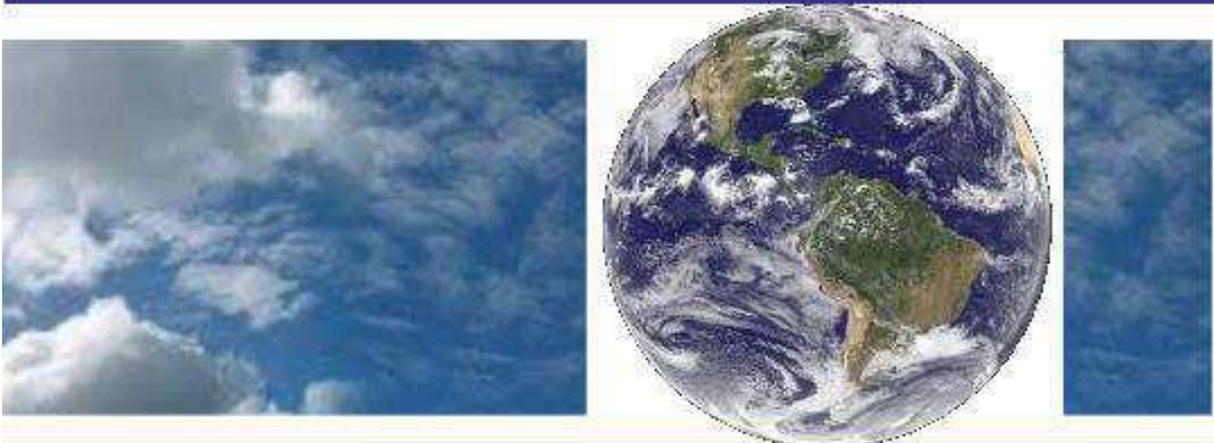


**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS  
UNIDADE ACADÊMICA DE CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM  
METEOROLOGIA**



**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**Adriana de Souza Costa**

**Modulação Regional das Chuvas no Estado do Maranhão**

**Campina Grande, fevereiro de 2016**



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS  
UNIDADE ACADÊMICA DE CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM METEOROLOGIA

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**MODULAÇÃO REGIONAL DAS CHUVAS NO ESTADO DO  
MARANHÃO**

**ADRIANA DE SOUZA COSTA**

**CAMPINA GRANDE - PB  
FEVEREIRO, 2016**

ADRIANA DE SOUZA COSTA

**MODULAÇÃO REGIONAL DAS CHUVAS NO ESTADO DO  
MARANHÃO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Meteorologia, da Universidade Federal de Campina Grande, em cumprimento às exigências para obtenção do grau de Mestre em Meteorologia.

Área de concentração: **Meteorologia de Meso e Grande Escala**

Subárea: **Climatologia**

**Orientador:** Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Célia Campos Braga

**CAMPINA GRANDE - PB**

**FEVEREIRO DE 2016**

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

C838m Costa, Adriana de Souza.  
Modulação regional das chuvas no estado do Maranhão /  
Adriana de Souza Costa. – Campina Grande, 2016.  
85 f.: il. color.

Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Universidade  
Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos  
Naturais, 2016.  
"Orientação: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Célia Campos Braga".  
Referências.

1. Regiões Homogêneas. 2. Transformada de Ondeletas. 3.  
Pacífico Equatorial. 4. Variabilidade de Precipitação – Maranhão  
(Estado). I. Braga, Célia Campos. III. Título.

CDU 551.582(812.1)(043.3)

ADRIANA DE SOUZA COSTA

MODULAÇÃO REGIONAL DAS CHUVAS NO ESTADO DO MARANHÃO

DISSERTAÇÃO APROVADA EM 29/02/2016

BANCA EXAMINADORA

  
Prof. Dra. CELIA CAMPOS BRAGA  
Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas  
Universidade Federal de Campina Grande

  
Prof. Dr. JOSÉ IVALDO BARBOSA DE BRITO  
Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas  
Universidade Federal de Campina Grande

  
Prof. Dra. MARIA LUCIENE DIAS DE MELO  
Instituto de Ciências Atmosféricas  
Universidade Federal de Alagoas

*A Deus, por iluminar meus caminhos e me sustentar nos momentos difíceis, Ele que é o centro e fundamento da minha vida.*

*Aos meus pais Assis e Marineide, ao meu marido Fábio, as minhas irmãs Andréia, Mércia e Michelle por existirem em minha vida e pelo carinho, incentivo e compreensão.*

## **AGRADECIMENTOS**

Em primeiro lugar ao bom DEUS, referencial absoluto em minha vida, por nunca me deixar abater em meio às dificuldades, por renovar a cada momento a minha força e disposição.

A minha família, em especial minha mãe Marineide Alves de Souza Costa, meu pai Assis de Oliveira Costa, minhas irmãs Andréia, Mércia e Michelle, meus sobrinhos André, Arthur, Débora e Heloísa, por todo amor, apoio e incentivo.

Ao meu esposo Fábio Avelino da Costa pelo companheirismo, amor e paciência em todos os momentos.

A Professora Doutora Célia Campos Braga, minha orientadora, pela paciência e pelos ensinamentos, sem os quais, não estaria concluindo este trabalho. Além de ter sido minha primeira professora no DCA, no Curso de Nivelamento.

Aos Professores Doutores José Ivaldo Barbosa de Brito e Maria Luciene Dias de Melo que aceitaram participar da minha Banca Examinadora e contribuíram de forma valorosa para a conclusão desta pesquisa.

A meus amigos, Nayara dos Santos, Gabriella Oliveira, Alécio Rodrigues, Irene Cristina, Leonardo Fagner, Wanessa Luana, Mariana Cavalcante, Edicarlos Pereira, Milena Perira e Valneli Mello que foram uma segunda família nesse momento da minha vida.

A todos os professores da Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas pela atenção e pelos ensinamentos ministrados com zelo e carinho.

A coordenação da Pós Graduação em Meteorologia pela atenção e apoio.

As secretárias Divanete e Arilene pela ajuda, paciência e competência na resolução dos problemas do dia a dia do curso.

A CAPES pelo apoio financeiro e ao Programa de Pós-graduação em Meteorologia da UFCG pela oportunidade de realização do curso.

A Agência Nacional de Águas (ANA) e Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) pela disponibilização dos dados utilizados nesta pesquisa.

## RESUMO

O Estado do Maranhão está localizado numa zona de transição entre o semiárido nordestino, a Amazônia quente e úmida e os chapadões do Brasil central, dando ao Estado características peculiares. Embora, o Estado não se encontre no contexto do polígono das secas, por apresentar condições climáticas bem definidas, a distribuição espacial e temporal das chuvas são bastantes irregulares, o que submete o sistema agrícola da região a sérios problemas, com impactos econômicos e sociais significativos. Diante dessas particularidades, o objetivo do estudo foi analisar e compreender a variabilidade da precipitação e relacioná-la com a TSM e outros sistemas meteorológicos que influenciem as chuvas no Estado. Para tal, empregou-se o método da Transformada de Ondeletas (TO) para identificar em diferentes escalas de oscilações o sinal da precipitação e da TSM, e assim apontar os sistemas que contribuem nas diferentes nas escalas de tempo. Os resultados mostraram no espectro global de energia da ondeleta que o ciclo anual é o dominante em todas as localidades analisadas. E, que além da escala anual observam-se também interações com as escalas sazonal, intrasazonal, semi-anual, bianual e até decadal. No tocante a TSM do Pacífico Equatorial, a escala anual é mais intensa no setor leste do oceano, decrescendo no sentido leste-oeste, onde a escala decadal se torna mais acentuada. A relação entre a chuva nas regiões homogêneas (RH) do Maranhão e a TSM do oceano Pacífico Equatorial mostrou que existe correlações importantes entre as mesmas. Ou seja, as áreas do Niño que apresentaram as maiores correlações com as RH foram: Niño 3 com a RH1 (correlação  $r = -0,72$ ), com a RH2 (correlação  $r = -0,65$ ), com a RH3 (correlação  $r = -0,69$ ), com a RH4 (correlação  $r = -0,53$ ), e Niño 1+2 com a RH5 (correlação  $r = -0,52$ ).

**Palavras-chave:** Regiões Homogêneas, Transformada de Ondeletas, Pacífico Equatorial, Estado do Maranhão.

## ABSTRACT

The State of Maranhão is located in a transition zone between the semi-arid northeast, the hot and humid Amazon and the plains of central Brazil, giving the state peculiar characteristics. Although the state is not in the polygon the context of drought, have well-defined climatic conditions, the spatial and temporal distribution of rainfall is quite irregular, which submits the agricultural system of the region to serious problems, with significant economic and social impacts . Given these characteristics, the objective of the study was to analyze and understand the variability of precipitation and relate it to the TSM and other weather systems that influence rainfall in the state. To this end, we used the method of Wavelet Transform (TO) to identify different scales fluctuations sign of precipitation and TSM, and thus point the systems involved in the different time scales. The results showed the overall spectrum of the wavelet energy that the annual cycle is the dominant in all analyzed locations. And that in addition to the annual scale also observe up interactions with seasonal scales, intraseasonal, semi-annual, bi-annual and decadal up. Regarding the TSM Equatorial Pacific, the annual scale is more intense in the east of the ocean sector, decreasing from east to west, where the decadal scale becomes more pronounced. The relationship between rainfall in homogeneous regions (HR) of Maranhao and the ocean TSM Equatorial Pacific showed that there is significant correlation between them. Ie areas of Niño with the highest correlations with HR were: Niño 3 with RH1 relationship ( $r = -0.72$ ), with RH2 relationship ( $r = -0.65$ ), with RH3 (correlation  $r = -0.69$ ), as RH4 (correlation  $r = -0.53$ ) and Nino 1 + 2 with RH5 relationship ( $r = -0.52$ ).

**Keywords:** Homogeneous regions, Wavelet Transform, the Equatorial Pacific, State of Maranhao.

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1.	Distribuição espacial dos postos pluviométricos no Estado do Maranhão.	27
FIGURA 2.	Tipos de vegetação do Maranhão. Fonte: (www.ebah.com.br/content/agroambientes-transicao-entre-tropico-umido-semi-arido-maranhense).	28
FIGURA 3.	Variabilidade dos totais médios anuais da precipitação no período de 1987 a 2013 no Estado do Maranhão.	30
FIGURA 4.	Áreas do Oceano Pacífico Equatorial, conhecidas como Niño 1+2, Niño 3, Niño 3.4 e Niño 4. Fonte: FUNCEME/DEMET (2005).	31
FIGURA 5.	a) Série temporal de precipitação, b) Espectro de potência de ondeleta, c) Espectro global de ondeleta, d) Média por escalas das potências ou variância da ondeleta.	38
FIGURA 6.	Correlação dos três primeiros fatores comuns rotacionados que explicaram 91,5% da precipitação mensal no Maranhão.	42
FIGURA 6.1.	Padrão espacial do primeiro fator comum da precipitação mensal, no Estado do Maranhão no período de 1987 a 2013.	43
FIGURA 6.2.	Padrão espacial do segundo fator comum da precipitação mensal no Estado do Maranhão no período de 1987 a 2013.	44
FIGURA 6.3.	Padrão espacial do terceiro fator comum da precipitação mensal no Estado do Maranhão no período de 1987 a 2013.	45
FIGURA 7.	Padrão espacial do primeiro fator comum (correlações) que explica 23,8% da variância total da série.	46
FIGURA 8.	Série temporal (escores) do primeiro fator comum espacial para o período de 1987-2013.	47
FIGURA 9.	Padrão espacial do segundo fator comum (correlações) que explica 15,3% da variância total da série.	48
FIGURA 10.	Série temporal (escores) do segundo fator comum espacial (CP2) para o período de 1987-2013.	48
FIGURA 11.	Padrão espacial do terceiro fator comum (correlações) que explica 11,2% da variância total da série.	49
FIGURA 12.	Série temporal (escores) do terceiro fator comum espacial (CP3) para	50

o período de 1987-2013.

FIGURA 13.	Regionalização da precipitação a partir dos fatores espaciais e temporais obtidas pelo método de agrupamento de Ward para o Maranhão.	51
FIGURA 13.1.	Variabilidade média mensal da precipitação no período de 1987-2013, para as estações da RH1.	52
FIGURA 13.2.	Variabilidade média mensal da precipitação para o período de 1987-2013, para as estações da RH2.	52
FIGURA 13.3.	Variabilidade média mensal da precipitação para o período de 1987-2013, para as estações da RH3.	53
FIGURA 13.4.	Variabilidade média mensal da precipitação para o período de 1987-2013, para as estações da RH4.	54
FIGURA 13.5.	Variabilidade média mensal da precipitação para o período de 1987-2013, para as estações da RH5.	54
FIGURA 14.	a) Série temporal de precipitação mensal; b) Escalograma de energia de ondeletas; c) Espectro global para Cantanhede (RH1) e d) Média por escalas das potências ou variância da ondeleta.	56
FIGURA 15.	a) Série temporal de precipitação mensal; b) Escalograma de energia de ondeletas; c) Espectro global para Monção (RH2) e d) Média por escalas das potências ou variância da ondeleta.	57
FIGURA 16.	a) Série temporal de precipitação mensal; b) Escalograma de energia de ondeletas; c) Espectro global, para a cidade de Codó (RH3); d) Média por escalas das potências ou variância da ondeleta.	58
FIGURA 17.	a) Série temporal normalizada de precipitação, b) Espectro de potência de ondeletas, c) Espectro global para Buriti Bravo (RH4), d) Média por escalas das potências ou variância da ondeleta.	59
FIGURA 18.	a) Série temporal de precipitação, b) Escalograma de energia de ondeletas, c) Espectro global, para Carolina (RH5), d) Média por escalas das potências ou variância da ondeleta.	60
FIGURA 19.	Variabilidade mensal da TSM nas regiões do Niño1+2, Niño 3, Niño 3.4 e Niño 4 no período de 1987 a 2013.	61
FIGURA 20.	a) Série temporal de TSM; b) Escalograma de energia de ondeletas; c) Espectro global para a área do Pacífico Niño 1+2; d) Média por	62

	escalas das potências ou variância da ondeleta.	
FIGURA 21.	a) Série temporal de TSM; b) Escalograma de energia de ondeletas; c) Espectro global para a área do Pacífico Niño 3; d) Média por escalas das potências ou variância da ondeleta.	63
FIGURA 22.	a) Série temporal de TSM; b) Escalograma de energia de ondeletas; c) Espectro global para a área do Pacífico Niño 3.4; d) Média por escalas das potências ou variância da ondeleta.	64
FIGURA 23.	a) Série temporal de TSM; b) Escalograma de energia de ondeletas; c) Espectro global para a área do Pacífico Niño 4; d) Média por escalas das potências ou variância da ondeleta.	64
FIGURA 24.	Variabilidade temporal das TSM nas regiões do Niño e PRP da RH1.	66
FIGURA 25.	Variabilidade temporal das TSM nas regiões do Niño e PRP da RH2.	67
FIGURA 26.	Variabilidade temporal das TSM nas regiões do Niño e PRP da RH3.	68
FIGURA 27.	Variabilidade temporal das TSM nas regiões do Niño e PRP da RH4.	69
FIGURA 28.	Variabilidade temporal das TSM nas regiões do Niño e PRP da RH5.	70
FIGURA A.	a) Série temporal de precipitação, b) Escalograma de energia de ondeletas, c) Espectro global, para Média da RH1, d) Média por escalas das potências ou variância.	83
FIGURA B.	a) Série temporal de precipitação, b) Escalograma de energia de ondeletas, c) Espectro global, para Média da RH5, d) Média por escalas das potências ou variância.	83
FIGURA C.	a) Série temporal de precipitação, b) Escalograma de energia de ondeletas, c) Espectro global, para Média da RH3, d) Média por escalas das potências ou variância.	84
FIGURA D.	a) Série temporal de precipitação, b) Escalograma de energia de ondeletas, c) Espectro global, para Média da RH4, d) Média por escalas das potências ou variância.	84
FIGURA E.	a) Série temporal de precipitação, b) Escalograma de energia de ondeletas, c) Espectro global, para Média da RH5, d) Média por escalas das potências ou variância.	85

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1.	Classificação dos anos de El Niño e La Niña segundo a classificação de Trenberth (1997).	40
TABELA 2.	Sequência dos autovalores e a variância explicada e acumulada (%) mensal dos fatores rotacionados da precipitação.	42
TABELA 3.	Coefficiente de correlação linear entre a TSM nas áreas dos Niños e a precipitação do grupo RH1.	66
TABELA 4.	Coefficiente de correlação linear entre a TSM nas áreas dos Niños e a precipitação do grupo RH2.	67
TABELA 5.	Coefficiente de correlação linear entre a TSM nas áreas dos Niños e a precipitação do grupo RH3.	69
TABELA 6.	Coefficiente de correlação linear entre a TSM nas áreas dos Niños e a precipitação do grupo RH4.	70
TABELA 7.	Coefficiente de correlação linear entre a TSM nas áreas dos Niños e a precipitação do grupo RH5.	71
TABELA A.	Localização Geográfica, médias mensais e total das médias anual da Precipitação Pluvial no Estado do Maranhão, para os anos de 1987 a 2013.	79
TABELA B.	Identificação dos grupos estabelecidos pelo método de Ward (Síntese do dendograma de classificação).	81
TABELA C.	Ocorrência de eventos de El Niño e La Niña durante o período de 1972 a 2013. Fonte: CPC/NCEP/NOAA (2015).	81
TABELA D.	Sequência dos autovalores e a variância explicada e acumulada (%) dos dados anuais rotacionados da precipitação.	82

## LISTA DE SIGLAS

AA	-	Análise de Agrupamentos
AF	-	Análise de Fourier
ANA	-	Agência Nacional das Água
AO	-	Análise de Ondeletas
AS	-	América do Sul
ASAS	-	Alta Subtropical do Atlântico Sul
ACP	-	Análise de Componentes Principais
CDC	-	Climate Diagnostic Center
CP	-	Componentes Principais
DOL	-	Distúrbios Ondulatórios de Leste
DPA	-	Dipolo do Atlântico
EGO	-	Espectro Global das Ondeletas
EN	-	El Niño
ENOS	-	El Niño-Oscilação Sul
EPO	-	Espectro de Potência das Ondeletas
FOE	-	Função Ortogonal Empírica
IME	-	Índice Multivariado de ENOS
KMO	-	Kaiser-Meyer-Olkin
INMET	-	Instituto Nacional de Meteorologia
LI	-	Linhas de Instabilidade
LN	-	La Niña
MMQ	-	Métodos dos Mínimos Quadrados
NOAA	-	National Oceanic and Atmospheric Administration
NEB	-	Nordeste do Brasil
ODP	-	Oscilação Decenal do Pacífico

OL	- Ondas de Leste
OMJ	- Oscilação Madden-Julian
PRP	- Precipitação total mensal, estacional ou anual
RH	- Região Homogênea
SF	- Sistemas Frontais
SQD	- Soma dos Quadrados dos Desvios
TF	- Transformadas de Fourier
TFJ	- Transformada de Fourier Janelada
TSM	- Temperatura da Superfície do Mar
TO	- Transformada de Ondeletas
VCAN	- Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis
ZCAS	- Zona de Convergência do Atlântico Sul
ZCIT	- Zona de Convergência Intertropical

## SUMÁRIO

<b>1 - INTRODUÇÃO</b> .....	16
<b>2 - OBJETIVOS</b> .....	18
2.1 Objetivo Geral.....	18
2.2 Objetivos Específicos.....	18
<b>3 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	19
3.1 Climatologia do Estado do Maranhão.....	19
3.2 Aplicações da Análise Multivariada.....	22
3.3 Aplicações da Análise Espectral e Ondeletas.....	24
<b>4 - MATERIAL E METÓDOS</b> .....	29
4.1 Área de Estudo.....	29
4.2 Dados de Precipitação.....	31
4.3 Dados de TSM.....	32
4.4 Metodologia.....	33
4.4.1 Análise Fatorial em Componentes Principais.....	33
4.4.2 Análise de Agrupamento .....	35
4.4.3 Análise Espectral e Ondeletas.....	36
4.4.4 A função Ondeleta Base de Morlet.....	38
4.4.5 Interpretação do Gráfico de Ondeleta.....	39
4.4.6 Análise de Correlação Linear.....	40
4.4.7 Determinação dos anos de El Niño e La Niña.....	41
<b>5 - RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	43
5.1 Variabilidade espacial e temporal da precipitação.....	43
5.1.1 Análise sazonal da precipitação.....	43
5.1.2 Análise da variabilidade interanual da precipitação.....	47
5.2 Regiões homogêneas da precipitação.....	52
5.3 Análise espectral da precipitação no Estado do Maranhão.....	57
5.4 Análise Espectral da TSM.....	62
5.5 Relação entre TSM e Chuva.....	66
<b>6 - CONCLUSÕES</b> .....	73
<b>7 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	74
<b>APÊNDICE</b> .....	79

## 1 - INTRODUÇÃO

A precipitação é uma variável meteorológica importante e complexa que apresenta grande variabilidade espacial e temporal na região tropical. É a variável meteorológica com o maior número de observações, principalmente no Nordeste do Brasil. As chuvas nesta região estão diretamente ligadas à convecção local, que é caracterizada pela convergência de ar úmido nos baixos níveis da troposfera, resultado da baixa pressão junto à superfície, seja em função do aquecimento diferencial dessa superfície, seja pela ação de fenômenos transientes de caráter puramente dinâmicos. A convecção nos trópicos é essencialmente controlada, pela circulação geral da atmosfera, fenômeno de grande escala resultante de interações complexas entre as superfícies do planeta, em particular a distribuição entre continentes e oceanos com fornecimento desigual de energia solar, topografia e cobertura vegetal (MOLION & BERNARDO 2002).

Na região tropical, a variação tempo-espço das variáveis meteorológicas, em especial a precipitação, está relacionada à atuação de fenômenos meteorológicos de diferentes escalas de tempo, que são modulados por mecanismos oceano-atmosfera de escala interanual, sazonal e intrasazonal que determinam a quantidade de chuva nas diferentes áreas da região.

O clima encontrado na região Nordeste vai desde semiárido (Polígono das secas) até tropical (costa leste). A estação das chuvas no Nordeste Setentrional, principalmente na parte norte do Maranhão e Piauí, Ceará, oeste do Rio Grande do Norte e interior da Paraíba e Pernambuco, ocorre no período de fevereiro a maio e deve-se ao deslocamento da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) para latitudes mais ao sul, a qual influencia diretamente na qualidade do período chuvoso da região (UVO, 1989). Na porção sul-sudeste e oeste da região, os máximos de precipitação ocorrem nos meses de novembro a fevereiro e são influenciados pelas frentes frias oriundas das latitudes médias do hemisfério sul que alcançam latitudes mais baixas (KOUSKY, 1979).

Em geral, os mecanismos que governam o regime de chuva da região Nordeste são: Eventos El Niño-Oscilação Sul (ENOS); Temperatura da superfície do mar (TSM) na bacia do oceano Atlântico; Ventos Alísios; Pressão ao Nível do Mar (PNM) (ANDREOLLI e KAYANO, 2006); Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) sobre o oceano Atlântico, Frentes Frias, e Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis (VCAN). Além desses mecanismos podemos destacar também a atuação das linhas de Instabilidade (LI) com predominância nos meses de junho, julho e agosto, dos Complexos Convectivos de Mesoescala (CCM) e do

efeito das brisas marítima e terrestre (SOUZA & CAVALCANTI, 2009, NASCIMENTO, 2014).

Em se tratando do Estado do Maranhão, o mesmo não se encontra no contexto do polígono das secas, pois apresenta condições climáticas bem definidas, embora a distribuição espacial e temporal da precipitação seja bastante irregular, o que submete o sistema agrícola da região a sérios problemas, com impactos econômicos e sociais significativos. Essa irregularidade na distribuição da precipitação é decorrente de alguns aspectos importantes: posição geográfica, extensão territorial e suas feições fisiográficas, por estar localizado em uma região de transição que recebe influências das características climáticas do semi-árido nordestino, da Amazônia quente e úmida e dos chapadões do Brasil central. A grande extensão territorial no sentido latitudinal contribui anualmente para a atuação de diferentes sistemas meteorológicos, contando ainda com a influência das condições dos Oceanos Atlântico e Pacífico Tropicais. Outro aspecto relevante responsável por essa variabilidade está relacionado à diversidade de ecossistemas que compõem o seu espaço geográfico, onde são encontradas áreas com formações de floresta, várzeas, cerrado, manguezais, dunas e chapadões (MENEZES, 2009).

O conhecimento da atuação dos sistemas meteorológicos e a periodicidade em que os mesmos venham afetar na variabilidade sazonal e anual da precipitação em uma determinada região é de fundamental importância no planejamento agrícola, hídrico e socioeconômico da mesma. Nos últimos tempos novas técnicas matemáticas e estatísticas têm sido desenvolvidas e introduzidas na literatura científica, com a finalidade de fornecer subsídios para a caracterização de regimes atmosféricos não lineares associados à natureza das variáveis meteorológicas e do meio ambiente (WENG & LAU 1994; VITORINO et al. 2006, BRAGA et. al. 2014). Desta forma neste estudo buscou-se fazer uma análise de multiresolução do sinal das chuvas em multiescalas ocorridas no Estado do Maranhão e relacioná-las com as variações das TSM nas áreas monitoradas do Pacífico Equatorial. Para isso utilizou-se as técnicas da análise multivariada e da Transformada de Ondeleta de Morlet na análise de tempo – escala dos escalogramas de energia para o período de 1987 – 2013 no sentido de aprimorar estudos realizados no Estado.

## **2 - OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo Geral**

O presente estudo objetiva fazer um diagnóstico de multiresolução do sinal das precipitações ocorridas no Estado do Maranhão e relacioná-las com as variações das TSM nas áreas monitoradas no Pacífico Equatorial, assim como apontar os sistemas meteorológicos que mais influenciam a região.

### **2.2 Objetivos Específicos**

- Obter regiões homogêneas a partir dos fatores comuns temporais e espaciais da precipitação utilizando técnicas estatísticas da Análise de Componentes Principais e Análise de Agrupamento;

- Estimar oscilações da precipitação no Maranhão por meio da aplicação da técnica da Transformada de Ondeletras (TO) as séries temporais de precipitação na escala-tempo no Escalograma de Energia e Espectro Global de Potência;

- E, finalmente identificar os modos de variabilidades dominantes da precipitação em cada região homogênea e caracterizar as oscilações de baixas e altas frequências no sinal da precipitação no Estado, e, relacioná-los com a TSM e sistemas atmosféricos.

### 3 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 Climatologia do Estado do Maranhão

O regime climático de uma determinada região é a resposta natural aos fenômenos oceânicos e atmosféricos, à geografia, à distribuição dos continentes e oceanos à latitude, à altitude e ao posicionamento do relevo em relação as correntes atmosféricas, que pode ser modificado no decorrer dos anos pelas intempéries do tempo e atividades humanas. A maior parte da região Nordeste é caracterizada como semiárida, com grande variabilidade espacial e temporal das precipitações e elevada taxa de evaporação. As variações interanuais são marcantes. Considerando a variação sazonal da precipitação pluvial na região como um todo, pode-se dizer que existem diferenças no regime pluviométrico com precipitação mais significativa de novembro a julho.

De acordo com a classificação climática de Köppen-Geiger, a região Nordeste é caracterizada por cinco tipos de climas: tropical, semiárido, subúmido seco, subúmido e equatorial úmido. Em particular o clima do Estado do Maranhão é caracterizado como subúmido seco, subúmido, tropical e equatorial úmido, onde as temperaturas médias anuais são superiores a 24°C, com totais médios anuais de precipitação que variam desde 800 mm na região central, onde as chuvas são mais escassas, a superior a 2200 mm na região norte, nas proximidades do litoral onde são mais abundantes (MENEZES, 2009, NASCIMENTO, 2014). Por conta da grande distância entre seus extremos norte/sul e leste/oeste o Estado é influenciado por distintos sistemas atmosféricos a depender da área e época do ano.

Os principais sistemas atmosféricos que produzem precipitação no Nordeste do Brasil, são: a ZCIT, os Distúrbios de Leste, as bandas de nebulosidade, associadas a Frentes Frias, Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis (VCAN) (ARAGÃO, 1975; VIRJI, 1981; KOUSKY & GAN, 1981), sistemas de brisas marítimas e terrestres (KOUSKY, 1980), a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), e movimentos para leste de células convectivas tropicais de circulação direta de grande escala associadas com a Oscilação de 30-60 dias de Madden e Julian (OMJ) (KAYANO *et al.*, 1990). Todos esses sistemas são importantes na produção de chuvas sobre a região e agem diferentemente em anos de episódio extremos de precipitação, com mudanças na duração, estrutura e intensidade, esses fenômenos atuam em sub-regiões distintas nas mesmas épocas ou em épocas diferentes.

A ZCIT é o fator mais importante na determinação de quão abundante ou deficiente serão as chuvas no setor norte do Nordeste do Brasil. Ela atinge posição máxima extrema sul nos anos chuvosos nos meses de março, abril e maio, enquanto que nos anos secos seu retorno para o hemisfério norte é nas primeiras semanas de abril (Uvo, 1989). É formada principalmente pela confluência dos ventos alísios do hemisfério norte com os ventos alísios do hemisfério sul, em baixos níveis (o choque entre eles faz com que o ar quente e úmido ascenda e provoque a formação das nuvens), baixas pressões, altas temperaturas da superfície do mar, intensa atividade convectiva e precipitação, é parte integrante da circulação geral da atmosfera e está intimamente ligada às variações de TSM do Atlântico (HASTENRATH, 1990).

Os VCAN que atingem a região Nordeste do Brasil formam-se no Oceano Atlântico entre os meses de outubro e março e sua trajetória normalmente é de leste para oeste, com maior frequência entre os meses de janeiro e fevereiro. Os VCAN são observados pelas imagens de satélite, têm a forma aproximada de um círculo girando no sentido horário. Na sua periferia há formação de nuvens causadoras de chuva e no centro há movimentos de ar de cima para baixo (subsistência), aumentando a pressão e inibindo a formação de nuvens (KOUSKY e GAN, 1981). O tempo de vida médio dos VCAN pode durar apenas algumas horas ou perdurar por um período de até mais de duas semanas. A formação desses sistemas ciclônicos coincide com a época do ano onde o escoamento em altos níveis (200 hPa) apresenta-se meridional, de sul a norte, sobre o Brasil a leste do meridiano de 50° W (FIGUEROA et al., 1994). No verão o intenso aquecimento do continente causa desenvolvimento de um anticiclone (Alta da Bolívia) sobre a América do Sul tropical, e um cavado no Oceano Atlântico próximo ao litoral do nordeste do Brasil, nos altos níveis. A intensidade do anticiclone sobre o continente em 200 hPa, determina a formação dos vórtices ciclônicos sobre o oceano (KOUSKY e GAN, 1981).

As Frentes Frias são regiões de descontinuidade térmica separando duas massas de ar de características termodinâmicas diferentes. São delgadas zonas de transição entre uma massa de ar quente (menos densa) e uma massa de ar frio (mais densa). Elas possuem curvatura ciclônica e nuvens convectivas com topos altos e frios quando fortes e ativas. A penetração de Sistemas Frontais (SF) no NEB ocasiona prolongados períodos de chuvas no centro-sul da Bahia e no sul dos Estados do Piauí e Maranhão e desempenham um importante papel no seu regime de precipitação cujo máximo é atingido durante os meses de novembro e janeiro. No

mesmo período os máximos de precipitação são observados na parte Sul do Maranhão (KOUSKY, 1979).

A Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) pode ser considerada como o principal sistema de grande escala responsável pelo regime de chuvas sobre o Brasil durante o verão austral. É caracterizada como uma banda de nebulosidade que se estende do Noroeste da Amazônia até o Atlântico Sul Central no sentido noroeste-sudeste (KOUSKY, 1988). A melhor forma de identificá-la é através de imagens de satélites ou em padrões de distribuição de radiação de onda longa (CARVALHO et al., 2004).

Dentre as anomalias de TSM que influenciam as chuvas no Estado do Maranhão destacam-se os eventos de El Niño/La Niña e as anomalias no Atlântico Tropical (AT). O El Niño Oscilação Sul (ENOS) é um fenômeno de interação oceano-atmosfera, que possui duas fases, a fase fria (La Niña) e fase quente (El Niño). As condições de El Niño associam-se ao aquecimento anômalo em grande-escala nas águas oceânicas sobre o Pacífico Equatorial centro-leste, perdurando por pelo menos cinco meses entre o verão e outono. Inversamente, as condições de La Niña se relacionam com o resfriamento anormal das águas oceânicas equatoriais sobre a bacia centro-leste do oceano Pacífico Equatorial (TRENBERTH, 1997). Na região do Pacífico, o fenômeno ENOS, resultado da interação entre o Pacífico Equatorial e a atmosfera, têm provocado alterações nas flutuações e anomalias climáticas nas condições atmosféricas da América do Sul. As principais manifestações do episódio quente em sua fase ativa, próxima à costa oeste da América do Sul, provoca uma alteração no padrão do regime de chuva em grande parte da região equatorial, a exemplo do Nordeste do Brasil, com forte redução de chuvas (LIMA e RAO, 1994). A alteração da circulação atmosférica no Pacífico Equatorial influencia a circulação sobre a América do Sul. Estudos sobre ENOS, indicam sua influência sobre a precipitação em três regiões do Brasil: no Sul, semiárido do Nordeste e Amazônia (Kousky, 1988).

Em condições normais, o ramo ascendente da Célula de Walker ocorre sobre o Pacífico Oeste-Equatorial, onde as águas são mais quentes, conseqüentemente acompanhadas de pressões atmosféricas mais baixas. O contrário ocorre sobre a região do Pacífico Leste, próximo à costa Ocidental da América do Sul, onde se pode observar águas mais frias e pressões atmosféricas mais altas, com isso há a formação do ramo subsidente da Célula, inibindo a precipitação. Quando se configura o fenômeno El Niño ocorre o deslocamento da Célula para o Pacífico Leste devido ao aquecimento anômalo da superfície do mar,

favorecendo subsidência de ar sobre a bacia centro-oeste e sobre o Atlântico Equatorial, incluindo a Amazônia Oriental e o Nordeste do Brasil.

A Oscilação de Madden e Julian (OMJ) ou Oscilação 30–60 dias é um fenômeno que caracteriza-se por um deslocamento de oeste para leste de uma célula zonal de grande escala termicamente direta que causa variações na convecção tropical. A OMJ é uma flutuação intrasazonal ou "onda" que ocorre nos trópicos globais. A OMJ faz com que os fenômenos meteorológicos se intensifiquem ou enfraqueçam durante a sua atuação, podendo influenciar no regime pluviométrico e, em algumas vezes, significativamente.

### **3.2 Aplicações da Análise Multivariada**

Os métodos de análise multivariados tornam possível levantar questões específicas e precisas de considerável complexidade em cenários naturais. Isso viabiliza a condução de pesquisas importantes e a avaliação dos efeitos de variações paramétricas que naturalmente ocorrem no contexto em que elas normalmente aparecem. A ACP e AA têm sido aplicados com frequência a séries de variáveis meteorológicas, por serem capazes de identificar e classificar padrões espacial e temporal, com o objetivo de interpretar fenômenos de interesse de maneira mais clara e simplificada (ARAÚJO, 2005, WILKS, 2006).

A ACP é uma técnica usada para transformar um grupo de variáveis correlacionadas em um grupo de variáveis não-correlacionadas que as quantificam em proporções decrescentes da variância explicada dos dados originais. A razão da utilização deste método é para reduzir a complexidade existente nos dados e ao mesmo tempo o número de variáveis que necessariamente deveriam ser consideradas (AMANAJÁS e BRAGA, 2012 ). Já a AA é conhecida como uma técnica estatística multivariada para delimitar grupos homogêneos de variáveis que tenham comportamentos semelhantes no tempo no seio de uma população. Ou seja, o método consiste em dividir um sistema multidimensional em grupos, em cada um dos quais se reúnem os indivíduos que apresentam maior similaridade entre si e dissimilaridade entre grupos (WILKS, 2006).

Prates (1994) aplicou a ACP em dados de chuva coletados em 128 postos pluviométricos distribuídos no Estado de Minas Gerais e regiões limítrofes dos Estados de Goiás, Espírito Santo e Bahia, com o objetivo identificar regiões homogêneas da precipitação. As três primeiras componentes principais explicaram 92,32% da variância total dos dados. A primeira componente que explicou 86,85% da variância associou a variabilidade local da precipitação aos mecanismos de grande escala, tal como a ZCAS, que é o principal sistema

produtor de chuvas em Minas Gerais. A segunda e terceira componentes principais, explicaram 3,55% e 1,92% da variância, respectivamente. Apesar do baixo percentual, representam as diferenças do regime pluviométrico associadas a efeitos locais, principalmente topografia.

Gong & Richman (1995) empregaram a análise de agrupamento hierárquico e não hierárquico utilizando vários métodos de classificação (ligação simples, ligação completa, ligação média entre os grupos, ligação média dentro de um novo grupo, método de Ward, *K-means*, núcleos aglomerativos e análise de componentes principais rotacionadas) e três diferentes medidas de similaridade (distância Euclidiana, correlação inversa e ângulo teta) para analisar dados diários de precipitação da América do Norte central e leste. Os autores observaram que os métodos hierárquicos superaram os não hierárquicos e que os métodos de *K-means* e Ward apresentaram melhores resultados.

Ceballos & Braga (1995) aplicaram a análise de agrupamento hierárquico em regiões homogêneas de radiação global diária para estimar dados de locais baseados em estações circunvizinhas. Para a simulação das séries adotaram um critério no qual os estimadores dos componentes principais podem ser obtidos com base no método dos mínimos quadrados. Os resultados obtidos foram satisfatórios, com erros padrão de estimativa que não ultrapassaram 5%.

Westra *et al.* (2010) empregaram ACP para explicar a variabilidade climática das anomalias de TSM global. Compararam os resultados obtidos usando componentes não rotacionadas, com rotação Varimax e Componentes Independentes. Através da ACP, fenômenos de escala global, tais como tendências de mudanças globais e sinais de El Niño Oscilação Sul (ENOS), foram bem representados quando interpretados os componentes obtidos. Contudo, a rotação Varimax ofereceu vantagens quanto à interpretação de fenômenos localizados, como a variabilidade climática no Atlântico Tropical. Observaram ainda, que quando o objetivo foi interpretar fisicamente os resultados extraídos dos componentes, a utilização de componentes independentes não foi satisfatória.

Amanajás e Braga (2012) empregaram o método da ACP para obter padrões climatológicos da precipitação na Amazônia Oriental e relacioná-los com os principais mecanismos climáticos dos Oceanos Pacífico e Atlântico Tropical. Os resultados obtidos pela ACP apontaram a existência de três padrões pluviométricos bem definidos que explicaram aproximadamente 92% da variância total da precipitação. O padrão dominante definiu áreas de chuva que são influenciadas pela atuação da ZCIT. O segundo padrão espacial está

associado a eventos de mesoescala, tal como as LI que favorecem as chuvas na região nos meses de maio a agosto. Já o terceiro padrão espacial evidencia a influência da atuação da ZCAS, sistema atuante no final da primavera e início do verão, bem como sistemas de escala local.

Nascimento (2014) aplicou a ACP e Agrupamentos de dados aos do índice de precipitação normalizada para identificar regiões de eventos máximos e mínimos de chuva no estado do Maranhão. Identificou os padrões espaciais e temporais e relacionou com os principais fenômenos meteorológicos atuantes no estado do Maranhão. Os resultados mostraram que a maior incidência de secas ocorreram no sul e as maiores de chuvas foram registradas no norte do Estado do Maranhão. Observou-se ainda, que as chuvas na região são propiciadas na sua maioria pela atuação de diversos sistemas meteorológicos, tais como, Zona de Convergência Intertropical, Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis, Zona de Convergência do Atlântico Sul e Sistemas Frontais.

### **3.3 Aplicações da Análise Espectral e Ondeletas**

Uma série temporal é definida como um conjunto de observações de uma variável disposta no tempo. Normalmente as séries temporais são analisadas a partir de seus principais movimentos, descritos como: tendência, ciclo, sazonalidade e variações aleatórias (OLIVEIRA & FAVERO, 2003).

Os métodos estatísticos normalmente utilizados em séries temporais são, em sua grande maioria, baseados nos conceitos de estacionariedade e linearidade, o que indica que a maioria dos métodos existentes de tratamento de dados são lineares e estacionários (MORETIN 1999). A Análise de Fourier (AF) é apropriada para analisar processos estacionários, entretanto demonstra-se claramente que a AF tradicional não é viável na investigação de fenômenos que possuem sinais não estacionários (maioria das observações meteorológicas) ou mesmo aqueles em que o sinal sofre variações bruscas de frequência (FARGE, 1992).

Em meados da década de 1940, um pesquisador chamado Dennis Gabor percebeu a dificuldade de se aplicar a Série de Fourier em séries temporais não-estacionárias. Por conta disso fez modificações na Transformada de Fourier (TF) criando um método conhecido como Transformada de Fourier Janelada (TFJ), o que lhe permitiu obter informações temporais da presença da função seno em “janelas fixas” pré-determinadas (GABOR 1946). Apesar do método de Gabor ter contribuído para o avanço dos estudos de séries temporais não-

estacionárias, ainda havia alguns problemas a serem superados, um deles é o fato da TFJ ser fixa, o que impossibilita a modificação após o início da aplicação do método, e outro, é que as funções trigonométricas possuem energia infinita, ou seja, elas são limitadas entre  $-\infty$  e  $+\infty$  (BOLZAN, 2006).

Em 1981, o geofísico Francês chamado Jean Morlet percebeu os dois problemas ao aplicar a TFJ em séries temporais de ecos geofísicos na busca de poços petrolíferos. Imediatamente vislumbrou a necessidade de desenvolver uma suposta função matemática base  $\Psi$ , que possuísse energia finita, ou seja, um início e um fim, e que essa função fosse totalmente capaz de dilatar ou comprimir, eliminando o problema da janela temporal da TFJ ser fixa (MORLET, 1981). Sabe-se que Morlet foi o primeiro a denominar em francês o conjunto de funções com forma de pequenas ondas geradas por dilatação e translação de uma função base geradora simples de Ondelettè (ondeleta-mãe), o que permite a geração das chamadas ondeletas-filhas. Esta técnica criada por Morlet (1981) foi denominada de Transformada de Ondeletas (TO).

Weng & Lau (1994), fizeram um estudo na parte oeste do Pacífico (Ilha de Java) durante os anos de 1987 a 1988, para identificar períodos duplos e localização tempo-frequências em dados sintéticos e em dados reais. Puderam analisar o sinal de índices convectivos através dos escalogramas de energia e fase motivados em descobrir a interação de múltiplas escalas de tempo na convecção daquela região. Primeiramente utilizaram a TO de Haar aplicada a séries temporais sintéticas derivadas de sistemas dinâmicos simples não lineares, em seguida usaram a TO complexa de Morlet para estudar a localização tempo-frequência da convecção tropical baseado nos dados de alta frequência no canal infravermelho de um satélite geoestacionário meteorológico japonês. Os resultados obtidos através da TO de Haar mostraram que existe a presença e a separação de múltiplas frequências nos períodos duplos, que nesse caso, também permitiu a detecção de um sinal extremamente fraco nos sub-harmônicos de ordem superior resultantes de bifurcações dos períodos duplos, que com a análise de Fourier, ou não seriam detectados ou seriam considerados estatisticamente insignificantes. A TO de Morlet aplicada às séries de radiação infravermelha indicaram a presença de múltiplas escalas de tempo que estão localizadas tanto na frequência como no tempo, correspondendo aos períodos chuvosos e secos e varia da forma semidiurna, diurna, sinótica, para a mensal, principalmente no período chuvoso.

Torrence & Compo (1998) desenvolveram um guia prático para a análise de ondeletas usando de séries de ENOS que inclui: uma comparação com o método de Gabor (TFJ), a

escolha de uma função ondeleta base, o efeito de borda devido ao comprimento finito das séries temporais e a relação entre escalas de ondeleta e frequência de Fourier. Um novo teste de significância estatística para o espectro de ondeleta foi desenvolvido derivado da teoria espectral dos ruídos vermelho e branco no estabelecimento de níveis de significância e intervalos de confiança. Nesse contexto é mostrado que a suavização nas escalas de tempo pode ser usada para aumentar a confiança no espectro de ondeleta, e também são mostradas fórmulas empíricas para o efeito de suavização nos níveis de significância e intervalos de confiança. Os autores em seus estudos verificaram que a vantagem das *Wavelets* em relação à análise espectral clássica é que permite analisar escalas de diferentes variabilidades temporais e não exige que a série seja estacionária. Assim, elas são apropriadas para analisar eventos irregularmente distribuídos e séries temporais que contêm potência não estacionária com frequências diferentes (TORRENCE e COMPO, 1998).

Vitorino (2003) em estudo da variabilidade intrasazonal na América do Sul e oceanos adjacentes aplicou a *Wavelet* com a função Morlet às séries temporais de reanálises de ROLE (Radiação de onda longa emergente) e PNM (Pressão ao nível do mar), no período de 1979 a 1996. Como resultado detectou que a banda de alta frequência de 2 a 10 dias é dominante na região em praticamente todo o ano. Além disso, observou ainda que na banda intrasazonal de 30 a 90 dias, o sinal de ROLE aparece no verão, mas com pouca intensidade. Enquanto, que a PNM revelou maior intensidade da faixa sazonal durante o inverno do Hemisfério Sul.

Andreoli e Kayano (2004) estudaram a variabilidade da TSM no Atlântico Tropical usando a Transformada em Ondeletas e encontraram escalas dominantes de 9,8 anos e 12,7 anos para os índices do Atlântico Tropical Norte e Sul, respectivamente, e uma escala não significativa de 12,7 anos para o Atlântico Tropical.

Da Silva (2009) analisou, com base em Análise de Ondeletas, a climatologia da bacia hidrográfica do rio Mundaú (AL e PE). No estudo a autora enfocou a variabilidade espaço temporal dos principais eventos que proporcionam chuvas na região e como eles afetavam os aspectos socioeconômicos e ambientais. Assim como, analisou as anomalias de chuva a partir os índices climáticos, Índice Multivariado de El Niño (IME), Índice de Oscilação Sul (IOS) e Oscilação Decadal do Pacífico e anomalias de TSM do Oceano Atlântico. A autora afirma que nas regiões do Baixo Mundaú, o período anterior a 1974 foi mais úmido do que o posterior ao mesmo. Já nas regiões do Médio Mundaú e Alto Mundaú, o período pós 1974 foi mais úmido que o anterior, o contrário da região Litorânea. Por meio da Análise de Ondeletas foi sugerido, para o Baixo Mundaú, que as anomalias de TSM do Oceano Atlântico poderiam ser

usadas como previsoras das anomalias de precipitação da quadra chuvosa que se estende de abril a julho. No Médio Mundaú foi usado como previsor o IME, e para o Alto Mundaú, o IME e as anomalias de TSM do Oceano Atlântico.

Moura e Vitorino (2012) apresentaram uma análise atmosférica da variabilidade espacial e temporal da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) nas cidades de Belém, Jakarta e Nairóbi, que estão localizadas sobre os continentes da América do Sul, Ásia e África, respectivamente. Para isso, foram utilizados dados diários de precipitação observada e radiação de onda longa para o período de 1999 a 2008, e aplicadas às técnicas matemáticas e estatísticas, como a média aritmética e a transformada em ondeletas Morlet. Em geral, os resultados indicam que do ponto de vista espacial, a precipitação mensal varia consideravelmente, pois as três cidades estudadas localizam-se em diferentes continentes da faixa tropical. Isto ocorre principalmente, durante os meses de janeiro a maio, período de maior atuação da ZCIT no hemisfério sul. As variações atmosféricas observadas, a partir dos escalogramas de fase, de ondeleta indicam que as escalas interdecadal, anual, interanual e intrassazonal são moduladoras da precipitação. Tais escalas podem ser representadas pelos mecanismos oceano-atmosfera dos fenômenos El Niño Oscilação Sul e da oscilação intrassazonal de Madden e Julian.

Braga et al. (2014) realizaram uma análise diagnóstica da precipitação mensal (PRP) para o estado da Paraíba, relacionando-a com a TSM, nas regiões de monitoramentos do Pacífico Equatorial e Atlântico Tropical, utilizando a TO. Mostraram que a aplicação da TO na PRP evidencia que o espectro global de energia da ondeleta é mais marcante no ciclo anual de todas as localidades estudadas. Além da escala anual, observaram-se interações complexas de oscilações nas escalas de tempo, mensal, intrasazonal, semi-anual, bianual e decadal. A análise da TSM do Pacífico apresentou a escala anual mais intensa na parte leste do oceano, decrescendo no sentido leste-oeste, onde a escala decadal se torna mais acentuada. As análises da TSM do Atlântico indicam basicamente duas oscilações: uma na escala anual e outra na escala decadal. A TSM do Pacífico relacionou-se melhor com a PRP apenas em eventos mais intensos do El Niño/Oscilação Sul (ENOS), já a anomalia de TSM do AT relacionou-se melhor com as chuvas do oeste do Estado.

Oliveira et al. (2015) utilizaram o teste t de Student para provar estatisticamente a existência de uma diferença significativa entre os valores médios de várias variáveis meteorológicas durante as fases ativas e inativas da Oscilação de Madden-Julian (OMJ) na Amazônia Oriental. A transformada de ondeleta foi utilizada para identificar 14 casos de

ocorrência da OMJ, nos quais as análises foram realizadas. A análise mostrou que as variáveis influenciadas pela convecção, como radiação de onda longa, temperaturas média, máxima e insolação, apresentaram diferenças entre cada fase da OMJ, em níveis de confiança de 95% ou superior.

## 4 - MATERIAL E MÉTODOS

### 4.1 Área de estudo

A área de estudo compreende o Estado do Maranhão, localizado no Nordeste brasileiro, com área territorial de 331.983,293 km<sup>2</sup>, limitado ao Norte pelo Oceano Atlântico, ao Sul e sudoeste pelo Estado de Tocantins, a Leste pelo Estado do Piauí e a Oeste pelo Estado do Pará (Figura 1). Devido a sua posição geográfica, o mesmo apresenta características de área de transição, ou seja; na parte centro-norte do Estado observa-se o processo de transição das áreas subúmidas secas do Nordeste para o clima equatorial úmido da Amazônia Oriental, enquanto, na porção sul-sudoeste verifica-se a transição para o clima tropical do Brasil Central.

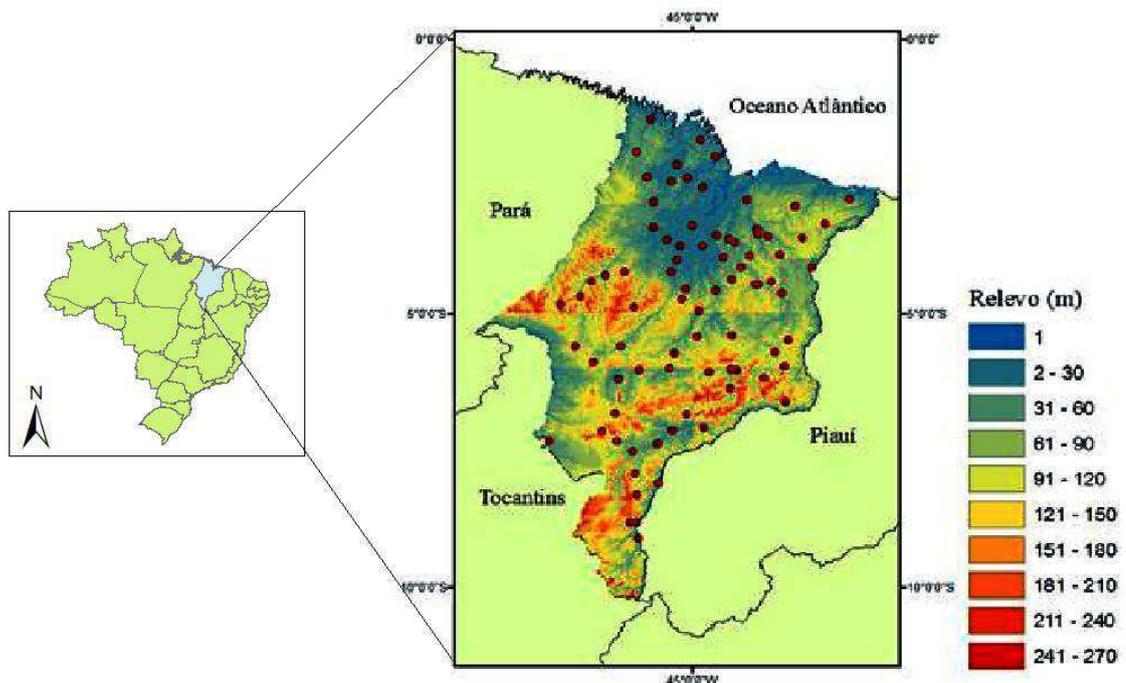


Figura 1. Distribuição espacial dos postos pluviométricos no Estado do Maranhão. (Fonte: IBGE, 2015 adaptado pelo Autor, 2015).

O regime pluviométrico maranhense é marcado pela presença de taxas pluviométricas elevadas em sua porção norte-ocidental e, em consequência, a cobertura vegetal é constituída pela floresta tropical e campos periodicamente inundáveis, sendo denominada pré-amazônica. Da parte norte-oriental até a fronteira piauiense, compõe a zona de transição entre a floresta

pré-amazônica e a vegetação de cerrado e caatinga. Na porção meridional verifica-se a ocorrência de extensos chapadões com formação de cerrados (Figura 2).

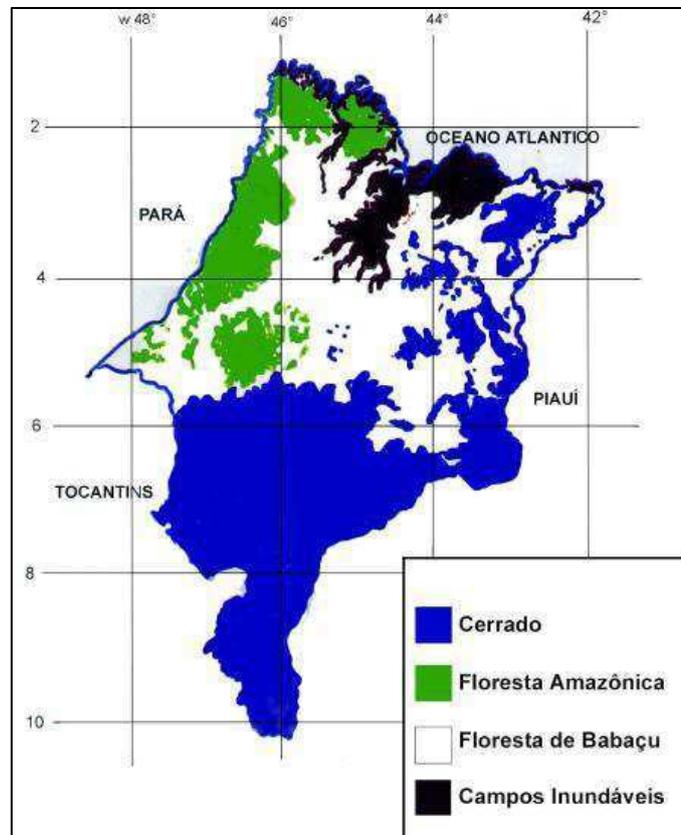


Figura 2. Tipos de vegetação do Maranhão. Fonte: ([www.ebah.com.br/content/agroambientes-transicao-entre-tropico-umido-semi-arido-maranhense](http://www.ebah.com.br/content/agroambientes-transicao-entre-tropico-umido-semi-arido-maranhense)).

Outro fator condicionante do clima responsável pela distinção entre algumas áreas de vegetação são: no noroeste a presença da Floresta Amazônica ou Hiléia Brasileira, sendo esta região também conhecida como Amazônia Maranhense; nas regiões de clima caracterizado como tropical, predomina o cerrado, ao sul; no litoral existe a presença do mangue; ao leste se encontra uma zona de transição entre o cerrado e a floresta equatorial, Mata dos Cocais, de vegetação relativamente homogênea, onde predomina o babaçu, de grande importância econômica para o Estado (Figura 2).

A rede hidrográfica maranhense é, em sua maior parte, pertencente à bacia do Norte e Nordeste. Os principais rios encontrados no território são: Parnaíba, dividindo a fronteira com o Piauí; o Gurupi (zona de fronteira com o Pará), o Tocantins (fronteira com Tocantins); e Turiaçu, Itapecuru, Pindaré, Grajaú e Mearim. O Maranhão é, dos Estados Nordestinos, o que menos se identifica com a característica maior dessa região: a escassez de recursos

hídricos. Com efeito, o Maranhão é detentor de uma invejável rede hidrográfica, com, pelo menos, dez bacias perenes, podendo ser individualizadas as seguintes bacias hidrográficas: Gurupi, Turiaçu, Maracaçumé-Tromaí, Uru-Pericumã-Aurá, Mearim, Itapecuru, Tocantins, Parnaíba, Munim e pequenas bacias do norte (ATLAS DO ESTADO DO MARANHÃO, 1984; 2002 ).

#### **4.2 Dados de Precipitação**

Utilizaram-se séries de totais médios mensais e anuais da precipitação (mm) de 81 postos pluviométricos/estações distribuídos no Estado do Maranhão, no período de 1987-2013 (Figura 1). Esses dados foram obtidos no laboratório de meteorologia da Universidade Estadual do Maranhão - UEMA e Agência Nacional das Águas (ANA). Inicialmente, os dados foram analisados quanto à atualidade, ausência de falhas e consistência. Selecionou-se um período que apresentasse o menor número de falhas e o maior número de estações e que tivessem um período comum de observações. Na porção noroeste da região observa-se uma escassez de estações, essa é uma área de preservação florestal.

A Figura 3 mostra a distribuição espacial dos totais médios anuais da precipitação no Estado do Maranhão do período de 1987 a 2013. Observa-se que na faixa do litoral norte e noroeste do Estado os totais médios anuais ultrapassam 1900 mm, atingindo os menores valores inferiores a 1000 mm na região central sul. Na realidade esta configuração espacial da precipitação total anual média faz parte dos resultados obtidos neste trabalho de pesquisa, porém como nesta seção está a apresentar os dados de precipitação do Maranhão optou-se por inserir aqui esta análise. A propósito, a variabilidade de precipitação mostrada na Figura 3 está relacionada a atuação de sistemas atmosféricos pertencentes as várias escalas de tempo conforme descrito na seção 3.2, os quais interagindo entre si, dão ao Estado características climáticas particulares.

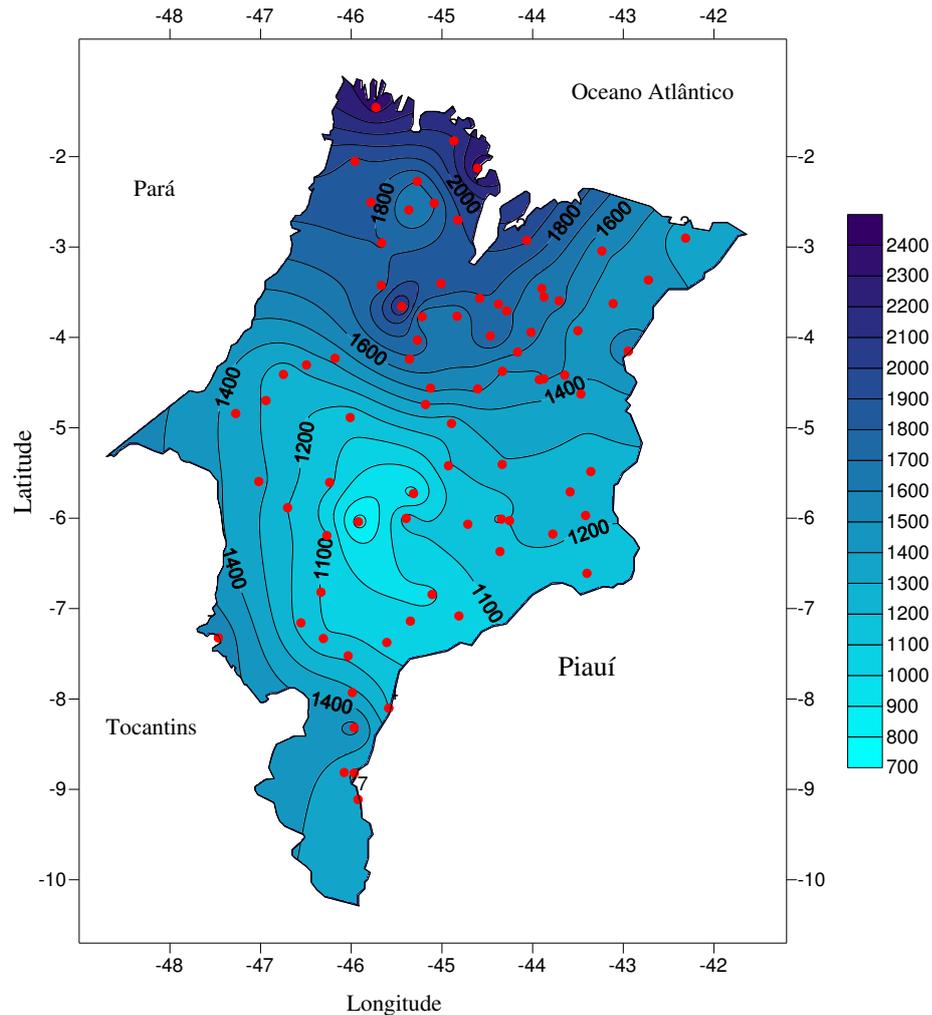


Figura 3. Variabilidade dos totais médios anuais da precipitação no período de 1987 a 2013 no Estado do Maranhão.

#### 4.3 Dados de TSM

Os dados mensais de TSM foram obtidos através do site Climate Diagnostic Center /National Oceanic and Atmospheric (<http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/climateindices/list/>), para o período de 1987 até o ano de 2013 e fazem referência as áreas de monitoramento do Pacífico Equatorial (NINO1+2, NINO 3, NINO 3.4 e NINO 4). Na Figura 4 consta a localização das áreas dos Niños: no extremo leste do Pacífico equatorial á area do Niño 1+2 (0-10°S, 90°W-80°W); no Pacífico equatorial leste à área do Niño 3 (5°N-5°S, 150°W-90°W); no Pacífico equatorial central leste a do Niño 3.4 (5°N-5°S, 170°W-120°W) e no Pacífico equatorial central à área do Niño 4 (5°N-5°S, 160°E-150°W).

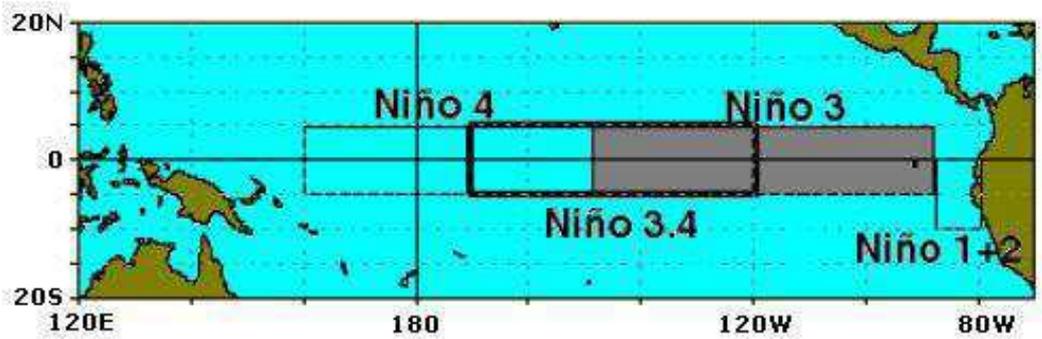


Figura 4. Áreas do Oceano Pacífico Equatorial, conhecidas como Niño 1+2, Niño 3, Niño 3.4 e Niño 4. Fonte: FUNCEME/DEMET (2005).

#### 4.4 Metodologia

A seguir está descrita a metodologia utilizada neste trabalho. Através da ACP foram determinados os padrões da variabilidade espacial e temporal da precipitação mensal e interanual, a partir destes fatores comuns espaciais e temporais aplicou a AA para subdividir o Estado em regiões homogêneas segundo o critério de Kaiser. Em seguida aplicou-se a TO as séries temporais de precipitação e TSM, afim de decompor o sinal das séries em múltiplas de tempo. E, por fim, correlacionou-se a precipitação com os índices de TSM do Oceano Pacífico Equatorial.

##### 4.4.1 Análise fatorial em Componentes Principais

A ACP é uma técnica da análise multivariada utilizada para reduzir o número de variáveis de um conjunto de dados, identificando o padrão de correlações ou de covariâncias entre elas e gerando um número menor de novas variáveis latentes, não observadas, calculadas a partir dos dados brutos. A redução do número de variáveis, também chamados muitas vezes de fatores ou componentes, maximiza o poder explicativo do conjunto de todas as variáveis, a partir da classificação dos autovetores associados aos autovalores da matriz de correlação (RICHMAN, 1986, WILKS, 2006).

A aplicação da análise fatorial requer que a matriz de dados tenha correlações suficientes. Existem três testes estatísticos para determinar a adequação da análise fatorial. O primeiro se dá aplicando o teste de esfericidade de *Bartlett* que testa a hipótese da matriz de

correlação ser uma matriz identidade (correlação zero entre as variáveis) e o seu determinante ser igual a um; o segundo é a estatística de *Kaiser-Meyer-Olkin* (KMO) que indica o grau de explicação dos dados a partir dos fatores encontrados na análise fatorial; valores de KMO maiores que 0,5 indicam que a análise fatorial consegue descrever satisfatoriamente as variações dos dados originais; o terceiro é através da matriz anti-imagem que indica o poder de explicação dos fatores em cada uma das variáveis analisadas (REIS 2001, CORRAR et al. 2007, HAIR et al. 2005).

A ACP é uma técnica estatística que transforma linearmente um conjunto de ( $p$ ) variáveis em um conjunto com um número menor ( $k$ ) de variáveis não correlacionadas, que explica uma parcela substancial das informações do conjunto original. As  $p$  variáveis originais ( $X_1...X_p$ ) são transformadas em  $p$  variáveis ( $Y_1..., Y_p$ ), denominadas componentes principais, onde  $Y_1$  é a que explica a maior parcela da variabilidade total dos dados,  $Y_2$  explica a segunda maior parcela e assim por diante (WILKS, 2006).

Existem dois tipos de ACP utilizados para analisar as variáveis observadas, tanto no tempo quanto no espaço, denominado de Modo-T (tempo) e Modo-S (espaço). O Modo-S, pode ser aplicado para criar agrupamentos de variáveis e classificar seus campos atmosféricos espaciais. Segundo Richman (1983) o Modo-T é uma ferramenta muito útil para sintetizar e reproduzir padrões de circulações, quantificando sua frequência e mostrando os períodos de tempo neles dominantes, ou seja, obter a evolução dos principais modos dominantes de circulação que permitam analisar a trajetória e comportamento dos sistemas sinóticos sobre determinadas áreas. Para a análise no Modo-T organizou-se uma matriz de dados  $M$  ( $m \times k$ ), onde as  $m$  linhas correspondem os postos pluviométricos e as  $k$  colunas os totais médios mensais observados. O Modo-S está relacionado com a análise de séries temporais correspondentes a pontos no espaço. Para a análise no Modo-S montou-se uma matriz de dados  $M$  ( $n \times p$ ), onde as  $n$  linhas correspondem aos meses do ano, e as  $p$  colunas corresponde às estações.

O resultado da análise fornece dois parâmetros: cargas fatoriais (correlações), que correspondem aos autovetores da matriz da ACP e indica a principal direção da variação dos dados, isto é, o modo principal como os dados variam no espaço; e os escores ou Componentes Principais (CP), que indica a variação temporal dos dados para cada modo. O primeiro modo é uma combinação linear normalizada das variáveis originais e representa a máxima fração ou porcentagem da variância explicada, o segundo modo é ortogonal ao primeiro e o segundo em importância, e assim sucessivamente (WILKS, 2006).

O número escolhido de Componentes Principais teve como base o critério de truncamento de Kaiser, que considera como mais significativos os autovalores cujos valores sejam superiores à unidade (GARAYALDE et al., 1986). A distribuição espacial das CP's representa a contribuição destes em relação à variância total do conjunto de dados da precipitação em cada localidade. Os fatores comuns são obtidos pela relação entre a matriz dos autovetores (A) e a raiz quadrada do autovalor ( $\lambda$ ), ou seja, o primeiro fator comum é obtido pela relação entre o primeiro autovetor ( $a_{11}$ ) e o primeiro autovalor ( $\lambda_1$ ) e assim sucessivamente.

#### 4.4.2 Análise de Agrupamento

A AA tem por objetivo classificar um conjunto de indivíduos ou objetos que possuam as mesmas características. Ou seja, classificar uma amostra de dados em um número pequeno de grupos mutuamente excludentes, com base nas similaridades entre eles. Existem dois métodos de classificação. Um é o método hierárquico, em que a partição dos grupos se dá a partir de um mínimo de grupos não definidos inicialmente. E o outro é o hierárquico em que o número de grupos é definido a priori. A classificação dos indivíduos em grupos distintos é feita a partir de uma função de agrupamento denominada distância ou similaridade e de um critério matemático de agrupamento. Os hierárquicos mais utilizados são: Ligação Simples, Ligação Completa, Ligação Média, Método Centróide e Método de Ward. Já nos métodos não hierárquicos o número de grupos é definido a priori. Os mais conhecidos são o método aglomerativo de *K-means*, de MacQueen e o das Nuvens Dinâmicas (WILKS, 2006; EVERITT, 1993; GONG & RICHMAN, 1995).

Para medir a similaridade entre as estações, empregou-se a distância euclidiana quadrática, que é a soma dos quadrados das diferenças (HAIR et al., 2005). Logo, a distância euclidiana é obtida pela equação:

$$d_{ij} = \sqrt{\sum_{v=1}^p (X_{iv} - X_{jv})^2} \quad (1)$$

em que:

$v$  são as variáveis ( $v = 1, 2, 3, \dots, p$ );

$X_{iv}$  é a  $v$ -ésima característica da  $i$ -ésima observação;

$X_{jv}$  é a  $v$ -ésima característica da  $j$ -ésima observação.

Nos métodos hierárquicos, a obtenção dos grupos pode ser feita por cortes transversais no dendrograma a partir do critério de agregação entre os grupos e conhecimento prévio da região em estudo (BOUROCHE & SAPORTA, 1982). Neste estudo utilizou-se o método de agrupamento de Ward (1963), o qual utiliza como critério de agrupamento a inércia entre grupos, que é medida pela Soma dos Quadrados dos Desvios (SQD) de cada ponto a média do grupo ao qual pertence. Logo, para “ $p$ ” indivíduos organizados em  $k$  grupos, temos:

$$SQD = \sum_{i=1}^n X_i^2 - \frac{1}{n} \left( \sum_{i=1}^n X_i \right)^2 \quad (2)$$

onde  $X_i$  é o número de indivíduos pertencentes ao  $i$ -ésimo grupo.

#### 4.4.3 Análise Espetral e Ondeleta

A partir do século XVII Jean Baptiste Joseph Fourier começou a desenvolver um método que leva o seu nome. Objetivando encontrar uma solução para um problema físico de propagação de calor em corpos sólidos, admitiu que essa propagação deveria se dar por ondas de calor, levando em conta que a forma mais simples de uma onda era uma função senoidal. Fourier mostrou que qualquer função, por mais complicada que fosse poderia ser decomposta como uma soma de senos e cossenos. Então, Fourier desenvolveu sua tão famosa série em processos físicos de sinal estacionário. Contudo, há certas áreas do conhecimento científico nos quais os modelos não-estacionários e não lineares são necessários, como é o caso dos estudos na área da climatologia, onde os sinais de propagação no tempo e no espaço na sua grande maioria não são regulares (MEYER 1993; ASSIS et al. 1996; MORETIN 1999).

A técnica da TJF para o estudo de sinais não-estacionários é limitada no aspecto de que possui uma janela móvel no tempo, porém esta janela é fixa, ou seja, ela não consegue determinar variações de altas e baixas frequências simultaneamente. Para sanar tal deficiência é requerido o uso da técnica conhecida como Transformada em Ondeletas (TO), a qual possui janelas móveis, no tempo ou no espaço, que se dilatam ou se comprimem para capturar sinais de baixa e alta frequência, respectivamente (CASTRO, 2007).

A ideia central da TO consiste em decompor o sinal analisado em diferentes níveis de frequências (resolução) (MASSEI, et al., 2006); tal processo é conhecido como “Multiresolução”. Esta forma de representação do sinal fornece uma estrutura hierárquica simples para a interpretação física das informações fornecidas pelo sinal analisado.

O termo ondeleta refere-se basicamente a um conjunto de funções com forma de pequenas ondas geradas por translações  $\Psi(t) \rightarrow \Psi(t+1)$  e escalonamentos  $\Psi(t) \rightarrow \Psi(2t)$  de uma função ondeleta base  $\Psi_0(t)$ , a chamada ondeleta-mãe.

Unindo as propriedades de translação e escalonamento (equações 4 e 5, respectivamente) em uma única função ondeleta geradora  $\Psi_{j,k}(t)$ , obtêm-se as chamadas funções ondeletas filhas (CHIERICE JUNIOR et al., 2008; IZADIFAR, 2010), pela mudança de  $j$  e  $k$ . Sendo assim, a Equação 3 mostra a função ondeleta geradora em função de  $\Psi_0$ .

$$\Psi_{j,k}(t) = \frac{1}{\sqrt{j}} \Psi_0\left(\frac{t-k}{j}\right); j \neq 0 \quad (3)$$

em que “ $j$ ” é denominado fator de escalonamento (contração  $j$  aumenta e dilatação  $j$  diminui) e “ $k$ ” é o fator de translação. As ondeletas filhas são geradas da seguinte forma:

$$\Psi_k(t) = \Psi_0(t-k) \quad \text{Translação} \quad (4)$$

$$\Psi_j(t) = \frac{1}{\sqrt{j}} \Psi_0\left(\frac{t}{j}\right) \quad \text{Escalonamento}; j \neq 0 \quad (5)$$

As equações 4 e 5 mostram as ondeletas filhas geradas pela translação e pela mudança de escala, respectivamente. O fator  $\frac{1}{\sqrt{j}}$  é chamado de constante de normalização da energia de cada ondeleta filha de forma a manter a mesma energia da ondeleta principal, ou seja, a soma das energias de todas as ondeletas filhas, oriundas das Equações (4) e (5), resulta na energia total da transformada.

A localização temporal da função ondeleta ocorre devido à mesma ser definida em um intervalo finito, ou seja, quando a escala  $j$  na Equação 3 aumenta a função ondeleta dessa escala fica localizada em um intervalo (janela temporal) de comprimento cada vez menor, determinando a localização no tempo do sinal analisado para a respectiva escala  $j$ . A localização em frequência da ondeleta-mãe se deve ao fato da transformada de Fourier da função ondeleta poder ser interpretada como um filtro passabanda, ou seja, a TF da ondeleta base em uma determinada escala  $j$  determina a energia para aquele período e conseqüentemente sua referida frequência, ou seja, a energia de uma determinada ondeleta filha.

A Transformada em Ondeletas envolve uma operação “linear” que pode ser utilizada na análise de sinais não-estacionários para extrair informações das variações em frequência dos mesmos e para detectar estruturas localizadas no tempo ou espaço.

Para que uma função seja denominada de função ondeleta base, representada por  $\Psi$ , ela deve satisfazer as seguintes propriedades:

**1ª Propriedade:** A integral dessa função deve ser zero, ou seja:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \Psi_0(t) dt = 0 \quad (6)$$

A Equação 6 assegura que a função ondeleta assume uma forma do tipo onda. Essa condição é conhecida como condição de “admissibilidade”. Isso garante a Transformada Inversa da função ondeleta (TORRENCE e COMPO, 1998).

**2ª Propriedade:** A função ondeleta deve possuir energia unitária, isto é:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} |\Psi_0(t)|^2 dt = 1 \quad (7)$$

A Equação 7 assegura que a função ondeleta possua suporte compacto, ou seja, um decaimento rápido de amplitude (BUENO et al., 2008), da literatura inglesa (*e-folding time*), o que garante que a ondeleta-mãe possua uma localização espacial. As propriedades descritas acima são equivalentes a dizer que  $\Psi_0(t)$  é quadraticamente integrável, ou seja, que a função ondeleta pertence ao conjunto das funções de quadrado integrável  $L^2(\mathbb{R})$  dentro do conjunto dos números reais  $\mathbb{R}$ . As propriedades acima, também sugerem que  $\Psi_0(t)$  tende a oscilar acima e abaixo do eixo  $t$  e que tem sua energia localizada em certa região, já que ela é finita. Aliás, nesta classe de funções encontram-se a maior parte dos sinais reais (de energia finita) de importância na aplicação de processamento de sinais.

#### 4.4.4 A Função Ondeleta Base de Morlet

A função de Morlet é dada pela seguinte expressão:

$$\Psi(t) = e^{iw_0 t} e^{-\frac{t^2}{2}} \quad (8)$$

$w_0$  é uma frequência adimensional (ou seja, o valor que determina a forma do sinal modulador da Função Ondeleta) e  $t$  é cada valor da série temporal. E,  $e^{-t^2/2}$ , que representa uma onda modulada por um envelope Gaussiano.

Pode-se então variar a "escala" da ondeleta mudando sua largura. Esta é a vantagem real da Análise de Ondeletas. Ondas Morlet apresentam alta frequência enquanto gaussianas apresentam baixa frequência. Para a determinação de ciclos curtos ou longos modifica-se o tipo da onda para Morlet ou Gaussiana, respectivamente.

#### 4.4.5 Interpretação do Gráfico de Ondeleta

A teoria da ondeleta baseia-se na representação de funções em diferentes escalas e diferentes resoluções (tempo-escala), considerando assim uma das suas principais características (DAUBECHIES, 1992). A Figura 5 (a, b, c e d) a seguir ilustra a descrição e interpretação da TO, ou seja, Figura 5.a) corresponde a série temporal da variável em questão; 5.b) as áreas coloridas na escala do Espectro de Potência das ondeletas (EPO), as cores preta e laranja correspondem as maiores energias. Os contornos fechados são significativos para o nível de confiança 95% da curva contínua, em forma de "U", que representa o cone de influência da energia; 5.c) indica o espectro global das ondeletas (EGO) para os valores mais significativos ao nível de 95% à direita da curva tracejada, a frequência que ultrapassar esta curva tracejada será estatisticamente significativo; e 5.d) a média por escalas das potências ou variância que mostra em quais anos ocorreram as máximas variâncias da variável em questão.

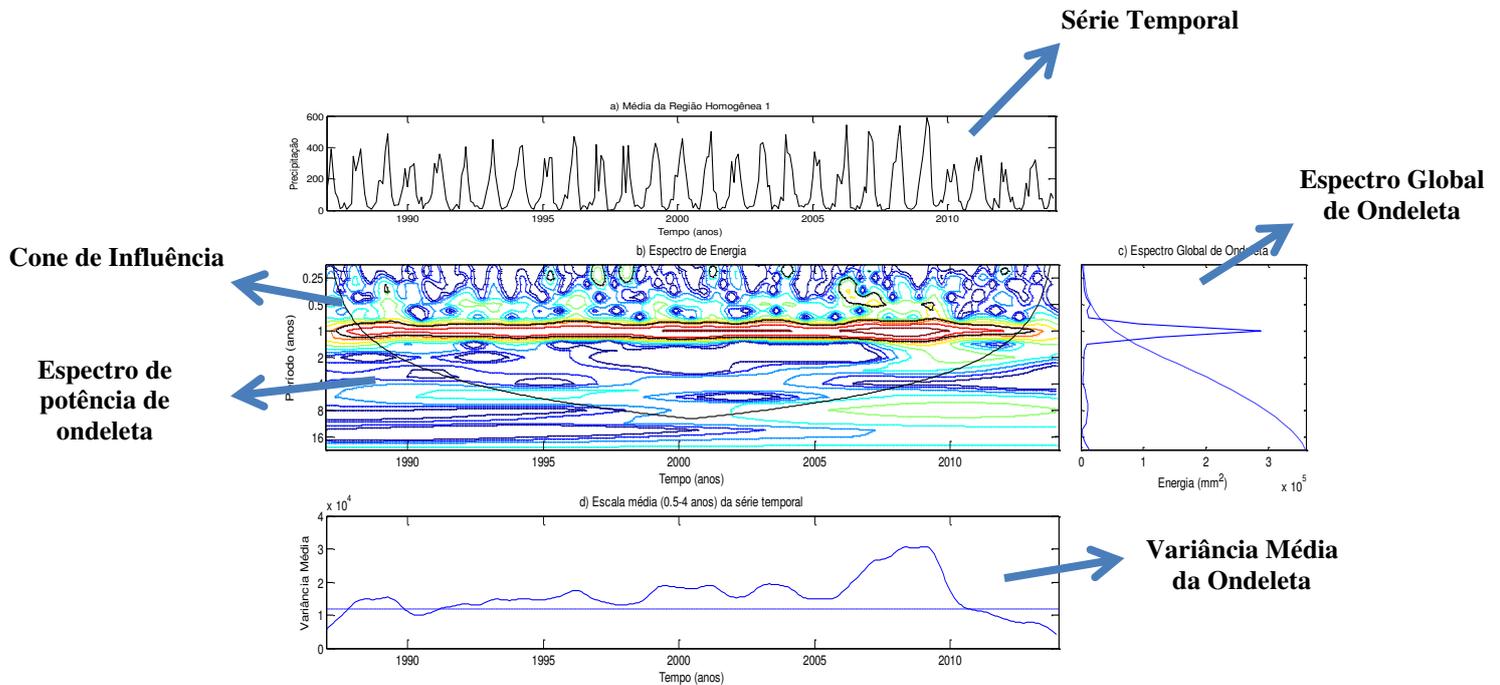


Figura 5. a) Série temporal de precipitação, b) Espectro de potência de ondeleta, c) Espectro global de ondeleta, d) Média por escalas das potências ou variância da ondeleta.

#### 4.4.6 Análise de Correlação Linear

O coeficiente de correlação de Pearson mede o grau da correlação linear entre duas variáveis quantitativas. É um índice adimensional variando entre -1,0 e 1,0 inclusive, que mede o quanto duas variáveis são correlacionadas. A correlação entre duas variáveis é dada pela seguinte expressão:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})(x_i - \bar{x})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}} \quad (9)$$

onde  $x_i$  e  $y_i$  são os valores observados de  $X$  e  $Y$ , respectivamente;  $i = 1, 2, \dots, n$ ;  $n$  é o número de observações para cada variável; e  $\bar{x}$  e  $\bar{y}$  são as médias de  $X$  e  $Y$  respectivamente.

Para a relação entre a precipitação em cada área homogênea com a TSM nas áreas do Pacífico Equatorial, aplicou-se a metodologia do método dos mínimos quadrados (MMQ). A partir do MMQ encontram-se os coeficientes de regressão angular e linear e os coeficientes de determinação e correlação entre as variáveis. Para verificar a significância da correlação ( $r$ ) foi feito o teste de significância amostral, através do teste unilateral de Student, considerando

$r$  como sendo o coeficiente de correlação de uma população teórica avaliada a partir do coeficiente de correlação amostral, para  $r=0$  (hipótese nula), dada por:

$$t = \frac{r\sqrt{N-2}}{\sqrt{1-r^2}} \quad (10)$$

Se a hipótese nula é rejeitada para um determinado nível de significância, o  $r$  amostral encontra-se na área de aceitação, ou seja, existe uma correlação entre as populações, caso contrário, se a hipótese nula for aceita a correlação entre as populações estudadas é igual a zero situando-se na área de rejeição.

#### **4.4.7 Determinação dos anos de El Niño e La Niña**

Os índices mensais para a classificação de anos de EN e LN foram obtidos através da metodologia descrita em Trenberth (1997), que classifica os eventos em função das temperaturas do Pacífico nas regiões Niño 3.4. De acordo com a metodologia de Trenberth, se analisa as médias mensais de TSM durante 5 meses, e se essa média for superior a  $0,4\text{ }^{\circ}\text{C}$  durante 6 meses ou mais, então esse período pode ser classificado como evento de EN. Para a classificação de anos de LN se aplica a mesma metodologia, mas com média inferior a  $-0,4^{\circ}\text{C}$ . A tabela a seguir classifica os períodos de ENOS de 1987 a 2013.

Tabela 1. Classificação dos anos de El Niño e La Niña segundo a classificação de Trenberth (1997).

EVENTOS DE EL NIÑO					EVENTOS DE LA NIÑA				
INICIO	FIM	DURAÇÃO	Média	Pico	INICIO	FIM	DURAÇÃO	Média	Pico
		(MESES)					(MESES)		
mai/72	mar/73	11	1,3	2,0	jun/73	jul/74	14	-1,3	-1,9
set/76	fev/77	06	0,7	0,8	out/74	mar/76	18	-0,9	-1,6
set/77	jan/78	05	0,7	0,8	out/84	jun/85	9	-0,8	-1,1
out/79	fev/80	05	0,5	0,6	mai/88	fev/89	13	-1,2	-1,8
abr/82	jun/83	15	1,3	2,1	ago/95	mar/96	8	-0,8	-1,0
set/86	fev/88	18	1,1	1,6	jul/98	mar/01	33	-1,0	-1,6
jun/91	jul/92	14	1,0	1,6	ago/07	jun/08	11	-1,0	-1,4
out/94	mar/95	06	0,8	1,0	nov/08	fev/09	4	-0,7	-0,8
mai/97	mai/98	13	1,6	2,3	jul/10	abr/11	10	-1,1	-1,4
jun/02	fev/03	09	0,9	1,3	ago/11	mar/12	8	-0,7	-0,9
jul/04	abr/05	10	0,6	0,7	-	-	-	-	-
set/06	jan/07	05	0,8	1,0	-	-	-	-	-
jul/09	abr/10	10	0,9	1,3	-	-	-	-	-

Legenda

FORTE MODERADO FRACO

## **5 - RESULTADOS E DISCUSSÃO**

### **5.1 Variabilidade espacial e temporal da precipitação**

Nesta primeira etapa do estudo são apresentados os resultados dos padrões temporais e espaciais da precipitação expressos pelos seus principais fatores comuns, obtidos pela análise fatorial em componentes principais. Em seguida serão determinadas as regiões homogêneas calculadas a partir da Análise de agrupamentos aplicada aos fatores comuns espaciais e escores temporais mais expressivos da precipitação. A técnica empregada possibilitou subdividir o Estado e caracterizá-lo conforme as variabilidades sazonais e interanuais da precipitação.

#### **5.1.1 Análise sazonal da precipitação**

Estão apresentados e discutidos os três fatores comuns mais significativos que explicam 91,5% da variância total média mensal da precipitação para período de 1987 a 2013, para o Estado do Maranhão (Tabela 2). Esses fatores foram selecionados segundo o critério de Kaiser que trunca os autovalores maiores que a unidade. Para auxiliar na definição dos fatores utilizou-se o scree plot que exhibe os autovalores associados a um componente ou fator em ordem decrescente versus o número do componente ou fator, indicando que as três componentes estão posicionadas antes da inflexão. Aplicou-se o teste de KMO para medir o grau de correlação parcial entre as variáveis, o qual resultou num  $KMO = 0,849$ , para um nível de 95%, indicando portanto que os fatores encontrados na análise conseguem descrever satisfatoriamente as variações dos dados originais. Considerando os dois indicadores de seleção acima, tamanho da amostra e o regime climático da região, reteve-se as três primeiras componentes principais.

Tabela 2. Sequência dos autovalores e a variância explicada e acumulada (%) mensal dos fatores rotacionados da precipitação.

Componentes Principais	Autovalores Iniciais			Cargas Não Rotacionadas			Cargas Rotacionadas		
	Total	% de Variância	Cumulativa %	Total	% de Variância	Cumulativa %	Total	% de Variância	Cumulativa %
1	7,557	62,971	62,971	7,557	62,971	62,971	4,114	34,286	34,286
2	2,200	18,332	81,303	2,200	18,332	81,303	3,980	33,165	67,451
3	1,228	10,230	91,533	1,228	10,230	91,533	2,890	24,082	91,533
...	...	...	...						
12	0,012	0,104	100,000						

As correlações temporais mensais associadas aos três primeiros fatores são ilustradas na Figura 5. O primeiro fator comum temporal rotacionado que explica 34,1% da variância total dos dados tem correlação positiva, superiores a 0,8 nos meses de junho a agosto (Figura 5). A configuração espacial correspondente a este fator apresenta contribuições superiores a 1,0 no norte e noroeste (Figura 6.1). De acordo com o regime climático do Maranhão este fator evidencia a época chuvosa do ano que é influenciada pelas LIs e distúrbios ondulatórios de leste, é responsável por cerca de 25% a 33% do total de precipitação anual no Maranhão (BARROS, 2008 e BARROS e OYAMA, 2010).

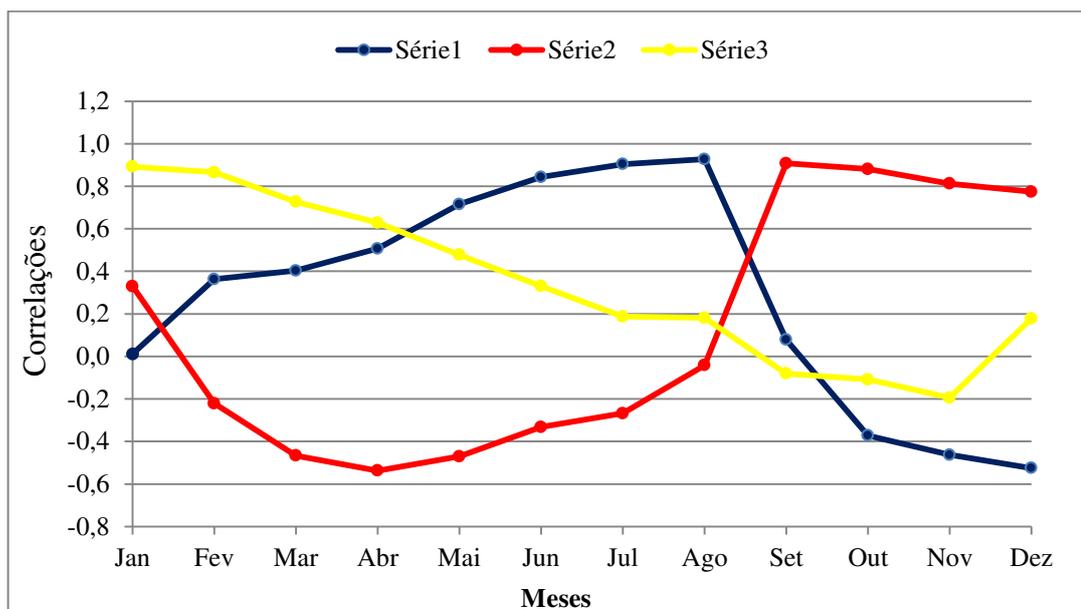


Figura 6. Correlação dos três primeiros fatores comuns rotacionados que explicaram 91,5% da precipitação mensal no Maranhão.

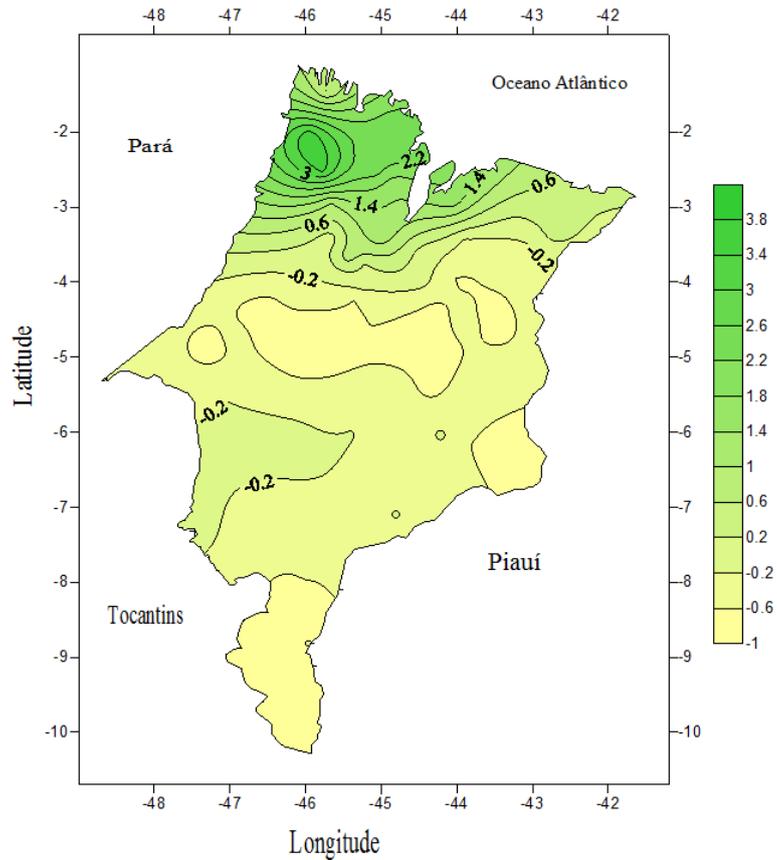


Figura 6.1. Padrão espacial do primeiro fator comum da precipitação mensal, no Estado do Maranhão no período de 1987 a 2013.

O segundo fator que explica 32,7% da variância total, apresenta correlações superiores a 0,8 nos meses de setembro a dezembro. A distribuição espacial relacionada mostra contribuições (escores) elevadas positivas no sudoeste, sul e extremo noroeste (Figura 6.2). Possivelmente as chuvas nesses meses indicadas neste padrão, sejam provenientes da influência da ZCAS. Outro importante mecanismo causador de chuvas no sul do Nordeste do Brasil é a penetração de frentes frias até às latitudes tropicais entre os meses de novembro e janeiro (Kousky, 1979, Virj, 1981).

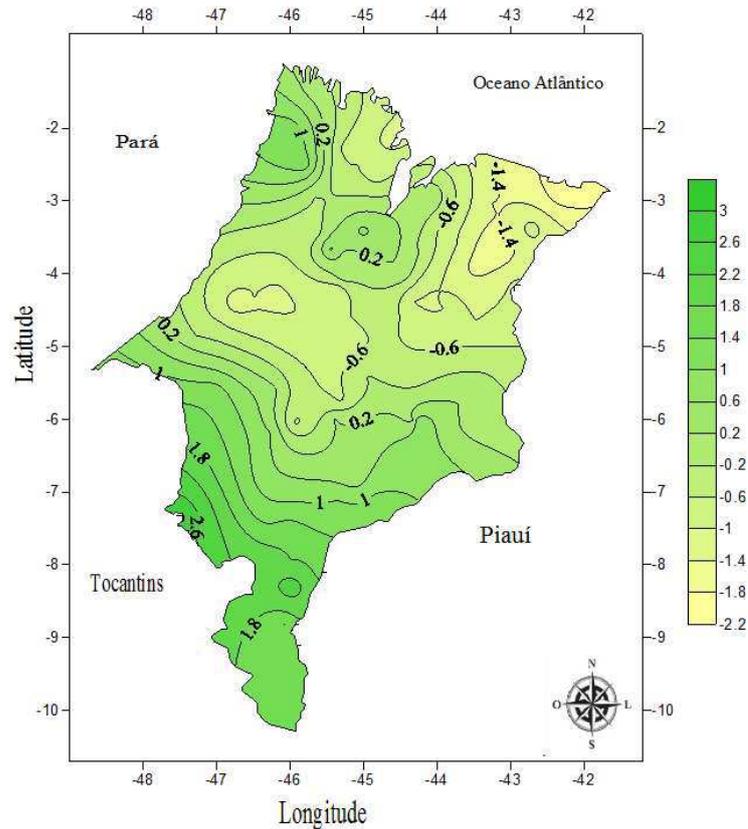


Figura 6.2. Padrão espacial do segundo fator comum da precipitação mensal no Estado do Maranhão no período de 1987 a 2013.

O terceiro fator comum, que explica 24,7% da variância total dos dados, revela um ciclo bem definido, com correlações máximas nos meses de janeiro a abril ( $r > 0,6$ ). A configuração espacial do terceiro fator apresenta grande variabilidade espacial com contribuições negativas inferiores a -1,4 na região central sul/sudeste e inferior a -0,6 no centro norte (Figura 6.3). Verifica-se contribuições positivas superiores a 1 na região central norte, extremo norte, sul e sudeste do Estado (Figura 6.3). Nestas regiões as precipitações mais importantes estão associadas ao deslocamento da ZCIT para Sul e a atuação do VCAN no verão (GAN & KOUSKY, 1986). Normalmente a ZCIT migra sazonalmente de sua posição mais ao norte, aproximadamente 12°N, em agosto-setembro para posições mais ao sul e aproximadamente 4°S, em março-abril favorecendo as chuvas nas regiões definidas por este fator (HASTENNATH, 1990).

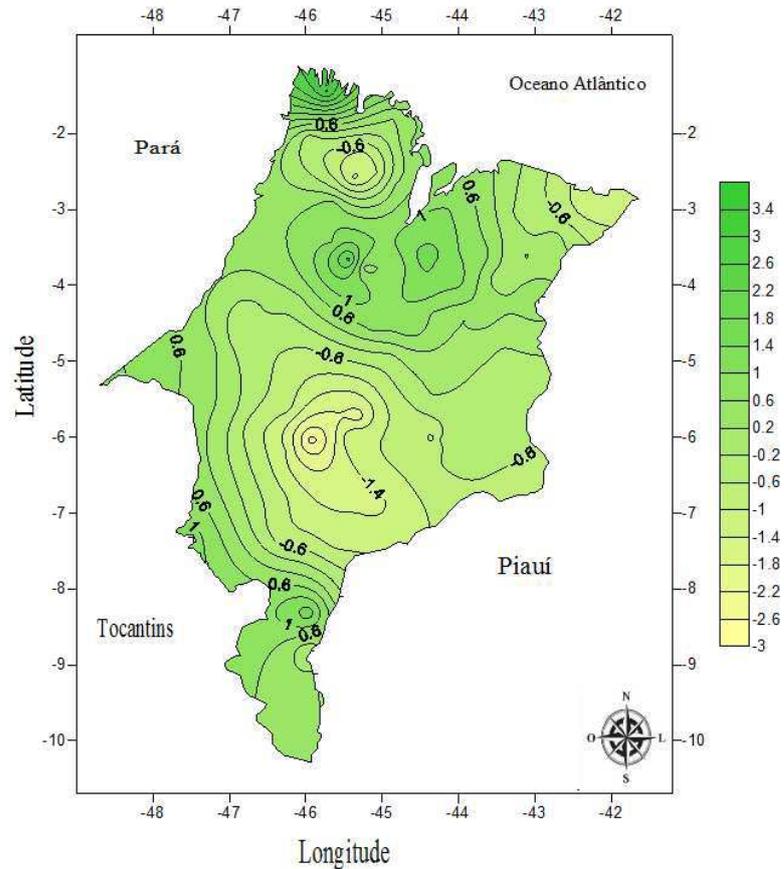


Figura 6.3. Padrão espacial do terceiro fator comum da precipitação mensal no Estado do Maranhão no período de 1987 a 2013.

### 5.1.2 Análise da variabilidade interanual da precipitação

Seguindo o mesmo procedimento utilizado na subsecção 5.1.1, neste caso foram considerados os 15 fatores comuns mais significativos dos totais de precipitação anual que explicaram 93,4% da variância total dos dados no período de 1987 a 2013 (Apêndice). Esses fatores foram selecionados segundo o critério de Kaiser que trunca os autovalores maiores que a unidade. A seguir serão mostrados e discutidos apenas os três primeiros fatores comuns espaciais anuais (correlações) e suas respectivas séries temporais (scores), para evitar repetições desnecessárias e cansativas, não se fez comentários para os demais fatores. A técnica da ACP conseguiu descrever satisfatoriamente as variações dos dados originais, foi obtido um KMO de 0,903, indicando a adequação da análise.

As correlações espaciais do primeiro fator representa a situação média da precipitação anual, ou seja, este fator mostra um regime quase homogêneo da precipitação com correlações positivas e altas superiores a 0,7 no norte e nordeste e vão diminuindo progressivamente na

direção ao sul, atingindo valores inferiores a 0,1 (Figura 7). Na série temporal relativa a este fator verifica-se alternância de contribuições positivas e negativas das CPs e alta variabilidade da precipitação na escala interanual (Figura 8).

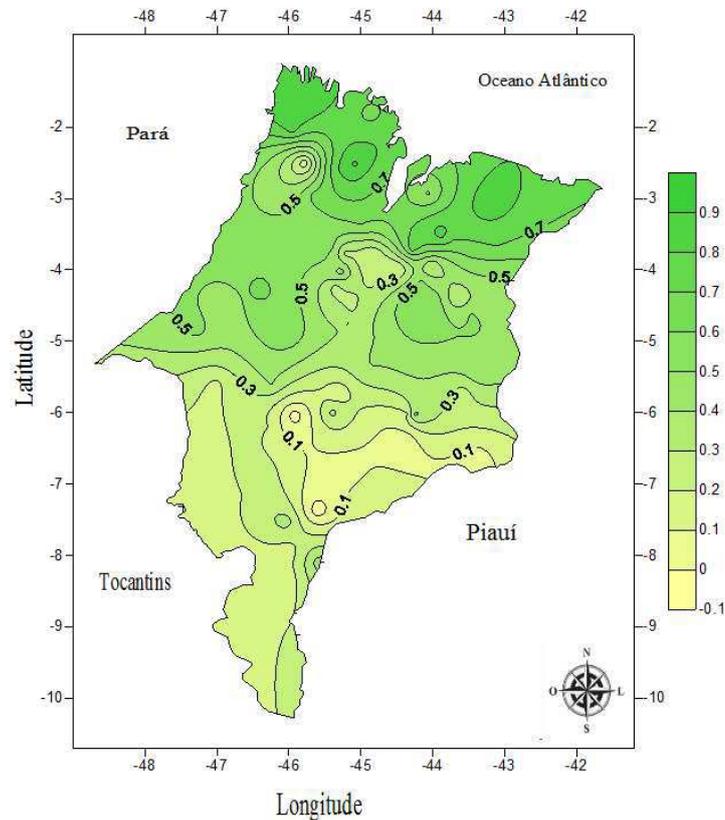


Figura 7. Padrão espacial do primeiro fator comum (correlações) que explica 23,8% da variância total da série.

Observa-se máximos muito chuvosos com contribuições superiores a 1,5 nos anos 1988, 1989 e mínimos em 1992 e 2012 evidenciam as anomalias dos anos extremos (secos e chuvosos) (Figura 8). De acordo com dados observados na Tabela 3 (em anexo), esses máximos e mínimos foram observados em anos de ocorrência do fenômeno El Niño/La Niña, o qual altera a circulação de Walker, e do Padrão de Dipolo do Atlântico, que exerce influências no deslocamento norte-sul da ZCIT, favorecendo as chuvas/secas na região, concordando com estudos realizados na região por ANDREOLI e KAYANO, 2006.

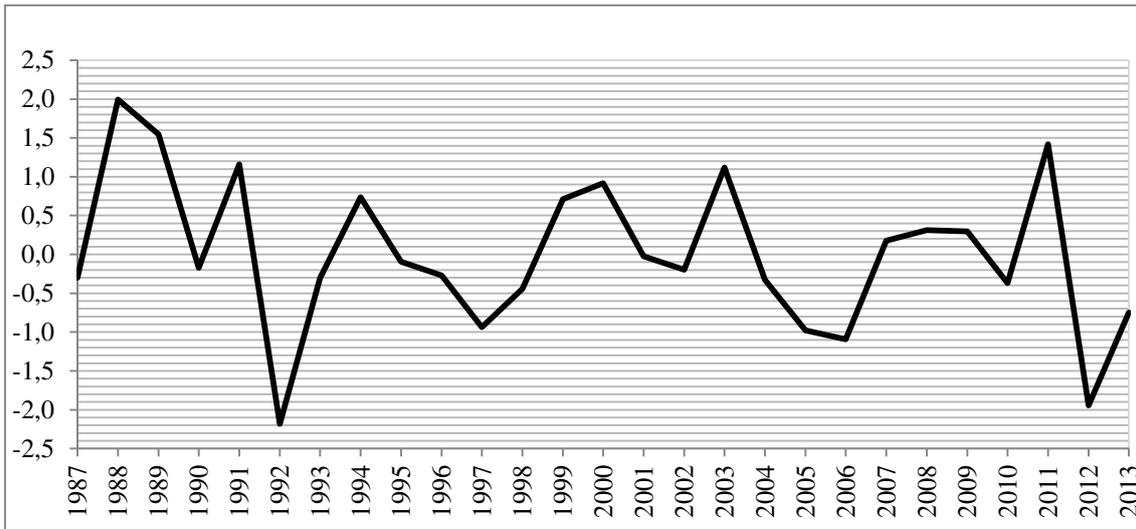


Figura 8. Série temporal (escores) do primeiro fator comum espacial para o período de 1987-2013.

O segundo fator comum, que explica 15,3% da variância total, apresenta correlações mais elevadas na diagonal sudoeste-nordeste do Estado e um núcleo superior a 0,6 no leste, atingindo valores mínimos em alguns núcleos no sul e extremo norte (Figura 9). Esses máximos e mínimos foram observados em anos de ocorrência do fenômeno El Niño/La Niña conforme pode ser mostrado por este padrão as contribuição máxima em 2009 e mínima em 2013.

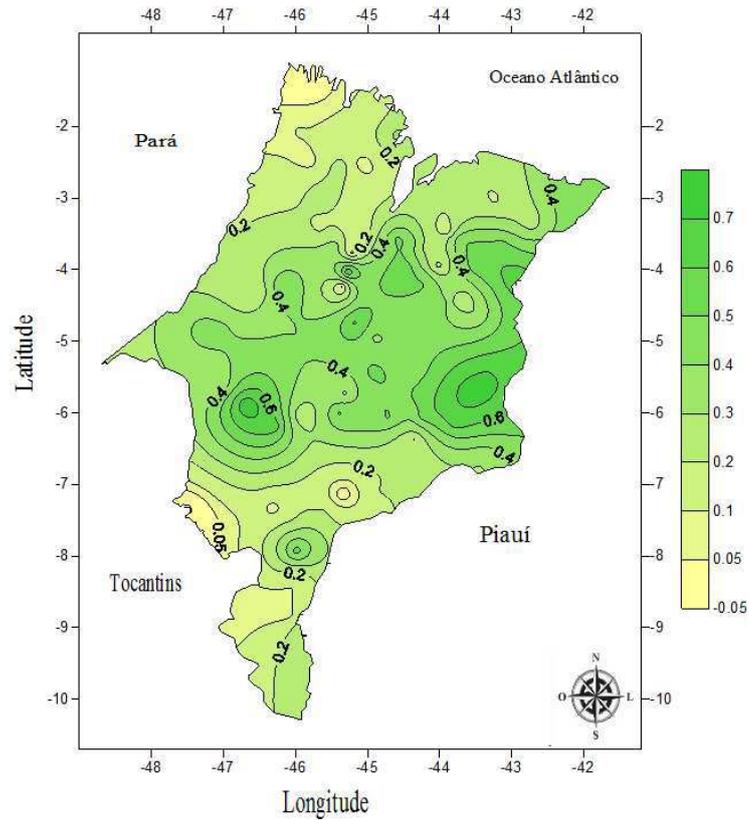


Figura 9. Padrão espacial do segundo fator comum (correlações) que explica 15,3% da variância total da série.

Observam-se também contribuições positivas em 1996 e 1997 e negativas em 1987 e 1991 em menores proporções, evidenciando também a ocorrência de eventos de La Niña e El Niño respectivamente (Tabela 1 e Figura 10).

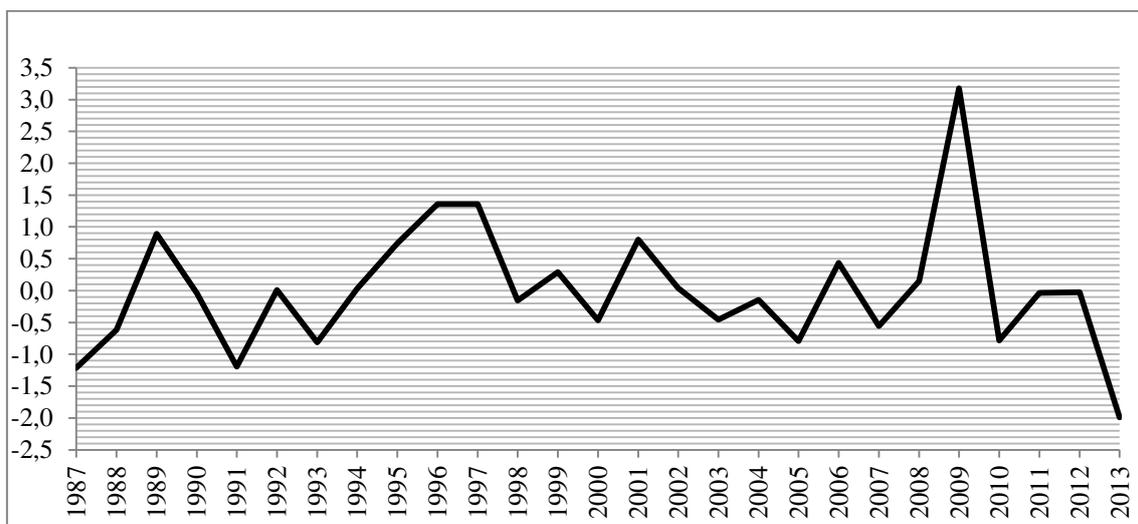


Figura 10. Série temporal (escores) do segundo fator comum espacial (CP2) para o período de 1987-2013.

O padrão espacial associado ao terceiro fator, que explica 11,2% da variância total dos dados, apresenta correlações positivas com grande variabilidade espacial. Verificam-se correlações com núcleos superiores ao 0,5 na região central e sudeste, nas demais regiões as correlações oscilam em média entre -0,2 a 0,3.

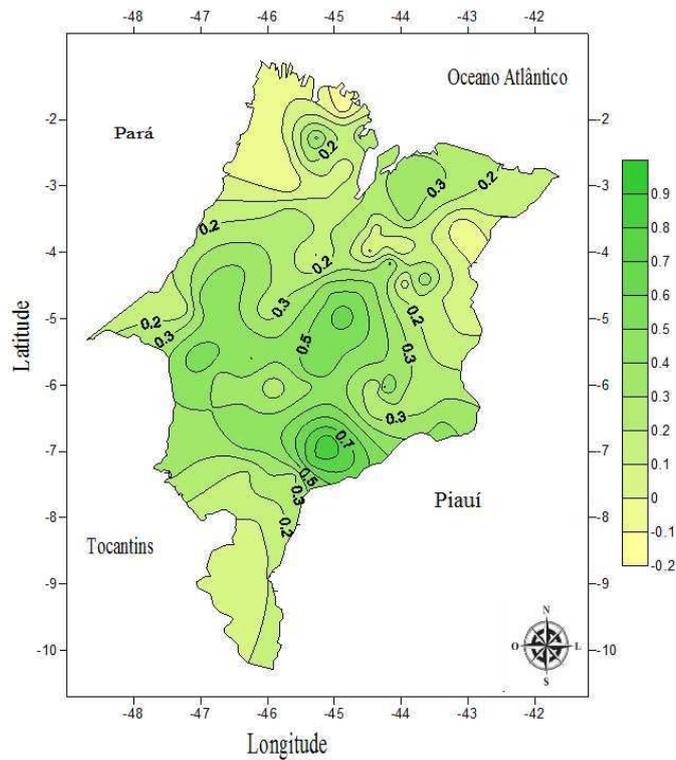


Figura 11. Padrão espacial do terceiro fator comum (correlações) que explica 11,2% da variância total da série.

A série temporal associada ao terceiro padrão mostra a variabilidade temporal da precipitação anual no período janeiro de 1987 a dezembro de 2013. Os valores mínimos são observados no ano de 1987, que coincide com evento El Niño, e no ano de 1990 em que o oceano Pacífico apresentava condição de neutralidade e mesmo assim o ano foi seco com escore anual de -2. Os máximos superiores 1 ocorreram nos 1996, 2000, 2010 e 2011, coincidiram com eventos de La Niña e novamente em 2013 (Vide Apêndice) o oceano Pacífico apresentou condição de neutralidade (Figura 12).

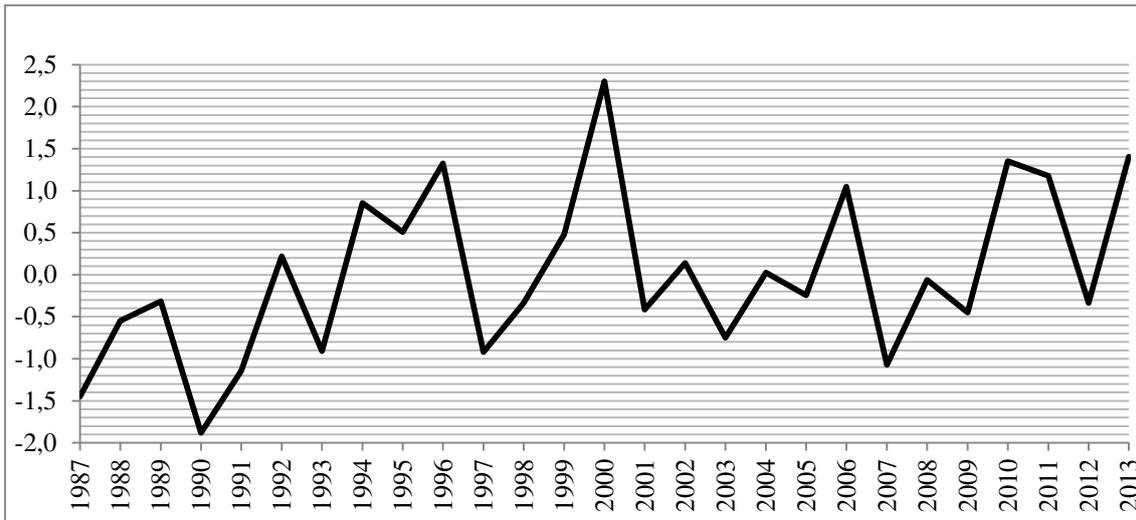


Figura 12. Série temporal (escores) do terceiro fator comum espacial (CP3) para o período de 1987-2013.

## 5.2 Regiões Homogêneas da Precipitação

A delimitação das regiões homogêneas da precipitação foi obtida pelo o método de agrupamento de Ward (1963), a partir da matriz dos fatores comuns espaciais e temporais mais expressivos. A aplicação do método à matriz de dados resultante da ACP mensal e anual possibilitou dividir o Estado do Maranhão em 5 regiões homogêneas do ponto de vista do regime de precipitação (Figura 13). A seguir será apresentada uma breve descrição das principais características do regime pluviométrico de cada região.



Figura 13. Regionalização da precipitação a partir dos fatores espaciais e temporais obtidas pelo método de agrupamento de Ward para o Maranhão.

A região homogênea RH1 possui 12 estações, cuja precipitação total média anual é superior a 1900mm, encontra-se inserido no norte e noroeste do Estado, observa-se que esta região possui os maiores índices pluviométricos do Estado, e o período de chuvas é de janeiro até julho. Entretanto, os maiores índices pluviométricos ocorrem de janeiro a maio (Figura 13.1), devido à atuação dos VCAN e da ZCIT, respectivamente. Esse período de chuvas mais extenso possivelmente se deve a proximidade com o litoral e atuação de distúrbios ondulatórios de leste e brisas marítimas/terrestre, conforme descrito por Kousky (1980), Kousky e Gan (1981) e Andreoli e Kayano (2006).

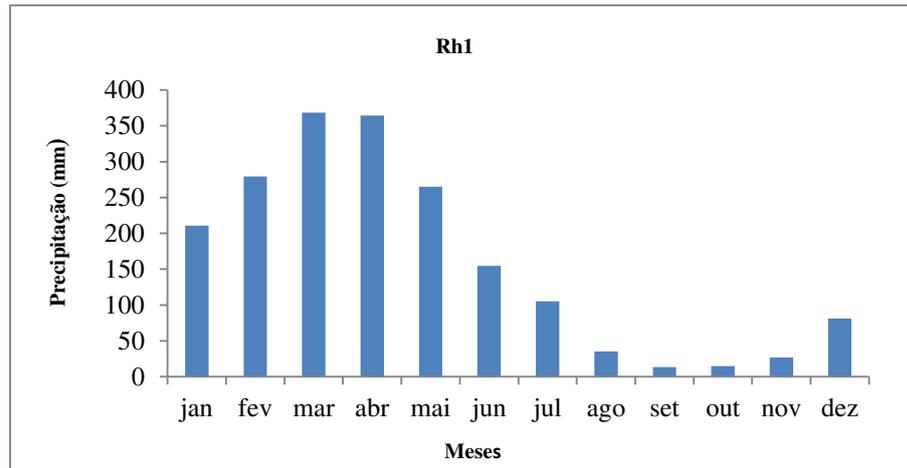


Figura 13.1. Variabilidade média mensal da precipitação no período de 1987-2013, para as estações da RH1.

A região homogênea RH2 situada na região centro-norte do Estado (Figura 13), é composta por 8 estações, com precipitação total média anual superior a 1600mm (Figura 13.2). O período de chuva é de janeiro a maio, sendo março e abril os meses mais chuvosos (Figura 13.2). Conforme a literatura e estudos realizados para o NEB, os máximos de precipitação nestes meses são influenciados pela atuação dos VCAN e ZCIT na região conforme comentário na secção 3.1.

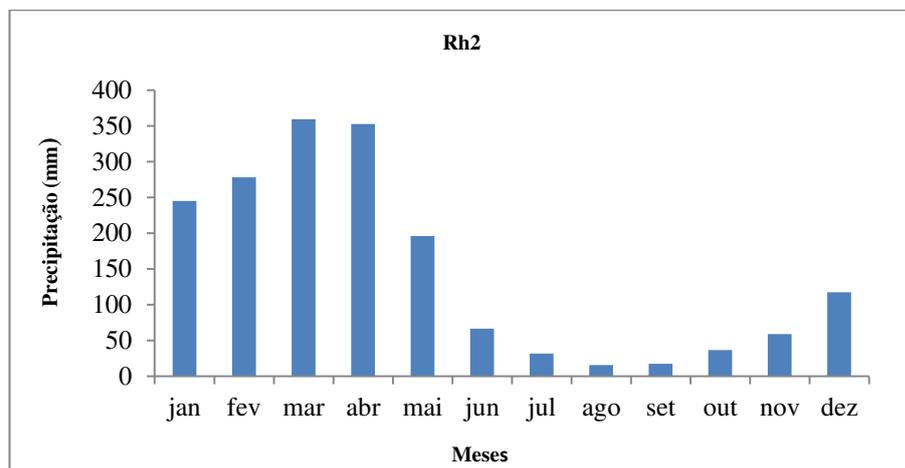


Figura 13.2. Variabilidade média mensal da precipitação para o período de 1987-2013, para as estações da RH2.

A região RH3 composta por 29 estações, se estende na diagonalmente que vai desde o oeste/noroeste até a região nordeste do Estado, com totais médios anuais da precipitação variando entre 1300 e 1700mm. O período de maiores índices pluviométricos começa em

dezembro e estendem-se até maio, pode-se observar na Figura 13.3 que os máximos e mínimos de precipitação ocorrem em março e agosto, respectivamente. Estes valores de precipitação são oriundos da atuação dos VCAN e ZCIT na região (GAN e KOUSKY, 1986).

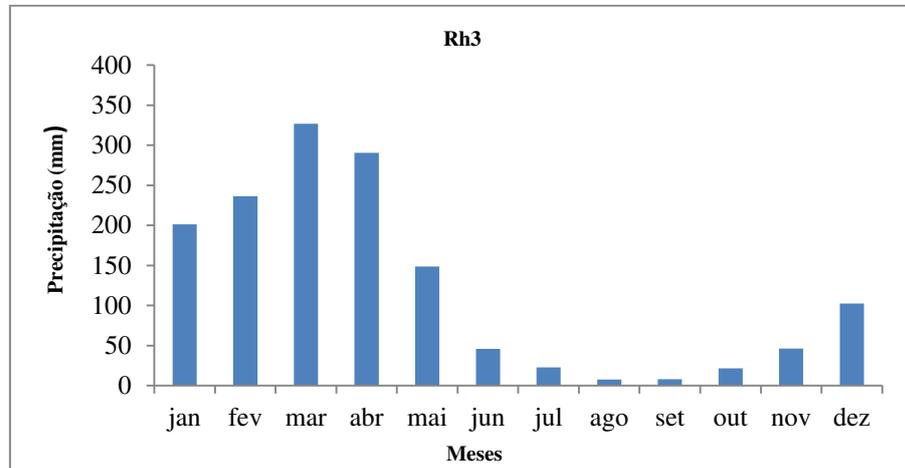


Figura 13.3. Variabilidade média mensal da precipitação para o período de 1987-2013, para as estações da RH3.

A região RH4 pertence a região central-sul e sudeste, abrange uma grande área do Estado (24 estações), caracterizada por apresentar os menores índices pluviométricos que oscilam de 800 e 1300 mm com núcleo mais seco no centro do sudeste (Figura 3). Nesta região o regime de chuvas é de novembro a abril (Figura 13.4), a maior concentração de chuvas ocorre nos primeiros meses do ano oriundos da atuação também dos VCAN em janeiro e fevereiro e da ZCIT em março e abril (GAN e KOUSKY, 1986).

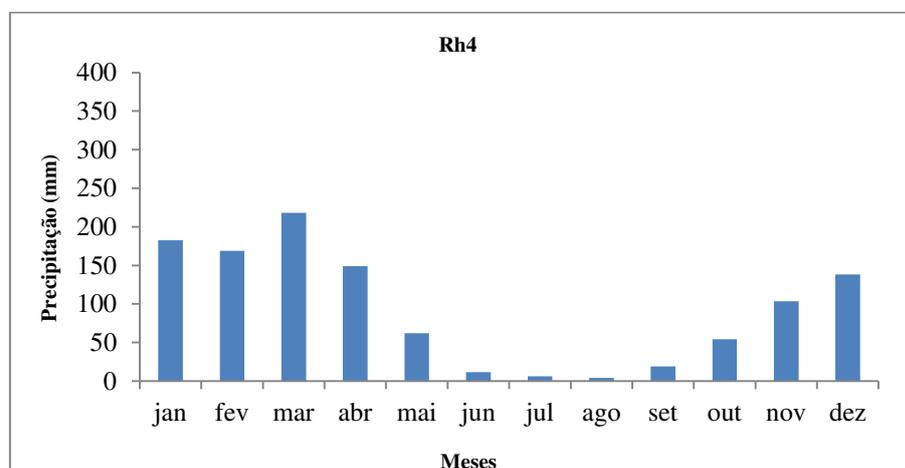


Figura 13.4. Variabilidade média mensal da precipitação para o período de 1987-2013, para as estações da RH4.

Finalmente a RH5 composta por 8 estações, se estende deste a extremidade oeste/sudoeste até o sul do Estado com totais médios anuais de precipitação entre 1300 a 1500 mm. Nessa região ocorrem chuvas elevadas de novembro a abril, e são influenciadas pela associação das ZCAS e Frentes justificando as chuvas no período de novembro e dezembro; em janeiro e fevereiro a precipitação na região está associada aos VCAN; Outro fator contribuinte para a formação de chuvas na região de janeiro a abril é o deslocamento mais para o sul da ZCIT (UVO, 1989) (Figura 13.5).

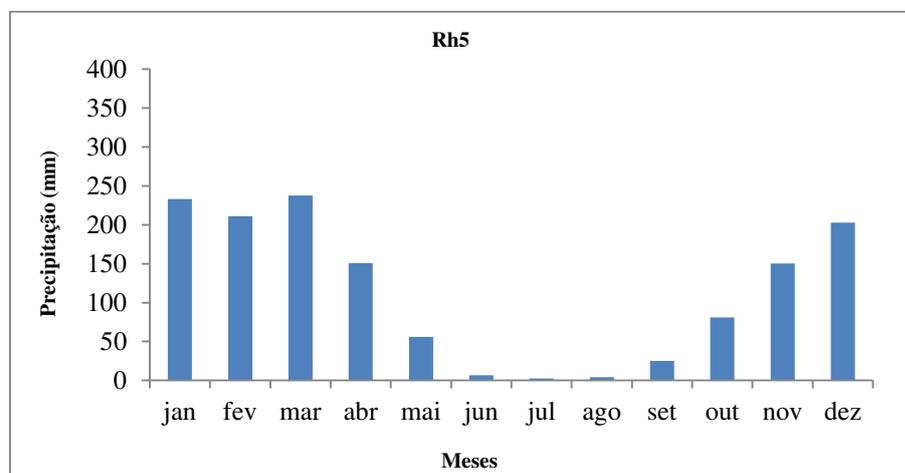


Figura 13.5. Variabilidade média mensal da precipitação para o período de 1987-2013, para as estações da RH5.

Para cada RH da precipitação foram caracterizados os períodos secos e chuvosos, a partir dos fatores comuns temporais e espaciais, e a possível relação entre os meses secos e chuvosos com os sistemas meteorológicos atuantes na região. Dessa forma percebeu-se que as regiões mais secas se localizam no sul e as mais chuvosas no norte do Estado do Maranhão. Os resultados encontrados corroboram com os resultados obtidos por Nascimento, (2014), e em linhas gerais estão em conformidade com a configuração espacial da precipitação para a América do Sul proposta por Reboita et al. (2010).

### 5.3 Análise espectral da precipitação no Estado do Maranhão

Na segunda etapa do estudo foram analisados e discutidos os resultados obtidos da aplicação da TO a séries temporais mensais da precipitação nas regiões homogêneas determinadas através da análise de agrupamento dos principais fatores comuns espacial e temporal da precipitação. Foi aplicada a TO para as médias mensais de cada RH, porém percebe-se que a interações entre as escalas foram suavizadas (Apêndice). Sendo assim, em cada uma das 5 RH, selecionou-se 1 localidade para representá-las, que apresentasse um maior período de dados em comum, pois com uma série de dados maior é possível verificar a atuação de diferentes sistemas atmosféricos ao longo do tempo, que não seriam vistos na figura da TO com uma série de tempo menor. A metodologia utilizada teve como base os trabalhos de Torrence & Compo, (1998); Morettin (1999); Vitorino et al. (2006); Braga et al. (2014), dentre outros. Este estudo possibilitou detectar informações importantes em diferentes escalas de tempo no regime de chuvas no Estado do Maranhão.

A aplicação da TO para a localidade de Monção (Alto Turi) pertencente a RH1 (noroeste do Estado), mostra que a escala dominante é a anual e as intensidades máximas de energia no EPO da precipitação se verificam nos anos de 1974 a 1977, 1985/1986 e 2007 (Figura 14b). Além da escala anual existem relações com as escalas menores associadas aos picos de precipitação superiores a 500 mm nos anos de 1985/1986 e 700 mm em 2007 (Figura 14a). Alguns picos de menores significância são vistos na escalas de tempo de 2 e 4 anos nas décadas de 1980 e 2000.

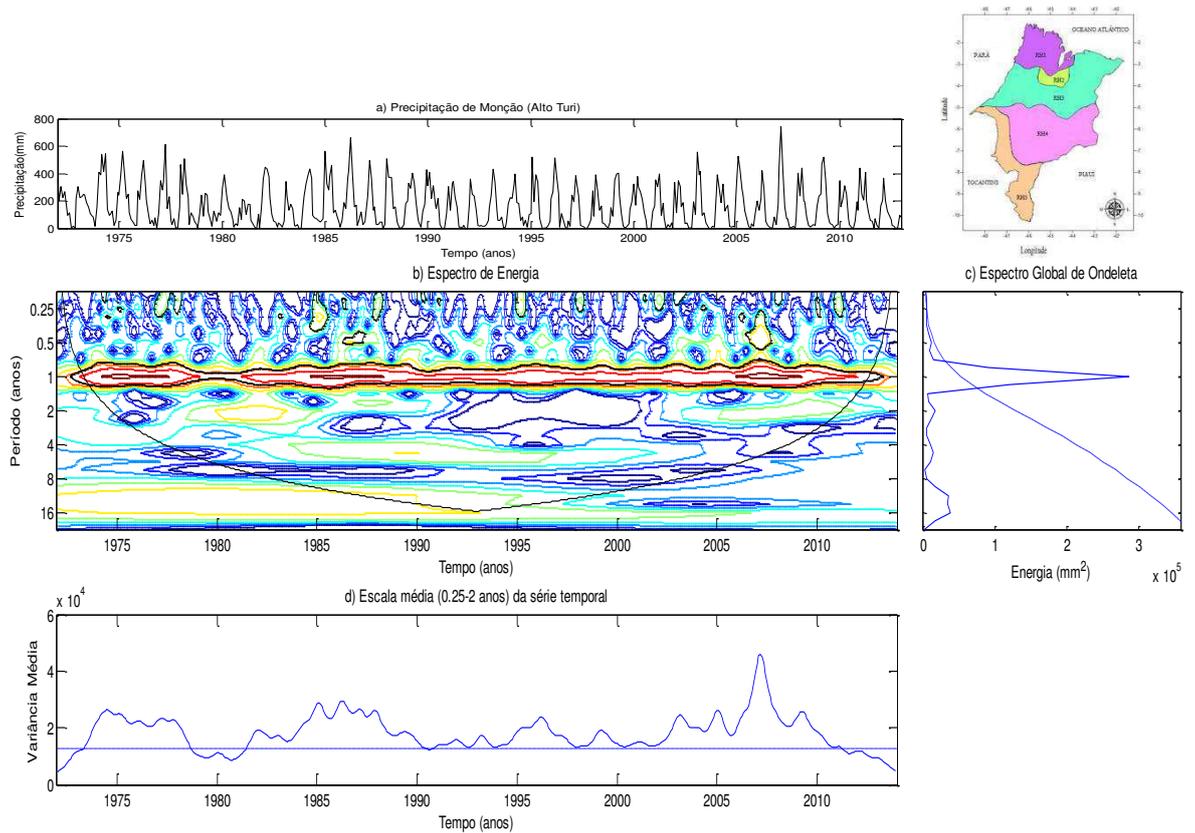


Figura 14. a) Série temporal de precipitação mensal; b) Escalograma de energia de ondeletas; c) Espectro global para Monção (RH1) e d) Média por escalas das potências ou variância da ondeleta.

Para a RH2 Figura 15, analisou-se a localidade de Cantanhede. Observa-se que a escala dominante é a anual com intensidades máximas de energia da precipitação no EPO nos anos de 1973/1974, 1984 a 1986, 1988, 1991, 1998, 2004, 2008 e 2009. Nestes anos, existe uma intensa energia associada à escala anual, com pouquíssimas interações com as escalas intrasazonal e semianual (Figura 15b). Nos anos de 1973/1974, 1984/1985 e 2008 os máximos de precipitação coincidem com anos de La Niña. Nota-se ainda, oscilações nas escalas de 4 e 8 entre 1988 a 1992. Na Figura 15d, correspondente a média por escalas de potências ou variâncias de 0,25-2 anos (MEPO), alguns máximos são detectados e estão associados a maior variância dos dados nesta escala de tempo, alguns desses picos coincidem com o aumento das chuvas na região Nordeste nos anos que ocorreram eventos de “La Niña” (Tabela 1). Essas duas regiões RH1 e RH2 situada ao norte do Estado apresentam regime pluviométrico semelhantes, embora o período chuvoso da RH1 seja mais longo, conforme já comentado na seção 5.2.

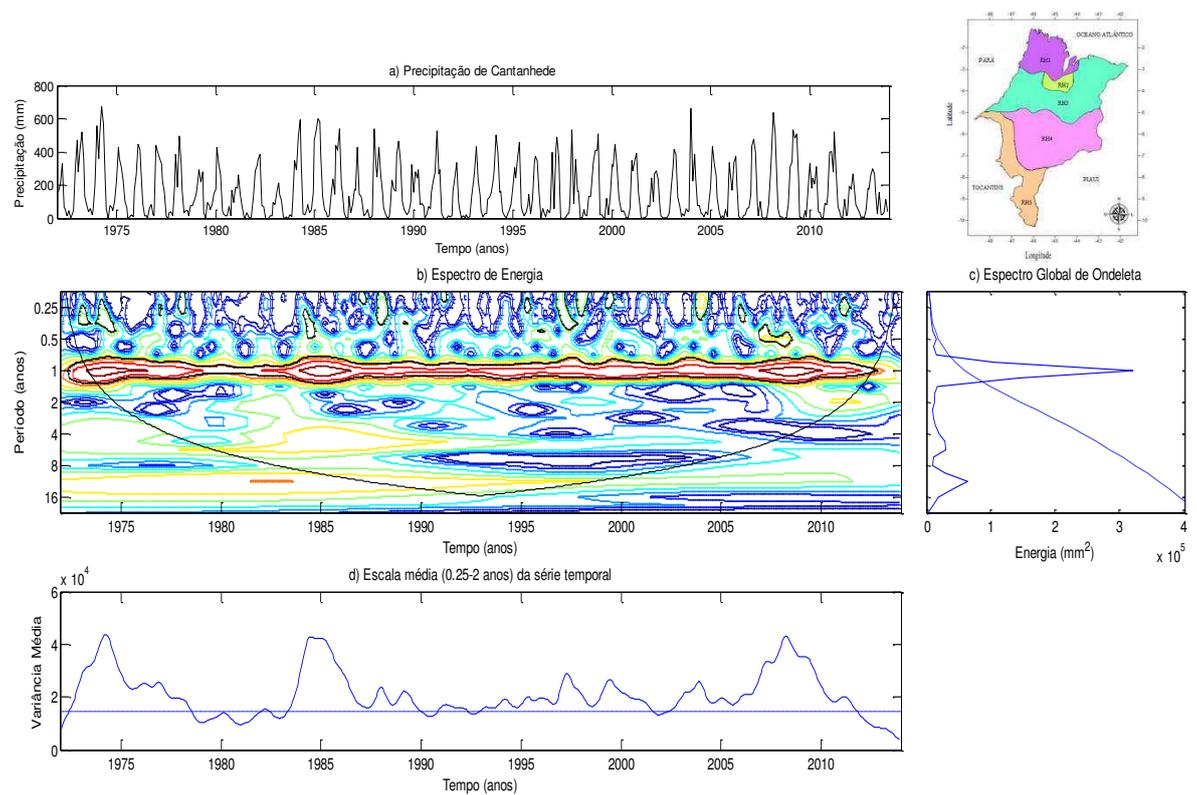


Figura 15. a) Série temporal de precipitação mensal; b) Escalograma de energia de ondeletas; c) Espectro global para Cantanhede (RH2) e d) Média por escalas das potências ou variância da ondeleta.

Na RH3 selecionou-se a localidade de Codó, observa-se que no EPO e EGO a escala anual é marcante, com maiores intensidade de energia nos anos 1984 a 1988, 1995, 1999 a 2001, 2003/2004 e 2008/2009 (Figura 16a). Na maior parte desses anos, houve interações de forma bem sutis com as escalas semianual na década de 1980 (Figura 16b), com altura pluviométrica da ordem de 500 mm. Pelo escalograma fica evidenciado núcleos de energia pouco significativos, nas escalas de tempo de dois a quatro anos.

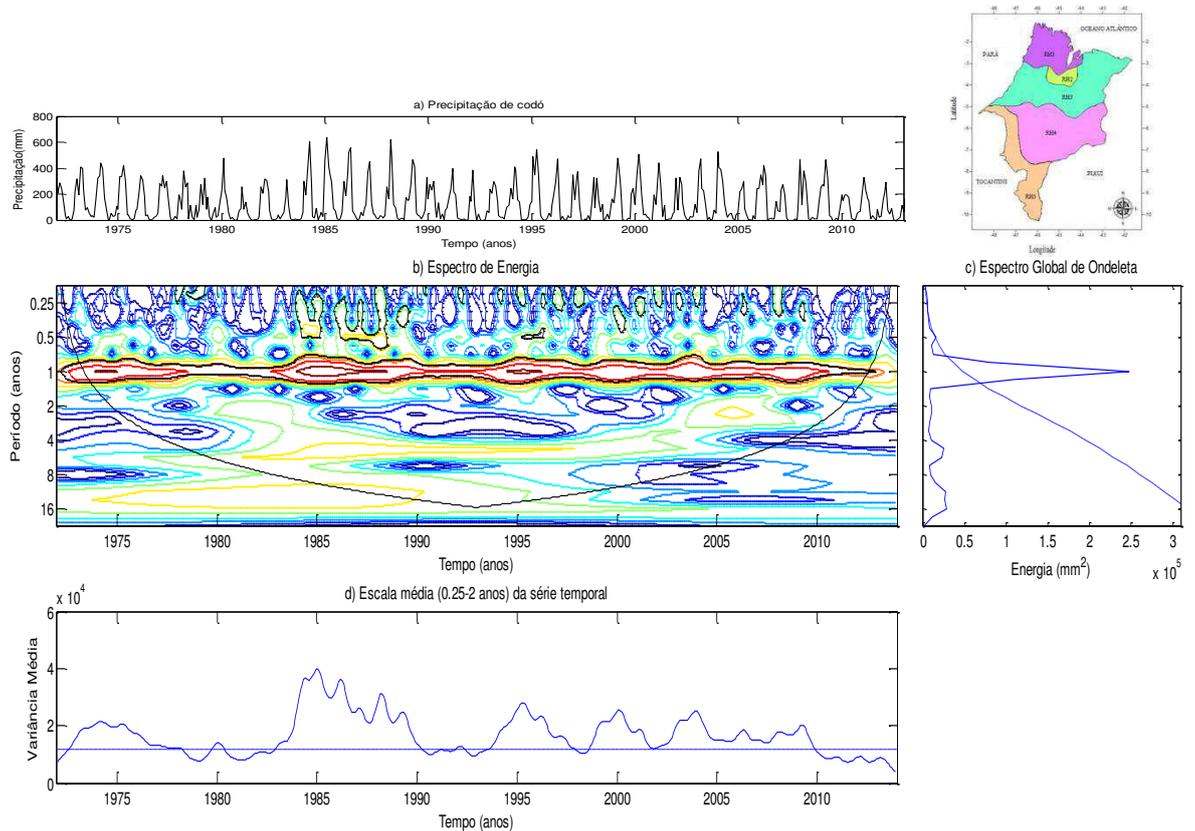


Figura 16. a) Série temporal de precipitação mensal; b) Escalograma de energia de ondeletas; c) Espectro global, para a cidade de Codó (RH3); d) Média por escalas das potências ou variância da ondeleta.

Para a RH4 é analisado a localidade de Buriti Bravo (Figura 17). A configuração da EPO, EPG evidencia o domínio da escala anual, com precipitações mensais acima 500 mm registradas nos anos de 1984/86, 1989, 1997 e 2004, anos de ocorrência de La Niña e de anos de eventos de transição entre El Niño e La Niña (ARAGÃO, 1998). Existe uma interação forte na escala de 4 anos em 1984/1986, isso pode também ser visto no MEPO na escala de 0,25-2 anos. A série temporal mostra que o regime de chuva na região é diferenciado das regiões mais ao norte, com período de ocorrência de novembro a maio. A região é influenciada por diversos sistemas meteorológicos tais como,VCAN, ZCAS e ZCIT (NASCIMENTO, 2014).

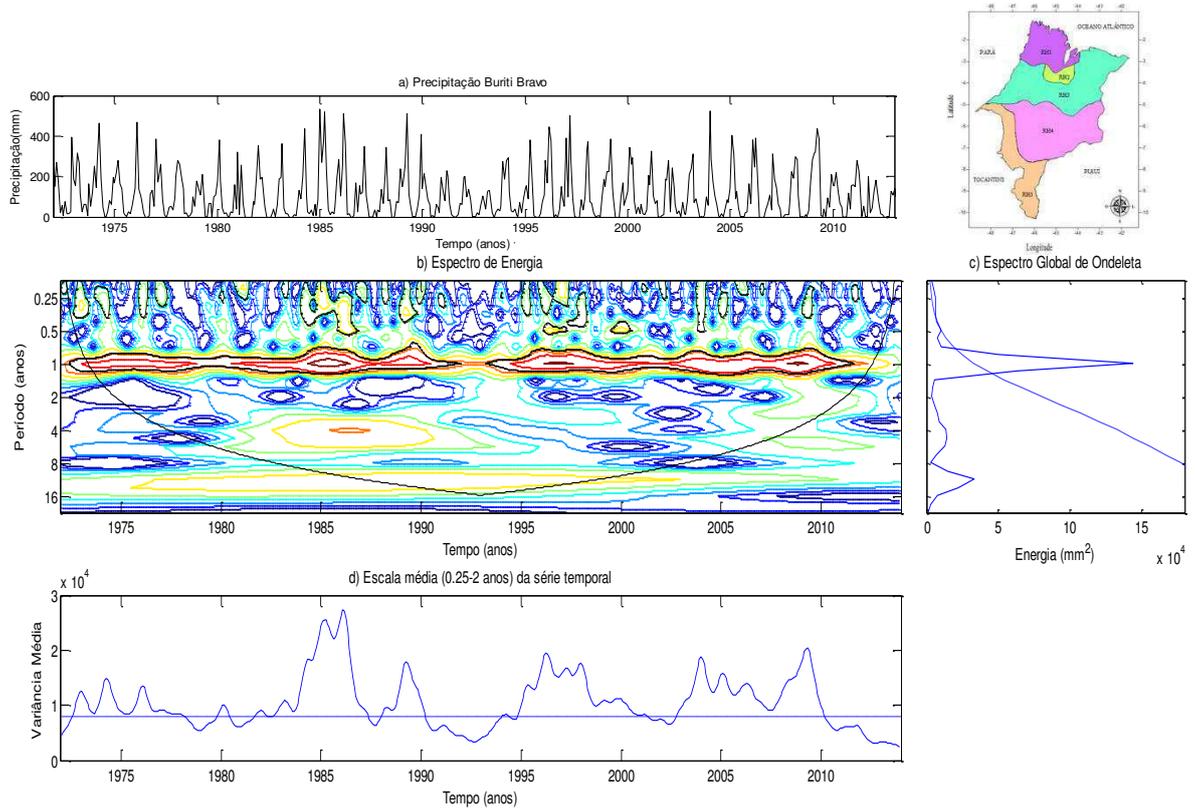


Figura 17. a) Série temporal normalizada de precipitação, b) Espectro de potência de ondeletas, c) Espectro global para Buriti Bravo (RH4), d) Média por escalas das potências ou variância da ondeleta.

A Figura 18 a, b e d, ilustram EPO EGO e MPO para localidade de Carolina da RH5. Observa-se também que a escala dominante é anual, com picos de máximas precipitações nos anos 1973, 1982/83, 1985/87, anos de El Niño, evidenciando que a chuva na região para estes anos não foram influenciadas pelo evento. A série temporal da precipitação apontam máximos nos anos 1973, 1982, 1987, 2004 e 2005 (Figura 18a). O EPO como nas demais regiões enfatiza o domínio do ciclo anual e algumas poucas interações de pouca significância entre 4-8 anos. Conforme estudos realizados para o Maranhão, a região do sul e sudoeste apresentam características amazônicas com chuvas mais intensas de novembro a abril e estão associadas aos VCAN, ZCAS e Frentes (KOUSK, 1988; NASCIMENTO, 2014).

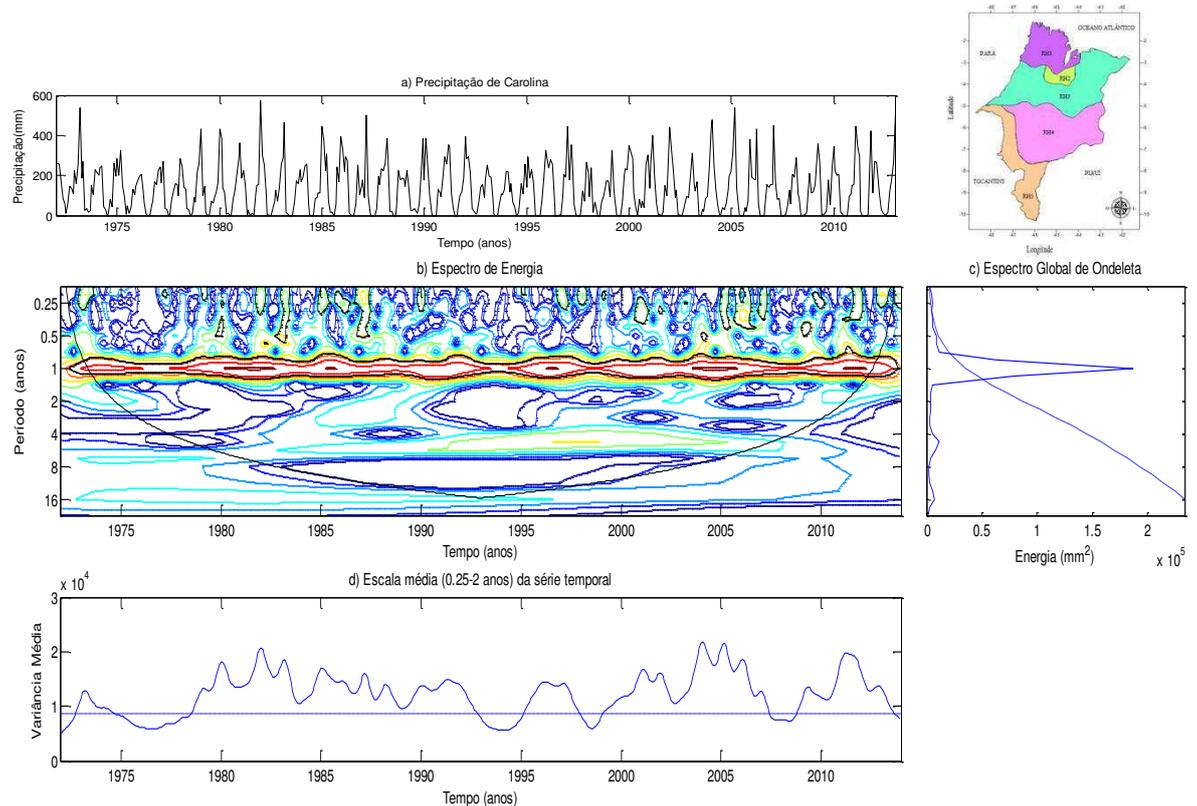


Figura 18. a) Série temporal de precipitação, b) Escalograma de energia de ondeletas, c) Espectro global, para Carolina (RH5), d) Média por escalas das potências ou variância da ondeleta.

A aplicação da TO as séries climatológicas de cada RH da precipitação no Maranhão permitiu decompor nas diferentes escalas tempo, anos que ocorreram chuvas intensas nas regiões e mostrar as escalas de tempo dominantes e suas interações com as escalas menores, a decomposição é realizada não somente na frequência (escala), mas também no tempo.

#### 5.4 Análise Espectral da TSM

Finalmente aplicou-se TO para as áreas de TSM do Pacífico Equatorial, Niño1+2, Niño 3, Niño 3.4 e Niño 4 com o propósito de verificar se existia alguma conexão com as regiões homogêneas da precipitação no Estado.

Na Figura 19 constam a variabilidade média da TSM para as 4 áreas do Pacífico Equatorial. As temperaturas médias na região do Niño 1+2 são menores do que as áreas mais a oeste do Pacífico Equatorial onde as águas superficiais são mais aquecidas, devido a formação do ramo ascendente da Célula de Walker que ocorre sobre o Pacífico Oeste-Equatorial.

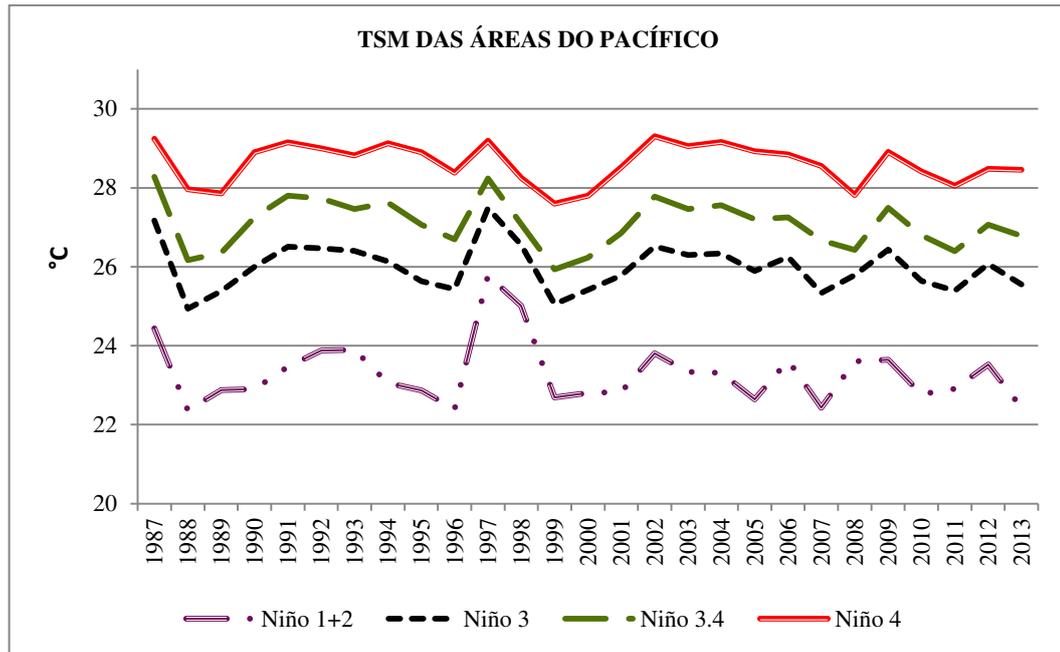


Figura 19. Variabilidade mensal da TSM nas regiões do Niño1+2, Niño 3, Niño 3.4 e Niño 4 no período de 1987 a 2013.

Para a área Niño 1+2 (Figura 20) observa-se que a maior variabilidade é a anual, conforme indicado no EPO e espectro global. Além desse pico anual no EGO mostra forte intensidade na escala de quatro anos, sobretudo de 1980 a 2000, modulando principalmente os anos de El Niño/La Niña. Pelas configurações da energia de ondeleta na escala de 4 anos se observa que os anos de 1992, 1997/98, obtiveram valores mais elevados da TSM (evento forte de El Niño) (Tabela 1).

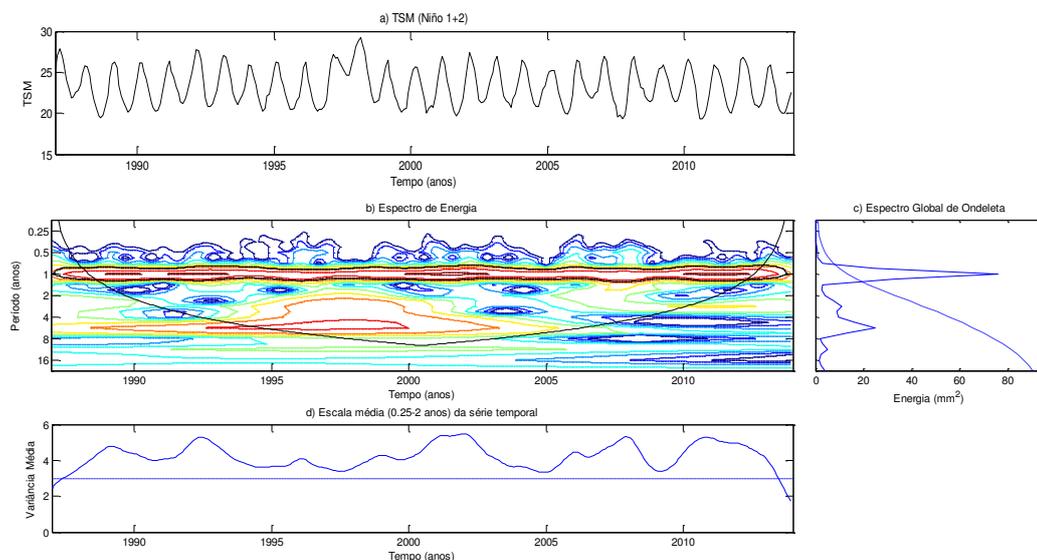


Figura 20. a) Série temporal de TSM; b) Escalograma de energia de ondeletas; c) Espectro

global para a área do Pacífico Niño 1+2; d) Média por escalas das potências ou variância da ondeleta.

Os resultados obtidos para a região do Niño 3 (Figura 21) apresenta configuração energética diferente, pois observa-se no EPO e EGO que a escala anual é menos intensa que a da área Niño 1+2 do Pacífico, porém, as escalas de quatro e dois anos são bastante caóticas. Destacam-se os anos de 1987/88, 1997/98 pela interação entre escalas de quatro e dois anos e a anual, com máximo de temperaturas nos referidos anos conforme a série temporal da TSM. Nas figuras 21.b e 21.c observa-se um forte pico na escala de oito anos. Embora, não seja estatisticamente significativa, a escala de quatro anos é evidenciada cobrindo uma área maior no oceano que a região do Niño 1+2. Isso confirma os resultados obtidos por Cerqueira, (2010) em seus estudos realizados para o Estado da Paraíba.

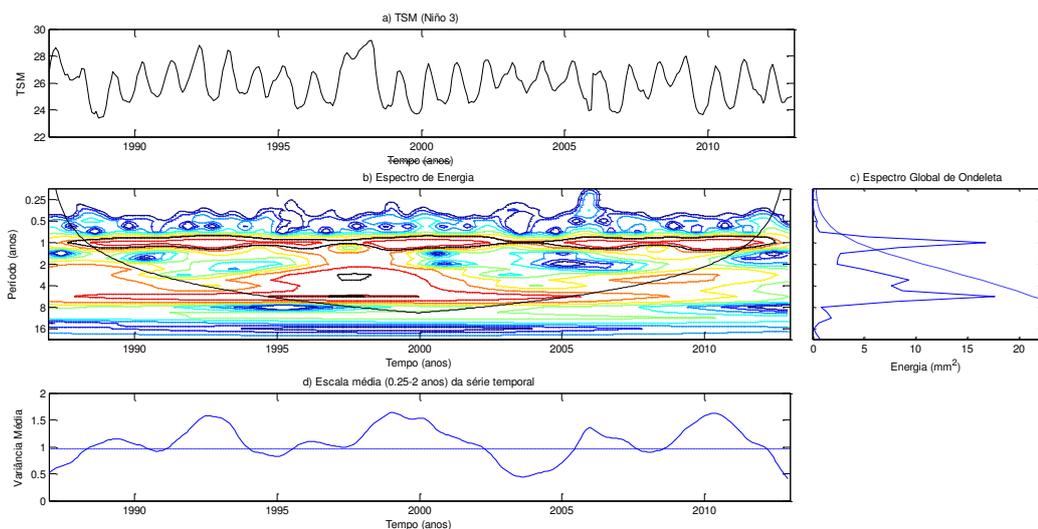


Figura 21. a) Série temporal de TSM; b) Escalograma de energia de ondeletas; c) Espectro global para a área do Pacífico Niño 3; d) Média por escalas das potências ou variância da ondeleta.

Na região do Niño 3.4 do Pacífico (Figura 22), a periodicidade anual não é bem definida conforme EPO e EGO. No escalograma é bem fortalecida a escala de quatro anos que interage com as escalas bianual e anual na década de 1990 e 2000 modulada pela escala de quatro anos. A escala anual, por sua vez, apresenta-se com um pico bem moderado e contornos espectrais bem menos intensos, especialmente quando comparados às das outras escalas já discutidas. Os resultados do Niño 3.4, são semelhantes aos encontrados para o Niño

4, no entanto, percebe-se que a escala em torno de 4 e 8 anos (maior pico) se destaca com contornos espectrais mais intensos.

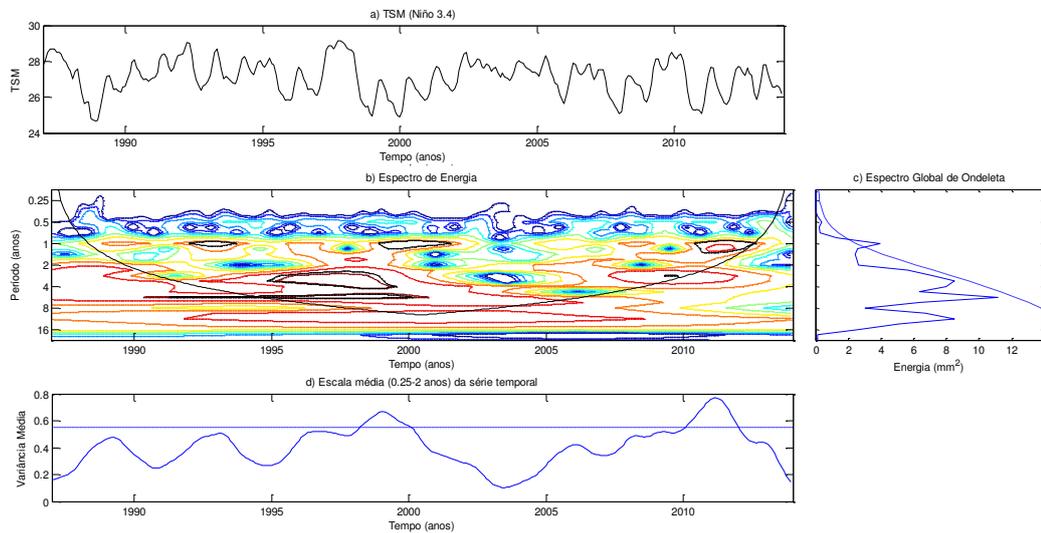


Figura 22. a) Série temporal de TSM; b) Escalograma de energia de ondeletas; c) Espectro global para a área do Pacífico Niño 3.4; d) Média por escalas das potências ou variância da ondeleta.

Na região do Niño 4 a escala anual enfraquece e quase não existe, isso pode ser explicado pela baixa variabilidade da TSM anual nesta região, ou seja, a variação térmica ao longo do ano é quase constante. O enfraquecimento da escala anual pode estar associado a baixa variabilidade anual da TSM que enfraquece o sinal na direção oeste do Pacífico equatorial.

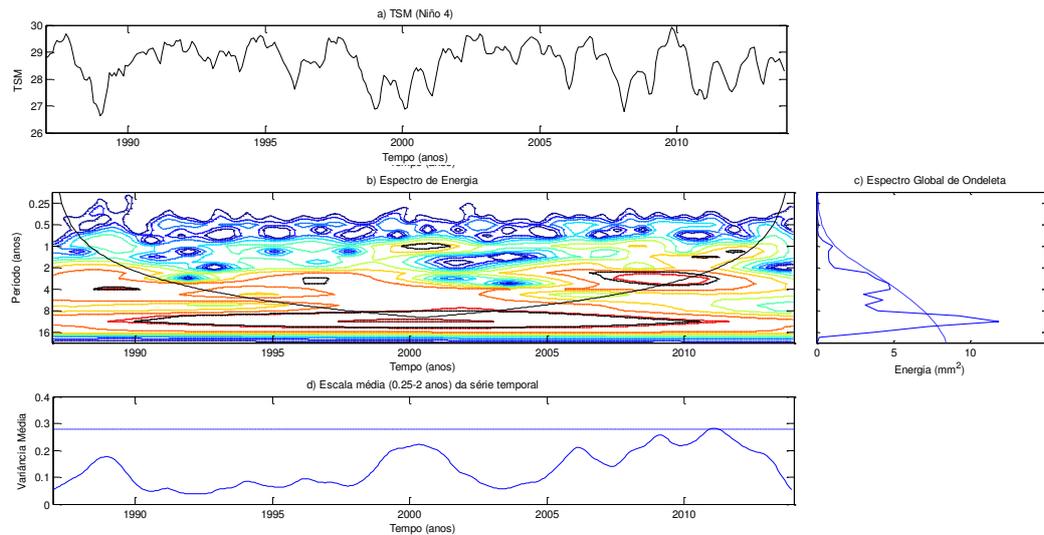


Figura 23. a) Série temporal de TSM; b) Escalograma de energia de ondeletas; c) Espectro global para a área do Pacífico Niño 4; d) Média por escalas das potências ou variância da ondeleta.

A presença da escala decadal é mais fortalecida e interage com a escala de 4 anos, isso indica que na área Niño 4, as oscilações no Pacífico são comuns. Os resultados do Niño 4, são semelhantes aos encontrados para o Niño 3.4, no entanto, percebe-se que a escala em torno de 4 a 8 anos (maior pico) se destaca com contornos espectrais mais intensos entre a década de 1990. Em 2000 e de 2006 a 2013 interagem as escalas de quatro e dois anos e a escala anual. Para as áreas dos Niños 3.4 e 4 mostram um enfraquecimento da energia na escala anual à medida que se desloca para a região oeste do Pacífico.

### 5.5 Relação entre TSM e Chuva

Análise conjunta entre a PRP e TSM das áreas no Niño 1+2, 3, 3.4 e 4 e as possíveis relações existentes entre elas no Estado do Maranhão, são mostradas a seguir.

A Figura 24 apresenta a variabilidade dos totais anuais da PRP da RH1 e a média anual da TSM. Percebe-se que elas têm coerência temporal visível, pois quando a TSM aumenta há diminuição da precipitação em alguns anos, como nos anos de 1992 e 1997 que com as temperaturas mais elevadas do Pacífico Equatorial levaram a redução dos totais anuais da chuva (<1700 mm). Observa-se nos anos de 1988/89 e 2008/09 uma clara oposição entre os sinais das séries de PRP da RH1 e os Niños (Figura 24) com chuvas acima de 2000 mm. Os dados históricos mostram que 1988/89 e 2008/09 foram anos de La Niña contribuindo com

o aumento das chuvas na região, enquanto que os anos de 1992 e 1997 foram registrados eventos fortes de El Niño (Tabela 1). A análise de ondeletas nessa região identificou que existe uma interação com as escalas bianual, anual e semianual para esse período, estas interações estão associadas aos picos de maiores precipitação.

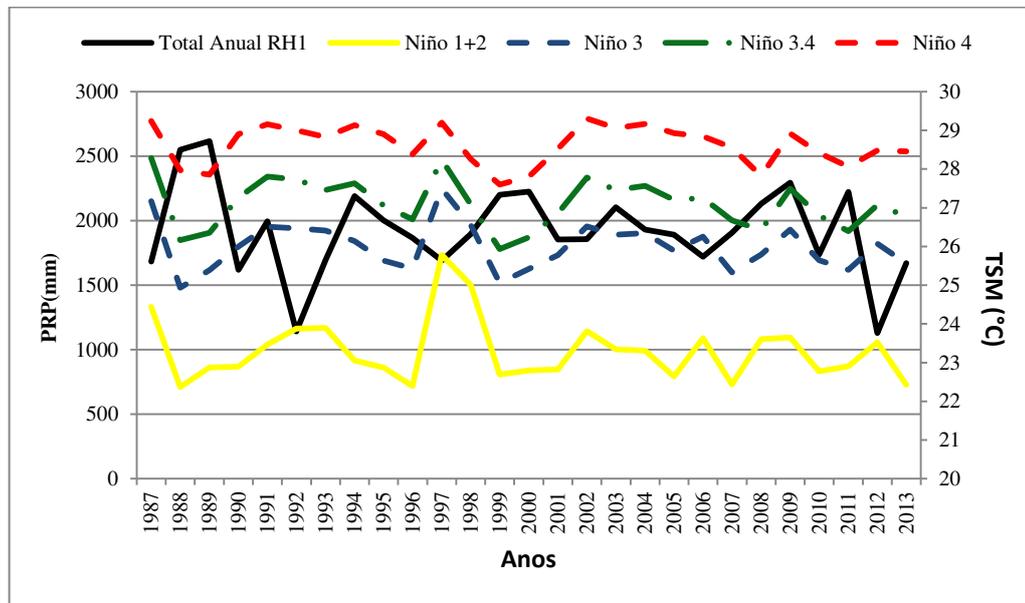


Figura 24. Variabilidade temporal das TSM nas regiões do Niño e PRP da RH1.

Para a região RH1, correspondente à parte Norte do Estado, a precipitação desta região foi a mais influenciada pelas variações de TSM, com os maiores valores de correlações no período estudado. As maiores correlações observadas ocorreram com as regiões do Niño 3 e 3.4, sendo que a maior correlação ocorreu com a TSM do mês de abril e a precipitação de abril (-0,72). Grande parte das chuvas da parte Norte do Estado se deve a presença da ZCIT que tem sua posição modulada pela TSM no Oceano Pacífico Equatorial e Atlântico Tropical (HASTENRATH, 1990).

Tabela 3. Coeficiente de correlação linear entre a TSM nas áreas dos Niños e a PRP do grupo RH1.

RH1	Niño 1+2	Niño 3	Niño 3.4	Niño 4
PRP/TSM	Mar	Abr	Abr	Abr
Abr	-0,55**	<b>-0,72**</b>	-0,63**	
Set				-0,55**

\*\* 99% de significância estatística, \* 95% de significância estatística.

A variabilidade dos totais anuais da PRP da RH2 mostra a relação com a TSM do Niño 1+2, Niño 3, Niño 3.4 e Niño 4 como pode ser visto na Figura 25. Observa-se que com as temperaturas elevadas nas regiões do Pacífico Equatorial sempre ocorre queda da chuva anual na região. Como por exemplo nos anos de 1997/98 a oposição entre os sinais das séries de PRP da RH2 e os Niños (Figura 25), levaram a redução dos totais anuais da chuva (<1700 mm). Enquanto que no ano de 2009 não há oposição entre os sinais das séries estudadas e levaram a um aumento nos totais anuais da chuva. Estes anos coincidem com o evento El Niño e La Niña, respectivamente (Tabela 1).

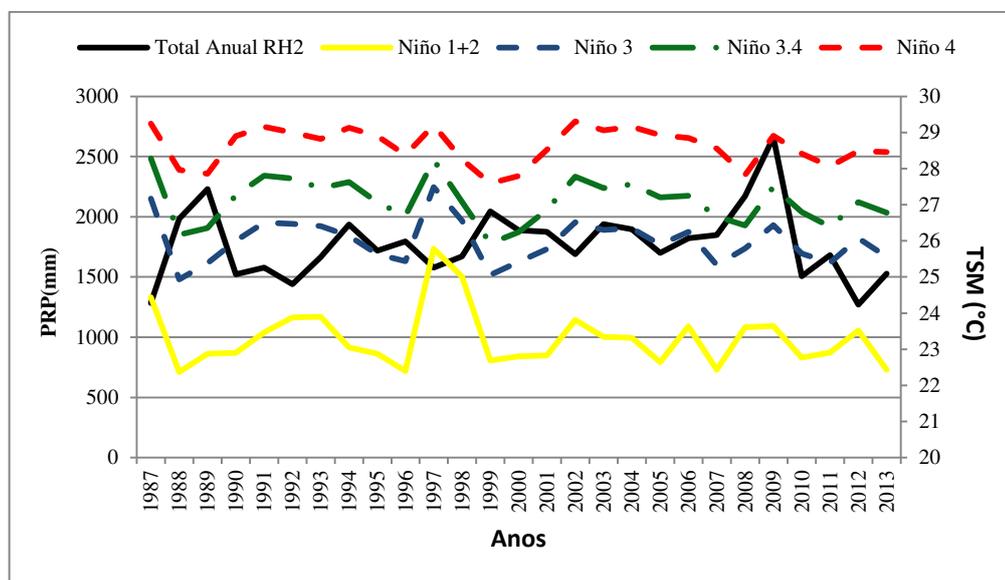


Figura 25. Variabilidade temporal das TSM nas regiões do Niño e PRP da RH2.

A RH2 também localizada na parte Norte do Estado, obteve correlações estatisticamente significativas  $\alpha = 0,01$  em alguns meses, sendo que as maiores correlações  $r = 0,65$  e  $r = 0,61$  ocorreram entre a TSM de março com a PRP de abril na região do Niño 3 e TSM de abril com PRP de abril no Niño 3.4, respectivamente. Na primeira área há defasagem de um mês e na segunda verificou-se no mesmo mês. Com isso, pode-se concluir que o aumento da TSM na área do Niño 3 e 3.4 são as que mais contribuem para as chuvas na RH2.

Tabela 4. Coeficiente de correlação linear entre a TSM nas áreas dos Niños e a PRP do grupo RH2.

RH2	Niño 1+2	Niño 3	Niño 3.4	Niño 4
PRPVISM	Abr	Mar	Abri	Fev
Mar				-0,48*
Abri	-0,47*	-0,65**	-0,61**	

\*\* 99% de significância estatística, \* 95% de significância estatística.

A Figura 26 apresenta a variabilidade dos totais anuais da precipitação da RH3 e média anual da TSM. Existe uma relação assimétrica entre os anos de 1997/98, 2000/01 onde ocorreram EN e em seguida LN, respectivamente. Em 1997 e 1998 houve queda acentuada da chuva (<1300 mm), seguida de um aumento (>1600 mm) nos anos de 2000/01, aos quais podem estar relacionados com os eventos de ENOS (Tabela 1). As configurações da energia de ondeleta identificaram um núcleo de energia na escala de 4 anos, nas décadas de 1990 e 2000, e essa escala representa o período de atuação de eventos do ENOS (Figura 17).

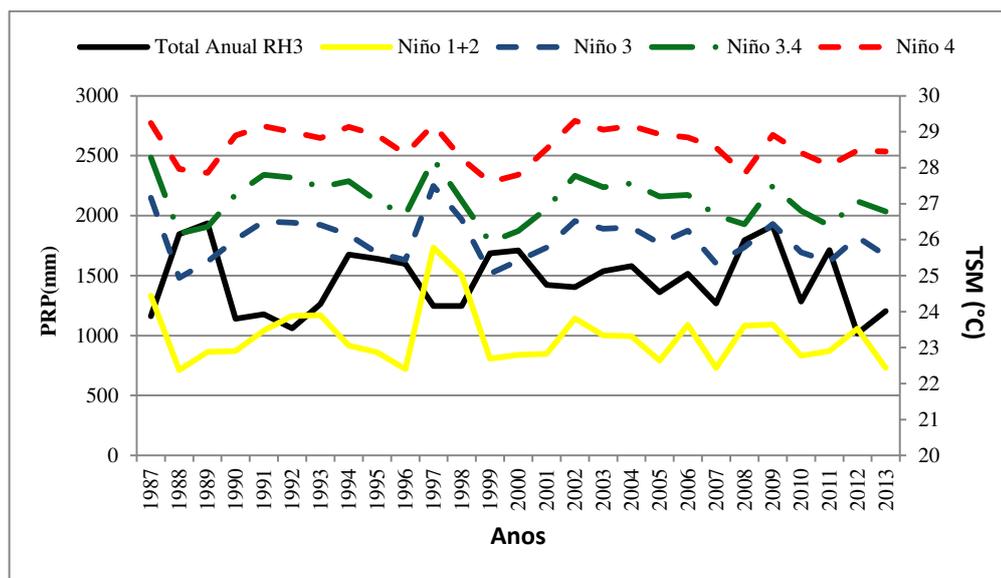


Figura 26. Variabilidade temporal das TSM nas regiões do Niño e PRP da RH3.

A RH3 se estende diagonalmente desde o oeste/noroeste até a região nordeste do Estado, o efeito das variações da TSM do Pacífico Equatorial em relação à precipitação são bem perceptíveis, e principalmente na área dos Niños 3 e 3.4, apresentando as maiores correlações para esta RH, podendo ser destacada a região do Niño 3, onde a TSM de abril tem  $r = -0,69$  com a PRP de abril (tabela 5). Verifica-se que os padrões espaciais de correlação da precipitação com a TSM da região de Niño 3 são bastante parecidos aos padrões da TSM da

região de Niño 3.4. A TSM na região do Niño 3 é a que apresenta maior associação com a PRP no Estado do Maranhão.

Tabela 5. Coeficiente de correlação linear entre a TSM nas áreas dos Niños e a PRP do grupo RH3.

RH3	Niño 1+2	Niño 3	Niño 3.4	Niño 4
PRP\TSM	Mar	Abr	Abr	Fev
Abr	-0,57**	<b>-0,69**</b>	-0,61**	-0,50**

\*\* 99% de significância estatística, \* 95% de significância estatística.

A Figura 27 ilustra a relação entre a PRP da RH4 e a TSM. Especificamente nesse caso essa relação se mostra menos acentuada, uma vez que a análise de ondeleta para Buriti Bravo (Figura 16) mostrou várias interações entre as escalas. Nesta região os índices pluviométricos são os mais baixos em relação as outras regiões, diferindo do regime de chuvas das regiões mais ao norte. Isso pode estar associado a uma série de fatores meteorológicos que podem interferir no regime pluviométrico da região, como a ZCAS e frentes (KOUSK, 1988; NASCIMENTO, 2014).

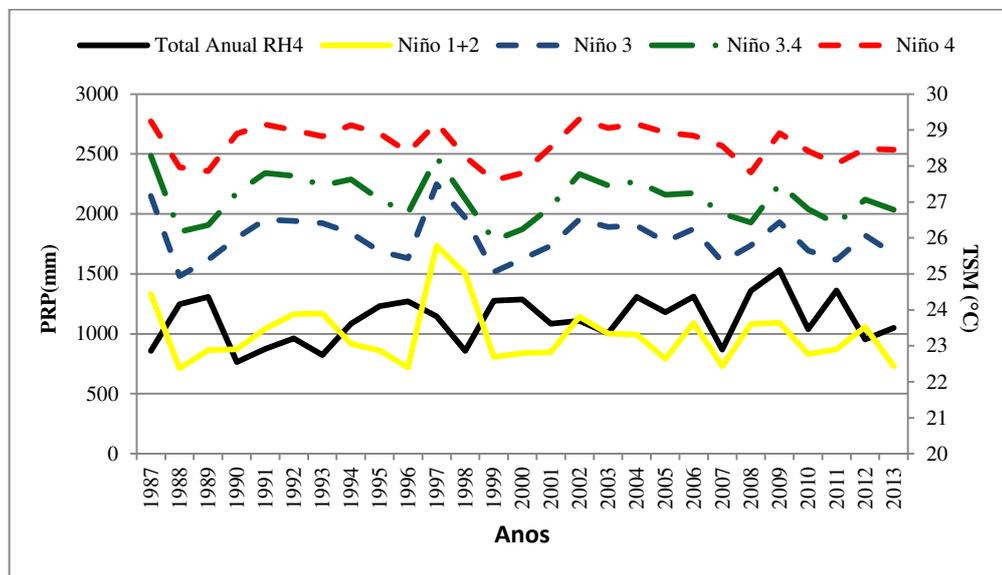


Figura 27. Variabilidade temporal das TSM nas regiões do Niño e PRP da RH4.

Para a região RH4 que se encontra na parte central-sul da região. A maior correlação de  $r = 0,53$  entre a TSM e PRP também se observa na área do Niño 3, no mês março e abril respectivamente.

Tabela 6. Coeficiente de correlação linear entre a TSM nas áreas dos Niños e a PRP do grupo RH4.

RH4	Niño 1+2	Niño 3	Niño 3.4	Niño 4
PRP/TSM	Mar	Mar	Ago	Fev
Mar				-0,39
Abr	-0,47*	-0,53**		
Nov			-0,47*	

\*\* 99% de significância estatística, \* 95% de significância estatística.

A variabilidade entre a TSM e PRP na RH5 consta na Figura 28. A RH5 é um caso muito singular, visto que a assimetria entre os sinais das séries ocorrem em fases opostas apenas em alguns anos (1989, 1997/99, 2000 e 2004) na análise de ondeleta praticamente não existe núcleos de energia atuando na escala de 4 anos. Como já discutido anteriormente a região do sul e sudoeste do Maranhão apresentam características amazônica com chuvas mais intensas de novembro a abril e estão associadas aos VCANS, ZCAS e SF (KOUSK, 1988; NASCIMENTO, 2014).

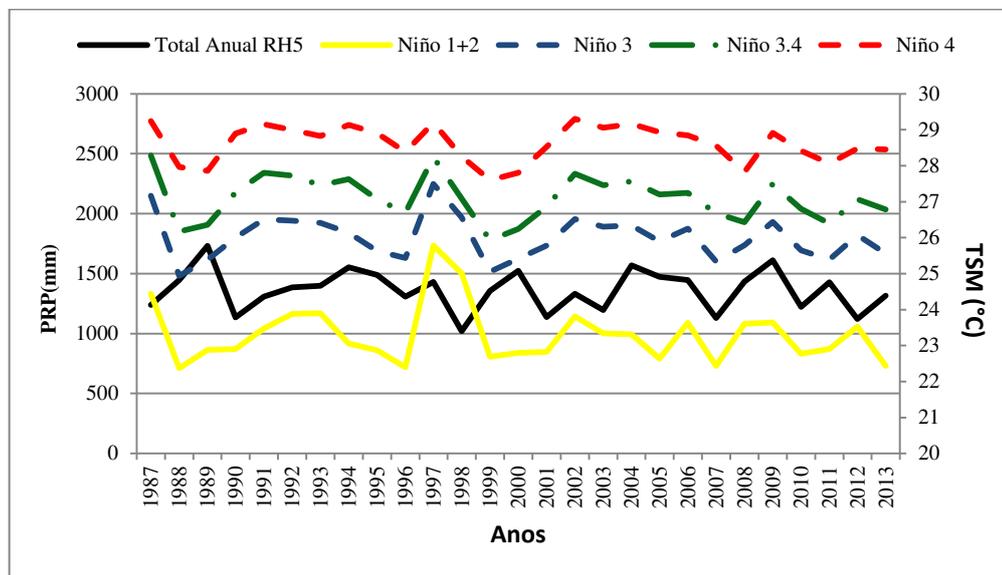


Figura 28. Variabilidade temporal das TSM nas regiões do Niño e PRP da RH5.

Para a RH5 localizada na parte sul do Estado a maior correlação entre TSM e PRP foi de  $r = 0,52$  para o nível de significância  $\alpha = 0,01$  na área do Pacífico Niño 1+2, ocorreu entre

a TSM de março e a PRP de abril (Tabela 7). Essa foi à única RH que apresentou correlação mais elevada na área do Niño 1+2.

Tabela 7. Coeficiente de correlação linear entre a TSM nas áreas dos Niños e a PRP do grupo RH5.

<b>RH5</b>	<b>Niño 1+2</b>	<b>Niño 3</b>	<b>Niño 3.4</b>	<b>Niño 4</b>
<b>PRP\TSM</b>	<b>Mar</b>	<b>Mar</b>	<b>Fev</b>	<b>Abr</b>
<b>Abr</b>	<b>-0,52**</b>	-0,49*	-0,37	
<b>Jul</b>				-0,47*

\*\* 99% de significância estatística, \* 95% de significância estatística.

Em síntese a aplicação da análise de correlação entre a TSM das áreas do Niño 1+2, 3, 3.4 e 4 mostrou que as chuvas nas regiões Norte e Nordeste do Estado do Maranhão tem uma grande dependência das condições das TSM do Oceano Pacífico Equatorial, já nas áreas noroeste e centro-sul essa dependência não se dá de forma tão marcante quando comparada com a parte mais ao norte.

## 6 - CONCLUSÕES

A aplicação da Transformada de ondeletas as séries de precipitação em regiões homogêneas, no Estado do Maranhão e nas áreas de TSM do Pacífico Equatorial possibilitou chegar as seguintes conclusões:

A aplicação da TO na PRP ressalta que o espectro global de energia da ondeleta é mais marcante no ciclo anual para todas as estações representativas das regiões homogêneas estudadas, além da escala anual, podem-se observar interações complexas de oscilações em diferentes escalas de tempo e mostrar que a construção das séries faz parte de interações complexas de ondulações em diferentes escalas. Assim como, destacou nas diferentes escalas tempo, anos que ocorreram chuvas intensas nas regiões, possibilitando relacioná-los com os sistemas atmosféricos que atuam na produção das chuvas no Estado.

A análise da TO aplicada a TSM do Pacífico Equatorial apresenta a escala anual mais intensa na parte leste do oceano, decrescendo no sentido leste-oeste, onde a escala decadal se torna mais acentuada.

A análise da correlação mostrou que existe uma significativa associação entre o padrão de chuvas em cada RH no Maranhão e a TSM do oceano Pacífico Equatorial, possibilitando verificar como a chuva em cada RH segue as variações de TSM. A região homogênea RH5 é melhor correlacionada com a TSM da região do Niño 1+2, enquanto que as RH1, RH2, RH3 e RH4, têm boas correlações com as áreas do Niño 3 e Niño 3.4. Grande parte das chuvas da parte Norte do Estado se deve a presença da ZCIT que tem sua posição modulada pela TSM no Oceano Pacífico Equatorial e pelos Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis. Na parte Sul, o Estado sofre a influência da Zona de Convergência do Atlântico Sul e das Frentes Frias.

## 7 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDREOLI, R.V.; KAYANO, M.T.; GUEDES, R.L.; OYAMA, M.D.; ALVES, M.A.S. A influência da temperatura da superfície do mar dos oceanos Pacífico e Atlântico na variabilidade de precipitação em Fortaleza. **Revista Brasileira Meteorologia**, v.19, n.3, p.337-344, 2004.

ANDREOLI, R. V.; KAYANO, M. T. Tropical Pacific and South Atlantic effects on rainfall variability over Northeast Brazil. **International Journal of Climatology**, v. 26, p. 1895-1912, 2006.

ARAGÃO, J.O.R. **Um estudo das estruturas das perturbações sinóticas do Nordeste do Brasil**.(INPE-789-TPT/017). Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 1975.

ARAGÃO, J. O. R. O impacto do ENSO e do dipolo do Atlântico no nordeste do Brasil. **Bulletin Institut Français Études Andines**, v.27 n.3, p.839-844, 1998.

ARAÚJO, S. M. B. **Estudo da variabilidade climática em regiões homogêneas de temperaturas médias no Rio Grande do Sul**. Pelotas: UFPel, 2005. 54f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Curso de Pós-Graduação em meteorologia, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2005.

ATLAS DO ESTADO DO MARANHÃO. São Luís-MA. 1984, 2002.

ASSIS, F. N.; ARRUDA, H. V. de; PEREIRA, A. R. **Aplicações de estatística à Climatologia: Teoria e prática**. Pelotas: Ed. Universitária, 1996. 161 f.

AMANAJÁS, J. C.; BRAGA, C. C. Padrões espaço-temporal Pluviométricos na Amazônia Oriental utilizando Análise Multivariada. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.27, p. 323 – 338, 2012.

BARROS, S. S. **Precipitação no Centro de Lançamento de Alcântara: aspectos observacionais e de modelagem**. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos-SP, 112p. 2008.

BARROS, S. S.; OYAMA, M. D. Sistemas Meteorológicos Associados à Ocorrência de Precipitação no Centro de Lançamento de Alcântara. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 25, p. 333-344, 2010.

BOLZAN. M. J. A. Transformada em ondeleta: Uma necessidade. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 28, n. 4, 563-567, 2006. 101.

BOUROCHE, J. M.; SAPORTA, G. **Análise de Dados**. Rio de Janeiro, Zahar. 117p. 1982.

BUENO, R. F.; BLITZKOW, D.; FONSECA JUNIOR, E. S.; PACILÉO NETTO, N; BARBOSA, A. C. B. **Aplicação da Transformada de Fourier e em Ondaleta às séries temporais de diferenças de altitude, determinadas por GPS, acoplado a Shaker na base USP**. Bol, Ciênc. Geod., sec. Artigos, Curitiba, v. 14, n. 4, p. 557-570, 2008.

BRAGA, C. C.; AMANAJÁS, J. C.; CERQUEIRA, H. D. V.; VITORINO, M. I. The Role of the Tropical and Pacific Oceans SST in Modulating the Rainfall of Paraíba State, Brazil. **Brazilian Journal of Geophysics**, v. 32, p. 97, n. 1, 2014.

CARVALHO, L.; JONES, C.; LIEBMAN, B. The South Atlantic Convergence Zone: intensity, form, persistence, and relationship with intraseasonal to interannual Activity and Extreme Rainfall. **Journal of Climate**, v.17, p. 88-108, 2004.

CASTRO, A. C. **Padrões de variabilidade intrasazonal sobre a cidade de São Paulo e Oceano Atlântico Sul adjacente utilizando a análise de ondaleta, no período de 1982 a 2005**. Dissertação de Mestrado. USP. Novembro, 2007.

CEBALLOS, J. C.; BRAGA, C. C. Missing Data Assessment in a Solarimetric Network. **International Journal of Climatology**, v.15, p.325-340, 1995.

CERQUEIRA, H. D. V. **Modulação da temperatura da superfície do mar do Pacífico e Atlântico Tropical na precipitação no Estado da Paraíba**. 137p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia). Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, 2010.

CORRAR, L. J.; PAULO, E.; DIAS FILHO, J. M. **Análise Multivariada: para os cursos de administração, ciências contábeis e economia**. Ed. Atlas. São Paulo, 2007. ISBN 978-85-224-4707-7.

CHIERICE JUNIOR, N.; CAMPANHA, J. R.; CHIERICE, ROSOLI, A. F. O uso da análise de Fourier, de wavelets e dos expoentes de Lyapunov no estudo de um oscilador não-ideal com atrito seco excitação externa. **In:7th Brazilian Conference on Dynamics, Control and Their Applications - DINCON'2008**, Presidente Prudente - SP, 2008.

DA SILVA, D. F. **Análise de aspectos climatológicos, agroeconômicos, ambientais e de seus efeitos sobre a bacia hidrográfica do rio mundaú (AL e PE)**. Tese de Doutorado em Recursos Naturais, UFCG (Universidade Federal de Campina Grande), 174f, Campina Grande, PB, 2009.

DAUBECHIES, I. Ten Lectures on Wavelets. SIAM, **NSF Conference Series in Applied Mathematics**, Philadelphia, PA-EUA, 1992.

EVERITT, B.S.; DUNN, G. **Applied multivariate analysis**. London: Edward Arnold, 1993.400p.

FARGE, M. Wavelet Transforms and their Applications to Turbulence. **Annual Reviews of Fluid Mechanics**, v. 24, p. 395-457, 1992.

FIGUEROA, S. N.; P. SATYAMURTY P. L.; SILVA DIAS. Simulations of the summer circulation over the South American region with an ETA coordinate model. **Journal Atmospheric Science**, v. 52, p. 1573-1584, 1994.

FUNCEME/DEMET. Disponível em <http://www.funceme.br/DEMET/Index.html>, acessado em Outubro de 2015.

GABOR, D., 1946. Theory of communications. **Journal of Institution of Electrical Engineers** 93, 429–457.

GAN, M. A.; KOUSKY, V.E. Vórtices ciclônicos da alta troposfera no oceano Atlântico Sul. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 1, p. 19-28, 1986.

GARAYALDE, E.J.G.; da SILVA, M.G.A.; TAVARES, A. de SÁ. Classificação mesoclimática da região sul do Brasil pela análise de Componentes Principais. **In: Congresso Interamericano de Meteorologia, 1., Congresso Brasileiro de Meteorologia**, 1986, Brasília. **Anais...**, Brasília: Sociedade Brasileira de Meteorologia, v.1, 1986. p. 119-124.

GONG, X.; RICHMAN, M.B. On the Application of Clusters Analysis to growing season precipitation data in North America East of the Rockies. **Journal of Climate**, v.8, p.897-924, 1995.

HAIR, Jr. J. F.; ANDERSON, R. E.; TATHAM, R. L.; BLACK, W. C. Análise Multivariada de Dados. **Ed. Bookman**. 5ª edição, 593 pág.. Porto Alegre, 2005. ISBN 85-363-0482-0.

HASTENRATH, S. **Prediction of northeast Brazil rainfall anomalies**, v.3, n.8, p. 893-904, 1990.

IZADIFAR, Z. Modeling and Analysis of Actual Evapotranspiration Using Data Driven and Wavelet Techniques. Degree of Master of Science. **Thesis Degree of Master of Science**. University of Saskatchewan. Saskatoon, Saskatchewan, Canada, 2010.

KAYANO, M. T.; KOUSKY, V.E.; STUDZINSKI, C. D.; DIAS, P. L.S. As variações intra-sazonais da precipitação no Brasil durante o verão de 1989/1990. **Boletim Clima Análise**, INPE, São José dos Campos, Brasil, 5(4), 40-50, 1990.

KOUSKY, V.E. Frontal Influences on Northeast Brasil. **Monthly Weather Review**, v.1, n.107, p.1140-1153, 1979.

KOUSKY, V. E. Diurnal rainfall variation on Northeast Brazil. **Monthly Weather Review**, v.108, n.4, p. 488 – 498, 1980.

KOUSKY, V. E.; GAN, A. Upper tropospheric cyclonic vortices in the tropical South Atlantic. **Tellus**, v. 33(6), p. 538-551, 1981.

KOUSKY, V. E. Pentad outgoing longwave radiation climatology for the South American sector. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 3, p. 217-231, 1988.

LIMA, C. M. e RAO, B.V.: Estudo de Casos Extremos (secas/enchentes) no leste da Região Nordeste do Brasil. **Anais: VIII Congresso Brasileiro de Meteorologia**, n.2, p.46-48, 1994.

LYRA, G. B.; JÚNIOR, J. F. O.; ZERI, M. Cluster analysis applied to the spatial and temporal variability of monthly rainfall in Alagoas state, Northeast of Brazil. **International Journal of Climatology**. v. 34, 2014.

MASSEI, N.; DUPONT, J. P.; MAHLER, B. J.; LAIGNEL, B.; FOURNIER, M; VALDES, D.; OGIER, S. Investigating transport properties and turbidity dynamics of a karst aquifer

using correlation, spectral, and wavelets analyses. **Journal of Hydrology**. v. 329, p. 244-257, 2006.

MENEZES, R. H. N. **Caracterização agroclimática e análise do rendimento agrícola do estado do Maranhão, Brasil**. 168p. Tese (Doutorado em Meteorologia). Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, 2009.

MEYER, Y. Wavelets: algorithms and applications. **SIAM**, Philadelphia, 1993.

MOLION, L. C. B.; BERNARDO, S. O. Uma revisão da dinâmica das chuvas no nordeste brasileiro. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.17, n.1, p. 1-10, 2002. 105.

MORETTIN, P., A. **Ondas e ondeletas: da análise de Fourier à análise de ondeletas**. São Paulo: editora da Universidade de São Paulo. 1999.

MORLET, J. Sampling theory and wave propagation. **In: ANNUAL MEETING**, 51, 1981, Los Angeles: SOC. EXPLOR. GEOPHYSICS, 1981.

MOURA, M. N.; VITORINO, M. I. Variabilidade da precipitação em tempo e espaço associada à zona de convergência intertropical, **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.27, n.4, 475 - 483, 2012.

NASCIMENTO, F. das C. N. **Padrões climáticos associados à periodicidade de eventos extremos de precipitação no Estado do Maranhão**. 108p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia). Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, 2014.

OLIVEIRA, M. A.; FAVERO, L. P. **Uma breve descrição de algumas técnicas para análise de séries temporais: séries de Fourier, wavelets, Arima, modelos estruturais para séries de tempo e redes neurais**. São Paulo: USP, Ensaio 2003. 13p.

OLIVEIRA, J. V.; VITORINO, M. I; SÁ, L. D. A.; Implication of Madden–Julian Oscillation phase on the Eastern Amazon climate. **Atmosphere Science Letters**, v.16, p. 318-323, 2015.

PRATES, J. E. **Controles Associados à Distribuição Espacial de Precipitação no Verão em Minas Gerais: Aspectos Fisiográficos e Meteorológicos**. São Paulo, 1994. 178p. Tese (Doutorado em Meteorologia) - Universidade de São Paulo.

REBOITA, M. S.; GAN, M. A.; ROCHA, R. P.; AMBRIZZIT, T. Regimes de Precipitação na América do Sul: Uma Revisão Bibliográfica. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.25, n.2, p.185-204, 2010.

REIS, E. **Estatística Multivariada Aplicada**. 2ed. Edições Sílabo. Lisboa, 2001. ISBN 972-618-247-6.

RICHMAN, M. B. Specification of complex modes of circulation with T-mode factor analysis. **In: II International Conference on Statistics and Climate**, 1983, Lisbon. Anais... National Institute of Meteorology and Geophysics, 1983. p. 511-518.

RICHMAN, M. B. Rotation of principal components. **Journal of Climatology**, 6:293-335, 1986.

SOUZA, P.; CAVALCANTI, I. F. A. **Atmospheric centres of action associated with the Atlantic ITCZ position.** *International Journal of Climatology*. V.29, p. 2091–2105, 2009.

TORRENCE, C.; COMPO, G.P. A practical guide to wavelet analysis. **Bulletin of the American Meteorological Society**. 79, 61-78, 1998.

TRENBERTH. K. E. The definition of El Niño. **Bulletin of the American Meteorological Society**. v. 78, p. 2771-2777, 1997.

UVO, C. B. **A Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) e sua Relação com a Precipitação na Região Norte do Nordeste Brasileiro.** Dissertação de Mestrado em Meteorologia, INPE, São José dos Campos-SP, 1989.

VIRJI, H. A preliminary study of summertime tropospheric circulation patterns over South America estimated from cloud winds. **Monthly Weather Review**, v.109, p. 599-610, 1981.

VITORINO, M. I. **Análise das Oscilações Intrasazonais sobre a América do Sul e Oceanos adjacentes utilizando a Análise de Ondeletas.** (INPE-9822-TDI/865). 2003. 344 p. Tese (Doutorado em Meteorologia). Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). São José dos Campos, 2003.

VITORINO, M. I.; BRAGA, C. C.; BRITO, J. B. B. Análise da variabilidade de baixa frequência da precipitação sobre o estado da Paraíba. **XIV Congresso Brasileiro de Meteorologia**, 2006, Florianópolis - SC. Anais DVD-ROM, SBMET.

WARD, J. H. Hierarchical grouping of optimize na objective function. **Journal of American Statistical Association**, v. 58, p. 236-244. 1963.

WENG, H.; LAU, K-M. Wavelet, period doubling, and time-frequency localization with application to organization of convection over the tropical Western Pacific. **American Meteorological Society**, Set. P. 2523-2541, 1994.

WESTRA, S.; BROWN, C.; LALL, U.; KOCH, I.; SHARMA, A. Interpreting variability in global SST data using independent component analysis and principal component analysis. **International Journal Climatology**, 30:333-346, 2010.

WILKS, D. S. *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences*. 2. ed. **London, Academic Press**, 2006. 649p.

## APÊNDICE

Tabela A. Localização Geográfica, médias mensais e total das médias anual da Precipitação Pluvial no Estado do Maranhão, para os anos de 1987 a 2013.

Nº	MUNICÍPIO(ESTAÇÃO)	LAT	LONG	ANUAL
1	Cândido Mendes	-1,4558	-45,7281	2397,4
2	Cururupu	-1,8261	-44,8678	2208,2
3	Tutóia (Barro Duro)	-2,9022	-42,3131	2484,9
4	São Bento	-2,7011	-44,8233	1414,6
5	Monção (Alto Turi)	-2,9539	-45,6647	1952,4
6	Cândido Mendes (Maracaçumê)	-2,0522	-45,9583	1849,2
7	Turiação	-2,5047	-45,7842	1909,4
8	Pinheiro (Pimenta)	-2,5903	-45,3653	1911,2
9	Pinheiro	-2,5153	-45,0856	1740,5
10	Santa Helena	-2,2739	-45,2711	1721,0
11	S. Quitéria do Mar ( Bar da Onça)	-3,3647	-42,7239	1695,5
12	Vargem Grande (Iguará)	-3,5536	-43,8736	1418,0
13	Nina Rodrigues	-3,4594	-43,8989	1611,6
14	Vargem Grande ( Munim)	-3,5953	-43,7086	1648,9
15	Mata Roma	-3,6258	-43,1122	1677,3
16	Chapadinha ( Brejo do Meio)	-3,9261	-43,5011	1480,5
17	Urbano Santos ( Gonçalves)	-3,0442	-43,2364	1495,1
18	Cantanhede	-3,6325	-44,3764	1478,2
19	Pirapemas (Peritoró II)	-3,7064	-44,2872	1783,3
20	Pirapemas (pedras)	-3,9436	-44,0175	1750,7
21	Presidente Jucelino	-2,9272	-44,0642	1635,1
22	São Mateus do Maranhão	-3,9833	-44,4667	1881,6
23	Itapecurú Mirim (Miranda)	-3,5667	-44,5833	1686,5
24	Vitória do Mearim (Lago Açú)	-3,7667	-44,8333	1875,3
25	Vitória do Mearim (Aratoi Grande)	-3,7708	-45,2183	1683,6
26	Cajari (Boa Vista do Pindaré)	-3,4028	-45,0106	1638,9
27	Monção (Newton Belo)	-3,4244	-45,6694	1943,1
28	Bom Jardim (Tucuma)	-4,2314	-46,1789	1980,2
29	Codó	-4,4586	-43,8767	1772,8
30	Codó (Fazenda Sobral)	-4,4672	-43,9258	1445,9
31	Codó (Palmeira do Norte)	-4,4181	-43,6456	1616,4
32	Aldeias Altas	-4,6261	-43,4683	1538,9
33	Coroatá	-4,1628	-44,1658	1464,5
34	Pedreias (Pedreiras II)	-4,5703	-44,6050	1496,9
35	Barra do Corda (Santa Vitória)	-4,9517	-44,8942	1347,5
36	Coroatá (Piritoró - BR 316)	-4,3750	-44,3333	1616,8

37	Santa Luzia ( Esperantina)	-4,0311	-45,2711	1541,7
38	Lago da Pedra ( Angico)	-4,7428	-45,1806	1276,6
39	Grajaú (Arame)	-4,8864	-46,0114	1533,6
40	Lago da Pedra	-4,5606	-45,1256	1804,9
41	Vitorino Freire (São João do Grajaú)	-4,2406	-45,3581	1436,9
42	Santa Luzia (Ponte BR - 222)	-4,3042	-46,4936	1240,5
43	Santa Luzia (Fazenda Pedreiras)	-4,4092	-46,7475	1598,8
44	Santa Luzia (Vale do Pindaré)	-4,6981	-46,9392	1788,5
45	Imperatriz (Reta km - 32)	-4,8414	-47,2739	1421,7
46	Parnarama (Lagoa)	-5,4844	-43,3586	1254,3
47	Burití Bravo (Mendes)	-5,7092	-43,5872	1368,7
48	Passagem Franca (Vereda Grande)	-5,9700	-43,4158	1428,7
49	Presidente Dutra (Flores)	-5,4197	-44,9283	1348,5
50	Graça Aranha	-5,4050	-44,3356	1251,3
51	Barra do Corda (Rio Corda II)	-5,7275	-45,3131	1311,0
52	Grajaú (Fortaleza)	-5,6044	-46,2386	1193,7
53	Sítio Novo	-5,8842	-46,7019	1284,5
54	Burití (Buritirama)	-5,5944	-47,0192	926,9
55	Barão do Grajaú (Lages)	-6,6100	-43,4011	1167,4
56	Passagem Franca	-6,1756	-43,7778	1240,8
57	Colinas	-6,0275	-44,2539	1364,6
58	Mirador	-6,3692	-44,3594	1162,7
59	Mirador (Porto do Lopes)	-6,0103	-44,3444	1306,2
60	Mirador (Campo Largo)	-6,0669	-44,7144	1269,6
61	Barra do Corda (Papagaio)	-6,0022	-45,3942	1200,9
62	Loreto (Mato Grosso)	-6,8442	-45,1092	1154,8
63	Grajaú (Fazenda Piranhas)	-6,0392	-45,9206	1139,1
64	Grajaú (Fazenda São Vicente)	-6,8183	-46,3336	1221,6
65	Grajaú (Fazenda Sempre Viva)	-6,1928	-46,2689	984,0
66	São Felix de Balsas	-7,0814	-44,8125	891,2
67	Sambaíba	-7,1386	-45,3478	1140,1
68	São Raimundo das Mangabeiras (Fazenda Tigre)	-7,3747	-45,6078	1116,0
69	Balsa	-7,5225	-46,0342	1110,5
70	Balsa (Brejo Comprido)	-7,9286	-45,9886	1028,5
71	Riachão (Morro Vermelho)	-7,1578	-46,5544	1106,1
72	Balsa Recursos	-7,3314	-46,3075	1215,0
73	Carolina	-7,3231	-47,4644	1365,4
74	Tasso Fragoso (Barra do Fosdão)	-8,1014	-45,5875	1176,6
75	Alto Parnaíba (Inhumas)	-8,8211	-45,9681	1182,2
76	Alto Parnaíba (Boa Vista)	-8,8128	-46,0781	1595,9
77	Alto do Parnaíba	-9,1131	-45,9261	1512,6
78	Tasso fragoso (babilonia)	-8,3175	-45,9678	1218,6
79	Guimarães	-2,1294	-44,6069	1326,4

<b>80</b>	Pindaré Mirim	-3,6583	-45,4431	1406,7
<b>81</b>	Duque bacelar	-4,1528	-42,9461	1367,9

Tabela B. Identificação dos grupos estabelecidos pelo método de Ward (Síntese do dendograma de classificação).

<b>Grupos</b>	<b>Números equivalentes aos postos pluviométricos*</b>
1	18,19,22,23,24,25,37,80
2	1,2,4,5,6,7,8,9,10,21,26,79
3	3,11,12,13,14,15,16,17,20,27,28,29,30,31,32,33,34,35,36,38,39,40,41,42,43,44,45,50,81
4	46,47,48,49,51,52,53,55,56,57,58,59,60,61,62,63,64,65,66,67,68,69,71,72
5	54,70,73,74,75,76,77,78

\* Para identificação dos postos pluviométricos e municípios, vide Tabela A.

Tabela C. Ocorrência de eventos de El Niño e La Niña durante o período de 1972 a 2013.

Fonte: CPC/NCEP/NOAA (2015).

<b>Ano</b>	<b>DJF</b>	<b>JFM</b>	<b>FMA</b>	<b>MAM</b>	<b>AMJ</b>	<b>MJJ</b>	<b>JJA</b>	<b>JAS</b>	<b>ASO</b>	<b>SON</b>	<b>OND</b>	<b>NDJ</b>
1972	<b>-0.7</b>	-0.4	0	0.3	<b>0.6</b>	<b>0.8</b>	<b>1.1</b>	<b>1.3</b>	<b>1.5</b>	<b>1.8</b>	<b>2.0</b>	<b>1.9</b>
1973	<b>1.7</b>	<b>1.2</b>	<b>0.6</b>	0	-0.4	<b>-0.8</b>	<b>-1.0</b>	<b>-1.2</b>	<b>-1.4</b>	<b>-1.7</b>	<b>-1.9</b>	<b>-1.9</b>
1974	<b>-1.7</b>	<b>-1.5</b>	<b>-1.2</b>	<b>-1.0</b>	<b>-0.9</b>	<b>-0.8</b>	<b>-0.6</b>	-0.4	-0.4	<b>-0.6</b>	<b>-0.7</b>	<b>-0.6</b>
1975	<b>-0.5</b>	<b>-0.5</b>	<b>-0.6</b>	<b>-0.6</b>	<b>-0.7</b>	<b>-0.8</b>	<b>-1.0</b>	<b>-1.1</b>	<b>-1.3</b>	<b>-1.4</b>	<b>-1.5</b>	<b>-1.6</b>
1976	<b>-1.5</b>	<b>-1.1</b>	<b>-0.7</b>	-0.4	-0.3	-0.1	0.1	0.3	<b>0.5</b>	<b>0.7</b>	<b>0.8</b>	<b>0.8</b>
1977	<b>0.7</b>	<b>0.6</b>	0.4	0.3	0.3	0.4	0.4	0.4	<b>0.5</b>	<b>0.6</b>	<b>0.8</b>	<b>0.8</b>
1978	<b>0.7</b>	0.4	0.1	-0.2	-0.3	-0.3	-0.4	-0.4	-0.4	-0.3	-0.1	0
1979	0	0.1	0.2	0.3	0.3	0.1	0.1	0.2	0.3	<b>0.5</b>	<b>0.5</b>	<b>0.6</b>
1980	<b>0.6</b>	<b>0.5</b>	0.3	0.4	0.5	0.5	0.3	0.2	0	0.1	0.1	0
1981	-0.2	-0.4	-0.4	-0.3	-0.2	-0.3	-0.3	-0.3	-0.2	-0.1	-0.1	0
1982	0	0.1	0.2	<b>0.5</b>	<b>0.6</b>	<b>0.7</b>	<b>0.8</b>	<b>1.0</b>	<b>1.5</b>	<b>1.9</b>	<b>2.1</b>	<b>2.1</b>
1983	<b>2.1</b>	<b>1.8</b>	<b>1.5</b>	<b>1.2</b>	<b>1.0</b>	<b>0.7</b>	0.3	0	-0.3	-0.6	-0.8	-0.8
1984	-0.5	-0.3	-0.3	-0.4	-0.4	-0.4	-0.3	-0.2	-0.3	<b>-0.6</b>	<b>-0.9</b>	<b>-1.1</b>
1985	<b>-0.9</b>	<b>-0.7</b>	<b>-0.7</b>	<b>-0.7</b>	<b>-0.7</b>	<b>-0.6</b>	-0.4	-0.4	-0.4	-0.3	-0.2	-0.3
1986	-0.4	-0.4	-0.3	-0.2	-0.1	0	0.2	0.4	<b>0.7</b>	<b>0.9</b>	<b>1.0</b>	<b>1.1</b>
1987	<b>1.1</b>	<b>1.2</b>	<b>1.1</b>	<b>1.0</b>	<b>0.9</b>	<b>1.1</b>	<b>1.4</b>	<b>1.6</b>	<b>1.6</b>	<b>1.4</b>	<b>1.2</b>	<b>1.1</b>
1988	<b>0.8</b>	<b>0.5</b>	0.1	-0.3	<b>-0.8</b>	<b>-1.2</b>	<b>-1.2</b>	<b>-1.1</b>	<b>-1.2</b>	<b>-1.4</b>	<b>-1.7</b>	<b>-1.8</b>
1989	<b>-1.6</b>	<b>-1.4</b>	<b>-1.1</b>	<b>-0.9</b>	<b>-0.6</b>	-0.4	-0.3	-0.3	-0.3	-0.3	-0.2	-0.1
1990	0.1	0.2	0.2	0.2	0.2	0.3	0.3	0.3	0.4	0.3	0.4	0.4
1991	0.4	0.3	0.2	0.2	0.4	<b>0.6</b>	<b>0.7</b>	<b>0.7</b>	<b>0.7</b>	<b>0.8</b>	<b>1.2</b>	<b>1.4</b>
1992	<b>1.6</b>	<b>1.5</b>	<b>1.4</b>	<b>1.2</b>	<b>1.0</b>	<b>0.8</b>	<b>0.5</b>	0.2	0	-0.1	-0.1	0
1993	0.2	0.3	0.5	0.7	0.8	0.6	0.3	0.2	0.2	0.2	0.1	0.1
1994	0.1	0.1	0.2	0.3	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	<b>0.6</b>	<b>0.9</b>	<b>1.0</b>
1995	<b>0.9</b>	<b>0.7</b>	<b>0.5</b>	0.3	0.2	0	-0.2	<b>-0.5</b>	<b>-0.7</b>	<b>-0.9</b>	<b>-1.0</b>	<b>-0.9</b>

1996	-0.9	-0.7	-0.6	-0.4	-0.2	-0.2	-0.2	-0.3	-0.3	-0.4	-0.4	-0.5
1997	-0.5	-0.4	-0.2	0.1	0.6	1.0	1.4	1.7	2.0	2.2	2.3	2.3
1998	2.1	1.8	1.4	1.0	0.5	-0.1	-0.7	-1.0	-1.2	-1.2	-1.3	-1.4
1999	-1.4	-1.2	-1.0	-0.9	-0.9	-1.0	-1.0	-1.0	-1.1	-1.2	-1.4	-1.6
2000	-1.6	-1.4	-1.1	-0.9	-0.7	-0.7	-0.6	-0.5	-0.6	-0.7	-0.8	-0.8
2001	-0.7	-0.6	-0.5	-0.3	-0.2	-0.1	0	-0.1	-0.1	-0.2	-0.3	-0.3
2002	-0.2	-0.1	0.1	0.2	0.4	0.7	0.8	0.9	1.0	1.2	1.3	1.1
2003	0.9	0.6	0.4	0	-0.2	-0.1	0.1	0.2	0.3	0.4	0.4	0.4
2004	0.3	0.2	0.1	0.1	0.2	0.3	0.5	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7
2005	0.6	0.6	0.5	0.5	0.4	0.2	0.1	0	0	-0.1	-0.4	-0.7
2006	-0.7	-0.6	-0.4	-0.2	0.0	0.1	0.2	0.3	0.5	0.8	0.9	1.0
2007	0.7	0.3	0	-0.1	-0.2	-0.2	-0.3	-0.6	-0.8	-1.1	-1.2	-1.3
2008	-1.4	-1.3	-1.1	-0.9	-0.7	-0.5	-0.3	-0.2	-0.2	-0.3	-0.5	-0.7
2009	-0.8	-0.7	-0.4	-0.1	0.2	0.4	0.5	0.6	0.7	1.0	1.2	1.3
2010	1.3	1.1	0.8	0.5	0	-0.4	-0.8	-1.1	-1.3	-1.4	-1.3	-1.4
2011	-1.3	-1.1	-0.8	-0.6	-0.3	-0.2	-0.3	-0.5	-0.7	-0.9	-0.9	-0.8
2012	-0.7	-0.6	-0.5	-0.4	-0.3	-0.1	0.1	0.3	0.4	0.4	0.2	-0.2
2013	-0.4	-0.5	-0.3	-0.2	-0.2	-0.2	-0.2	-0.2	-0.2	-0.2	-0.2	-0.3

DESCRIÇÃO: Períodos quente (vermelho) e (azul) períodos de frio

Fonte: <http://www.cpc.ncep.noaa.gov>

Tabela D. Sequência dos autovalores e a variância explicada e acumulada (%) dos dados anuais rotacionados da precipitação.

Componentes Principais	Autovalores Iniciais			Cargas Não Rotacionadas			Cargas Rotacionadas		
	Total	% de Variância	Cumulativa %	Total	% de Variância	Cumulativa %	Total	% de Variância	Cumulativa %
1	40,328	49,788	49,788	40,328	49,788	49,788	19,241	23,755	23,755
2	7,008	8,652	58,440	7,008	8,652	58,440	12,431	15,347	39,102
3	4,556	5,625	64,065	4,556	5,625	64,065	9,077	11,206	50,308
...	...	...	...	...	...	...			
27	0,171	0,211	100,000	0,171	0,211				

As Figuras de A a E se referem aos espectros de ondeletas das médias mensais das cinco regiões homogêneas.

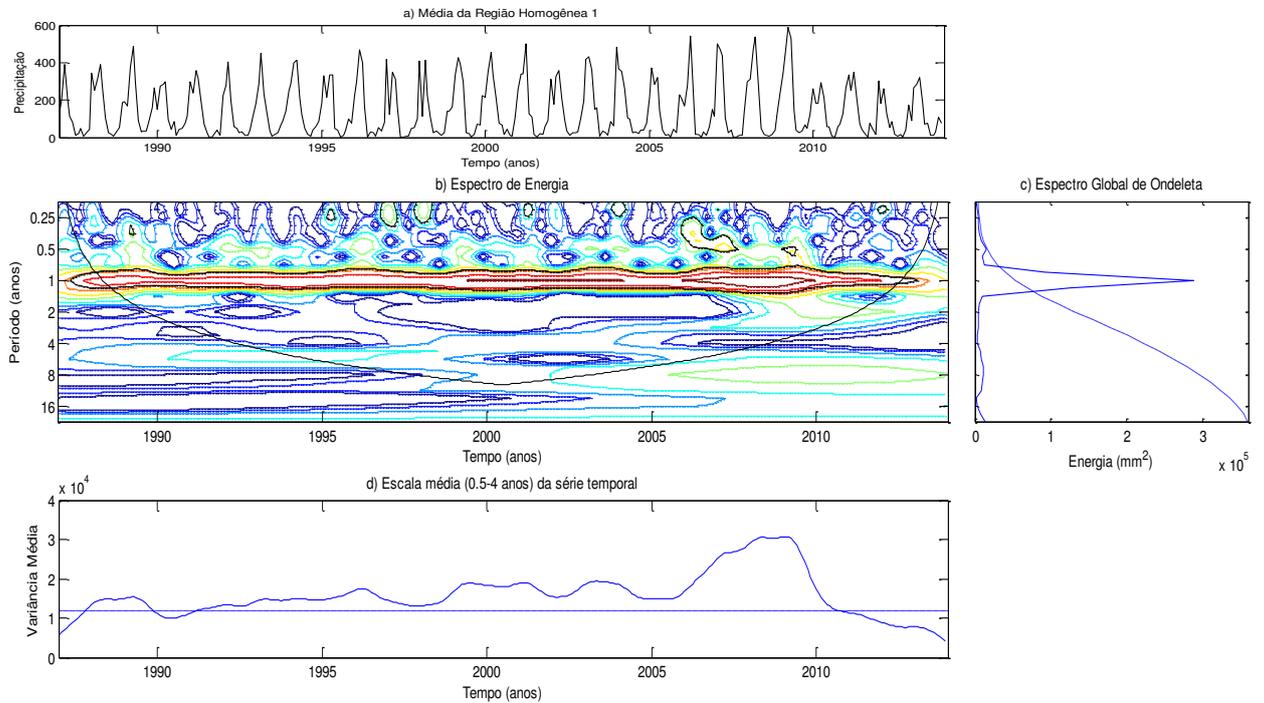


Figura A. a) Série temporal de precipitação, b) Escalograma de energia de ondeletas, c) Espectro global, para Média da RH1, d) Média por escalas das potências ou variância.

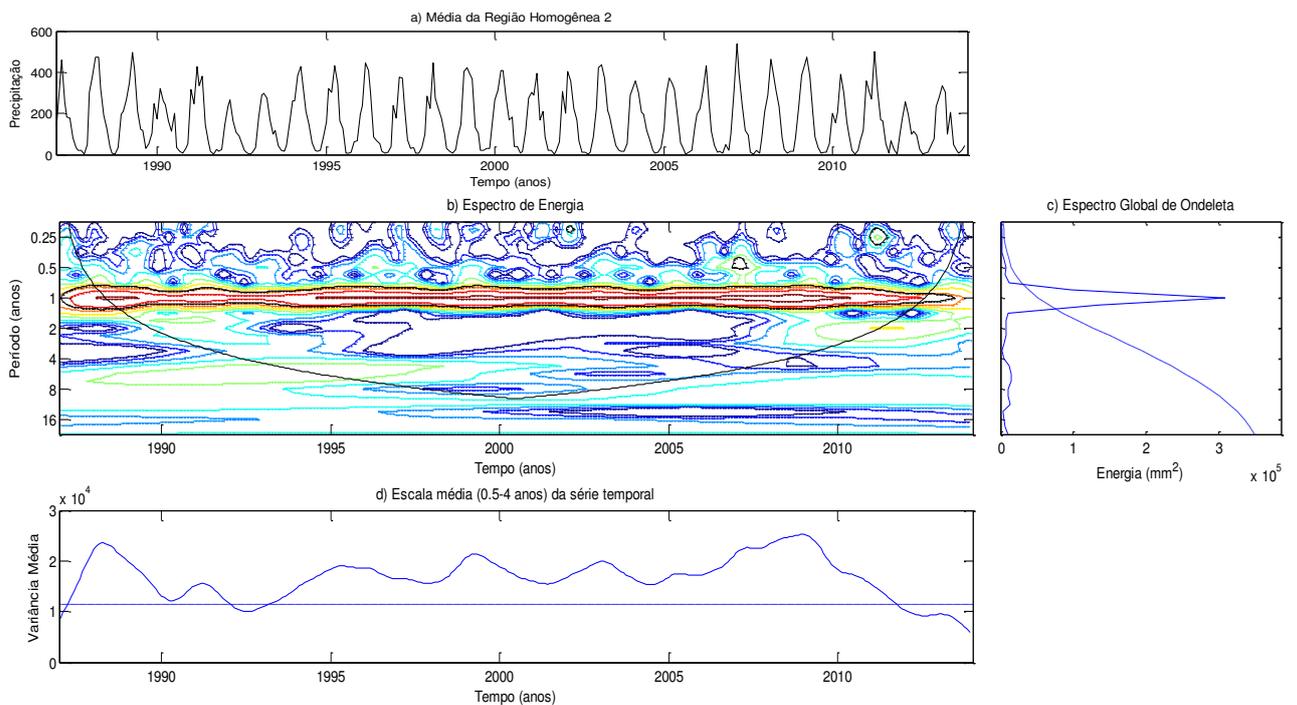


Figura B. a) Série temporal de precipitação, b) Escalograma de energia de ondeletas, c) Espectro global, para Média da RH2, d) Média por escalas das potências ou variância.

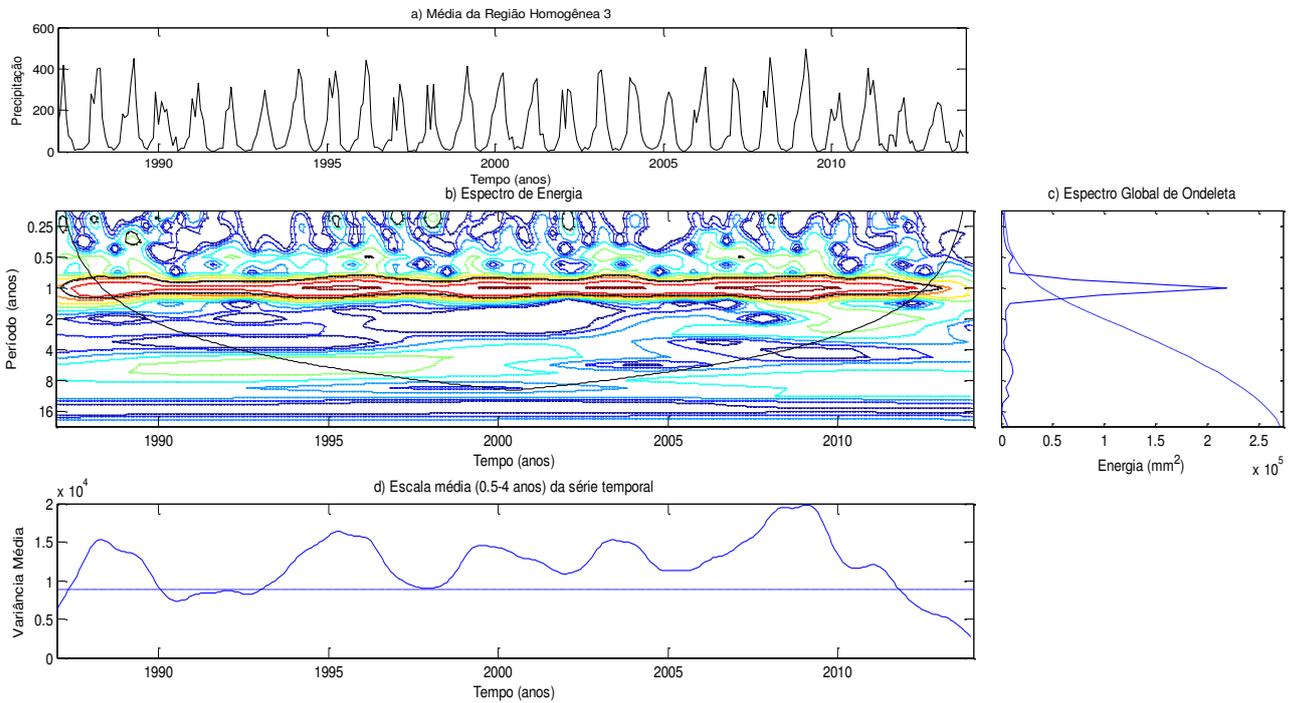


Figura C. a) Série temporal de precipitação, b) Escalograma de energia de ondeletas, c) Espectro global, para Média da RH3, d) Média por escalas das potências ou variância.

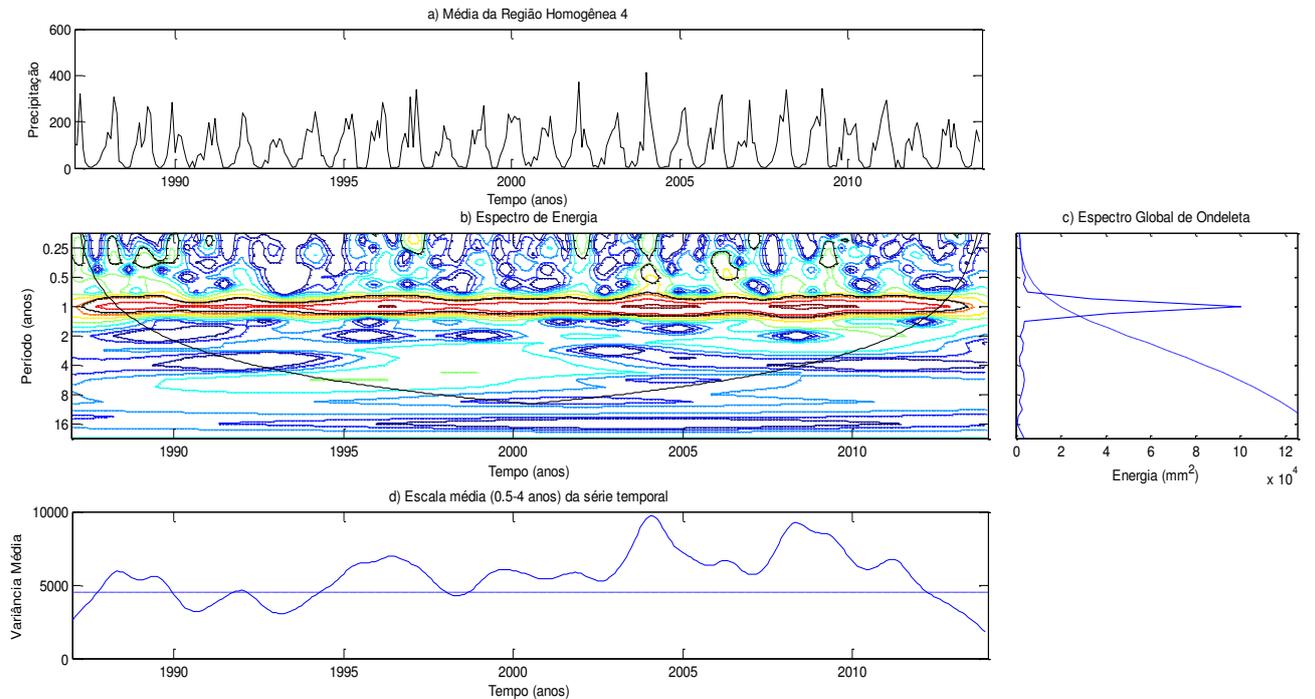


Figura D. a) Série temporal de precipitação, b) Escalograma de energia de ondeletas, c) Espectro global, para Média da RH4, d) Média por escalas das potências ou variância.

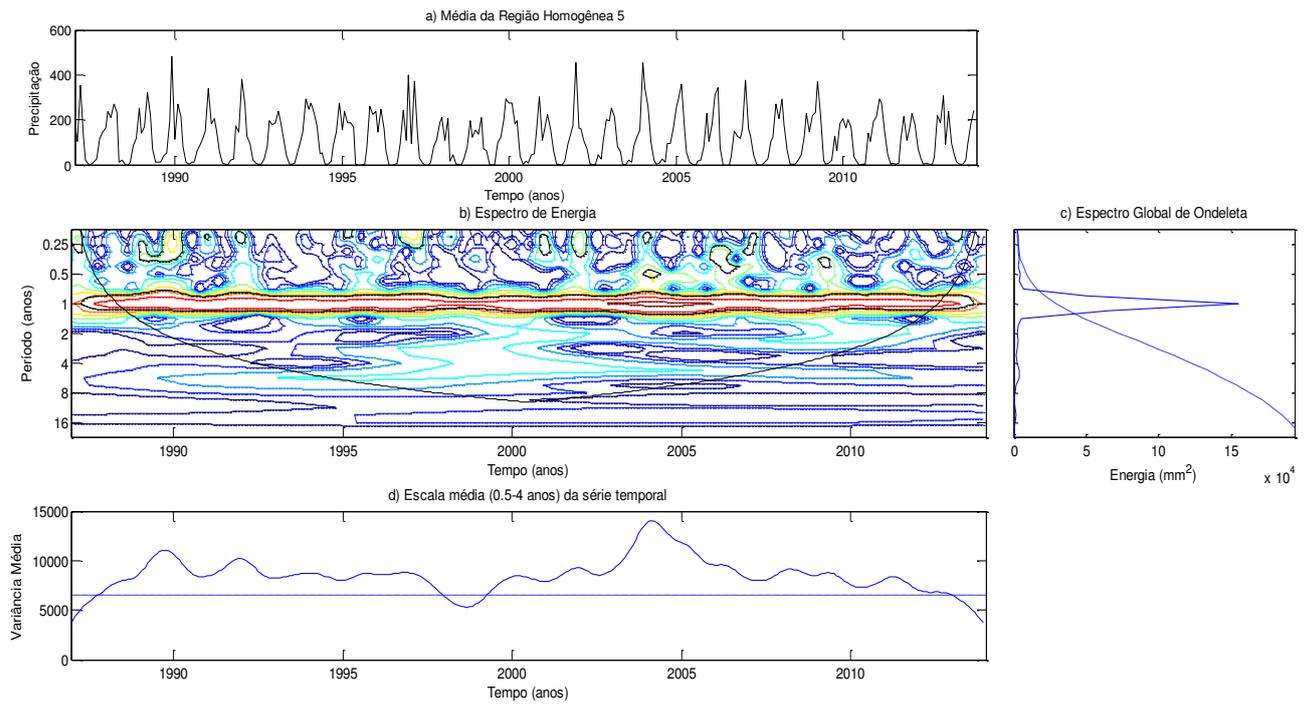


Figura E. a) Série temporal de precipitação, b) Escalograma de energia de ondeletas, c) Espectro global, para Média da RH5, d) Média por escalas das potências ou variância.