

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE ASTRONOMIA, GEOFÍSICA E
CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS

**PADRÕES DE VARIABILIDADE INTRAZONAL SOBRE A
CIDADE DE SÃO PAULO E O OCEANO ATLÂNTICO SUL
ADJACENTE UTILIZANDO A ANÁLISE DE ONDELETA, NO
PERÍODO DE 1982 A 2005.**

Alrenice Cunha de Castro

Dissertação de Mestrado

Orientador: Dr. Ricardo de Camargo

São Paulo

Novembro 2007

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a Marcelo Schneider, por me salvar todos os dias.

A minha família, em especial a minha mãe Aldenice, minha avó Aldenora e meus irmãos Kenia e Alexandre.

Aos meus queridos irmãos de vida, Linconly, Ideolinda, Denize, Sara, Marcelo Leão, Dário, Viviane e Rodrigo.

AGRADECIMENTOS

Nenhuma letra aqui escrita seria possível sem o apoio e o carinho das seguintes pessoas;

Minha mãe Aldenice, por batalhar pela minha criação e para que eu um dia pudesse cursar uma faculdade. Minha irmã Kenia, que enche minha vida com amor e esperança, meu irmão Alexandre, por cuidar de tudo o que amo. Minha avó Aldenora, por me amar e me transmitir sua força sempre.

Meus amigos e irmãos cósmicos da família Alencar Pereira, em especial, Afrânio e Fátima, pelo carinho, a Afrânio Segundo, pela amizade, a Linconly Jesus pela força e companheirismo, em todos os momentos, em cada instante, que, mesmo aqui pude sentir sua presença meu irmão, sua proteção na força de todos os nossos guias do plano mais alto. Pelas suas palavras de carinho e repreensão, pelo seu pensamento e alegria, pelas batalhas que nós, tantas vezes guerreiros, combatemos juntos na busca de um mundo mais justo.

A Ideolinda e Anax, por me adotarem em sua vida e me ensinarem o amor pelas atitudes e pela honestidade. Dédé, você foi um bálsamo na minha vida em cada instante, a sua força foi sentida em cada momento dessa fase na minha vida, te amo.

A Sara Rocha, Sérgio Tahim, Joélia e Liv, pelo incentivo e companhia sempre constante, a Marcelo Leão e família, pelo amor e amizade, a Wilker, Zeca, Gláucio, Breno e em especial a Denize Lopes por tudo que vivemos juntas, por todos os cálculos e equações diferenciais que você me ensinou a amar. A Luciana Angélica, que sempre me deu força e carinho, a todos os meus amigos do Depto. de Física da UFC, Adefran, Lenimberg, Apiano, Roner, Vivi, Vinícius, Michel, Damasceno, Herbert, Felipe, Andrey, Euclides, Makarius, Abraão, Wilami, Eduardo Girão, Nuno, Carlos Santana e a todos os companheiros do D.A de Física, pelas lições de ética, cidadania e justiça, e pela capacidade de mudar um pouco do nosso mundo.

Quero agradecer também aos melhores mestres que uma estudante poderia ter. Ao Prof. Carlos Alberto, pelas conversas maravilhosas e saudosas sobre os mistérios das partículas que tudo constroem com suas teorias e campos, pelas lições de vida e postura ética que foram além dos muros acadêmicos, ao Prof. Arimateia, por me ensinar que a melhor arma de um físico é a sensibilidade, ao Prof. Cleuton Freire, pelas palavras que me fizeram ficar na física, e ao meu muito querido Prof. Fernando Siqueira, pelos papos, pelo carinho, pelos

conselhos e pela amizade de “luz”. A Profa. Eloneid Nobre pela dedicação e ao Prof. Amorim, pela amizade tão especial que cultivamos.

Um espaço especial nestas palavras para quem, por vias tão caóticas, me fez chegar até aqui, ao Prof. Alexandre Costa, por me fazer enamorar pela ciência e me encantar com as incertezas, pelas palavras, pela amizade e pela inspiração que você me traz.

Ao Prof. Carlos Parente, pelo exemplo de humanidade, pela força e pelo profundo carinho e admiração que tenho por você, grande guerreiro. A todos do Laboratório de Física de Nuvens, em especial a Sérgio Sombra, por me iniciar nas veredas científicas e pelos momentos de alegria.

A família ICE, que me ensinou o valor do amor fraterno, em especial a Regilane e Francisco Cajazeiras, Ariane, Irlene, Joventina, Arimatea e Conceição.

A quem com tanto carinho me acolheu na minha chegada a Sampa, as queridas Taciana, Gyrlene e Ana Elizabeth. Aos irmãos que fiz nesta caminhada, em especial a Jonathan Mota, André Sayão, Rafael Castelo, Sandra Saad, Evaldo, Ricardo Siqueira e Elisabeth Amaral, por absolutamente tudo e por me amarem como sou, pela ajuda a cada instante, e meu obrigado também a Edna, Leuda, Olívia, Ana Cris, Nilton, Angélica, Nathalie, Fábio, Sebastian, Rosiberto, Helber, Desireé e Léo.

O meu muito obrigado pelo carinho e pelo amor fraterno, Juliana Shontag, pelo acolhimento físico e emocional, você é uma amiga muito especial, e a Michel, pela amizade. A Geová, Leandro Ymai em especial, e Anderson, por me ajudarem e me acolherem em suas vidas.

A COSEAS, pela bolsa de moradia estudantil e em especial, a assistente social Luiza Canzian, pelo carinho, apoio e amizade.

A minha família cruspiana, por fazer mais felizes meus dias, a Rodrigo Braga (pelo exemplo e força), Neves, Leandro, Ney, Érika, Vani (pelo axé nosso de cada dia), Sara Freitas (por me fazer sentir meu Ceará), Yuri, Flavitcha, Daniel, Dário (por ser tuuudo), Vivi (por estar em minha vida), Rodrigo (por ser especial), Bruno, Fabiano, Chico, Geórgia, Saulo e Ana, o que seria de mim sem vocês meus amores? Aos amigos de amigos que viraram irmãos, Renata, Ana Paula, Ângela Maria, Libério, Josué, Valmir e Jairo.

A todos os meus alunos, que mais me ensinam do que aprendem.

Ao meu orientador, pelo carinho, paciência e compreensão, o meu muito obrigado, Prof. Ricardo de Camargo, a Profa. e amiga Isabel Vitorino, por me inserir no fantástico mundo das ondeletas, a Profa. Leila Carvalho, pelos conselhos e auxílios, sem os quais este

trabalho não existiria. Ao Prof. Pedro Dias e a Profa. Jacyra Soares pela ajuda quando da minha chegada e aos Profs. Massambani, Augusto Pereira e Joseph Harari, pelo conhecimento, amizade e incentivo.

A todos os funcionários do Depto. de Ciências Atmosféricas do IAG/USP, aos técnicos da estação meteorológica, pelos dados utilizados neste trabalho, aos funcionários da secretaria do instituto, em especial, a Rose, Marcel e André, pelo apoio acadêmico e o sorriso amigo em todas as horas. As secretárias do Depto. de Ciências Atmosféricas, Beth, Ana Lúcia e Sonia, pelo apoio nas atividades acadêmicas.

E meu carinho e obrigado especial a Marcelo Schneider, que apareceu em minha vida pra me fazer acreditar no sublime, no BOM, no amor. A toda a família Schneider, em especial a Marli, pelo carinho e afeto.

Aos meus amigos do plano mais alto, por me mostrarem que o amor a tudo supera, especialmente a um amigo a quem a ancestralidade me permitiu seu amor, abnegação e auxílio. E a Deus, que está SEMPRE comigo, mesmo quando eu não estou com ELE.

Ao CNPq, pelo financiamento desta pesquisa.

RESUMO

A variabilidade climática resultante da interação entre o oceano e a atmosfera é produzida através das constantes trocas de energia proveniente da radiação solar. O objetivo deste estudo é a determinação e identificação dos padrões de escala que atuam no sistema oceano-atmosfera, e que causam maior variabilidade dentro da escala intrasazonal entre a cidade de São Paulo e o oceano Atlântico Sul adjacente. Para tanto, se empregou a técnica da Transformada em Ondeleita (TO), o filtro de Lanczos e o método da transformada ou do chamado Espectro Cruzado de Ondeleita (ECO) a dois conjuntos de dados: A estação meteorológica do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo (EM-IAG/USP) situada na cidade de São Paulo, no período de 1º de janeiro de 1982 a 31 de dezembro de 2005; E o conjunto do *National Center for Environmental Prediction* (NCEP) localizado no oceano Atlântico Sul, para o mesmo período. Os resultados para a técnica de filtragem de dados executados pelos filtros de Lanczos e Ondeleita foram bastante similares, visto que houve boa concordância em fase e amplitude. A TO, por sua vez, mostrou-se eficiente em detectar oscilações associadas a regimes não estacionários, como os aqui encontrados, com interações de escala e troca de energia em diversas frequências. Investigou-se o comportamento tanto da energia global das variáveis bem como amplitude relacionada aos coeficientes da parte real da Ondeleita. Os anos de 1985, 1992 e 2002-2003 mostraram como os mais significativos em termos de energia e amplitude, nos espectros globais e da parte real. No caso da TMA e SKIN T 2 o período mais ativo na banda intrasazonal 25-100 dias foi no ano de 1985 enquanto que para a série de SKIN T 3 o período mais ativo ocorreu entre os anos de 2001 e 2003. No ano de 2002, houve a formação de uma estrutura do tipo multiescala, com características autosimilares do tipo fractal. O método ECO indicou maior correlação cruzada no ano de 2002, período em que foram observados extremos espectrais. Observou-se nos anos de 1985, 1992 e 2002 houve a formação de um dipolo de SKIN T entre o Atlântico Norte e a região do Atlântico Sul subtropical. Na fronteira entre estas duas regiões localiza-se a região de estudo oceânica deste trabalho, relacionada a SKIN T 3.

**INTRASEASONAL VARIABILITY PATTERN ON THE CITY OF SÃO PAULO AND
THE ADJACENT SOUTH ATLANTIC OCEAN USING THE WAVELET ANALISYS,
IN THE PERIOD OF 1982- 2005.**

Abstract

The resultant climatic variability of the interaction between the ocean and the atmosphere is produced through the constant exchanges of energy coming from the solar radiation. The objective of this study is the determination and identification of the scale pattern that act in the system ocean-atmosphere, and that cause greater variability inside of the intraseasonal scale between the city of São Paulo and the adjacent South Atlantic Ocean. For in such a way, it was applied the technique of the Wavelet Transformed (WT), the Lanczos filtering and the method of Cross Wavelet Spectra (CWT) to the two data sets: The meteorological station data set of the Institute of Astronomy, Geophysics and Atmospheric Sciences of the University of São Paulo (IAG/USP) located in the city of São Paulo, covers the period of 1^o of January of 1982 the 31 of December of 2005; and the National Center of Environmental Prediction (NCEP) data set located in the South Atlantic Ocean, for the same period. The results for the filtering data executed for the Lanczos and Wavelet filtering technique had been sufficiently similar, since it had good agreement in phase and amplitude. The WT, in turn, revealed be efficient in detecting oscillations in a non stationary regime, as found here, with interactions of scale and exchange of energy in several frequencies. The behavior of the global wavelet energy as well the amplitude of the real part of wavelet coefficients was investigated. The years of 1985, 1992 and 2002-2003 were the most significant in terms of energy and amplitude, in the global spectra and in the real part. In the case of 2 TMA and SKIN T the most active period in intraseasonal band of 25-100 days was in the year of 1985 while for the series of SKIN T3 it was the year of 2001 and 2003. It was observed in the years of 1985, 1992 and 2002 the development of a dipole in the SKIN T field, between the North Atlantic and the subtropical South Atlantic region. In the border of these two regions it was located the oceanic region of study, related with SKIN T3.

SUMÁRIO

LISTA DE ABREVIATURAS.....	10
LISTA DE FIGURAS.....	11
LISTA DE TABELAS.....	14
1. INTRODUÇÃO.....	15
1.1 – Oscilações intrasazonais: A oscilação de Madden-Julian (OMJ).....	16
1.2 – Oscilações de baixa frequência – O fenômeno El Niño/Oscilação Sul (ENOS).....	17
1.3 – Revisão Bibliográfica.....	19
1.3.1 – Complexidade do sinal meteorológico e a variabilidade em multiescalas.....	19
1.3.2 – Análise espectral e observacional da variabilidade intrasazonal na América do Sul: Aplicações da Transformada em Ondeleta (TO).....	20
1.3.3 – Padrões de variabilidade climática entre a cidade de São Paulo e o oceano Atlântico Sul adjacente.....	22
2. DADOS METEOROLÓGICOS E METODOLOGIA.....	25
2.1 Dados utilizados.....	25
2.2 – O Conjunto do National Center for Environmental Prediction (NCEP).....	27
2.3 – Métodos de Análise de Séries Temporais.....	30
2.3.1 – Análise de Fourier.....	30
2.3.2 – A Transformada de Fourier.....	32
2.3.3 – A Transformada Discreta de Fourier.....	33
2.3.4 – O Filtro de Lanczos.....	34
2.4 – A Análise em Ondeleta.....	35
2.4.1 – Escala e Transição.....	36
2.4.2 – Propriedades de ondeletas.....	38
2.4.3 – Transformada em ondeleta contínua.....	38
2.4.4 – Espectro global de ondeleta (EGO).....	42
2.4.5 – Espectro cruzado de ondeleta (ECO).....	43
3.1 – RESULTADOS.....	44
3.1 – Filtragem dos dados: Seleção das escalas temporais.....	44
3.2 – Cálculo EGO: análise dos espectros globais.....	48
3.3 – Análise da parte real dos espectros gerados pela TO.....	57

3.4 – Cálculo do ECO – Análise do espectro cruzado.....	64
3.5 – Análise sinótica: Associação dos períodos e o comportamento das variáveis.....	72
3.5.1 – Análise da SKIN T e os padrões globais do Atlântico e do Pacífico.....	72
3.5.2 – Caso de 1985.....	72
3.5.3 – Caso de 1992.....	75
3.5.4 – Caso de 2002.....	76
4.1 – CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	79
4.2 – Sugestões para trabalhos futuros.....	80
4.3 – Referências Bibliográficas.....	81
Apêndice A.....	85

LISTA DE ABREVIATURAS

OA	Sistema Oceano-Atmosfera
TSM	Temperatura da Superfície do Mar
TMA	Temperatura Média do Ar
OMJ	Oscilação de Madden e Julian
ROLE	Radiação de Onda Longa Emergente
ENOS	El Niño/Oscilação Sul
OS	Oscilação Sul
AF	Análise de Fourier
CSP	Cidade de São Paulo
OAS	Oceano Atlântico Sul
AO	Análise em Ondeleta
TO	Transformada em Ondeleta
EM-IAG/USP	Estação meteorológica do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo
SKN T	<i>Skin temperature</i> ou temperatura de película
NCEP	<i>National Center for Environmental Prediction</i>
PNM	Pressão ao nível do mar
SEB	Região sudeste do Brasil
COB	Região Centro-Oeste do Brasil
TF	Transformada de Fourier
ZCAS	Zona de Convergência da América do Sul
SFs	Sistemas Frontais
VCANs	Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis
ECO	Espectro Cruzado de Ondeleta

IV	Espectro infravermelho
FFT	Transformada rápida de Fourier ou <i>Fast Fourier Transform</i>
MRA	Análise em Multiresolução
TOD	Transformada de Ondeleita Discreta
EGO	Espectro Global de Ondeleita

LISTA DE FIGURAS

CAPITULO 1

CAPÍTULO 2

Figura 2.1: Série temporal total da temperatura média do ar (TMA), medida sobre a estação meteorológica do IAG-USP, referente ao ponto 1, localizado na cidade de São Paulo.

Figura 2.2: Área de estudo: no retângulo em vermelho (ponto 1) destaca-se a localização da EM-IAG/USP e em azul (pontos 2 e 3) está representada a região do oceano Atlântico Sul cujos dados foram obtidos do projeto de reanálises do NCEP.

Figura 2.3: Série temporal total de *skin temperature*, que compõe a região 2, obtida do Projeto de Reanálises do NCEP, cuja localização é 45°W, 23.8°S. Esta série mostra similaridade espacial com a série de TMA da EM-IAG-USP (ponto 1), resultante da influência do continente.

Figura 2.4: Série temporal total de *skin temperature*, que compõe a região 3, obtido do Projeto de Reanálises do NCEP, cuja localização é 43.13°W, 23.8°S. Esta série temporal mostra um padrão espacial diferenciado em relação a série da EM-IAG-USP.

Figura 2.5: Análise da série temporal de temperatura de película (*Skin Temperature*) do Conjunto de dados do National Center for Environmental Prediction (NCEP). A partir do tracejado observa-se a alteração da resolução dos dados devido a mudanças nos sensores utilizados.

Figura 2.6: Compressão de senóides. (wavelet Toolbox – Misiti, 1996).

Figura 2.7: Fig.2.7 – Compressão de ondeletas. (wavelet Toolbox – Misiti, 1996).

Figura 2.8: Translação de ondeleta deslocada. (wavelet Toolbox – Misiti, 1996).

Figura 2.9: Análise ondeleta em uma seção do sinal. (wavelet Toolbox – Misiti, 1996).

Figura 2.10: Análise ondeleta em uma nova seção do sinal. (wavelet Toolbox – Misiti, 1996).

Figura 2.11: Análise ondeleta com uma ondeleta de nova escala. (wavelet Toolbox – Misiti, 1996).

Figura 2.12: Correspondência entre escalas e frequências na análise ondeleta. (wavelet Toolbox – Misiti, 1996).

Figura 2.13: Parte real da função Morlet para $w_0 = 8$ (Fonte: Torrence & Compo; A practical guide to wavelet analysis, 1998).

CAPÍTULO 3

Figura 3.1: Filtragem para a série de TMA do IAG-USP referente ao ponto 1, a cor em negro destaca o espectro gerado pelo filtro de Lanczos, em vermelho o resultado obtido pela filtragem da TO.

Figura 3.2: Filtragem para a série de *skin temperature* referente ao ponto 2, a cor em negro destaca o espectro gerado pelo filtro de Lanczos, em vermelho o resultado obtido pela filtragem da TO.

Figura 3.3: Filtragem para a série de *skin temperature* referente ao ponto 3, a cor em negro destaca o espectro gerado pelo filtro de Lanczos, em vermelho o resultado obtido pela filtragem da TO.

Figura 3.4: Série temporal (acima), periodograma (abaixo) e EGO (direita) obtidos para os dados de TMA do ponto 1 para o período de 1982-2005.

Figura 3.5: Série temporal (acima), periodograma (abaixo) e EGO (direita) obtidos para os dados de TMA do ponto 1 para o intervalo de 1985-1986.

Figura 3.6: Série temporal (acima), periodograma (abaixo) e EGO (direita) obtidos para os dados de TMA do ponto 1 para o intervalo de 2002-2003.

Figura 3.7: Série temporal (acima), periodograma (abaixo) e EGO (direita) obtidos para os dados de SKIN T do ponto 2 para o período de 1982-2005.

Figura 3.8: Série temporal (acima), periodograma (abaixo) e EGO (direita) obtidos para os dados de SKIN T do ponto 2 para o intervalo de 1985-1986.

Figura 3.9: Série temporal (acima), periodograma (abaixo) e EGO (direita) obtidos para os dados de SKIN T do ponto 2 para o intervalo de 2002-2003.

Figura 3.10: Série temporal (acima), periodograma (abaixo) e EGO (direita) obtidos para os dados de SKIN T do ponto 3 para o período de 1982-2005.

Figura 3.11: Série temporal (acima), periodograma (abaixo) e EGO (direita) obtidos para os dados de SKIN T do ponto 3 para o intervalo de 1991-1993.

Figura 3.12: Série temporal (acima), periodograma (abaixo) e EGO (direita) obtidos para os dados de SKIN T do ponto 2 para o intervalo de 2000-2003.

Figura 3.13: Série temporal (acima), periodograma (abaixo) da parte real dos coeficientes da ondeleta obtidos para os dados de TMA do ponto 1 para o intervalo de 1985-1986.

Figura 3.14: Série temporal (acima), periodograma (abaixo) da parte real dos coeficientes da ondeleta obtidos para os dados de SKIN T do ponto 2 para o intervalo de 1985-1986.

Figura 3.15: Série temporal (acima), periodograma (abaixo) da parte real dos coeficientes da ondeleta obtidos para os dados de SKIN T do ponto 3 para o intervalo de 1991-1993.

Figura 3.16: Série temporal (acima), periodograma (abaixo) da parte real dos coeficientes da ondeleta obtidos para os dados de TMA do ponto 1 para o intervalo de 2000-2003.

Figura 3.17: Série temporal (acima), periodograma (abaixo) da parte real dos coeficientes da ondeleta obtidos para os dados de SKIN T do ponto 2 para o intervalo de 2000-2003.

Figura 3.18: Série temporal (acima), periodograma (abaixo) da parte real dos coeficientes da ondeleta obtidos para os dados de SKIN T do ponto 3 para o intervalo de 2000-2003.

Figura 3.19: Série temporal 1, composta por duas séries de amplitudes diferentes para um mesmo período.

Figura 3.20: Periodograma de ondeleta gerado pelo ECO a partir das séries temporais de diferentes amplitudes, ao lado a barra de cores indicando a intensidade das correlações.

Figura 3.21: ECO obtido a partir da correlação cruzada entre as séries da fig. 3.19.

Figura 3.22: Espectro de coerência obtido a partir da correlação cruzada da série da fig. 3.19.

Figura 3.23: ECO obtido a partir da correlação cruzada entre as variáveis TMA e SKIN T 2, para os pontos 1 e 2, respectivamente.

Figura 3.24: ECO obtido a partir da correlação cruzada entre as variáveis TMA e SKIN T 3, para os pontos 1 e 3, respectivamente.

Figura 3.25: Espectro de coerência obtido a partir da correlação cruzada entre as variáveis TMA e SKIN T 2, para os pontos 1 e 2, respectivamente.

Figura 3.26: Espectro de coerência obtido a partir da correlação cruzada entre as variáveis TMA e SKIN T 3, para os pontos 1 e 3, respectivamente.

Figura 3.27: Anomalias de Skin temperature (Climatologia 1968-1996) para o mês de Agosto/1992, derivadas do projeto de reanálise do NCEP/NCAR. Os valores em tons avermelhados indicam anomalias positivas, enquanto que tons azulados indicam anomalias negativas.

Figura 3.28: Mesmo que a fig. 3.27, exceto para o mês de Junho/1985.

Figura 3.29: Mesmo que a fig. 3.27, exceto para o mês de Julho/1985.

Figura 3.30: Mesmo que a fig. 3.27, exceto para o mês de Maio/1992.

Figura 3.31: Mesmo que a fig. 3.27, exceto para os meses de Junho a Julho/1992.

Figura 3.32: Mesmo que a fig. 3.27, exceto para o mês de Agosto/2002.

Figura 3.33: Mesmo que a fig. 3.27, exceto para o mês de Setembro/2002.

Figura 3.34: Mesmo que a fig. 3.27, exceto para o mês de Outubro/2002.

Figura 3.35: Mesmo que a fig. 3.27, exceto para o mês de Novembro/2002.

CAPÍTULO 4

LISTA DE TABELAS

CAPITULO 1

CAPÍTULO 2

CAPÍTULO 3

Tabela 3.1: Indicativo da série temporal corrida (1-7671) e os respectivos inícios dos anos (1982-2003).

CAPÍTULO 4

CAPÍTULO 1

1. INTRODUÇÃO

A variabilidade do sinal meteorológico resultante das interações que ocorrem dentro do sistema acoplado oceano-atmosfera (OA) é um elemento climático importante no desenvolvimento de trabalhos de análise observacional, particularmente os ligados à climatologia. Estas interações atuam em diversas escalas de tempo e são observadas freqüentemente em regiões tropicais, em latitudes médias e altas. A predição dessa variabilidade, entretanto, é extremamente difícil, pois, as interações envolvidas neste sistema possuem muitas variáveis, e complexos *feedbacks*, que não são exatamente previsíveis. Os mecanismos relacionados a este sistema são, a priori, completamente aleatórios. Recentemente, análises mais precisas têm revelado certa “ordem” neste sistema, que se expressa sob a forma de uma invariância de escala (Mandelbrot, 1985).

Muitos componentes associados ao sinal meteorológico deste sistema manifestam esta invariância, tais como a temperatura da superfície do mar (TSM), temperatura média do ar (TMA), precipitação, dentre outros. A invariância de escala, a auto-similaridade e a aleatoriedade são, portanto, atributos presentes no sinal meteorológico deste sistema, o primeiro diz respeito à semelhança de padrões em diversas escalas, o segundo baseia-se na simetria geométrica e o terceiro atributo está relacionado à dinâmica caótica do sistema, assinalando a imprevisibilidade da forma específica a ser gerada.

Estas variáveis são elementos de sistemas complexos naturais com estruturas localizadas entre séries temporais periódicas e aleatórias. E com o objetivo de compreender melhor o comportamento complexo, bem como os padrões associados aos fenômenos do sistema OA, faz-se necessário à aplicação de métodos matemáticos que contemplem a natureza não-linear dos mesmos. A compreensão dos padrões dinâmicos e do comportamento dessas variáveis nas diferentes escalas de tempo, que vão desde a escala sub-sinótica até à escala interanual, são de suma importância para o entendimento da variabilidade climática local dentro do sistema OA.

Uma das perguntas freqüentemente colocada por usuários de previsões meteorológicas é se essa variabilidade pode ter ou não momentos de previsibilidade, comportando-se, por exemplo, como uma oscilação quase periódica em determinados períodos (Schneider, 2004). As oscilações podem estar associadas a ciclos quase regulares, porém imersas dentro de

características não-lineares. Em suma, quais seriam os padrões de comportamento dessas oscilações no sistema acoplado OA?

1.1 – Oscilações intrasazonais: A oscilação de Madden-Julian (OMJ)

Alguma resposta a esta pergunta começou a ser dada através da descoberta da *Oscilação Intrasazonal* por Madden e Julian no começo da década de 70, o que gerou uma série de estudos cujo objetivo era compreender a influência dessas oscilações no regime de precipitação, especialmente em latitudes tropicais. Essas oscilações, reportadas na literatura como Oscilação de Madden e Julian (OMJ) foram inicialmente denominadas como distúrbios atmosféricos que se propagam sobre o oceano Pacífico Oeste numa escala de tempo de 40-50 dias. Os autores ainda interpretaram-nas como células de circulação zonal equatorial, moduladas pela nebulosidade que atua sobre a região, entretanto, novos cálculos no ano de 1972 com dados de outras estações revelaram picos espectrais com máximos na coerência entre 40 e 50 dias (Vitorino, 2003).

Inicialmente, Madden e Julian não encontraram evidências desta oscilação na baixa troposfera no Atlântico e oeste da África. Através da análise dos campos de vento zonal, razão de mistura e temperatura eles investigaram a convergência (divergência) em baixos (altos níveis). Os resultados apoiaram a idéia de que os distúrbios convectivos tinham origem no oceano Índico. Posteriormente, vários estudos detectaram uma propagação para leste das anomalias de radiação de onda longa emergente (ROLE) e por consequência, das células convectivas num período entre 40-50 dias, caracterizando assim a OMJ (Madden e Julian, 1971, 1972).

Estudos como o de Lau e Chan (1988) mostra uma propagação para leste das anomalias de ROLE relacionados com a OMJ, estendendo-se desde o oceano Índico até o Pacífico central equatorial. Existem vários estudos observacionais acerca das OMJ, mas somente alguns destes estudos mostram um entendimento teórico da oscilação (Vitorino, 2003).

Lau e Peng (1987) propuseram duas hipóteses teóricas para a propagação da OMJ para leste. Uma delas sugere que existe uma fonte de calor oscilando no local e uma outra fonte de calor forçada internamente. A primeira hipótese sugere que a convecção associada com a oscilação de 40-50 dias está presente entre o oceano Índico e o Pacífico oeste, pois a fonte de calor é induzida por processos locais. Como a fonte de calor associada com a oscilação está

confinada dentro dos trópicos, os distúrbios de ondas transientes gerados por aquecimento são propagados para longe da região de origem na forma de ondas equatoriais. A segunda hipótese sugere um distúrbio gerado próximo ao Equador que se dissipa fora de sua região de origem quando não ocorre aquecimento interno. Entretanto, a presença de um mecanismo de aquecimento interno poderá manter ou amplificar estes distúrbios fora de sua região de origem.

Os autores testaram as duas hipóteses através de um modelo dinâmico simples em coordenadas σ (sigma). Eles observaram que a fonte de calor oscilando no local só produz ondas de Kelvin, mas não origina a propagação para leste observada nas OMJ. Assim, eles perceberam que a máxima instabilidade da larga escala pode influenciar nas pequenas escalas. Segundo estes autores, esta teoria explica a preferência da propagação para leste das oscilações intrasazonais.

Kayano e Kousky (1992) mostraram a importância do monitoramento das OMJ, pois estas fornecem importantes informações para o monitoramento climático e possivelmente a previsão de médio prazo para algumas regiões tropicais (Vitorino, 2003).

1.2 – Oscilações de baixa frequência – O fenômeno El Niño/Oscilação Sul (ENOS)

Um outro tipo de oscilação de baixa frequência resultante de interações no sistema OA e de grande importância para a atmosfera da região tropical é o El Niño/Oscilação Sul (ENOS). Philander (1990) relata que, do ponto de vista meteorológico, as variações interanuais na atmosfera tropical são causadas por mudanças na TSM. Do ponto de vista oceanográfico, as mudanças na TSM são causadas pela variabilidade atmosférica. A duração do fenômeno El Niño pode variar entre 12 e 18 meses, enquanto que a ocorrência do fenômeno se dá em intervalos de dois anos até uma década. Também é válido ressaltar que há períodos em que os eventos de El Niño são mais intensos do que em outros (Philander, 1990).

Alguns estudos mostram que existe uma similaridade espacial entre as anomalias de convecção e os padrões de circulação associados com a OMJ e o ENOS (Lau e Chan, 1986). Lau e Chan sugerem que a ocorrência do ENOS pode ser resultado da amplificação da variabilidade atmosférica interna das oscilações de 40-50 dias, através da interação do sistema OA, favorecida pela TSM relativamente alta sobre o oceano Índico e Pacífico Oeste.

Os resultados encontrados por Lau e Chan mostram que o modo dominante na variação da convecção tropical está associado a fenômenos que ocorrem em múltiplas escalas

de tempo, tais como: as flutuações de 40-50 dias, o ENOS e a modulação anual, e que estas variações estão relacionadas com flutuações na circulação equatorial de Walker (Vitorino, 2003).

Kousky e Cavalcanti em estudo sobre as características e a evolução dos eventos de Oscilação Sul (OS) associados às anomalias de precipitação mostram que a natureza persistente destes eventos é devida ao forte acoplamento entre a atmosfera e o oceano. Os autores enfatizam que, embora a causa inicial da oscilação seja desconhecida, uma vez iniciada, a OS segue certa seqüência de eventos com efeitos bem definidos na precipitação sobre uma grande parte dos trópicos e subtropicais (Kousky e Cavalcanti, 1984).

A maior parte dos estudos sobre variabilidade intrasazonal utiliza a análise espectral de Fourier (AF). Nesta análise, é determinado que o sinal seja estacionário, cujas oscilações são representadas como a soma de funções senos e cossenos. Isto não ocorre em sinais com características complexas, como é o caso do sinal meteorológico que representa o sistema OA (Vitorino, 2003; Schneider, 2004).

O presente estudo é motivado pela necessidade de uma descrição local dos padrões de escala presentes neste sistema, aqui representado pela oscilação intrasazonal entre a cidade de São Paulo (CSP) e o oceano Atlântico Sul (OAS) adjacente ao continente, utilizando a temperatura como parâmetro de correlação para descrever os padrões das escalas de tempo que atuaram na intensificação dessa variabilidade em determinados períodos.

Para atingir este objetivo foram empregadas as seguintes ferramentas matemáticas na análise de séries temporais de temperatura, dentre estas destacamos a Transformada em Onduleta (TO). Com a TO é possível identificar a distribuição, a interação de energia em diversas escalas e o comportamento espectral que as oscilações intrasazonais apresentam em cada período investigado. Esta ferramenta oferece uma vantagem em relação à AF, pois permite detectar tanto a oscilação quanto a localização temporal dos componentes do sinal meteorológico analisado, o que permite a associação dos períodos observados com os fenômenos estudados (Vitorino 2003; Schneider, 2004; Reboita, 2004).

Este método foi utilizado na análise dos seguintes dados de temperatura; temperatura média do ar (TMA) na cidade de São Paulo que corresponde à série histórica da estação meteorológica do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo (EM-AG/USP) e a temperatura de película, ou “*skin temperature*” (SKIN T), obtida do Projeto de reanálises do *National Center for Environmental Prediction* (NCEP) que forma a base dos dados sobre o oceano Atlântico Sul adjacente. O período

analisado compreende os anos de 1982 a 2005. O presente trabalho também discute as mudanças de fase e a transição de regime, verificadas em eventos sinóticos ocorridos num dado intervalo de tempo na região de estudo. Foram selecionados alguns estudos de caso onde são feitas discussões sobre as características espectrais e a interação entre escalas que colaboraram para variação na intensidade do sinal meteorológico investigado. Dessa forma, são mostrados qualitativamente os padrões de distribuição de energia entre as diversas escalas de frequência que compõem a variabilidade climática entre a cidade de São Paulo e o oceano Atlântico Sul adjacente durante o período analisado.

1.3 – Revisão Bibliográfica

Nesta seção são descritos de forma resumida alguns estudos que utilizaram técnicas de análise espectral em séries temporais que representam o sinal meteorológico. São abordados o comportamento complexo da variabilidade atmosférica, bem como alguns dos elementos teóricos e observacionais dos principais mecanismos que influenciam as oscilações intrasazonais.

1.3.1 – Complexidade do sinal meteorológico e a variabilidade em multiescalas

Lorenz (1969) foi o pioneiro em estudos acerca do comportamento irregular da circulação geral atmosférica. Em seu estudo sobre a circulação geral da atmosfera ele utilizou um modelo baseado em três equações diferenciais ordinárias integradas numericamente com ou sem variações da forçante térmica externa, para representar aspectos da circulação de Hadley. Neste caso, Lorenz observou que com a inclusão do ciclo sazonal, podem ocorrer variações interanuais intensas, com alternâncias irregulares entre os verões ativos, onde as correntes de vento oeste zonal são submetidas a fortes oscilações, em oposição a verões inativos, quando as oscilações são menores. Lorenz conclui que um sistema simples representando uma célula de convecção pode ser resolvido numericamente. O autor ressalta que todas as soluções encontradas são instáveis, e geralmente associadas a termos não periódicos. A grande contribuição de Lorenz foi mostrar a relação existente entre as condições iniciais do sistema e os diferentes estados que estas podem gerar a partir de pequenas variações (Lorenz, 1969).

Assim, considerando-se como premissa a não-periodicidade presente no sinal meteorológico, procura-se provar através das características mais energéticas do sinal que este sistema real é muito mais caótico do que se pensa e que essa complexidade é refletida através da interação entre as várias escalas do sistema OA, responsáveis pelos padrões de circulação geral.

O fato de as oscilações intrasazonais na atmosfera tropical estarem associadas a um processo de múltiplas escalas de tempo, apresentando flutuações irregulares, torna-se um obstáculo para a previsão de tempo de longo prazo. Esta questão pode estar relacionada à dificuldade de se observar as escalas menores do movimento que se manifestam nas escalas maiores, através de interações de escalas (Vitorino, 2003).

Um estudo de Cai e Mak (1990) sugere que ondas de escala planetária de baixa frequência e ondas de escala sinótica de alta frequência, dentro de um estado equilibrado da atmosfera são simbioticamente dependentes umas das outras. Nesse contexto de investigação da interação entre escalas, Cuff e Cai (1995), em um estudo observacional sobre a interação entre os transientes de baixa e alta frequência, obtiveram resultados sobre a transferência de energia entre os modos de baixa e alta frequência. Os autores argumentam que os transientes de baixa frequência organizam os transientes de alta frequência (Schneider, 2004).

1.3.2 – Análise espectral e observacional da variabilidade intrasazonal na América do Sul: Aplicações da Transformada em Ondeleta (TO)

Em face da dificuldade em se caracterizar essas oscilações torna-se necessário utilizarmos um método de análise adequado na localização temporal das estruturas de multiescalas. O método usado neste estudo tem sua origem na língua francesa, criada por Meyer (1990) é chamado de “*transformé ondelette*”, na língua inglesa é denominado de “*wavelet transform*”, traduzidos para o português como transformada em ondeletas (SÁ et al., 1998), ou ainda, ondaletas (Morettin, 1999). Neste estudo será chamado de Transformada em Ondeletras (TO) (Schneider, 2004).

Este método é recomendado para o estudo de fenômenos transientes, especialmente heterogêneos e que atuam simultaneamente em várias escalas do escoamento (Weng e Lau, 1994; Torrence e Compo, 1998). Enquanto o filtro passa-banda seleciona energias associadas a um intervalo espectral, considerando-as como “médias” em cada frequência, a TO detecta as

oscilações a partir de uma janela que se alarga para as baixas frequências e se estreita para focar as altas frequências (Foufoula-Georgiou e Kumar, 1994).

Vitorino (2003) em estudo sobre a variabilidade intrasazonal sobre a América do Sul e oceanos adjacentes aplicou a TO via função Morlet às séries temporais de reanálises de ROLE e PNM (Pressão ao nível do mar), no período de 1979 a 1996. A autora detectou que a banda de alta frequência (2-10) dias é dominante na região praticamente durante o ano todo. Além disso, a autora ainda observou que na banda intrasazonal de 30-90 dias o sinal de ROLE aparece no verão, mas com pouca intensidade. Já a PNM revela maior intensidade durante o inverno do hemisfério sul. Os resultados para o inverno deram origem a alguns estudos de casos de ondas de frio e bloqueios atmosféricos na região (Schneider, 2004).

As análises dos casos indicam que os episódios de ondas de frio no Sul do Brasil atingem as regiões Sudeste e Sul da Amazônia e estão associados com oscilações de PNM na banda de 30-90 dias e que os bloqueios atmosféricos revelam maior intensidade de energia de PNM nas bandas de 2-10 dias e de 10-20 dias.

Schneider (2004) com o objetivo de detectar as frequências de oscilação atmosférica no período de inverno nas regiões Sul, Sudeste (SE) e Centro-Oeste do Brasil (COB), com ênfase na escala intrasazonal, aplicou os métodos da Transformada de Fourier (TF) e Transformada de Ondeletas (TO) às séries temporais de ROLE, PNM, TMA e altura geopotencial no nível de 500 mb.

Os resultados com a TF e TO na escala intrasazonal encontrados por este autor foram semelhantes e apresentaram padrões de variabilidade interanual e atividade na banda intrasazonal. Do ponto de vista climatológico, a TF destacou as oscilações de alta frequência (banda de 2-7 dias) no Sul do Brasil. Na banda de 36-46 dias as oscilações de TMA demonstraram serem as mais dominantes. Na ROLE (banda 30-60 dias) foram observadas oscilações com maiores amplitudes na região COB. Por meio da TO este autor também investigou o espectro e a interação das escalas ao longo de uma série de eventos particularmente frios (1975 1979 e 1994). Foi observada uma transferência de energia de baixa frequência para alta frequência durante a ocorrência dos eventos frios.

A TO também foi utilizada por vários autores em estudos sobre o fenômeno ENOS. Esta técnica foi aplicada a dois conjuntos de dados: um atmosférico e outro oceânico, do período de 1870 a 1988, por Gu e Philander (1995). O objetivo dos autores era analisar a variabilidade interanual e o ciclo anual da região equatorial. Os resultados indicaram que a amplitude do ENOS foi grande no período de 1885 a 1915, pequena entre 1915 a 1950 e

umentando rapidamente após 1960. A resolução temporal da TO apropriada para o ENOS varia entre cerca de 5 a 10 anos. Estes autores reportam que as variações decadais na amplitude do ENOS não são marcadas por variações correspondentes na amplitude do ciclo anual (Schneider, 2004).

Reboita (2004) em estudo sobre a determinação dos sistemas atmosféricos que causam maior variabilidade climática no extremo sul do Brasil, empregou a TO a dois conjuntos de dados, um medido no continente no período de 1990 a 2001, e outro medido no oceano no período de 2001 a 2002, observando que a maior variância de ondeleta em todas as variáveis atmosféricas esteve associada ao ciclo anual, com exceção das componentes zonal e meridional da velocidade do vento e da precipitação. A autora relata que nestas três variáveis a maior energia foi relacionada à passagem de massas de ar e a formação de sistemas frontais e estes sistemas, por sua vez, assumiram maior importância quando o ciclo anual foi descontado das demais variáveis. Ela concluiu que o ciclo anual é o responsável pela maior parte da variabilidade climática no extremo sul do Brasil juntamente com as massas de ar e sistemas frontais. A autora relata, entretanto, que o clima desta região também é afetado pelas OMJ, bloqueios atmosféricos e fenômeno ENOS (Reboita, 2004).

1.3.3 – Padrões de variabilidade climática entre a cidade de São Paulo e o oceano Atlântico Sul adjacente

Diversos estudos mostram que o padrão climático sobre a cidade de São Paulo e o oceano Atlântico Sul adjacente, está associado à ação de vários sistemas meteorológicos, dentre os quais podemos citar: Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), Dipolo do oceano Atlântico, Sistemas Frontais (SFs), de Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis (VCANs), ENSO (El niño-Oscilação Sul) e Ciclogêneses (Nobre, 1988; Silva Dias et al., 1988; Marton, 2000). Esses sistemas são responsáveis pelos modos de variabilidade da atmosfera através de múltiplas escalas de tempo (Kousky, 1988; Lau e Chan, 1988).

A cidade de São Paulo está localizada na Região Sudeste do Brasil (SEB), e possui sua economia notadamente voltada para a atividade industrial. Um dos exemplos conhecidos sobre como a variabilidade climática afeta as atividades econômicas em uma localidade ocorreu da deficiência de chuvas no verão e outono do ano de 2001, o que acarretou com uma redução na vazão das bacias da região nordeste, centro-oeste e sudeste do Brasil, que se refletiu na geração de energia elétrica para essas regiões, forçando o governo a implementar

um programa de racionamento para evitar um colapso de energia (black-out ou apagão) (Climanálise, 2001). Um outro aspecto do sistema OA local e que atua como um mecanismo de variabilidade decadal de grande influência no clima desta região é a temperatura da superfície do mar (TSM) do oceano Atlântico.

Um outro aspecto do sistema OA local e que atua como um mecanismo de variabilidade decadal de grande influência no clima desta região é a temperatura da superfície do mar (TSM) do oceano Atlântico. Silva (1988) encontrou uma significativa correlação entre os dados mensais de TSM para uma área próxima da costa do estado de São Paulo com os dados mensais da temperatura da cidade de São Paulo.

Cardoso e Silva Dias (2000), em estudo observacional sobre a relação entre a TMA na cidade de São Paulo e a TSM nos oceanos Atlântico e Pacífico, estabeleceu relações diagnósticas e prognósticas. Primeiramente, através da análise de correlações simples e estudo de casos de invernos extremos, o estudo confirmou as indicações da relação entre a TSM e a temperatura de São Paulo. Posteriormente, foi utilizada a análise de componentes principais e análise canônica, com a finalidade de realizar uma pré-filtragem dos dados de TSM de três formas distintas: apenas Pacífico, apenas Atlântico, e ambos os oceanos, conjuntamente. Os resultados encontrados neste estudo para as pré-filtragens foram utilizados como preditores da temperatura de São Paulo, através do uso de modelos linear e não-linear, os quais foram baseados em regressão linear múltipla e redes neurais, respectivamente. Os autores ressaltam, entretanto, que a TSM é apenas um dos fatores que controla a variação climática, sugerindo outros mecanismos como a disposição e a intensidade da Alta Subtropical do Atlântico Sul, sistemas frontais, ciclogêneses e fenômenos de grande escala como o ENSO (Cardoso, 2000).

Cardoso e Silva Dias (2000) também identificaram posteriormente as regiões dos oceanos Atlântico Sul e Pacífico Sul que possuem correlações significativas com a temperatura na cidade de São Paulo no inverno. Para ambos os oceanos, os autores observaram a presença de um dipolo de correlações significativas. Correlações mais altas foram verificadas para o caso do oceano Atlântico sudoeste e no oceano Pacífico tropical leste, persistindo com a defasagem da TSM (1 a 3 meses). Foram desenvolvidos modelos empíricos de previsão de temperatura do ar usando modos de TSM defasada como preditores (Cardoso e Silva Dias, 2000).

Outros períodos de oscilação foram documentados em estudo de Dorelo (1990), para a cidade de São Paulo. Diferentes resultados foram encontrados para as oscilações nos campos de pressão, temperatura e precipitação. Além da oscilação entre 7-9 dias, Dorelo encontrou

picos significativos em torno de cinco dias, principalmente no campo de pressão atmosférica. O autor sugere que a oscilação de cinco dias poderia ser uma resposta ao deslocamento de ondas planetárias, do tipo tropical, estando associada aos vórtices de grande escala de altos níveis (Yanay et al, 1968). Freitas (1998), usando totais de precipitação diária em pântadas, para o período de 1967-1992, nos estados do Paraná, Santa Catarina e São Paulo e identificou periodicidades na faixa dos 10 dias para a época de inverno (Freitas, 1998).

O objetivo central deste trabalho é mostrar a existência de padrões de escala similares, dentro do sistema OA representados pela cidade de São Paulo e o oceano Atlântico Sul adjacente através da análise em ondeleta. Utilizando séries temporais de temperatura como parâmetro de correlação, foram identificados os padrões de escala que mais contribuíram para a variabilidade climática local nesta região.

Este estudo está organizado da seguinte maneira: no capítulo 2 é apresentada a base dos dados e a metodologia empregada neste trabalho; no capítulo 3 são mostrados os resultados das análises, onde se destaca a TO e são mostrados também os resultados do espectro de energia para a oscilação intrasazonal dentro da região de estudo, em especial os resultados obtidos com o Espectro Cruzado de Ondeleta (ECO) e no capítulo 4 são apresentadas as considerações finais e sugestões para trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2

2. DADOS METEOROLÓGICOS E METODOLOGIA

2.1 Dados utilizados

A base de dados do presente estudo consiste de séries temporais de temperatura obtidas por meio dos registros diários medidos em graus Celsius (°C), de 1º de janeiro de 1982 a 31 de dezembro de 2005, ininterruptamente. Dessa maneira, obteve-se um total de 8.766 dados diários. Foram utilizados os dados climáticos obtidos na EM-IAG/USP e do projeto de reanálises do NCEP (Kalnay et al., 1996). Estes dados formam um conjunto bastante representativo do sinal meteorológico do sistema OA sobre a CSP e o OAS adjacente.

Os dados oceânicos utilizados neste estudo foram obtidos a partir da média de 2 caixas que integram o Projeto de reanálises do NCEP (obtidos em <http://www.cdc.noaa.gov/cgi-bin/>) que compõem os pontos referentes à região do OAS. A resolução espacial de cada caixa é de 1.87° x 1.87°, e suas coordenadas são: 23.8°S-45°W; 23.8°S-43. 13°W. No presente estudo, a abrangência total da região considerada está entre 22°S e 42° W. Alguns trabalhos citados anteriormente desenvolveram seus estudos utilizando esses dados somente a partir de 1979, pois apenas a partir desse período as estimativas de satélite foram incorporadas nos dados de reanálises.

Os dados de superfície referentes à variável temperatura média do ar (TMA) foram obtidos da série histórica da EM-IAG-USP. Os dados de TMA são oriundos de observações diárias medidos sobre uma estação meteorológica convencional, situada no bairro da Água Funda na cidade de São Paulo, cuja localização é 23.65°S e 46.62°W. Esses dados têm sido amplamente utilizados, sendo, portanto, uma importante e fidedigna fonte para estudos climatológicos.

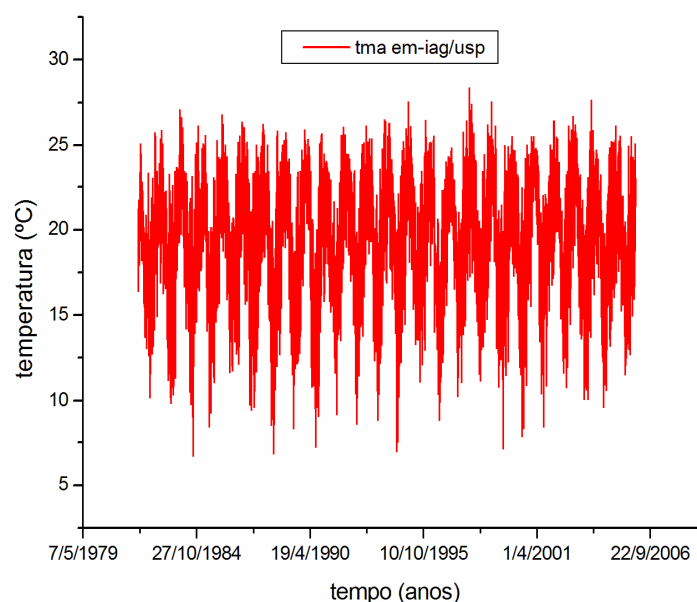


Fig. 2.1 – Série temporal total da temperatura média do ar (TMA), em °C, medida sobre a estação meteorológica do IAG-USP, referente ao ponto 1, localizado na cidade de São Paulo.

Essa região engloba diferentes características da variabilidade climática resultante de interações no sistema OA. Para facilitar a identificação através da extensão meridional, os pontos serão identificados de acordo com sua numeração, como indicado na figura 2.2: o ponto ou região 1 pertence à fonte de dados medida sobre o continente e as regiões 2 e 3 pertencem aos dados oceânicos.

O ponto 1 localiza-se sobre o continente, entre o Planalto Paulistano e a Serra do Mar, sofrendo assim a ação de diversos sistemas meteorológicos, tais como brisas, frentes frias, ZCAS, dentre outros. Por outro lado, os pontos 2 e 3 abrangem, respectivamente, uma região oceânica próxima a costa e outra mais distante, entretanto, ambas pertencem a uma zona de transição climática (latitude de 23°S), possuindo características climáticas intermediárias (Climanálise Especial, 1996), ou seja, além da ação dos sistemas anteriormente mencionados, são, devido a sua posição geográfica, mais fortemente controlados pela ação da alta subtropical do Atlântico Sul.

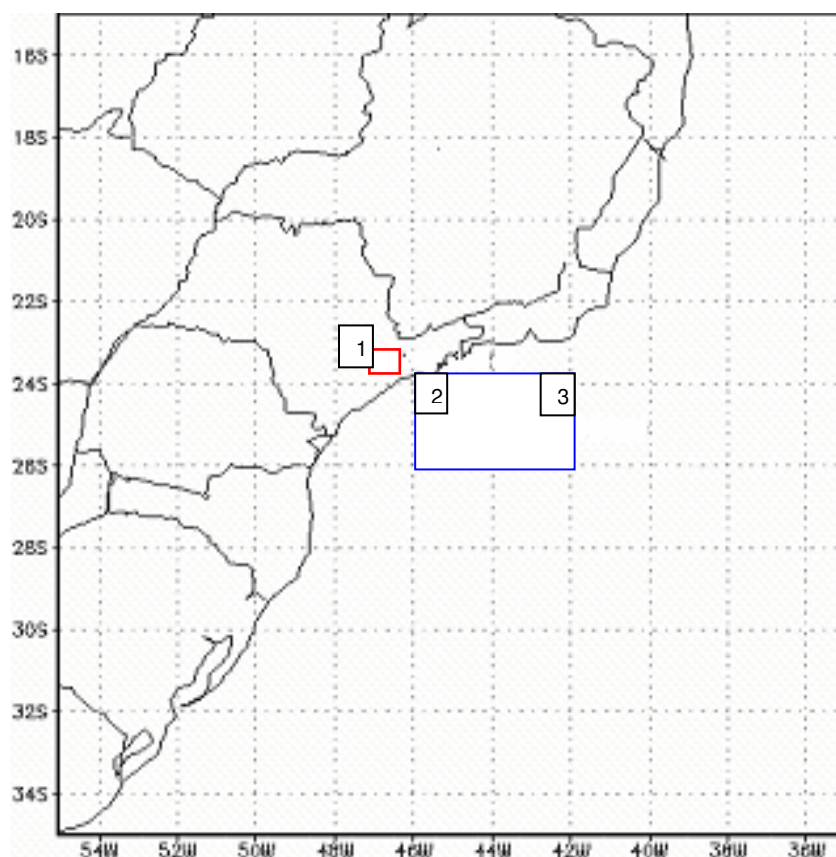


Fig. 2.2 – Área de estudo: no retângulo em vermelho (ponto 1) destaca-se a localização da EM-IAG/USP e em azul (pontos 2 e 3) está representada a região do oceano Atlântico Sul cujos dados foram obtidos do projeto de reanálises do NCEP.

2.2 – O Conjunto do *National Center for Environmental Prediction (NCEP)*

Os dados provenientes do projeto de reanálises do NCEP requerem maior atenção durante sua abordagem, pois esses dados são provenientes de modelos numéricos onde os dados observados são interpolados e suavizados, para posterior assimilação pelos modelos. Isto resulta numa série de eliminações de informações dos distúrbios localizados em algumas escalas temporal e espacial (Kalnay et al., 1996). Esses dados também são obtidos via sensoriamento remoto por satélites, onde podemos ressaltar também os problemas que afetam os dados.

O maior problema é que são dados coletados em superfície, ou seja, qualquer inferência sobre processos internos será sujeita a algumas limitações. Os sensores oceanográficos que coletam tais dados operam na banda espectral do infravermelho (IV) são

relativamente abundantes. Esta tecnologia já tem mais de três décadas e produziu as mais longas séries temporais de dados oceanográficos.

A variável oceanográfica de maior interesse obtida através dos sensores de IV é a temperatura da superfície do mar (TSM). Entretanto, a camada de água que efetivamente emite a radiação medida pelo sensor é extremamente delgada (cerca de $10\mu\text{m}$) e recebe o nome de “temperatura de película”, do inglês “*skin temperature*” (região em azul da figura 2.2). Essa espessura corresponde ao comprimento de atenuação da radiação infravermelha na água. A variável “*skin temperature*” é também utilizada como uma aproximação para a TSM. Como a temperatura sobre áreas oceânicas é igual ao valor inicial da TSM de Reynolds (Kalnay et al., 1996), alguns autores (Liebmann et al., 1999) mostraram a qualidade desse conjunto de dados para estudos sobre variabilidade intrasazonal nos trópicos e subtropicais.

O problema de se inferir a temperatura do oceano a partir de camadas muito finas é que o efeito do aquecimento diurno é exagerado. É importante ressaltar que em geral os satélites que portam estes sensores estão em órbita sincronizada com o sol, isto é, passam sobre uma dada área no mesmo horário. Levar este fator em conta quando da análise destes dados evitará a introdução de tendências (Muza, 2005).

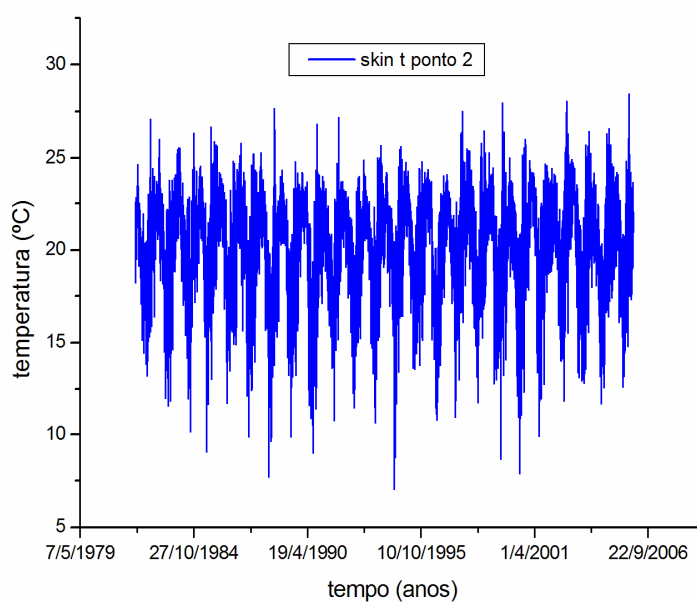


Fig.2.3 – Série temporal total de *skin temperature*, que compõe a região 2, obtida do Projeto de Reanálises do NCEP, cuja localização é 45°W , 23.8°S . Esta série mostra similaridade espacial com a série de TMA da EM-IAG-USP (ponto 1), resultante da influência do continente.

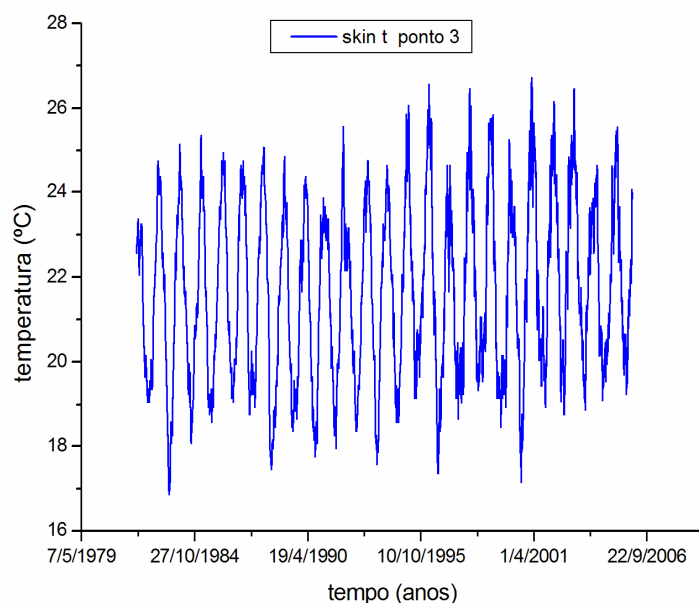


Fig.2.4 – O mesmo que figura 2.3, exceto para a região 3, localizada em 43.13°W, 23.8°S. Esta série temporal mostra um padrão espacial diferenciado em relação à série da EM-IAG-USP.

Com base em estudos anteriores que utilizaram esses dados, fica evidente que os mesmos conseguem reproduzir características dos sistemas meteorológicos e oceânicos em diversas escalas. Mas, com relação à representação das escalas de tempo de alta frequência e suas interações, possivelmente algumas escalas sofrem alteração no sinal, tanto em energia quanto em fase, em função da qualidade da informação local. Tais limitações foram consideradas antes da aplicação dos métodos espectrais de análises.

A escolha do período de 1982 a 2005 foi adotada, pois, ao serem consultados os dados da série original (1950 a 2005), ficaram evidentes a impossibilidade de se detectar oscilações para períodos anteriores ao final da década de 70. Este fato se deve a mudança nas técnicas de coletas e instrumentos utilizados para captação dos dados no decorrer dos anos. Entretanto, observa-se que no período compreendido entre 1982 a 2005 já é possível detectar variações no sinal das séries temporais, como mostra a figura 2.5.

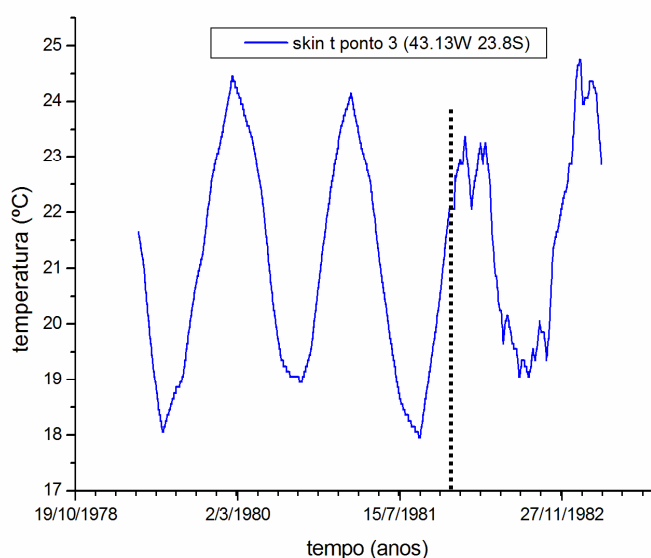


Fig.2.5 – Análise da série temporal de temperatura de película (*Skin Temperature*) do Conjunto de dados do National Center for Environmental Prediction (NCEP). A partir do tracejado observa-se a alteração da resolução dos dados devido a mudanças nos sensores utilizados.

2.3 – Métodos de Análise de Séries Temporais

Esta seção contempla as principais técnicas de análise e análise espectral utilizadas em séries temporais. Tais metodologias incorporaram novos conceitos matemáticos, a partir das múltiplas aplicações que foram sendo dadas com o decorrer do tempo. Notoriamente, destaca-se nesta seção os conceitos matemáticos relativos às duas principais análises utilizadas em estudos que envolvem séries temporais: a análise de Fourier clássica e a análise em Ondeleta.

2.3.1 – Análise de Fourier

A análise de Fourier, ou análise espectral de uma série temporal consiste em expressar uma função $f(t)$, considerando os fenômenos investigados, do tipo periódico, como uma somatória de funções trigonométricas de senos e cosenos. Um dos princípios fundamentais na análise de Fourier é que um sinal periódico, de período $2L$, definido no intervalo fechado $[-L, L]$ possa ser representado por:

$$f(t) = \sum_{n=0}^{\infty} A_n \text{sen}(\dot{\omega}_n t + \phi_n) = \sum_{n=0}^{\infty} [a_n \cos(\dot{\omega}_n t) + b_n \text{sen}(\dot{\omega}_n t)] \quad (2.1)$$

Em que os coeficientes a_n e b_n são chamados coeficientes de Fourier, cujos valores são consequentes da formação de uma base ortogonal pelas funções seno e cosseno dadas por:

$$a_0 = \frac{1}{L} \int_{-L}^L f(t) dt$$

$$a_n = \frac{1}{L} \int_{-L}^L f(t) \cos(\omega_n t) dt$$

$$b_n = \frac{1}{L} \int_{-L}^L f(t) \text{sen}(\omega_n t) dt$$
(2.2)

Se $f(t)$ tem período $T = 2L$ então ω_n é a frequência angular, para cada n dada por:
 $\omega_n = (2\pi/T)n = (\pi/L)n$ (em radianos por unidade de tempo), e o período relacionado à frequência angular é $T = (2\pi/\omega_n)n$ (em unidade de tempo). É comum escrever a equação 2.1 na forma:

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} \left[a_n \cos\left(\frac{\omega_n}{L} t\right) + b_n \text{sen}\left(\frac{\omega_n}{L} t\right) \right] \quad (2.3)$$

Pode-se dizer então que a equação (2.3) é a representação espectral de $f(t)$. O objetivo desta análise é obter a amplitude em função da frequência para cada senóide que compõe o sinal. Pela fórmula de Euler, pode-se escrever a série de Fourier na sua forma complexa:

$$f(t) = \sum_{h=-\infty}^{\infty} c_n e^{i\omega_n t / L} \quad (2.4)$$

em que os coeficientes c_n são obtidos por:

$$c_n = \frac{1}{2L} \int_{-L}^L f(t) e^{-i\pi n t / L} dt, \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad (2.5)$$

ou

$$\begin{aligned} & \frac{a_n - b_n}{2}, \quad \text{se } n \geq 1 \\ & \frac{a_0}{2}, \quad \text{se } n = 0 \\ & \frac{a_{|n|} - ib_{|n|}}{2}, \quad \text{se } n \leq -1 \end{aligned} \quad (2.6)$$

2.3.2 – A Transformada de Fourier

A Transformada de Fourier (TF) é um dos métodos mais utilizados em análise de séries temporais. A partir da série de Fourier é possível desenvolver sua transformada. Com as equações 3.4 e 3.5 e fazendo $h = \pi/L$ e $\omega_n = nh = n\pi/L$, $n=0, 1, 2, \dots$, então:

$$f(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} c_n e^{i\omega_n t} \quad (2.7)$$

$$c_n = \frac{h}{2\pi} \int_{-\pi/h}^{\pi/h} f(t) e^{-i\omega_n t} dt \quad (2.8)$$

Definindo-se

$$F(\omega_n) = \frac{1}{2\pi} \int_{-L}^L f(t) e^{-i\omega_n t} dt \quad (2.9)$$

Com $(L, -L) = (-\pi/h, \pi/h)$, temos que:

$$f(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} hF(\omega_n) e^{i\omega_n t} \quad (2.10)$$

fazendo $L \rightarrow \infty$ e $h \rightarrow 0$, considerando a equação (2.10) é uma integral de Riemann definida pela integral $F(\omega) e^{i\omega t}$, obtemos:

$$\mathfrak{F}\{f(t)\} = F(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-i\omega t} dt \quad (2.11)$$

$$f(t) = \mathfrak{F}^{-1}\{F(\omega)\} = \int_{-\infty}^{\infty} F(\omega) e^{i\omega t} dt \quad (2.12)$$

assumindo o t como o tempo e ω como a frequência angular, as equações (2.11) e (2.12) definem então a transformada de Fourier e sua inversa, respectivamente. As constantes 1 e $1/2\pi$ que precedem as integrais (2.11) e (2.12) podem ser substituídas por quaisquer constantes, desde que o produto seja igual a $1/2\pi$ (Chierice, 2003).

2.3.3 – A Transformada Discreta de Fourier

Séries temporais nem sempre correspondem a funções finitas ou contínuas. Mas remetem necessariamente a registros discretos de determinados fenômenos, representados por $f(t)$, com $f_0, f_1, f_2, \dots, f_{N-1}$, com um número N de observações amostrados em intervalos constantes de tempo Δt ou por um período T . Considerando $\Delta t = 1$, o conjunto de discreto de frequências de Fourier $\omega_n = 2\pi n/N\Delta t$, $n = 0, 1, 2, \dots, N-1$, o período $T_n = N\Delta t/n$ e definindo a transformada discreta de Fourier como sendo:

$$F_n = \frac{1}{N} \sum_{t=0}^{N-1} f_t e^{-i\omega_n t} \quad (2.13)$$

E a transformada discreta inversa de Fourier como:

$$f_t = \sum_{n=0}^{N-1} F_n e^{i\omega_n t} \quad (2.14)$$

A transformada discreta de Fourier tem sido amplamente utilizada na estimativa de espectros associados a processos estacionários (Chierice, 2003). O cálculo da transformada inversa de Fourier envolve $O(N^2)$ operações complexas, entretanto, o uso do algoritmo da chamada transformada rápida de Fourier (*Fast Fourier Transform*), conhecida como FFT, mostra que a TF pode ser calculada usando $O(N \text{Log}_2(N))$ operações.

2.3.4 – O Filtro de Lanczos

O método do filtro Lanczos é uma aplicação derivada da AF que tem como objetivo fazer a separação das escalas temporais através da modificação das amplitudes de Fourier que representam as séries temporais de dados. Um primeiro passo é calcular a função peso W_k (ou mesmo “os pesos”), que suaviza a resposta através do fator σ , segundo termo da Eq. 2.16. Para realizar a filtragem de altas e baixas frequências, utiliza-se a eq. (2.15) para o cálculo dos pesos. Já para filtrar uma banda específica da série, limitada pelas frequências de corte f_{C2} e f_{C1} , utiliza-se Eq. (2.16) de acordo com Duchon (1979).

$$W_k = \frac{\text{sen}2\pi f_c k}{\pi k} \frac{\text{sen}(\pi k / n)}{\pi k / n} \quad k = -n, \dots, 0, \dots, n \quad (2.15)$$

$$W_k = \left(\frac{\text{sen}2\pi f_{C1} k}{\pi k} - \frac{\text{sen}2\pi f_{C2} k}{\pi k} \right) \sigma \quad (2.16)$$

$$n \geq \frac{1.3}{(f_{C1} - f_{C2})} \quad (2.17)$$

$$y_t = \sum_{k=-\infty}^{\infty} W_k x_{t-k} \quad (2.18)$$

A seleção de uma escala temporal para filtragem requer uma escolha adequada do número de pesos k . Duchon (1979) sugere que sejam estabelecidos alguns critérios como o descrito na eq. (2.17). Entretanto, o mais comum é ter bom-senso quanto aos critérios

adotados nessa escolha. Isso porque poucos k fazem com que frequências que não são desejadas passem pelo filtro, e uma extrapolação de k traz o problema do efeito de Gibbs (Muza, 2005).

Isto ocorre devido aos erros no truncamento da série de Fourier, que carregam as oscilações. Uma escolha correta de k pode reduzir esse efeito em razão do fator σ que é o grande diferencial no filtro Lanczos em relação aos demais filtros. Uma maneira correta de escolher k é através do cálculo da função resposta descrita por completo em Duchon (1979). Alguns autores (Marton, 2000) mostraram a eficiência desse filtro para a separação de escalas intrasazonais e frequências mais altas, onde a melhor resposta é igual a 0,5 para cada uma das frequências de corte f_c .

Marton (2000) manteve o mesmo de k para várias bandas desde a alta frequência, como para frequências intrasazonais. A série filtrada é obtida através da Eq. (2.18) onde se ressalta a perda de $(k-1)/2$ dados no começo e final da série.

2.4 – A Análise em Ondeleta (AO)

A palavra ondeleta derivada do vocábulo francês “*ondelette*”, que denota o diminutivo da palavra onda, ou seja, “ondinha” ou “ondícula”, surgiu em meados dos anos 80, a partir dos estudos de um grupo de pesquisadores franceses. A idéia na análise ondeleta consiste em aproximar uma função por uma combinação linear de funções básicas (ondeletas), obtendo assim uma boa representação da função original tanto no domínio das frequências como no domínio temporal. A aplicação de ondeletas não exige a estacionariedade das séries em estudo, sendo apropriada para a análise de eventos irregularmente distribuídos.

O termo “*ondelette*” foi introduzido pelo engenheiro geofísico J. Morlet (1982), sendo que a base matemática de suas idéias formalizada pelo físico teórico de mecânica quântica A. Grossmann, que o ajudou a formalizar a transformada de ondeleta em sua forma contínua.

Os dados estudados por Morlet exibiam conteúdos de frequências que mudavam rapidamente ao longo do tempo. Nesse caso, a transformada de Fourier não era adequada como ferramenta de análise. Na realidade eles redescobriram e deram uma interpretação ligeiramente diferente do trabalho de Calderón sobre análise harmônica de 1946 (Chierice, 2003).

Foi Yves Meyer, um matemático francês que em 1984 ressaltou a semelhança entre o trabalho de Morlet e Calderón. Isso levou Meyer em 1985 a construir funções básicas de

ondeleta ortonormais cujo domínio de tempo e frequência eram associados. Entretanto, Meyer observou que J. O. Strömberg já tinha descoberto as mesmas funções ondeletas cinco anos antes. O autor observou também que o primeiro trabalho sobre ondeleta foi elaborado em 1909, por A. Haar, que construiu funções base de ondeleta ortonormais. Suas ondeletas eram de pequeno uso prático e de baixo domínio de frequência. Em 1930, P. Levey utilizou o trabalho de Haar e desenvolveu funções básicas ortonormais para estudar os sinais aleatórios do movimento browniano.

Recentemente, na década de 90, Ingrid Daubechies, desenvolveu sistemas para discretização de parâmetros de tempo e escala da transformada ondeleta. Estes sistemas apresentavam uma maior liberdade na escolha das funções básicas.

Daubechies, juntamente com Mallat desenvolveram a transição da análise de sinais contínuos para discretos. Em 1986, Mallat e Meyer desenvolveram a idéia de análise em multiresolução (MRA) para a transformada de ondeleta discreta (TOD). Daubechies utilizando os trabalhos de Mallat formalizou a teoria moderna de ondeleta desenvolvendo as bases ortonormais de ondeletas suaves com suportes compactos.

Em 1992, Daubechies com Albert Cohen construíram as ondeletas biortogonais com suporte compacto que são utilizadas por muitos pesquisadores sobre as funções de base ortonormais (Morettin, 1999; Chierice, 2003).

2.4.1 – Escala e Transição

Enquanto a AF consiste em decompor um sinal em senos e cosenos de várias frequências (Chierice, 2003), a análise de ondeleta (AO) é a decomposição de um sinal por meio de escalas (dilatação e compressão) e translação de uma dada ondeleta original (ondeleta mãe).

Para um significado mais amplo do conceito de escala, vejamos o exemplo de uma função senóide, $\psi(t) = \text{sen}(\omega t)$ a qual introduziremos um fator de escala denotado por $a = 1/\omega$, com $\omega = 1, 2, 3, \dots, \infty$. Veremos então a compressão da senóide na figura 2.6:

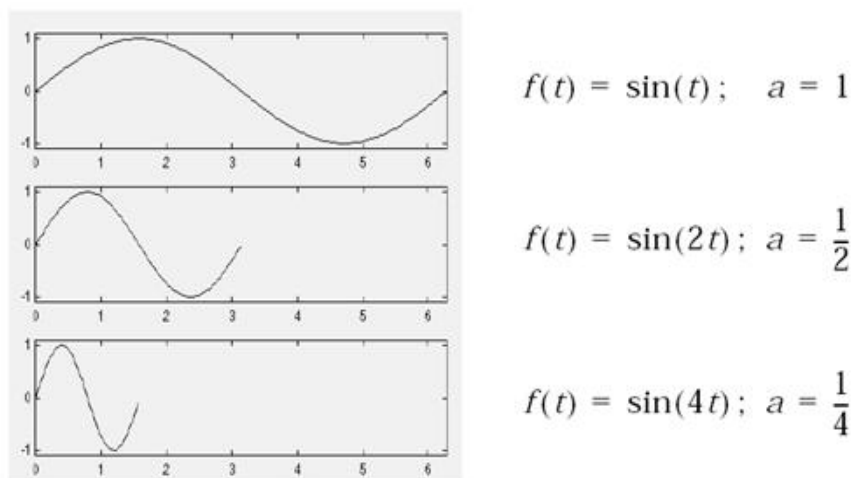


Fig.2.6 – Compressão de senóides (wavelet Toolbox – Misiti, 1996).

Nota-se que à medida que o fator de escala diminui, a senóide fica cada vez mais comprida. O fator de escala aplica-se de forma análoga para as ondeletas. Fatores de escala menores fazem a “compressão” de ondeletas e fatores de escala maiores fazem a “dilatação” de ondeletas. Figura 2.7:

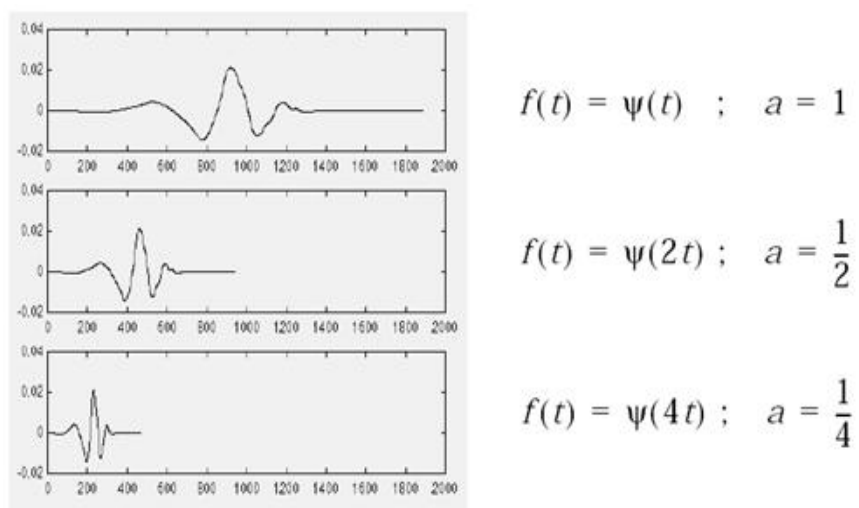


Fig.2.7 – Compressão de ondeletas (wavelet Toolbox – Misiti, 1996).

quanto à variação do parâmetro a que corresponde à informação de escala, temos:

- i) para $a > 1$, tem o efeito de dilatação da função ondeleta-mãe;
- ii) para $a < 1$, tem o efeito de contração da função ondeleta-mãe;

Esta propriedade torna possível analisar os aspectos globais e locais de séries temporais. A translação de uma ondeleta, representada pelo parâmetro b , significa atrasar (ou adiantar) o seu início. Deslocar uma função $\psi(t)$ em b é representá-la por $\psi(t - b)$ conforme a figura 2.8:



Fig.2.8 – Translação de ondeleta deslocada (wavelet Toolbox – Misiti, 1996).

À medida que b varia, a função é analisada localmente em torno de b .

2.4.2 – Propriedades de ondeletas

As funções ondeletas apresentam certas propriedades dentre as quais podemos citar:

- A expansão ondeleta gera uma localização tempo-frequência do sinal;
- O cálculo dos coeficientes do sinal pode ser feito eficazmente.

Pode-se mostrar que muitas transformações de ondeletas (o conjunto de coeficientes de expansão) podem ser calculadas com $O(N)$ operações. Isto significa que o número de multiplicações e adições aumentam linearmente com o número de elementos do sinal analisado. As transformações de ondeletas mais gerais requerem $O(N \log(N))$ operações, o mesmo que para a FFT (*Fast Fourier Transform*);

- A expansão de ondeletas permite uma descrição local mais precisa e uma melhor separação das características do sinal;
- Existem inúmeras famílias de ondeletas e isso facilita a sua utilização em vários tipos de sinais (Chierice, 2003).

2.4.3 – Transformada em ondeleta contínua

Matematicamente, a transformada de ondeleta contínua é definida em termos de uma integral de convolução entre o sinal analisado $f(t)$ e uma ondeleta conhecida como “ondeleta-mãe”, ondeleta-geratriz ou ainda ondeleta analisadora, expressa por:

$$C(a,b) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t)\psi_{a,b}(t)dt \quad (2.17)$$

em que os parâmetros a e b variam continuamente em \mathbb{R} , com $a \neq 0$, e

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}}\psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad a \in \mathbb{R}^+ \text{ e } b \in \mathbb{R} \quad (2.18)$$

Sendo as funções $\psi_{a,b}$ chamadas ondeletas filhas e são geradas a partir de dilatações e translações da ondeleta-mãe $\psi(t)$. No caso da transformada contínua as ondeletas-mães mais conhecidas são as de Morlet e Chapéu Mexicano.

Na equação (2.18), o termo em denominador \sqrt{a} corresponde a um fator de normalização da energia de cada ondeleta de forma a manter a mesma energia da ondeleta-mãe. Nessa equação os parâmetros a e b , correspondem, respectivamente, às informações de escala e translação. A equação (2.18) pode também ser escrita como o produto interno de $f(t)$ com uma função ondeleta $\psi_{a,b}(t)$, isto é, $C(a,b) = \langle f, \psi_{a,b} \rangle$. Esta equação, de fato está decompondo f em uma superposição de ondeletas $\psi_{a,b}(t)$. Desta forma, os parâmetros a e b , associam aos coeficientes $C(a, b)$, valores de frequência e localização no tempo, em cada intervalo Δt do sinal analisado. Uma função ondeleta ψ apresenta as seguintes propriedades:

P1) Para ser dita ondeleta

$$\int_{-\infty}^{\infty} \psi(t)dt = 0 \quad (2.19)$$

Isso garante que a função ondeleta tem uma forma do tipo onda – condição de admissibilidade;

P2) A função ondeleta deve ter energia unitária, isto é,

$$\int_{-\infty}^{\infty} |\psi(t)|^2 dt = 1 \quad (2.20)$$

isso garante o suporte compacto, ou um decaimento rápido de amplitude, garantindo a localização espacial. Para se obter a transformada ondeleta de um sinal deve-se proceder como se segue:

Passo 1: escolher uma ondeleta-mãe e compará-la com uma seção no começo do sinal original;

Passo 2: calcular o coeficiente ondeleta, a partir da transformada ondeleta e quanto menor a amplitude desse coeficiente melhor será a aproximação entre ondeleta e o sinal na seção tomada;

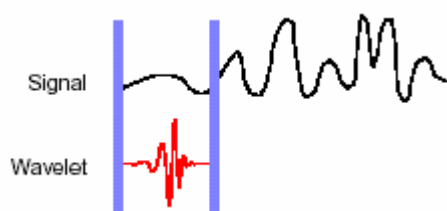


Fig.2.9 – Análise ondeleta em uma seção do sinal (wavelet Toolbox – Misiti, 1996).

Passo 3: tomar a próxima seção do sinal e novamente repetir os passos 1 e 2 até cobrir, de seção em seção, todo o sinal;

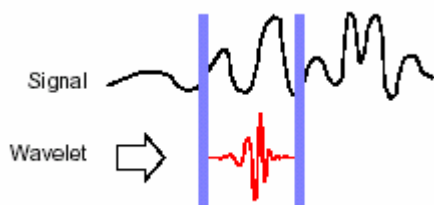


Fig.2.10 – Análise ondeleta em uma nova seção do sinal (wavelet Toolbox – Misiti, 1996).

Passo 4: ajustar uma nova escala para a ondeleta (dilatar ou comprimir) e repetir os passos de 1 a 3;

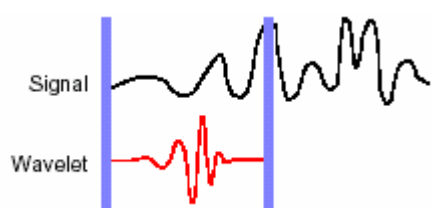


Fig.2.11 – Análise ondeleta com uma ondeleta de nova escala. (wavelet Toolbox – Misiti, 1996).

Passo 5: repetir os passos de 1 a 4 para todas as escalas da ondeleta (quantas vezes se mostrarem necessárias).

Ao término de todos os passos descritos acima teremos produzido coeficientes ondeleta em diferentes escalas e seções do sinal. Os coeficientes ondeletas das escalas maiores estão associados às ondeletas mais dilatadas e, escalas menores, às ondeletas mais comprimidas. Pode-se observar ainda que, quanto mais dilatada for a ondeleta, maior será a seção do sinal com o qual ela estará sendo comparada e, deste modo, as características mais visíveis estão sendo medidas pelos coeficientes ondeletas. Assim, existe uma correspondência entre as escalas ondeleta e a frequência revelada pela análise ondeleta, figura 2.12.

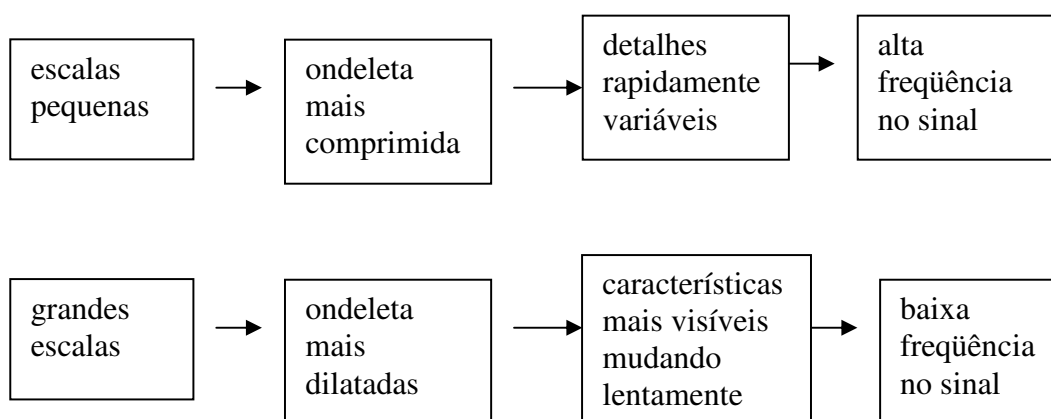


Fig.2.12 – Correspondência entre escalas e frequências na análise ondeleta (wavelet Toolbox – Misiti, 1996).

Para este estudo a função ondeleta escolhida para a análise foi a de Morlet. Esta ondeleta é complexa e possui características semelhantes àsquelas do sinal meteorológico analisado, tais como simetria ou assimetria, variação temporal brusca ou suave (Vitorino,

2003; Schneider, 2004). Segundo a literatura, este é um critério para escolha da função ondeleta (Weng e Lau, 1994). A função de Morlet é dada pela seguinte expressão:

$$\psi(t) = e^{iw_0t} e^{-t^2/2} \quad (2.21)$$

que representa uma onda modulada por um envelope Gaussiano, como pode ser visto na figura 2.13:



Fig 2.13 – Parte real da função Morlet para $w_0 = 8$ (Fonte: Torrence & Compo; A practical guide to wavelet analysis, 1998).

A ondeleta de Morlet, por ser contínua, é útil para estudar a variabilidade temporal da energia de cada componente de frequência presente na série temporal. Para isso, a TO de Morlet permite a construção do chamado “Periodograma em Ondeleta”, que consiste em um gráfico tridimensional cujo eixo y representa as escalas (ou frequências) da série, o eixo x representa o comprimento temporal da série e por último, as cores identificam a energia associada a cada escala. O algoritmo usado nesse estudo foi o desenvolvido por Torrence e Compo (1998), utilizando o software MATLAB.

2.4.4 – Espectro global de ondeleta (EGO)

A TO permite fornecer a mesma informação da TF através da redução de uma de suas três dimensões, ou seja, se for retirada a variabilidade temporal de sua transformada, podemos obter o chamado Espectro Global de Ondeleta (EGO) (*Global Spectral Wave* – em inglês). O EGO é obtido a partir da variância do valor absoluto ao quadrado do coeficiente de ondeleta da série temporal em cada escala de tempo (Torrence e Webster, 1999). A variância de ondeleta pode ser interpretada como a contribuição da energia da escala à energia total da função $f(t)$. O gráfico da variância é chamado de espectro de ondeleta global (Vitorino, 2003).

$$V_f(l) = \int_{-\infty}^{\infty} |W_{l,t'}|^2 dt' \quad (2.22)$$

A fase do sinal é definida através da expressão (Foufoula-Georgiou e Kumar, 1994):

$$\phi(l, t') = \arctan\left(\frac{\text{Im}[W_{l,t'}]}{\text{Re}[W_{l,t'}]}\right) \quad (2.23)$$

este espectro realça as escalas resolvidas pela ondeleta em que a variabilidade é relativamente alta, como, por exemplo, na escala intrasazonal.

2.4.5 – Espectro cruzado de ondeleta (ECO)

Um método bastante utilizado para se aferir o grau de relação entre dois sistemas físicos, é através da correlação entre as séries temporais de cada um destes sistemas, este método permite averiguar até que ponto dois processos físicos têm influência um sobre o outro. Neste sentido, métodos como Correlação Cruzada, Espectro de Fourier Cruzado, dentre outros, têm sido muito utilizados para tal objetivo em diversos campos de pesquisas. Entretanto, devido ao surgimento da Transformada em Ondeleta com suas características que permitem a análise em tempo-escala, o método tem se tornado muito apropriado para a análise de variabilidade temporal da correlação cruzada entre duas séries temporais. Com isso, Labat (2005) têm definido o chamado Espectro Cruzado de Ondeletas (ECO) de duas séries temporais y_n e x_n como sendo dado por:

$$ECO = \frac{|W_n^x(s)W_n^{y*}(s)|}{|W_n^x(s)||W_n^y(s)|} \quad (2.24)$$

onde $W_n^x(s)W_n^{y*}(s)$ são as transformadas em ondeletas das séries y_n e x_n , respectivamente e $*$ denota o complexo conjugado. Em conclusão, a introdução do espectro cruzado de ondeleta permite uma rápida identificação do grau de correlação entre dois processos físicos em uma dada escala (Vieira, 2006).

CAPÍTULO 3

3.1 – RESULTADOS

3.1 – Filtragem dos dados: Seleção das escalas temporais

Inicialmente, procurou-se analisar os resultados obtidos a partir da aplicação de dois métodos de filtragem para a separação de escalas temporais – o filtro de Lanczos e a TO, com o objetivo de verificar suas eficiências no estudo da variabilidade espaço-temporal das séries de temperatura. Em seguida foram definidos os critérios para a seleção de casos dentro da escala de tempo intrasazonal e a correlação entre a ocorrência de máximo-mínimos com eventos sinóticos nas escalas que colaboraram para a amplificação ou não da variabilidade intrasazonal no período estudado.

Os métodos aplicados neste capítulo têm o propósito de analisar a eficiência dos filtros de separação de escalas temporais nos dados meteorológicos descritos anteriormente. Dessa maneira, foi utilizado primeiramente um algoritmo para o filtro de Lanczos associado com a transformada rápida de Fourier (*Fast Fourier Transform* – FFT). Os resultados obtidos foram comparados em seguida com os espectros gerados a partir da filtragem feita pela TO.

O método da FFT para filtragem de dados se constitui em atribuir pesos que permitam obter uma resposta na banda de interesse. A separação da banda é dada por uma função retangular que atribui valor igual a 1 para as frequências a que se deseja separar e zero para as demais frequências do domínio. A obtenção das transformadas de Fourier discretas consiste do cálculo dos coeficientes A_k e B_k através das equações (3.1) e (3.2), respectivamente. Isso é feito para as $n/2$ funções harmônicas, sendo n o tamanho da série temporal. Através desses coeficientes encontra-se a amplitude C_k (eq. 3.3) e a fase Φ (eq. 3.4).

Assim, obtém-se uma nova série y_t (eq. 3.5) representada através dos $n/2$ harmônicos. A FFT nada mais é do que calcular os coeficientes aproveitando a propriedade de ortogonalidade de senos e cosenos, de maneira a não ser necessário efetuar cálculos redundantes (Muza, 2005).

Assim, calculou-se a FFT e a seguir determinou-se a função retangular na série transformada, ambas no domínio de frequência, isto é, variáveis contínuas. Para se obter o domínio do tempo no quais as variáveis da série sejam discretas é necessário calcular a

inversa da FFT. A frequência de nosso interesse corresponde à escala intrasazonal (25-100 dias).

$$A_k = \frac{2}{n} \sum_{t=1}^n y_t \cos\left(\frac{2\pi kt}{n}\right) \quad (3.1)$$

$$B_k = \frac{2}{n} \sum_{t=1}^n y_t \sin\left(\frac{2\pi kt}{n}\right) \quad (3.2)$$

$$C_k = \left(A_k^2 + B_k^2\right)^{1/2} \quad (3.3)$$

$$\phi_k = \begin{cases} \tan^{-1} \frac{B_k}{A_k} & A_k > 0 \\ \tan^{-1} \frac{B_k}{A_k} \pm \pi, \text{ ou } \pm 180^\circ & A_k < 0 \\ \frac{\pi}{2}, \text{ ou } 90^\circ & A_k = 0 \end{cases} \quad (3.4)$$

$$y_t = \bar{y} + \sum_{k=1}^{n/2} \left(C_k \cos\left(\frac{2\pi kt}{n} - \phi_k\right) \right) \quad (3.5)$$

A função do filtro de Lanczos é transformar uma seqüência de dados de entrada em uma seqüência de dados de saída usando uma relação linear. O objetivo então é melhor observar um intervalo de frequências. A função peso e a função resposta contêm um par de transformada de Fourier, sendo Δ o intervalo de amostragem, F_n a frequência de Nyquist com valor de 1/2 ciclo por intervalo de amostragem. A função peso para o filtro passa-banda utilizado é dada pela expressão:

$$W_k = \text{sen} \left(2\pi f c_2 / \pi k \right) - \text{sen} \left(2\pi f c_1 / \pi k \right) \quad (3.6)$$

Sendo F_{c1} e F_{c2} são as frequências de corte. O número mínimo de pesos requerido para o filtro passa-banda de Lanczos é dado por:

$$n > 1,3 / (fc_2 - fc_1) \quad (3.7)$$

O uso de um número maior de pesos resulta numa função resposta mais próxima da janela retangular ideal do que se deseja, ou seja, a filtragem é mais efetiva. No entanto, ocorre uma maior perda de dados nas extremidades da série, sendo proporcional ao número de pesos utilizado na filtragem. Neste estudo deseja-se considerar a escala intrasazonal (25-100 dias), portanto foi utilizado um número de peso k igual a 150.

A amostra de cada série temporal completa tem 24 anos. Foram feitos testes com o objetivo de analisar a resposta do filtro de Lanczos para a banda de 25-100 dias para avaliar o sinal do espectro nas frequências baixas. A função resposta dos filtros de Lanczos e da TO na escala de tempo de 25-100 dias para as séries temporais dos pontos 1, 2 e 3 é mostrada nas figuras 3.1, 3.2 e 3.3.

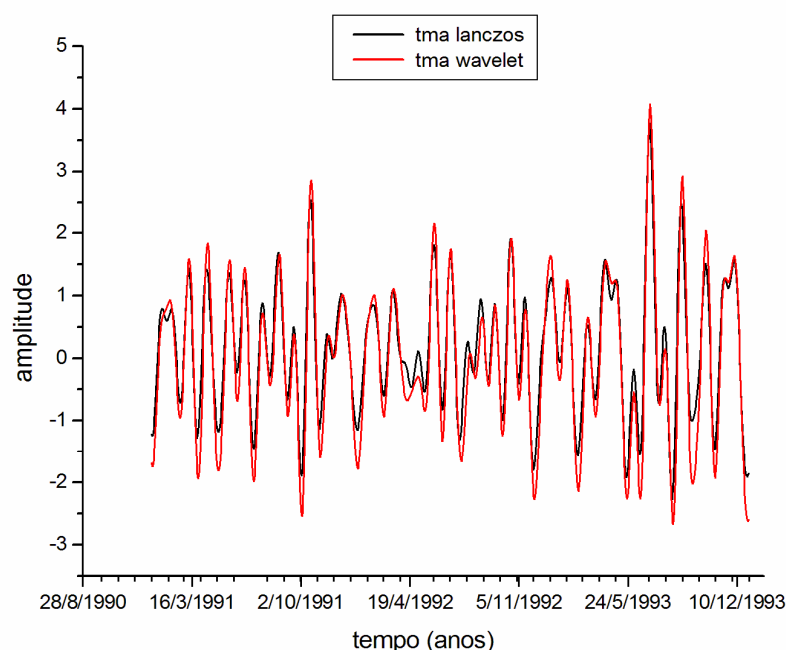


Fig. 3.1 - Filtragem na banda 25-100 dias para a série de TMA do IAG-USP referente ao ponto 1, a cor em preto destaca o espectro gerado pelo filtro de Lanczos, em vermelho o resultado obtido pela filtragem da TO. Na abcissa o período (em anos) e na ordenada a amplitude do sinal.

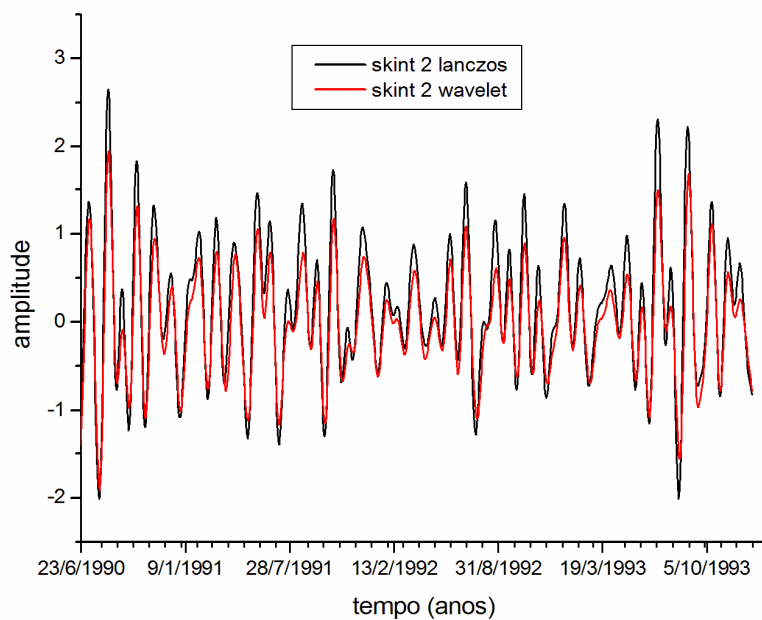


Fig. 3.2 – O mesmo que figura 3.1, exceto para a série de *skin temperature* referente ao ponto 2.

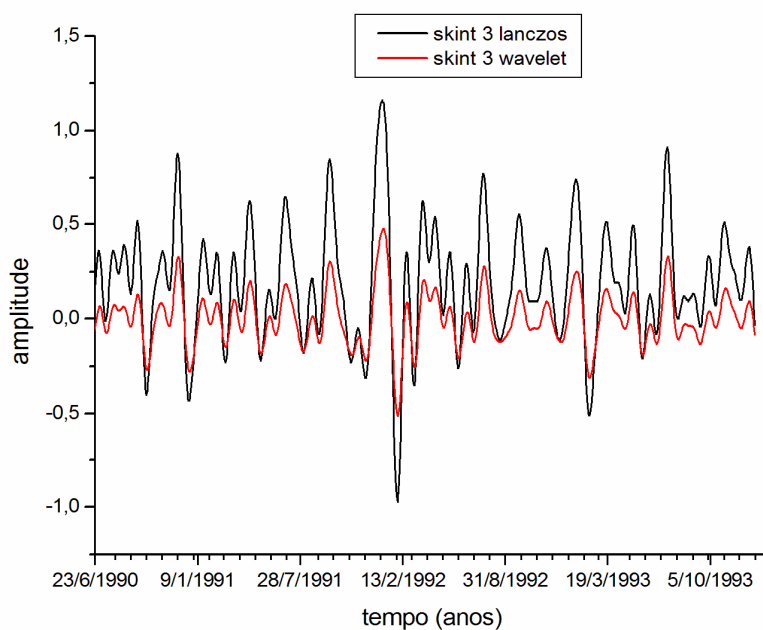


Fig. 3.3 – O mesmo que figura 3.2, exceto para a série referente ao ponto 3.

Observa-se que os resultados na resposta do filtro de Lanczos, em relação à fase, mostram-se bastante similares para todos os pontos, quando comparados com a filtragem feita

pela TO na mesma escala. Inicialmente, isso mostra que o filtro da TO é capaz de reproduzir a função resposta obtida pelo filtro de Lanczos.

No que concerne à amplitude, a filtragem para o ponto 1 obteve o resultado de maior coerência entre os valores. Para o ponto 2 observa-se boa correlação com pequenas variações entre as funções resposta dos filtros. Por outro lado, no ponto 3 fica evidente que os filtros têm diferenças significativas entre os valores de amplitude.

Isso pode estar associado ao fato de que a normalização de escalas aqui utilizadas faz com que o filtro da ondeleta tenha maior resposta nas oscilações de alta frequência. O filtro de Lanczos é mais efetivo nas bandas de alta frequência, ou seja, sua função resposta é próxima da ideal até bandas de aproximadamente 90 dias, ocorrendo o “vazamento” para bandas maiores. Por outro lado, como destacado anteriormente, a ondeleta é uma espécie de filtro passa-banda, com a característica de ter uma função resposta conhecida, ou seja, a série é filtrada dentro da banda especificada (no caso 25-100 dias). Assim, como a série *skin temperature* referente ao ponto 3 é mais energética em direção à baixa frequência (diga-se acima de 30 dias), seria de se esperar que o filtro de Lanczos indique maior amplitude, pois devido ao vazamento, captura energia em escalas além dos 100 dias.

3.2 – Cálculo EGO: análise dos espectros globais

Séries temporais não-estacionárias, como séries de temperatura, necessitam de métodos de estimativa espectral que permitam analisar seu espectro de energia através de uma visão dinâmica, ou seja, estudar seu espectro de energia em função do tempo de ocorrência desta (Vieira, 2006). A TO é uma ferramenta capaz de promover isso. O uso da TO na sua forma contínua tem sido muito utilizada no estudo de fenômenos de multiescalas. Por isso, o objetivo desta seção é averiguar como a oscilação intrasazonal se manifesta sobre estas variáveis (TMA e SKIN T) e quais podem ser os períodos mais afetados.

O primeiro passo foi aplicar a equação (2.22) às séries dos pontos 1, 2 e 3 no período de estudo. As figuras apresentam três gráficos distintos, cada um deles tem a seguinte descrição: o gráfico superior mostra a série temporal estudada, o gráfico central à esquerda mostra o chamado periodograma que será detalhado posteriormente e o gráfico central à direita mostra o resultado da aplicação do Espectro Global de Ondeletas (EGO), enquanto que o gráfico inferior mostra a variância média filtrada da série temporal. O periodograma em

ondeleta, citado anteriormente, representa o resultado da TO aplicado à série temporal onde: o eixo x é a escala temporal correspondente ao da série (em anos); o eixo y representa os períodos presentes na série (em dias); a escala de cores indica a energia associada a cada período da série. A linha em preto contínua no periodograma é chamada de cone de influência, ou seja, períodos fora deste cone devem ser negligenciados por não possuírem uma confiança estatística adequada.

A figura 3.4 mostra o resultado para a série de TMA do ponto 1 para todo o período (1982 a 2005). Nota-se no gráfico superior o comportamento marcado pela influência do ciclo anual presente no período. O periodograma desta série temporal mostra variações da energia nos principais períodos presentes, onde, podem-se associar estas variações com eventos sinóticos resultante da amplificação do sinal na banda intrasazonal, especialmente nas escalas de 30-60 dias e entre 25-100 dias.

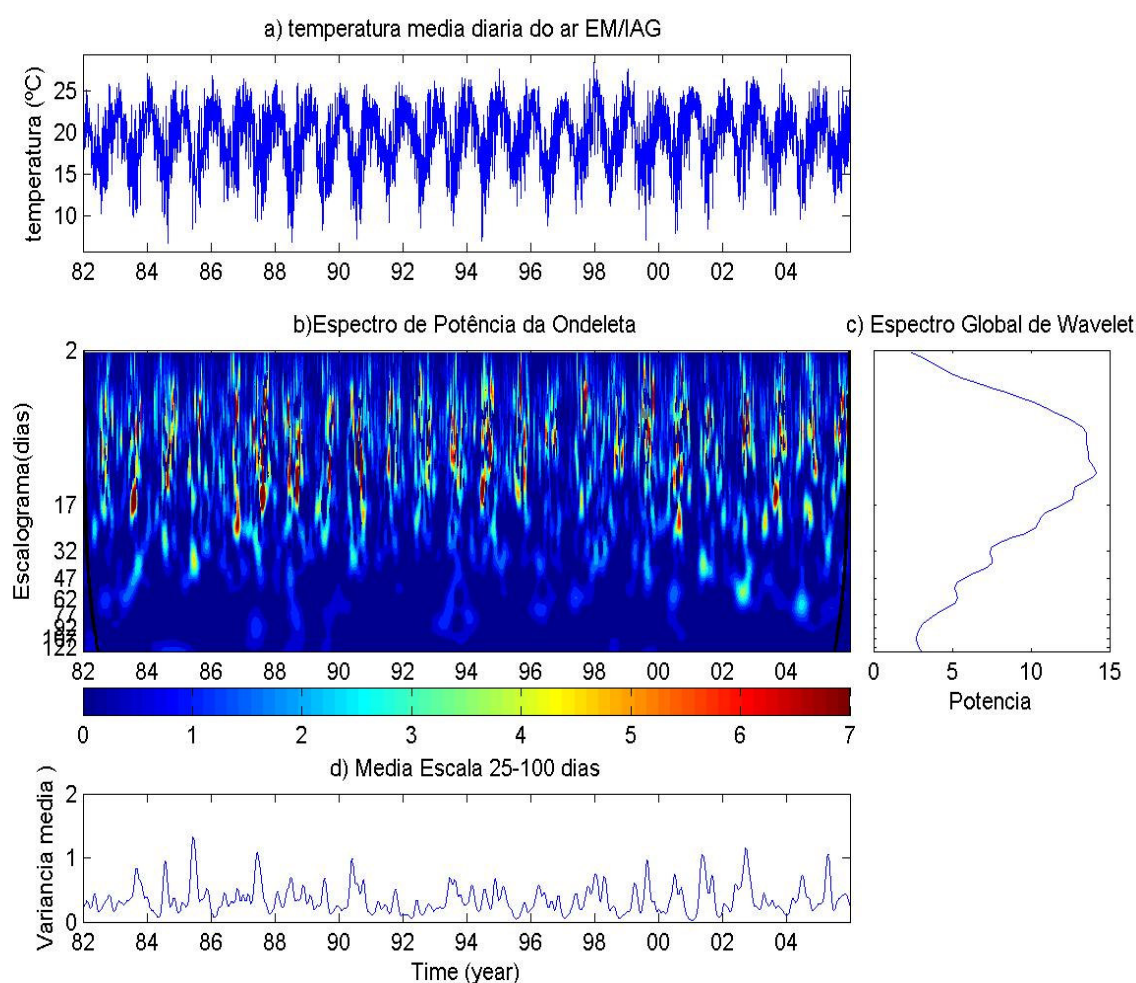


Fig. 3.4 – Série temporal (acima), periodograma de 2 a 122 dias (centro), EGO (direita) e filtragem na banda 25-100 dias (abaixo) obtidos para os dados de TMA do ponto 1 para o período de 1982 2005.

Nota-se nos gráficos obtidos, um aumento da energia observado principalmente nos anos de 1985-1986 e 2002-2003, particularmente nas escalas entre 30-60 dias e 60-120 dias. Para averiguar a influência das oscilações intrasazonais nos anos mencionados anteriormente, foi aplicada a TO e o EGO para a mesma variável, porém considerando apenas o intervalo dos anos que apresentaram uma significativa variação na energia. A figura 3.5 mostra o resultado obtido para o intervalo dos anos de 1985-1986 e a figura 3.6 mostra o resultado para os anos de 2002-2003.

É interessante ressaltar que a metodologia da TO permite uma análise interativa com a interface gráfica do periodograma gerado. Isso facilita na investigação da relação entre os períodos mais energéticos com os máximos e mínimos observados na série temporal e na variância média. A questão agora é averiguar se estas escalas estão presentes nos resultados obtidos para os pontos 2 e 3.

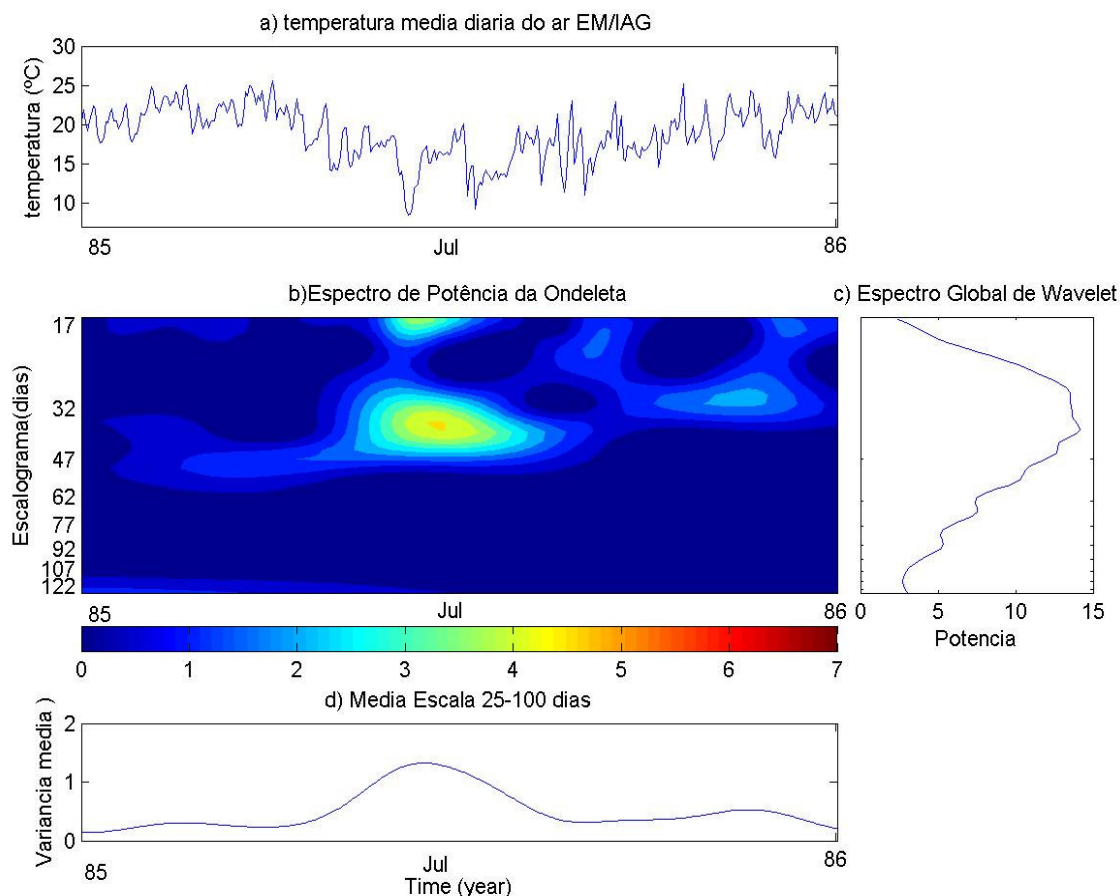


Fig. 3.5 – O mesmo que para a figura 3.4, exceto para a variável de TMA do ponto 1 dentro do intervalo de 1985-1986.

Na figura 3.5 destaca-se a forte amplitude na banda entre 25 e aproximadamente 50 dias. Neste período ocorreu um aumento significativo da variância média próxima ao mês de julho do ano de 1985. Este fato tem uma forte correlação com a variabilidade da TMA na série temporal do intervalo analisado, dado que essa banda de 25-50 dias foi a principal responsável pela modulação do sinal atmosférico com a ocorrência de dois períodos negativos (ocorrência de mínimos na temperatura) e um período positivo (ocorrência de máximos na temperatura).

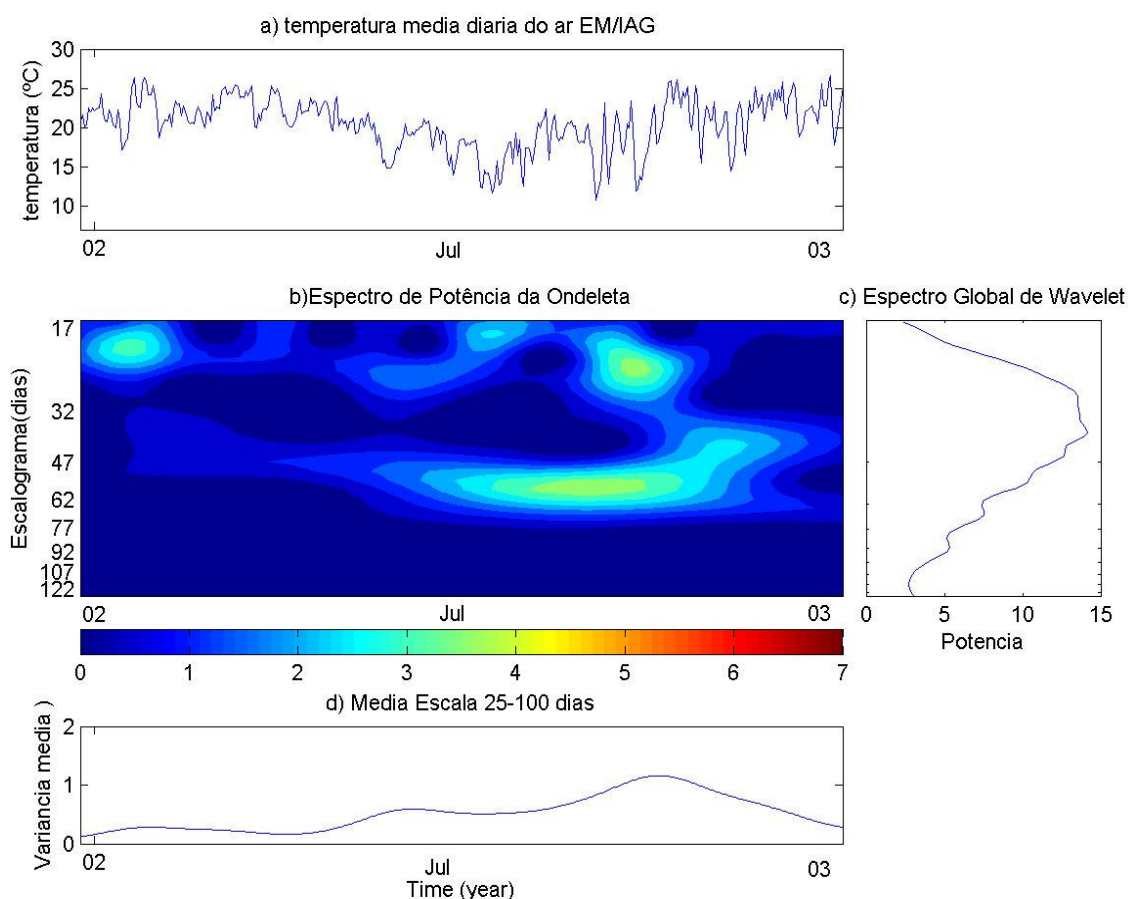


Fig. 3.6 – O mesmo que para figura 3.5, exceto para a variável de TMA do ponto 1, dentro do intervalo de 2002-2003.

Na figura 3.6 destaca-se a forte amplitude na banda entre 30 e aproximadamente 70 dias. Esta oscilação aumentou de amplitude e acentuou a variabilidade do sinal na segunda metade do ano de 2002, o que pode ter favorecido ao aumento na temperatura média. É interessante notar que esse aumento de energia coincide com as elevadas temperaturas

registradas no mês de outubro daquele ano. Observa-se também que ocorreu uma variação de escala na banda de 16-40 dias, que está relacionado a um aumento na amplitude da variância média da banda 25-100 dias, conforme visto no gráfico inferior. Este resultado de escala na banda de 16-40 dias, que está relacionado a um aumento na amplitude da variância média da escala, conforme visto no gráfico inferior. Este resultado também mostra que essas escalas interagiram, colaborando para uma amplificação no sinal da temperatura o que acarretou na formação de uma estrutura do tipo multiescala.

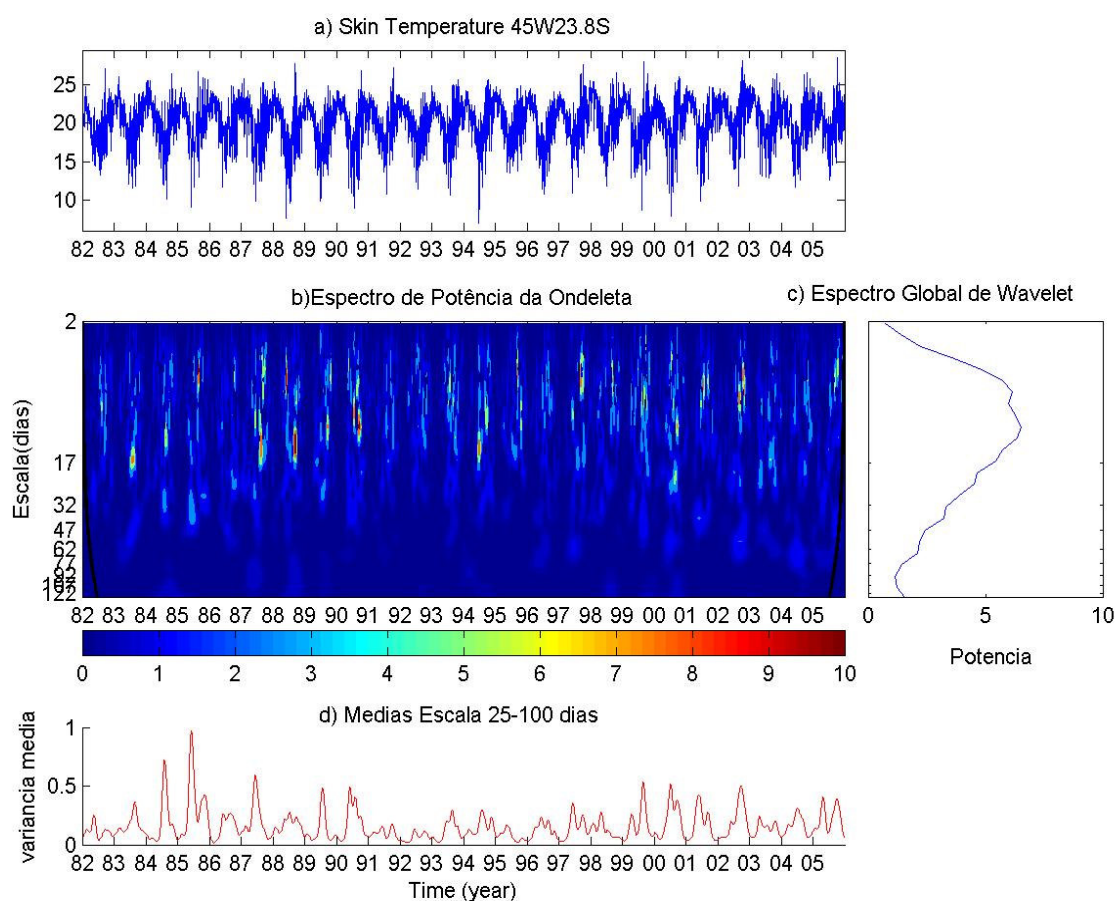


Fig. 3.7 – Série temporal (acima), periodograma (abaixo) e EGO (direita) obtidos para os dados de SKIN T do ponto 2 para o período de 1982 2005.

A figura 3.7 mostra os resultados referentes à série temporal da skin temperature para o ponto 2. O periodograma revela oscilações de maior amplitude nos anos de 1984 e 1985, similares aos resultados obtidos para a TMA. O ano de 2002 também aparece como um dos

mais energéticos dentro da filtragem executada na banda intrasazonal (parte inferior da figura 3.7).

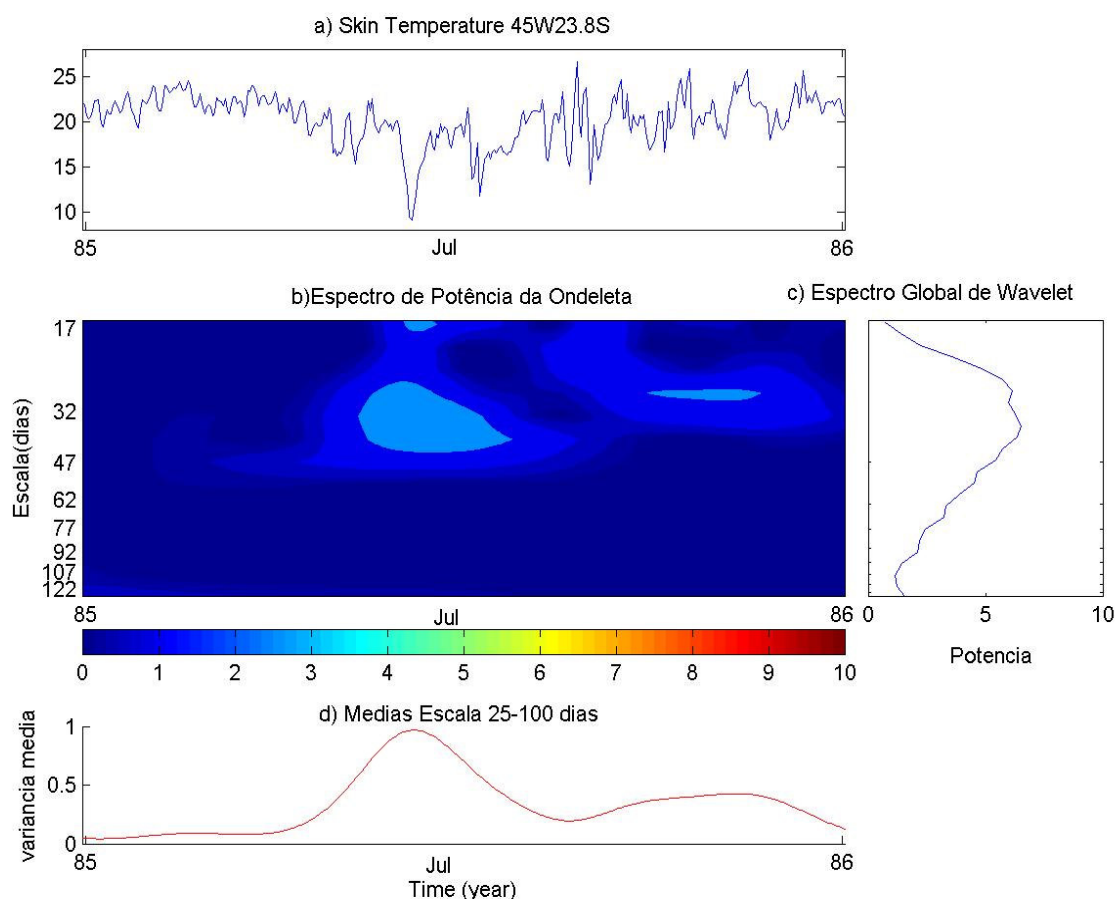


Fig. 3.8 – Série temporal (acima), periodograma (abaixo) e EGO (direita) obtidos para os dados de SKIN T do ponto 2 para o intervalo de 1985-1986.

Na figura 3.8 observa-se forte variabilidade dentro da banda de 25-50 dias em meados do ano de 1985, responsável pela modulação dos mínimos e máximos registrados na série de *skin temperature* neste período. Outra oscilação, por volta de 25 dias, aparece no final do mesmo ano, porém com menor amplitude. O EGO mostra também que estas escalas estão em concordância com a evolução da potência observada principalmente na escala de 25-50 dias.

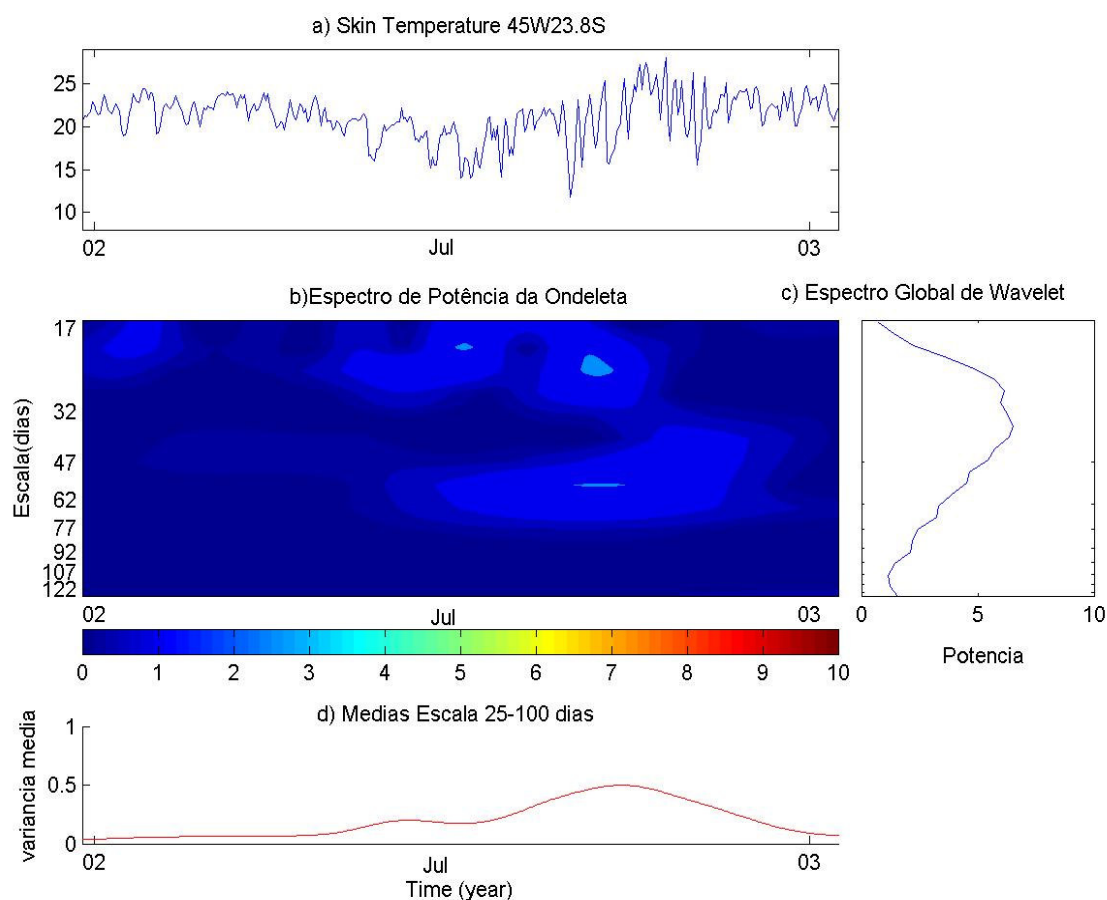


Fig. 3.9 – Série temporal (acima), periodograma (abaixo) e EGO (direita) obtidos para os dados de SKIN T do ponto 2 para o intervalo de 2002-2003.

Outro período de forte energia foi o ocorrido no ano de 2002, onde se destaca a conexão entre a baixa frequência (aproximadamente 40 a 80 dias) e a banda submensal (frequência de 15-30 dias). Particularmente é interessante observar as similaridades espaciais entre os resultados dos pontos 1 e 2. Esta similaridade pode ser associada aos modos de formação dos padrões das séries temporais destes pontos. Para um resultado quantificado, torna-se necessária a utilização de uma “medida” desta similaridade. Pois, para sinais complexos, como os mostrados aqui, é possível que estes padrões sejam formados por estruturas do tipo fractal, ou seja, auto-similares.

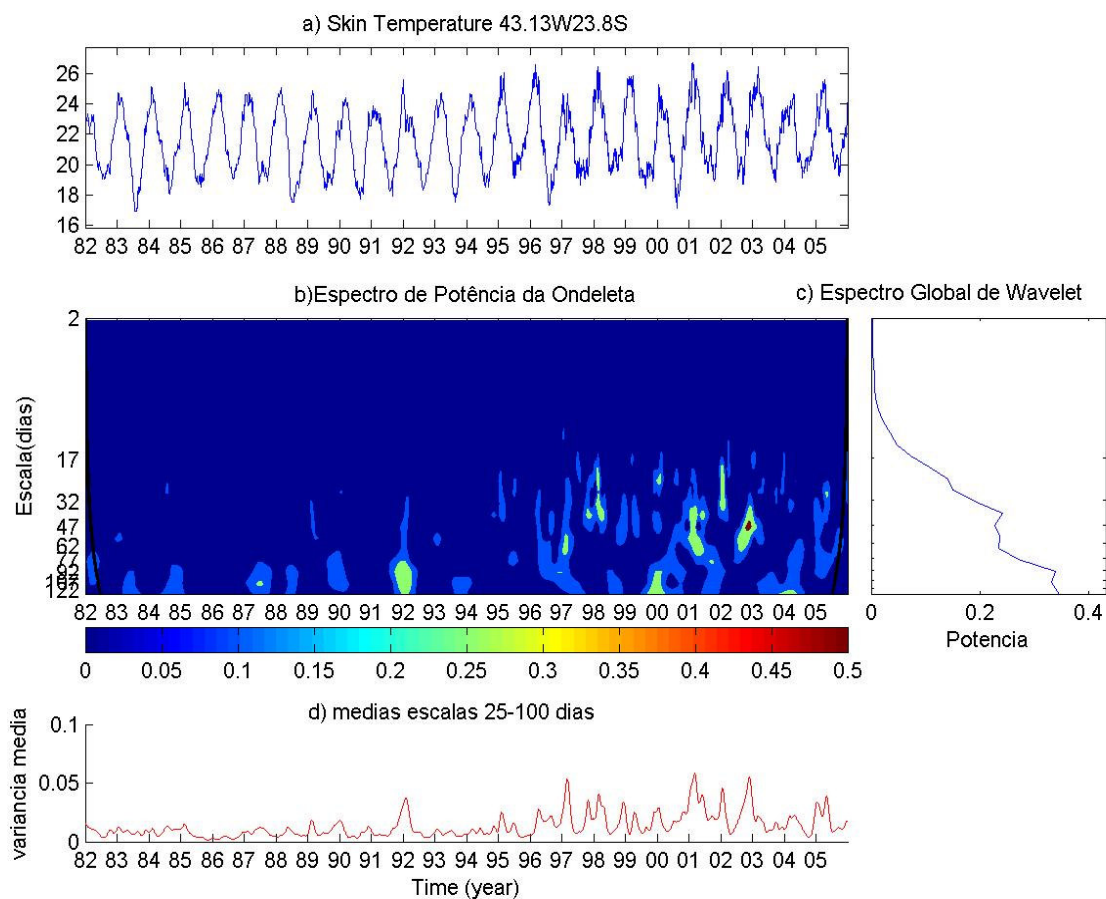


Fig. 3.10 – Série temporal (acima), periodograma (abaixo) e EGO (direita) obtidos para os dados de SKIN T do ponto 3 para o período de 1982 2005.

A análise para a série skin temperature 3 indica picos de maior energia média na banda 25-1000 dias por volta dos anos de 1992, 1997-1998 e 2001-2003. O pico mais energético de todo período localiza-se no ano entre os anos de 2003-2003, centrado na banda de 30-70 dias aproximadamente.

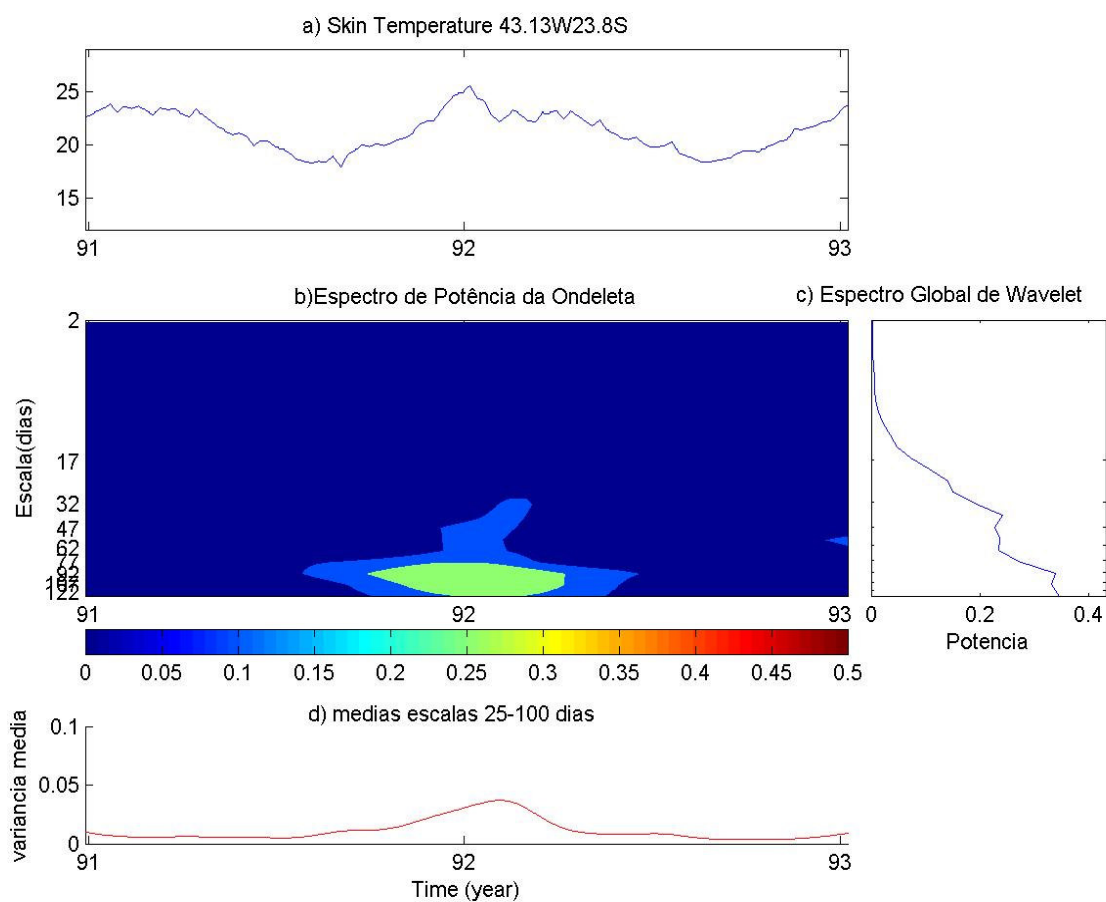


Fig. 3.11 – Série temporal (acima), periodograma (abaixo) e EGO (direita) obtidos para os dados de SKIN T do ponto 3 para o intervalo de 1991-1993.

Próximo do ano de 1992 observa-se o evidente predomínio da banda intrasazonal no periodograma de ondeleta (figura 3.11), com picos entre 30-100 dias (onde há uma larga banda de interação).

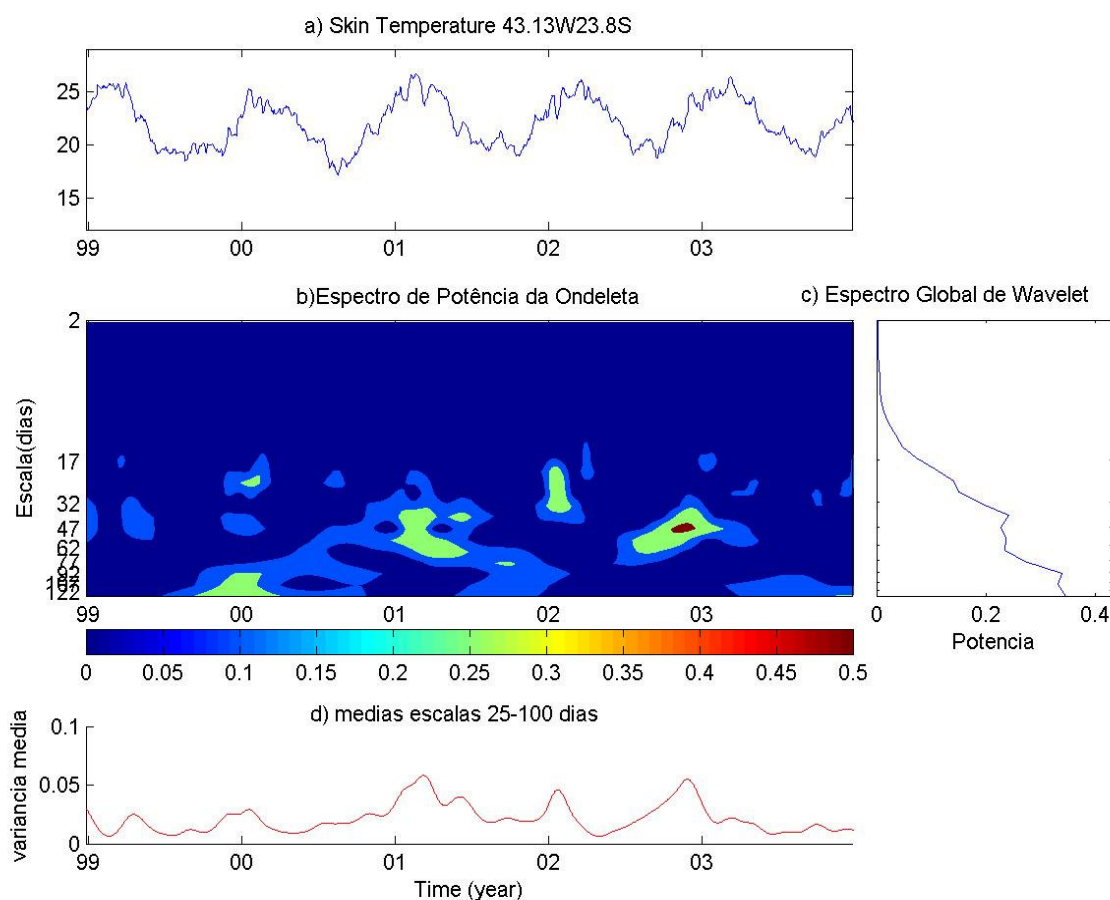


Fig. 3.12 – Série temporal (acima), periodograma (abaixo) e EGO (direita) obtidos para os dados de SKIN T do ponto 2 para o intervalo de 2000-2003.

No período entre 1999 e 2003 observa-se que as oscilações mais energéticas ocorreram, em geral, no período de verão, como são os casos de 2000, 2001 e 2002 (gráfico central e inferior). Para o ano de 2002, as oscilações de maior amplitude ocorreram no final do ano, com escala próxima de 50 dias.

3.3 – Análise da parte real dos espectros gerados pela TO

A seguir são mostrados os resultados gerados pela TO para os pontos 1, 2 e 3, desta vez com o objetivo de observar os coeficientes da parte real do espectro. Foram selecionadas as escalas de tempo (banda) intrasazonais de 25-100 dias, a fim de investigar a variabilidade intrasazonal e associar as escalas presentes com eventos sinóticos ocorridos nestes períodos. No caso, os coeficientes de ondeleta foram calculados apenas para os anos que apresentaram

atividade na energia do sinal, ou seja, apenas os anos de 1985-86, 1992-93 e 2000-03. Dessa maneira foram obtidos os campos de variação espaço-temporal do sinal intrasazonal de 25-100 dias. Nas figuras a seguir pode-se observar os coeficientes obtidos para ambas variáveis para o intervalo entre os anos de 1985 e 1986.

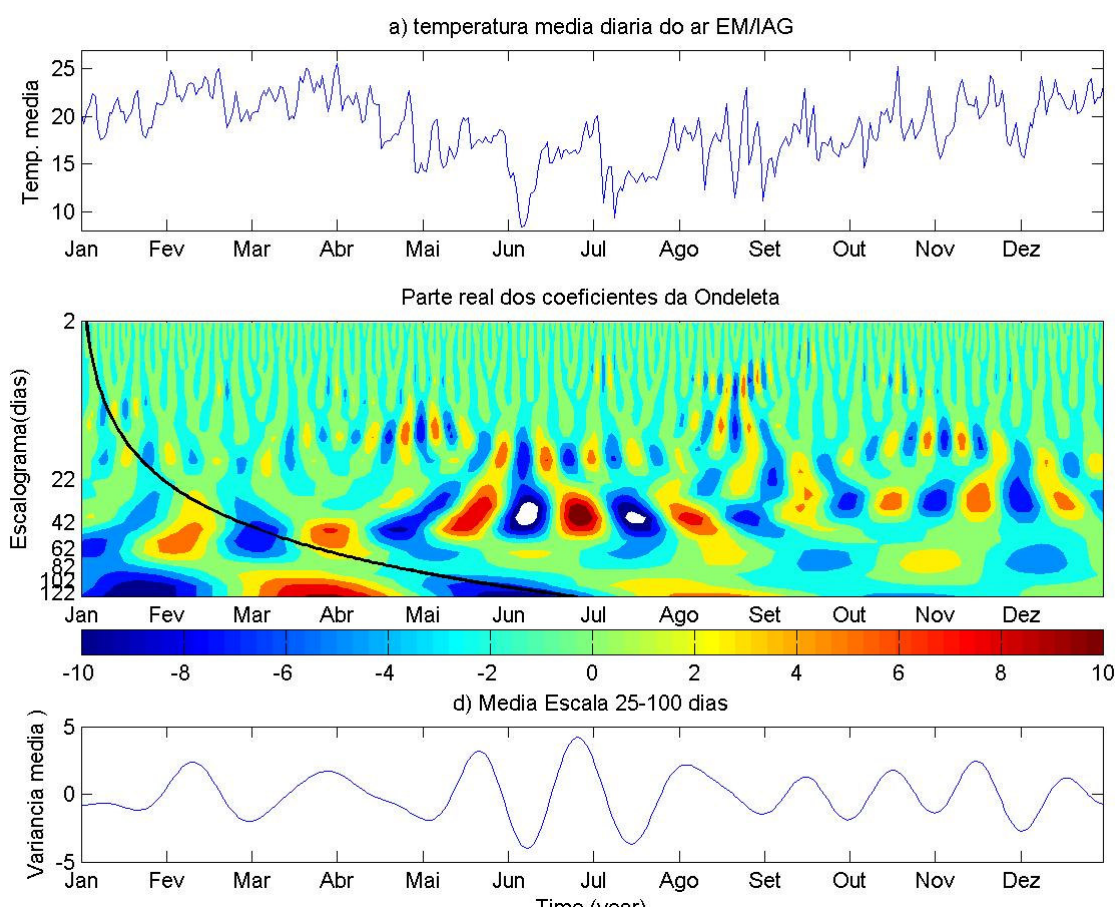


Fig. 3.13 – Série temporal (acima), periodograma ou escalograma da parte real dos coeficientes da ondeleta (centro) e filtragem para a banda 25-100 dias, obtidos para os dados de TMA do ponto 1 para o intervalo de 1985-1986. Linha preta contínua (centro) indica o cone de influência. Tons azulados indicam valores de coeficientes negativos enquanto avermelhados indicam valores positivos.

A série de TMA com o espectro da parte real dos coeficientes da ondeleta para o ano de 1985 pode ser observado na figura 3.13. Nota-se que um mínimo relativo de temperatura é observado no início dos meses de junho e julho (parte superior da figura 3.13).

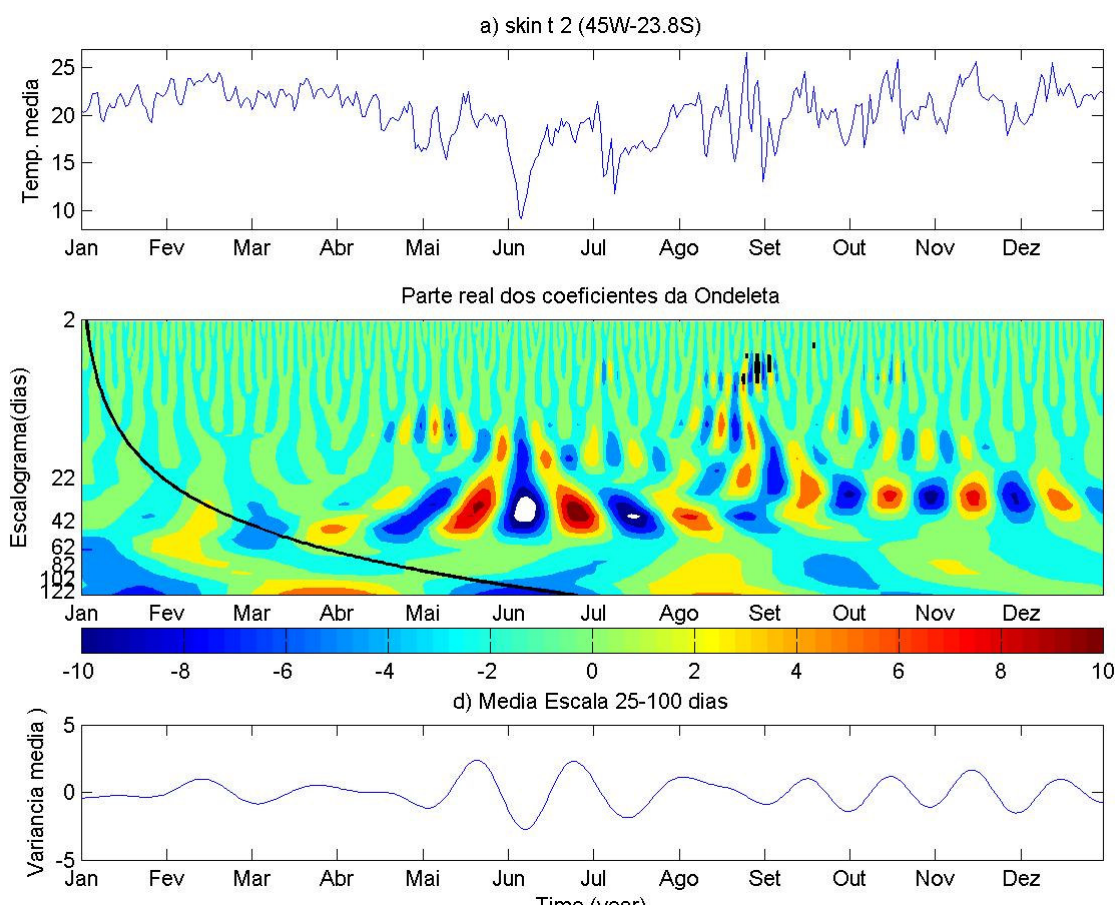


Fig. 3.14 – Série temporal (acima), periodograma (abaixo) da parte real dos coeficientes da ondeleta obtidos para os dados de SKIN T do ponto 2 para o intervalo de 1985-1986.

Na série de skin temperature para a parte real (figura 3.14) também é identificado forte pico espectral entre os meses de maio e julho, dentro da banda de 30-45 dias. A partir de setembro ocorre uma ruptura no padrão de organização das escalas, com a presença da escala próxima de 30 dias, que modula o sinal em direção ao final do ano.

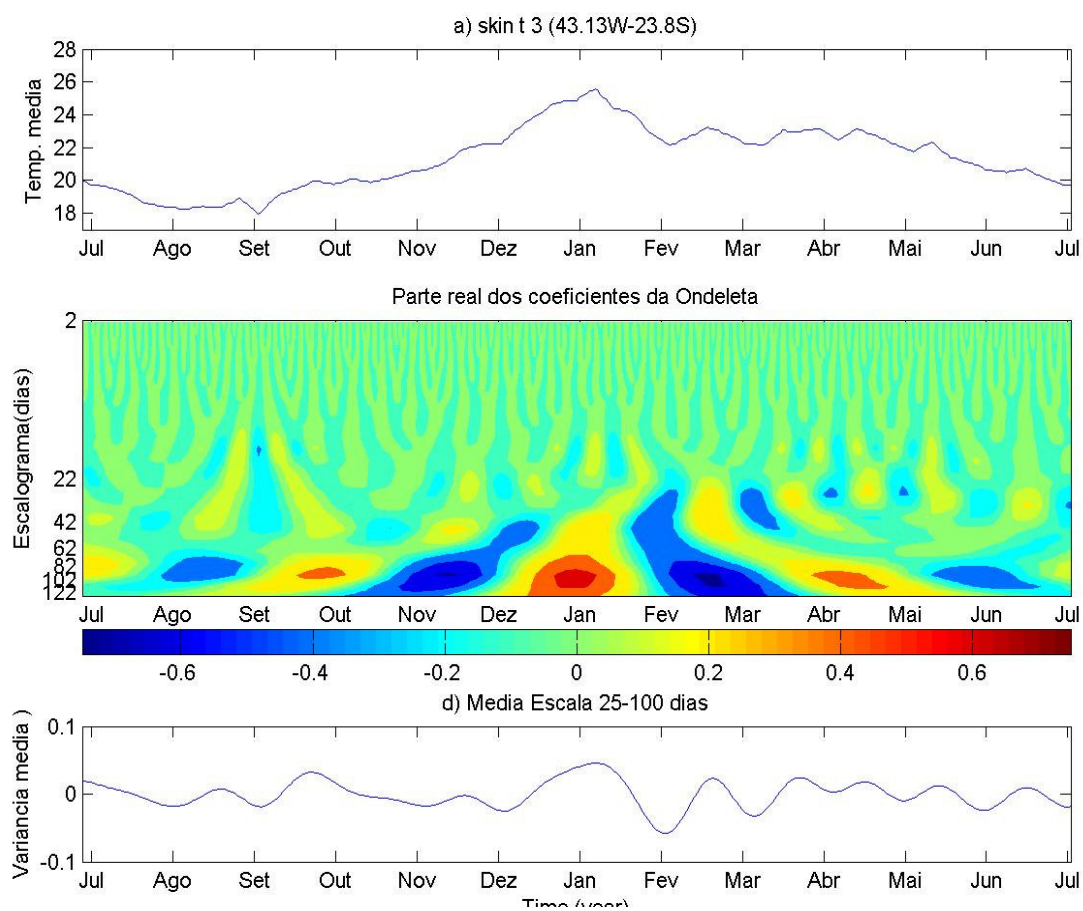


Fig. 3.15 – O mesmo que figura 3.13, exceto para os dados de SKIN T do ponto 3 para o intervalo de julho de 1991- julho de 1992.

O forte aquecimento registrado no início do ano de 1992 (figura 3.15) revela a presença e a modulação de uma oscilação em torno de 30 e de 80-120 dias, que começou no ano anterior. Nota-se que o pico espectral ocorre no mês de janeiro, mesmo período do máximo observado associado à variância média (parte inferior da figura 3.15). Observa-se, ainda, entre os meses de fevereiro a julho de 1992 uma separação ou duplicação de escalas.

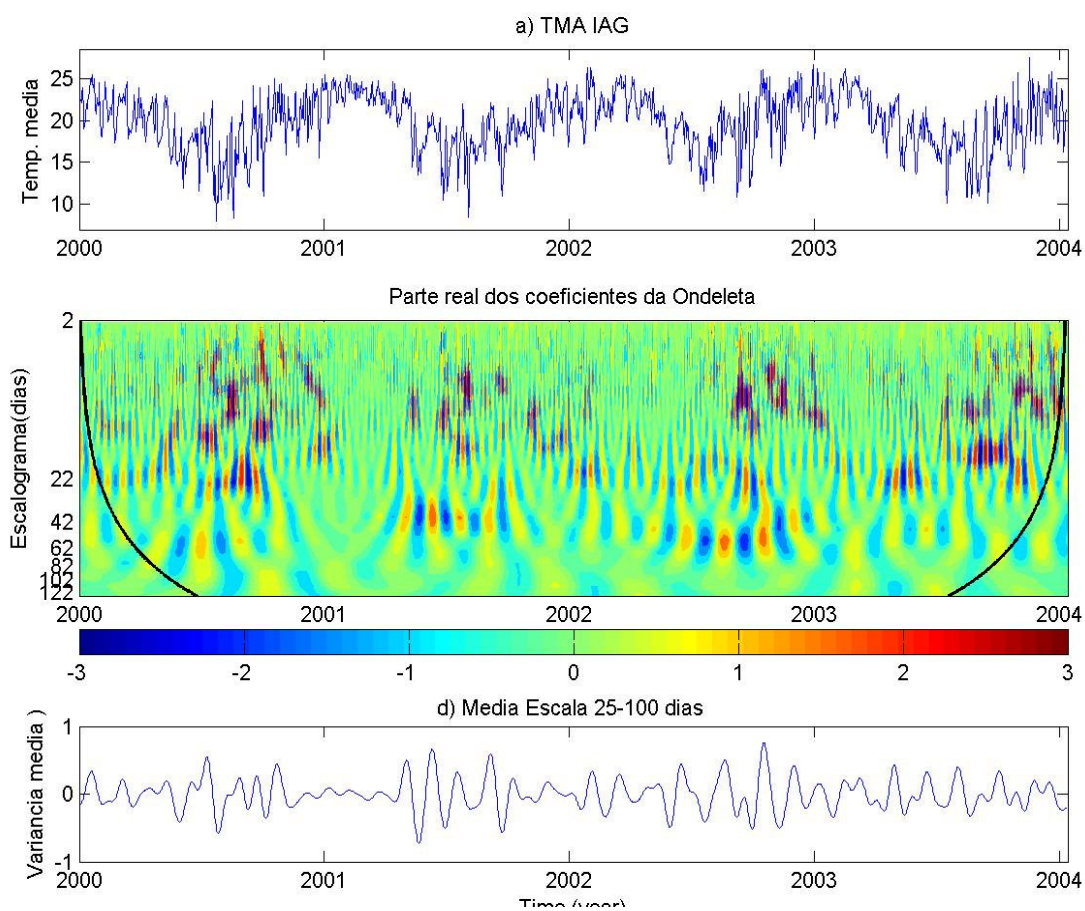


Fig. 3.16 – Série temporal (acima), periodograma (abaixo) da parte real dos coeficientes da ondeleta obtidos para os dados de TMA do ponto 1 para o intervalo de 2000-2003.

A série de TMA entre os anos de 2000 e 2004 (figura 3.16) indica predomínio da banda de 30-60 dias, aproximadamente, enquanto que a filtragem da TO mostra a variabilidade mais forte em meados do ano 2001 e final do ano de 2002. A propósito, no final do ano de 2002, por volta de outubro, percebe-se que há um máximo no sinal da TMA, e um máximo dos coeficientes da parte real e da filtragem. Assim, pode-se concluir que é um período de extremos ajudado pela interação de banda larga, aproximadamente 20-70 dias.

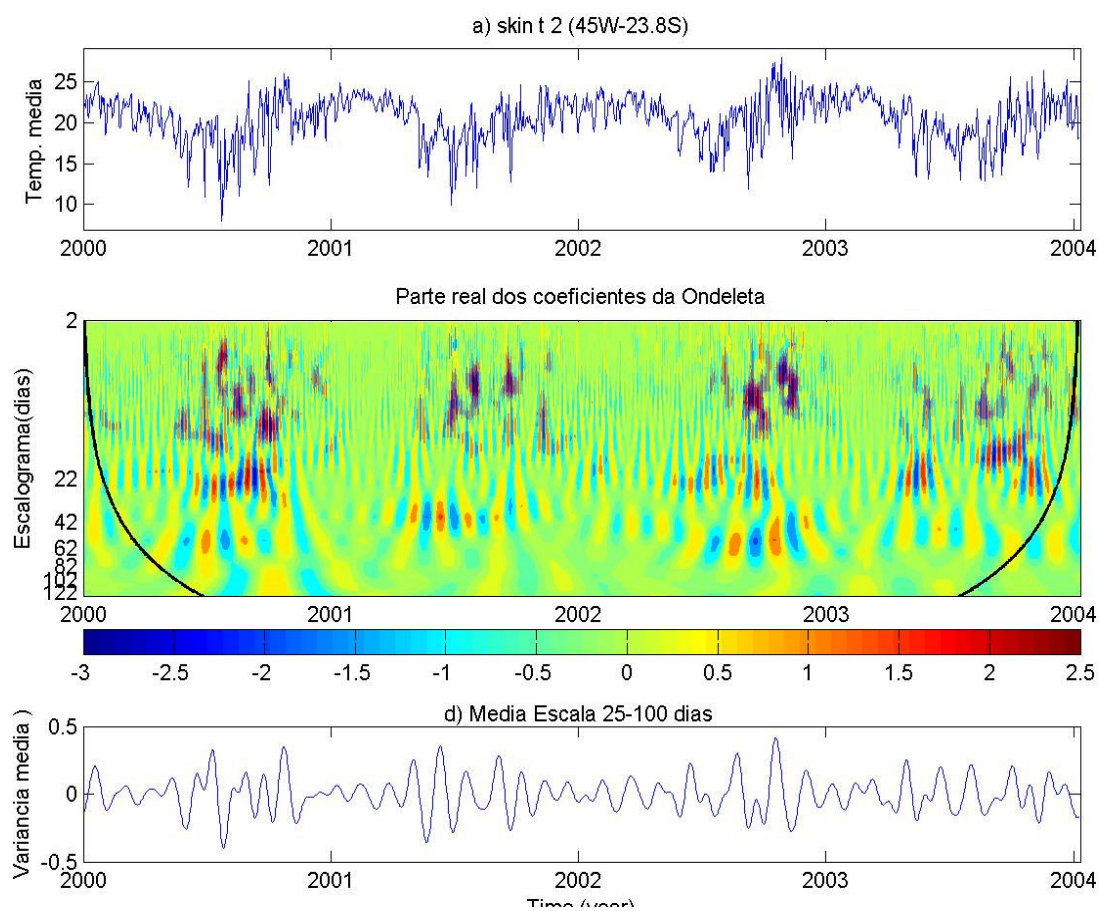


Fig. 3.17 – Série temporal (acima), periodograma (abaixo) da parte real dos coeficientes da ondeleta obtidos para os dados de SKIN T do ponto 2 para o intervalo de 2000-2003.

O espectro da série SKIN T 2 entre os anos de 2000 e 2004 (figura 3.17) também revela o forte pico espectral e a interação entre escalas dentro da banda 20-70 dias, que ocorre no 2º semestre do ano de 2002. Ou seja, mais uma vez fica evidente a importância da interação em banda larga na ocorrência dos extremos de uma variável.

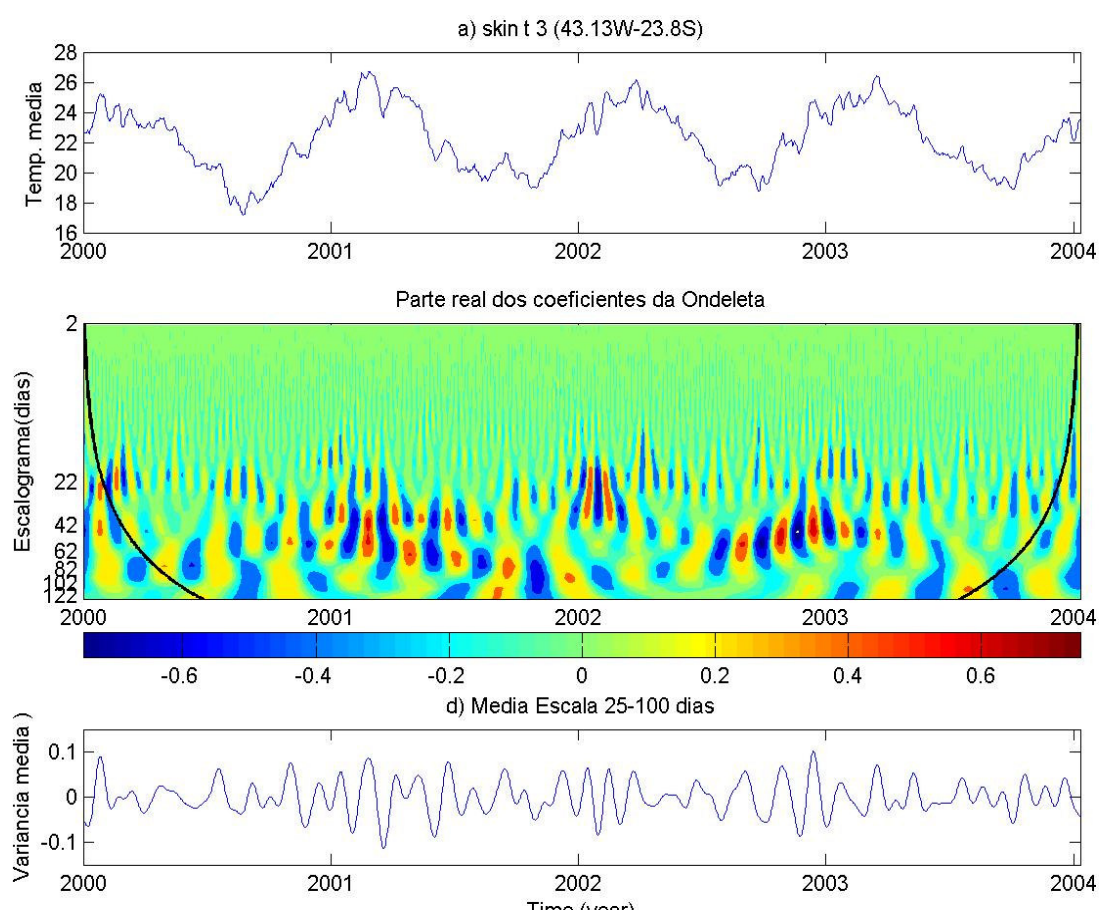


Fig. 3.18 – Série temporal (acima), periodograma (abaixo) da parte real dos coeficientes da ondeleta obtidos para os dados de SKIN T do ponto 3 para o intervalo de 2000-2003.

Por outro lado o periodograma referente a serie SKIN T 3 (figura 3.18) também identifica forte variabilidade no final do ano de 2002. Observa-se que as escalas com maior amplitude começam próximo da banda 50- 90 para em seguida deslocarem-se para a banda de 20-70 dias. Em relação à TMA, observa-se que o período com maior amplitude possui certa defasagem, em cerca de 2 meses (ocorre entre o fim de 2002 e início de 2003). Como comentado anteriormente, no caso da variável SKIN T 3 estar localizada sobre o oceano e mais distante da costa, os extremos espectrais acabam ocorrendo em épocas diferentes. A correlação cruzada entre as séries SKIN T e TMA, será discutida na seção posterior.

3.4 – Cálculo do ECO – Análise do espectro cruzado

Os resultados da seção anterior mostram algumas importantes diferenças e semelhanças entre ambas variáveis (SKIN T e TMA), no entanto, os mesmos resultados não revelam se há ou não correlação quantitativa entre elas. E caso exista, como ocorre e em quais escalas. Por esta razão, para analisar esta questão será realizada uma abordagem robusta, executada através do Espectro Cruzado de Ondeleta (ECO).

Grinsted et. al. (2004), utilizando dados climatológicos, utilizou esta metodologia para correlacionar duas séries temporais (VIEIRA, 2006). As figuras a seguir mostram os resultados para os testes de sensibilidade do método, cujo objetivo foi testar a eficiência do mesmo em correlacionar duas séries com amplitudes variadas no tempo.

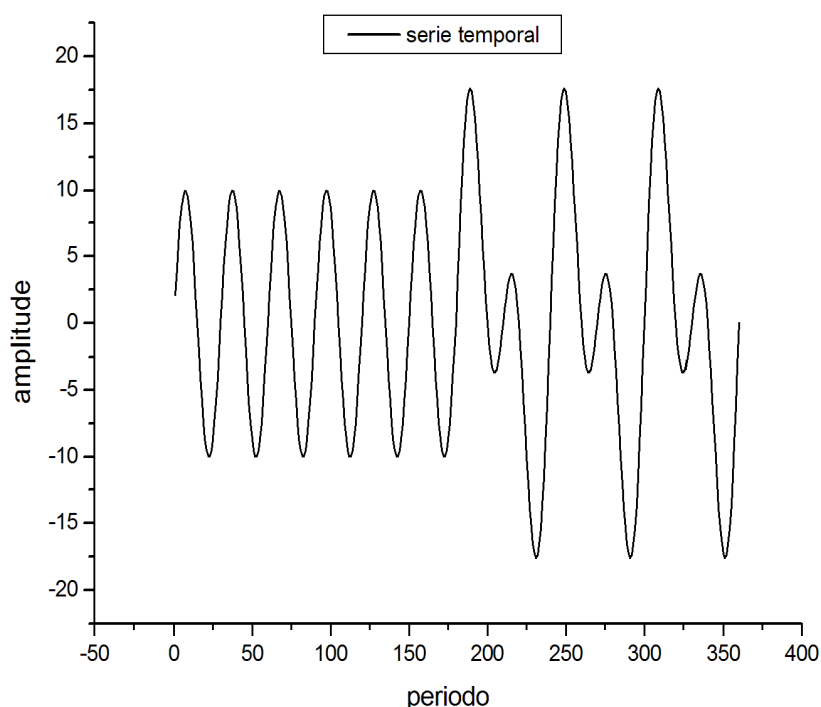


Fig. 3.19 – Série temporal 1, composta por duas séries de amplitudes diferentes para um mesmo período.

A série temporal senoidal de teste denominada série 1 é composta de 730 pontos e indica em sua primeira metade a presença da oscilação de 30 dias, enquanto que a segunda

metade da série contém as oscilações de 30 + 60 dias, com mesma amplitude. Por outro lado, a segunda série contém as oscilações de 30 + 60 dias todo o período, porém com a oscilação de 60 dias tendo o dobro da energia.

Serie 1: $10 \cdot \text{SEN}(2 \cdot \text{PI}() / 30 \cdot \text{A1_A730}) + 10 \cdot \text{SEN}(2 \cdot \text{PI}() / 30 \cdot \text{A360_A730}) + 10 \cdot \text{SEN}(2 \cdot \text{PI}() / 60 \cdot \text{A360_A730})$

Série 2: $5 \cdot \text{SEN}(2 \cdot \text{PI}() / 30 \cdot \text{A1_A730}) + 10 \cdot \text{SEN}(2 \cdot \text{PI}() / 60 \cdot \text{A1_A730})$

Ressalta-se que a figura 3.19 mostra a série ideal teste para somente 360 pontos, ou seja, a primeira metade vai de 1 a 180 dias.

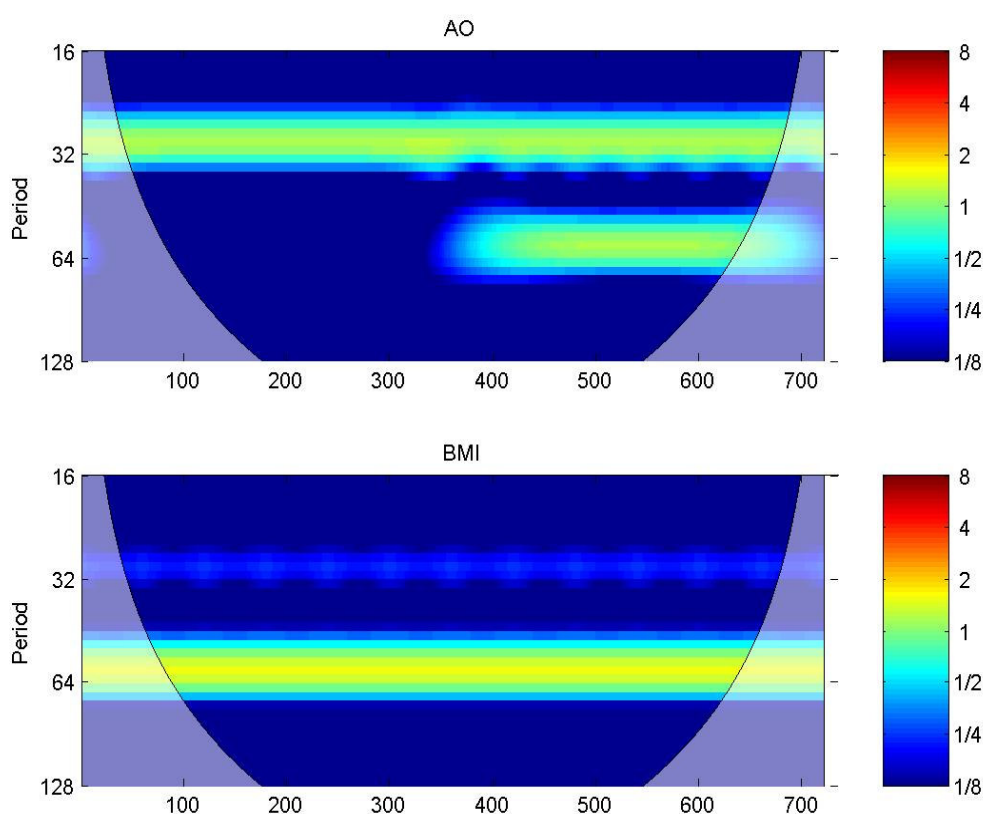


Fig. 3.20 – Periodograma de ondeleta gerado pelo ECO a partir das séries temporais de diferentes amplitudes, ao lado a barra de cores indicando a intensidade das correlações.

Observa-se que o espectro de ondeletas, (neste caso dados em oitavas) captura mudança de padrão imposta à série teste (figura 3.20).

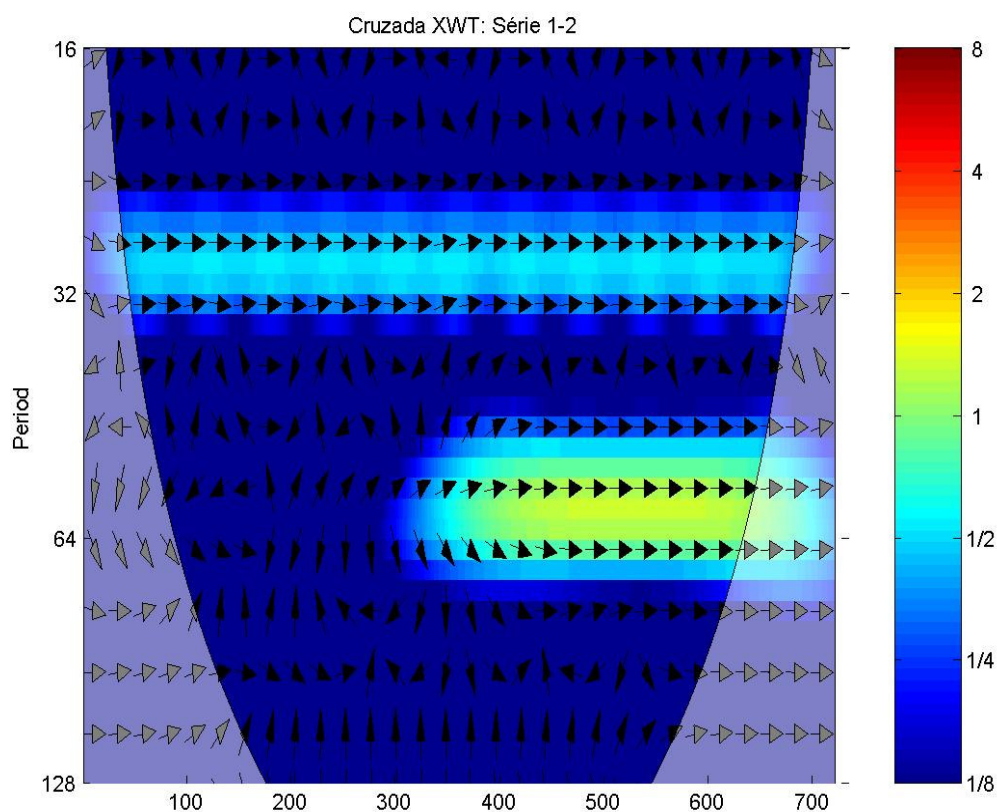


Fig. 3.21 – ECO obtido a partir da correlação cruzada entre as séries da fig. 3.19.

O ECO obtido a partir da correlação cruzada entre as séries testes 1 e 2 possui correlação na oscilação de 30 e 60 dias e indica a eficiência do método em detectar a mudança de covariação entre duas séries: em 30 dias a correção ocorre em todo período, porém com menor amplitude em relação à correlação que ocorre na segunda metade, referente à oscilação de 60 dias.

Por outro lado, a coerência indica correlação constante para a oscilação de 30 dias, uma vez que a coerência somente leva em consideração a fase das escalas, e não a amplitude, como no caso do ECO. Dessa maneira, observa-se que a coerência para a escala de 60 dias começa de fato na segunda metade da série.

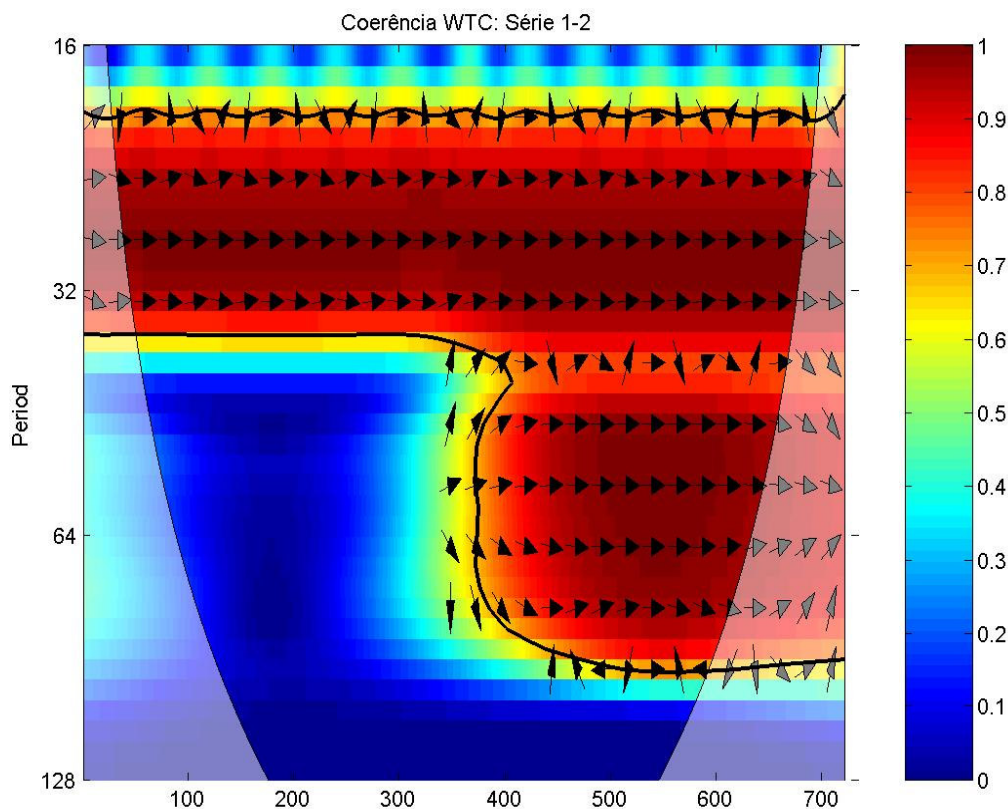


Fig. 3.22 – Espectro de coerência obtido a partir da correlação cruzada da série da fig. 3.19.

Para esta análise, será utilizado o periodograma do ECO que possui as mesmas características do periodograma da ondeleta comum, ou seja, o eixo x denota a escala temporal e o eixo y denotam-se os períodos presentes nas séries temporais e finalmente, a barra de cores indica a intensidade da correlação entre ambas as variáveis. Os gráficos a seguir mostram os resultados das correlações entre TMA e SKIN T 2 e da TMA com o SKIN T 3, ambos para o período completo, isto é, de 1982 a 2005.

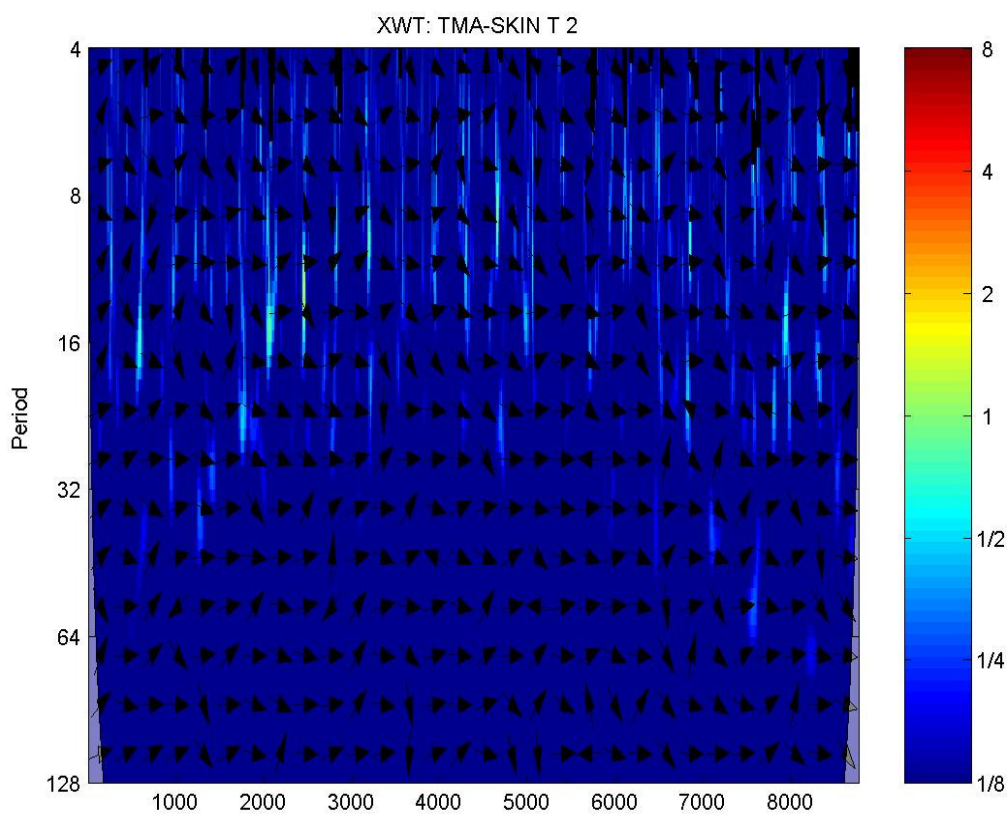


Fig. 3.23 – ECO obtido a partir da correlação cruzada entre as variáveis TMA e SKIN T 2, para os pontos 1 e 2, respectivamente.

Observa-se que na parte inicial e final da série, pontos 1 a 2000 e 7000 a 8766 as correlações entre a TMA x SKIN T 2 concentram-se variam entre bandas de 4 a 60 dias, aproximadamente, enquanto que no período intermediário da série observa-se que a correlação cruzada (dependente da escala e da amplitude das mesmas) indica oscilações abaixo dos 30 dias.

Tempo (dias)	Ano
1	1982
1097	1985
2192	1988
3288	1991
4384	1994
5480	1997
6575	2000
7671	2003

Tabela 3.1 – Indicativo da série temporal corrida (1-7671) e os respectivos inícios dos anos (1982-2003).

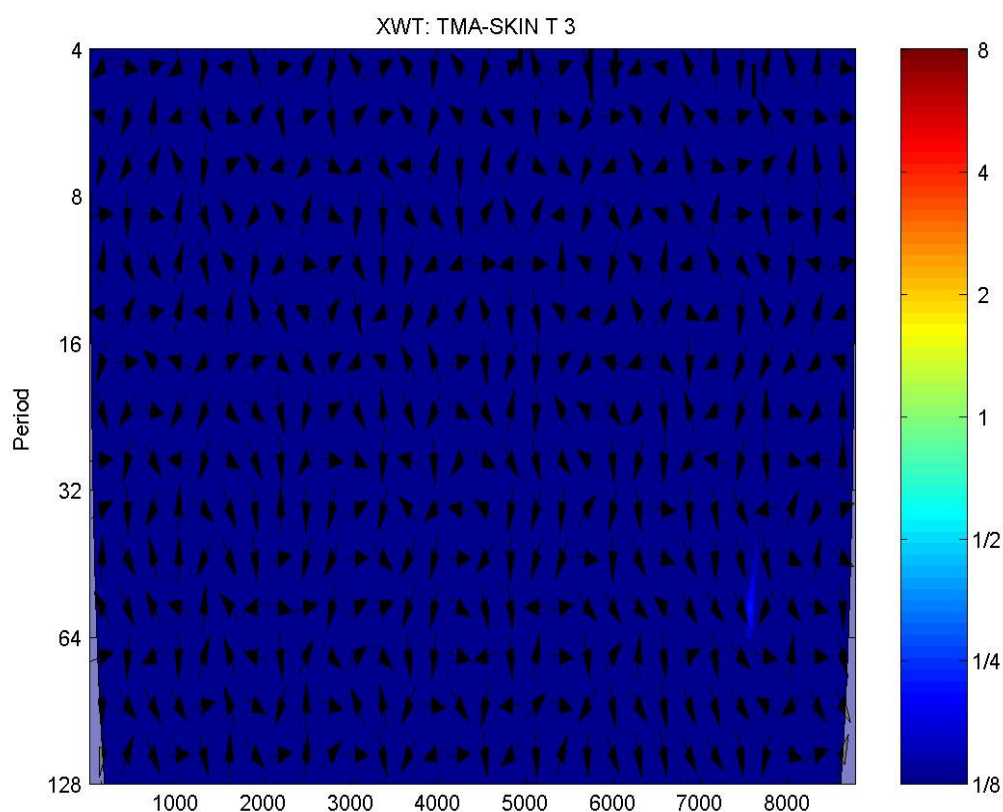


Fig. 3.24 – ECO obtido a partir da correlação cruzada entre as variáveis TMA e SKIN T 3, para os pontos 1 e 3, respectivamente.

Interessante destacar que nos primeiros anos da série, 1 a 2192 (anos de 1982 a 1982) a correlação começa em baixa frequência e “desloca-se” para frequências mais altas, enquanto que no final da série (tempo 6575- por volta do ano de 2000 em diante) a correlação desloca-se da alta para a baixa frequência. Os maiores valores absolutos de correlação cruzada foram

detectados próximo da escala de 15 dias (1983, 1988 e 2004). Na banda intrasazonal, as maiores correlações são observadas aproximadamente nos anos de 1986, 1988, 1995-1996 e 2002-2003.

Um resultado extremamente relevante é o que indica a importância conjunta do continente e do oceano (SKIN 3 T no caso de 2002-2003). Além disso, a figura 3.24 detecta pico de correlação cruzada neste período, ou seja, houve forte variabilidade no continente e no oceano. Uma análise mais detalhada, no entanto, permite afirmar que a contribuição relativa do oceano neste caso foi maior, visto que no final do ano (2002), a série SKIN T 3 aumenta fortemente sua amplitude, enquanto que a TMA diminui. (ver figuras 3.16 e 3.18)

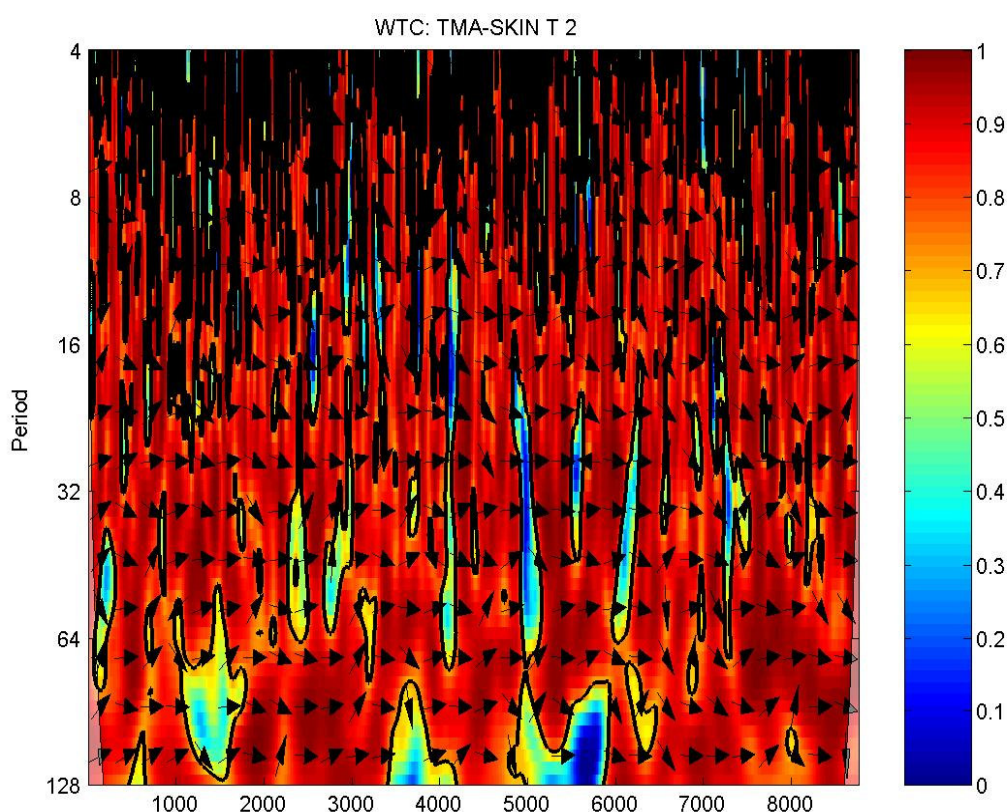


Fig. 3.25 – Espectro de coerência obtido a partir da correlação cruzada entre as variáveis TMA e SKIN T 2, para os pontos 1 e 2, respectivamente.

A figura 3.25 possui forte correlação em praticamente todo o período, denotado pelo tom avermelhado do espectro de coerência, cuja correlação tem valores superiores a 0,8. Alguns períodos, no entanto, mostraram pouca coerência, como o observado entre 5000-6000

(referente aos anos de 1996-1998). Os valores de escala neste período ficaram concentrados na banda entre 15-60 dias e de 80-120 dias.

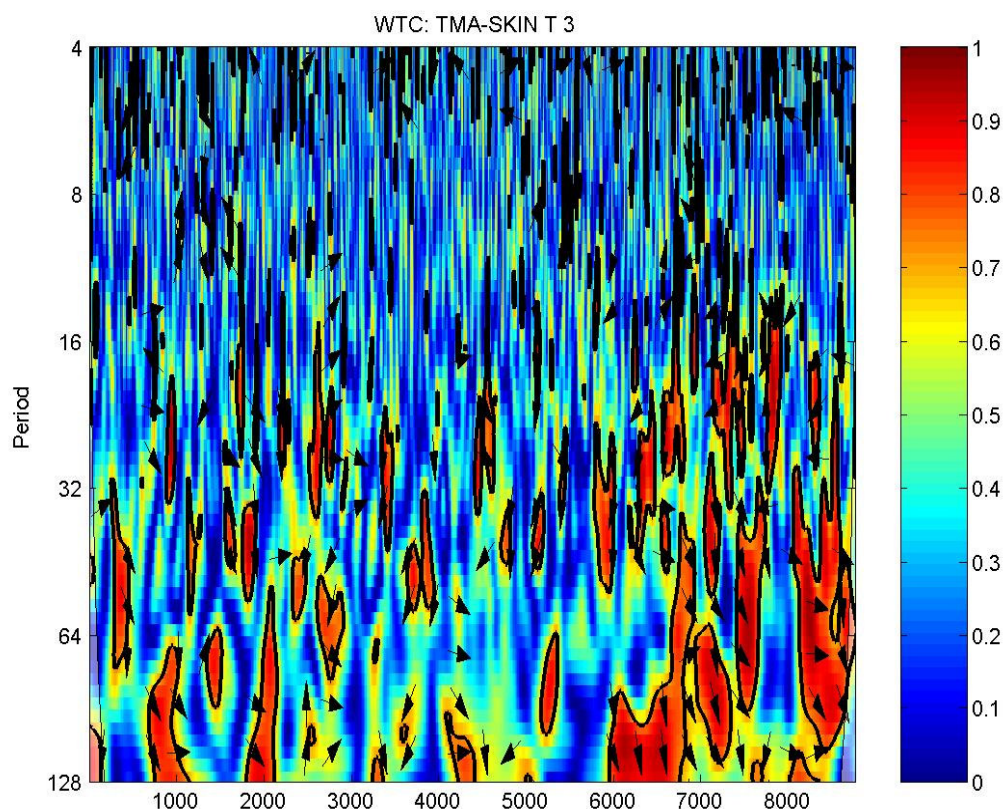


Fig. 3.26 – Espectro de coerência obtido a partir da correlação cruzada entre as variáveis TMA e SKIN T 3, para os pontos 1 e 3, respectivamente.

A figura 3.26 é relativa a coerência entre as séries de TMA e SKIN 3 T, as cores indicam uma correlação moderada dentro da escala intrasazonal, principalmente. Os maiores valores obtidos foram observados entre 0,7 e 0,9. Observa-se também que a partir do ano de 1999 (aproximadamente 5480), houve uma interação entre a banda intrasazonal e a banda submensal. Os maiores valores absolutos encontram-se entre 6000 e 7500 (referentes aos anos de 1998 a 2002).

3.5 – Análise sinótica: Associação dos períodos e o comportamento das variáveis

Nesta seção serão discutidos os padrões sinóticos globais e regionais de SKIN T, referentes às regiões do Pacífico Equatorial e região do Atlântico (Norte e Sul Subtropical).

3.5.1 – Análise da SKIN T e os padrões globais do Atlântico e do Pacífico

A variável SKIN T passou a ser utilizada há algum tempo para substituir em alguns casos, dados de TSM, o NCEP disponibiliza a análise sinótica de alguns períodos, especialmente após a década de 80, e vem usando esta variável como opção a TSM como forçante ou fonte de alguns modelos climáticos, ou ainda mesmo como aproximação e interpolação com a TSM (Kalnay et al., 1996).

3.5.2 – Caso de 1985

Em maio de 1985 observa-se um dipolo no Atlântico Sul subtropical, próximo à região de estudo, com águas mais aquecidas ao norte e mais frias ao sul (Figura 3.27). No mesmo período são observadas condições de águas ligeiramente frias (entre Neutras e La Nina fraca) sobre a região que abrange a bacia do Pacífico Tropical, especialmente no Pacífico Leste. No decorrer dos meses, entre junho e julho, nota-se um prolongamento das águas mais frias sobre a costa de São Paulo, com a continuidade da presença do dipolo na TSM (Figuras 3.28 e 3.29).

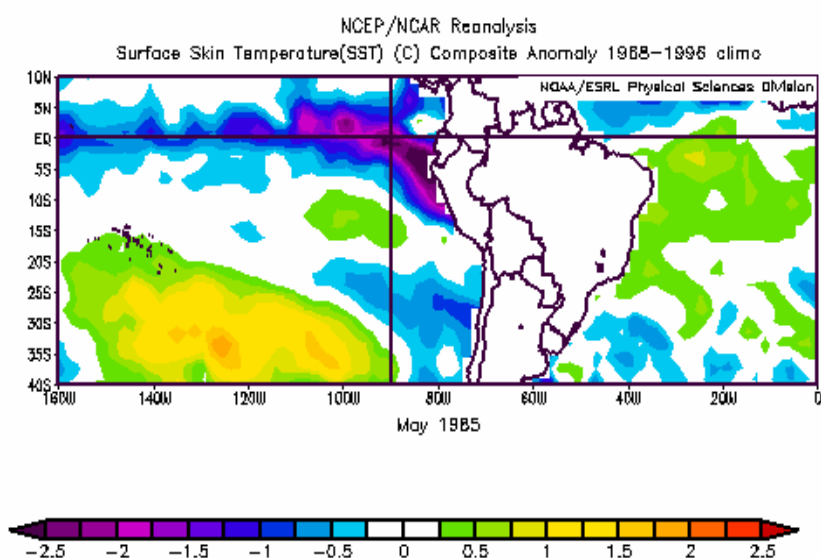


Fig. 3.27 – Anomalias de Skin temperature (Climatologia 1968-1996) para o mês de Agosto/1992, derivadas do projeto de reanálise do NCEP/NCAR. Os valores em tons avermelhados indicam anomalias positivas, enquanto que tons azulados indicam anomalias negativas.

Nas séries de TMA e SKIN T 2 identificou-se forte oscilação perto de 30-50 dias, enquanto que na série de SKIN T 3 (mais distantes do continente) não observou-se oscilação significativa, ou seja, neste caso a variabilidade sobre o continente foi mais destacada.

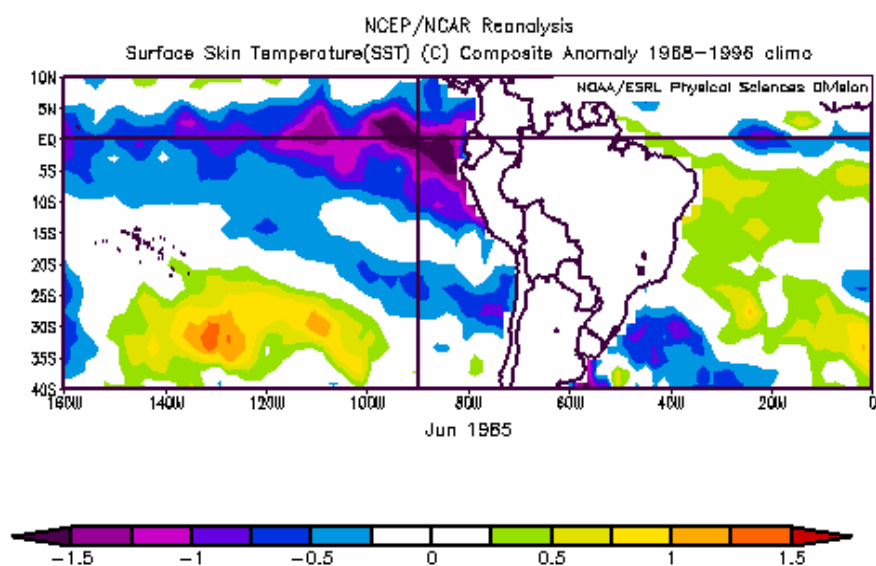


Fig. 3.28 – Mesmo que a fig. 3.27, exceto para o mês de Junho/1985.

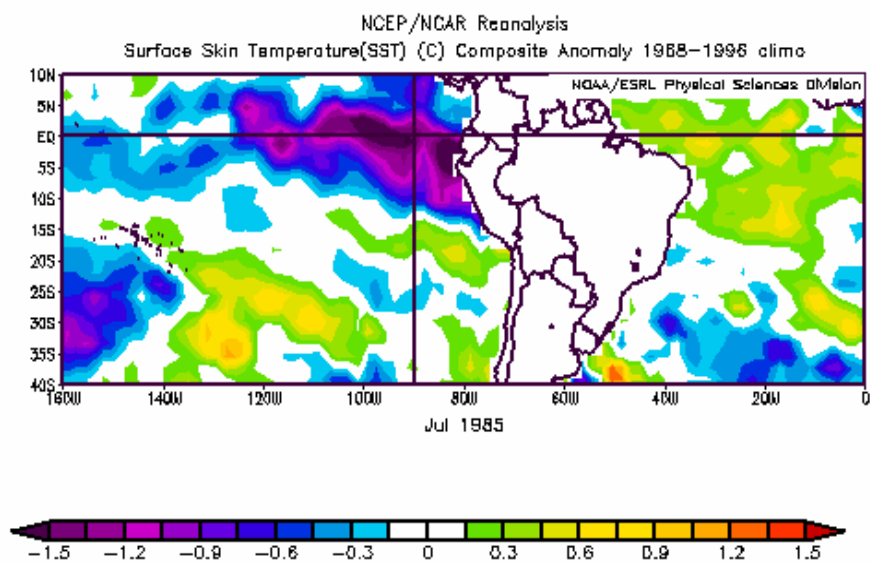


Fig. 3.29 – Mesmo que a fig. 3.27, exceto para o mês de Julho/1985.

3.5.3 – Caso de 1992

O caso de 1992 (Figuras 3.30 e 3.31) revela condições de TSM acima do normal tanto no Atlântico subtropical bem como no Pacífico (El Nino fraco). No Atlântico Norte observa-se anomalias de águas mais frias do que o normal, estabelecendo um dipolo em relação às águas mais quentes do sul. Nos meses de junho a agosto o dipolo no Atlântico permanece, porém perde intensidade. As águas sobre a região de estudo sofreram um leve resfriamento.

Por outro lado no Pacífico equatorial a TSM resfria-se rapidamente, o que volta a indicar condições de neutralidade. As oscilações observadas na TMA e SKIN T 2 concentraram-se nas escalas de 20- 30 dias, com pouca amplitude, enquanto que a série SKIN T 3 mostrou forte amplitude na banda larga de 20-90 dias. Neste caso, o oceano mostrou maior variabilidade espectral.

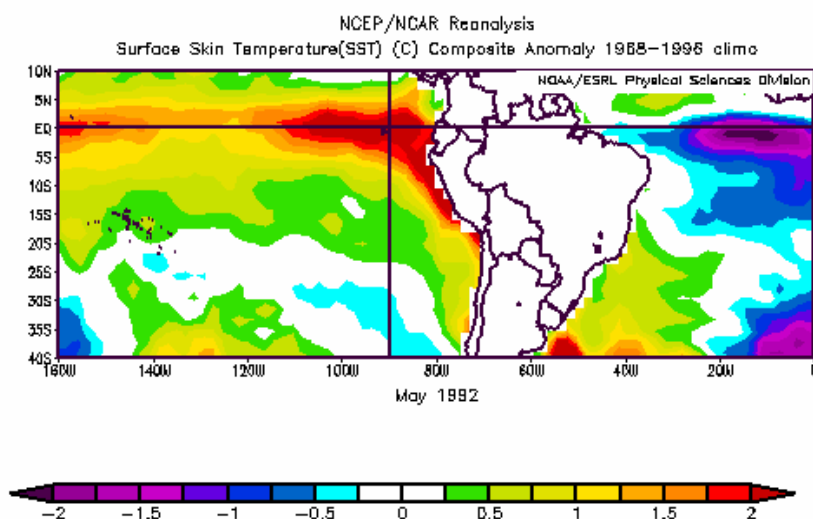


Fig. 3.30 – Mesmo que a fig. 3.27, exceto para o mês de Maio/1992.

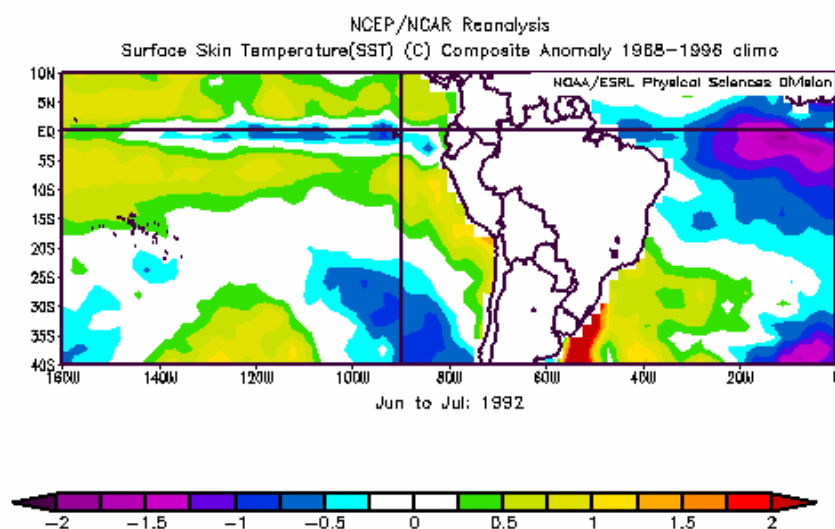


Fig. 3.31 – Mesmo que a fig. 3.27, exceto para os meses de Junho a Julho/1992.

3.5.4 – Caso de 2002

O caso de 2002 volta a revelar um dipolo no Atlântico subtropical, com águas mais aquecidas no sul em relação ao norte (figuras 3.32 a 3.34). Condições de TSM mais quentes do que o normal são observadas sobre o Pacífico centro-leste (El Nino fraco-moderado). As oscilações na TMA e SKIN 2 T ficaram entre 50-90 e 20-70 dias. Em relação à TMA, observa-se que o período com maior amplitude tem certa defasagem, em cerca de 2 meses (ocorre entre o fim de 2002 e início de 2003). Dessa maneira, os extremos espectrais acabam ocorrendo em épocas diferentes. Observa-se, portanto, que a variabilidade intrasazonal foi importante tanto no continente como no oceano. Fato importante a ser destacado é que a filtragem na banda intrasazonal 25-100 dias indica que o extremo espectral ocorre antes no continente em relação ao oceano (como destacado anteriormente).

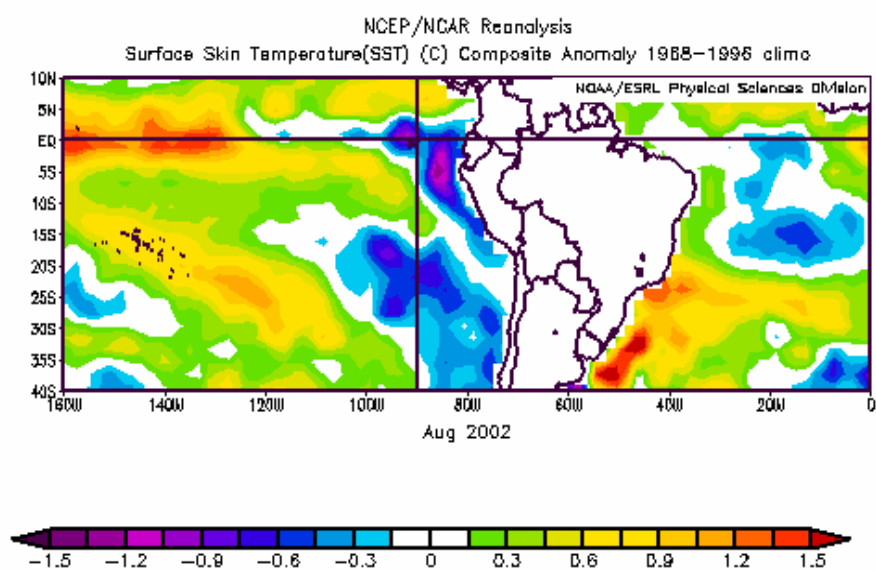


Fig. 3.32 – Mesmo que a fig. 3.27, exceto para o mês de Agosto/2002.

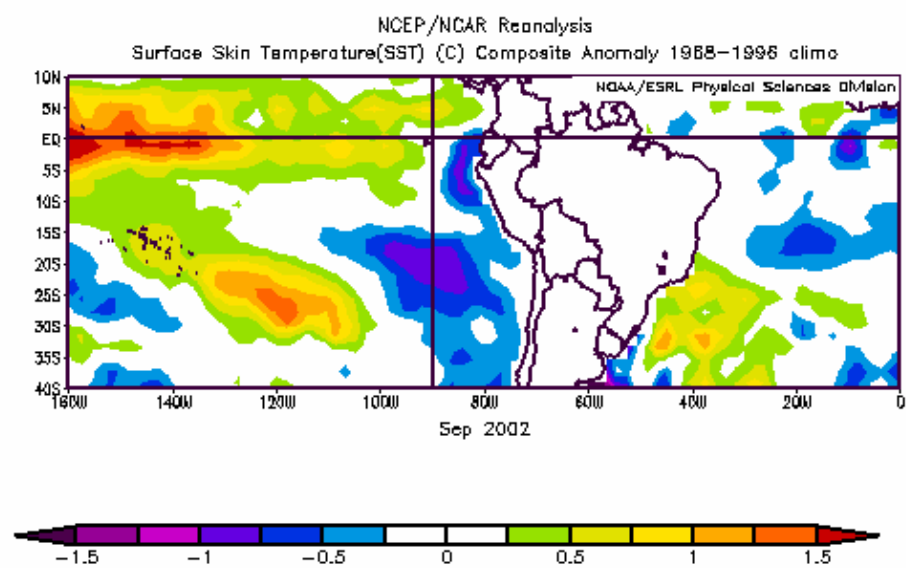


Fig. 3.33 – Mesmo que a fig. 3.27, exceto para o mês de Setembro/2002.

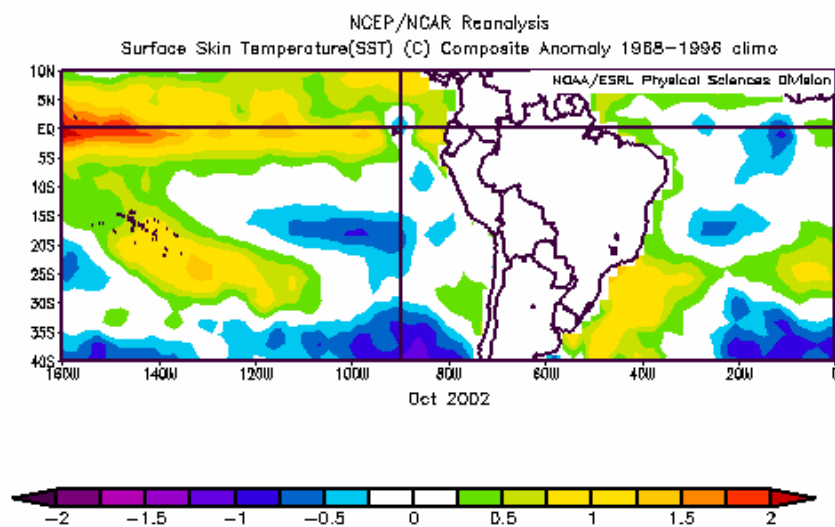


Fig. 3.34 – Mesmo que a fig. 3.27, exceto para o mês de Outubro/2002.

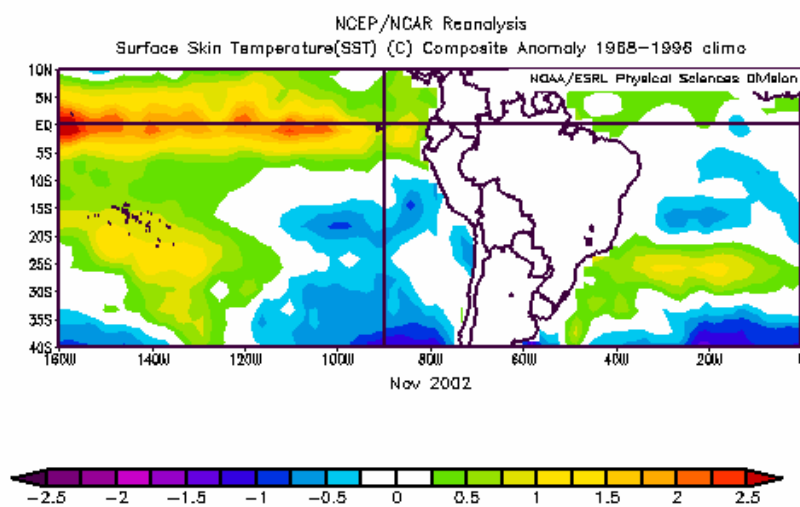


Fig. 3.35 – Mesmo que a fig. 3.27, exceto para o mês de Novembro/2002.

CAPÍTULO 4

4.1 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo mostrou algumas das características e padrões gerais da variabilidade intrasazonal sobre a cidade de São Paulo e o Oceano Atlântico Sul adjacente no período entre 1982 e 2005. Os principais resultados referentes ao método da filtragem da Ondeleta e Lanczos indicaram que as duas técnicas mostraram-se efetivas dentro da banda intrasazonal e tiveram boa similaridade quanto à variação em fase e amplitude.

As maiores diferenças quanto à amplitude ocorreram entre a TMA e o SKIN T 3 , ou seja, entre o continente e o ponto mais distante, provavelmente devido à normalização empregada no método da Ondeleta, que evidencia a alta frequência e a banda intrasazonal. Mesmo assim houve uma ótima concordância de fase entre a filtragem de Lanczos e a executada pela Ondeleta.

O método de filtragem da Ondeleta, dentro da banda intrasazonal, permitiu detectar alguns períodos particulares onde a energia obteve forte variabilidade. Para tanto se investigou o comportamento tanto da energia global das variáveis bem como amplitude relacionada aos coeficientes da parte real da Ondeleta (método este que identifica os mínimos e máximos locais da série, ou seja, associados a extremos). Os anos de 1985, 1992 e 2002-2003 mostraram-se como os mais significativos em termos de energia e amplitude, nos espectros globais e da parte real.

No caso da TMA e SKIN T 2 o período mais ativo na banda intrasazonal 25-100 dias foi no ano de 1985 enquanto que para a série de SKIN T 3 o período mais ativo ocorreu entre os anos de 2001 e 2003.

Observa-se que em alguns anos, como especialmente no caso de 2002, houve a formação de uma estrutura do tipo multiescala, com características auto-similares do tipo fractal. Neste período há a chamada interação de banda larga, que proporciona a ocorrência de máximos e mínimos na série.

O trabalho também investigou a correlação objetiva entre a variável do continente TMA e as oceânicas SKINs. O método da transformada cruzada em ondeleta foi eficiente em averiguar os períodos de covariância (variabilidade simultânea entre as séries). Os principais

resultados indicaram que o período com maior correlação cruzada ocorreu no ano de 2002, período em que foram observados extremos espectrais.

A técnica de correlação baseada na coerência (a qual indica variabilidade em fase, independentemente da amplitude) foi também aplicada aos dados e revelou que de fato há forte correlação entre a série do continente (TMA) e a série próxima do oceano (SKIN T 2). Esse resultado vai ao encontro dos obtidos por Cardoso (2000), que atribuiu forte influência da TSM do Atlântico Sul sobre o clima de inverno na cidade de São Paulo. Os resultados aqui encontrados também revelam que à medida que se afasta do continente, ocorre uma diminuição da intensidade da correlação, ou seja, a SKIN deixa de ter influência significativa sobre a cidade de São Paulo.

Apesar de serem baseados em sucessivas interpolações os dados de SKIN T mostraram-se capazes de identificar oscilações dentro da escala intrasazonal, ou seja, os dados de SKIN T, em especial, foram úteis na identificação de períodos com variabilidades associadas às escalas mais lentas. Reforça-se, portanto, que os mesmos dados não são apropriados para um estudo mais detalhado de oscilações rápidas, inerentes à passagem de frentes frias, por exemplo.

Na seção referente aos estudos de casos identificaram-se alguns padrões característicos de comportamento da SKIN T nos Oceanos Pacífico e Atlântico que conduziram a eventos extremos do sinal das variáveis de TMA e de SKIN. Observou-se que em geral, nos anos de 1985, 1992 e 2002 houve a formação de um dipolo de SKIN T entre o Atlântico Norte e a região do Atlântico Sul subtropical. Destaca-se que na fronteira entre estas duas áreas localiza-se a região de estudo oceânica deste trabalho, relacionada ao ponto SKIN T 3.

Nos anos de 1992 e 2002 observaram-se condições limiars de El Niño, com águas do Pacífico mais aquecidas do que o normal, enquanto que o ano de 1985 apresentou condições de neutras a ligeiramente abaixo do normal.

4.2 – Sugestões para trabalhos futuros

- Continuidade de estudos referentes à correlação entre a região oceânica do Atlântico Sul e a América do Sul;
- Investigação sobre o impacto dos dipolos de TSM e forçantes do El Niño e La Niña.

-Análise de correlação entre os máximos e mínimos observados na série e a estrutura autosimilar encontrada.

Referências Bibliográficas

CAI, M. & MAK, M. – Symbiotic relation between planetary and synoptic-scale waves. *J.Atmos.Sci.*, 47, 2953-2968, 1990.

CHIERICE, R. A. F. – O Uso de Wavelets na Detreminação do Expoente de Hurst de Uma Série Temporal Diária de Chuvas do Município de Araras-SP – de 1955-2000, 2003.

CLIMANALISE ESPECIAL – Boletim do monitoramento e análise climática. São José dos Campos-SP. Brasil. INPE/ CPTEC, 123-130p, 2001.

CLIMANALISE ESPECIAL – Boletim do monitoramento e análise climática. São José dos Campos-SP. Brasil. INPE/ CPTEC, 123-130p, 2001.

DAUBECHIES, I – Ten Lectures on Wavelets. SIAM, 357pp, 1992.

DORELO, M. B. – Análise espectral de séries climatológicas de superfície e altitude para a região de São Paulo. Dissertação de Mestrado. Departamento de Ciências Atmosféricas IAG/USP, São Paulo (SP), 75p, 1990.

DUCHON, C.E. – Lanczos Filtering in one and two dimensions. *Journal of Applied Meteorology*, 18, 1016-1022, 1979.

FOUFOULA-GEORGIU, E. & KUMAR, P. – Wavelets in Geophysics: Wavelet analysis and its applications. San Diego, *Academic Press*, 372p. 1994.

FREITAS, E. D. – Variabilidade Sazonal e Intrasazonal da precipitação no estado do Paraná. Dissertação de Mestrado. Departamento de Ciências Atmosféricas, IAG/USP, 133p, 1998.

KALNAY, E. – The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bull.Amer.Meteor.Soc.*, 77, 437-471, 1996.

KOUSKY, V. E. & CAVALCANTI, I. F. A. – Eventos Oscilação Sul – evolução e anomalias de precipitação. *Ciência e Cultura*, 36(11), Novembro de 1984.

KOUSKY, V.E. – Pentad outgoing long wave radiation climatology for the South American sector. *Rev.Bras.Meteor.*, 3, 217-231, 1988.

LAU, K.M.; CHAN, P.H.: Intraseasonal and Interannual variability of tropical convection: A possible link between the 40-50 day oscillation and ENSO? *J.Atmos.Sci.*, 45, 506-521, 1988.

LAU, K.M. & CHAN, P.H.: The 40-50 day oscillation and ENSO: A new perspective. *Bull. Amer.Meteor.Soc.*, 67, 533-534, 1986.

LIEBMANN, B., SMITH, C., G.N. KILADIS – Description of a complete (interpolated) outgoing longwave radiation. *Bull Amer. Meteor. Soc.*, 77, 1570-1573, 1996.

LORENZ, E.N. – The nature of the global circulation of the atmosphere: a present view. *The Global Circulation of the Atmosphere*, Roy.Meteor.Soc., London, 3-32, 1969.

LORENZ, E.N. – Can chaos and intransitivity lead to interannual variability? *Tellus*, 42A, 378-389, 1990.

MANDELBROT, B. B. – The fractal geometry of nature. New York: W. H. Freeman, 1983.

MADDEN, R.A. & JULIAN, P.R. – Detection of a 40-50 day oscillation in the zonal wind in the tropical Pacific. *J.Atmos.Sci.*, 28, 702-708, 1971.

MADDEN, R.A. & JULIAN, P.R. – Description of global-scale circulation cells in the tropics with a 40-50 day period. *J.Atmos.Sci.*, 29, 1109-1123, 1972.

MARTON, E. – Oscilações Intrasazonais Associadas à Zona de Convergência do Atlântico Sul no Sudeste Brasileiro. *Tese de Doutorado em Meteorologia*, IAG/USP, 2000, São Paulo (SP).

MISITI M., MISITI Y., OPPENHEIM G., POGGI J. M. – Wavelet Toolbox For Use With Matlab, The MathWorks Inc, 1996.

MORLET, J. – Wave propagation and sampling theory. *Geophys.*, 47, 222-236, 1982.

MORETTIN, P.A. – Ondas e Ondaletas: Da Análise de Fourier à Análise de Ondaletas. Editora da Universidade de São Paulo, São Paulo, EDUSP, SP, 1999.

MUZA, M. N. – Variabilidade Intrasazonal e Interanual dos Eventos Extremos de Precipitação e Seca no Sul e Sudeste do Brasil durante o Verão Austral. Dissertação de Mestrado. Departamento de Ciências Atmosféricas, IAG/USP, São Paulo (SP), 177p, 2005.

NOBRE, C. A – Ainda sobre a Zona de Convergência do Atlântico Sul: A importância do Oceano Atlântico. *Climanálise*, 3(4), 30-33, 1988.

PHILANDER, S.G. – El Niño, La Niña, and the Southern Oscillation. Academic Press, INC. San Diego, Califórnia, 1990.

REBOITA, M.S. – Elementos da Variabilidade Climática no Extremo Sul do Brasil, no Período de 1990 a 2001. Dissertação de Mestrado, Fundação Universidade Federal Do Rio Grande – FURG, Rio Grande, RS, Fevereiro de 2004.

SCHNEIDER, M. – A Intrasazonalidade Nas Regiões Sul Sudeste E Centro-Oeste Do Brasil Durante Os Meses De Inverno. Dissertação de Mestrado, Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas – IAG/USP, São Paulo, SP, Fevereiro de 2004.

SILVÉRIO, A.C. – Aleatorização da Amplitude de Aquecimento num Modelo Acoplado Oceano-Atmosfera e Mecanismo de Criticalidade Auto-Organizada no Fenômeno ENSO, Dissertação de Mestrado, Departamento de Física da Universidade Federal do Ceará, 1996.

SILVA, A.R.J. – Padrões de evolução do clima em São Paulo. Relatório de Iniciação Científica, Departamento de Ciências Atmosféricas, Instituto Astronômico e Geofísico da USP, 1988.

SILVA DIAS, P.L.; CAPLAN, P.; KOUSKY, V.E. – As chuvas Intensas de Fevereiro de 1988: Circulação Global e Previsibilidade. *Anais do Cong.Bras.Meteor.*, 1988.

TORRENCE, C. & COMPO, G.P. – A practical guide to wavelet analysis. *Bull.Amer.Meteor.Soc.*, 79, 61-78, 1998.

VIEIRA, P. C. – Análise estatística e Ondeletas aplicadas ao vento solar e densidade de prótons. Dissertação de Mestrado. Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento, UNIVAP, São José dos Campos (SP), 89p, 2006.

VITORINO, M, I. – Análise das Oscilações Intrasazonais Sobre a América do Sul e Oceanos Adjacentes Utilizando a Análise de Ondeletas. Tese de Doutorado, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE, São José dos Campos, SP, Dezembro de 2002.

WENG, H. e LAU, K. M. – Wavelets, period doubling, and time- frequency localization with application to organization of convection over Tropical Western Pacific. *J. Atmos. Sci.*, 51, 2523-2541, 1994.

APÊNDICE A

Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas
Mini-curso de Mecânica Estatística Não-extensiva

Aplicabilidade da Geometria Fractal em Geofísica

Por Alrenice Cunha de Castro

Rio de Janeiro, Abril de 2007

Resumo

Séries temporais de variáveis geofísicas retratam sistemas de grande complexidade, devido a influencia de vários fatores naturais como: pressão atmosférica, umidade, temperatura, topografia, sazonalidade, entre outros. A previsibilidade dos fenômenos que envolvem variáveis geofísicas tem sido objeto de várias pesquisas atualmente. Dados observacionais de séries temporais e de modelos matemáticos denotam a ausência de uma escala temporal única, característica de alguns fenômenos geofísicos. Uma vez que a maioria destes fenômenos é aperiódico (ou quase-periódico, com apenas uma banda larga de escala temporal interanual), a previsão desses eventos é meramente probabilística. Nestas condições, as flutuações temporais de variáveis geofísicas podem ser consideradas autocorrelacionadas – condição para se aferir um grau de previsibilidade – e a estatística fractal pode ser aplicável. O objetivo desta monografia é enfatizar o uso de alguns métodos recentes que podem ser aplicados a séries temporais de sistemas complexos, como a estatística fractal e obter informações sobre propriedades de longo alcance do sistema.

A1. Introdução

Sistemas formados por variáveis geofísicas são importantes elementos para o desenvolvimento de trabalhos sobre análise ambiental e previsão de tempo e clima. Entretanto, a previsão deste tipo de sistema envolve interação entre muitas variáveis, sendo, portanto, muito difícil aferir a estes sistemas um grau de previsibilidade. Os mecanismos associados a estes sistemas são completamente aleatórios. Recentemente, estudos mais precisos têm revelado uma certa “ordem” nestes sistemas, que se expressa sob a forma de uma invariância de escala. Esta invariância está associada à geometria fractal LOVEJOY, MANDELBROT (1985). Vários estudos mostram que séries temporais de variáveis geofísicas possuem propriedades dos fractais (multifractais), isto indica que estas séries podem ser tratadas como sistemas complexos. Análises observacionais mostram também que os fenômenos geofísicos se enquadram dentro da classe de sistemas dinâmicos com criticalidade auto-organizada, ou seja, com muitos graus de liberdade. Uma vez que a presença de auto-similaridade espacial confere a esta classe de sistemas uma característica fractal, é possível determinar uma dimensão fractal para as séries temporais de variáveis geofísicas. Esta informação é relevante para se atestar o grau de previsibilidade dos fenômenos geofísicos.

Através da geometria fractal podemos encontrar regras simples para descrever, modelar e analisar as formas complexas encontradas na natureza. Muitos fenômenos naturais manifestam essa invariância: registros hidrológicos, variáveis solares, registros de temperaturas, etc. Como estas variáveis são elementos de sistemas complexos naturais com estruturas fractais, localizadas entre séries temporais periódicas e aleatórias. E com o objetivo de compreender melhor o comportamento complexo, bem como os padrões associados a estes fenômenos, faz-se necessário à aplicação de métodos matemáticos que contemplem a natureza não-linear dos mesmos.

A2. Fractais

O termo “fractal” significa fragmentado, quebrado, irregular (do latim, *fractus*) Este vocabulário foi utilizado pela primeira vez pelo matemático polonês Benoit Mandelbrot em 1967, popularizando-se depois da publicação do livro **The Fractals Geometry of Nature** MANDELBROT (1982). Esta publicação é uma versão estendida e atualizada do seu livro “*Les Objects Fractales: for me, harsad et dimension*”, publicado em 1975. Ao criar a geometria fractal, Mandelbrot estabeleceu as bases para o estudo focalizando as formas fragmentadas e irregulares. Tais categorias de formas são normalmente geradas por uma dinâmica caótica, de forma que a geometria descreve os traços e as marcas deixadas pela passagem dessa atividade dinâmica. Desta maneira, um fractal é a fratura deixada por um terremoto ou a linha costeira sinuosa esculpida pela turbulência dos oceanos e a erosão; as estruturas ramificadas de uma samambaia, que marca o processo de seu crescimento; os fragmentos irregulares do gelo à medida que as águas se congelam. Portanto os fractais descrevem a rugosidade do mundo, sua energia, suas mudanças e transformações dinâmicas.

Segundo o trabalho de Mandelbrot, os fractais são definidos como estruturas auto-similares, ou seja, aquelas que se apresentam da mesma forma qualquer que seja a escala sob a qual são vistas. Mas a maior contribuição deste conceito é uma definição de *dimensão* onde objetos heterogêneos podem ser convenientemente medidos. A geometria dos fractais e seus conceitos têm se tornado, nos últimos vinte anos uma ferramenta primordial nas ciências naturais. Hoje a geometria fractal está no centro dos processos de modelagem de fenômenos naturais.

De acordo com Mandelbrot,

“Um fractal é uma figura feita de partes similares ao todo de alguma forma”.

Os matemáticos que contribuíram para o desenvolvimento da geometria fractal destacam-se Georg Cantor (1845-1918) que ao desenvolver o denominado *conjunto de pontos* de Cantor, em 1883, já visualizava aspectos da teoria dos fractais. Porém o grande salto de Mandelbrot foi perceber a possibilidade de usar os fractais para resolver complexos problemas matemáticos, dando-lhes uma forma geométrica, o que à época, causou grande resistência no meio científico. Em seus estudos, Mandelbrot apresentou alternativas para a resolução em oposição ao tradicional uso da geometria euclideana.

A3. Dimensão

A geometria dos fractais possibilita concepções mais amplas para se estudar a dimensionalidade de um objeto. Elas baseiam-se na idéia de medidas. Mandelbrot foi além das dimensões inteiras 0,1, 2, 3,... até uma impossibilidade aparente: as dimensões fractais (dimensões fracionadas). No mundo fractal há irregularidades e sinuosidades e se ganha cada vez mais informações à medida que se aprofunda a análise em escalas ampliadas. A dimensão fracionada torna-se uma maneira de medirem-se propriedades, tais como as irregularidades de um objeto. Mandelbrot especificou maneiras de calcular a dimensão fracionada dos objetos reais, e fez com sua geometria uma afirmação sobre os padrões irregulares da natureza: a de que o grau de irregularidade permanece constante em diferentes escalas. Existem várias definições para dimensão, entretanto, aqui, foram reproduzidas aquelas que se encaixam no conceito de fractal.

Definição Euclidiana: A geometria dimensional Euclidiana pressupõe que os objetos se distribuem no espaço assumindo dimensões inteiras. Como, por exemplo, uma reta, que possui uma única dimensão (monodimensional), um plano, que possui duas dimensões (bidimensional), para o ponto, admiti-se dimensão zero.

Dimensão Fractal: ou dimensão de medida ou de similaridade. É aquela que existe fora dos limites da dimensão inteira. A definição de dimensão fractal está relacionada com o conceito de medida MANDELBROT (1982):

Por exemplo:

- 1) Se quisermos medir uma reta escolhemos uma escala ε e seu comprimento L será definido por

$$L = N(\varepsilon) \cdot \varepsilon \quad (3.1)$$

tal que $N(\varepsilon)$ é o número de vezes que a escala ε é aplicada.

- 2) Se quisermos medir a área A de uma região plana, teremos:

$$A(\varepsilon) = N(\varepsilon) \cdot \varepsilon^2 \quad (3.2)$$

O processo análogo é aplicado então a outras estruturas geométricas, como o volume. De acordo com os exemplos citados, podemos perceber que ao reduzirmos a escala ε a medida (comprimento, área, volume) se torna mais precisa. Portanto podemos definir de forma genérica a medida M :

$$M = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} N(\varepsilon) \cdot \varepsilon^{D_m} \quad (3.4)$$

Onde D_m é a dimensão do instrumento de medida, ou seja, se estamos medindo com retas $D_m = 1$ e no caso de planos $D_m = 2$.

Avaliando o $N(\varepsilon)$ temos que, no caso de uma reta, à medida que ε diminui, o número de intervalos $N(\varepsilon)$, que é necessário para cobrir toda a figura, aumenta com a razão inversa, ou seja,

$$N(\varepsilon) \sim \varepsilon^{-1} \quad (3.5)$$

Generalizando para qualquer construção geométrica,

$$N(\varepsilon) \sim C \cdot \varepsilon^{-D} \quad (3.6)$$

Onde C é uma constante de proporcionalidade e D a dimensão a ser obtida. Assim, tomando o logaritmo da equação 3.6 temos que:

$$\text{Log } [N(\varepsilon)] = \text{Log } C + D \text{Log } (1/\varepsilon) \quad (3.7)$$

A dimensão D pode ser obtida diretamente pela inclinação da reta $\text{Log } C + D \text{Log } (1/\varepsilon)$ ou pela relação de Mandelbrot,

$$D = \frac{\text{Log } [N(\varepsilon)]}{\text{Log } (1/\varepsilon)} \quad (3.8)$$

A teoria dos fractais consegue descrever as formas da natureza que anteriormente não eram tratadas matematicamente, como a forma de uma nuvem, por exemplo. Isso implica em se relacionar dimensão fractal com as irregularidades dos objetos e processos complexos tendo como base uma “dimensão de referencia” inteira (euclidiana). Em D está a idéia de preenchimento de espaço, pois, à medida que D aumenta o grau de preenchimento do espaço ou irregularidade, também aumenta como algo contínuo e podendo assumir valores não inteiros, diferentes da idéia comum sobre dimensão.

A4. Auto-similaridade e aplicabilidade

Este conceito, derivado do conceito de dimensão fractal é relativo à capacidade de se obter a mesma forma (ao menos estatisticamente) ao se efetuar uma mudança de escala. Há fractais onde uma transformação de escala, com o mesmo fator para todas as direções, leva a sistemas similares, aos quais denominamos auto-similares. A invariância de escala, a auto-similaridade e a aleatoriedade são, portanto, os principais atributos dos fractais. O primeiro diz respeito à semelhança de padrões em diversas escalas, o segundo baseia-se na simetria geométrica e o terceiro atributo está relacionado à dinâmica caótica dos sistemas, assinalando a imprevisibilidade da forma específica a ser gerada.

Dessa forma, foram desenvolvidos alguns fractais, que se tornaram clássicos e referências para novos estudos. Logo, a implementação e a compreensão de métodos matemáticos que contemplem a geometria fractal, bem como os estudos ligados a fenômenos transientes e física estatística tornam-se necessários para o desenvolvimento destes métodos, sua aplicabilidade imediata ao estudo de fenômenos geofísicos e todos os sistemas complexos integrantes a estes, inicia uma nova proposta de pesquisa em ciência, pois, desta forma é possível agrupar de maneira interdisciplinar várias áreas do conhecimento.

A5. Referências

LOVEJOY, B. S.; MANDELBROT, B.B. Fractal properties of rain, and fractal model. *Tellus. Series A. Dynamic Meteorology and Oceanography*, Copenhagen, V. 37, p. 209-232, 1985.

MANDELBROT, B.B. *The fractal geometry of nature*. New York: W. H. Freeman, 1983.

Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)