação do Vale do Itajaí.

A fim de demonstrar o potencial de análise da TO e facilitar a interpretação dos gráficos que tipicamente são utilizados, aplicou-se o mesmo algoritmo que foi utilizado nas séries de dados reais, para séries temporais artificiais com frequências (e períodos) conhecidas. Uma destas séries artificiais é mostrada na figura 6. Na parte superior da Figura 6a tem-se o gráfico da função $f(x) = \text{sen}(x)$ cujo período é de 65 unidades e na parte inferior tem-se o escalograma da parte real dos coeficientes da TO. No eixo das ordenadas estão representadas as escalas (ou períodos) e no eixo das abscissas, a série temporal. Os núcleos coloridos (cor azul para as amplitudes negativas e cor vermelha para as positivas) indicam a intensidade dos coeficientes da TO. Na figura 6b tem-se a distribuição espectral de potências global para a função $f(x) = \text{sen}(x)$. É possível notar que a distribuição espectral apresenta um pico em torno da periodicidade 65.

A linha pontilhada na mesma figura indica o nível de confiança de 95%. Na figura 7, apresenta-se outro exemplo, um pouco mais complexo, da função $f(x) = \text{sen}(x) + \text{sen}(2x) + \text{sen}(6x)$. O escalograma (figura 7a) mostra nitidamente as 3 periodicidades presentes na série cujos picos espectrais encontram-se isolados no espectro de potências global da figura 7b.

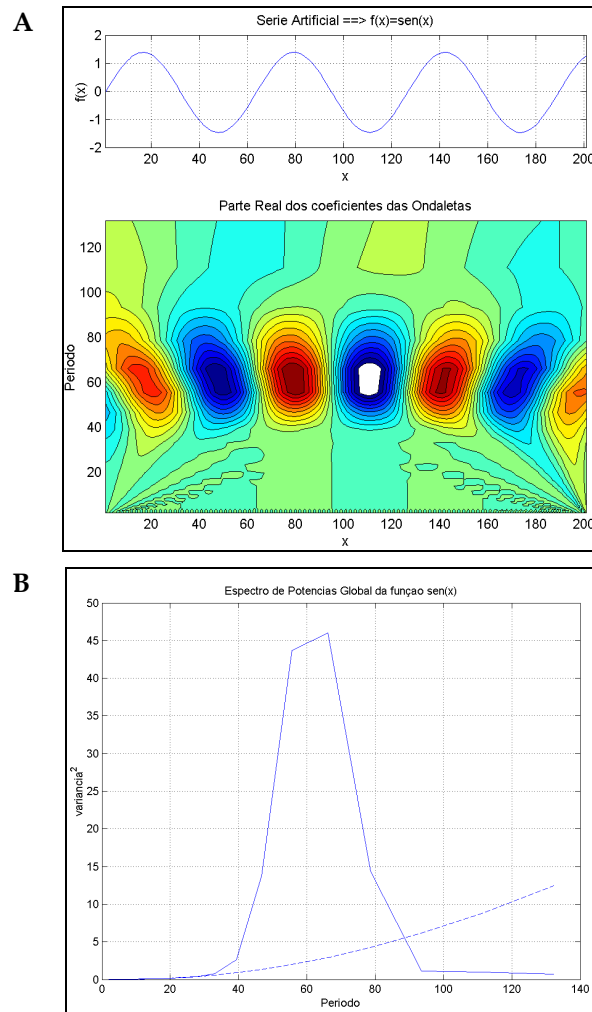


Figura 6. (a) Parte real dos coeficientes da TO (parte inferior) da função $f(x) = \text{sen}(x)$ (parte superior) e (b) Espectro de potências global da função $f(x) = \text{sen}(x)$.

A análise via TO para as séries de precipitação, pressão atmosférica e temperatura do ar no Vale do Itajaí revelaram algumas características peculiares. A figura 8 (vide anexo) apresenta o escalograma da parte real dos coeficientes das ondasletas para a série de precipitação em Blumenau a cada ano, de 1993 a 2002. É nítido nesta análise que a maior concentração da variância da série está confinada aos períodos abaixo de 10 dias, o que evidencia que as alterações no estado atmosférico que produz as chuvas devem-se a sistemas atmosféricos que

apresentam ciclos de vida com duração inferior ou igual a este período. Em outras escalas temporais, a precipitação também apresenta variabilidade intensa, mas estes eventos são isolados. Em alguns casos, os valores dos coeficientes da TO são intensos em várias escalas temporais ao mesmo tempo, o que pode indicar a existência de superposição entre os mecanismos que geraram as anomalias de precipitação. Muito interessante nesta análise é o período posterior a 1997 onde pode-se verificar flutuações dos coeficientes em escalas temporais acima de 20 dias e com muita intensidade, principalmente no ano de 1998 cuja precipitação foi influenciada pela ocorrência do evento *El Niño*.

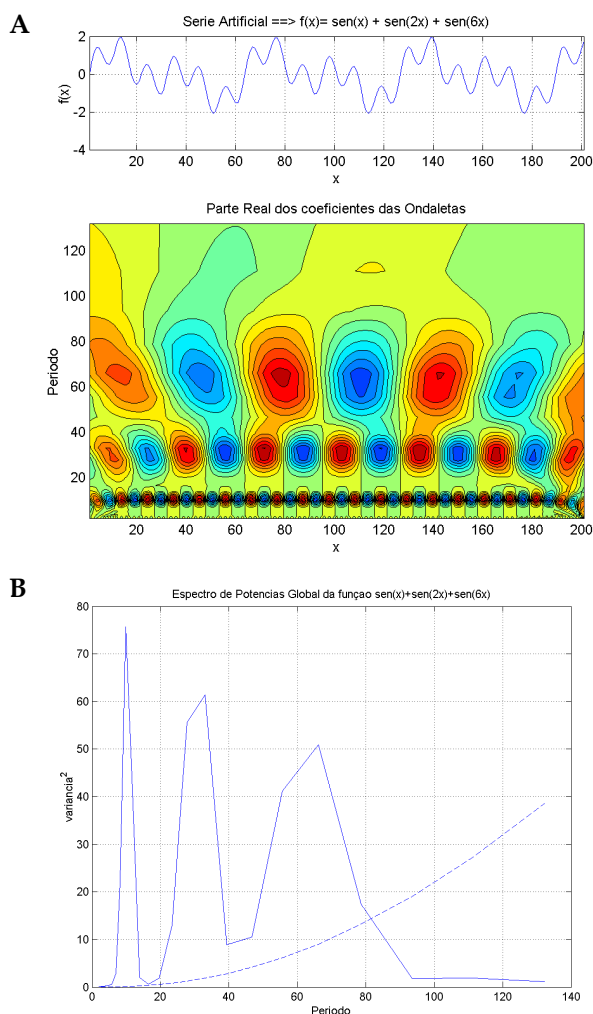


Figura 7. Idem à Figura 6, mas para a função $f(x) = \text{sen}(x) + \text{sen}(2x) + \text{sen}(6x)$.

No espectro de potências global da precipitação mostrado na figura 9 observa-se que a série apresenta uma distribuição espectral bastante ampla, mas com um pico máximo em torno de 15 dias. Há picos secundários em torno de 27 dias com variância robusta e em torno de 5 dias com

menor variância. O pico de 27 dias foi mencionado no parágrafo anterior durante a discussão da figura 8 e deve estar associado às oscilações atmosféricas de escalas sazonais conhecidas, sendo a mais provável a Oscilação de Madden-Julian. Já o pico de 5 dias deve estar vinculado aos sistemas de pressão móveis que se deslocam do Pacífico para o sul da América do Sul.

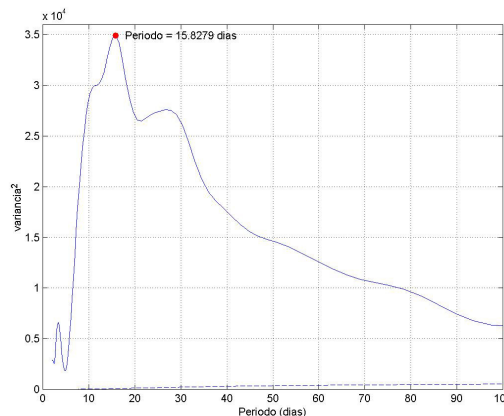


Figura 9. Espectro de Potências global para a série de precipitação de Blumenau, no período de 1993 a 2002.

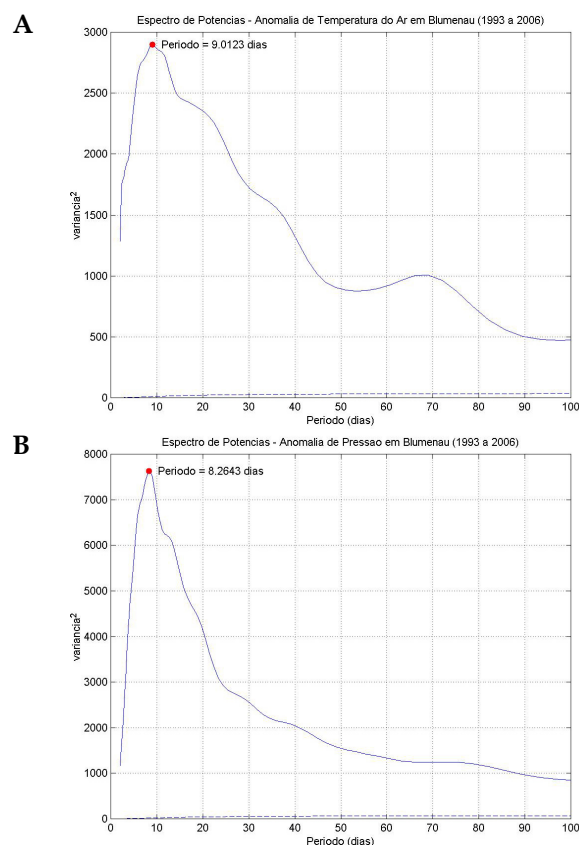


Figura 10. Espectro de Potências global para a série de (a) Temperatura e (b) Pressão atmosférica em Blumenau para o período de 1993 a 2002.

O espectro de potências global para as séries de temperatura do ar e da pressão atmosférica

registradas na estação meteorológica da FURB é mostrado na figura 10.

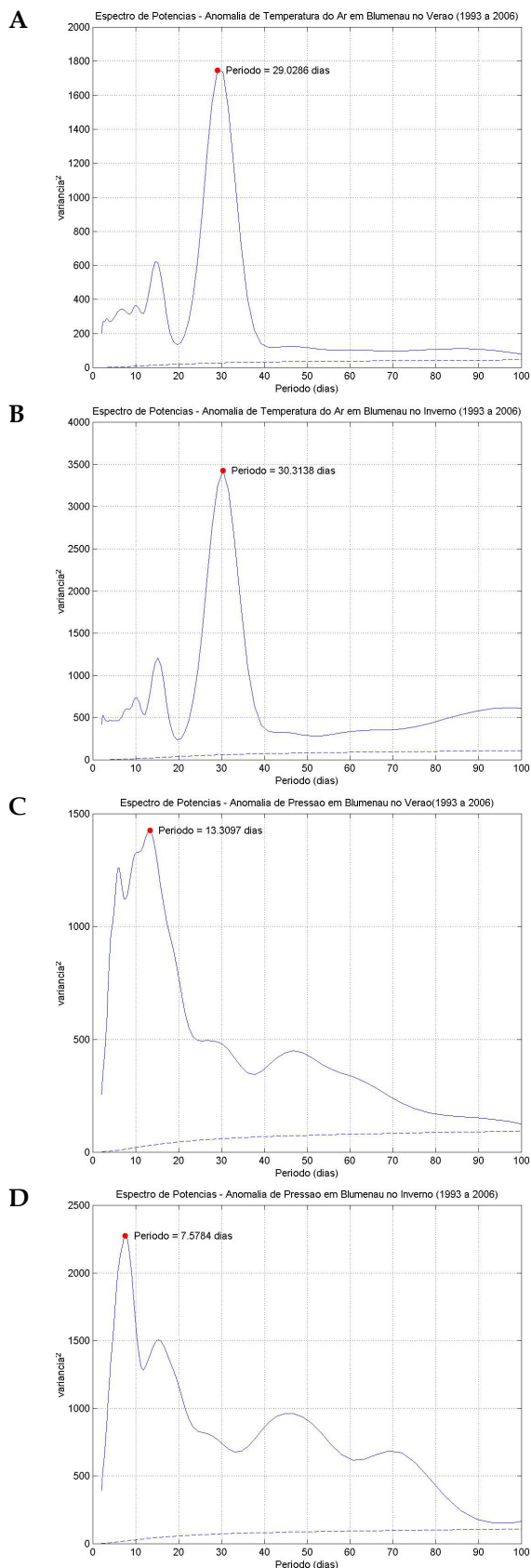


Figura 11. Espectro de Potências global para a série de temperatura no verão (A) e inverno (B) e para a pressão atmosférica no verão (C) e inverno (D) em Blumenau (93-02).

Os dois espectros são consistentes com uma série de ruído vermelho, ou seja, há uma maior concentração de energia (variância) nas oscilações com períodos curtos (até 20 dias, no caso da pressão e até 30 dias no caso da temperatura do ar). Há uma ligeira diferença nos períodos dos picos da série de temperatura do ar e da pressão atmosférica, mas ambos estão em torno de 8 dias.

A fim de verificar a possibilidade de mecanismos diferentes na geração das alterações do tempo em função da época do ano, foram construídas séries temporais para o verão e para o inverno. A temperatura apresenta picos robustos em torno de 30 dias (figuras 11a e 11b) enquanto a pressão atmosférica apresenta uma diferença significativa com o pico em torno de 13 dias no verão e de 7.5 dias no inverno. Estas diferenças nas oscilações do campo de pressão provavelmente estão associadas aos diferentes sistemas meteorológicos atuantes sobre o Vale do Itajaí nas diferentes épocas do ano. Durante o inverno, a passagem de sistemas frontais é o principal mecanismo de mudança no tempo os quais, em média, apresentam uma frequência de cerca de sete dias. No verão, as periodicidades mais robustas em escalas mais altas parece ser devido a atuação de sistemas mais persistentes como, por exemplo, à atividade da Alta da Bolívia e à Baixa do Chaco. No inverno, a série de pressão também apresenta picos espectrais em torno de 15, 45 e 70 dias. No verão apenas o pico de 45 dias é significativo. Estas oscilações de períodos mais longos sugerem a presença de mecanismos de teleconexão na modulação do campo de pressão sobre o Vale do Itajaí. A relação entre estes mecanismos e as variáveis meteorológicas no Vale do Itajaí será explorada em trabalhos futuros.

5. Agradecimentos: os autores agradecem à FURB que através do programa PIBIC permitiu a realização deste trabalho.

6. Referências

1. ALVERSON, K.; BRADLEY R.; PEDERSEN, T. Environmental Variability and Climate Change. *Science*, v. 3, p. 25-27, 2001.
2. GABOR, D. Theory of Communication. *Journal of IEEE*, v. 93, p. 429-457, 1946.
3. KOUSKY, V. E.; KAYANO, M. T. Principal Modes of Outgoing Longwave Radiation and 250-mb Circulation for the South American Sector. *Journal of Climate*, v. 7, p. 1131-1143, July 1994.
4. LIEBMANN, B.; KILADIS, G. N.; MARENGO, J. A.; AMBRIZZI, T. Sub Monthly Convective Variability over South America and South Atlantic Convergence Zone. *Journal of Climate*, v.12, p.1877-1891, 1999.
5. MADDEN, R. A.; JULIAN, P. R. Detection of a 40-50

- Day Oscillation in the Zonal Wind in the Tropical Pacific. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 28, p.702-708, July 1971.
6. MADDEN, R. A.; JULIAN, P. R. Description of Global-Scale Circulation Cells in the Tropics with a 40-50 Day Period. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v.29, p.1109-1123, 1972.
 7. MADDEN, R. A.; JULIAN, P. R. Observations of the 40-50 Day Tropical Oscillation - A Review. **Monthly Weather Review**, v.122, p.814-837, 1994.
 8. MARAUN, D.; KURTHS, J. Cross Wavelet Analysis: Significance Testing and Pitfalls. **Nonlinear Processes in Geophysics**, v. 11, p. 505-514, 2004.
 9. MARTON, E.: **Oscilações Intrasazonais Associadas à Zona de Convergência do Atlântico Sul no Sudeste Brasileiro**. 2000. Tese (Doutorado em Meteorologia). Instituto de Astronomia e Geofísica - Universidade de São Paulo (IAG/USP). São Paulo, 2000.
 10. OBREGÓN, G. O. P. **Dinâmica da Variabilidade Climática da Precipitação sobre a América do Sul**. 2001. Tese (Doutorado em Meteorologia). Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). São José dos Campos, 2001.
 11. TORRENCE, C.; COMPO, G. P. A Practical Guide to Wavelet Analysis. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 79, n. 1, p. 61-78, January 1998.
 12. VITORINO, M. I. **Análise das Oscilações Intrasazonais sobre a América do Sul e Oceanos adjacentes utilizando a Análise de Ondeletas**. (INPE-9822-TDI/865). 2003. 344 p. Tese (Doutorado em Meteorologia). Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). São José dos Campos, 2003.
 13. WEICKMANN, K. M. Intraseasonal Circulation and Outgoing Long Wave Radiation Modes during Northern Winter. **Monthly Weather Review**, v.111, p.1838-1858, 1983.

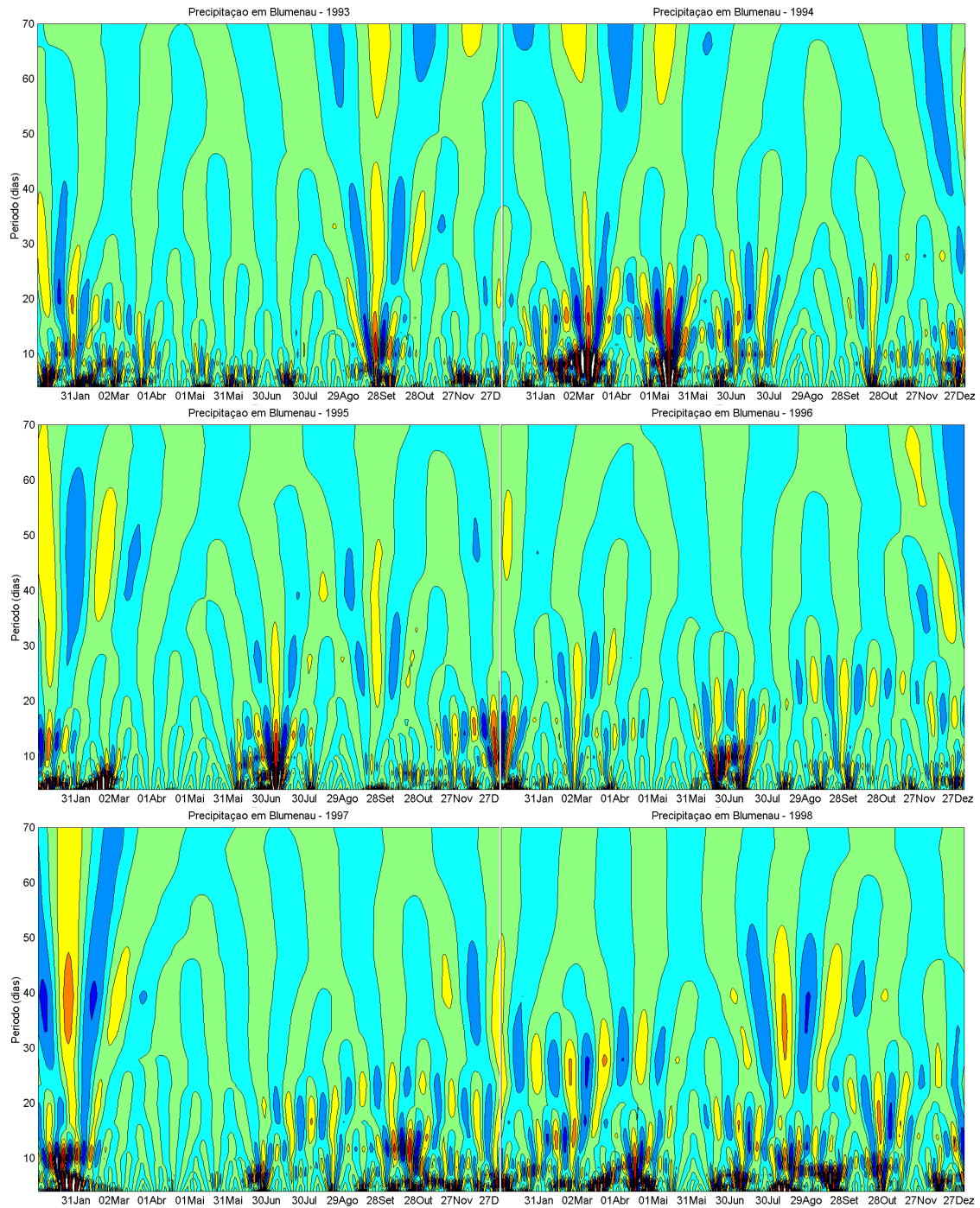


Figura 8 – Parte real dos coeficientes da Transformada de Ondas para a precipitação em Blumenau no período de 1993 a 2002. (continua)...

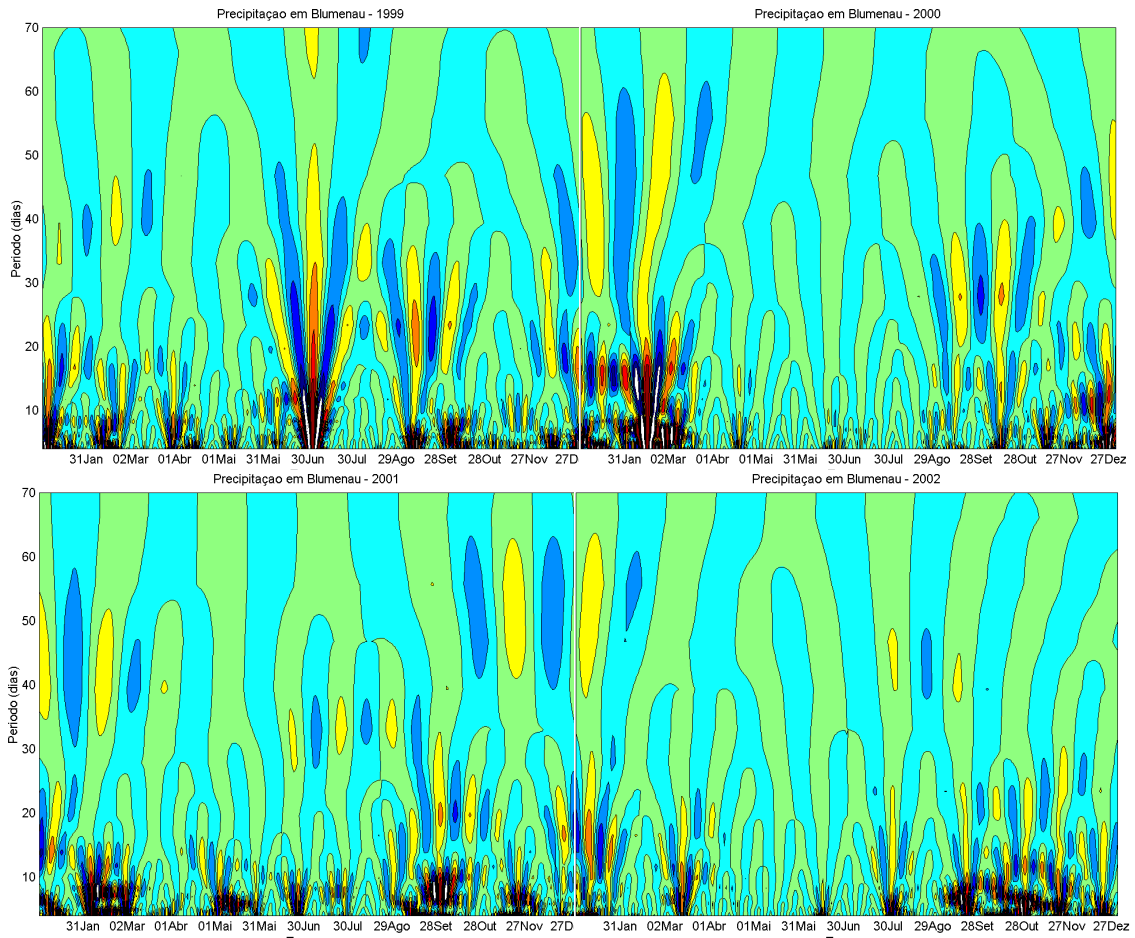


Figura 8 – Conclusão.