

**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

Danielle Cagliari de Lima

**ANÁLISE DAS POSSÍVEIS RELAÇÕES ENTRE OS
CICLOS SOLARES E AS ANOMALIAS DE TSM DOS
OCEANOS PACÍFICO E ATLÂNTICO TROPICAIS**



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



**ANÁLISE DAS POSSÍVEIS RELAÇÕES ENTRE OS
CICLOS SOLARES E AS ANOMALIAS DE TSM DOS
OCEANOS PACÍFICO E ATLÂNTICO TROPICAIS**

DANIELLE CAGLIARI DE LIMA

**Campina Grande - Paraíba
2017**

ANÁLISE DAS POSSÍVEIS RELAÇÕES ENTRE OS CICLOS SOLARES E AS ANOMALIAS DE TSM DOS OCEANOS PACÍFICO E ATLÂNTICO TROPICAIS

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

Área de concentração: Meteorologia de Meso e Grande Escalas

Subárea: Climatologia

Orientador: Prof. Dr. José Ivaldo Barbosa de Brito

Discente: Danielle Cagliari de Lima

**Campina Grande - Paraíba
2017**

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

L732a

Lima, Danielle Cagliari de.

Análise das possíveis relações entre os ciclos solares e as anomalias de TSM dos oceanos Pacífico e Atlântico Tropicais / Danielle Cagliari de Lima. – Campina Grande, 2017.

103 f. : il. color.

Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, 2017.

"Orientação: Prof. Dr. José Ivaldo Barbosa de Brito".

Referências.

1. Clima Espacial. 2. Radiação Solar. 3. Clima Terrestre. 4. Variabilidade Climática. I. Brito, José Ivaldo Barbosa de. II. Título.

CDU 551.585(043)

DANIELLE CAGLIARI DE LIMA

ANÁLISE DAS POSSÍVEIS RELAÇÕES ENTRE OS CICLOS SOLARES E AS
ANOMALIAS DE TSM DOS OCEANOS PACÍFICO E ATLÂNTICO TROPICAIS

DISSERTAÇÃO APROVADA EM 29/08/2017

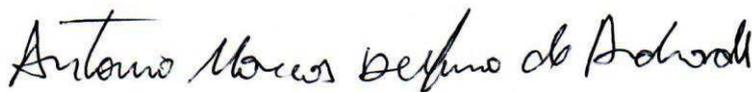
BANCA EXAMINADORA



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



Prof. Dr. RICARDO ARLEN BURITI DA COSTA
Unidade Acadêmica de Física
Centro de Ciências e Tecnologia
Universidade Federal de Campina Grande



Prof. Dr. ANTONIO MARCOS DELFINO DE ANDRADE
Instituto de Engenharia e Geociência
Universidade Federal do Oeste do Pará

Dedico inteiramente a todos os seres que se beneficiarão desta dissertação, que foi profundamente relevante tanto para meu conhecimento quanto para inspiração de pesquisas futuras.

AGRADECIMENTOS

À Deus pela graça da vida nesse plano terrestre.

À minha família, em especial aos meus pais, Adroaldo e Jurema, por sempre me incentivarem a buscar minhas próprias respostas diante as curiosidades, me estimulando a ser questionadora, por todo seu apoio, carinho e dedicação. Que para sempre estejam comigo os valores, amor e humildade ensinados.

Em especial ao Professor Dr. José Ivaldo Barbosa de Brito, por ter acreditado em mim e aceito me orientar nessa linha de pesquisa, por toda sua dedicação, compreensão, paciência, pela sua excelente orientação na realização deste trabalho e pela amizade.

Aos professores Dr. Ricardo Arlen Buruti da Costa e Dr. Antônio Marcos Delfino de Andrade, por toda a contribuição para o aperfeiçoamento dessa pesquisa.

Ao departamento pela possibilidade de cursar este Mestrado.

Aos professores, pelos seus ensinamentos e atenção disponíveis.

À Divanete (in memorium) pela sua preocupação com minha estadia na cidade.

À Pâmela e Waléria pelo auxílio inicial e a amizade.

Aos colegas, inclusive Suellen, Lady, Rosária e Nikolay pelas rodas de estudos, debates e a linda amizade que permanecerá.

À todos que me acolheram com sua amizade e apoio em Campina Grande.

Aos amigos que me apoiaram mesmo que não presentes fisicamente, sempre sentia a torcida de cada um de vocês aqui comigo.

À amada Charge (in memorium) por sua companhia desde a graduação.

À toda ancestralidade que carrego, me fazendo ser essa pessoa decidida que sou.

Ao universo pela bela oportunidade.

Por último, mas não menos importante agradeço a Coordenação de Aperfeiçoamento do Pessoal de Ensino Superior (CAPES) pela concessão da bolsa viabilizando essa pesquisa.

“Nós mesmos somos o nosso pior inimigo. Nada pode destruir a humanidade, mas a própria humanidade.”

“Algum dia, quando tivermos dominado os ventos, as ondas, as marés e a gravidade, utilizaremos as energias do amor. Então, pela segunda vez na história do mundo, o homem descobrirá o fogo.”

Pierre Teilhard de Chardin

RESUMO

Estudos recentes mostram que o ciclo solar influencia os sistemas meteorológicos estratosféricos e troposféricos, proporcionando assim um novo quadro conceitual que reconsidera a evidência da influência solar no clima. Portanto, a principal proposta desse trabalho é investigar os possíveis efeitos dos ciclos solares nas anomalias da Temperatura da Superfície do Mar (ATSM). Para tanto, utilizou-se dados do número de manchas solares (NMS), proveniente do Royal Observatory of Belgium, de ATSM das áreas dos Niños 1+2, 3, 3.4 e 4, no Pacífico, e das áreas do Atlântico Tropical Norte e Sul, obtidos nos sites do CPC/NCEP/NOAA e do ESRL/NOAA, respectivamente, e de Oscilação Decenal do Pacífico (ODP), do ESRL/NOAA, todos dados mensais no período de dezembro/1949 a janeiro/2017. Objetivando filtrar as oscilações de escala intrasazonal, foi realizada a média móvel de três meses, com valor centrado no mês intermediário para todas as séries. Empregou-se o método dos quantis para classificar os períodos frios, neutros e quentes de cada área, considerando os 25% menores valores como períodos frios, os 25% intermediários como neutros e os 25% superiores como quente. Foram calculadas as médias e os desvios padrões do NMS para cada período e realizado o teste t de Student para comparar estas médias. Dessa forma verificou-se que, nos períodos de máximos do NMS, as ATSM no Pacífico e Atlântico Norte tendem para as condições neutras e as do Atlântico Sul para as frias. Para se verificar detalhes da relação entre as séries de ATSM e NMS, aplicou-se a análise espectral de transformadas Ondaletas Contínuas, Cruzadas e de Coerências, tendo como base a Ondaleta de Morlet. Os resultados demonstraram haver influências dos ciclos solares de Hale (256 meses), de Schwabe (128 meses) e do seu segundo harmônico (64 meses) no comportamento das ATSM. Também foi observado que as ATSM nos oceanos Pacífico e Atlântico respondem de forma diferente ao forçante solar. Concluiu-se que os efeitos dos ciclos solares sobre as ATSM se dá de forma não linear, pois ocorreram mudanças de fases entre as séries ao longo do tempo. Quanto à diferença de resposta das ATSM do Pacífico e do Atlântico, ao forçante solar, acredita-se que seja devido à Anomalia Geomagnética do Hemisfério Sul e a fenômenos atmosféricos associados, mas não houve estudos contundentes a esse respeito, tanto que se sugerem pesquisas sobre a influência dos ciclos solares na circulação atmosférica, principalmente, para a região do Atlântico Sul.

Palavras-chave: Clima espacial; Radiação solar; Clima terrestre; Variabilidade climática

ABSTRACT

Recent studies show that the solar cycle influences stratospheric and tropospheric meteorological systems, thus providing a new conceptual framework that reconsiders the evidence of solar influence on climate. Therefore, the main proposal of this work is to investigate the possible effects of solar cycles on Sea Surface Temperature Anomalies (SSTA). In order to do so, we used data of sunspot number (SN) from the Royal Observatory of Belgium, SST anomalies in the areas of Niños 1 + 2, 3, 3.4 and 4 in the Pacific, and North Atlantic and South Atlantic, in the Atlantic, obtained from the CPC/NCEP/NOAA and ESRL/NOAA sites, respectively, and Pacific Decadal Oscillation (PDO), from the ESRL/NOAA, all monthly data during the period of December/1949 to January/2017. A three-month moving average filter was applied on all series to remove the intraseasonal oscillations. The quantile method was used to classify the cold, neutral and warm periods of each area, considering the 25% lower values as cold periods, the 25% intermediate as neutral and the 25% higher as warm. The means and standard deviations of the SN were calculated for each period and Student's t-test was performed to compare these means. It was verified that, in periods of SN maxima, the SSTA in the Pacific and North Atlantic tended to neutral conditions and those from the South Atlantic to the cold. In order to verify details of the relation into the series of SSTA and SN, the spectral analysis of the Continuous Wavelet Transform, Cross-Wavelet Transform and Wavelet Coherence was used, based on Morlet wavelet. The results showed that there were influences of solar cycles of Hale (256 months), Schwabe (128 months) and its second harmonic (64 months) in the behavior of SSTA. It has also been observed that the SSTA in the Pacific and Atlantic oceans respond differently to the solar forcing. It was concluded that the solar cycles effects on SSTA occur in a non-linear way, as there were phase changes between the series over time. As for the difference in the response of the Pacific and Atlantic SSTA to the solar forcing, it is believed to be due to the Southern Hemisphere Geomagnetic Anomaly and associated atmospheric phenomena, but there have been no conclusive studies on this matter, so much so that researches are suggested on the influence of solar cycles on the atmospheric circulation, most importantly for the South Atlantic region.

Keywords: Space weather; Solar radiation; Terrestrial climate; Climate variability

SUMÁRIO

RESUMO	ix
ABSTRACT	x
LISTA DE SIGLAS	xiii
LISTA DE FIGURAS	xiv
LISTA DE TABELAS	xix
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Objetivos	3
1.1.1. Objetivo Geral	3
1.1.2. Objetivos Específicos	3
2. REFERENCIAL TEÓRICO.....	4
2.1. Clima espacial	4
2.2. O Sol.....	10
2.3. Manchas Solares	12
2.4. Ciclos Solares	14
2.5. Clima Terrestre.....	17
2.6. Oceanos	21
2.7. ENOS, El Niño e La Niña	23
2.8. Atlântico	26
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	30
3.1. Dados.....	30
3.2. Métodos	32
3.2.1 Primeira Parte	32
3.2.2. Estimativa de Quantis.....	32
3.2.3. Estimativa de t de Student para Comparações de Médias.....	35
3.2.4. Transformadas Ondaletas	36
3.2.5. Transformada Ondaletas Continuas	37
3.2.6. Transformada Ondaletas Cruzadas.....	41

3.2.7. Transformada Ondaletas Coerência	41
3.2.8. Ângulo de Fase	42
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	44
4.1. Análise dos períodos frios, quentes e neutros de TSM no Pacífico Equatorial e Atlântico Tropical.....	44
4.2. Análise Espectral.....	50
4.2.1. Análise das configurações de Ondaleta.....	52
4.2.1.1. Análise das configurações de ondaleta continua para o número de manchas solares	52
4.2.2. Análise Espectral: Transformadas Cruzada e Coerência em Ondaletas...54	
4.2.2.1. Análise das configurações de ondaleta continua e espectral para o número de manchas solares e a ATSM na área do Niño 1+2.....	55
4.2.2.2. Análise das configurações de ondaleta continua e espectral para o número de manchas solares e a ATSM na área do Niño 3	59
4.2.2.3. Análise das configurações de ondaleta continua e espectral para o número de manchas solares e a TSM na área do Niño 4	63
4.2.2.4. Análise das configurações de ondaleta continua e espectral para o número de manchas solares e a TSM na área do Niño 3.4.....	65
4.2.2.5. Análise das configurações de ondaleta continua e espectral para o número de manchas solares e a TSM em todas as áreas de Niños (Média de Niños)..	68
4.2.2.6. Análise das configurações de ondaleta continua e espectral para o número de manchas solares e o índice de ODP	70
4.2.2.7. Análise das configurações de ondaleta continua e espectral para o número de manchas solares e a TSM no ATN	72
4.2.2.8. Análise das configurações de ondaleta continua e espectral para o número de manchas solares e a TSM no ATS	76
4.3. Discussões	79
4.3.1. Pressuposição para o Nordeste do Brasil	85
5. CONCLUSÕES.....	87
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	90

LISTA DE SIGLAS

ATN	Atlântico Tropical Norte
ATS	Atlântico Tropical Sul
ATSM	Anomalia da Temperatura da Superfície do Mar
COI	Cone de Influência
CPC	Climate Prediction Center
EGO	Espectro de Ondaleta Global
EMBRACE	Estudo e Monitoramento Brasileiro de Clima Espacial
ENOS	El Niño-Oscilação Sul
ESRL	Earth System Research Laboratory
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
NCEP	National Centers for Environmental Prediction
NMS	Número de Manchas Solares
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
OMA	Oscilação Multidecenal do Atlântico
OMM	Organização Meteorológica Mundial
ODP	Oscilação Decenal do Pacífico
ROB	Royal Observatory of Belgium
SILSO	Sunspot Index and Long-term Solar Observations
TSM	Temperatura da Superfície do Mar
WDC	World Data Center
WTC	Transformada Ondaleta Coerência
XWT	Transformada Ondaleta Cruzada
ZCIT	Zona de Convergência Intertropical

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Sistema Sol-Terra.....	5
Figura 2.2: Efeito do vento solar na magnetosfera da Terra	6
Figura 2.3: Ilustração da corrente de vento solar de alta velocidade solar emanando dos buracos coronais.	8
Figura 2.4: Área de atuação da Anomalia Magnética do Atlântico Sul e seu deslocamento e crescimento desde 1590.....	9
Figura 2.5: Esquema da torção das linhas de campo magnético solar.	11
Figura 2.6: Diagrama de Maunder (diagrama borboleta) mostrando a localização das	14
Figura 2.7: Concentração de ^{14}C (curva sólida) plotado junto com o número de manchas solares. Círculos pretos são dados de manchas solares vistas a olho nu. Prováveis anomalias no comportamento do ciclo solar devido ao desvio excedente de ^{14}C estão sombreadas.	16
Figura 2.8: Espectro de emissão de um corpo negro a 5.900K, irradiância solar no topo da atmosfera e irradiância solar ao nível do mar, as áreas sombreadas mostram	18
Figura 2.9: Interação da radiação solar com a atmosfera terrestre.	19
Figura 2.10: Condições oceânica e atmosférica no oceano Pacífico Tropical	24
Figura 2.11: Esquema do padrão oceânico e atmosférico sobre a bacia do Oceânico Atlântico.	27
Figura 3.1: Áreas dos Niños 1+2, 3, 3.4 e 4	30
Figura 3.2: Áreas ATN e ATS.....	31
Figura 3.3: Cálculo por interpolação linear para o quantil Q_p	34
Figura 3.4: Relação do ângulo de fase entre duas séries temporais.	42
Figura 3.5: Relação do ângulo de fase (graus e período) entre as Manchas Solares e a ATSM.	43
Figura 4.1: Períodos de TSM Fria em azul e Quente em vermelho para as áreas ATN, ATS, Niños 1+2, 3, 4, 3.4, para a média (Méd) de todas as áreas dos Niños e ODP. Com as cores verde e magenta esta a classificação da ODP*, El Niño (El) e La Niña (La) da área Niño 3.4 conforme a classificação pela NOAA.	44

Figura 4.2: Gráfico harmônicos de Fourier dos Números de Manchas Solares51

Figura 4.3: (a) Valores da media corrida de três meses do número de Manchas Solares por ano, desde 1950 até 2016. (b) Diagrama tempo-frequência da série temporal de manchas solares (espectro de potência de ondaletas). A paleta de cores indica a energia, sendo a menor energia na cor azul e a maior intensidade de energia em vermelho. A linha cinza em (b) representa o cone de influência (COI), onde os efeitos de borda tornam-se importantes. (c) Espectro Global de Ondaletas (EGO), associada a cada frequência de meses, a linha pontilhada em (c) representa o intervalo de confiança do EGO (95%). ...53

Figura 4.4: (a) Série temporal da média móvel da ATSM na região Niño 1+2 para o período de 1950-2016 e seu respectivo (b) Espectro de Potência de Ondaletas, menor energia (azul) e maior intensidade de energia (vermelho). (c) Espectro Global de Ondaletas (EGO), a linha pontilhada em (c) representa o intervalo de confiança do EGO (95%). (d) Transformada Ondaleta Cruzada (XWT), as cores indicam a covariabilidade de energia máxima (vermelho) e mínima (azul) entre o Número de Manchas Solares (NMS) e da ATSM na região Niño 1+2 e (e) Transformada Ondaleta Coerência (WTC), as cores indicam a coerência entre as duas séries que varia de 0 (azul) a 1 (vermelho). O contorno preto grosso designa o nível de significância de 5% em relação ao ruído vermelho e o Cone de Influência (COI) representado pela linha em formato de arco. As setas indicam as diferenças de fases entre as duas séries. Acima da Figura WTC, linha com a evolução no tempo dos períodos classificados como frios (azul) e quentes (vermelho) para essa região.56

Figura 4.5: (a) Série temporal da média móvel da ATSM na região Niño 3 para o período de 1950-2016 e seu respectivo (b) Espectro de Potência de Ondaletas, menor energia (azul) e maior intensidade de energia (vermelho). (c) Espectro Global de Ondaletas (EGO), a linha pontilhada em (c) representa o intervalo de confiança do EGO (95%). (d) Transformada Ondaleta Cruzada (XWT), as cores indicam a covariabilidade de energia máxima (vermelho) e mínima (azul) entre o Número de Manchas Solares (NMS) e da ATSM na região Niño 3 e (e) Transformada Ondaleta Coerência (WTC), as cores indicam a coerência entre as duas séries que varia de 0 (azul) a 1 (vermelho). O contorno preto grosso designa o nível de significância de 5% em relação ao ruído vermelho e o Cone de Influência (COI) representado pela linha em formato de arco. As setas indicam as diferenças de fases entre as duas séries. Acima da Figura WTC, linha com a evolução

no tempo dos períodos classificados como frios (azul) e quentes (vermelho) para essa região. 61

Figura 4.6: (a) Série temporal da média móvel da ATSM na região Niño 4 para o período de 1950-2016 e seu respectivo (b) Espectro de Potência de Ondas, menor energia (azul) e maior intensidade de energia (vermelho). (c) Espectro Global de Ondas (EGO), a linha pontilhada em (c) representa o intervalo de confiança do EGO (95%). (d) Transformada Onda Cruzada (XWT), as cores indicam a covariabilidade de energia máxima (vermelho) e mínima (azul) entre o Número de Manchas Solares (NMS) e da ATSM na região Niño 4 e (e) Transformada Onda Coerência (WTC), as cores indicam a coerência entre as duas séries que varia de 0 (azul) a 1 (vermelho). O contorno preto grosso designa o nível de significância de 5% em relação ao ruído vermelho e o Cone de Influência (COI) representado pela linha em formato de arco. As setas indicam as diferenças de fases entre as duas séries. Acima da Figura WTC, linha com a evolução no tempo dos períodos classificados como frios (azul) e quentes (vermelho) para essa região. 64

Figura 4.7: (a) Série temporal da média móvel da ATSM na região Niño 3.4 para o período de 1950-2016 e seu respectivo (b) Espectro de Potência de Ondas, menor energia (azul) e maior intensidade de energia (vermelho). (c) Espectro Global de Ondas (EGO), a linha pontilhada em (c) representa o intervalo de confiança do EGO (95%). (d) Transformada Onda Cruzada (XWT), as cores indicam a covariabilidade de energia máxima (vermelho) e mínima (azul) entre o Número de Manchas Solares (NMS) e da ATSM na região Niño 3.4 e (e) Transformada Onda Coerência (WTC), as cores indicam a coerência entre as duas séries que varia de 0 (azul) a 1 (vermelho). O contorno preto grosso designa o nível de significância de 5% em relação ao ruído vermelho e o Cone de Influência (COI) representado pela linha em formato de arco. As setas indicam as diferenças de fases entre as duas séries. Acima da Figura WTC, linha com a evolução no tempo dos períodos classificados como El Niño (vermelho) e La Niña (azul) pela NOAA. 66

Figura 4.8: (a) Série temporal da média móvel da ATSM na região dos Niños para o período de 1950-2016 e seu respectivo (b) Espectro de Potência de Ondas, menor energia (azul) e maior intensidade de energia (vermelho). (c) Espectro Global de Ondas (EGO), a linha pontilhada em (c) representa o intervalo de confiança do EGO (95%). (d) Transformada Onda Cruzada (XWT), as cores indicam a covariabilidade de energia

máxima (vermelho) e mínima (azul) entre o Número de Manchas Solares (NMS) e da ATSM na região dos Niños e (e) Transformada Ondaleta Coerência (WTC), as cores indicam a coerência entre as duas séries que varia de 0 (azul) a 1 (vermelho). O contorno preto grosso designa o nível de significância de 5% em relação ao ruído vermelho e o Cone de Influência (COI) representado pela linha em formato de arco. As setas indicam as diferenças de fases entre as duas séries. Acima da Figura WTC, linha com a evolução no tempo dos períodos classificados como frios (azul) e quentes (vermelho) para essa região.69

Figura 4.9: (a) Série temporal da média móvel do índice de ODP para o período de 1950-2016 e seu respectivo (b) Espectro de Potência de Ondaletas, menor energia (azul) e maior intensidade de energia (vermelho). (c) Espectro Global de Ondaletas (EGO), a linha pontilhada em (c) representa o intervalo de confiança do EGO (95%). (d) Transformada Ondaleta Cruzada (XWT), as cores indicam a covariabilidade de energia máxima (vermelho) e mínima (azul) entre o Número de Manchas Solares (NMS) e o índice de ODP e (e) Transformada Ondaleta Coerência (WTC), as cores indicam a coerência entre as duas séries que varia de 0 (azul) a 1 (vermelho). O contorno preto grosso designa o nível de significância de 5% em relação ao ruído vermelho e o Cone de Influência (COI) representado pela linha em formato de arco. As setas indicam as diferenças de fases entre as duas séries. Acima da Figura WTC, linha com a evolução no tempo dos períodos classificados como frios (azul) e quentes (vermelho) para a ODP.71

Figura 4.10: (a) Série temporal da média móvel da ATSM no Atlântico Tropical Norte (ATN) para o período de 1950-2016 e seu respectivo (b) Espectro de Potência de Ondaletas, menor energia (azul) e maior intensidade de energia (vermelho). (c) Espectro Global de Ondaletas (EGO), a linha pontilhada em (c) representa o intervalo de confiança do EGO (95%). (d) Transformada Ondaleta Cruzada (XWT), as cores indicam a covariabilidade de energia máxima (vermelho) e mínima (azul) entre o Número de Manchas Solares (NMS) e a ATSM no ATN e (e) Transformada Ondaleta Coerência (WTC), as cores indicam a coerência entre as duas séries que varia de 0 (azul) a 1 (vermelho). O contorno preto grosso designa o nível de significância de 5% em relação ao ruído vermelho e o Cone de Influência (COI) representado pela linha em formato de arco. As setas indicam as diferenças de fases entre as duas séries. Acima da Figura WTC, linha com a evolução no tempo dos períodos classificados como frios (azul) e quentes (vermelho) para essa região.73

Figura 4.11: (a) Série temporal da média móvel da ATSM no Atlântico Tropical Sul (ATS) para o período de 1950-2016 e seu respectivo (b) Espectro de Potência de Ondaletas, menor energia (azul) e maior intensidade de energia (vermelho). (c) Espectro Global de Ondaletas (EGO), a linha pontilhada em (c) representa o intervalo de confiança do EGO (95%). (d) Transformada Ondaleta Cruzada (XWT), as cores indicam a covariabilidade de energia máxima (vermelho) e mínima (azul) entre o Número de Manchas Solares (NMS) e a ATSM no ATS e (e) Transformada Ondaleta Coerência (WTC), as cores indicam a coerência entre as duas séries que varia de 0 (azul) a 1 (vermelho). O contorno preto grosso designa o nível de significância de 5% em relação ao ruído vermelho e o Cone de Influência (COI) representado pela linha em formato de arco. As setas indicam as diferenças de fases entre as duas séries. Acima da Figura WTC, linha com a evolução no tempo dos períodos classificados como frios (azul) e quentes (vermelho) para essa região.77

Figura 4.12: Na parte superior está plotado a evolução temporal do índice da média móvel de três meses do NMS e na parte inferior o espectro de potência de ondaletas da ATSM do Niño 1+2.79

Figura 4.13: Evolução temporal da média móvel de três meses do NMS e a ATSM (°C) da área do Niño 3.4. ATSM inferior a linha verde é La Niña e superior a magenta é El Niño.80

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1: Valores utilizados nas séries temporais.....	32
Tabela 4.1: Médias e desvios padrões (D.P.) do número de manchas solares observadas nos períodos frios, neutros e quentes nas áreas dos Niños.....	45
Tabela 4.2: Valores calculados de t do teste de Student para comparação de médias do número de manchas solares observadas nos períodos frios, neutros e quentes nas áreas dos Niños.	46
Tabela 4.3: Médias e desvios padrões (D.P.) do número de manchas solares observadas nos períodos frios, neutros e quentes nas áreas ATN e ATS e ODP.	47
Tabela 4.4: Valores calculados de t do teste de student para comparação de médias do número de manchas solares observadas nos períodos frios, neutros e quentes nas áreas NALT e ATS e ODP.	48
Tabela 4.5: Médias e desvios padrões (D.P.) do número de manchas solares observadas nos períodos de La Niña, El Niño e Neutro na região Niño 3.4 e número de trimestres corridos de observações de La Niña, El Niño e Neutro no período de janeiro de 1950 a dezembro de 2016.....	49
Tabela 4.6: Valores calculados de t do teste de student para comparação de médias do número de manchas solares observadas nos períodos La Niña, El Niño e Neutro na área do Niño 3.4.	49

1. INTRODUÇÃO

O Sol é a fonte primária de energia para o sistema climático do planeta Terra. A dependência da vida e os fenômenos climáticos associados ao Sol justificam seu estudo. De acordo com Hartmann (2015), muito da energia recebida desse astro se origina na fotosfera e suas características dominantes são pequenas áreas escuras chamadas manchas solares. A compreensão dos ciclos solares estende-se a outros fenômenos além de suas manchas. Por exemplo, a irradiância solar total que tem sido observada por satélites desde 1979 sofre uma variação quase periódica de aproximadamente onze anos, variando cerca de 0,1% do mínimo (“mínimo solar”) ao máximo (“máximo solar”) (LEAN et al., 2005).

Geralmente, a irradiância solar total e o número de manchas solares seguem um ao outro, ambos podem ser utilizados para caracterizar a energia solar máxima ou mínima. Existe apenas um detalhe diferente: enquanto a energia solar máxima tende a ter um amplo máximo em irradiância solar total, existe um pico no número das manchas solares no início da energia solar máxima que chega à Terra e é impreciso em termos de radiação (HAAM e TUNG, 2012). A propósito, Rind (2002) descreveu, como o Sol fornece uma explícita forçante externa ao sistema climático terrestre, uma melhor compreensão da sua causa e efeito na mudança do clima pode ajudar na avaliação de outras forçantes climáticas e dos mecanismos de realimentação.

O clima afeta a vida humana de várias maneiras. Flutuações e tendência no clima podem causar sérias dificuldades para a humanidade afetando o sistema de suprimento de alimento, água e energia. Além de que, o número de vidas humanas em risco de fome durante as anomalias climáticas nunca foi tão grande, devido ao aumento populacional e a necessidade de absorver o máximo da produtividade agrícola (HARTMANN, 2015). Ademais, a disponibilidade de água no Brasil depende, em grande parte, do clima. O ciclo anual das chuvas e de vazões dos rios no país varia entre bacias, e a variabilidade interanual do clima, associada aos fenômenos de El Niño, La Niña, ou à variabilidade na TSM do Atlântico Tropical e Sul, podem gerar anomalias climáticas, que produzem grandes secas (MARENGO, 2008).

O sistema climático da Terra se divide em duas esferas concêntricas. Uma externa que envolve todo o sistema (altitude de 20 km) e outra interna, que fica no fundo do oceano (profundidade 11 km). As duas esferas concêntricas possuem uma diferença insignificamente da esfera terrestre e a maior parte da energia térmica relevante ao sistema

climático está na parte superior do oceano (BARNETT et al., 2001; BINDOFF et al., 2007; HARTMANN e WENDLER, 2005; PIELKE, 2003). O sistema pode ser dividido em quatro componentes amplamente homogêneos, a atmosfera, a terra, a parte superior do oceano (profundidade em torno de 700 m) e o oceano profundo.

Douglass e Knox (2009) verificaram que o oceano responde de forma rápida para radiação recebida do Sol quando ocorre um desequilíbrio de radiação implícito. Concluíram que 90% da energia são contabilizadas nos dados do oceano e que os tempos de atraso entre as variações no fluxo e as mudanças no conteúdo de calor do oceano são insignificantes numa escala anual. As mudanças no estado do clima são contínuas. Qualquer variação no sinal do fluxo de radiação percebido a partir da deposição de energia no oceano é a assinatura de uma alteração climática.

Buscando compreender a influência do Sol sobre o clima, na última década um número crescente de pesquisas tem estudado possíveis relações do ciclo solar com os fenômenos El Niño e La Niña (HAMM e TUNG, 2012; ROY e HAIGH, 2010; STAGER et al., 2007; ZHOU e TUNG, 2010), principalmente da área do Niño 3.4, com outras variáveis atmosféricas, por exemplo, a temperatura do ar próximo à superfície (STAUNING, 2011), e com sistemas atmosféricos tipo monções da Índia (VAN LOON e MEEHL, 2012). Recentemente, Chiodo et al., (2016) descreveram sobre o impacto de um futuro mínimo solar em projeções de alterações climáticas no Hemisfério Norte. Portanto, a possível relação ciclo solar no clima terrestre é fascinante e, ainda, envolve muitas pesquisas.

Obter uma previsão climática mais exata é de extrema importância. Porém, se torna muito complexo descrever suas alterações utilizando o desequilíbrio de radiação, sendo mais provável que seja associada com correntes oceânicas, como, o fenômeno El Niño /La Niña. White et al. (2001) afirmaram que "aquecimento e resfriamento globais resultam das flutuações no equilíbrio hidrológico global, não do balanço de radiação global". Entretanto, White e Tourre (2003) alegaram que a amplitude na sequência de tempo da Oscilação Quase-Decenal exibe picos que estão alinhados com o sinal de onze anos da irradiância solar, sugerindo que essa irradiância do Sol excita essa Oscilação no sistema climático terrestre.

Sabe-se que, a maioria das mudanças climáticas da Terra, tende ao equilíbrio radiativo (DOUGLASS, 2010). Entretanto, muitas são as lacunas a respeito de como o pequeno forçante radiativo, ciclo solar, produz uma resposta em grande escala que pode afetar o clima global e o tempo. Ainda inexiste uma compreensão pontual de como as manchas

solares influenciam na alteração da temperatura da superfície dos oceanos, sendo esse um importante enigma a ser decifrado.

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo Geral

A presente pesquisa teve como objetivo investigar e identificar possíveis influências das oscilações da atividade solar, ciclo solar, designado pelo número de manchas solares, nas anomalias da Temperatura da Superfície do Mar (TSM) dos oceanos Pacífico e Atlântico Tropicais.

1.1.2. Objetivos Específicos

Quantificar possíveis influências do número de manchas solares sobre a anomalia de TSM em cada uma das áreas dos Niños (1+2, 3, 3.4 e 4) e verificar se existem diferenças entre elas.

Avaliar a relação entre a atividade solar e os fenômenos El Niño e La Niña na área do Niño 3.4.

Estimar a influência das manchas solares no Atlântico Norte e Sul Tropical.

Avaliar a diferença da influência das manchas solares entre os oceanos Atlântico e Pacífico Tropicais.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. Clima espacial

Na literatura internacional, clima espacial é conhecido como *Space Weather*. Um acordo entre as comunidades internacionais sobre uma definição padrão é inexistente. Por esta razão o INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais), em seu *site* oficial, descreve os conceitos de diversas instituições e cria a sua própria definição (INPE, 2016a). Entretanto, como esta pesquisa é um trabalho de dissertação de um curso de meteorologia, é conveniente descrever a definição da OMM (Organização Meteorológica Mundial) e em seguida a do INPE.

Segundo a OMM “O clima espacial abrange o estado físico e fenomenológico que ocorrem no espaço, incluindo o Sol e os meios interplanetário e planetário com o objetivo de observar, compreender e prever o seu estado e seus distúrbios, com atenção especial aos potenciais impactos desses distúrbios nos sistemas biológicos e tecnológicos” (OMM, 2016).

O Sol pode influenciar no desempenho e na confiabilidade dos sistemas tecnológicos espaciais e terrestres, bem como pode afetar a vida ou a saúde humana. Existem diversos centros de pesquisas que fazem previsão do clima espacial. O NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) é responsável por um centro de previsão do clima espacial (Space Weather Prediction Center) <<http://www.swpc.noaa.gov/>>.

No Brasil, o INPE criou em agosto de 2007 o programa EMBRACE (Estudo e Monitoramento Brasileiro de Clima Espacial) com a missão de monitorar o ambiente do espaço Sol-Terra, a magnetosfera, a atmosfera superior e os efeitos de correntes induzidas no solo para prever possíveis influências nas atividades tecnológicas e econômicas (INPE, 2016b). De acordo com EMBRACE, “O clima espacial abrange as condições e os processos que ocorrem no espaço, que têm o potencial de afetar o ambiente próximo a Terra e / ou o ser humano ou os atuais ativos tecnológicos” (INPE, 2016a).

Em geral, o Sol é que determina esta espécie de clima através da variação de sua atividade, interagindo com o meio interplanetário, o campo magnético terrestre e as condições ionosféricas (OMM, 2016). As principais manifestações solares são grandes explosões que ocorrem nas camadas externas do Sol, a Cromosfera e a Coroa ou Corona (atmosfera solar). Em consequência emite um fluxo contínuo de plasmas em todas as direções, composto de partículas atômicas, basicamente de prótons, elétrons e partículas alfa, bem como campos magnéticos.

2.1. Clima Espacial

Essas emanações que ocorrem engloba todos os planetas do Sistema Solar, preenchendo o espaço interplanetário sendo genericamente denominadas de Vento Solar. Em síntese vento solar é um fluxo de partículas e o campo magnético, que ainda interligado ao Sol, arrasta o campo magnético externo, formando o campo magnético interplanetário (TAVARES, 2000). Algumas das ejeções solares lançam grandes quantidades do material constituinte da Coroa e são capazes de causar “Tempestade Geomagnética” ou também conhecida como “Tempestade Magnética”, sendo relacionadas à variabilidade do “Clima Espacial”. A Figura 2.1 mostra a estrutura do sistema Sol-Terra conforme Dal Poz (2010).

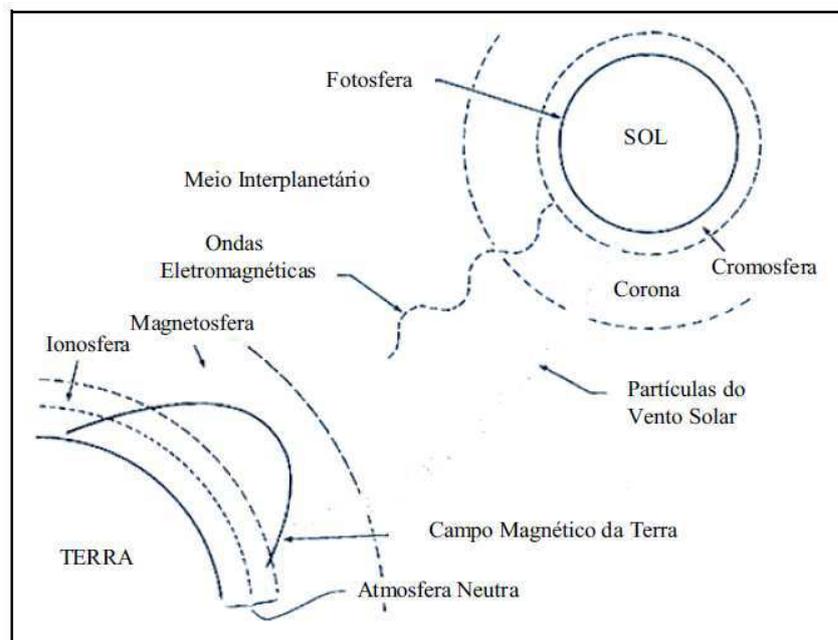


Figura 2.1: Sistema Sol-Terra

Fonte: DAL POZ, 2010

Segundo descrito por Dessler (1967), em 1951, Biermann defendia o conceito de vento solar contínuo para explicar a aceleração observada de caudas de cometas, efeito que faz a cauda do cometa apontar na direção contrária ao Sol, indicando a presença de um meio interplanetário. Foi observado por outros cientistas que a pressão do fóton sozinha não podia explicar as observações. A mesma ideia inicial apresentada por FitzGerald que em 1900, ao visualizar as estrelas através da cauda dos cometas, percebeu que os átomos dos gases na cauda podem absorver apenas uma porção pequena das radiações. Biermann atribuiu à aceleração das caudas do cometa a ionização dos gases devido à transferência de momentum de elétrons de vento solar. Os argumentos da cauda do cometa não foram aceitos até que Parker formulou a teoria hidrodinâmica do fluxo de partículas saindo da base da Coroa e

chamou esse fluxo de “Vento Solar”. Após dois anos ocorreu a primeira observação direta do vento solar através das sondas Soviéticas Lunik 2 e Lunik 3, em 1960, porém as previsões de Parker só foram confirmadas em 1962, com os dados da sonda Norte Americana Mariner 2. Entretanto, em 1960, Chamberlain questionou a validade básica da ideia de expansão hidrodinâmica para a corona solar e propôs, em vez disso, um modelo evaporativo, o que levou a velocidades de expansão coronal mais de uma ordem de grandeza inferior às estimativas de Parker.

Observando o efeito do vento solar nas caudas de cometas foi possível calcular sua velocidade que varia de centenas até 1000 km s^{-1} (LÜST, 1963), a velocidade média de fluxo varia de 350 a 695 km s^{-1} (GOSLING et al., 1978), e durante uma ejeção de massa coronal em outubro de 2003 foi observado velocidade acima de 1850 km s^{-1} (SKOUG et al., 2004). Para viajar a distância SOL-TERRA de $149.600.000 \text{ km}$, as partículas eletricamente carregadas demoram em torno de um dia e meio até, no máximo, 6 dias. Enquanto isso, os fótons (luz solar) levam em torno de 8 minutos para atingir a Terra.

O vento solar é muito fraco em comparação com o vento na Terra, embora seja gigantescamente mais rápido, pois sua densidade é muito baixa, sendo cerca de 100 partículas por polegada cúbica. Assim, uma pressão típica do vento solar é medida em nanopascal (nPa), enquanto na superfície da Terra, a pressão atmosférica é de 100 quilopascal (kPa), e os ventos superficiais são cerca de 100 pascal (Pa). Como o vento solar é medido em nanopascal, é aproximadamente 1 bilhão de vezes mais fraco do que os ventos aqui na Terra (NASA, 2016). A propósito, o efeito do vento solar sobre a magnetosfera da Terra é mostrado na Figura 2.2.

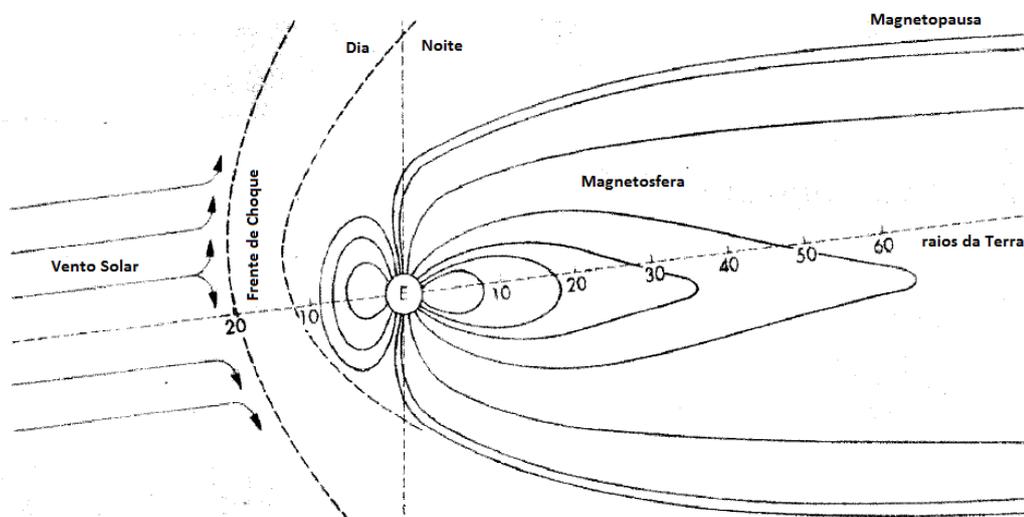


Figura 2.2: Efeito do vento solar na magnetosfera da Terra
Fonte: adaptada de Rodrigues (2000)

O vento solar interage com a magnetosfera, de modo a comprimir o lado voltado para a Terra, e esticar o lado oposto desse campo invisível, como a cauda de um cometa (RODRIGUES, 2000). As tempestades solares aumentam a intensidade do vento alterando as condições geomagnéticas e ionosféricas o que dificulta a entrada de raios cósmicos. Quanto mais fraco for o campo magnético solar e o campo geomagnético, maior será a intensidade do raio cósmico na Terra. A maioria das partículas de raios cósmicos que atingem esse planeta são produzidas fora do sistema solar durante explosões de supernova (STEINHILBER et al., 2012).

De acordo com Shue et al. (1998), em 1931, Chapman e Ferraro introduziram o primeiro conceito sobre a localização da magnetopausa, que depende da pressão dinâmica do vento solar. Ferraro (1952) foi o primeiro que calculou o tamanho e a forma da magnetopausa, além de descrever a tempestade geomagnética. Fairfield (1971) reconheceu que a orientação do campo magnético interplanetário também pode afetar a localização da magnetopausa e declarou que a posição média dessa camada e da frente de choque, também conhecida como frente de impacto (“*bow shock*”), depende da densidade e velocidade do fluxo de vento solar. Apenas alguns dos íons interplanetários e elétrons penetram na magnetosfera da Terra, sua entrada é influenciada pelas linhas do campo magnético interplanetário (LIN et al., 1995).

Na magnetosfera o campo geomagnético domina os processos sobre as partículas carregadas. O movimento dessas partículas é dominado por forças devido aos campos elétrico e magnético da Terra. Esse campo é gerado em sua grande maioria por correntes que fluem no interior do planeta, possuindo pequenas contribuições dos sistemas de correntes atmosféricas do conjunto magnetosfera-ionosfera (COSTA et al., 2011).

Segundo Parker (1965), as linhas de força magnéticas são sempre esticadas pelo vento solar, porém uma ejeção solar faz com que fluxos mais rápidos atinjam fluxos mais lentos resultando em corte nessas linhas. Quando partículas e campos magnéticos solares muito intensos interagem com o campo geomagnético terrestre, podem ou não produzir uma tempestade geomagnética, dependendo do acoplamento dos campos magnéticos.

Tempestades Geomagnéticas são eventos nos quais uma grande quantidade de energia é transferida do vento solar para dentro da Magnetosfera Terrestre (GONZALEZ et al., 1994). Geram poderosas correntes elétricas de intensidade variável, fluindo a cerca de 100 km da superfície na ionosfera por alguns minutos, horas ou mesmo dias, criando a aurora boreal (norte) e aurora austral (sul) (OLIVEIRA FILHO e SARAIVA, 2016). Podem ocorrer a qualquer momento, mesmo quando existir poucas manchas solares; os efeitos de tempestades

nas latitudes altas podem ser propagados para a região equatorial. A forma que ocorre a primeira fase da tempestade esta descrito nas publicações de Chapman e Ferraro (1940) e Ferraro (1952).

Severas tempestades podem ser causadas pelos seguintes eventos solares: grandes explosões (“*solar flares*”), ejeções coronais de massa (“*Coronal Mass Ejection*”), corrente de vento solar de alta velocidade (“*High Speed Streams*”) (Figura 2.3) provenientes de buracos coronais e desaparecimentos súbitos de filamentos (“*Sudden Disappearing Filaments*”).

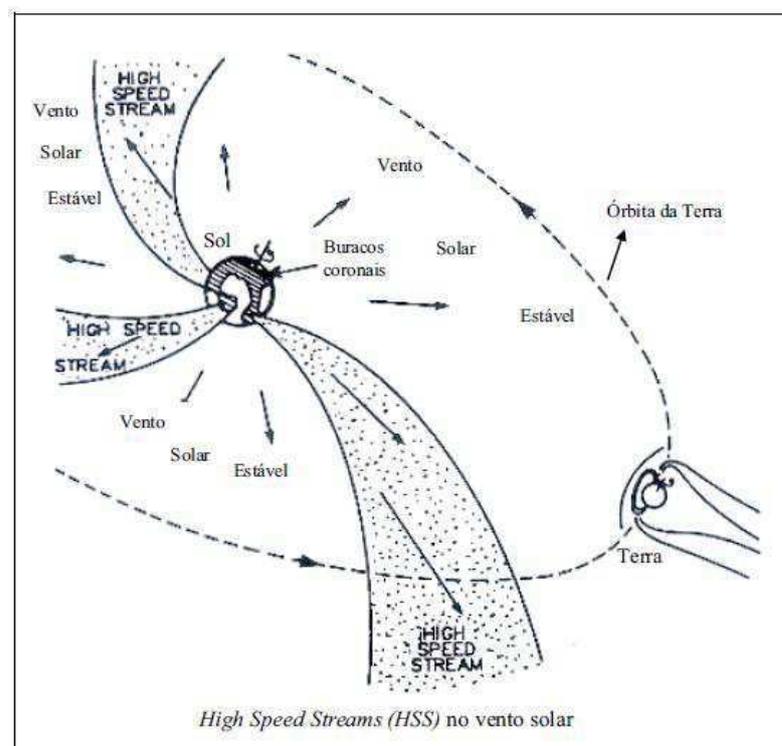


Figura 2.3: Ilustração da corrente de vento solar de alta velocidade solar emanando dos buracos coronais.

Fonte: DAL POZ, 2010

Segundo Cliver et al. (1990), fluxos de vento de alta velocidade são causados por buracos coronais, porém o causador de maior velocidade do vento solar são os “*flares*” que, em raros casos, pode chegar até 2000 km s^{-1} . Esses flares são violentas erupções de plasma e radiação vinda da liberação da energia magnética associada às manchas solares, são aproximadamente 1000 K mais quentes que a fotosfera solar média e emite em torno de 15% mais energia.

As regiões mais quentes da coroa se expandem um pouco mais rapidamente do que as regiões mais frias e, conseqüentemente, ultrapassam o vento frio mais lento criando turbulências e talvez choques (Parker, 1965). A região que separa os fluxos de baixa e alta

2.1. Clima Espacial

velocidade no vento solar é estreita, onde a densidade do vento solar cai drasticamente, a temperatura do próton aumenta acentuadamente, e a velocidade do fluxo aumenta (GOSLING et al., 1978). É mais comum ocorrer vento solar de alta velocidade nas fases descendentes da atividade solar, pois é nessa fase que ocorrem mais emissões de feixes rápidos provenientes de buracos coronais, associadas a linhas de campo magnético “abertas”, facilitando o escapamento das partículas carregadas (COSTA et al., 2011).

Fioravanti (2011) descreveu que o Atlântico Sul é a região onde a anomalia magnética do campo eletromagnético é mais fraca de toda a superfície terrestre, representando uma região onde a blindagem contra partículas solares e raios cósmicos é mais frágil. Essa anomalia está se deslocando e se expandindo. Antes era restrita ao sul do continente da África e atualmente cobre parte do sul da América do Sul e quase todo o Atlântico Sul e o Brasil (Figura 2.4).

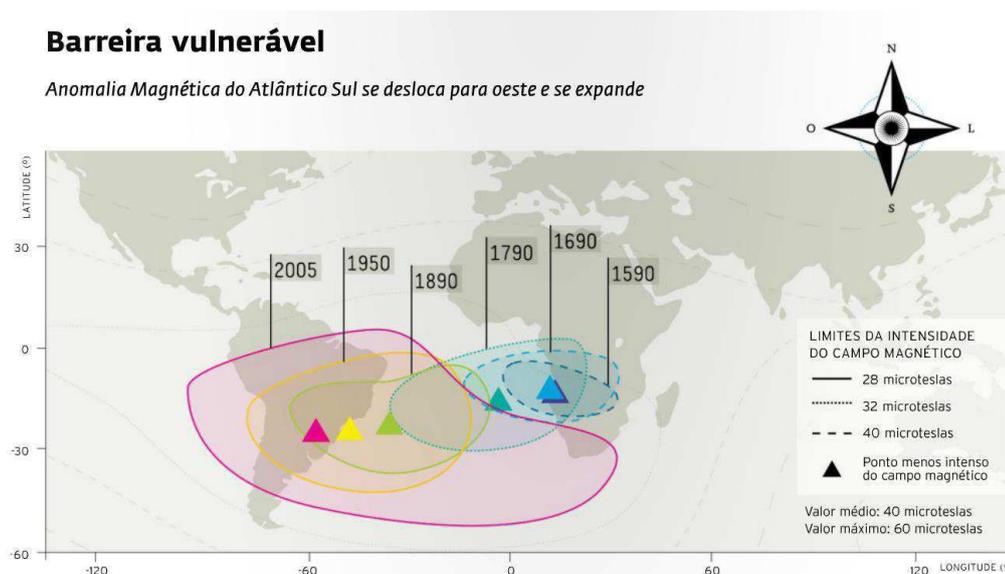


Figura 2.4: Área de atuação da Anomalia Magnética do Atlântico Sul e seu deslocamento e crescimento desde 1590.

Fonte: FIORAVANTI, 2011.

Friego et al. (2013) realizaram uma análise estatística indireta para um possível mecanismo de raio-cósmico-clima em escala regional e confirmam que a Anomalia Geomagnética do Atlântico Sul facilita a entrada de partículas eletricamente carregadas. Eles acreditam que os raios, por sua vez, poderiam facilitar a formação de nuvens, fazer chover mais e baixar a temperatura, principalmente sobre as terras cobertas por trechos menos intensos do campo magnético.

2.2. O Sol

A radiação do Sol se propaga em forma de partículas (plasma) ou radiação eletromagnética (luz). O seu núcleo gera energia através de reações termonucleares que transformam massa em energia. De um modo geral, a fusão nuclear converte quatro prótons em um núcleo de hélio, isso acontece em várias etapas e cada estágio das reações libera energia. A energia é liberada porque o núcleo de hélio tem uma massa ligeiramente menor que os quatro prótons originais, a partir dos quais foi formado. A quantidade total de energia liberada, para cada conversão de quatro núcleos de hidrogênio em um núcleo de hélio, é cerca de 10 milhões de vezes maior do que a produzida pela reação química, quando o hidrogênio se combina com oxigênio para formar água. Essa enorme diferença, entre a energia liberada pelas reações nucleares, em relação às reações químicas, explica como a fusão pode sustentar o Sol por bilhões de anos (MCCRACKEN e STOTT, 2012).

De acordo com McCracken e Stott (2012) dois prótons demoram centenas de milhões de anos para se fundirem. Nesse sentido, a partir das taxas de reação nuclear e da quantidade de hidrogênio inicial disponível no Sol, se estima que o tempo para usar todo o hidrogênio é de cerca de 10 bilhões de anos. E demora cerca de um milhão de anos para a energia sair do Sol, sendo transportada do núcleo por radiação, depois por convecção na superfície, de onde é irradiada.

Antes do lançamento dos satélites, se acreditava que a irradiância solar total¹ fosse constante e invariante, sendo chamada de "constante solar", até recentemente (TSIROPOULA, 2003). A irradiância solar total varia cerca de 0,1% durante o ciclo solar de onze anos e as maiores variações de 0,2% são associadas ao período de rotação do Sol de 27 dias, regiões espectrais ultravioleta, visível e infravermelho participam dessas variações, com mudanças maiores em comprimentos de onda mais curtos (FRÖHLICH e LEAN, 2004). Essas variações ocorrem de acordo com alterações no magnetismo solar.

Se o Sol se comportasse como um ímã perfeito, as linhas de força de campo magnético teriam uma configuração tracejada unindo o polo Norte ao polo Sul, como se verifica no campo magnético terrestre. Por não ser um corpo sólido, o Sol não gira a uma velocidade uniforme, a exemplo da Terra. Essa rotação diferencial faz com que o equador solar complete uma volta em 25 dias, enquanto que as regiões próximas aos polos completam uma volta em 36 dias (OLIVEIRA e SARAIVA, 2014). Rodrigues (2000) menciona que as

¹ Irradiância Solar Total: taxa de energia solar integrada em todo espectro eletromagnético, recebida sobre uma unidade de área no topo da atmosfera terrestre e perpendicular à direção do Sol, à distância média Terra-Sol.

linhas de campo magnético se enrolam devido ao movimento turbulento de convecção, e essa rotação diferencial que deforma, alonga e deflete como elásticos as linhas por arrastamento com velocidade cujo valor depende da latitude. Como a zona do equador possui velocidade de rotação maior, as linhas de campo se torcem mais rapidamente nessa região, como mostrado na Figura 2.5.

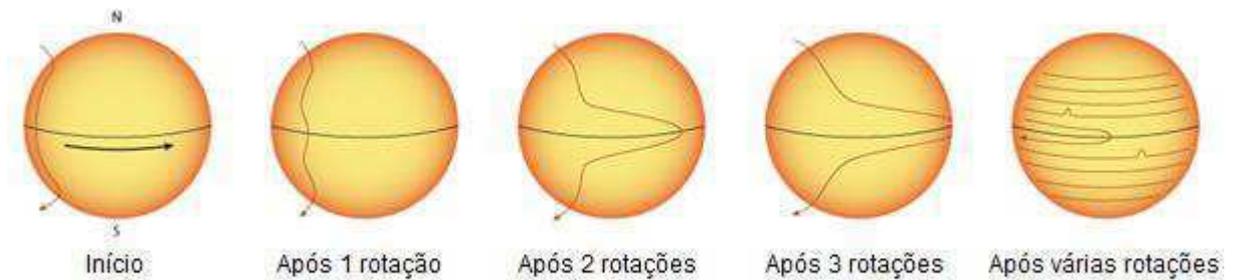


Figura 2.5: Esquema da torção das linhas de campo magnético solar.

Fonte: NASA, Interstellar Boundary Explorer, 2017.

Nas regiões próximas de 40° de latitude, ocorre uma concentração de campo magnético, o efeito de rotação do Sol gera uma torção das linhas de força magnética que origina elevação dessas linhas, que arrastam o plasma acima da superfície formando arcos que ligam pontos de polaridade oposta. Se o gás fluir através destas linhas de campos poderá se observar uma proeminência. Algumas vezes, ocorre da energia contida nas linhas de campo magnético ser liberada repentinamente em uma gigantesca explosão chamada “*flare*”, a qual pode durar de minutos a horas. Os pontos de apoio dos arcos podem ser a origem de um par de manchas (RODRIGUES, 2000).

Esta teoria explica a formação das manchas em pares, com polaridade oposta e justifica o aparecimento das manchas no início do ciclo em latitudes próximas dos 40° . À medida que o ciclo vai avançando no tempo as linhas de campo vão torcendo cada vez mais dando origem a mais pontos bipolares (ou manchas) que se aproximam do equador. Quando a atividade geomagnética é mais pronunciada, gerando valores máximos no número de manchas solares, ocorre o pico do ciclo solar, a atividade solar é máxima.

Próximo ao máximo solar configura ausência de polaridade dominante nos polos, uma reversão dessa polaridade do Sol começa a se tornar aparente cerca de dois anos após o máximo (ECHER et al., 2003). Quando isso acontece se inicia um novo ciclo, o campo magnético solar fica novamente fraco e dipolar, mas a diferença de rotação polar e equatorial logo tenciona as linhas de campo, registando-se novamente a aparição de manchas nas

latitudes em torno de 40° , verificando-se o desaparecimento ou a degeneração das manchas próximas ao equador. Um indício de um novo ciclo é quando as manchas “líderes” invertem a sua polaridade, pois durante todo o ciclo solar essas manchas mantêm a mesma polaridade (ECHER et al., 2003).

O ciclo de manchas solares de onze anos é também conhecido como ciclo de Schwabe, por ter sido descoberto por Heinrich Schwabe em 1843. São necessários dois ciclos de manchas solares para o Sol retornar ao mesmo estado de polaridade original, resultado numa periodicidade de 22 anos que é conhecido como ciclo de Hale.

2.3. Manchas Solares

As manchas solares ocorrem na “superfície do Sol”, a Fotosfera, camada visível do nosso astro central, que possui uma temperatura de emissão de aproximadamente 5780 K. O centro de uma mancha solar típica tem uma temperatura de emissão em torno de 1700 K mais fria que a média da fotosfera, tal que a emissão de energia é apenas aproximadamente 25% da média. A escuridão dessas manchas é produzida por uma interrupção do fluxo de energia em direção normal e para fora do disco solar devido as fortes perturbações do campo magnético. Essas manchas têm características transientes e de range de escala de poucas centenas a dezenas de milhares de quilômetros, e seu tempo de existência varia de um ou dois dias, a vários meses, possuindo um tempo médio de uma ou duas semanas. A área do disco visível que é coberta por mancha corresponde de 0 a 0,1%. As manchas solares escuras são acompanhadas por regiões brilhantes chamadas *flares*.

Dependendo das condições atmosféricas (névoa, poeira,...) é possível observar uma mancha solar a olho nu. Vaquero (2007) revisa evidencias históricas sobre o número e posição das manchas e afirma existirem diversos registros antigos de observações e relatos medievais a respeito de trânsitos planetários que na realidade eram manchas solares. A primeira observação conhecida de uma mancha solar, usando uma câmera escura, foi realizada por Kepler em 1607. Galileu Galilei foi um dos primeiros a catalogar essas manchas, mas sua relevância se deu quando Heinrich Schawbe descobriu que estas desapareciam e ressurgiam com uma variação regular em número. Rudolf Wolf realizou os primeiros cálculos para a determinação diária do número relativo de manchas e introduziu o “número de Wolf” representado por Rz.

O número de Wolf é o indicador mais conhecido do ciclo solar, serve para minimizar erros de observação e uniformizar os valores obtidos em locais diferentes. É calculado por

contagem do número total de manchas e pelo número de grupos tendo a seguinte expressão matemática:

$$R_z = K (10 g + f)$$

Sendo R_z o número de Wolf, g o número de grupos de manchas, f o número total de manchas e K o fator instrumental ou de redução. O valor para K depende do instrumento utilizado, do "olhar" e da percepção do observador tendo um valor de 0,6 a 1. Normalmente se utiliza o valor 1 e, uma vez que o número de Wolf é proporcional ao valor calculado, o erro é sempre o mesmo e por isso não interfere nas conclusões. Pelo fato de cada grupo possuir uma média de 10 manchas foi introduzido esse fator na expressão.

O número de Wolf revelou que o ciclo das manchas se ajustava melhor a um período médio próximo de onze anos. Uma característica é que o tempo de aumento do mínimo para o máximo de manchas é aproximadamente 4,6 anos e o tempo de declínio, para o mínimo novamente, é de aproximadamente 6,4 anos (RODRIGUES, 2000), com a assimetria temporal entre a fase ascendente e a descendente sendo maior quanto maior o máximo. De 1749 até 2017 a média mensal do número total diário de manchas solares variou de zero a 398,2, conforme os dados disponíveis pelo Royal Observatory of Belgium (detalhes no item 3.1).

Em janeiro de 1849, Wolf iniciou um programa de observação sistemática com determinações diárias do número de grupos de manchas solares e pontos individuais (Wolf, 1850 *apud* FRIEDLI, 2016). Wolf recalculou e adicionou a sua série de dados, observações realizadas por outros observadores desde 1749. O grupo de patrimônio da Sociedade Rudolf Wolf na Suíça disponibiliza registros digitalizados do livro original contendo a série de Wolf no *site* <www.wolfinstitute.ch> (FRIEDLI, 2016).

De acordo com Rodrigues (2000), Wolf iniciou a contagem dos ciclos em 1755, quando utilizou o cálculo do valor médio e convencionou que o período entre 1755 a 1766 seria o "ciclo 1", todos os ciclos subsequentes foram numerados consecutivamente depois disso. Atualmente estamos no final do ciclo solar de número 24, o ciclo mais fraco dos últimos 100 anos, conforme se observa no gráfico da Figura 2.6. Tem sido um ciclo de manchas solares de amplitude abaixo da média, com baixo nível de amplitude em todas as atividades usuais, sendo muito parecido com o Ciclo Solar 16 que ocorreu no início do século XX (PESNELL, 2016). Na próxima Figura se verifica como a quantidade de manchas solares varia ao longo dos ciclos.

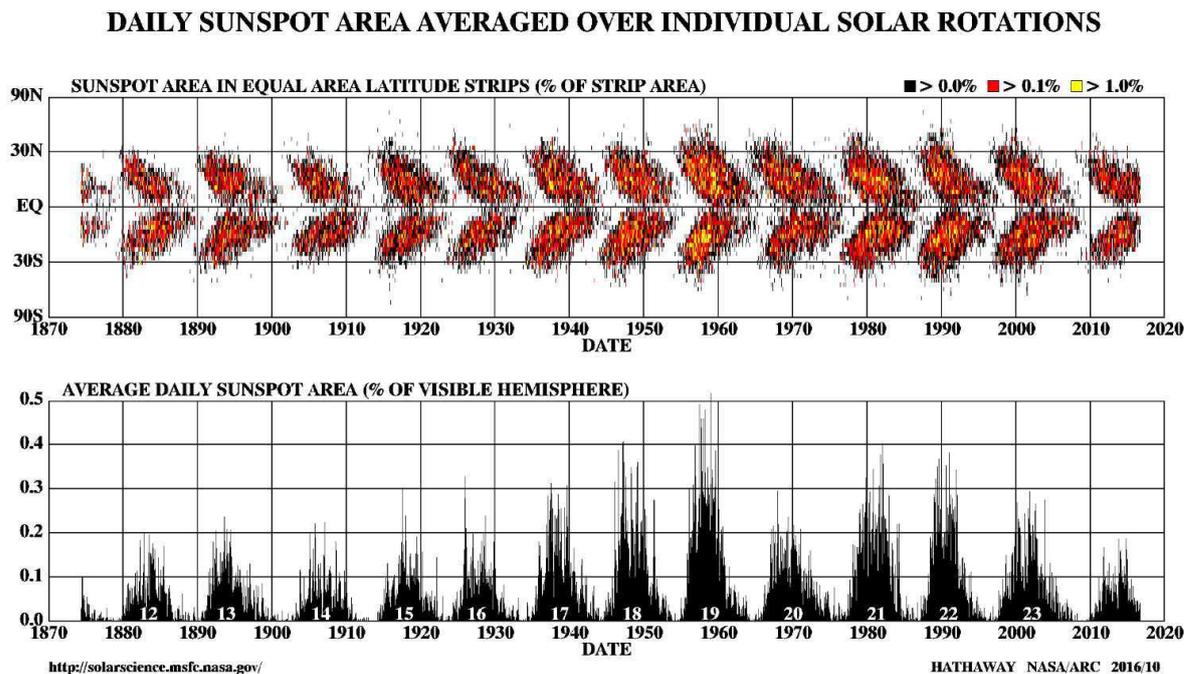


Figura 2.6: Diagrama de Maunder (diagrama borboleta) mostrando a localização das manchas solares em função do tempo e a média diária das manchas solares com a numeração dos ciclos solares.

Fonte: NASA, Marshall Space Flight Center <<http://solarscience.msfc.nasa.gov>>

De fato, a Figura 2.6 mostra a migração das manchas de latitudes maiores para latitudes menores, o que constitui o padrão denominado lei de Sporer, representado pelo diagrama de borboleta de Maunder.

2.4. Ciclos Solares

O Sol também possui outros ciclos conforme sua atividade. Através de análises estatísticas do número de manchas solares por ano e cálculo de variância (energia), diversos autores confirmam que o ciclo de Schwabe, com período de aproximadamente onze anos, é a principal variação solar. O ciclo de Hale possui um período de aproximadamente 22 anos, equivalente a dois ciclos de Schwabe. Bolzan (2004) observou períodos menores que onze anos, particularmente um período ocorrendo entre 4 a 8 anos. Existem indicações recentes, a partir do número de manchas solares e de dados climáticos, sobre um período em torno de 5,5 anos da atividade solar, conhecido como segundo harmônico do ciclo solar de onze anos (RIGOZO e NORDEMANN, 2000).

O ciclo de Gleissberg é particularmente intrigante porque, por um lado, há indícios de tais mudanças no registro histórico e, por outro lado, o período é tão longo que tem sido difícil acumular dados adequadamente para testar essa variação (FEYNMAN e FOUGERE, 1984). Schove (1955) usou registros históricos desde o ano 300 d.C, das observações das

manchas solares e da atividade auroral, para estimar as magnitudes e os anos em que ocorreram o máximo do número de manchas solares. Separadamente ao ciclo médio de onze anos, ele identificou um ciclo de 78 anos (ciclo de Gleissberg) e um ciclo de 200 anos para a atividade auroral.

Uma forma de obter informações da atividade solar no passado é através dos Isótopos² de ^{14}C (encontrado em anéis de árvores e corais) e ^{10}B (aprisionado em depósitos de gelo) que são sensíveis ao influxo de raios cósmicos (PENEIREIRO, 2016). O vento solar modula os raios cósmicos de forma que ao baixar sua intensidade permite que altos fluxos de raios cósmicos penetrem na atmosfera (detalhes no item 2.1, Figura 2.2). Quando o Sol está mais ativo intensifica a magnetosfera e evita que os raios cósmicos galácticos penetrem na atmosfera terrestre, reduzindo assim a produção de ^{14}C e ^{10}B , quando o mesmo está menos ativo, a Terra recebe mais raios cósmicos produzindo mais ^{14}C e ^{10}B . Cabe ressaltar que a produção desses isótopos ocorre quando os raios cósmicos penetram na atmosfera terrestre e reagem através de reações nucleares, com o nitrogênio atmosférico e com o oxigênio (STEINHILBER et al., 2012).

Diversas pesquisas têm demonstrado que os registros em árvores, apresentam informações significativas sobre as mudanças ambientais e as relações Sol-Terra no passado (CASTAGNOLI et al., 1992; CLEVELAND e DUVICK, 1992; KURTHS et al., 1993; SCUDERI, 1993; RIGOZO e NORDEMANN, 2000). Outra forma de reconstruir a atividade solar no passado (paleoastrofísica) é a medição da concentração de isótopos cosmogênicos³ em meteoritos e a medição de termoluminescência nas camadas estratificadas de colunas de sedimentos marinhos (PERISTYKH e DAMON, 2003).

Eddy (1976) revisou a literatura do século XVII ao século XX sobre as observações de manchas solares, auroras e ^{14}C , demonstrou que houve pouquíssimo registro de manchas solares ou aurora entre 1645 e 1715, período que ele chamou de Mínimo de Maunder. Demorou muitos anos para que a comunidade científica aceitasse seus resultados. Agora, o mínimo de Maunder é conhecido por ser um dos muitos Grandes Máximos e Mínimos que ocorreram no passado (FEYNMAN e RUZMAIKIN, 2011). Esse Mínimo coincide com a onda de frio que atingiu a Europa, congelando os rios Tâmis e Sena, sendo chamado de pequena Idade do Gelo (ALCOFORADO, 1999). Isso demonstra que o clima espacial

² Isótopos são variantes de um elemento químico, átomos cujos núcleos têm o mesmo número atômico, possuem a mesma quantidade de prótons, mas não a mesma de nêutrons.

³ Isótopos cosmogênicos ou nuclídeos cosmogênicos são formados a partir de reações nucleares causadas pelos raios cósmicos com núcleos de elementos químicos ali existentes.

influencia no clima terrestre e, talvez, a baixa atividade solar seja um indicador de períodos com baixas temperaturas.

A Figura 2.7 mostra valores medidos da concentração de ^{14}C em anéis de árvores proporcional à atividade solar, para o período de 1050 a 1900, plotado juntamente com o número de manchas solares. Os últimos mil anos revelam na atividade solar o Grande Máximo entre 1100 e 1250, o mínimo de Wolf em torno de 1350, o mínimo de Spörer entre 1460 a 1550 e o mínimo de Maunder de 1645 a 1715. O mínimo de Dalton (1795-1825) é menos claro, pois a lenta resposta do ^{14}C no tempo tende a obscurecer variações mais fracas (EDDY, 1976).

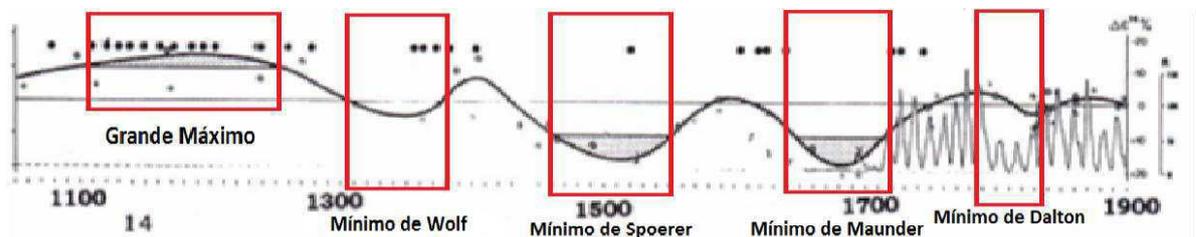


Figura 2.7: Concentração de ^{14}C (curva sólida) plotado junto com o número de manchas solares. Círculos pretos são dados de manchas solares vistas a olho nu. Prováveis anomalias no comportamento do ciclo solar devido ao desvio excedente de ^{14}C estão sombreadas.
Fonte: adaptada de Eddy (1976)

Segundo Feynman e Fougere (1984) há evidências de que as mudanças da atividade solar, que ocorrem em conexão com o ciclo longo, são bastante diferentes das que ocorrem por causa do ciclo de onze anos. Embora não possam identificar definitivamente quais mudanças solares ocorrem durante a variação de ciclo longo, apesar de terem demonstrado que esse ciclo é real e periódico.

Existem diversos pesquisadores fazendo previsões sobre os próximos ciclos solares (AHLUWALIA, 2016; JANARDHAN et al., 2016; SHEPHERD et al., 2014), segundo Pesnell (2016) previsões baseadas apenas nas estatísticas do número de manchas solares são inadequadas para prever o próximo máximo solar e, segundo Jiang et al. (2015), realizar alguma previsão sensível do próximo ciclo solar é praticamente impossível, enquanto a amplitude dos campos polares do Sol não for estabelecida em torno do mínimo solar. Pesnell (2016) indica o artigo de Shepherd et al. (2014) os quais preveem que a atividade solar estará sistematicamente decrescendo nos ciclos 24-26, possivelmente levando à ausência de manchas solares durante uma ou duas décadas, semelhante ao registrado durante o Mínimo de Maunder, no período medieval.

Com base no estudo de campos magnéticos solares, Janardhan et al. (2016) também indicam que podemos estar indo em direção de um Grande Mínimo como o de Maunder. Eles afirmam que o Sol está em declínio constante desde meados dos anos 90 e a tendência decrescente deverá continuar pelo menos até 2020. Preveem que terá menos manchas solares no ciclo 25 do que o 24, e apenas um pouco mais que o ciclo anterior ao Mínimo de Maunder.

Já os autores Feynman e Ruzmaikin (2011), através de diversos dados solares, discutem se o enfraquecimento solar faz parte de uma variação de longo prazo como um Grande Mínimo ou um Ciclo de Gleissberg. Eles afirmam que o início gradual do mínimo entre os ciclos 23 e 24 que iniciou em 2006, favorece ser um mínimo do Ciclo Centenário de Gleissberg, pois um Grande Mínimo como o Mínimo de Maunder é distribuído estocasticamente, pode ter seu início abrupto ou seguir uma série de poucos ciclos solares decrescentes, e teria duração de 20 a 190 anos.

Foram realizadas várias tentativas para explicar o aquecimento global do século XX, exclusivamente pela variação de irradiação associado ao ciclo de Gleissberg, essas tentativas falham porque requerem um forte forçamento solar, incompatível com os registros paleoclimáticos⁴ (PERISTYKH e DAMON, 2003).

Os fatores antropogênicos como fio-condutor das alterações climáticas se encontram em acirrado debate atual. Um fator preponderante para melhor compreender o clima consiste em identificar qual o impacto das alterações solares sobre tal questão. Somente nos próximos anos, em virtude da diminuição das irradiações solares, poderá se testemunhar se i) a temperatura global cairá, como observado no passado, ou se ii) a temperatura realmente aumentará, conforme noticiado, demonstrando a influência de ações antrópicas.

2.5. Clima Terrestre

Na meteorologia existe uma diferença entre tempo e clima. Clima é aquilo que esperamos; tempo é o que sentimos (DIAS e SILVA, 2009). O tempo é o estado físico das condições atmosféricas em um determinado momento e local que influência sobre a vida e as atividades do homem. O clima é o estudo médio das condições do tempo para um determinado período em certa localidade ou região, pode ser definido como a "descrição estatística em termos de média e variabilidade de quantidades relevantes e frequências de eventos que ocorrem durante determinado período de tempo" (INMET, 2016).

⁴ Paleoclimático: estudo das variações climáticas da pré-história através de reconstituição por vestígios encontrados na natureza para determinar que tipo e intensidade de clima havia no local.

Quantitativamente usa valores esperados dos elementos meteorológicos (temperatura, vento, precipitação, pressão e umidade média) que podem ser chamados de elementos climáticos.

O clima é bastante complexo, envolvendo controles internos e externos ao sistema terra-atmosfera-oceano (MOLION, 2008). Os elementos que formam o sistema climático são a atmosfera, hidrosfera, criosfera, litosfera de superfície e a biosfera. A atmosfera é o envelope de gás em torno da Terra, a hidrosfera é a parte do sistema de clima que contém água em sua forma líquida na superfície terrestre e no subsolo, a criosfera contém água em sua forma sólida, a litosfera de superfície é a camada superior de terra sólida nos continentes e nos oceanos suportando atividade vulcânica que influencia o clima. E a biosfera contém todos os organismos vivos e ecossistemas nos continentes e nos oceanos (INMET, 2016). Este sistema também está sujeito a influências extraterrestres, particularmente à do Sol.

O Sol se comporta praticamente como um corpo negro, ou seja, absorve toda a energia recebida e irradia energia à taxa máxima possível para uma determinada temperatura. A irradiância solar total (item 2.2, página 10) sofre variações periódicas de 1 Wm^{-2} , relacionada com a atividade das manchas solares (BARRY e CHORLEY, 2013). Os gases não se comportam como corpos negros. A Figura 2.8 mostra as principais bandas de absorção na atmosfera, com as áreas sombreadas indicando a absorção dos constituintes atmosféricos. Nessa mesma Figura, observam-se as curvas de distribuição espectral da radiação solar no topo da atmosfera, num corpo negro para 5.900 K no topo de atmosfera (linha tracejada), e na superfície do mar.

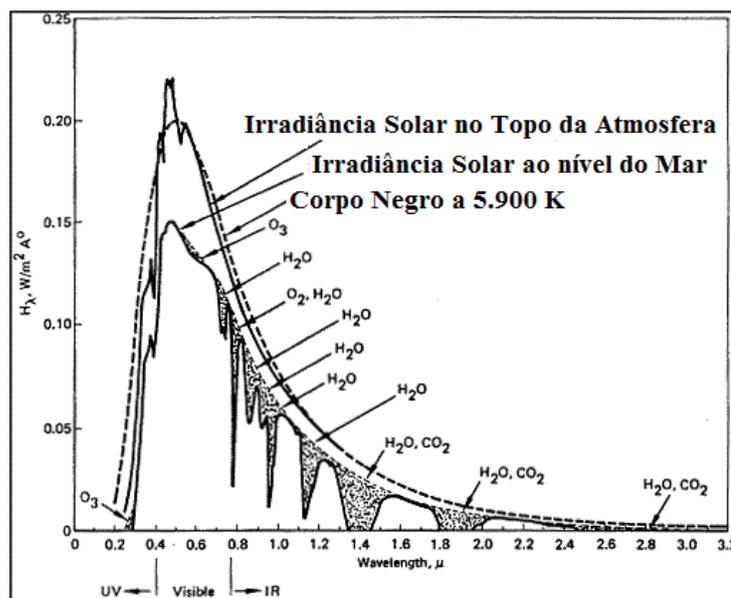


Figura 2.8: Espectro de emissão de um corpo negro a 5.900K, irradiância solar no topo da atmosfera e irradiância solar ao nível do mar, as áreas sombreadas mostram as bandas de absorção dos diversos gases atmosféricos.

Fonte: NASA, Thompson, 1986.

Praticamente toda a energia da radiação solar, ou seja, a radiação direta, difusa e refletida, cai na região de ondas curtas entre 0,2 a 5 μm , com a maior parte da radiação nas regiões espectrais visíveis e do infravermelho próximo. Portanto, os fluxos listados nesta região são conhecidos como ondas curtas. A radiação térmica da superfície terrestre e a da atmosfera possuem, pelo contrário, uma característica de ondas longas, uma vez que está localizada no infravermelho (5 a 100 μm) e, portanto, é chamada de onda longa. A radiação de ondas longas da superfície terrestre é frequentemente chamada de radiação terrestre (KONDRATYEV, 1969).

A força propulsora de todos os movimentos atmosféricos relativos à superfície terrestre é o aquecimento devido à absorção de radiação solar. Para balancear a absorção dessa radiação, a Terra emite radiação para o espaço resultando na conservação de energia do sistema terra / atmosfera na média global e no tempo (BONATTI, 1996). A estabilidade do clima resulta desse balanço entre o fluxo de radiação de ondas curtas absorvido pelo Planeta e o fluxo da radiação de ondas longas emitidas para o espaço.

O aquecimento do clima global ocorreria, por exemplo, ou pela redução de remissão da radiação de onda curta para o espaço resultando no aumento da absorção da mesma, ou pela absorção da radiação de ondas longas por constituintes da atmosfera, que reduziria a perda dessa radiação para o espaço exterior (MOLION, 2008). A Figura 2.9 mostra um esquema simplificado dos processos envolvidos no balanço radiativo do planeta, onde apenas está representado o efeito médio global de todos os processos. O valor de cada componente pode variar significativamente de uma região para outra e de um período do ano para outro (MARTINS et al., 2004).

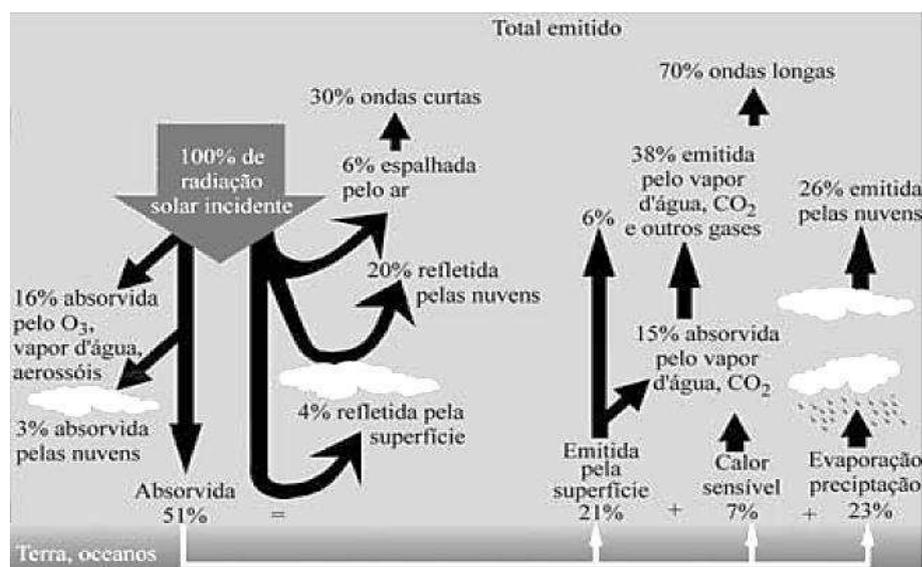


Figura 2.9: Interação da radiação solar com a atmosfera terrestre.

Fonte: Martins et al., 2004.

O sistema climático evolui no tempo sob a influência de sua própria dinâmica interna e devido a mudanças nos fatores externos que afetam o clima (chamados de “forçantes”). As principais forçantes são mudanças nas placas tectônicas, periodicidades astronômicas (forçantes de Milankovich), variabilidade solar, erupções vulcânicas, mudanças induzidas pelo ser humano na composição atmosférica e na cobertura do solo. A radiação solar alimenta o sistema climático. Existem três maneiras fundamentais de mudar o equilíbrio de radiação da Terra, alterando:

- a radiação solar recebida (mudanças na órbita da Terra ou no próprio Sol);
- a fração de radiação solar que é refletida denominada "albedo" (mudanças na cobertura da nuvem, partículas atmosféricas ou vegetação);
- a radiação de ondas longas da Terra de volta ao espaço (alterando as concentrações de gases de efeito estufa).

O clima, por sua vez, responde diretamente a tais mudanças, bem como indiretamente, através de diversos mecanismos de “*feedback*” que podem amplificar ou diminuir os efeitos de uma mudança no forçamento climático. Por exemplo, à medida que as crescentes concentrações de gases de efeito estufa aquecem o clima da Terra, a neve e o gelo começam a derreter. Este derretimento revela terras mais escuras e superfícies de água que estavam debaixo da neve e do gelo, e essas superfícies mais escuras absorvem mais calor do Sol, causando mais aquecimento, o que causa mais derretimento, e assim por diante, em um ciclo de auto-reforço. Este ciclo de *feedback* amplifica o aquecimento inicial causado pelo aumento dos níveis de gases de efeito estufa, logo ele é um *feedback* positivo, se fosse negativo reduziria a taxa de aquecimento (IPCC, 2007).

As causas das mudanças climáticas podem ser terrestres, tais como migração polar e deriva continental, mudança na topografia da Terra; variações na composição atmosférica; astronômicas, tais como mudança na excentricidade da órbita terrestre, mudança na precessão dos equinócios, mudanças na obliquidade do plano da eclíptica; e extraterrestres como variações na quantidade de radiação solar. Para ocorrer uma grande mudança no clima, como uma glaciação⁵, é necessário que os fatores atuem em conjunto, mudança orbital sozinha parece causar pouca variação (PRESTES, 2006). Pequenas flutuações na radiação solar ocasionam uma reação em cadeia para conduzir a uma glaciação. Durante as glaciações, os mares absorveram grandes quantidades de dióxido de carbono. Atualmente estamos num

⁵ Glaciação: período de resfriamento da Terra, dentro de uma era do gelo, provocando o aumento das geleiras nos polos e em zonas montanhosas, próximas às regiões de neve perpétua.

período interglacial, quando as temperaturas podem oscilar ciclicamente entre mais altas e mais baixas (EEROLA, 2003).

O Sol representa a principal fonte de energia para a Terra, assim, compreender a sua influência sobre o clima é crucial, mas também uma tarefa difícil (GRAY et al. 2010). Os mecanismos propostos para mudança climática devido aos efeitos solares são variações:

- Na irradiância espectral, especialmente no ultravioleta próximo (0,3-0,4 μ m) e no ultravioleta médio (0,2-0,3 μ m), levando a mudanças no meio ambiente da superfície terrestre, e possivelmente conduzindo variações na dinâmica troposférica;

- Na irradiância solar total (“constante solar”), levando a mudanças no balanço de radiação planetária, e a variações no clima regional e global;

- No vento solar, levando a mudanças na ionização atmosférica por raios cósmicos e no circuito elétrico global, com potenciais consequências para a nucleação e desenvolvimento de nuvens (REID, 1999).

O clima na Terra tem influencia do Sol, vulcões, concentrações de gases de efeito estufa e variabilidade interna, os quais desempenham um papel importante. É necessário quantificar a influência solar e distinguir entre essas forçantes, para isso se utilizam simulações do modelo climático com novos conjuntos de dados e se correlaciona com fatores reais observados (STEINHILBER et al., 2012). As simulações realizadas com modelos climáticos sugerem que a maior irradiação solar durante os picos de manchas solares, com um aumento correspondente de cerca de 1,5% na coluna de ozônio, modifica a circulação global. As células de Hadley enfraquecem, e as correntes de jato subtropicais e as células de Ferrel mudam em direção ao polo (BARRY e CHORLEY, 2013b).

O clima global responde com um certo atraso a mudanças na entrada de energia solar. Próximo a grandes oceanos, a inércia térmica do mar prolongará e adiará o efeito das mudanças do forçante solar, em outras palavras, os oceanos suavizam e atrasam as mudanças climáticas. O atraso no efeito pode ser da ordem de uma ou mais décadas, dependendo do tamanho do oceano e sua latitude (PRESTES, 2006).

2.6. Oceanos

Os oceanos são um elemento chave do sistema climático, estão relacionados aos processos dinâmicos e termodinâmicos que envolvem a complexidade da interação entre o oceano e a atmosfera, parte essencial do balanço de energia global do sistema Terra/atmosfera (HARTMANN, 2015).

A temperatura no oceano geralmente decresce com a profundidade, varia de uma temperatura muito próxima da temperatura do ar na superfície para valores muito próximos do ponto de fusão da água, no oceano profundo. O maior gradiente vertical de temperatura no oceano ocorre na termoclina, que separa as águas mais quente da camada superficial (camada de mistura) das águas da camada mais profunda, fria com temperatura quase uniforme (HARTMANN, 2015).

O transporte meridional de energia nos oceanos é claramente importante para o clima, mas como os transportes são medidos indiretamente, é incerto saber quais os tipos de circulações contribuem mais para esse transporte. Existem três tipos genéricos de circulações que são candidatas: correntes dirigidas pelo vento, circulação termohalina⁶ e redemoinhos no meio do oceano.

Variações nas configurações das Temperaturas da Superfície do Mar (TSM), devido às variações de transporte de calor em direção aos polos, devem produzir mudanças climáticas sensíveis. Sabe-se que existem mudanças de longo prazo nas circulações oceânicas de escala global, da ordem de décadas, como a Oscilação Decenal do Pacífico (ODP), e milênio, como Circulação Oceânica Profunda, e que essas influenciam fortemente o transporte e a distribuição horizontal de calor sensível nos oceanos e, conseqüentemente, as temperaturas do ar, devido às variações nas trocas de calor entre a superfície do oceano e a atmosfera. Porém, tais efeitos ainda não foram quantificados com a precisão necessária (MOLION, 2008).

A TSM possui uma grande importância no estudo dos fenômenos de interação oceano-atmosfera e na determinação e variabilidade das condições climáticas regionais e globais, sendo uma importante condição de contorno para a circulação da atmosfera (GONZALEZ et al., 2013). Os padrões de TSM no Oceano Pacífico, dominado em escala interanual pelo El Niño/La Niña Oscilação Sul (ENOS) e interdecenal pela ODP, e no Atlântico, em escala interanual pelo padrão de dipolo e interdecenal pela Oscilação Multidecenal do Atlântico (OMA), são extremamente relevante para a análise do clima no Brasil (GONZALEZ et al., 2013).

Neste contexto, já é de domínio público que padrão de anomalias de TSM sobre o Atlântico Tropical produz impactos na posição latitudinal da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) e, conseqüentemente, anomalias de precipitação sobre o Norte e Nordeste

⁶ Circulação Termohalina ou Termosalina: é a circulação oceânica global movida pelas diferenças de densidade das águas dos oceanos por causa das diferenças de temperatura e salinidade na água oceânica superficial.

do Brasil. Enquanto, que o fenômeno ENOS produz anomalias de precipitação e temperatura do ar em todo Brasil.

2.7. ENOS, El Niño e La Niña

Originalmente El Niño representava um aquecimento de uma corrente marítima fria de sul no Pacífico, ao longo da costa do Peru e Equador. O aquecimento dessa corrente era mais frequente próxima ao Natal, o que levou os marinheiros e pescadores peruanos a chamar de El Niño, devido ao Menino Jesus (PHILANDER, 1990). Depois esse evento foi associado com as variações mais intensas da TSM ao longo da região equatorial de todo o Oceano Pacífico, ou seja, ao aquecimento anômalo das águas da superfície do Pacífico Equatorial (RASMUSSON e CARPENTER, 1982). Posteriormente, Philander (1990) cunhou a palavra La Niña para denominar o resfriamento das águas da superfície do Pacífico Equatorial.

O componente atmosférico do El Niño é a Oscilação Sul, que expressa a correlação inversa existente entre a pressão atmosférica na região da alta pressão do Pacífico Sudeste e a da área de baixa pressão no extremo oeste do Pacífico. Esta relação é também conhecida como “gangorra barométrica” e foi estabelecida por Gilbert Walker nos anos 1920 (RASMUSSON e CARPENTER, 1982). Quando a alta pressão é mais intensa no Pacífico Sudeste, geralmente, a baixa pressão do extremo oeste do Pacífico também é mais intensa, e quando a alta é mais fraca a baixa também é. O Índice de Oscilação Sul é utilizado no monitoramento deste componente, sendo definido como a diferença entre os desvios normalizados da pressão na superfície entre as regiões do Pacífico Sudeste no Taiti, na Polinésia Francesa (17,5°S; 149,6°W), e Pacífico extremo oeste na ilha de Darwin, no norte da Austrália (12,4°S; 130,9°E) (PHILANDER, 1990).

Em condições de El Niño os alísios enfraquecem, podendo até mesmo inverter de sentido, passando a ser oriundo de oeste, isso diminui o acúmulo de água quente no Pacífico oeste. Diminui as diferenças de temperatura e de pressão atmosférica entre leste e oeste, o que reduz ainda mais os ventos alísios. As mudanças na TSM modificam a circulação atmosférica tropical. A Célula de Circulação Equatorial de Walker enfraquece e em casos de eventos fortes de El Niño pode desaparecer (VAROTSOS et al., 2016).

Em condições de La Niña há um fortalecimento das condições normais do oceano e da atmosfera na região tropical do Oceano Pacífico. A Célula de Circulação Equatorial de Walker se intensifica, os ventos alísios sopram com mais intensidade, causando aumento no carregamento de águas quentes para oeste. As diferenças de temperatura entre leste e oeste

tendem a se acentuar, o que, por sua vez, causam a intensificação dos ventos alísios (VAROTSOS et al., 2016). A Figura 2.10 demonstra essas interações.

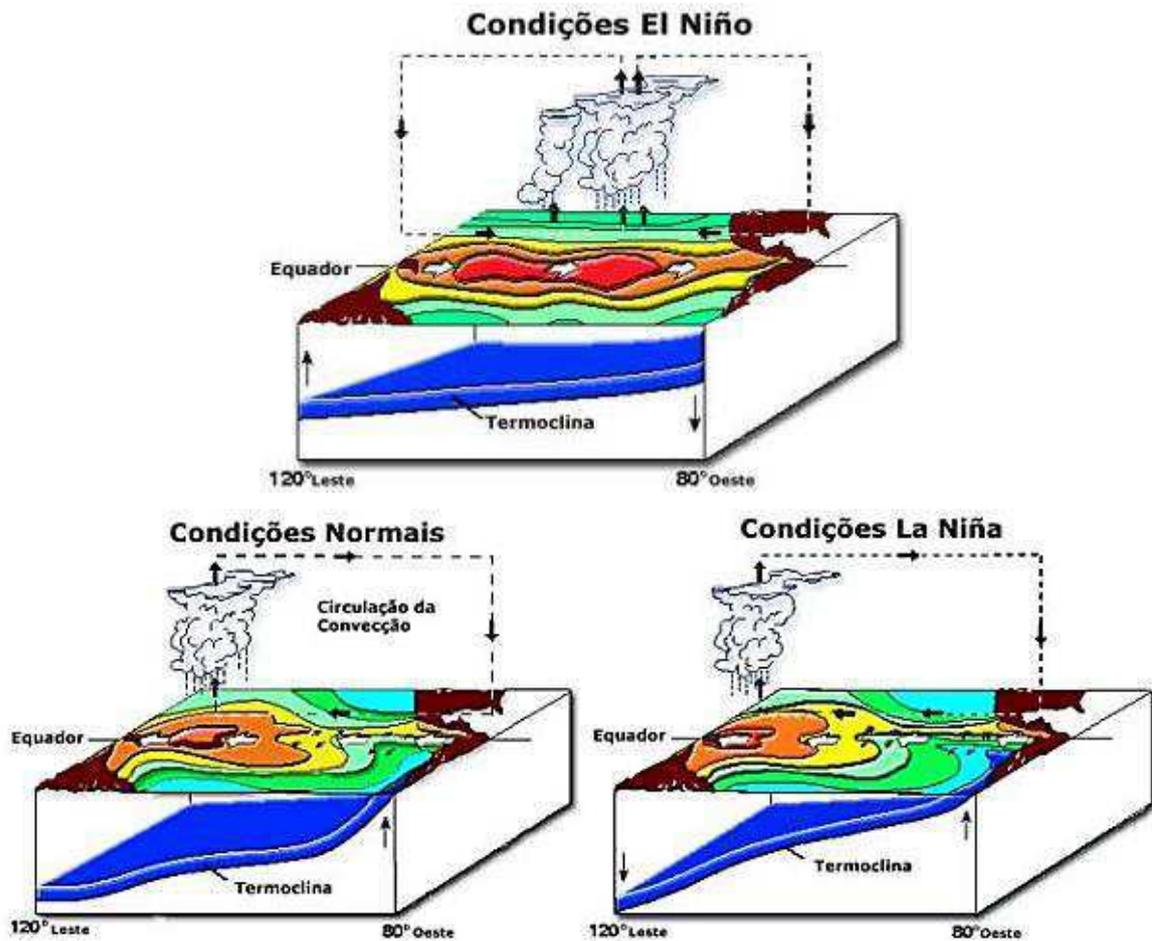


Figura 2.10: Condições oceânica e atmosférica no oceano Pacífico Tropical durante El Niño, condições normais e La Niña.

Fonte: CPTEC-INPE, Oliveira, 2001ab.

Em eventos muito fortes de El Niño a TSM nas regiões dos Niños pode ser, em média, 2 a 5°C acima da normal, ao passo que nos eventos muito fortes de La Niña, as temperaturas podem ser de 1 a 4°C abaixo da normal (WOLTER e TIMLIN, 2011).

O ciclo solar de onze anos e o El Niño-Oscilação Sul (ENOS) são fenômenos quase periódicos, com períodos de 9-12 e 3-7 anos, respectivamente. Stager et al. (2007) identificaram que periodicidades de aproximadamente onze anos também ocorrem no sistema ENOS, que possui o dobro de frequência média de ocorrência que o ciclo solar.

O ENOS é o sinal mais forte da variação climática interanual do sistema atmosférico, pode afetar os padrões climáticos em todo o mundo, influenciando sistemas de alta e baixa pressão, ventos e precipitação (WOLTER e TIMLIN, 2011). Esse acompanhado de alta

pressão de ar no Pacífico Ocidental e baixa pressão de ar no Pacífico oriental, pode trazer umidade para uma região, causando extremos de muita ou pouca água em outros.

As características e causas do ENOS recebem muita atenção, especialmente o seu fator de impacto sobre a sociedade e o meio ambiente.

O ciclo de atividade solar de onze anos foi encontrado nas análises dos dados climáticos da Terra, e a atividade solar é inferida como um fator externo que deve afetar o ENOS (LABITZKE e VAN LOON, 1988; TINSLEY et al., 1989; GLEISNER e THEJLL, 2003; ZHOU et al., 2013; SOON et al., 2014). Além disso, alguns estudos têm revelado uma boa correlação, até as últimas décadas, entre o ENOS e a atividade solar, embora o mecanismo ainda seja controverso.

Haam e Tung (2012) mostraram que os anos de pico solares podem coincidir com eventos frios do ENOS por acaso, mesmo se as duas séries temporais são independentes, e essa coincidência pode continuar por muitos ciclos. Em seu estudo, usando duas séries sinusoidais uma com ciclo de onze anos e outra com ciclo de 3,7 anos, eles demonstraram claramente essa coincidência e discutem as suas conclusões em detalhes. Assim, para estes pares de duas séries temporais auto-correlacionados, solar e ENOS, pode haver correlação zero para o período à longo prazo, mas correlações casuais, estatisticamente significativas, podem ser alcançados por alguns períodos, se a série temporal são sub-mostrados. Por isso, é possível que, quando se utiliza o método de composição do pico solar, o sinal de ENOS é envolvido com o sinal de energia solar (ROY e COLLINS, 2015).

Segundo Roy e Collins (2015), a intensificação da ZCIT é favorecida pela composição solar máxima, portanto, mais precipitação, mesma relação que ENOS e monções de verão indiano (mais chuvas durante os eventos frios do ENOS). Em vista disso, os autores afirmam que as monções de verão indiano não dependem unicamente do Sol, conforme Van Loon e Meehl (2012) afirmavam.

Ao analisar as fases com eventos de ENOS, Kayano e Andreoli (2006) verificaram que quando ENOS e ODP estão na mesma fase (fase oposta) os padrões de teleconexões do ENOS com as precipitações são mais intensos (fracos); e durante a fase neutra da ODP, as anomalias de precipitação associadas a eventos El Niño e La Niña mostram magnitudes comparáveis, porém com sinais opostos. Então, as autoras sugerem que ODP e ENOS têm feitos combinados em distribuição anômala de precipitação em algumas regiões, agindo construtivamente quando estão em mesma fase e destrutivamente quando estão em fases opostas (KAYANO e ANDREOLI, 2009a).

2.8. Atlântico

A importância da variabilidade da anomalia de TSM no Atlântico Tropical na produção de precipitação no Nordeste do Brasil, principalmente durante a estação chuvosa, foi descrita por Hastenrath e Merle (1987) e Uvo et al. (1998). Enquanto, Tourre et al. (1999) afirmaram que o Atlântico apresenta uma baixa variabilidade interanual, mas significativas variabilidades sazonais, que de certa forma reforça as observações de Hastenrath e Merle (1987) e Uvo et al. (1998), e interdecenais, que foram analisadas por Kayano e Capistrano (2014).

No Atlântico Tropical existem dois modos de variabilidade da TSM, na escala interanual e um na escala decenal. Na primeira escala ocorre o modo equatorial, semelhante ao fenômeno ENOS (ZEBIAK, 1993), e o modo inter-hemisférico tipo dipolo ou gradiente meridional de TSM (SERVAIN et al., 1982; ENFIELD et al., 1999). Na segunda escala se verifica uma variabilidade de baixa frequência e pequena magnitude sobre quase todo Oceano Atlântico, denominada de OMA (DIJKSTRA et al., 2006; OLIVEIRA, 2010).

Hastenrath e Heller (1977), através de análise do Atlântico Tropical com o método das composições, encontraram para anos de secas (chuvas excessivas) no Nordeste brasileiro um padrão de anomalia da TSM com valores positivos (negativos) ao norte do equador e negativos (positivos) ao sul. Na avaliação do balanço de umidade foi encontrada alta evaporação sobre o Atlântico Norte, e baixa evaporação no Atlântico Sul durante o período de alta precipitação nessa região. Evaporação é o principal processo na relação entre os componentes oceânico e atmosférico. À medida que o oceano libera a energia, resfriando-se, em forma de vapor para a atmosfera, esta recebe a energia equivalente como vapor de água condensada, esse pode ser o mecanismo que gera o padrão de anomalias.

Moura e Shukla (1981) utilizando dados de TSM no período de 1948 a 1972, sobre Atlântico Tropical, calcularam a correlação de Anomalias de TSM (ATSM) e a precipitação de Fortaleza e Quixeramobim, no trimestre março-abril-maio. Eles encontraram simultaneamente anomalias de TSM opostas no norte e sul do Atlântico equatorial e propuseram um mecanismo dinâmico para explicar as secas no Nordeste. Servain (1991) denominou de “modo dipolo” o padrão com ocorrência simultânea de anomalias positivas (negativas) no Atlântico Tropical Norte e negativas (positivas) no Atlântico Tropical Sul. Porém alguns autores questionam e sugerem a independência do Atlântico Tropical Norte e Sul (ENFIELD et al., 1999).

Segundo Hastenrath e Greischar (1993) o gradiente inter-hemisférico de anomalia de TSM gera, à superfície, um gradiente térmico e de pressão, havendo uma interação entre oceano e atmosfera, conforme ilustrado na Figura 2.11, que altera a circulação meridional da atmosfera (Hadley), influenciando no deslocamento, duração e intensidade da ZCIT sobre o oceano Atlântico Equatorial. A ZCIT influencia na distribuição temporal e espacial das precipitações, alterando os índices pluviométricos no leste da Amazônia, litoral norte brasileiro, incluindo Ceará e partes do Rio Grande do Norte, Piauí, Maranhão e oeste da Paraíba e de Pernambuco, além de alguns países da África.



Figura 2.11: Esquema do padrão oceânico e atmosférico sobre a bacia do Oceânico Atlântico.
 Fonte: FUNCEME, 2017.

Por meio de análises de ondaletas dos índices de ATSM dos dois setores do Atlântico Tropical, Andreoli e Kayano (2003) mostraram que existem dois modos decenais de periodicidades distintas, separados pela ZCIT, um de periodicidade de 10 anos, no norte, e outro com periodicidade de 14 anos, no sul, e o padrão de dipolo entre os dois modos perdura somente alguns meses.

De acordo com Souza e Nobrega (1998), a intensificação dos processos evaporativos da água oceânica (associados à intensificação dos alísios) instabiliza a atmosfera e origina a formação de nuvens, que, por sua vez, diminuem a incidência da radiação de onda curta na superfície e, ao mesmo tempo, aumentam a emissão de onda longa da superfície em direção à atmosfera. Esses mecanismos colaboram para a manutenção das anomalias negativas de TSM, uma vez que a ocorrência do processo de evaporação das águas superficiais necessita da

retirada de energia (calor latente) do próprio oceano. E, ao mesmo tempo, a cobertura de nuvens resulta num saldo negativo do balanço radiativo na superfície, contribuindo também para o resfriamento das águas.

Por outro lado, a inibição da evaporação das águas oceânicas (associada ao relaxamento dos alísios) e também a falta de nebulosidade se relacionaram com o aumento da incidência da radiação de onda curta na superfície e diminuição da radiação de onda longa da superfície para a atmosfera. Esses resultados colaboraram para a manutenção das anomalias positivas de TSM (SOUZA e NOBREGA, 1998).

Hastenrath e Greischar (1993) descreveram que o ENOS contribui para reforçar ou enfraquecer a correlação do gradiente inter-hemisférico do Atlântico e a precipitação do Nordeste brasileiro. Saravanan e Chang (2000) observaram durante a primavera boreal (março-maio) que o ENOS provocou anomalias na circulação de Walker, influenciando no Atlântico Tropical.

A duração dos períodos secos e chuvosos no leste da Amazônia e litoral Norte Brasileiro irá depender do período de atuação, duração, intensidade e área coberta pelos fenômenos El Niño e Dipolo do Atlântico. Desse modo, as variações interanuais e intersazonais da precipitação nessa Região brasileira são devidas, principalmente, aos dois oceanos tropicais, Pacífico (El Niño) e Atlântico (Dipolo) com dois modos principais:

Por um lado, quando as águas do Oceano Pacífico estiverem mais quente do que o normal e as águas dos Oceanos Atlântico Sul mais frio e Atlântico Norte mais quente, corresponde redução acentuada da precipitação no leste da Amazônia e litoral Norte Brasileiro e aos episódios de seca para o Nordeste do Brasil (KAYANO e ANDREOLI, 2009b).

Por outro lado, quando as águas do Oceano Pacífico estiverem mais frias do que o normal e as águas dos Oceanos Atlântico Sul mais quente e Atlântico Norte mais frio, corresponde a episódios com excesso de chuvas (KAYANO e ANDREOLI, 2009b).

O Atlântico Tropical Sul desempenha um papel mais predominante do que o Atlântico Tropical Norte no clima do Nordeste. Sendo o estudo da TSM nessa parte do Atlântico de suma importância para essa região do Brasil (KAYANO E ANDREOLI, 2009b). Além disso, o Atlântico Tropical e o Pacífico Tropical, por meio do ENOS, podem ter papel construtivo ou destrutivo, ou seja, fortalecer ou enfraquecer as anomalias de precipitação nessa região. Finalmente, as anomalias de TSM do Atlântico Tropical Sul podem pré-condicionar os efeitos do ENOS na precipitação do Nordeste. Isso indica que, em algumas

situações, ocorre uma persistência do padrão de anomalias TSM do Atlântico Tropical Sul, desde alguns meses antes da estação chuvosa da região até a própria estação.

Conforme Kayano e Andreoli (2006) as conexões entre ATSM no Pacífico Leste e precipitações na escala 11-14 anos, podem ser uma resposta a variações de TSM na escala interanual. Sugere-se que os padrões de teleconexões atmosféricos, ENOS associados à ODP, ocasionam a formação de um gradiente meridional de ATSM no Atlântico Tropical, que modula a posição e a intensidade da ZCIT afetando a precipitação do Nordeste. As autoras sugerem que a variabilidade decenal de 9 a 14 anos de precipitação na região norte do Nordeste, pode ter ligação com relações decenais do Pacífico, Oscilação do Atlântico Norte e variações de TSM no Atlântico Tropical Norte.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Dados

Os dados da Temperatura Média da Superfície do Mar (TSM) das áreas dos Niños 1+2 (10°S-0; 90°O-80°O), 3 (5°S-5°N; 150°O-90°O), 3.4 (5°S-5°N; 170°O-120°O) e 4 (5°S-5°N; 160°L-150°O) (Figura 3.1), e dos períodos de El Niño e La Niña da região do Niño 3.4, para o período de dezembro de 1949 a janeiro de 2017, foram obtidos do *site* do *Climate Prediction Center* (CPC) que faz parte do *National Centers for Environmental Prediction* (NCEP) da *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA) <<http://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/indices/>>. O ENOS utilizado, índice Niño 3.4 disponível pela NCEP, é definido como a média corrida de três meses dos dados de Anomalia de TSM (ATSM) na região Niño 3.4, calculada em relação ao período base centrado de 30 anos atualizados a cada 5 anos, por exemplo, os anos 1950 a 1955 são comparados com a média de 1936-1965, enquanto os anos 1956 a 1960 são comparados com 1941-1970, assim supõe-se que o efeito sazonal seja removido. Os períodos de La Niña e El Niño são os períodos abaixo e acima das TSM normais, com base em um limiar de +/- 0,5°C, para fins históricos, quando o limite é cumprido por um mínimo de 5 temporadas de sobreposição consecutivas. Mais detalhes sobre a metodologia encontram-se no *site* do NCEP da NOAA <http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ensoyears.shtml>.

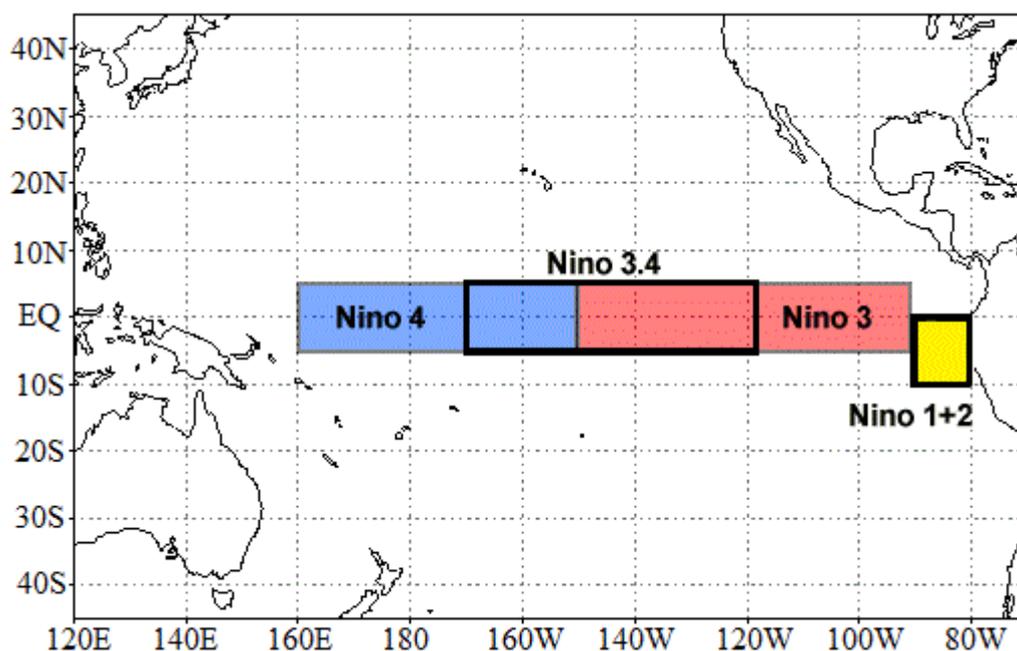


Figura 3.1: Áreas dos Niños 1+2, 3, 3.4 e 4

Fonte: adaptado *National Centers for Environmental Information* (NCEI-NOAA), 2017

Os dados das áreas tropicais do oceano Atlântico Norte – ATN – (5,5°N-23,5°N; 57,5°O-15,0°O) e Sul – ATS – (0-20°S; 30°O-10°L) (Figura 3.2) e da Oscilação Decenal do Pacífico (ODP), para o período de dezembro de 1949 a janeiro de 2017 foram obtidos do *site* do *Earth System Research Laboratory* (ESRL) da NOAA <<http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/climateindices/list/>>.

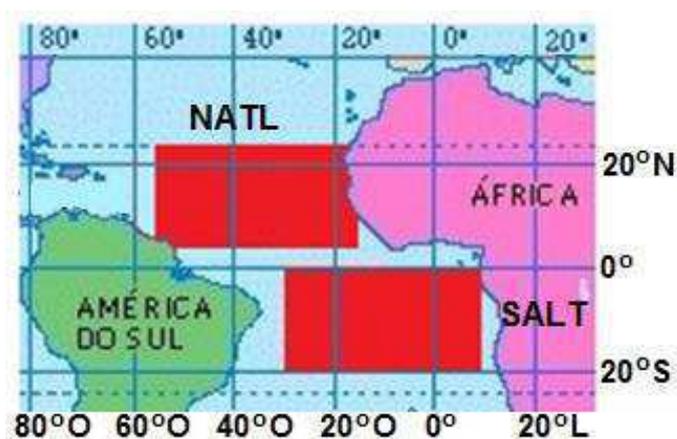


Figura 3.2: Áreas ATN e ATS
Fonte: adaptado ESRL, 2016

Estes dados foram usados para a classificação de períodos frios, neutros e quentes em cada uma das áreas, para todo Pacífico e ocorrências de El Niño e La Niña na área do Niño 3.4.

Os registros de Manchas Solares, para o período de dezembro de 1949 até janeiro de 2017, são do *World Data Center* (WDC) do *Sunspot Index and Long-term Solar Observations* (SILSO) que pertencem ao *Royal Observatory of Belgium* (ROB), em Bruxelas, como dados públicos no *site* <<http://www.sidc.be/silso/datafiles>>. Foi utilizada a média mensal do número total diário de manchas solares, que estão disponíveis de 1749 até os dias atuais, com estimativas de erro, conforme publicado no ROB-SILSO.

A principal vantagem de usar as Manchas Solares como índice solar é pela medição ser feita diretamente e por captar a variabilidade cíclica do Sol, além de ser o índice mais utilizado para representar a variabilidade decenal e para análise de dados climáticos de longo prazo.

Optou-se em iniciar em dezembro por ser o período que iniciam as estações de inverno e verão nos hemisférios Norte e Sul, devido à disponibilidade de dados de ATSM a série inicia em 1949 e encerra em janeiro de 2017. Os últimos quatro valores de todas as

séries eram recentes, portanto considerados como estimativa, segue abaixo uma tabela com os valores utilizados:

Ano	Mês	Manchas Solares	Nino 1+2	Nino 3	Nino 4	Nino 3.4	ATN	ATS	ODP
2016	10*	33,60	0,26	-0,47	-0,30	-0,80	0,55	0,46	0,56
2016	11*	21,40	0,47	-0,47	-0,23	-0,82	0,46	0,28	1,88
2016	12*	18,90	0,49	-0,44	-0,12	-0,65	0,63	0,74	1,17
2017	1*	25,80	0,53	-0,28	-0,21	-0,65	0,47	0,67	0,77

Tabela 3.1: Valores utilizados nas séries temporais.

3.2. Métodos

3.2.1 Primeira Parte

O primeiro passo foi a realização de média móvel de três meses, como valor centrado no mês intermediário, em todas as séries de dados. Ressalta-se que esta metodologia é adotada pelo CPC para a classificação de El Niño e La Niña na área do Niño 3.4. Isto é feito para melhor caracterizar os fenômenos de grande escala.

Em seguida se quantificou os períodos denominados de frios, neutros e quentes que são decorrentes dos valores observados de TSM nas áreas dos Niños 1+2, 3, 3.4 e 4, ATN, ATS, todo Pacífico Equatorial, que é a média ponderada pela área dos Niños 1+2, 3 e 4, e de ODP.

Para a classificação dos períodos frios, neutros e quentes de cada área e ODP foi utilizado o método dos quantis. Os trimestres com TSM inferior ao 25º percentil, que representa os 25% menores valores de toda a série, são classificados como frios, os valores entre os 37,5º e 62,5º percentis, que são os 25% valores intermediários, são classificados com neutros e aqueles superiores ao 75º percentil como quentes, que representa os 25% maiores valores.

3.2.2. Estimativa de Quantis

De acordo com Xavier e Xavier (1999), existem vários métodos na estatística clássica que são utilizados na estimativa de quantis (percentis) Q_p . Os quais são resultados dos cálculos efetuados a partir de uma amostra. Em aplicações meteorológicas essa amostra pode ser definida a partir de uma série de observações (x_1, x_2, \dots, x_n) de uma mesma variável aleatória X .

Na literatura estatística, os métodos ou procedimentos destinados à estimativa de quantis, classificam-se em dois grupos:

(i) Partindo diretamente da série de observações (x_1, x_2, \dots, x_n) de uma variável X , num dado intervalo do ano (mês, bimestre, trimestre, quadrimestre, semestre, quadra chuvosa, etc.) ao longo dos N anos de observações;

(ii) Ou, a partir de uma lei de probabilidade que tenha sido ajustada a esses dados.

Neste estudo foi aplicado o grupo (i), onde os dados são dispostos em ordem não decrescente.

No entanto, para uma variável contínua, o cálculo de um quantil qualquer a partir dos dados ordenados seguirá o seguinte algoritmo:

Etapa 1 - Dispor dos dados ou observações x_1, x_2, \dots, x_n (n é o número de observações).

Etapa 2 - Ordenar os dados: $y_1 < y_2 < \dots < y_j < \dots < y_n$

Nesse caso os dados podem ser dispostos em ordem estritamente crescente, ou seja, não ocorrem repetições.

Etapa 3 - Evidenciar qual o número de ordem j de cada elemento y_j da série assim ordenada.

Etapa 4 - para cada elemento y_j determinar a "ordem quantílica" p_j que lhe corresponde, mediante a seguinte expressão:

$$p_j = \frac{j}{(N+1)}; \quad j = 1, 2, \dots, N \quad (1)$$

Etapa 5 - Finalmente, para calcular o "quantil" Q_p para uma "ordem quantílica" p qualquer, segue-se:

1) Se p coincidir como algum p_j já obtido, então

$$Q_p = Q_{p_j} = y_{j+1} \quad (2)$$

2) Se p não coincidir, haverá um índice j tal que $p_j < p < p_{j+1}$, donde, $Q(p)$ será obtido por interpolação, como se indica através da Figura 3.3.

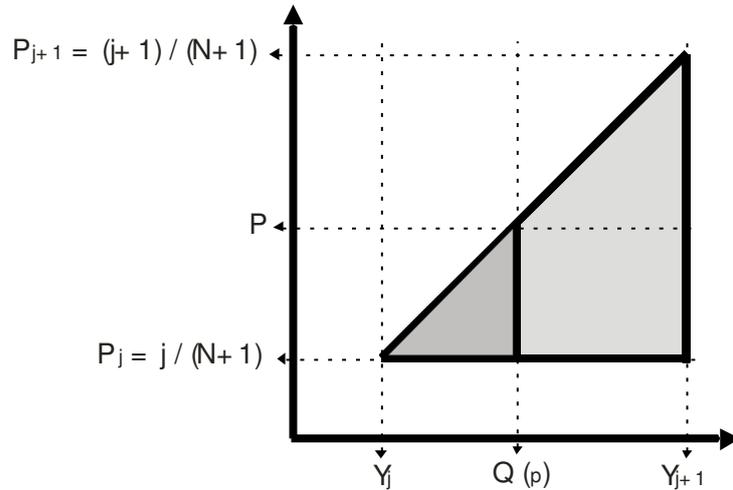


Figura 3.3: Cálculo por interpolação linear para o quantil Q_p

A interpolação linear toma como base a proporcionalidade entre os lados de dois triângulos semelhantes, o que em último caso pode resultar em uma *regra de três*. Dessa forma, teremos:

$$\frac{(Q_p - y_j)}{(y_{j+1} - y_j)} = \frac{(p - p_j)}{(p_{j+1} - p_j)}, \quad \text{no qual:}$$

$$Q_p - y_j = \frac{(p - p_j)}{(p_{j+1} - p_j)} \times (y_{j+1} - y_j), \quad \text{logo:}$$

$$Q_p = y_j + \frac{(p - p_j)}{[p_{j+1} - p_j]} \times (y_{j+1} - y_j) \quad (3)$$

Na verdade, os casos 1 e 2 podem ser englobados na mesma fórmula, supondo $p_j < p < p_{j+1}$; obviamente, quando $p = p_j$ a fórmula se reduz a $Q_p = y_j$.

Deve-se tomar alguns cuidados na interpolação do item 2 da etapa 5, cujo procedimento nem sempre é feito corretamente, exceto para a mediana. Por outro lado, ressaltamos que o uso da expressão: $p_j = \frac{j}{(N+1)}$, em vez de: $p_j = \frac{j}{(N)}$, para o cálculo dos quantis em geral é a mais apropriada.

No caso do trabalho em tela têm-se 804 trimestres corridos ($N = 804$). Portanto, o 25º percentil corresponde ao y_{201} , enquanto, o 37,5º e 62,5º correspondem às médias de y_{301} e y_{302} e de y_{502} e y_{503} , respectivamente, e para 75º é y_{603} .

Ressalta-se que os valores calculados não são exatamente 25% dos menores, 25% intermediários e 25% maiores, pois nos casos que os 25% menores terminavam em um valor -0,70 e os valores seguintes também eram -0,70 iria até o número com o último -0,70, mas se

tínhamos 3, 4 ou 5 números nestas condições e o valor -0,70 começava 2 números antes do número equivalente ao 25%, fez a escolha pelo o número menor de pontos, tal que os números de pontos ficaram entre 24,5% e 25,6%. Procedimentos semelhantes são usados para os demais quantis.

Detalhes do método dos quantis pode ser obtidos em Xavier e Xavier (1999) e em Xavier et al. (2002).

De posse das informações dos períodos frios, neutros e quente foram calculadas as médias e os desvios padrões das manchas solares para cada período de cada área, do Pacífico e do Atlântico, e de ODP. Para testar se as médias de cada série realmente são diferentes foi realizado o teste t de student para comparação de duas médias.

3.2.3. Estimativa de t de Student para Comparações de Médias

Supondo que Y_{25} e S_{25} são a média e o desvio padrão do número de manchas solares, cujos valores são inferiores ao 25º percentil e Y_{75} e S_{75} a média e o desvio padrão do número de manchas solares, cujos valores são superiores ao 75º percentil. Para testar se as médias Y_{25} e Y_{75} são diferentes pode usar um teste t de student, com n_{gl} grau de liberdade, dado por:

$$t = \frac{Y_{25} - Y_{75}}{\sqrt{\frac{s_{25}^2}{n_{25}} + \frac{s_{75}^2}{n_{75}}}} \quad (4)$$

em que n_{25} e n_{75} são as quantidades dos números de manchas solares inferiores a 25º percentil e superiores ao 75º percentil, respectivamente. E n_{gl} é calculado da seguinte forma:

$$n_{gl} = \frac{\left(\frac{s_{25}^2}{n_{25}} + \frac{s_{75}^2}{n_{75}}\right)^2}{\frac{\left(\frac{s_{25}^2}{n_{25}}\right)^2}{n_{25}-1} + \frac{\left(\frac{s_{75}^2}{n_{75}}\right)^2}{n_{75}-1}} \quad (5)$$

Como n_{25} é igual a n_{75} . Então, pode-se escrever $n_{25} = n_{75} = n$, e a equação (5) torna-se $n_{gl} = n-1$, ou seja, o teste é feito com $n-1$ grau de liberdade.

Caso o t calculado pela Equação (4) seja superior a $t_{crítico}$ obtido com nível de significância α e n_{gl} , diz que as médias são diferentes com $(1-\alpha) \times 100\%$ de confiança estatística, mas se t calculado é inferior ao $t_{crítico}$ as médias não são consideradas diferentes.

Ressalta-se que também são testadas diferenças de médias entre os períodos frios, neutros e quentes.

Detalhes do teste t de student para comparação de médias amostrais pode ser obtido em Cecon et al. (2012).

Como exemplo, a seguir são mostrados os cálculos para a TSM da área do Niño 3.

A média do número de manchas solares para os períodos frios (25% menores valores de TSM da área do Niño 3) foi 79, para os períodos neutros 113,2 e para os períodos quentes 93,1. Como o número de dados (trimestres móveis) de cada período (frio, neutro e quente) foi de 201 os valores críticos de $t_{0,99}$ (p-valor $\leq 0,01$) e $t_{0,95}$ (p-valor $\leq 0,05$) são 2,62 e 1,98 respectivamente. Os valores de t obtidos cada diferença de médias foram:

$$t_{\text{frios} \times \text{neutros}} = 4,81; t_{\text{frios} \times \text{quentes}} = 2,05; t_{\text{quentes} \times \text{neutros}} = 2,64.$$

Portanto, com base nestes valores, verifica-se que a média do número de manchas solares nos períodos de frios é inferior a dos períodos neutros, com 99% de confiabilidade estatística, e inferior a dos períodos quentes, com 95% de confiança estatística. A média dos períodos quentes é inferior a dos neutros, com 99% de confiabilidade estatística, ou seja, no período de mínimos de número de manchas solares existe probabilidade maior de ocorrência de TSM mais fria na área do Niño 3 (La Niña).

Também foram calculadas as médias e os desvios padrões do número de manchas solares nos períodos de El Niño, La Niña e neutros, conforme classificação do CPC.

O teste da diferença de médias é um bom indicador da dependência de variáveis meteorológicas e oceanográficas de determinados fenômenos geofísicos. Entretanto, para obter conclusões mais precisa, como o tempo de resposta da ATSM ao número de manchas solares (NMS), é oportuno procurar ferramentas estatísticas mais robustas, por exemplo, as transformadas em ondaletas. Portanto, serão realizadas análise de ondaletas cruzadas e ondaletas de coerência entre os fenômenos oceânicos e o número de manchas solares. A seguir são mostrados os procedimentos para a análise em ondaletas.

3.2.4. Transformadas Ondaletas

A propósito, da análise de transformada ondaletas, vale salientar que Torrence e Compo (1998) descreveram um guia prático para o uso desta ferramenta em estudo

climatológico, utilizando variáveis meteorológicas e oceanográficas. Portanto, parte dos escritos a seguir foi retirando do referido artigo.

Seguindo o caminho delineado por Torrence e Compo (1998) é oportuno descrever que a transformada janelada de Fourier apresentou um avanço na análise de séries temporais não estacionárias fazendo uso do espectro de frequência e de teste de significância estatística, entretanto, apresenta limitações, como por exemplo, ineficiência de localização de tempo-frequência, pois impõe uma escala ou "intervalo de resposta" T na análise. Esta ineficiência decorre das frequências $T/(2\delta t)$, que devem ser analisadas a cada passo de tempo, independentemente do tamanho da janela ou das frequências dominantes presentes. Portanto, buscou-se um método de localização tempo-frequência que seja independente da escala, e com isto chegou-se na análise de transformada ondaletas.

3.2.5. Transformada Ondaletas Contínuas

Dado exposto, de acordo com Daubechies (1990), a transformada ondaletas pode ser usada para analisar séries temporais que contenham variabilidades não estacionárias em muitas frequências diferentes. Portanto, é salutar descrever brevemente sobre transformada ondaletas.

A Transformada em Ondaletas na Forma Contínua foi desenvolvida para conseguir mostrar respectivamente sinais de baixa e alta frequência, pois possui janelas móveis no tempo ou no espaço que se dilatam ou se comprimem para capturar esses sinais através de operações integrais. Essa ferramenta é excelente para análise de variações locais de energia dentro de uma série temporal, pela sua decomposição em tempo-frequência-espaço, sendo capaz de obter uma identificação da posição dos picos de potência da série em qualquer localização no plano tempo-frequência e observar como varia no tempo. A Transformada em Ondaleta decompõe o sinal em algumas funções elementares derivadas do processo de dilatação e translação de uma ondaleta-mãe (LAU e WENG, 1995).

Supõe-se que uma série de tempo, x_n , com espaçamento de tempo igual a um δt e $n = 0, 1, \dots, N - 1$. Suponha também que se tenha uma função ondaleta, $\psi_0(\eta)$, que é função de um parâmetro de tempo não dimensional η . Conforme, Farge (1992), para ser admissível como uma ondaleta, esta função deve ter média zero e ser localizada em tempo e espaço de frequência. Um exemplo clássico é a ondaleta de Morlet, que consiste em uma onda plana modulada por uma Gaussiana, e é dada por:

$$\psi_0(\eta) = \pi^{-1/4} e^{i\omega_0 \eta} e^{-\eta^2/2} \quad (6)$$

Em que ω_0 é a frequência não-dimensional, aqui considerada como sendo 6, que de acordo com Torrence e Compo (1998), este valor satisfaz a condição de admissibilidade. O termo função ondaleta é usado genericamente para se referir as ondaletas ortogonais ou não ortogonais. O termo ondaleta base refere-se apenas a um conjunto ortogonal de funções. O uso de uma base ortogonal implica na utilização de transformada ondaleta discreta, enquanto que uma função ondaleta não ortogonal pode ser usada com a transformação ondaleta discreta ou contínua (FARGE, 1992). A transformada ondaleta contínua de uma sequência discreta x_n pode ser descrita como a convolução de x_n com uma versão escalonada de $\psi_0(\eta)$:

$$W_\eta(s) = \sum_{\eta'=0}^{N-1} X_{\eta'} \psi^* \left[\frac{(\eta' - \eta)\delta t}{s} \right], \quad (7)$$

onde o (*) indica o complexo conjugado. Variando a escala de ondaleta s e transladando ao longo do índice de tempo localizado η , pode-se construir uma imagem mostrando tanto a amplitude de quaisquer características versus a escala e como essa amplitude varia com o tempo. O subscrito 0 em ψ foi descartado para indicar que esta ψ também foi normalizado. Embora seja possível calcular a transformada ondaleta usando (7), é consideravelmente mais rápido fazer os cálculos no espaço de Fourier.

Para aproximar a transformada ondaleta contínua, a convolução (7) deve ser feita N vezes para cada escala, o qual N é o número de pontos na série temporal (KAISER, 1994). (A escolha de fazer todas as circunvoluções N é arbitrária e pode-se escolher um número menor). Ao escolher N pontos, o teorema de convolução nos permite fazer todas as N convoluções simultaneamente no espaço de Fourier usando uma Transformada de Fourier Discreta (TFD). A TFD de x_n é dada por

$$\hat{x}_k = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x_n e^{-2\pi i k n / N}, \quad (8)$$

sendo $k = 0 \dots N - 1$ é o índice de frequência. No limite contínuo, a transformada de Fourier de uma função $\psi(t/s)$ é dada por $\hat{\psi}(s\omega)$. Pelo teorema da convolução, a transformada ondaleta é a transformada de Fourier inversa do produto:

$$W_n(s) = \sum_{k=0}^{N-1} \hat{x}_k \hat{\psi}^*(s\omega_k) e^{i\omega_k n \delta t} , \quad (9)$$

Onde a frequência angular é definida como

$$\omega_k = \begin{cases} \frac{2\pi k}{N\delta t} & : k \leq \frac{N}{2} \\ -\frac{2\pi k}{N\delta t} & : k > \frac{N}{2} \end{cases} \quad (10)$$

Usando (9) e uma rotina de transformada de Fourier padrão, pode-se calcular a transformada ondaleta contínua (para um dado s) em todos os n simultaneamente e eficientemente.

Para assegurar que as transformadas ondaletas eq. (4) em cada escala s são diretamente comparáveis entre si e com as transformadas de outras séries temporais, a função ondaleta em cada escala s é normalizada para obter energia unitária:

$$\hat{\psi}(s\omega_k) = \left(\frac{2\pi s}{\delta t}\right)^{1/2} \hat{\psi}_0(s\omega_k), \quad (11)$$

usando as normalizações, em cada escala s tem-se

$$\sum_{k=0}^{N-1} |\hat{\psi}(s\omega_k)|^2 = N, \quad (12)$$

N é o número de pontos. Assim, a transformada ondaleta é ponderada apenas pela amplitude dos coeficientes de Fourier \hat{x}_k e não pela função ondaleta. Usando a fórmula de convolução (7), a normalização é dada por:

$$\psi\left[\frac{(n'-n)\delta t}{s}\right] = \left(\frac{\delta t}{s}\right)^{1/2} \psi_0\left[\frac{(n'-n)\delta t}{s}\right], \quad (13)$$

$\psi_0(\eta)$ é normalizada para ter energia unitária.

Como a função ondaleta $\psi(\eta)$ é geralmente complexa, a transformada ondaleta $W_n(s)$ também é complexa. A transformada pode então ser dividida na parte real, $\Re\{W_n(s)\}$, e parte imaginária, $\Im\{W_n(s)\}$, ou amplitude, $|W_n(s)|$ e fase, $\tan^{-1}[\Im\{W_n(s)\} / \Re\{W_n(s)\}]$. Finalmente, pode-se definir o espectro de energia ondaleta como $|W_n(s)|^2$. Para funções

ondaletas apenas como valor real tais como as DOG (derivados de uma Gaussiana) a parte imaginária é zero e a fase é indefinida.

Para facilitar a comparação de diferentes espectros de energia de onda, é desejável encontrar uma normalização comum para o espectro de ondaleta. Usando a normalização em eq. (11) e referindo-se a eq. (9), o valor esperado para $|W_n(s)|^2$ é igual a N vezes o valor esperado para $|\hat{x}_k|^2$. Para série temporal de ruído branco, esse valor da expectativa é σ^2/N , onde σ^2 é a variância. Assim, para um processo de ruído branco, o valor da expectativa para a transformada ondaleta é $|W_n(s)|^2 = \sigma^2$ para todos os n e s.

Aqui é oportuno ressaltar que uma crítica merecedora de crédito a análise ondaleta é a escolha arbitrária da função ondaleta $\psi_0(\eta)$. Ao escolher a função ondaleta, há vários fatores que devem ser considerados, sendo os principais pontos a ortogonalidade ou não, real ou complexa, largura e forma.

As funções ondaletas não ortogonais mais comuns são: Morlet, Paul, Marr ou Chapéu Mexicano (DOG, $m = 2$) e DOG ($m = 6$). As ondaletas Morlet e Paul são ambas complexas, enquanto, as DOG são reais. De acordo com Torrence e Campo (1998) existem muitos outros tipos de ondaletas, tais como Haar e Daubechies, a maioria dos quais são utilizados para análise de ondaletas ortogonais.

A ondaleta Morlet é complexa e possui características semelhantes às de sinais meteorológicos, sendo simétrica ou assimétrica, apresentando variação temporal brusca ou suave (WENG e LAU, 1994). Por ser complexa é a mais adequada para análise com mudanças na amplitude e fase (DOMINGUES et al., 2016). E por ser contínua, é útil para estudar a variabilidade temporal da energia de cada componente de frequência presente na série temporal. Sendo a mais pertinente para detectar variações nas periodicidades dos sinais geofísicos de forma contínua ao longo das escalas de tempo (RIGOZO, 2003), pois fornece um bom equilíbrio entre a localização de tempo e frequência.

Segundo Ochadlick et al. (1993), a utilização de ondaletas de Morlet ajuda em estudos climáticos podendo ser útil para descobrir evidência do controle direto da temperatura da superfície da Terra por variações na intensidade solar relacionadas à sua variabilidade cíclica.

Por esses motivos nesta pesquisa usou-se como função ondaleta base a Morlet e também por ser uma ondaleta já testada por muitos pesquisadores (WENG e LAU, 1994; TORRENCE e WEBSTER, 1999; RIGOZO, 2003; BOLZAN, 2004) como sendo apropriada para análise de oscilações de baixa frequência em escala interanual e interdecenal.

3.2.6. Transformada Ondaletas Cruzadas

Dadas duas séries temporais X e Y , com transformadas ondaletas $W_n^X(s)$ e $W_n^Y(s)$, pode-se definir o espectro de ondaletas cruzadas como $W_n^{XY}(s) = W_n^X(s) W_n^{Y*}(s)$, onde $W_n^{Y*}(s)$ é o complexo conjugado de $W_n^Y(s)$. O espectro de ondaletas cruzada é complexo, e, portanto, pode-se definir a potencia da ondaleta-cruzada como $|W_n^{XY}(s)|$.

Os níveis de confiança para a potência das ondaletas cruzadas podem ser derivados da raiz quadrada do produto das distribuições de qui-quadrado (χ^2) (JENKINS e WATTS, 1968). Assumindo que ambos os espectros ondaletas são χ^2 distribuídos com v graus de liberdade (GDL) (χ_v^2), a distribuição de probabilidade é dada por

$$F_v(Z) = \frac{z^{2-v}}{\Gamma^2(\frac{v}{2})} Z^{v-1} K_0(z), \quad (14)$$

O qual z é a variável aleatória, Γ é a função Gamma, e $K_0(z)$ é a função de Bessel modificada de ordem zero. A função de distribuição cumulativa é dada pela integral $p = \int_0^{Z_v(p)} f_v(z) dz$, sendo $Z_v(p)$ é o nível de confiança associado à probabilidade p . Dada uma probabilidade p , esta integral pode ser invertida para encontrar o nível de confiança $Z_v(p)$.

Se as duas séries temporais tiverem espectros de Fourier teóricos P_k^X e P_k^Y , então a distribuição de ondaleta cruzada é dada por:

$$f\left(\frac{|W_n^X(s)W_n^{Y*}(s)|}{\sigma_x\sigma_y} < p\right) = \frac{Z_v(p)}{v} \sqrt{P_k^X P_k^Y} \quad (15)$$

σ_X e σ_Y são os respectivos desvios-padrão. $Z_v(p)$ é o nível de confiança associado com a probabilidade p , para uma Função de Densidade de Probabilidade, definida pela raiz quadrada do produto de duas distribuições χ^2 . Para $v = 1$ (ondaletas reais), $Z_1(95\%) = 2.182$, enquanto que para $v = 2$ (ondaletas complexas), $Z_2(95\%) = 3.999$.

3.2.7. Transformada Ondaletas Coerência

Outra quantidade útil da análise de Fourier é a coerência, definida como o quadrado do espectro cruzado normalizado pelos espectros de potência individuais. Isto dá uma quantidade entre 0 e 1, e abrange a correlação cruzada entre duas séries temporais como uma função da frequência. A transformada coerência ainda pode ser interpretada como a medida da coerência entre duas ondaletas simples em tempo-frequência. Para o caso de duas séries

temporais, esta explica quanto da variabilidade de uma determinada variável pode ser explicada pela variabilidade da outra. Torrence e Webster (1999) definiram a transformada coerência entre duas séries temporais como:

$$R_n^2(s) = \frac{|s(s^{-1}W_n^{XY}(s))|^2}{s(s^{-1}|W_n^X(s)|^2).s(s^{-1}|W_n^Y(s)|^2)} \quad (16)$$

S é o operador de suavização. A equação (16) é uma expressão semelhante a do coeficiente de correlação. Portanto, a transformada ondaleta coerência também é uma medida do coeficiente de correlação localizado em tempo-frequência.

O nível de significância estatística da Transformada Ondaleta Coerência (WTC) foi determinado usando o método de Monte Carlo em 95% de confiança estatística (valor_p < 0,05). Maiores detalhes em Grinsted et al. (2004).

3.2.8. Ângulo de Fase

Na transformada ondaleta cruzada, bem como na transformada ondaleta coerência, a relação de fase, entre as variáveis analisadas, pode ser visualizada por vetores que determinam a diferença no tempo de resposta de uma série em relação à outra, ou simplesmente, a relação de fase entre ambas. Neste contexto, Barbosa e Blitzkow (2008) descreveram que existem várias possibilidades de representação dos vetores de fase e que podem mostrar interações entre duas grandezas físicas como também a forma de oscilação entre elas. Dessa forma, foi empregada a diferença de fase entre as séries, conforme exposto por Torrence e Webster (1999), Bloomfield et al. (2004) e Grinsted et al. (2004).

Para uma completa interpretação da diferença de fase entre as séries analisadas, deve-se seguir o diagrama da Figura 3.4 que mostra a forma de orientação dos vetores entre duas séries temporais. Uma observação importante é a de que se deve saber qual série temporal é processada primeiramente.

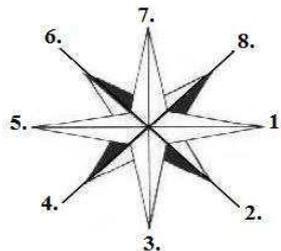


Figura 3.4: Relação do ângulo de fase entre duas séries temporais.

Fonte: Barbosa e Blitzkow, 2008.

Os ângulos de fase relativos as indicações numéricas da Figura 3.4 representa o seguinte:

1. Série 1 e Série 2 completamente em fase.
2. Série 2 avançada 45° da Série 1. A Série 1 responde em $1/8$ do período.
3. Série 2 avançada 90° da Série 1. A Série 1 responde em $1/4$ do período.
4. Série 2 avançada 135° da Série 1. A Série 1 responde em $3/8$ do período.
5. Série 1 e Série 2 estão em fase completamente opostas.
6. Série 2 defasada 225° da Série 1, ou a Série 1 avançada 135° da Série 2. A Série 2 responde com $3/8$ do período.
7. Série 2 defasada 90° da Série 1. A Série 2 responde em $1/4$ do período.
8. Série 2 defasada 45° da Série 1. A Série 2 responde em $1/8$ do período.

Com o objetivo de quantificar e qualificar a relação entre as manchas solares e a ATSM, em termos de propagação dos seus ciclos de oscilação, é necessário o conhecimento da diferença de fase entre elas. Como em termos de grandeza o Sol é muito superior à Terra, segundo o INPE (2016c) tendo 333.000 vezes mais massa e 1.304.000 vezes mais volume que nosso planeta, se utilizou como referência que a primeira série temporal é a de manchas solares influenciando ou não posteriormente a ATSM.

A fim de ver o atraso temporal de resposta da ATSM em relação à variação das manchas solares, utilizou-se a representação de vetores de fase conforme o esquema da Figura 3.5, que mostra orientação dos vetores de fase entre as manchas solares e a ATSM.

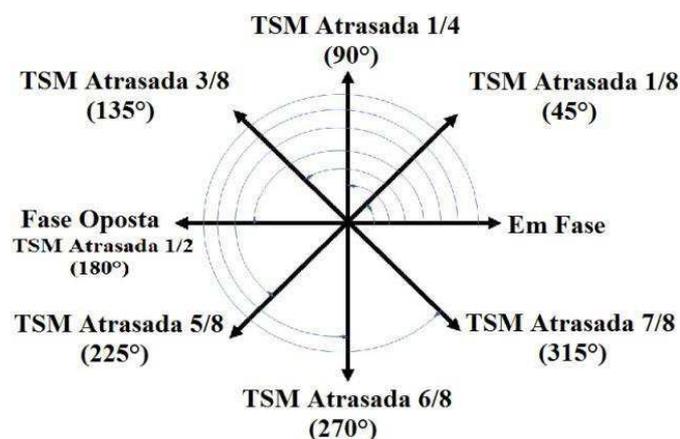


Figura 3.5: Relação do ângulo de fase (graus e período) entre as Manchas Solares e a ATSM.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Análise dos períodos frios, quentes e neutros de TSM no Pacífico Equatorial e Atlântico Tropical.

Primeiramente se realizou a média móvel de três meses das séries temporais mensais que iniciam em dezembro de 1949 e encerram em janeiro de 2017. Escolhe-se a média móvel de três meses porque o NCEP usa este valor (três meses) na caracterização de períodos de El Niño, La Niña e Neutro na área Niño 3.4. Ressalta-se que os valores dos últimos quatro meses de todas as séries temporais estavam sob análise, ou seja, eram dados preliminares, e seus valores constam na Tabela 3.1. É oportuno destacar que o método de classificação de períodos Quentes, Frios e Neutros está explicado no Capítulo referente à metodologia.

A proposito, a Figura 4.1 mostra ao longo de toda série os períodos Frios e Quentes para os valores trimestrais de Anomalia da TSM (ATSM) nas áreas Atlântico Tropical Norte (ATN), Atlântico Tropical Sul (ATS) (Figura 3.2, página 31), dos Niños 1+2, 3, 3.4 e 4 (Figura 3.1, página 30), da área de todos os Niños (Méd), exceto o 3.4, que é parte das áreas dos Niños 3 e 4, e Oscilação Decenal do Pacífico (ODP). Bem como os períodos de La Niña e El Niño da área Niño 3.4, conforme classificação do CPC/NCEP/NOAA, e os períodos de fase Fria e Quente da ODP obtidos do ESRL/NOAA constam com asterisco (ODP*).

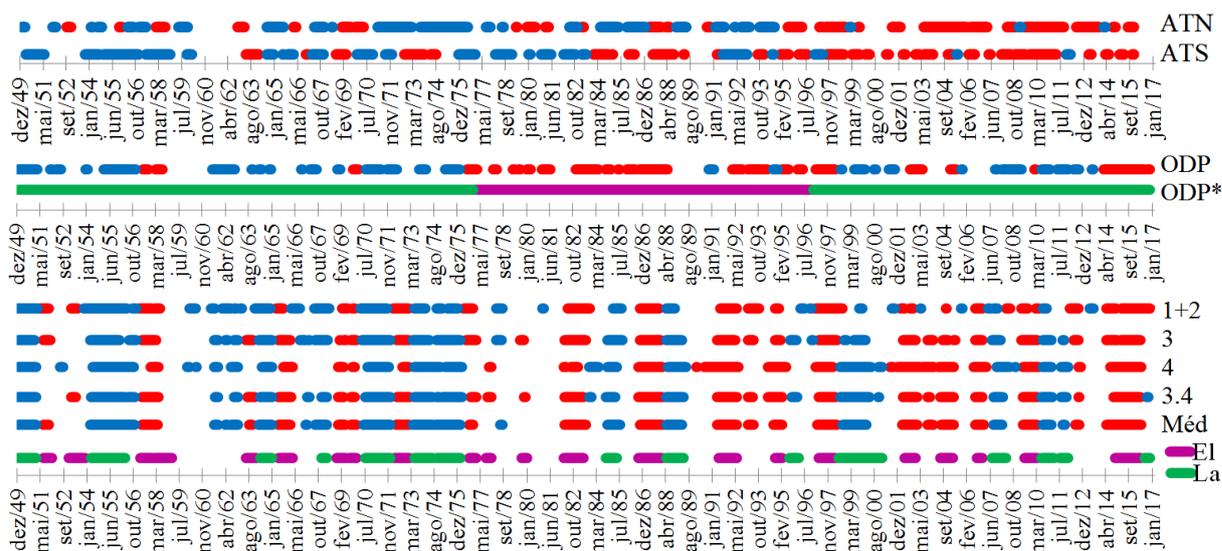


Figura 4.1: Períodos de TSM Fria em azul e Quente em vermelho para as áreas ATN, ATS, Niños 1+2, 3, 4, 3.4, para a média (Méd) de todas as áreas dos Niños e ODP. Com as cores verde e magenta esta a classificação da ODP*, El Niño (El) e La Niña (La) da área Niño 3.4 conforme a classificação pela NOAA.

É visível que a partir de 1995 houve um aquecimento simultâneo no ATN e no ATS, nesse mesmo ano ocorreu uma mudança de fase da Oscilação Multidecenal do Atlântico (OMA) de fria para quente. O índice OMA foi definido por Enfield et al. (2001) como a média corrida de 10 anos da ATSM no Atlântico Norte incluindo a região do Atlântico Tropical Norte (ATN). A OMA, assim como a ODP, possui baixa frequência tendo duas fases distintas, uma fria e outra quente. A sua fase fria ocorreu de 1965 até 1995 e as suas fases quentes são de 1927 até 1964 e de 1995 até os dias atuais.

A ODP iniciou em 1997 sua fase fria, apenas dois anos após o início da fase quente da OMA. Os resultados calculados para período quente e frio da ODP ficaram semelhantes à classificação de sua fase, com algumas exceções, por exemplo, o período quente que inicia em março de 2014 e perdura até dezembro de 2016 quando encerra a série de valores trimestrais calculada (dados preliminares de janeiro a junho de 2017 mostram ODP positiva).

Observa-se uma semelhança de comportamento na ATSM para todas as regiões dos Niños, sendo que por volta de 2001 até meados de 2006, e também em 2013, a região Niño 1+2 difere das demais com alguns curtos períodos frios.

Por outro lado, a Tabela 4.1 mostra as médias e os desvios padrões do número de manchas solares observados nos períodos frios, neutros e quentes das áreas dos Niños 1+2, 3, 3.4 e 4 e da área de todos os Niños, conforme explicado. Comparando o valor das médias dos períodos frios e quentes nas áreas dos Niños, observa-se que os períodos frios possuem valor menor de média do que os períodos quentes, sendo a maior diferença na área do Niño 3, e a menor na área do Niño 4. Os maiores valores das médias estão nos períodos neutros, sendo a maior diferença também na área do Niño 3 e a menor na área do Niño 4.

Tabela 4.1: Médias e desvios padrões (D.P.) do número de manchas solares observadas nos períodos frios, neutros e quentes nas áreas dos Niños.

Períodos		Niño 1+2	Niño 3	Niño 3.4	Niño 4	Média dos Niños
Frios	Média	81,2	79,0	83,0	85,2	84,2
	D.P.	62,4	63,0	64,5	63,8	62,8
Neutros	Média	114,6	113,2	106,5	98,7	101,9
	D.P.	76,7	79,2	75,3	79,1	79,4
Quentes	Média	89,5	93,1	90,1	92,2	93,2
	D.P.	73,3	74,3	74,8	71,2	72,0

Analisando os resultados do teste estatístico (Tabela 4.2) pode se afirmar que a região Niño 3 foi a que melhor apresentou significância estatística referente a diferença das

médias, pois tem 99% de confiança ($\text{valor}_p < 0,01$), que a média de manchas solares é diferente e maior no período neutro do que nos períodos frio e quente, e 95% de confiança ($\text{valor}_p < 0,05$) que a média de manchas solares é diferente e maior no período quente do que no frio. Então, no período de mínimos de número de manchas solares, existe probabilidade maior de ocorrência de TSM mais fria (La Niña) e no período de máximo número de manchas existe probabilidade maior de ter TSM neutro ou quente (El Niño) para essa área.

A região Niño 4 foi a que menos respondeu tendo apenas 90% de confiança estatística ($\text{valor}_p < 0,1$) que as médias são diferentes entre os períodos neutro e frio.

Dentre os períodos quentes, neutros e frios, o teste t de Student apresentou maior significância estatística na comparação entre os períodos neutros e frios. Alcançou 99% de confiança entre os períodos neutros e frios para as regiões do Niño (1+2, 3 e 3.4), 95% de confiança para a média de toda a região dos Niños, com exceção do período da região do Niño 4 que atingiu 90% de confiança. O que significa que quanto menor quantidade de manchas solares maior é a probabilidade de TSM fria (La Niña) para todas as regiões.

As médias de manchas solares entre os períodos quente e neutro atingiram 99% de confiança nas áreas Niño 1+2 e Niño 3 e 95% de confiança na área do Niño 3.4, portanto, quando maior for o número de manchas solares maior é a chance de ocorrer período neutro do que quente nessas regiões.

Entre os períodos frio e quente a confiança foi de 95% apenas na região Niño 3, sendo mais provável que no maior número de manchas solares ocorra TSM quente (El Niño) e no menor número de manchas solares ocorra TSM fria (La Niña) nessa região.

Tabela 4.2: Valores calculados de t do teste de Student para comparação de médias do número de manchas solares observadas nos períodos frios, neutros e quentes nas áreas dos Niños.

	Niño 1+2		Niño 3		Niño 3.4		Niño 4	
Períodos	Neutros	Quentes	Neutros	Quentes	Neutros	Quentes	Neutros	Quentes
Frio	4,79	1,23	4,81	2,05	3,36	1,02	1,88	1,04
Neutro		3,37		2,64		2,20		0,86

	Média dos Niños	
Períodos	Neutros	Quentes
Frio	2,49	1,35
Neutro		1,16

A Tabela 4.3 mostra as médias e os desvios padrões do número de manchas solares observados durante os períodos frios, neutros e quentes das áreas ATN, ATS e do índice da ODP. Observa-se que as médias dos períodos frios são superiores as dos períodos quentes para o Atlântico Tropical Norte e Sul e na ODP ocorre o inverso, ou seja, semelhante às regiões de Niños possuindo maior média no período quente do que no frio.

As médias dos períodos neutros foram superiores as dos períodos quentes e frios, com exceção no ATS que foi a única de todas as áreas analisadas que apresentou maior média no período frio do que no neutro. Pelo cálculo das médias constatou-se que a quantidade de manchas solares é maior em períodos neutros, por não apresentar o tempo de resposta da TSM em relação à variação no número de manchas solares.

Tabela 4.3: Médias e desvios padrões (D.P.) do número de manchas solares observadas nos períodos frios, neutros e quentes nas áreas ATN e ATS e ODP.

Períodos		ATN	ATS	ODP
Frios	Média	86,2	122,3	86,1
	D.P.	71,4	83,5	63,7
Neutros	Média	109,2	99,1	106,4
	D.P.	75,4	71,2	79,6
Quentes	Média	81,8	65,9	87,9
	D.P.	67,2	51,7	71,5

Ao analisar o teste estatístico (Tabela 4.4) se verificou que na área ATS houve significância estatística com 99% de confiança em todos os períodos de TSM, confirmado que a média do número de manchas solares é maior no período frio do que nos demais períodos e é menor no período quente que nos demais períodos. Então, quanto maior for o número de manchas solares maior será a probabilidade de TSM fria e quanto menor for o número de manchas maior a probabilidade de TSM quente, com 99% de confiabilidade estatística nessa região. Ressalta-se que estes resultados reforçam os obtidos por Curtis e Hastenrath (1995) que observaram uma relação oposto entre as anomalias de TSM do Pacífico Equatorial e do Atlântico Tropical Sul.

Sugere-se que a forçante solar influencia de forma diferenciada na resposta da TSM do ATS, em comparação da TSM do ATN e Pacífico Tropical, devido à Anomalia Geomagnética do Hemisfério Sul, que facilita a entrada de raios cósmicos na região do ATS, aumentando a quantidade de nucleação e formação de nuvens. Contudo, quanto maior o número de manchas solares, mais intenso está o Sol, ocorrendo maior evaporação da camada

superficial do oceano, que diminui a TSM. Enquanto o menor o número de manchas solares diminui a evaporação, e como a formação de nuvens é diferenciada nessa região, formam um tampão retendo as ondas longas, consequentemente aumenta a TSM.

Tanto na área ATN quanto na ODP a média de manchas do período frio é inferior ao neutro, com 99% de confiança estatística, sendo então mais provável ocorrer TSM fria quando houver menor quantidade de manchas solares nessas duas áreas (Tabelas 4.3 e 4.4).

Tabela 4.4: Valores calculados de t do teste de student para comparação de médias do número de manchas solares observadas nos períodos frios, neutros e quentes nas áreas NALT e ATS e ODP.

	ATN		ATS		ODP	
Períodos	Neutros	Quentes	Neutros	Quentes	Neutros	Quentes
Frio	3,15	0,63	2,97	8,12	2,82	0,27
Neutro		3,85		5,33		2,46

É conveniente informar que na metodologia do NCEP um período é considerado de El Niño (La Niña) se a média móvel de três meses da ATSM for superior ou igual a 0,5 (inferior ou igual a -0,5) por cinco meses consecutivos. Caso os valores da ATSM estivesse fora destas condições o período é considerado Neutro.

Usando este método, para área do Niño 3.4, no período de janeiro de 1950 a dezembro de 2016, verifica-se 199 períodos de La Niña, 220 de El Niño e 385 Neutros. O número de períodos de La Niña e de El Niño não difere muito do número de períodos frios e quentes, respectivamente, usados na presente pesquisa. Entretanto, para os períodos neutros há uma diferença considerável, 385 no caso do NCEP e 201 deste estudo, que considerou os 25% valores intermediário (mais centrais). Portanto, se faz necessário aplicar a mesma metodologia de cálculo de média, desvio padrão e teste t para o número de manchas solares, durante os períodos de La Niña, Neutro e El Niño definido pelo NCEP para área do Niño 3.4.

A Tabela 4.5, mostra que a média do número de manchas solares é maior no período neutro, seguido pelo de El Niño e menor no de La Niña, ou seja, semelhantes às obtidas para os períodos frios, quentes e neutros (Tabela 4.1, área Niño 3.4).

Tabela 4.5: Médias e desvios padrões (D.P.) do número de manchas solares observadas nos períodos de La Niña, El Niño e Neutro na região Niño 3.4 e número de trimestres corridos de observações de La Niña, El Niño e Neutro no período de janeiro de 1950 a dezembro de 2016.

	La Niña	Neutro	El Niño
Média	78,42	103,47	96,22
D.P.	60,56	72,44	81,30
Número	199	385	220

Também pelo uso do teste t de Student com 99% de confiança estatística (valor_p < 0,01) é possível afirmar que a média das manchas solares no período de La Niña é menor que no período neutro, sendo mais provável ocorrer La Niña quando tiver menor quantidade de número de manchas solares. Pois com menor número de manchas, menor a irradiância solar total (constante solar), conseqüentemente menor a TSM para essa região. Em conjunto ocorre a interação entre os raios cósmicos e a formação de nuvens por nucleação. Quanto menor o número de manchas solares, maior a quantidade de nuvens, devido a maior entrada de raios cósmicos, diminuindo a TSM.

E se obteve 95% de confiança estatística que, quanto menor o número de manchas solares, maior a probabilidade de El Niño do que neutro. Contudo é esperado um tempo de resposta do oceano as variações solares, principalmente quanto ao aquecimento, motivo no qual o período neutro possui o maior número de manchas solares.

Também, observou-se que a média no número de manchas solares é menor no período de La Niña que no de El Niño, entretanto, estatisticamente não é possível afirmar. Estes resultados são semelhantes aos obtidos para os períodos frios, quentes e neutros para área do Niño 3.4 (Tabela 4.2), ou seja, metodologias diferentes, mas resultados equivalentes.

Tabela 4.6: Valores calculados de t do teste de student para comparação de médias do número de manchas solares observadas nos períodos La Niña, El Niño e Neutro na área do Niño 3.4.

	La Niña	El Niño
El Niño	2,56	
Neutro	4,42	1,10

Diante dos resultados, têm-se evidências de que o número de manchas solares possui médias diferentes durante os períodos de temperaturas neutras, frias e quentes da superfície dos oceanos Atlântico e Pacífico Tropicais.

Verificou-se com 99% de confiança que há diferença entre as médias de manchas solares em períodos de TSM fria e neutra em todas as regiões estudadas, sendo que a região

de menor flutuação, Niño 4, com confiança de 90%, e somando toda área dos Niños (Média dos Niños) a confiança fica de 95%. Então, quanto menor a quantidade de manchas solares, maior a probabilidade de ocorrer períodos de TSM baixa, com exceção da região do Atlântico Tropical Sul, por estar na região de maior Anomalia Geomagnética do planeta, portanto, possui comportamento diferenciado.

Esse resultado é consistente com a interpretação de Svensmark e Friis-Christensen (1997) e Carlsaw et al. (2002) de que a máxima energia solar reduz os fluxos de raios cósmicos e isso pode reduzir a cobertura de nuvens, aumentando, assim, a insolação em superfícies terrestres e marítimas.

Ao observar as médias por períodos distintos se verificou que a dos períodos neutros apresenta maior quantidade de manchas solares que os outros períodos, com exceção da região ATS, concordante com o artigo de Higginson et al. (2004), os quais demonstraram que os eventos de El Niño tendem a ocorrer 2-3 anos antes e depois dos picos de manchas solares, produzindo uma periodicidade média com cerca de metade do comprimento de onda do ciclo solar de onze anos.

Stager et al. (2007) mostram como os ciclos das manchas solares podem ser utilizados para prever anomalias positivas de precipitação regionais com bastante antecedência na região equatorial do Lago Vitória no Leste do continente africano. Eles demonstram que embora as flutuações de irradiância associados ao ciclo das manchas solares sejam fracas, os seus efeitos na precipitação tropical podem ser amplificados, através das interações com as TSM e sistemas de circulação atmosférica, incluindo ENOS e a condução na convecção e migrações da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT). Na região de estudo de Stager et al. (2007) a maior precipitação está associada com a passagem sazonal da ZCIT, assim como a região Norte do Nordeste do Brasil.

4.2. Análise Espectral

A análise espectral de Fourier é uma técnica de estudo sobre periodicidade em uma série de tempo regular, feita com medidas em intervalos regulares de tempo, bastante utilizada. No campo da meteorologia e climatologia, nas últimas duas décadas se emprega a técnica de Análise de Ondaleta, em substituição a Fourier. Portanto, nesta pesquisa antes da análise de ondaleta são mostrados os harmônicos de Fourier para o número de manchas solares.

A propósito, a Figura 4.2 apresenta o gráfico dos harmônicos de Fourier das frequências dos números de manchas solares, de janeiro de 1801 a dezembro de 2015. Períodos correspondentes aos picos são indicados em meses. Na série de 214 anos ou 2568 meses e dentro desses a maior amplitude é referente a 129 meses (~11 anos), a segunda maior amplitude referente a 1290 meses (~107,5 anos), terceira maior referente a 143,33 meses (~11,94 anos).

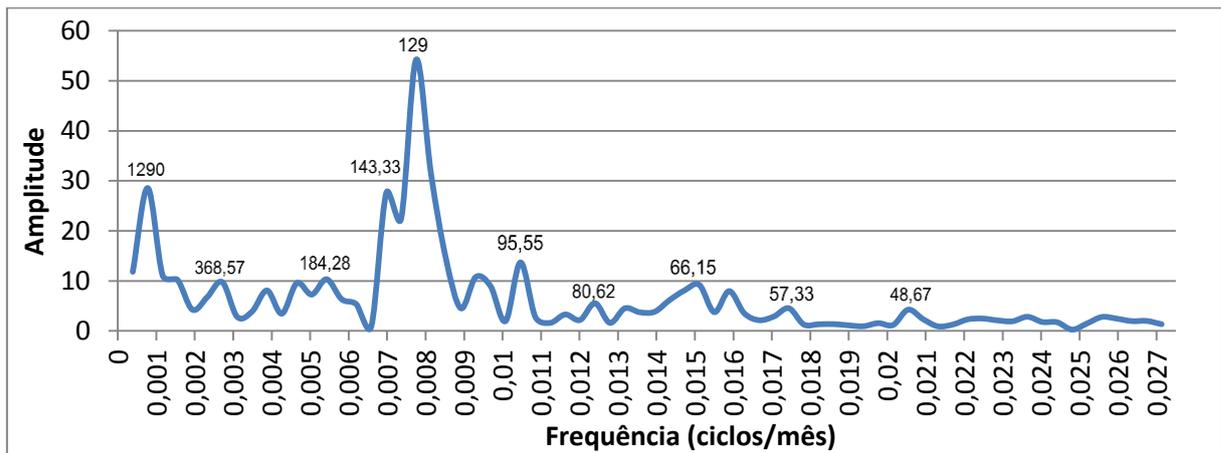


Figura 4.2: Gráfico harmônicos de Fourier dos Números de Manchas Solares de janeiro de 1801 a dezembro de 2015 e sua frequência em ciclos por mês, os valores no topo de cada ciclo indicam o período em meses das oscilações demarcadas.

Diante desse resultado pode-se afirmar que de 1801 até dezembro de 2015 o ciclo solar de Schwabe (~11 anos) é o de maior importância, em seguida o ciclo solar de Gleissberg (~100 anos), porém não se pode afirmar em quais anos ocorreram. A análise de Fourier conseguiu captar algumas periodicidades da série de dados, como os ciclos de Gleissberg (~100 anos), de Schwabe (~11 anos), mas os ciclos de Hale (~22 anos) e segundo harmônico do ciclo de Schwabe (~6 anos) não foram bem representados. Também não é possível verificar em que anos ocorreram as fases positivas e negativas de cada onda. Para obter informações nestas lacunas apresentadas pela análise de Fourier é necessário recorrer para análise de ondaletas.

Como se trata de Séries Temporais de tempo finito e a transformada de Fourier assume que os dados são cíclicos, ocorrerão erros no início e no final do espectro de potência de ondaletas, os efeitos de borda não podem ser ignorados. O Cone de Influência (COI) é a região do espectro de ondaletas em que os efeitos de borda tornam-se importantes (Torrence e Compo, 1998) e está representado pela grossa linha contínua na cor cinza. Os períodos fora desse cone possuem esse efeito de borda que diminui a confiabilidade da análise.

Nas Figuras “b” do Espectro de Potência em Ondaletas, com a finalidade de destacar os padrões locais nos escalogramas e diagramas de fase, se emprega uma paleta de cores, onde a cor azul representa menor energia e vermelho mais intensidade de energia.

4.2.1. Análise das configurações de Ondaleta

Na análise das Ondaletas contínuas é possível verificar em quais períodos e escalas temporais (frequência) ocorrem as maiores amplitudes (energia) e intensidade de repetições nas Séries Temporais analisadas. Identificando possíveis tendências, periodicidades, variações aleatórias, entre outros, a fim de analisar cada Série Temporal para após comparar e compreender a relação entre o ciclo solar e a ATSM.

4.2.1.1. Análise das configurações de ondaleta continua para o número de manchas solares

A Figura 4.3 foi construída a partir dos valores da média móvel de três meses de janeiro/1950 a dezembro/2016 obtida dos valores mensais do número de manchas solares de dezembro/1949 a janeiro/2017.

Analisando a Figura 4.3(a) observou-se que o ciclo solar mais intenso ocorreu de 1955 até 1964, Ciclo Solar 19, com o pico máximo de 1956 a 1959, o ciclo solar mais fraco iniciou em 2008 e perdura até os dias atuais, Ciclo Solar 24.

Na Figura 4.3(b) – espectro de potência de ondaleta (ondaleta de Morlet) – o eixo vertical do gráfico mostra as periodicidades em meses, o eixo horizontal mostra o comprimento temporal em anos da série, e as cores do gráfico são índices do número de manchas solares que caracteriza a amplitude do sinal em cada escala de frequência representando a energia associada a cada frequência existente.

Verificou-se pelo espectro que a fase de oscilações com periodicidade mais homogênea em frequência e intensidade das manchas solares corresponde àquelas com frequência entre 96 e 192 meses (8 e 16 anos), condizente como o ciclo de solar de Schwabe. Ainda na mesma Figura, também é possível perceber propagação com frequência mais elevada (de 5 a 8 anos) de 1950 a 1962 e de 1974 a 1994, e frequências ainda maiores em torno de 32 meses (2,66 anos) entre 1986 e 1992, a primeira está relacionado com o 2º harmônico do ciclo de Schwabe (BOLZAN, 2004).

Ao comparar as Figuras 4.3(a) e 4.3(b) percebe-se que nos períodos de máximo solar identificados na primeira figura, ocorre simultaneamente oscilações com uma frequência de

aproximadamente 16 meses, visto na segunda figura. Ondas de atividades do Sol se propagando com esta periodicidade, de 1,3-1,4 anos, também foram encontradas e investigadas por diversos autores (BROOMHALL, 2011; FLETCHER et al, 2010; HOWE et al, 2000; LIVSHITS e OBRIDKO, 2006; WANG e SHEELEY, 2003; RICHARDSON et al, 1994). Richardson et al (1994) perceberam essa periodicidade no vento solar, que está intimamente relacionado com as manchas solares, sugerindo que esteja relacionada com a estrutura magnética determinada pelos processos de geração de fluxo dentro do Sol.

Segundo Wang e Sheeley (2003) essas periodicidades não persistem de ciclo para o ciclo, mas aparecem apenas de forma esporádica. Fletcher et al (2010) confirmam que esse sinal é mais proeminente durante períodos que coincidem com máximos do ciclo de onze anos e possui uma amplitude semelhante nos modos de todas as frequências, contrastando com o sinal de onze anos, que é cerca de cinco vezes mais forte nos modos de frequência mais alta. Conforme Fletcher et al (2010) o sinal de quase 2 anos deve ter sua origem em camadas significativamente mais profundas do que o sinal de onze anos e só fica visível quando o fluxo magnético sobe.

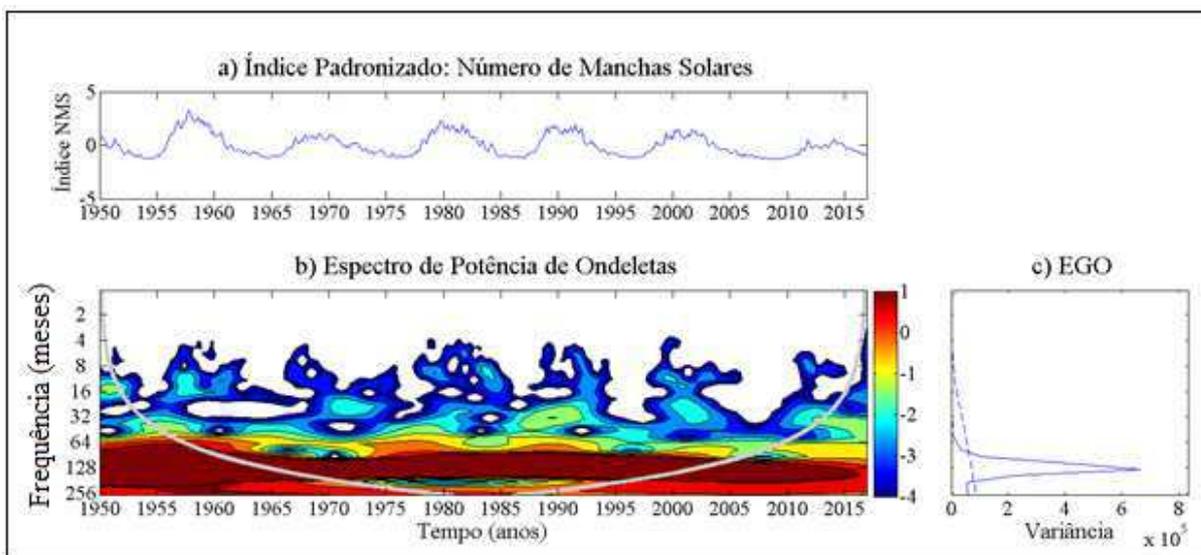


Figura 4.3: (a) Valores da media corrida de três meses do número de Manchas Solares por ano, desde 1950 até 2016. (b) Diagrama tempo-frequência da série temporal de manchas solares (espectro de potência de ondaletas). A paleta de cores indica a energia, sendo a menor energia na cor azul e a maior intensidade de energia em vermelho. A linha cinza em (b) representa o cone de influência (COI), onde os efeitos de borda tornam-se importantes. (c) Espectro Global de Ondaletas (EGO), associada a cada frequência de meses, a linha pontilhada em (c) representa o intervalo de confiança do EGO (95%).

O Espectro Global de Ondaleta (EGO) (Figura 4.3(c)) mostra no eixo das ordenadas (vertical) a frequência em meses igual à Figura 4.3b, e no eixo da abscissa a variância total

(energia) associada a cada frequência em meses, onde se confirma o ciclo de 8 a 16 anos, conhecido como ciclo Schwabe, aproximadamente onze anos, como a periodicidade dominante. Antes desse máximo ocorre uma variância menor desde a frequência de aproximadamente 4 anos até a de aproximadamente 8 anos, que corresponde ao segundo harmônico do ciclo de onze anos (RIGOZO e NORDEMANN, 2000; BOLZAN, 2004).

Após a forte queda do pico máximo de variância, existe um pequeno aumento em direção à frequência cada vez menor, acima de 256 meses (~21 anos), correspondendo ao ciclo de Hale, no entanto, não se pode concluir sobre as periodicidades superiores a 21 anos através desta análise de ondaleta pois, o nível de significância dos resultados fica comprometido devido a série-temporal não ser suficientemente longa. O ciclo na frequência de 1,3-2,6 anos é imperceptível, pois o EGO é a soma do espectro de potência em Ondaletas, essa variação visível somente no período máximo solar intercala com períodos sem manchas.

Estes resultados são semelhantes aos obtidos por Bolzan (2004), porém ele não utilizou a média corrida de três meses e sua série de dados foi de 1749 até 2002. Bolzan também optou pela função Ondaleta de Morlet, por ser a que possui um formato característico próximo das características encontradas na série-temporal e devido a essa ser bastante útil para analisar as várias frequências pertencentes ao sistema e mostrar uma relação entre o tempo e frequência.

4.2.2. Análise Espectral: Transformadas Cruzada e Coerência em Ondaletas

A análise das Transformadas Cruzadas em Ondaletas (XWT) e Transformada Coerência em Ondaletas (WTC) são métodos eficazes para testar propostas de prováveis ligações entre duas Séries Temporais (Grinsted et al., 2004).

A XWT encontra regiões comuns no espaço de tempo-frequência em que as duas Séries Temporais possuem covariabilidade de energia, ou seja, mostra a maior energia entre ambas, a potência comum. Indicam quais frequências e qual local da série os sinais possuem alta energia em comum, dando informações sobre a relação de fase no espaço tempo-frequência entre as duas Transformadas Contínuas de Ondaletas.

Enquanto, a WTC é a medida de coerência entre as duas Transformadas Contínuas de Ondaletas, podendo encontrar uma coerência significativa mesmo que a potência entre elas seja baixa, não determina a covariabilidade na energia.

Os resultados apresentados a seguir com a aplicação da XWT e WTC nas séries temporais com a média corrida de 3 meses, tem por finalidade principal observar a estrutura

dinâmica da ATSM em eventos decenais e também avaliar o tempo de resposta que o Sol provoca no oceano e em que escala de energia isso acontece, ou seja, verificar como os ciclos solares e a ATSM interagem entre si.

4.2.2.1. Análise das configurações de ondaleta continua e espectral para o número de manchas solares e a ATSM na área do Niño 1+2

Na Figura 4.4 estão plotados: o índice padronizado de ATSM da área do Niño 1+2, os espectros de potência e global de ondaletas deste índice padronizado, bem como as ondaletas cruzadas e de coerência entre o índice padronizado e o índice do número de mancha solar, para o período de janeiro de 1950 a dezembro de 2016.

Mais uma vez, ressalta-se que são valores oriundos de média corrida de três meses obtidos dos dados mensais de dezembro de 1949 a janeiro de 2017. Por esse motivo, no domínio de tempo inferior a quatro meses não se observam variações nas séries de tempo analisadas, ou seja, filtrou-se a intrasazonalidade. Para os demais índices de ATSM das áreas dos Niños, ODP, ATN e ATS são apresentados esta mesma configuração de Figuras.

Analisando a série na Figura 4.4(a) se percebe dois picos mais intensos de ATSM positiva, o primeiro nos anos de 1982 e 1984 e o segundo nos anos de 1997 e 1999, em 1954 foi o ano de ATSM negativa mais intensa. O diagrama tempo-frequência da série temporal de TSM (espectro de potência) na Figura 4.4(b) mostra a escala de frequência com maior intensidade na TSM no período de 32 a 50 meses nos anos de 1963 até 1976, a partir deste ano a frequência aumenta de 32-50 para pouco mais 64 meses e se prolonga até 2006. Também se observa oscilações com periodicidade de 128 meses de 1973 até 2014, sendo que a partir de 1997 o sinal desta oscilação está fora do cone de influência.

Percebe-se pequenos núcleos durando em torno de 5 anos da frequência de 16 a 32 meses centrados em 1953, 1965, 1973, 1983, 1988, 2007, menos intenso centrado em 2007 e em janeiro de 2014, mais intenso entre 1995 e 2000. Esses pequenos núcleos ocorrem exatamente nas fases de mínimo solar, apenas o centrado em 1983, que ocorre num momento que as manchas oscilam para o decaimento do ciclo 21, e o centrado de 2007, que ocorre no máximo solar do atual ciclo 24, que é o menor ciclo solar registrado nos últimos 100 anos. Ainda é possível observar oscilação com frequência de 256 meses que se prolonga de 1974 até o final da série, porém devido ao comprimento da série (804 meses) esta oscilação se encontra fora do cone de influência, pois para onda com esta frequência é possível observar no máximo duas repetições, que é relativamente pouco para ter confiança estatística.

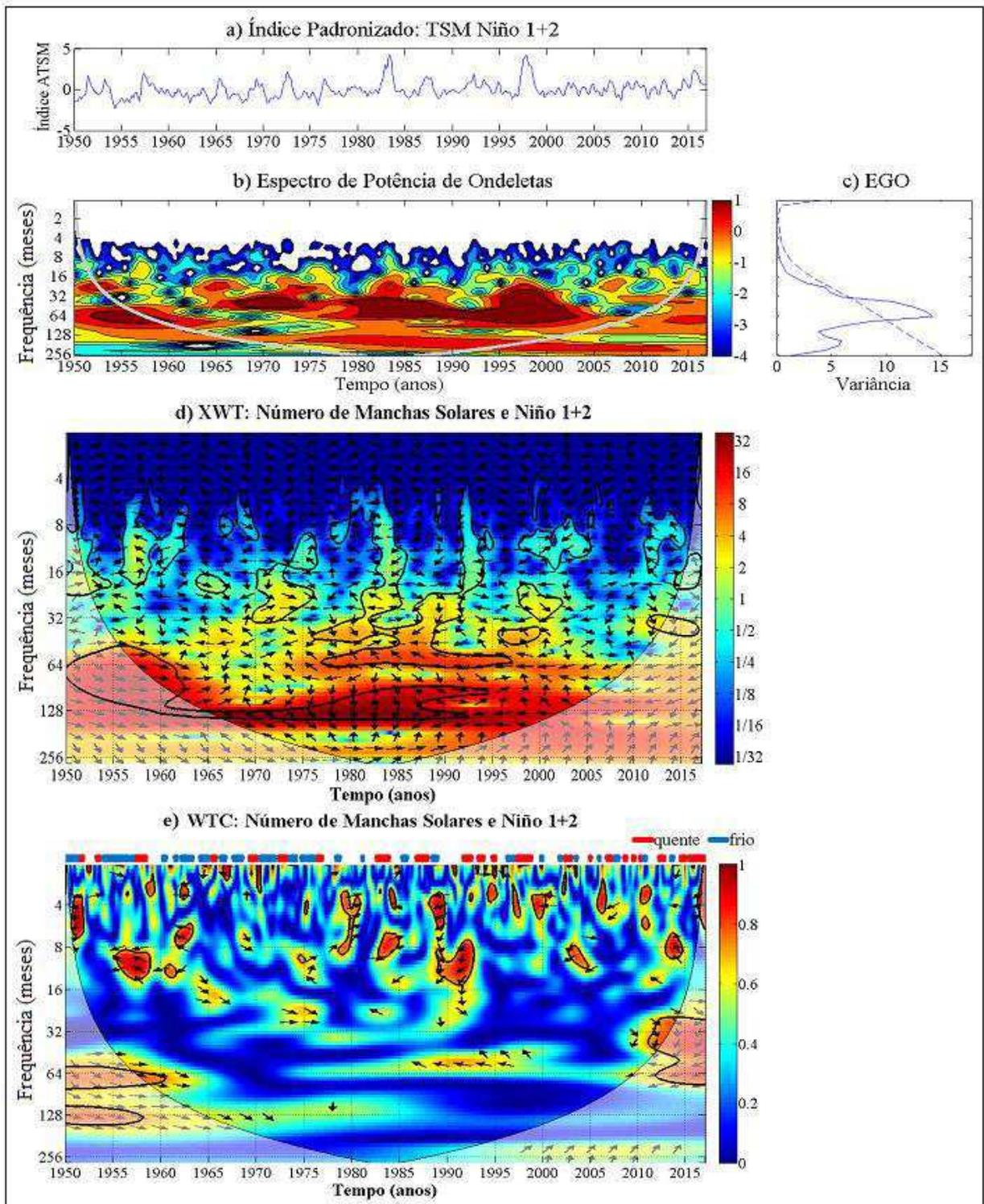


Figura 4.4: (a) Série temporal da média móvel da ATSM na região Niño 1+2 para o período de 1950-2016 e seu respectivo (b) Espectro de Potência de Ondeletas, menor energia (azul) e maior intensidade de energia (vermelho). (c) Espectro Global de Ondeletas (EGO), a linha pontilhada em (c) representa o intervalo de confiança do EGO (95%). (d) Transformada Ondaleta Cruzada (XWT), as cores indicam a covariabilidade de energia máxima (vermelho) e mínima (azul) entre o Número de Manchas Solares (NMS) e da ATSM na região Niño 1+2 e (e) Transformada Ondaleta Coerência (WTC), as cores indicam a coerência entre as duas séries que varia de 0 (azul) a 1 (vermelho). O contorno preto grosso designa o nível de significância de 5% em relação ao ruído vermelho e o Cone de Influência (COI) representado pela linha em formato de arco. As setas indicam as diferenças de fases entre as duas séries. Acima da Figura WTC, linha com a evolução no tempo dos períodos classificados como frios (azul) e quentes (vermelho) para essa região.

A Figura 4.4(c) EGO, soma toda potência espectral de uma mesma frequência ao longo de toda série (janeiro/1950 a dezembro/2016) e associa a cada frequência de meses (periodicidade), a linha pontilhada representa o limite de confiança do espectro global, neste estudo usou-se a confiança estatística de 95% ($\text{valor}_p < 0,05$). Para as oscilações com frequência de 32 a 80 meses, centrado em 64 meses (5,33 anos), de um modo geral, a variância aumenta com mais intensidade na frequência de 16 meses até chegar em 24 meses, sendo que antes aumenta lentamente, de 6 até 16 meses. Na frequência de 128 até 250 meses também se observa um pico de variância, que observando na Figura 4.4(b) persiste ao longo de quase toda série analisada.

Para investigar a relação entre a variabilidade das séries (ATSM da área do Niño 1+2 e número de mancha solar) e determinar as escalas de tempo onde essa relação ocorre foi realizada a Transformada Cruzada em Ondaletas (XWT), Figura 4.4(d) que mostra a covariabilidade de energia e o vínculo entre as fases das séries, e a Transformada Coerência em Ondaletas (WTC), Figura 4.4(e), para averiguar como as séries covariam, ou seja, como estão correlacionadas.

Enfatiza-se que realizou filtragem em todas as séries. Portanto, na WTC, as correlações com frequência menor de 4 meses são ruídos brancos, conforme se verifica na XWT, que mostra que nesta escala de tempo as séries não possuem energia associada a essa correlação.

Para a frequência de 4 e 8 meses, na XWT, observa-se pequenos núcleos onde a ATSM está atrasada 270° (3-6 meses) em 1951, em fase 1957, fase oposta (atrasada 180°) 1959, atrasada 135° (2-3 meses) 1962, fase oposta 1967, atrasada 315° (5-7 meses) 1969, alterando as fases 1982, atrasada 225° (3-4 meses) 1989, atrasada 225° (4-5 meses) 1992, fase oposta 1999, atrasada 225° (3-4 meses) 2007 e fase oposta 2011, em relação ao número de manchas solares (NMS).

Quando as duas séries estão em fases opostas significa que ao aumentar (ou diminuir) o NMS diminui (ou aumenta) a ATSM, e é equivalente a um atraso de 180° de uma série em relação à outra, e quando estão na mesma fase ao aumentar (ou diminuir) o NMS aumenta (ou diminui) a ATSM. A WTC, Figura 4.4(e), confirma a covariabilidade e fases das séries nos anos 1951, 1962, 1969, 1989, 1992, sendo que em 1983 as duas séries estão quase em fase, e apresenta um núcleo em 1979 com a TSM quase em fase com o NMS, e centrado em 2013 com a ATSM atrasada 2 meses em relação ao NMS indicando coerência entre as séries nessas regiões.

Para a periodicidade de 8 a 16 meses na XWT, observa-se núcleos onde a ATSM está atrasada 135° - 90° (4-6 meses) entre 1956-1959, em fase oposta (180°) 1960-1962, atrasada 45° - 135° (2-5 meses) 1971-1976, atrasada 225° (7-10 meses) 1983-1986, atrasada 270° (6-12 meses) 1991-1994, em fase 1997-2001, atrasada 225° (5-9 meses) 2002-2005, atrasada 135° (3-6 meses) 2011-2015, em relação ao NMS.

A WTC apresenta dois núcleos de forte coerência entre as séries, de 1955-1959 que confirma a covariabilidade e fase descrita no primeiro núcleo da XWT, e de 1988-1992 na qual não aparecia energia intensa relacionada nessa região. Também confirma a covariabilidade e fase nos núcleos descritos em XWT de 1960-1962, 1971-1976, 2002-2005 e 2011-2015. Os demais núcleos descritos em XWT a correlação entre NMS e ATSM não apresentam significância estatística.

Na frequência 16 e 32 meses na XWT, os núcleos com ATSM e NMS quase em fase foram observados entre 1963 e 1966, em fase de 1970 a 1976, com fase oposta (180°) de 1981 a 1985, com ATSM defasada 270° (18-24 meses) de 1987 a 1991, com coerência (correlação) estatisticamente significativa na covariabilidade e em fase, como pode ser observado na WTC, porém o núcleo de 1970-1976 está deslocado no tempo na WTC estando centralizado em 1975 e mantem a mesma fase. O núcleo de 1997-2002 com ATSM defasada 315° (28 meses) que se observa em XWT não apresenta coerência ao observar essa região na WTC.

A frequência 32 e 48 meses na XWT apresenta energia de covariabilidade, de 1976-1989 com a TSM defasada variando de 315° (35 meses) até ficar em fase oposta do NMS, e possui um núcleo de 1995-1999 com TSM defasada 90° (10 meses), sendo que esse núcleo não possui nenhuma coerência conforme se observa na WTC, e a primeira região apresenta muito baixa coerência.

Para oscilações com periodicidade de 48 a 64 meses a XWT apresenta um núcleo de alta energia de covariância de 1977-1996, onde a ATSM inicia defasada 135° (24 meses) e com o passar do tempo à defasagem torna-se fora de fase (180°). Na WTC essa área está menor e centralizada de 1987-1996, porém possui coerência e se confirma que a ATSM esta em fase oposta (180°) ao NMS, também existe um núcleo de coerência no final da série onde estas estão em fases opostas, apesar de estar a maior parte do núcleo fora do COI, não se descarta devido à confiança estatística de 95% dentro do contorno preto.

Na XWT se observa uma intensa energia de covariância ao longo de toda a série na frequência de 64 a 128 meses, sendo essa frequência em que a ATSM do Niño 1+2 e os NMS possuem maior covariabilidade de energia. No início as duas séries estão quase em fase,

ocorre uma mudança de fase centrada em 1980 quando a ATSM atrasa 270° , 192 meses em relação aos NMS, e após 1985 a ATSM atrasa 225° , 160 meses em relação aos NMS, até que as duas séries ficam completamente opostas a partir de 1991. Na WTC a coerência se dá do início da série até aproximadamente 1988 e se confirma as fases dentro desse período.

Para a frequência de 256 meses, a XWT aparenta ter uma energia de covariância associada ao longo de toda série, estando a ATSM em fase com o NMS. Na WTC apresenta uma área com coerência já fora do COI a partir de 1997 até o final da série.

No espectro de potência de ondaletas da região do Niño 1+2, nas frequências entre 16 e 32 meses os núcleos de energia estão associados às maiores amplitudes da ATSM, tanto de mínima quanto de máxima, e ocorrem geralmente nos mínimos solares. Esses núcleos aparecem na XWT com energia associada entre as séries e a WTC mostra que esse resultado possui coerência (correlação) estatisticamente significativa em 1965, 1975, 1983 e em torno de 1991, o que implica que possivelmente o Sol produz mudança na ATSM para esse período.

Assim como para a frequência de 64 meses, que corresponde ao segundo harmônico do ciclo de Schwabe, no período de 1975 a 2000 anos observa-se uma possível influência solar na ATSM (ver Figuras 4.4(b), (d) e (e)). Enquanto, na frequência de 128 meses que corresponde ao ciclo solar de onze anos verifica-se esta provável influência, da atividade solar na ATSM do Niño 1+2, do início da série até 1985.

Os correspondentes espectros de ondaletas mostram que os núcleos de períodos de tempo menores (inferiores de 16 meses) não obedecem nenhum padrão de fase e apesar de possuírem energia associada possuem duração relativamente curta e, possivelmente, estão associados a distúrbios transientes.

4.2.2.2. Análise das configurações de ondaleta contínua e espectral para o número de manchas solares e a ATSM na área do Niño 3

Na série de ATSM para a região Niño 3, Figura 4.5(a), observa-se que a maior TSM ocorreu em 1997, outro pico em 1983 e em 2016, e a menor em novembro de 1955.

Na Figura 4.5(b) é possível verificar pequenos aglomerados de baixa energia entre 4-8 meses, a partir da frequência de ~ 12 meses até em torno de 17 meses existem pequenas regiões com variação de energia, enquanto, que na de 17-32 meses se observam núcleos de energia que ocorrem com duração em torno de 5 anos intercalados, sendo 5 anos de energia associada a essa frequência e 5 anos sem energia associada ao mesmo período, apenas nos anos de 1981 e 1990 que não possui essa pausa de 5 anos. Também, se observa que os máximos de ATSM ocorreram nos anos que tinha esse núcleo de energia ativo, e por

coincidência ou não, os núcleos ocorreram nos períodos de mínimo solar. Já para frequência de 32-64 meses é a que possui maior período de tempo com energia associada, e as entre 128 e 256 meses também um grande núcleo de energia.

No EGO, Figura 4.5(c), em torno da frequência de 12 meses a variância começa a aumentar, e nas de 31 a 65 meses apresenta 95% de confiança estatística com pico centrado na frequência de 64 meses, após decai e apresenta outro pico menor centrado em 128 meses de variância.

A Transformada Cruzada em Ondas (XWT), Figura 4.5(d) não mostra energia associada às frequências inferiores a 4 meses, pois filtrou a intrasazonalidade e a Figura 4.5(e) com a Transformada Coerência em Ondas (WTC) apresenta ruídos brancos para essas frequências.

Na frequência de 4-8 meses a XWT, apresenta estruturas com baixo nível de energia e de curta duração, ou seja, distúrbios transientes, dentre dessas as mais intensas são de 1960-1962 com a ATSM defasada de 3-1 mês, 1982-1984 com a ATSM defasada de 315° - 90° (7-2 meses), de 1990-1992 com a ATSM defasada 1 mês, de 2010-2011 com a ATSM em fase oposta do NMS. Nem todas as regiões com valores de energia correspondem a mudanças na ATSM.

A WTC apresenta pequenos núcleos que confirma a fase e coerência do apresentado em XWT e possui algumas regiões de coerência que não contam com nenhuma energia associada, como o caso dos núcleos em 1995, 1997 e 2003 podendo ser associado a algum ruído.

Para oscilações com frequência de 8-16 meses, a XWT mostra a covariabilidade de energia da ATSM estando, de 1950-1953 defasada 270° (6-12 meses), de 1955-1962 em fase, de 1960-1962 defasada 90° (2-4 meses), em 1967 em fase oposta, de 1967-1976 com a ATSM alterando de fase oposta para 135° e 270° (4-6 meses), de 1977-1980 com ATSM variando de 90° (3 meses) até ficar na mesma fase, de 1982-1985 em fase, de 1991-1994 com ATSM defasada 6-12 meses, de 1998-2005 com a fase variando muito e em 2012 com ATSM defasada de 2-4 meses, em relação ao NMS.

A WTC confirma as fases de XWT e apresenta as regiões que possuem covariância de energia em XWT como regiões menores em coerência entre as séries, com alguns núcleos centrados em 1961, 1992 e 2003. Esses períodos podem estar relacionados com as flutuações de TSM anuais.

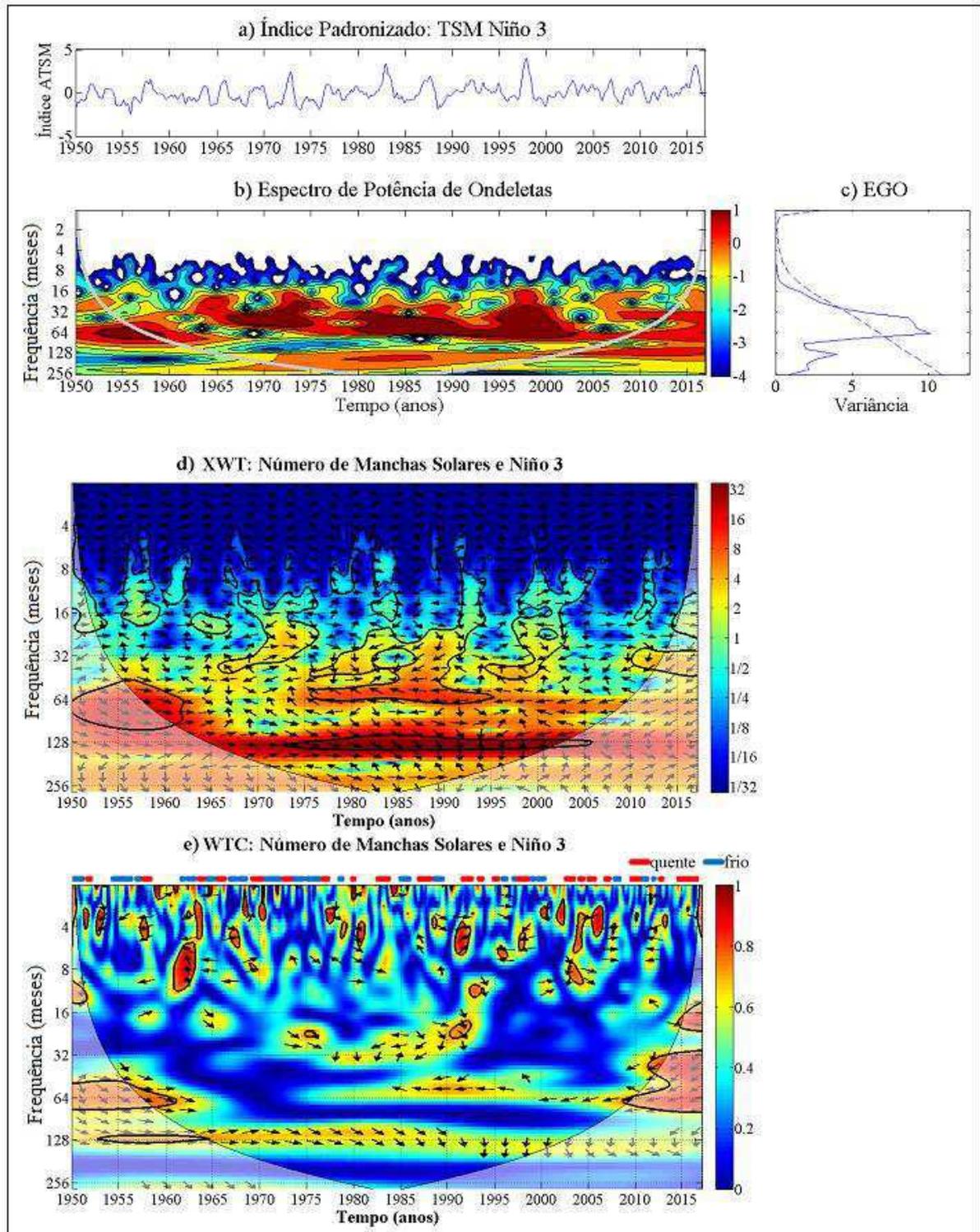


Figura 4.5: (a) Série temporal da média móvel da ATSM na região Niño 3 para o período de 1950-2016 e seu respectivo (b) Espectro de Potência de Ondaletas, menor energia (azul) e maior intensidade de energia (vermelho). (c) Espectro Global de Ondaletas (EGO), a linha pontilhada em (c) representa o intervalo de confiança do EGO (95%). (d) Transformada Ondaleta Cruzada (XWT), as cores indicam a covariabilidade de energia máxima (vermelho) e mínima (azul) entre o Número de Manchas Solares (NMS) e da ATSM na região Niño 3 e (e) Transformada Ondaleta Coerência (WTC), as cores indicam a coerência entre as duas séries que varia de 0 (azul) a 1 (vermelho). O contorno preto grosso designa o nível de significância de 5% em relação ao ruído vermelho e o Cone de Influência (COI) representado pela linha em formato de arco. As setas indicam as diferenças de fases entre as duas séries. Acima da Figura WTC, linha com a evolução no tempo dos períodos classificados como frios (azul) e quentes (vermelho) para essa região.

Na frequência de 16-32 meses, na XWT, observa-se uma pequena área de 1962-1967 com a ATSM defasada 315° (14-21 meses) e uma grande área de 1970-1976 com a ATSM alterando de fases oposta na frequência de 16 meses para em fase na de 32 meses, de 1979-1985 a ATSM está com fase oposta ao NMS, e de 1985-1992 a ATSM defasada 270° , e de 1997-2002 a ATSM alterando de fases e um último núcleo fora do COI com a ATSM em fase, com relação ao NMS.

Dessas áreas todas possuem um menor tamanho e também intensidade menor de sinal na WTC, apenas o núcleo entre 1997-2002 não possui nenhuma coerência associada, ou seja, correlação sem significância estatística. Os dois núcleos com coerência para as frequências de 16-32 meses são: em 1975 com a ATSM defasada 315° (21 meses) e de 1990-1992 com a ATSM defasada 270° (18 meses) do NMS.

Para as frequências de 32-64 meses observa-se dois núcleos com forte covariabilidade de energia na XWT, o primeiro de 1950-1961, com a ATSM mudando de fase e na área interna ao COI quase em fase com o NMS. Essa mesma região também possui um núcleo de coerência em WTC, confirmando a correlação e fase da ATSM em relação ao NMS. O segundo núcleo de 1975-1995, com a ATSM em fase oposta ao NMS, não possui núcleo de coerência (correlação sem significância estatística), porém existe uma intensidade de coerência de mesma fase na mesma região, conforme observado em WTC, em que se observa também um núcleo de coerência que inicia em 2008 e a maior parte fora do COI, entretanto, com 95% de confiança estatística ($\text{valor}_p < 0,05$), em que a ATSM está em fase oposta ao NMS.

Para oscilações com frequência de 128 meses observa-se de 1972 até 2005 uma região que apresenta maior intensidade de covariância de energia entre as séries, conforme visualiza a cor vermelha intensa e a linha de contorno em XWT. Na WTC aparece um único núcleo centrado na frequência de 128 meses, de 1953-1964 com apenas uma pequena área dentro do COI, porém ao longo de toda série existe coerência na frequência de 128 meses, com a ATSM em fase em relação ao NMS até 1980, então fica defasada 315° (112 meses) até 1992, quando a ATSM passa a ficar defasada 270° (96 meses) em relação ao NMS até o final da série.

Na frequência de 256 meses, a XWT apresenta energia de covariância do início da série até 1988, porém observa-se coerência WTC com significância estatística de 95% apenas entre 1957-1970, região fora do COI. Contudo, é muito provável que está correlação seja verdadeira devido ao grau elevado da confiança estatística.

4.2.2.3. Análise das configurações de ondaleta continua e espectral para o número de manchas solares e a TSM na área do Niño 4

Analisando a série de ATSM, Figura 4.6(a), verificou-se que o ano de maior valor foi em 2010 e os de menores valores foram 1974 e 1976.

No espectro de potência de ondaletas, Figura 4.6(b) as frequências de 4 e 8 meses possui baixa energia associada, na qual é imperceptível no EGO (Figura 4.6(c)). A partir da frequência de 8-16 meses inicia uma variação de energia que nessa periodicidade possui pequenos núcleos e aglomerados intercalados que ao serem somados apresentam baixa variância no EGO.

Nas frequências de 16-32 meses existem proeminências de energia que parecem apresentar um padrão de repetição, ao comparar com a série de NMS percebe-se que essas regiões ocorrem quando o ciclo solar de onze anos esta no mínimo, com exceção do período de 1986-1990 no qual pertence à transição de mínimo para máximo solar. A análise espectral revelou periodicidades significativas (nível de confiança de 95%) centradas em bandas de periodicidade 30-64, 100-200 meses, após decai e aumenta próximo de 256 meses.

Na Figura 4.6(b) é evidente que as frequências de maior energia são as de 32-64 meses, em que se observam diversos núcleos, e também na de 128 meses, a qual possui um único núcleo que perdura quase toda série de ATSM. A frequência de 256 meses aparece uma energia associada no início da série.

A XWT (Figura 4.6(d)) apresenta pequenos aglomerados de baixa energia na frequência de 4-8 meses, nos quais pelo observado na Figura 4.6(b) não possui associação com a ATSM. Em WTC (Figura 4.6(e)) aparece oscilações com frequência inferior a 4 meses, que são ruído, uma vez que perturbações neste escala de tempo foram filtradas, também é possível observar pequenos núcleos na frequência de 4-8 meses que provavelmente também sejam ruídos.

Na periodicidade de 8-16 meses, a XWT, observam-se núcleos nos períodos de 1950-1953, 1955-1959, 1968-1970, 1972-1976, 1978-1981, 1983-1985, 1988-1990, 1998-2006 e 2010-2012. Ao analisar a WTC é verificado que de 1950-1953 não possui coerência com significância estatística, e as demais regiões possuem, porém em área menor na qual se confirma os mesmos sinais de fase observados em XWT entre a ATSM e o NMS, são esses 225° (8 meses) de 1955-1959, 45° (2 meses) em 1969, 135° (3-6 meses) de 1973-1976, 225° (5 meses) em 1980, fase oposta de 1987-1989, 315° (12 meses) em 2000, 225° (5-8 meses) de 2004-2006, 225° (5 meses) de 2012-2014.

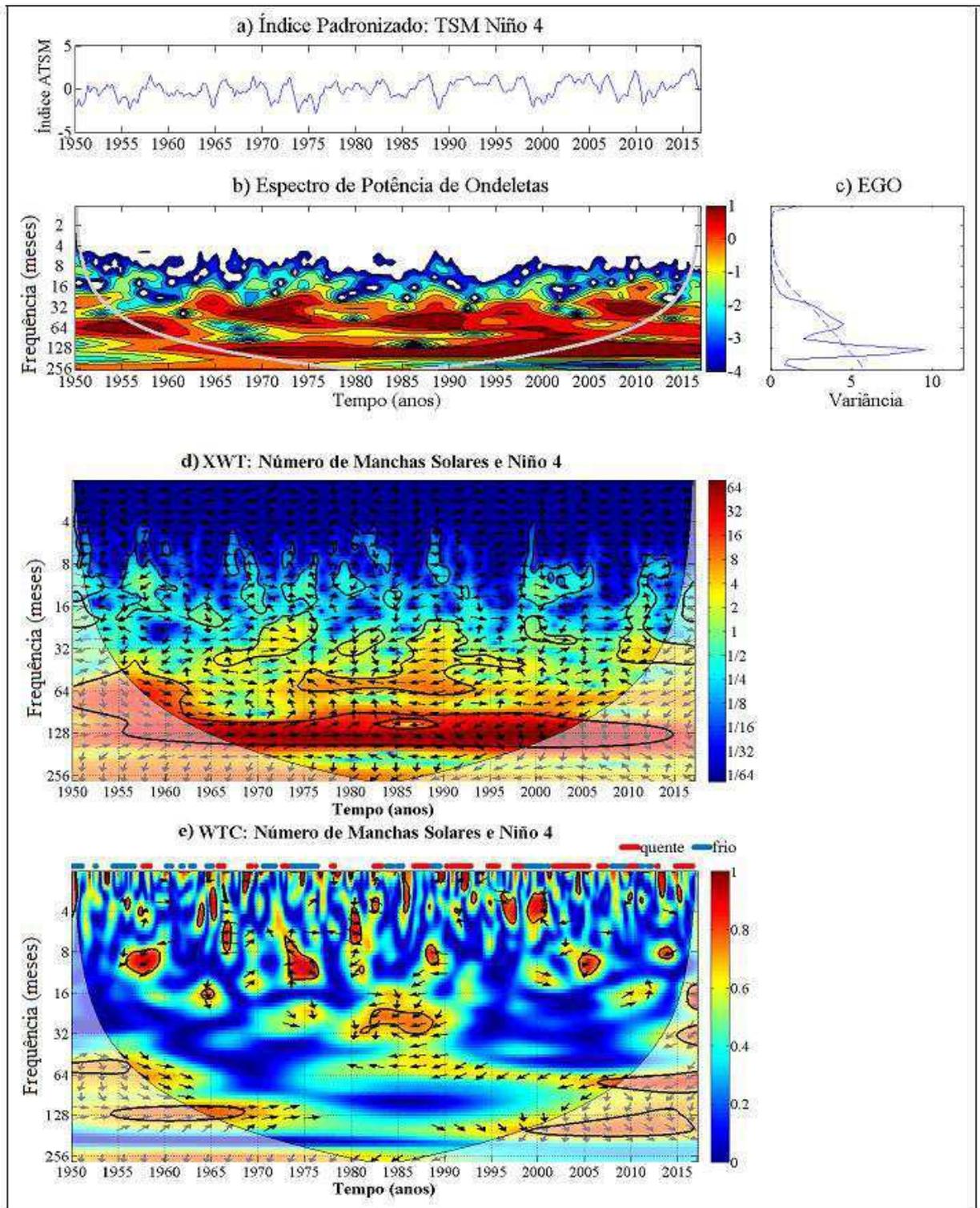


Figura 4.6: (a) Série temporal da média móvel da ATSM na região Niño 4 para o período de 1950-2016 e seu respectivo (b) Espectro de Potência de Ondaletas, menor energia (azul) e maior intensidade de energia (vermelho). (c) Espectro Global de Ondaletas (EGO), a linha pontilhada em (c) representa o intervalo de confiança do EGO (95%). (d) Transformada Ondaleta Cruzada (XWT), as cores indicam a covariabilidade de energia máxima (vermelho) e mínima (azul) entre o Número de Manchas Solares (NMS) e da ATSM na região Niño 4 e (e) Transformada Ondaleta Coerência (WTC), as cores indicam a coerência entre as duas séries que varia de 0 (azul) a 1 (vermelho). O contorno preto grosso designa o nível de significância de 5% em relação ao ruído vermelho e o Cone de Influência (COI) representado pela linha em formato de arco. As setas indicam as diferenças de fases entre as duas séries. Acima da Figura WTC, linha com a evolução no tempo dos períodos classificados como frios (azul) e quentes (vermelho) para essa região.

Na frequência de 16-32 meses na XWT de 1961-1966 existe um núcleo de energia que possui tamanho menor em WTC, em que a ATSM está defasada 270° (12 meses) em relação ao NMS. Na XWT consta um núcleo de 1970-1976 que na WTC possui menor área com seu centro em 1975, em que a ATSM está defasada 270° (18 meses). De 1980-1990 em WTC existe um núcleo de coerência onde a TSM está defasada 225° (10-20 meses) que em XWT se apresentava como dois núcleos de energia separados e com baixa energia em 1985. Na XWT existe um núcleo de energia em 2000 que não possui coerência em WTC.

Nas oscilações com frequência de 32 a 64 meses observa-se um núcleo no início da série com covariabilidade de energia que em XWT se apresenta como um núcleo de coerência fora do COI com a ATSM defasada 56 meses. Na XWT possui um segundo núcleo de 1974-1993 que possui coerência de 1974 até o final da série em WTC, porém o núcleo associado aparece de 2006 até o final da série em toda essa área a ATSM está em fase oposta ao NMS. Na frequência de 128 meses é percebido o maior núcleo e a maior covariabilidade de energia de XWT que perdura toda a série de dados e em WTC aparecem dois núcleos um no início da série até 1968 onde a ATSM está em fase com o NMS e outro de 1998-2016 com a ATSM defasada 315° (112-168 meses). Enquanto, que na frequência de 256 meses observa-se covariabilidade de energia ao longo de toda série em XWT, porém só apresenta coerência de 1950-1990 com a ATSM defasada 225° (160 meses).

4.2.2.4. Análise das configurações de ondaleta contínua e espectral para o número de manchas solares e a TSM na área do Niño 3.4

A ATSM na área do Niño 3.4, Figura 4.7(a) possui maiores picos de TSM em dezembro de 1982, novembro de 1997 e dezembro de 2015, menores em novembro de 1955, dezembro de 1973 e dezembro de 1988. O espectro de potência de ondaletas na frequência de 4-8 meses possui pequenos aglomerados de baixa energia, para a frequência de 8-16 meses começa a apresentar um pouco mais de energia.

Na frequência de 16-32 meses observa-se pequenos núcleos e aglomerados de energia, com certa periodicidade de repetições a cada cinco anos aproximadamente, sendo que nos anos de 1980-1990 não houve o período em torno de cinco anos sem essa variância; esses núcleos / aglomerados de maior energia ocorrem no período de mínimo do ciclo solar de onze anos, com exceção do núcleo entre 1986-1990. Entretanto, na frequência de 32-85 no período de 1985 a 1992 são verificados núcleos de intensa energia, enquanto na de 110 a 200 meses se configurou um núcleo de intensa energia de 1963 até o final da série (Figura 4.7 (b)).

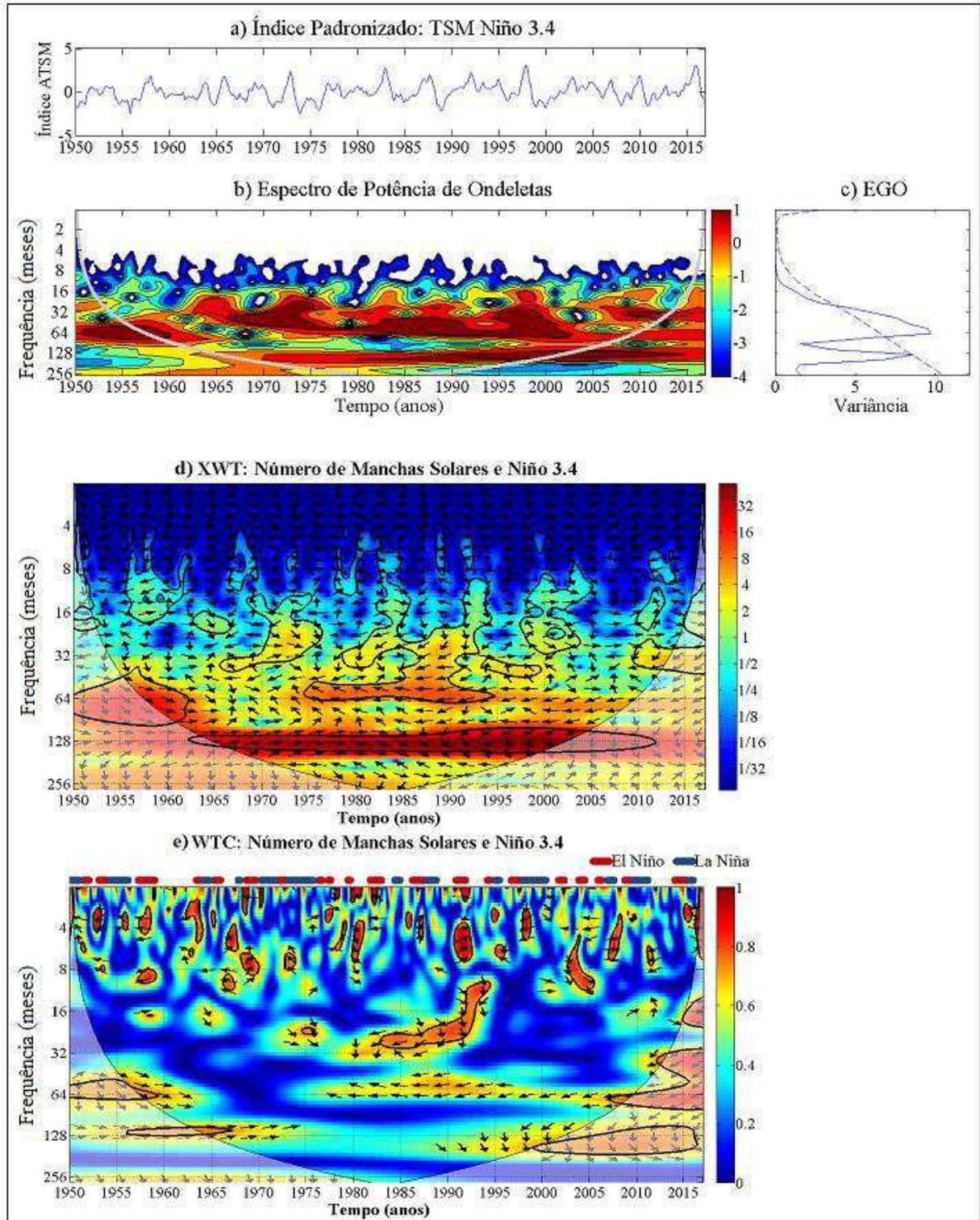


Figura 4.7: (a) Série temporal da média móvel da ATSM na região Niño 3.4 para o período de 1950-2016 e seu respectivo (b) Espectro de Potência de Ondeletras, menor energia (azul) e maior intensidade de energia (vermelho). (c) Espectro Global de Ondeletras (EGO), a linha pontilhada em (c) representa o intervalo de confiança do EGO (95%). (d) Transformada Ondaletra Cruzada (XWT), as cores indicam a covariabilidade de energia máxima (vermelho) e mínima (azul) entre o Número de Manchas Solares (NMS) e da ATSM na região Niño 3.4 e (e) Transformada Ondaletra Coerência (WTC), as cores indicam a coerência entre as duas séries que varia de 0 (azul) a 1 (vermelho). O contorno preto grosso designa o nível de significância de 5% em relação ao ruído vermelho e o Cone de Influência (COI) representado pela linha em formato de arco. As setas indicam as diferenças de fases entre as duas séries. Acima da Figura WTC, linha com a evolução no tempo dos períodos classificados como El Niño (vermelho) e La Niña (azul) pela NOAA.

A análise espectral, Figura 4.7(c), revela periodicidades significativas (confiança de 95%) na frequência de 26-90 meses, e também na frequência de 128 meses.

Como na frequência de 8-4 meses houve pouca variação da TSM, supõe-se que a energia de covariância na XWT (Figura 4.7(d)) e a coerência na WTC (Figura 4.7(e)) sejam ruidos, assim como na frequência superior a 4 meses verifica-se ruídos em WTC.

A frequência nos períodos de 8 e 16 meses a XWT apresenta diversos núcleos de covariância entre a ATSM e o NMS, todos esses apresentam coerência aparecendo em menor dimensão e com mesma fase em WTC, com exceção dos seguintes núcleos que não apresentam coerência estatisticamente significativa, de 1950-1952, 1968-1975 e 1982-1985.

Em WTC os anos que apresentam coerência com a ATSM, de 1957-1959 defasada 6 meses, 1964 fase oposta, 1966-1967 defasada 4 meses, 1969 defasada um mês, 1975 defasada 2 meses, 1980 defasada 7 meses, de 1991-1993 defasada 12 meses, 2000 em fase, de 2002-2005 defasada 11 meses, 2011 defasada 4 meses. Em 1953 aparece coerência em WTC, em que a ATSM atrasou 3 meses com relação ao NMS e não apresenta energia associada em XWT.

Na frequência de 16-32 meses na XWT todos os núcleos de covariância apresentam coerência estatística associada entre as duas séries com exceção do período de 1998-2005. As regiões de coerência são em 1958 com a TSM quase em fase, 1965 com ATSM defasada 7 meses, 1975 com ATSM defasada 21 meses, de 1980-1992 com a TSM variando de fase oposta para 270° (12-36 meses) e ao final da série fora do COI com a ATSM em fase oposta ao NMS.

Em oscilações com frequência de 32-64 meses se observa três núcleos de energia de covariância em XWT com coerência associada e mesma fase em WTC são eles de 1950-1965 com a ATSM defasada 56 meses, de 1974 até o final da série com a ATSM em fase oposta do NMS e fora do COI possui um núcleo de 2011 em diante em que a ATSM está defasada 20 meses.

Na frequência de 64-128 meses em XWT é possível identificar altos valores de energia interdecadal ao longo de todas as séries, região avermelhada com contorno preto, com as setas indicando que as duas séries estão em fase do início da série até 1990 quando a ATSM fica atrasada de 96-112 meses em relação ao ciclo solar. Em WTC esse núcleo se divide entre o início e o final da série e possui a mesma fase, porém pela cor se observa ter coerência ao longo de todas as séries. Enquanto, na frequência de 256 meses a série inicia com certa energia de covariância e coerência, porém fora do COI.

Utilizando a classificação de El Niño e La Niña, do *site* do CPC do NCEP-NOAA e observando a WTC, se averiguou que quando houve El Niño ou La Niña havia uma covariância entre o NMS e a ATSM nas frequências superiores a 32 meses. Em 1997 o núcleo de covariância foi numa frequência maior que 8 meses, e observando a XWT (Figura 4.7(d)) neste ano ocorreram dois núcleos de covariância entre a ATSM e o NMS nas frequências de 8-16 e 16-32 meses, provavelmente devido as fases entre as duas séries estarem se alterando não foi possível identificar a coerência com significância estatística.

Avaliando o comportamento da ATSM na Figura 4.7(a) com a WTC, Figura 4.7(e) se constata que a amplitude da ATSM foi maior nos anos em que não havia coerência com significância estatística entre a ATSM e o NMS na frequência de 128 meses e havia coerência com significância na de 64 meses. Isso se verifica no espectro de potência de ondaletas (Figura 4.7(b)) e no EGO, Figura 4.7(c) que mostram a energia de variância maior na frequência de 64 meses.

4.2.2.5. Análise das configurações de ondaleta contínua e espectral para o número de manchas solares e a TSM em todas as áreas de Niños (Média de Niños)

Na série ATSM, Figura 4.8(a), o mês em que ocorreu a menor temperatura foi em outubro de 1955, e as maiores foram observadas em novembro de 1997 e dezembro de 2015.

Pela Figura 4.8(b) foi observado que a partir da frequência de 8 meses começa a haver uma variação de energia na série. A periodicidade de 16-32 meses apresenta algumas proeminências que parecem seguir uma regularidade de 5 anos, essa variância ocorreu nos períodos de mínimo do ciclo solar de onze anos, apenas entre 1980-1990, que engloba o período de máximo solar, não se verificou um período de aproximadamente 5 anos sem variância.

O período de 32-64 meses é o que contém maior energia de variância e no período de 128 meses existe um núcleo que perdura quase toda a série. Conforme se confirma no EGO, Figura 4.8(c) que mostra com 95% de confiança a variância nos períodos 30-65 meses e também apresenta um pico de variância em 128 meses.

A XWT é apresentada na Figura 4.8(d), na qual se observa diversas áreas circuladas de energia associada entre as séries na frequência de 8-16 meses, todas essas possuem também uma região de coerência e de mesma fase em WTC (Figura 4.8(e)), com exceção da área de 1950-1954 que não possui coerência, ou seja, a correlação entre ATSM dos Niños e NMS não se tem significância estatística.

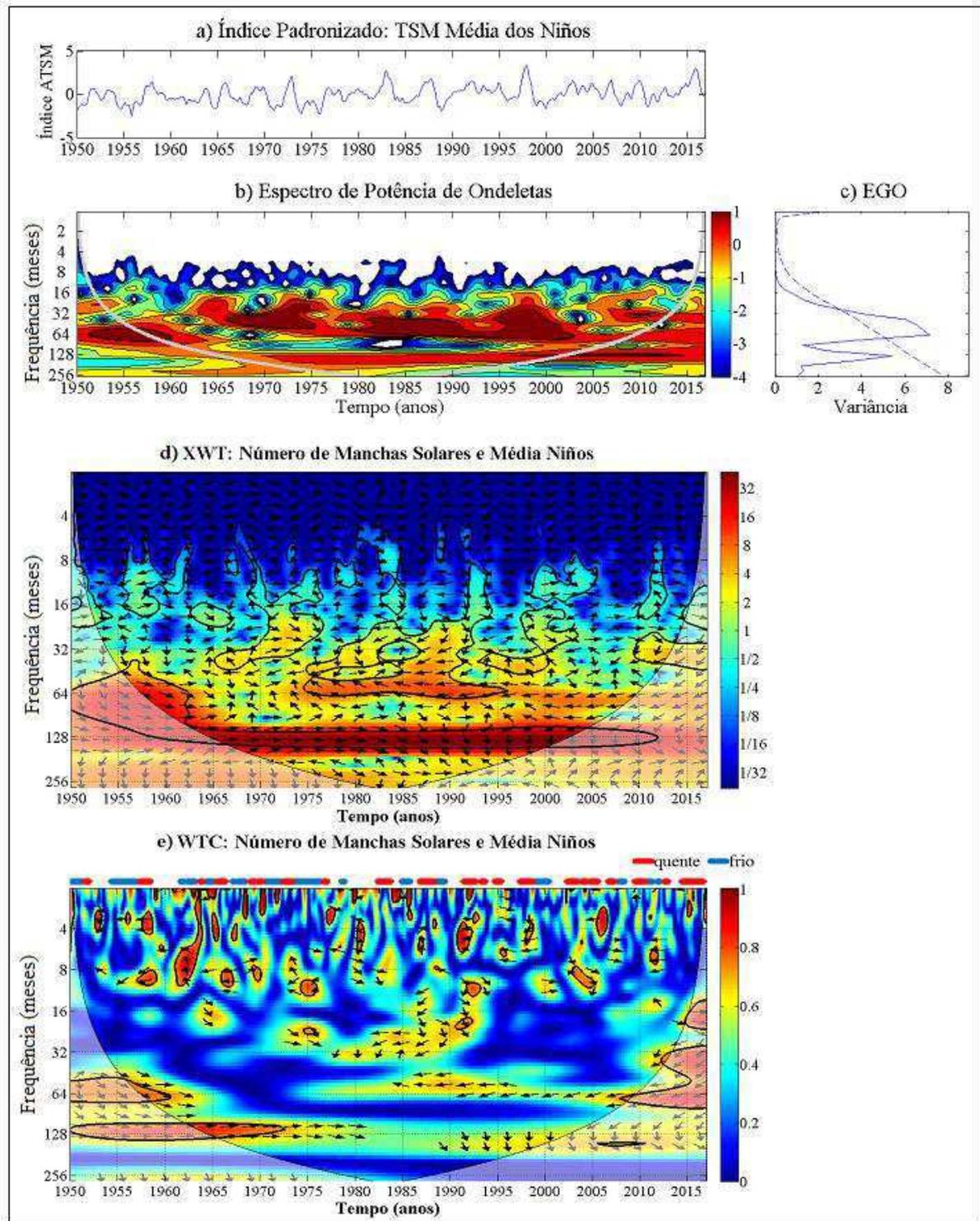


Figura 4.8: (a) Série temporal da média móvel da ATSM na região dos Niños para o período de 1950-2016 e seu respectivo (b) Espectro de Potência de Ondeletas, menor energia (azul) e maior intensidade de energia (vermelho). (c) Espectro Global de Ondeletas (EGO), a linha pontilhada em (c) representa o intervalo de confiança do EGO (95%). (d) Transformada Ondaleta Cruzada (XWT), as cores indicam a covariabilidade de energia máxima (vermelho) e mínima (azul) entre o Número de Manchas Solares (NMS) e da ATSM na região dos Niños e (e) Transformada Ondaleta Coerência (WTC), as cores indicam a coerência entre as duas séries que varia de 0 (azul) a 1 (vermelho). O contorno preto grosso designa o nível de significância de 5% em relação ao ruído vermelho e o Cone de Influência (COI) representado pela linha em formato de arco. As setas indicam as diferenças de fases entre as duas séries. Acima da Figura WTC, linha com a evolução no tempo dos períodos classificados como frios (azul) e quentes (vermelho) para essa região.

A Figura 4.8(e) mostra a coerência entre a TSM estando, de 1955-1960 defasada 6 meses, em 1961 defasada 2 meses, 1966 em fase oposta, 1970 em fase, 1975 defasada 2 meses, 1987 defasada 10 meses, 1992 defasada 7 meses, 2000 em fase, de 2002-2005 defasada 5-12 meses e em 2011 defasada 6 meses, do NMS. Em 1953 na frequência de 8 meses existe coerência (significância estatística) entre a ATSM, que está defasada 3 meses do NMS, mas a covariância de energia nessa região é inexistente.

Na frequência de 16-32 meses em XWT verificam-se duas áreas com covariância de energia e sem coerência em WTC que são de 1950-1954 e de 1997-2003. As demais áreas com energia de covariância nessa frequência possuem coerência. Em WTC são as áreas que correspondem aos anos de 1958, sendo em 1965 e 1975 com a ATSM defasada 315° (14-21 meses) e de 1976-1994 com a ATSM fora de fase em relação ao NMS.

Na frequência de 32-64 meses existem dois núcleos em XWT, um de 1950-1965 com a ATSM em fase e outro de 1975-1996 com a ATSM em fase oposta do NMS. E na WTC a região de 1975 até o final da série possui fase oposta, porém sem a linha de contorno preta (sem significância estatística) a partir de 2008 até o final da série.

Na frequência de 128 meses é a que possui maior covariabilidade de energia, com a cor vermelha mais intensa e o contorno preto em XWT, essa área perdura praticamente toda a série e é coerente sua variação com o NMS ao se observar em WTC, então a ATSM varia conforme o NMS de 1950 até 1980 quando inicia uma mudança de fase e a partir de 1990 a ATSM varia 96 meses após o NMS. Também é possível observar uma pequena quantidade de energia de covariância em XWT, que mostra coerência na frequência de 256 meses com a ATSM defasada em 270° (192 meses).

4.2.2.6. Análise das configurações de ondaleta contínua e espectral para o número de manchas solares e o índice de ODP

Na Figura 4.9(a) o ano de 1955 foi o que apresentou o menor valor do índice de ODP, enquanto que, os anos de 1983, 1987, 1993 e 1997 os maiores.

Na Figura 4.9(b) na frequência entre 8 a 16 meses existem vários pequenos núcleos que apresentam uma pequena variância no EGO (Figura 4.9(c)) e existe um pico de variância nas frequências de 64 meses e de 256 meses, para a de 128 meses a variância mostra confiança estatística de 95% (valor_p < 0,05).

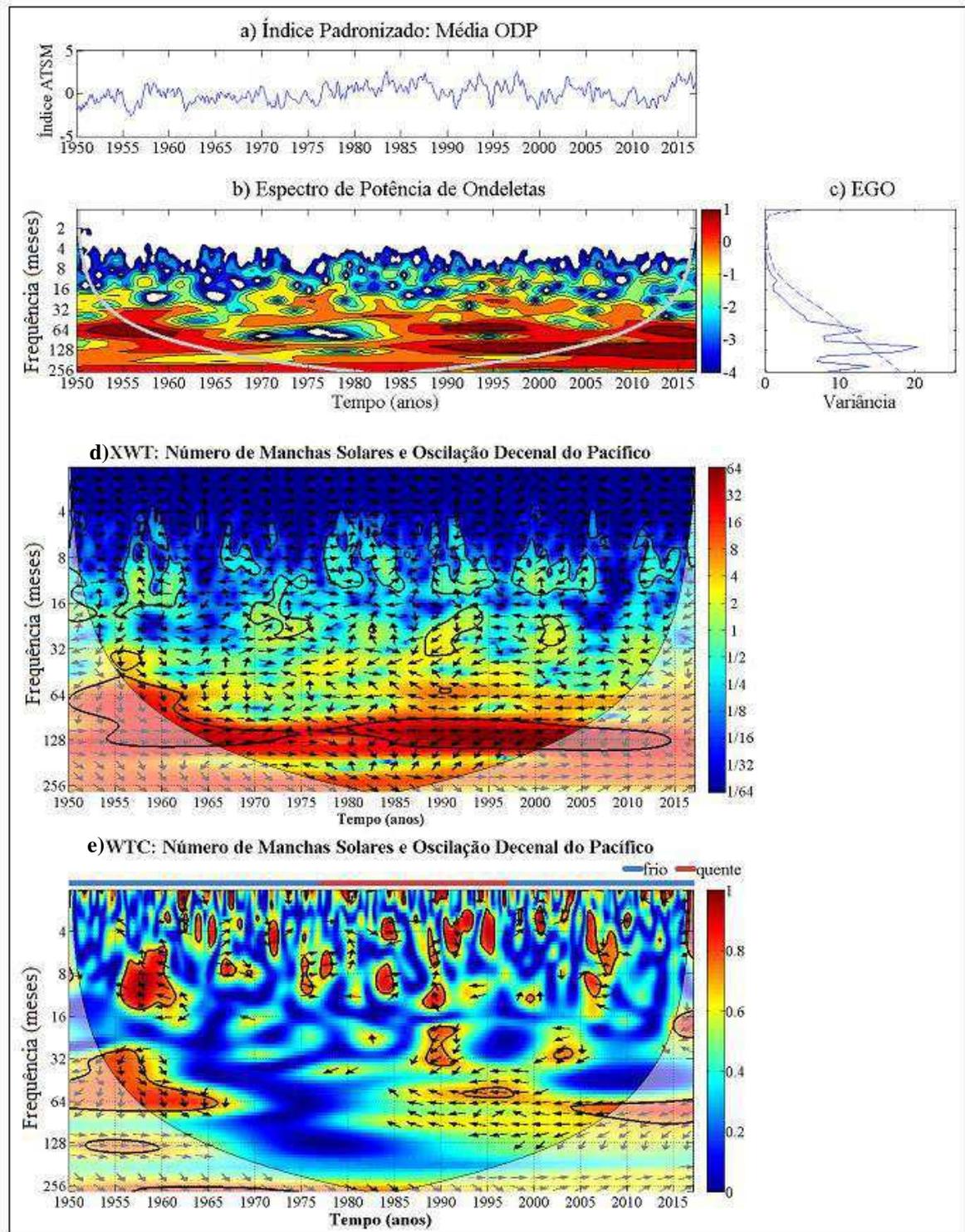


Figura 4.9: (a) Série temporal da média móvel do índice de ODP para o período de 1950-2016 e seu respectivo (b) Espectro de Potência de Ondeletas, menor energia (azul) e maior intensidade de energia (vermelho). (c) Espectro Global de Ondeletas (EGO), a linha pontilhada em (c) representa o intervalo de confiança do EGO (95%). (d) Transformada Ondaleta Cruzada (XWT), as cores indicam a covariabilidade de energia máxima (vermelho) e mínima (azul) entre o Número de Manchas Solares (NMS) e o índice de ODP e (e) Transformada Ondaleta Coerência (WTC), as cores indicam a coerência entre as duas séries que varia de 0 (azul) a 1 (vermelho). O contorno preto grosso designa o nível de significância de 5% em relação ao ruído vermelho e o Cone de Influência (COI) representado pela linha em formato de arco. As setas indicam as diferenças de fases entre as duas séries. Acima da Figura WTC, linha com a evolução no tempo dos períodos classificados como frios (azul) e quentes (vermelho) para a ODP.

Na Figura 4.9(c) se verificou, na frequência de 64 meses, um pico de variância com 95% de confiança no índice da ODP, e no seu espectro de potência de ondaletas, dois núcleos, o primeiro do início da série até 1965 e outro de 1985 até o final da série. Enquanto, que na WTC são observados três núcleos, o primeiro no início da série se estendendo até em torno de 1965, com uma diferença de fase em 48 meses entre NMS e ODP, o segundo de 1890 a 2000, fases opostas (ODP atrasada 180°) e o terceiro de 2003 até o final da série, também com fases opostas.

Na frequência de 128 meses existe um pequeno núcleo de coerência com 95% de confiança nos anos de 1953 a 1959, porém fora do COI. É interessante notar que na frequência de 100-130 meses existe um pico de variância no índice de ODP com 95% de confiança como se observa no EGO (Figura 4.9(c)) e um núcleo de intensa energia no espectro de potência e também na transformada cruzada (Figuras 4.9(b) e (d)). E em WTC aparece somente um núcleo de 1952 a 1960 com o índice em fase com o NMS e fora do COI.

A frequência de 8-16 meses apresenta uma grande área com núcleo de coerência (Figura 4.9(e)) de 1955-1963 onde a TSM está defasada de 2-8 meses em relação ao NMS. Enquanto, na de 16 a 34 meses existe uma região com coerência centrada em 1990, e de 2000-2005, onde a TSM está defasada de 10-20 meses do NMS.

Na transformada coerência em ondaletas se observa que na frequência de 256 meses, ao longo de toda a série de dados, existem coerência (correlação) entre o índice de ODP e o NMS. Entretanto, como existem somente 804 meses, 3 ciclos de 256 meses, então somente o período 1980 a 1987 está dentro do COI, porém de 1958 até 1974 existe 95% de confiança estatística. No EGO do índice de ODP que existe um pico próximo à frequência de 256 meses, possivelmente, representando a variabilidade decenal da ODP.

4.2.2.7. Análise das configurações de ondaleta contínua e espectral para o número de manchas solares e a TSM no ATN

Ao visualizar como o índice de ATSM se comporta no tempo (Figura 4.10(a)) se observa que o maior pico de TSM, naquela área do Atlântico, ocorreu em 2010 e o menor em 1974. Enquanto, no espectro potência de ondaletas (Figura 4.10(b)), verifica-se oscilações dispersas e de fraca energia na frequência de 8 meses, e na de 12 meses é possível observar pequenos núcleos de energia, os maiores são centrados em 1969, 1989 e 2014. Por outro lado, nas frequências 24 a 60 meses existem núcleos de forte energia de 1953 a 1961, 1965 a 1973, 1986 a 1998 e de 2008 a 2015.

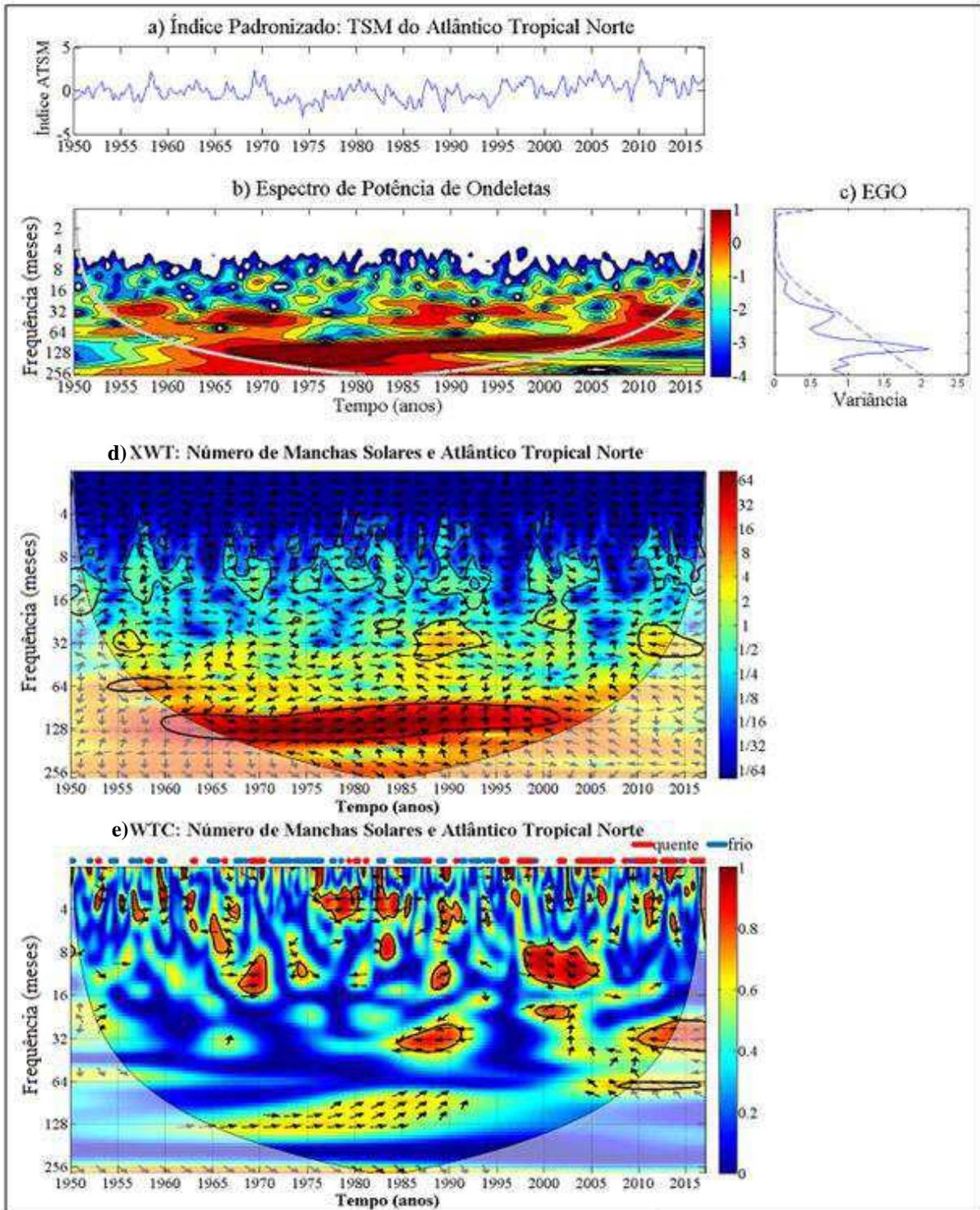


Figura 4.10: (a) Série temporal da média móvel da ATSM no Atlântico Tropical Norte (ATN) para o período de 1950-2016 e seu respectivo (b) Espectro de Potência de Ondeletas, menor energia (azul) e maior intensidade de energia (vermelho). (c) Espectro Global de Ondeletas (EGO), a linha pontilhada em (c) representa o intervalo de confiança do EGO (95%). (d) Transformada Ondaleta Cruzada (XWT), as cores indicam a covariabilidade de energia máxima (vermelho) e mínima (azul) entre o Número de Manchas Solares (NMS) e a ATSM no ATN e (e) Transformada Ondaleta Coerência (WTC), as cores indicam a coerência entre as duas séries que varia de 0 (azul) a 1 (vermelho). O contorno preto grosso designa o nível de significância de 5% em relação ao ruído vermelho e o Cone de Influência (COI) representado pela linha em formato de arco. As setas indicam as diferenças de fases entre as duas séries. Acima da Figura WTC, linha com a evolução no tempo dos períodos classificados como frios (azul) e quentes (vermelho) para essa região.

Nas oscilações com periodicidade de 100 a 190 meses se observa um núcleo de forte energia associada que permanece ao longo de quase toda a série, iniciando em 1959 e terminando em 2015. Na frequência de 256 meses também é possível observar energia associada desde 1952 até 1996.

Associado aos núcleos, na Figura 4.10(c), existe uma pequena proeminência na frequência de 12 meses, outra maior em 32 meses e em 192 meses, sendo que na de 96 meses até 128 meses a energia é mais intensa e com 95% de confiança estatística.

A análise de ondaleta cruzada (Figura 4.10(d)) mostra as variabilidades interanuais e interdecenais comuns entre o NMS e a ATSM do ATN. Observa-se um grande núcleo, na frequência de 128 meses, que se estende de 1959 até 2002, do início até 1980 as duas séries estão em fase, de 1980 a 1985 a ATSM está atrasada 16 meses ($45^\circ - 1/8$) desde ponto até 1997 a ATSM está atrasada 32 meses ($90^\circ - 1/4$), na parte final do núcleo a ATSM está atrasada 64 meses ($180^\circ - 1/2 -$ fase oposta).

Na frequência de 64 meses se verifica um núcleo de 1954-1960 com as séries quase em fase. Existem três núcleos centrados na frequência de 32 meses, o primeiro de 1954-1957 apresenta defasagem de 135° na ATSM que responde após 12 meses a variação das manchas solares. No segundo de 1986-1993 e no terceiro 2010-2016 as fases estão opostas.

Nas oscilações com periodicidade de aproximadamente 24 meses são observados três núcleos, em 1973 as séries estão fora de fase, de 1981-1984 e de 1999-2003 a TSM esta defasada de 45° , ou seja, a amplitude da ATSM ocorre 3 meses após a amplitude das manchas solares.

Na frequência de 8 e 16 meses existem diversos núcleos com alterações de fases entre eles, a ATSM esta, de 1950-1953 em fase, de 1955-1962 oscilando as fases, de 1966-1971 em fase, de 1973-1976 defasada de $270-315^\circ$ (9-10 meses), de 1977-1986 oscila iniciando em fase até ficar fora de fase, de 1987-1992 quase em fase, de 1993-1994 fora de fase, de 1998-2005 inicia em fase atrasa 315° e volta para fase, 2011-2013 em fase, 2013-2015 defasada 90° . No período de 4 a 8 meses existem pequenos núcleos de menor energia.

Na Transformada Ondaleta Coerência (Figura 4.10(e)) se observa diversos núcleos na frequência superiores a 4 meses, são ruídos brancos conforme se verifica em XWT que não possui energia associada, devido a media móvel de 3 meses realizada nas séries temporais.

Ao observar no período de 4 e 8 meses, notou-se que possui um núcleo de coerência de 1964-1966 no qual as séries estão fora de fase, porém não possui energia associada em XWT e núcleo semelhante ocorre de 1957-1958 com a ATSM está defasada 90° . Em 1973

existe um pequeno núcleo de coerência com a ATSM está defasada 225° (5 meses) e possui energia associada em XWT. De 1982-1984 a ATSM está defasada 135° (3 meses). Centrado em 1987 a ATSM está defasada 45° (quase em fase). De 1988-1991 a ATSM esta 270° (4 meses) atrasada em relação as manchas solares e possui energia em XWT. Em 1994 aparece um pequeno núcleo de coerência com as fases opostas e não possui energia na XWT. Em 2007 também existe um pequeno núcleo de coerência com 135° (2-3 meses) de defasagem na TSM. Nos núcleos de 2011 as fases estão opostas e de 2013 a TSM esta com defasagem de 270° (2 meses).

Nas oscilações com periodicidade de 8 a 16 meses se confirma quase tudo descrito na análise de XWT, com exceção dos períodos 2011-2013 e 2013-2015 que não possuem coerência. Porém apresenta menor quantidade de núcleos, que são de 1967-1970 em fase, 1973-1975 com a TSM atrasada 270° (9 meses), de 1987-1990 com a TSM atrasada 45° (1-2 meses), e o maior e mais intenso núcleo desse período indo de 1998-2005 com a TSM 270° (7-11 meses) defasada das manchas solares.

Na frequência de 24 meses se observa um pequeno núcleo de XWT centrado em 1973-1975, mas sem significância estatística, um segundo em torno de 1981-1984. Já o núcleo de 1999-2003 em XWT se confirma em WTC como um núcleo de forte coerência, em que a ATSM está atrasada 3 meses (45°) em relação ao NMS.

Concentrado na frequência de 32 meses, em 1966 existe uma pequena área de coerência sem núcleo associado, em que a ATSM está 8 meses (90°) atrasada em relação ao NMS, um segundo núcleo é observado de 1984 a 1991, com a ATSM e NMS em fase oposta. Centrado em 2002 existe um núcleo com coerência estatística e com a ATSM 8 meses atrasada em comparação com NMS. E de 2010 até o final da série também existe um núcleo de intensa coerência com as fases opostas entre as séries.

Ao atentar no período de 64 meses, percebeu apenas um núcleo nos anos de 2007-2016 com a TSM defasada 135° (24 meses). Na frequência de 128 meses existe uma coerência sem núcleo associado que inicia em fase por volta de 1960, em 1980 muda de fase atrasando 45° (32 meses) a ATSM com relação ao NMS e perdura até aproximadamente o ano de 1995.

O período de 256 meses apesar de estar quase fora do COI, apenas de 1978-1987 esta interno ao COI, apresenta forte energia de coerência desde o inicio da serie até 1995 com a ATSM 315° (224 meses) defasada em relação ao NMS.

4.2.2.8. Análise das configurações de ondaleta continua e espectral para o número de manchas solares e a TSM no ATS

Pelo que se conhece na literatura, esse trabalho apresenta análises inéditas de ondaletas cruzadas e a coerência dos parâmetros ATSM do Atlântico Tropical Sul e do Número de Manchas Solares. Portanto, não será realizada comparação de dados.

Na série de ATSM para o ATS, Figura 4.11 (a) as maiores TSM ocorreram em 1998, 2010 e 1973. Na Figura 11 (b) se percebe pequenos aglomerados de baixa energia entre 4-8 meses. Nos anos de 1980 e 1984, e de 1993 e 2000, e centrado em 2005 houve núcleos de energia na frequência próxima aos 16 meses.

A frequência de 32 meses apresentou alguns núcleos de maior energia que coincidem com os períodos de máximo solar ao comparar com a Figura 4.3 (a). Porém a energia mais intensa da variação da TSM ocorreu de 1968 até 1980 na frequência de 64 meses e de 1964 até 2002 na frequência de 128 meses.

Na Figura 4.11(c) se visualiza um pequeno pico de variância da ATSM próximo a frequência de 32 meses, outro centrado na frequência de 64 meses e o maior pico, com confiança acima de 95%, ocorre na frequência de 128 meses. Após é possível visualizar a variância da ATSM aumentando para frequência inferiores a 256 meses, mostrando possíveis oscilações de escala decenais da TSM do ATS.

Na Transformada Cruzada de Ondaleta (Figura 4.11(d)), observa-se na frequência de 256 meses, energia de covariância entre as séries, ao longo de todo período de dados diminuindo gradativamente com o tempo. Já na Transformada Ondaleta de Coerência (Figura 4.11(e)), nessa frequência de 256 meses se visualiza um contínuo núcleo de alta correlação (cor vermelha) ao longo de todos os anos analisados (1950-2017), com a borda em 1950 na frequência de 256 meses aumentando com o passar dos anos, esta frequência corresponde ao ciclo de Hale (~21 anos).

Nos anos de 1979 e 1988, esse núcleo possui confiabilidade estatística acima de 95% no teste de Monte Carlo, por estar dentro do cone de influencia (linha de contorno preta), o núcleo perdura por todo o restante de tempo anterior e posterior até 2005. A área interna ao núcleo possui alta correlação que segundo o teste t Student não se descarta. As duas séries iniciam com fases quase opostas em 1950, a ATSM ocorre em torno de 160 meses (~13 anos) após as manchas solares, com o passar dos anos as fases das séries ficam opostas, ou seja, quando aumenta a quantidade de NMS diminui a TSM no Atlântico Tropical Sul.

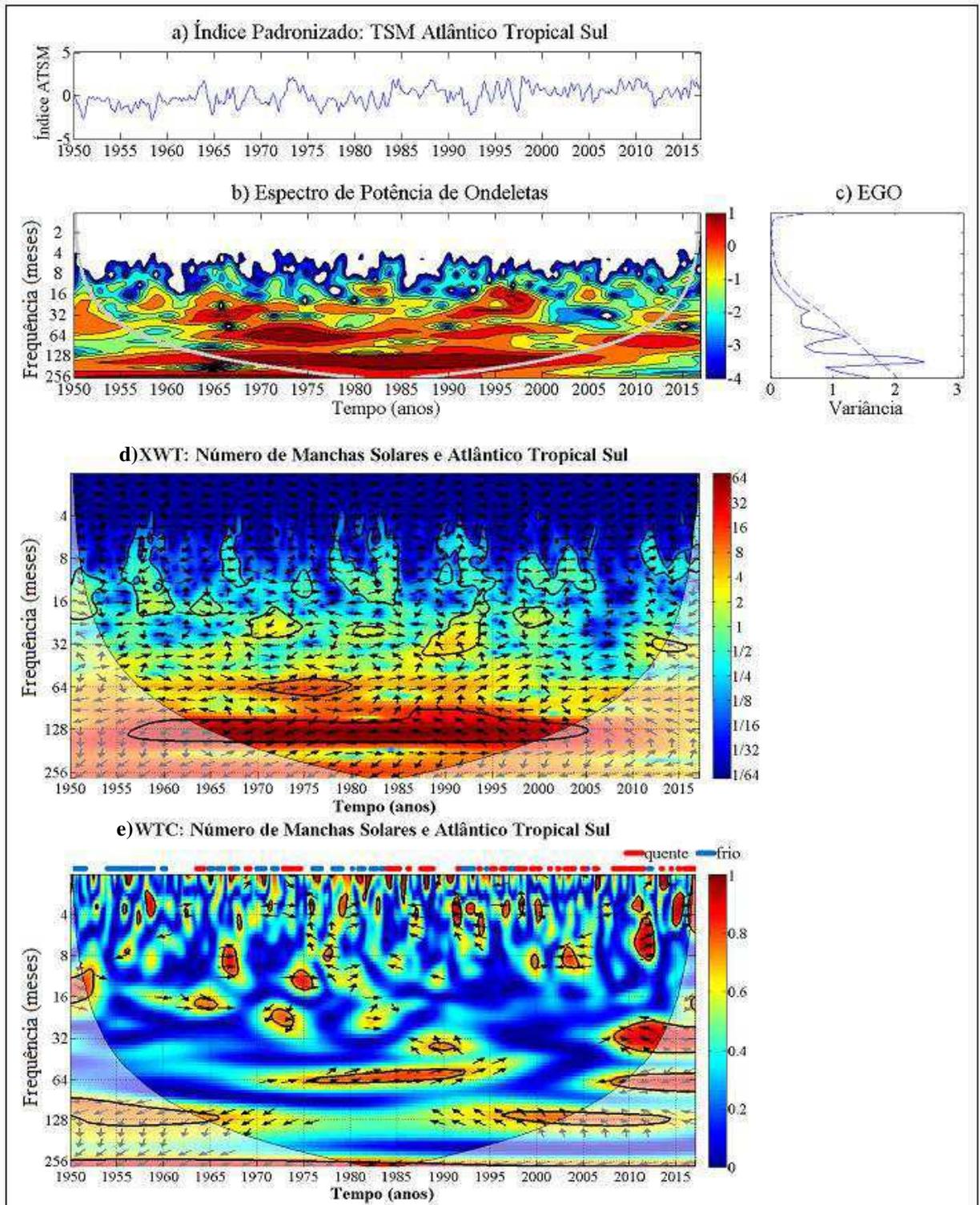


Figura 4.11: (a) Série temporal da média móvel da ATSM no Atlântico Tropical Sul (ATS) para o período de 1950-2016 e seu respectivo (b) Espectro de Potência de Ondeletas, menor energia (azul) e maior intensidade de energia (vermelho). (c) Espectro Global de Ondeletas (EGO), a linha pontilhada em (c) representa o intervalo de confiança do EGO (95%). (d) Transformada Ondaleta Cruzada (XWT), as cores indicam a covariabilidade de energia máxima (vermelho) e mínima (azul) entre o Número de Manchas Solares (NMS) e a ATSM no ATS e (e) Transformada Ondaleta Coerência (WTC), as cores indicam a coerência entre as duas séries que varia de 0 (azul) a 1 (vermelho). O contorno preto grosso designa o nível de significância de 5% em relação ao ruído vermelho e o Cone de Influência (COI) representado pela linha em formato de arco. As setas indicam as diferenças de fases entre as duas séries. Acima da Figura WTC, linha com a evolução no tempo dos períodos classificados como frios (azul) e quentes (vermelho) para essa região.

Na Figura 4.11(d), Transformada Cruzada em Ondaletas, a maior energia envolvida (cor vermelha intensa) indica elevada amplitude das ondas ocorrendo na frequência de 128 meses que corresponde ao ciclo solar de onze anos. A Coerência em Ondaletas (Figura 4.11(e)) apresenta correlação durante todo o tempo nesta frequência, porém possui dois núcleos nas bordas externas, a área onde esta circulada corresponde a 95% de significância no teste de t Student entre a relação da ATSM e o NMS.

A primeira região circulada esta quase totalmente fora do cone de influencia, a partir do ano 1962 já possui a confiabilidade estatística de 95% de Monte Carlo e as setas indicam que a ATSM ocorre 80 meses (~ 7 anos) após as manchas solares. O segundo círculo de correlação não se descarta o que esta fora do COI por possuir significância de 95% no teste de t Student e por possuir mais coerência devido às séries estarem completas no final possuindo mais repetições entre as ondas. Nessa área do período de 128 meses que inicia por volta de 1988, a fases da ATSM esta defasada 135° do NMS, indicando que a ATSM se altera 48 meses (~ 4 anos) após alterar o NMS.

Uma observação interessante é que a Oscilação Multidecenal do Atlântico, apesar de não ser calculada com dados da região ATS, essa oscilação altera para sua fase fria em 1965, mesmo ano que o núcleo de coerência deixa de existir, indicando que o ciclo de Schwabe deixa de influenciar diretamente na ATSM. E no ano de 1995 a Oscilação Multidecenal do Atlântico altera para fase quente, praticamente o mesmo ano que começa a existir outro núcleo de coerência, indicando que a ATSM volta a sofrer influência do ciclo solar de onze anos.

A frequência de 64 meses (~5 anos), corresponde ao segundo harmônico do ciclo solar de onze anos (frequência de 4 à 8 anos), possui em XWT (Figura 4.11 (d)) uma região de alta energia de covariância de 1970 até 1980, indicando que a ATSM altera menos de 8 meses após as manchas solares. Em WTC (Figura 4.11(e)) possui dois núcleos de correlação, sendo o primeiro de 1975 até 1992 e o segundo de 2008 até o final da série. É interessante que as setas de fase entre as duas séries esta diferente nos dois núcleos, sendo quase em fase no primeiro e em fase oposta no segundo, ou seja, quando aumenta (diminui) o NMS diminui (aumenta) a ATSM.

Observou-se no ano de 1972, na frequência de 24 a 32 meses, a existência de uma correlação com energia associada, em que as setas indicam que a ATSM altera em torno de 17 meses após as manchas solares. Em 1975, na frequência de 12 meses existe uma correlação, em que a ATSM está em fase com o NMS, quando aumenta o NMS também aumenta a

ATSM. Na frequência de 24 meses, no ano de 1982, as duas séries ficam em fase, quando aumenta o NMS também aumenta a ATSM.

Em 1990 existe uma correlação em torno do período de 42 meses onde a ATSM responde com o período de 16 meses depois do NMS. Para os períodos menores de 16 meses a energia associada é menor, conforme se observa na Figura 4.11(d), indicando menos correlação. Para a frequência próximo de 8 meses, de 1965-1968, existe uma correlação onde as duas séries ficam totalmente em fase. Salienta-se que seguido de todas essas correlações com as frequências superiores aos 64 meses ocorre uma mudança da ATSM de frio para quente, sendo uma mudança mais sutil de ATSM conforme maior for à frequência.

Acima da frequência de 8 meses as correlações observadas provavelmente são ruídos brancos, além disso a energia associada a estas altas frequências é muito fraca.

4.3. Discussões

Antes de entrar na discussão propriamente dita é interessante descrever sobre duas figuras mostrando possíveis relações El Niño/La Niña e Número de Manchas Solares (NMS).

A Figura 4.12 é uma montagem da evolução temporal do índice de NMS e o espectro de potência de ondaletas da ATSM da área do Niño 1+2. Observa-se que, em geral, nos períodos dos mínimos solares há uma maior variabilidade interanual da ATSM na escala de tempo (frequência) de 16 a 30 meses (1,3-2,5 anos), com duração de aproximadamente 4-5 anos, exceto para o mínimo de 1983 a 1988.

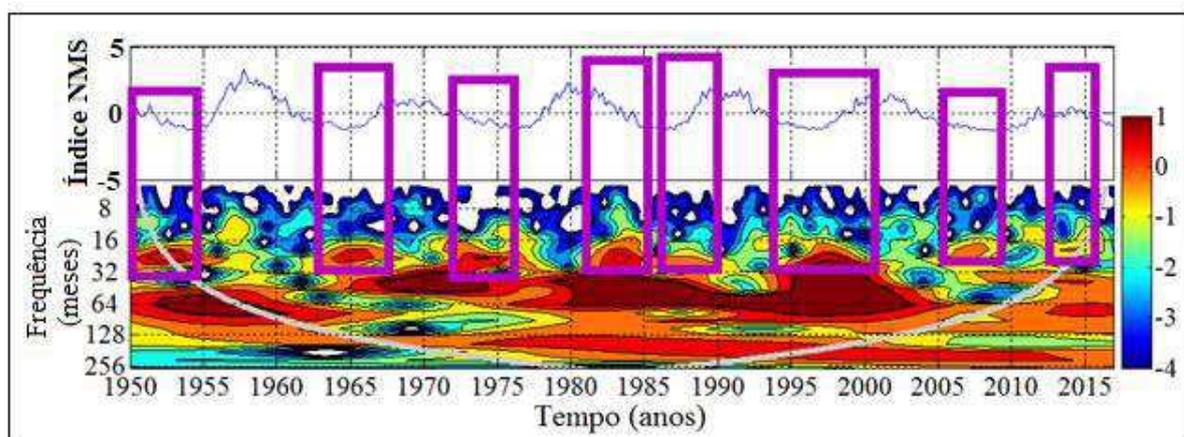


Figura 4.12: Na parte superior está plotado a evolução temporal do índice da média móvel de três meses do NMS e na parte inferior o espectro de potência de ondaletas da ATSM do Niño 1+2.

Por outro lado, na Figura 4.13 estão plotados os valores da média móvel de três meses de dezembro/1949 a janeiro/2017 do NMS e os índices de ATSM da área do Niño 3.4

obtidos diretamente do site do NCP/NCEP/NOAA. Esta Figura também se verifica que, em geral, nos períodos de mínimos de NMS ocorre uma maior variabilidade interanual da ATSM.

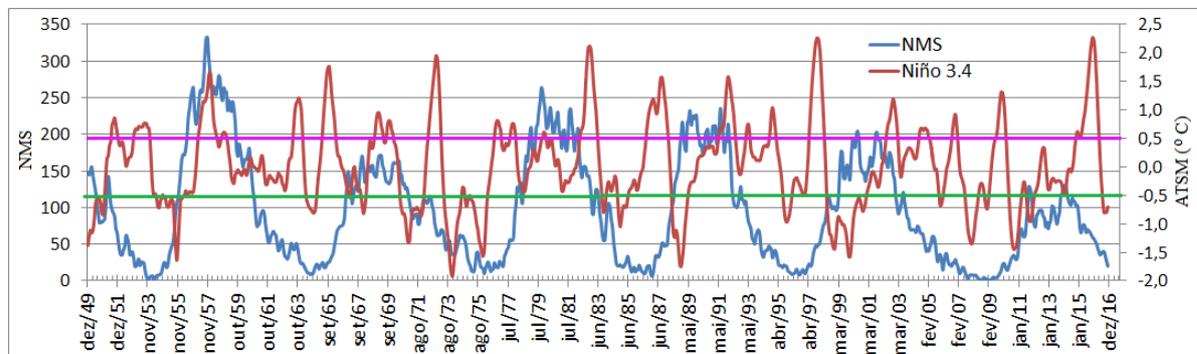


Figura 4.13: Evolução temporal da média móvel de três meses do NMS e a ATSM (°C) da área do Niño 3.4. ATSM inferior a linha verde é La Niña e superior a magenta é El Niño.

De um modo geral, todas as análises dos espectros de potência de ondaletas das ATSM de todas as áreas do Pacífico e Atlântico Tropicais mostram oscilações decenais na escala de tempo de aproximadamente onze anos e de 22 anos. Respectivamente configurações estas condizentes com os ciclos solares de Schwabe e Hale.

Também foram verificadas oscilações de ~ 5 anos, comparável com o segundo harmônico do ciclo de Schwabe e de frequência mais altas de 1,3-2,5 anos. Entretanto, não foi observada uma relação direta entre os ciclos das ATSM e os solares para frequência maior de 32 meses, pois em alguns períodos eles estavam em fase, em outros em fase oposta ou defasada em 1/8 a 5/8 de onda. Provavelmente outros mecanismos atuaram em conjunto para alterar a TSM, sendo necessária outra metodologia de investigação para essa alta frequência.

Ressalta-se que os sinais obtidos para a relação da ATSM do ATS, em geral, foram diferentes dos encontrados para a ATSM das demais áreas, por exemplo, na análise da transformada cruzada em ondaletas na frequência de 128 meses as séries de ATSM de todas as áreas, exceto ATS, estão em fases com a série de NMS, no período de 1965 a 1985, enquanto nesta mesma frequência e período as séries de NMS e ATSM do ATS estão em fases opostas.

Essa diferença de resposta, da TSM ao ciclo solar na região do ATS, ocorre devido a Anomalia Geomagnética do Atlântico Sul, a qual modifica o fluxo de entrada de raios cósmicos promovendo essa alteração para o período de estudo (1950-2015). A anomalia geomagnética esta intensificando e se propagando para oeste, sendo também conhecida por Anomalia Geomagnética do Hemisfério Sul. Inclusive recentemente atingiu a área do Niño 1+2, acredita-se que esse seja o motivo no qual as ATSM dessa região difere das demais áreas

dos Niños por curtos períodos frios a partir de 2001, conforme descrito na página 45 (3º parágrafo) ao analisar a Figura 4.1 (página 44).

De certa forma este resultado concorda com Curtis e Hastenrath (1995), no qual descrevem que as ATSM do Atlântico Tropical Norte estão em fase com as do Pacífico Equatorial, enquanto as ATSM do Atlântico Tropical Sul estão em fases opostas, tanto com as ATSM do Pacífico Equatorial, quanto com as do Atlântico Tropical Norte. Resultando semelhante foi obtido por Kayano e Capistrano (2014).

A propósito, da relação da atividade solar (número de manchas solares) e o clima terrestre, Eddy (1976) descreveu que, possivelmente, não é apenas coincidência que a época do máximo da Pequena Idade do Gelo na Europa ocorreu exatamente durante o mínimo solar prolongado de Maunder (Mínimo de Maunder), enquanto, registro de anéis de árvore que abrange o mesmo período mostra evidência de uma seca douradora no sudoeste americano. E que o Grande Máximo Solar dos séculos XI ao XIII coincide com o Ótimo Climático Medieval. Eddy (1976) ainda conjecturou que esta influência da atividade solar no clima é de longo prazo (século). A fase do ciclo de onze anos seria independente dessa mudança lenta, mas a amplitude do sinal de longo prazo poderia ser controlada por ele.

Nesta pesquisa a análise ficou restrita ao período em que se têm dados medidos confiáveis de TSM nos Oceanos Tropicais. Entretanto, na análise harmônica do número de manchas solares se observou que, quando o ciclo de Schwabe (~11 anos) é filtrado, o ciclo que predomina é o de Gleissberg (~100 anos). O gráfico de Fourier das frequências dos NMS (Figura 4.2, página 51), mostra que de janeiro de 1801 a dez 2015 o harmônico de maior amplitude é o do ciclo de Schwabe seguido pelo de Gleissberg.

Labitzke e Van Loon (1993) ao analisar possíveis efeitos de baixa frequência em variações solares na temperatura da superfície da Terra e nas ocorrências de El Niños ao longo da costa do Peru. Sugeriram que a atividade solar tem influência no desenvolvimento de eventos de El Niño. Na atual pesquisa observou-se uma relação entre os ciclos do NMS e as ATSM no Pacífico Equatorial, entretanto, não se verificou uma correlação estatisticamente significativa ao longo de toda série, pois como já mencionado em alguns períodos os ciclos estavam em fase e em outros fora de fase.

A explicação para essa diferença de fases, a modificação na forma de resposta da ATSM ao forçante solar, se encontra nas linhas de campo magnético terrestre e seu alinhamento com o campo magnético interplanetário. As interações entre esses dois campos promovem a mudança no tempo de resposta das ATSM ao NMS, e também a mudança nas

formas de resposta entre ambos, podendo ser opostas ou em fase. O Sol possui um ciclo de onze anos, ciclo de Schwabe, o qual altera sua polaridade e após o segundo ciclo retorna a polaridade original, durando aproximadamente 22 anos, ciclo de Hale, gerando alterações no meio interplanetário.

Os resultados dessa atual pesquisa demonstram que o ciclo solar de onze anos influencia a ATSM, porém durante intervalos de 21 anos. Após esse período o ciclo de Schwabe deixa de influenciar a ATSM, momento no qual ciclos menores, como o segundo harmônico desse ciclo solar, passam a influenciar as ATSM.

Ocorre como se fossem duas fases, uma fase positiva, na qual o ciclo solar de periodicidade de onze anos influencia a TSM, outra fase negativa, na qual o ciclo solar de periodicidade de onze anos não influencia na TSM, devido a outros ciclos de períodos menores influenciarem, totalizando um período de aproximadamente 42 anos.

É importante evidenciar que as mais intensas anomalias sempre ocorreram quando o período do segundo harmônico do ciclo solar começou ou deixou de influenciar na ATSM. Inclusive durante os anos sob sua influência foram anos nos quais a TSM sofreu oscilações maiores e mais frequentes, ou seja, aumenta a variância da TSM.

White et al. (1997) afirmaram que a temperatura média do oceano superior responde à variação da irradiância solar nas escalas decenal e interdecenal. Encontraram variações de temperaturas que respondem à mudança da irradiação solar em três bandas de frequência: maior que 100 anos; 18-25 anos e 9-13 anos.

No presente trabalho se verificou variações de temperatura nos Oceanos Pacíficos e Atlântico Tropical condizentes com as faixas de frequência 18-25 anos (ciclo de Hale ~22 anos) e 9-13 anos (ciclo de Schwabe ~11anos), ou seja, os resultados obtidos são semelhantes aos encontrados por White et al. (1997), exceto para frequência abaixo de 100 anos, pois nesta faixa não foram realizadas análise alguma no presente estudo.

Rigozo et al. (2003) utilizaram dados de 1876 até 1991 de anel de árvores para verificar o ciclo solar e ENOS usando Ondaletas de Morlet, perceberam que o ciclo solar de onze anos foi mais intenso durante 1930-1980, conforme o resultado obtido em XWT (Figura 4.7(d)) onde mostraram que em 1980 diminui a coerência.

Os autores encontraram no ENOS fortes amplitudes em 96 meses (1930-1960, 1975-1991) exatamente nos anos que encontramos coerência Figura 4.7(e), centrada na frequência de 64 meses. Períodos menores que 48 meses verificaram periodicidades alternadas, presentes em algumas vezes e ausentes em outras conforme o resultado obtido nesta dissertação.

Para analisar possíveis periodicidades da ATSM na área do Niño 4, no período de outubro a novembro, que são meses logo após o máximo climatológico da TSM nessa área, Stager et al. (2007), através das ondaletas complexas de Morlet, encontraram uma periodicidade de aproximadamente onze anos no sistema ENSO. Isto levou os autores a afirmarem que a variabilidade solar pode influenciar TSM tropicais através do aquecimento direto do oceano e / ou alterando sistemas de circulação atmosférica e também alterando as células de alta pressão oceânicas.

Na presente pesquisa também foi usada ondaletas complexas de Morlet, e foram encontradas periodicidades de ~11 anos nas ATSM de todas as áreas dos Niños e do Atlântico Tropical com dados mensais de todos os meses do ano. Entretanto, além da periodicidade de ~11 anos, também observou-se de ~22 anos e ~5-6 anos, que possivelmente esteja relacionada aos ciclos de NMS, tanto de forma direta como indiretamente por influência da atmosfera e do próprio oceano.

Kodera et al. (2007) descreveram que anos de alta atividade solar resultaria em ATSM confinadas no Oceano Pacífico Equatorial, enquanto que durante períodos de baixa atividade solar as ATSM se estenderia para o Oceano Índico. As Figuras 4.12 e 4.13 mostram variabilidades mais intensas de ATSM justamente no período de baixo NMS. Além disso, de um modo geral, verificou-se que ocorre um maior número de La Niña nos períodos de baixa atividade solar (menor NMS). Aliás, nos períodos de alta atividade solar se observou maior número de condições neutras no Pacífico Equatorial. Esta diferença nos resultados possivelmente seja relacionada aos diferentes períodos analisados e aos diferentes métodos utilizados em cada pesquisa.

De acordo com Meehl e Arblaster (2009), máximos de irradiação solar são acompanhados por mínimos de TSM no leste do Pacífico Tropical (La Niña). Descobriram que a ENOS fria em anos de pico das manchas solares é seguido de 2-3 anos mais tarde por um evento quente defasado. Este resultado foi recentemente reexaminado por Roy e Haigh (2012) onde concluem que os eventos quentes defasados não são estatisticamente significativos.

A Figura 4.13 ilustra seis picos de máximos no NMS, dentre esses, em quatro inícios de máximo observou-se La Niña, em 2-3 anos após verificou-se um El Niño. Porém nos períodos de mínimos do NMS também são observados El Niño após um evento de La Niña, ocorrendo eventos quentes após eventos frios. Ressalta-se que Meehl e Arblaster (2009),

assim como Roy e Haigh (2012), concentraram seus estudos nos períodos de máxima atividade solar.

Roy e Haigh (2010) mostraram em suas análises que os anos de pico solares têm sido associados com eventos frio de ENOS, e aludiram que, se o ENOS não é tomado com cuidado, um sinal pode ser interpretado erroneamente como um efeito solar, e que métodos como regressão múltipla e composição não conseguem detectar uma forte influência de energia solar.

Como já mencionado várias vezes na presente pesquisa, se observou maior quantidade dos eventos frios de ENOS nos períodos de mínimo do NMS, do que nos períodos de máximo do NMS (Figura 4.13). Entretanto, os resultados que afirmam sobre métodos como regressão múltipla e composição, serem incapazes de detectar uma forte influência de energia solar, são condizentes com os encontrados nessa pesquisa.

Por outro lado, Roy e Haigh (2012) sugerem que baixo índice solar desempenha um papel influenciador de vários fatores meteorológicos. Possivelmente, esta sugestão das autoras citadas pode ser investigada como uma das prováveis causas da alta variabilidade interanual da ATSM no Pacífico e Atlântico Norte Tropicais em períodos de mínimo NMS.

É oportuno ressaltar que, como observado na presente pesquisa para a ATSM do Pacífico, Holland et al. (2014), usando dados paleoclimáticos, também encontraram que eventos climáticos de alta frequência, na região Ártica da Islândia, ocorrem predominantemente durante os períodos de mínimo NMS, e nos períodos de máximo NMS se observou mais estabilidade climática, ou seja, períodos quentes ou frios prolongados.

Com o intuito de investigar a influência da atividade solar no ENOS, Zhai (2017) também faz uso da transformada de ondaletas cruzadas para análise de periodicidade, porém utiliza o índice paleoclimatológico do Niño 3 juntamente com o NMS. Dessa forma encontrou oscilações com frequências de 3,89 anos (46,68 meses), 7,58 anos (90,96 meses), 17,17 anos (206,04 meses) e 25,63 anos (307,56 meses). Alegou que o primeiro pode corresponder à oscilação de 3 a 7 anos de ENSO, e o último deve refletir a principal influência da atividade solar do período de 22 anos no ENSO.

O autor identificou que a influência da atividade solar no índice Niño 3 deve ser submetido a um procedimento de acumulação de cerca de 9 anos, ou seja, ENSO pode responder a atividade solar com 9 anos de atraso. Esse resultado foi encontrado nas periodicidades de 3,89 e 17,17 anos; para a frequência de 7,58 anos o atraso de fase seria de cerca de 5 anos.

De acordo com o mesmo autor, os seus resultados demonstram a existência da influência da atividade solar, ciclo de onze anos, sobre o ENSO, porém a influência é complexa e varia com o tempo. O índice Niño 3 está negativamente correlacionado com o NMS quando o nível de atividade solar está alto (maior NMS), durante um longo intervalo de tempo, e está positivamente correlacionado quando o nível de atividade solar está baixo (menor NMS).

Com relação às periodicidades obtidas por Zhai (2017) para o índice do Niño 3, os seus resultados concordam com os obtidos na presente pesquisa. Contudo, as correlações negativas (nível de atividade solar alto) e positivas (nível de atividade solar baixo), ressalta-se que nessa exposta pesquisa se obteve correlações estatisticamente significativas, concordando com os resultados de Roy e Haigh (2010).

Com relação às análises do Atlântico, principalmente o setor Sul, não foram encontradas pesquisas na literatura objetivando uma comparação para os resultados obtidos neste estudo. Porém seus resultados comprovam que o ciclo solar influencia nas ATSM, essa influência ocorre em conjunto com outros mecanismos atmosféricos, tais como, a interação entre a troposfera e a alta atmosfera, modificação da irradiância solar total, do balanço energético, da quantidade de raios cósmicos, do ozônio estratosférico, da propagação de ondas planetárias, nas quais em conjunto com a interação oceano-atmosfera, promovem a alteração da Circulação Geral da Atmosfera.

4.3.1. Pressuposição para o Nordeste do Brasil

No momento presente, o ciclo solar 24, ciclo mais tênue dos últimos 100 anos, inicia seu período mínimo. Tripathy et al (2010) afirmam que o mínimo entre os ciclos 23 e 24 é incomum em comparação com o comportamento durante o mínimo anterior entre os ciclos 22 e 23. Segundo o autor Bai (2003) o ciclo solar 23 é o 28º ciclo desde o mínimo de Maunder, logo estamos no 29º ciclo após esse mínimo.

As previsões de um próximo período prolongado de baixa atividade solar implicam consequências climáticas diretas. Numa simulação utilizada por Moffa-Sánchez et al (2014) a baixa irradiação solar promove o desenvolvimento de eventos de bloqueio atmosférico frequentes e persistentes, nos quais um sistema quasi-estacionário de alta pressão no Atlântico Norte Oriental modifica o fluxo dos ventos do oeste podendo ter contribuído para os invernos frios consecutivos documentados na Europa durante a Pequena Idade do Gelo.

Pollock et al (2016) também reforçam a importância da irradiância solar no forçamento das mudanças climáticas nas escalas do centenário e sugerem que outros fatores mantem seu efeito como a migração da ZCIT.

Os resultados dessa pesquisa demonstraram que estamos iniciando um período de correlação entre o Sol e a ATSM em maiores frequências, ou seja, durante os próximos 20 anos podem ocorrer maiores amplitudes térmicas, podendo modificar o padrão de temperatura da bacia Atlântica. Mudança de fase entre ATSM e NMS em maiores frequências, juntamente com um período de mínimo solar, seria a combinação perfeita para grandes anomalias térmicas nas áreas de Niños. Como consequência demonstra existir a possibilidade de uma alteração climática.

O forçamento externo pela variabilidade solar tem um impacto considerável na dinâmica atmosférica multidecenal e centenária, com aspectos importantes no clima regional (Moffa-Sánchez et al., 2014). Através das médias se verificou que quanto menor o número de manchas solares, maior é a ATSM do oceano Atlântico Sul Tropical e menor é a ATSM do Pacífico Tropical, havendo possibilidade de La Niña. Os dados de coerência também demonstram existir tendência da ATSM diminuir no Pacífico e aumentar no Atlântico Tropical Sul. Ambos os fenômenos interligados provocam maior quantidade de chuva no Nordeste do Brasil.

5. CONCLUSÕES

De 1950 até 2017 foi possível observar seis ciclos solares de onze anos, do ciclo 18 ao ciclo 24 pela contagem Wolf, nos quais se percebe que em todas as regiões dos Niños, ODP no Pacífico, e no Atlântico Tropical Norte e Sul, existiram covariâncias entre a ATSM e o NMS. Contudo, a influência da atividade solar (NMS) sobre as ATSM não é linear, pois ocorrem mudanças de fases entre as séries temporais ao longo do tempo, uma vez que no início das séries há contribuição das oscilações de baixa frequência, na parte central de frequência mais elevada e no final retorna a atuação de baixa frequência. Portanto, é possível concluir que, a atividade solar afeta a variabilidade da ATSM do Pacífico e Atlântico Tropicais, ocorre tanto nas oscilações de baixa como alta frequência.

Quando o ciclo solar de onze anos deixa de apresentar coerência, percebe-se a influencia do segundo harmônico do ciclo solar de onze anos (~5,33 anos) na ATSM, ou seja, frequências maiores influenciando a ATSM. Isso é bem evidente em todas as Figuras de WTC, sendo que na ODP o ciclo solar de 21 anos influencia mais na ATSM que o ciclo de onze anos. Mesmo assim é visível que, quando ocorre a influencia da frequência de ~5,33 anos na ODP, também ocorre uma mudança de fase na coerência, entre o índice de ODP e o NMS, na frequência de 21 anos.

O Sol é dinâmico, inverte sua polaridade a cada ciclo de Schwabe, deste modo, pode-se concluir que as variabilidades térmicas na ATSM durante aproximadamente 21 anos, não é coincidência, mas possíveis efeitos da variabilidade solar.

Em todas as áreas dos Niños ocorreram variabilidades de alta frequência predominantemente durante os mínimos de NMS, principalmente em energia de covariância, porém não foi possível identificar um padrão de fases para frequência acima de 32 meses, correspondendo em menos áreas de coerência entre as séries. Isso condiz com as médias calculadas, nas quais o maior NMS corresponde aos períodos neutros.

As áreas dos Niños 1+2 e 3 são mais sensíveis às influencias solares nas frequências mais altas (34-64 meses) e as áreas 3.4 e 4 em ambas as frequências altas e baixas. De todas as áreas a que mais difere na influencia solar entre as demais é a Niño 1+2; uma possível causa para isto pode ser à proximidade com a costa do Peru e/ou a influência diferenciada da Anomalia Magnética do Hemisfério Sul. Ao realizar a média de todas as áreas de Niños é notável a semelhança com a área Niño 3.4, sugerindo que essa possa ser utilizada como média das demais áreas. Ao comparar o gráfico da série de NMS com El Niño e La Niña, se

confirma os resultados das médias, de que La Niña tende a ocorrer em período do NMS menores, enquanto, nos máximo de NMS mais neutros, e NMS intermediários mais El Niños.

No Atlântico Tropical Norte a análise de ondaleta cruzada mostra as variabilidades interanuais e interdecenais comuns entre o NMS e a ATSM. Entretanto, ocorrem mudanças de fases entre as séries temporais ao longo do tempo tanto nas oscilações de frequência mais baixa como as mais altas, mostrando que a contribuição da atividade solar no comportamento da ATSM não é linear.

No Atlântico Tropical Sul as maiores variabilidade das amplitudes da ATSM ocorreram nos períodos de máximo solar. Outra observação é que a ATSM no ATS responde mais aos ciclos decenal e de ~21 anos do Sol do que as oscilações de frequência maiores, provavelmente devido a circulações oceânicas internas. Entretanto, as três maiores ATSM positivas ocorreram exatamente nos anos em que o segundo harmônico do ciclo de Schwabe (64 meses) influenciou na ATSM (WTC – ATS e NMS) e o NMS estava nos mínimos.

De todas as áreas do estudo na ATS foi onde a atuação do ciclo de Hale (~21 anos) se manteve mais intensa durante todos os anos da análise, alterando lentamente a fase de 225°, defasada ~13 anos, para fase oposta, sugerindo que a TSM aumenta quando diminui o NMS e diminui quando aumentar o NMS. Porém precisa de uma série mais longa de dados para compreender melhor como ocorre essa interação.

Também foi a área que melhor respondeu à forçante solar, devido ao fato de ter sido a única área com confiança estatística de 99% para todas as comparações de médias entre frio, quente e neutro, além de ser a única área em que se verificou a ocorrência do maior número de manchas no período frio ao invés do período neutro, como observado nas demais áreas. Assim, sugere-se que a Anomalia Geomagnética do Atlântico Sul pode alterar a forma de resposta da ATSM as flutuações solares nessa região.

Os ciclo solares de ~21 anos e o de ~11 anos atuam opostamente entre o Norte e o Sul do Atlântico Tropical, suas fases também são opostas.

A principal diferença entre os oceanos Atlântico e Pacífico esta na forma que a forçante solar influencia cada bacia. No Pacífico as oscilações solares de altas frequências (32-64 meses), principalmente o segundo harmônico do ciclo de onze anos, influenciam mais na sua mudança térmica, enquanto que no Atlântico predominam as oscilações solares de baixa frequência (128-256 meses), principalmente o ciclo solar de onze anos. Isso se deve ao oceano Pacífico Tropical possuir um ciclo de aproximadamente 5 anos no qual possui uma variação em sua amplitude térmica, o que condiz com o período de atuação do El Niño e La

Niña. No oceano Atlântico não existe um padrão tão definido de periodicidade na variabilidade de suas amplitudes térmicas.

Na ODP oscilações de baixa frequência (11-22 anos) exercem mais influencia do que as de altas frequências (64 meses ou menos). Ressalta-se que isto já era esperado, pois nos dados da ODP as oscilações de altas frequências são filtradas.

Sabe-se que existe uma relação entre os oceanos e a atmosfera, se os ciclos solares interferem na ATSM essa influencia também ocorre na atmosfera.

Como sugestão de trabalhos futuros seria utilizar outras metodologias para compreender como os ciclos solares influenciam na circulação geral da atmosfera e qual a interferência da Anomalia Geomagnética do Atlântico Sul no comportamento dos oceanos e da atmosfera através de um o estudo sobre o acoplamento da alta atmosfera com a troposfera no Hemisfério Sul.

Outra sugestão seria uma melhor abordagem física para compreender se o ciclo solar de 1,33 anos influencia no ENOS, pois não foi encontrado um padrão de fase nessa frequência. Além de uma nova pesquisa com séries mais robustas, para melhor compreender como ocorre a mudança de fase do ciclo de Hale com a ATSM. Em razão de que em todas as análises, o ciclo solar de onze anos manteve sua fase em torno de 20 anos, correspondente a um ciclo completo de Hale, que é quando ocorre o retorno à polaridade original do Sol. Possivelmente um ciclo solar maior influencie nessas alterações da ATSM.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AHLUWALIA, H. S. The descent of the solar Cycle 24 and future space weather. **Advances in Space Research**, v. 57, n. 2, p. 710-714, 2016. DOI:<http://dx.doi.org/10.1016/j.asr.2015.11.015>.

ALCOFORADO, M. J. Variações climáticas do passado: chave para o entendimento do presente? Exemplo referente a Portugal (1675-1715). **Territorium: Revista de Geografia Física Aplicada no Ordenamento do Território e Gestão de Riscos Naturais**, v. 6, n. 6, p. 19-30, 1999.

ANDREOLI, R. V.; KAYANO, M. T. Evolution of the equatorial and dipole modes of the sea-surface temperature in the tropical Atlantic at decadal scale. **Meteorology and Atmospheric Physics**, v. 83, n. 3-4, p. 277-285, 2003.

BAI, T. Periodicities in solar flare occurrence: Analysis of cycles 19-23. **The Astrophysical Journal**, v. 591, n. 1, p. 406, 2003.

BARBOSA, A. C. B.; BLITZKOW, D. **Ondaletas: Histórico e Aplicação**. São Paulo:IAG/USP, 2008. 39 p.

BARNETT, T. P.; PIERCE, D. W.; SCHNUR, R. Detection of anthropogenic climate change in the world's oceans. **Science**, v. 292, n. 5515, p. 270-274, 2001. DOI:10.1126/science.1058304.

BARRY, R. G.; CHORLEY, R. J. Radiação solar e o balanço de energia global: Radiação solar. In: BARRY, R. G.; CHORLEY, R. J. (Aut.) **Atmosfera, tempo e clima**. Porto Alegre: Bookman, 2013. p. 40-73.

BARRY, R. G.; CHORLEY, R. J. Mudanças climáticas. In: BARRY, R. G.; CHORLEY, R. J. (Aut.) **Atmosfera, tempo e clima**. Porto Alegre: Bookman, 2013b. p. 427-468.

BINDOFF, N. L.; WILLEBRAND, J.; ARTALE, V.; CAZENAVE, A.; GREGORY, J. M.; GULEV, S.; SHUM, C. K. Observations: oceanic climate and sea level. In: **Climate change 2007: The physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York, USA., 2007, p. 385-432, Chapter 5, 2007. Disponível em: <<https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/wg1/ar4-wg1-chapter5.pdf>>. Acesso em: 26 de set. 2016.

BLOOMFIELD, D. S.; MCATEER, R. T. J.; LITES, B. W.; JUDGE, P. G.; MATHIOUDAKIS, M.; KEENAN, F. P. Wavelet phase coherence analysis: application to a quiet-sun magnetic element. **The Astrophysical Journal**, v. 617, p. 623-632, 2004.

BOLZAN, M. J. A. Análise da transformada em ondas aplicadas em sinal geofísico. **Revista brasileira de ensino de Física**, v. 26, n. 1, p. 37-41, 2004.

BONATTI, J. P. Modelo de circulação geral atmosférica do CPTEC. **Climanálise Especial (10 anos Edicao Especial)**, 1996. Disponível em: <<http://mtc-m16b.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/iris@1915/2005/05.31.13.35/doc/bonatti.html>>. Acesso em: 05 de dez. 2016.

BROOMHALL, A. M.; FLETCHER, S. T.; SALABERT, D.; BASU, S.; CHAPLIN, W. J.; ELSWORTH, Y.; NEW, R. Are short-term variations in solar oscillation frequencies the signature of a second solar dynamo?. In: **Journal of Physics: Conference Series**. IOP Publishing, p. 012025, 2011. DOI: 10.1088/1742-6596/271/1/012025

CARSLAW, K. S.; HARRISON, R. G.; KIRKBY, J. Cosmic rays, clouds, and climate. **Science**, v. 298, n. 5599, p. 1732-1737, 2002. DOI: 10.1126/science.1076964.

CASTAGNOLI, G. C.; BONINO, G.; SERIO, M. Common spectral features in the 5500-year record of total carbonate in sea sediments and radiocarbon in tree rings. **Radiocarbon**, v. 34, n. 3, p. 798-805, 1992. DOI: http://dx.doi.org/10.2458/azu_js_rc.34.1532.

CECON, P. R.; SILVA, A. R.; NASCIMENTO, M; FERREIRA, A. **Método Estatístico**. Viçosa: Editora UFV, 229p. 2012.

CPTEC (Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climático), INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais), El-Niño, *O El Niño e Você - o fenômeno climático*, OLIVEIRA, G. S., São José dos Campos: Editora Transtec, 2001a. Disponível em: <<http://enos.cptec.inpe.br/elniño/pt>>. Acesso em: 29 de jul. 2017a.

CPTEC (Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climático), INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais), La Niña, *O El Niño e Você - o fenômeno climático*, OLIVEIRA, G. S., São José dos Campos: Editora Transtec, 2001b. Disponível em: <<http://enos.cptec.inpe.br/lanina/pt>>. Acesso em: 29 de jul. 2017.

CHAPMAN, S.; FERRARO, V. C. A. The theory of the first phase of a geomagnetic storm. **Journal of Geophysical Research**, v. 45, n. 3, p. 245-268, 1940. DOI:10.1029/TE045i003p00245

CHIODO, G.; GARCÍA-HERRERA, R.; CALVO, N.; VAQUERO, J. M.; AÑEL, J. A.; BARRIOPEDRO, D.; MATTHES, K. The impact of a future solar minimum on climate change projections in the Northern Hemisphere. **Environmental Research Letters**, v. 11, n.3, p. 034015-1-034015-15, 2016. DOI:10.1088/1748-9326/11/3/034015

CLEAVELAND, M. K.; DUVICK, D. N. Iowa climate reconstructed from tree rings, 1640–1982. **Water Resources Research**, v. 28, n. 10, p. 2607-2615, 1992. DOI:10.1029/92WR01562.

CLIVER, E. W.; FEYNMAN, J.; GARRETT, H. B. An estimate of the maximum speed of the solar wind, 1938–1989. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 95, n. A10, p. 17103-17112, 1990. DOI: 10.1029/JA095iA10p17103

COSTA, E. Jr.; SIMÕES, F.J.R.Jr.; CARDOSO, F.R.; ALVES, M.V. O vento solar e a atividade geomagnética. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 33, n. 4, p. 4301-2-4301-8, 2011.

CURTIS, S.; HASTENRATH, S. Forcing of anomalous sea surface temperature evolution in the tropical Atlantic during Pacific warm events. **Journal of Geophysical Research: Oceans**, v. 100, n. C8, p. 15835-15847, 1995. DOI: 10.1029/95JC01502

DAL POZ, W. R. *Investigações preliminares sobre a influência do clima espacial no posicionamento relativo com GNSS*. 2010. 159f. Tese (Doutorando em Ciências Cartográficas)- Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Presidente Prudente. 2010. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/11449/100251>>. Acesso em: 10 de out. 2016.

DAUBECHIES, I. The wavelet transform time-frequency localization and signal analysis. **IEEE Transactions on Information Theory**, v. 36, n. 5, p. 961–1005, 1990.

DESSLER, A. J. Solar wind and interplanetary magnetic field. **Reviews of Geophysics**, v. 5, n. 1, p. 1-41, 1967.

DIAS, M. A. F. S.; SILVA, M. G. A. J. Para Entender Tempo e Clima. In: CAVALCANTI, IFA; FERREIRA, NJ; DA SILVA, MGJ; SILVA DIAS, MAF. (Org.). **Tempo e Clima no Brasil**. São Paulo: Oficina de Textos, 2009. p. 375-383.

DIJKSTRA, H. A.; Te RAA, L.; SCHMEITS, M.; GERRITS, J. On the physics of the Atlantic Multidecadal Oscillation, **Ocean Dynamics**, v. 56, n. 1, p. 36–50, 2006.

DOMINGUES, M. O.; MENDES, O.; KAIBARA, M. K.; MENCONI, V. E.; BERNARDES, E. Explorando a transformada wavelet contínua. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v.38, n. 3, p. e3314-1-e3314-19, 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/1806-9126-RBEF-2016-0019>

DOUGLASS, D. H.; KNOX, R. S. Ocean heat content and Earth's radiation imbalance. **Physics Letters A**, v. 373, n. 36, p. 3296-3300, 2009. DOI:10.1016/j.physleta.2009.07.023.

DOUGLASS, D. H. Topology of Earth's climate indices and phase-locked states. **Physics Letters A**, v. 374, n. 40, p. 4164-4168, 2010. DOI:10.1016/j.physleta.2010.08.025.

ECHER, E.; RIGOZO, N. R.; NORDEMANN, D. J. R.; VIEIRA, L. E. A.; PRESTES, A.; DE FARIA, H. H. O Número de Manchas Solares, Índice da Atividade do Sol. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 25, n. 2, p. 157, 2003.

EDDY, J. A. The Maunder Minimum. **Science, New Series**, v. 192, n. 4245, p. 1189-1202, 1976.

EEROLA, T. T. Mudanças climáticas globais: passado, presente e futuro. In: FÓRUM DE ECOLOGIA–MUDANÇAS CLIMÁTICAS: PASSADO, PRESENTE E FUTURO. INSTITUTO DE ECOLOGIA POLÍTICA, 2003, Florianópolis: Universidade do Estado de Santa Catarina, 2003. p. 10.

ENFIELD, D. B.; MESTAS-NUÑEZ, A. M.; TRIMBLE, P. J. The Atlantic multidecadal oscillation and its relation to rainfall and river flows in the continental US. **Geophysical Research Letters**, v. 28, n. 10, p. 2077-2080, 2001.

ENFIELD, D. B.; MESTAS-NUÑEZ, A. M.; MAYER, D. A.; CID-SERRANO, L. How ubiquitous is the dipole relationship in tropical Atlantic sea surface temperatures?. **Journal of Geophysical Research: Oceans**, v. 104, n. C4, p. 7841-7848, 1999. DOI:10.1029/1998JC900109.

FAIRFIELD, D. H. Average and unusual locations of the Earth's magnetopause and bow shock. **Journal of Geophysical Research**, v. 76, n. 28, p. 6700-6716, 1971. DOI:10.1029/JA076i028p06700

FARGE, M. Wavelet transforms and their applications to turbulence. **Annual review of fluid mechanics**, v. 24, n. 1, p. 395-458, 1992. DOI:<https://doi.org/10.1146/annurev.fl.24.010192.002143>

FERRARO, V. C. A. On the theory of the first phase of a geomagnetic storm: A new illustrative calculation based on an idealised (plane not cylindrical) model field distribution. **Journal of Geophysical Research**, v. 57, n. 1, p. 15-49, 1952. DOI:10.1029/JZ057i001p00015

FEYNMAN, J.; FOUGERE, P. F. Eighty-eight year periodicity in solar-terrestrial phenomena confirmed. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 89, n. A5, p. 3023-3027, 1984. DOI: 10.1029/JA089iA05p03023.

FEYNMAN, J.; RUZMAIKIN, A. The Sun's Strange Behavior: Maunder Minimum or Gleissberg Cycle?. **Solar Physics**, v. 272, n. 2, p. 351-363, 2011. DOI: 10.1007/s11207-011-9828-0.

FIORAVANTI, C. A história magnética do Brasil. **Pesquisa FAPESP**, ed.185, julho 2011, p. 16-21, 2011. Disponível em: <<http://revistapesquisa.fapesp.br/2011/07/05/a-historia-magnetica-do-brasil/>>. Acesso em: 06 de out. 2016.

FLETCHER, S. T.; BROOMHALL, A. M.; SALABERT, D.; BASU, S.; CHAPLIN, W. J.; ELSWORTH, Y.; NEW, R.. A seismic signature of a second dynamo?. **The Astrophysical Journal Letters**, v. 718, n. 1, p. L19, 2010.

FRIEDLI, T. K. Sunspot Observations of Rudolf Wolf from 1849–1893. **Solar Physics**, v. 291, n. 9–10, p. 2505–2517, 2016. DOI 10.1007/s11207-016-0907-0.

FRIGO, E.; PACCA, I. G.; PEREIRA-FILHO, A. J.; RAMPELLOTO, P. H.; RIGOZO, N. R. Evidence for cosmic ray modulation in temperature records from the South Atlantic Magnetic Anomaly region. In: **Annales Geophysicae**. Copernicus Publications, 2013. v.31, n.10, p. 1833-1841. DOI:10.5194/angeo-31-1833-2013

FRÖHLICH, C.; LEAN, J. Solar radiative output and its variability: evidence and mechanisms. **Astronomy and Astrophysics Review**, v. 12, n. 4, p. 273-320, 2004.

FUNCEME (Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos). Boletim de monitoramento do El-Niño novembro de 2002: Influência dos oceanos pacífico e atlântico nas chuvas da região norte do nordeste do Brasil. Disponível em <http://www.funceme.br/produtos/script/chuvas/Grafico_chuvas_postos_pluviometricos/total_chuvas/el_nino/nov2002/bol_elnino_nov2002.htm>. Acesso em: 29 de jul. 2017.

GLEISNER, H.; THEJLL, P. Patterns of tropospheric response to solar variability. **Geophysical Research Letters**, v. 30, n. 13, p.44-1-44-4, 2003.

GONZALEZ, R. A., ANDREOLI, R. V.; CANDIDO, L. A.; KAYANO, M. T.; SOUZA, R. A. F. A influência do evento El Niño – Oscilação Sul e Atlântico Equatorial na precipitação sobre as regiões norte e nordeste da América do Sul. **Acta Amazônica**, v. 43, n. 4, p. 469 – 480, 2013.

GONZALEZ, W. D.; JOSELYN, J. A.; KAMIDE, Y.; KROEHL, H. W.; ROSTOKER, G.; TSURUTANI, B. T.; VASYLIUNAS, V. M. What is a geomagnetic storm? **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 99, n. A4, p. 5771-5792, 1994. DOI:10.1029/93JA02867

GOSLING, J. T., ASBRIDGE, J. R., BAME, S. J., FELDMAN, W. C. Solar wind stream interfaces. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 83, n. A4, p. 1401-1412, 1978. DOI: 10.1029/JA083iA04p01401

GRAY, L. J.; BEER, J.; GELLER, M.; HAIGH, J. D.; LOCKWOOD, M.; MATTHES, K.; LUTERBACHER, J. Solar influences on climate. **Reviews of Geophysics**, v. 48, n. 4, 2010. DOI: 10.1029/2009RG000282.

GRINSTED, A.; MOORE, J. C.; JEVREJEVA, S. Application of the cross wavelet transform and wavelet coherence to geophysical time series. **Nonlinear processes in geophysics**, v. 11, n. 5/6, p. 561-566, 2004.

HAAM, E.; TUNG, K..K. Statistics of solar cycle–La Nina connection: Correlation of two autocorrelated time series. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 69, n. 10, p. 2934-2939, 2012. DOI: 10.1175/JAS-D-12-0101.1.

HARTMANN, B.; WENDLER, G. The significance of the 1976 Pacific climate shift in the climatology of Alaska. **Journal of Climate**, v. 18, n. 22, p. 4824-4839, 2005. DOI:<http://dx.doi.org/10.1175/JCLI3532.1>.

HARTMANN, D. L. **Global Physical Climatology**. Seattle: Academic Press, 2015. v. 56, 411 p. (International Geophysics Series)

HASTENRATH, S.; GREISCHAR, L. Further work on the prediction of northeast Brazil rainfall anomalies. **Journal of Climate**, v. 6, n. 4, p. 743-758, 1993. DOI:[http://dx.doi.org/10.1175/1520-0442\(1993\)006<0743:FWOTPO>2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0442(1993)006<0743:FWOTPO>2.0.CO;2).

HASTENRATH, S.; HELLER, L. Dynamics of climatic hazards in northeast Brazil. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 103, n. 435, p. 77-92, 1977. DOI: 10.1002/qj.49710343505.

HASTENRATH, S.; MERLE, J. Annual cycle of subsurface thermal structure in the tropical Atlantic Ocean. **Journal of Physical Oceanography**, v. 17, n. 9, p. 1518-1538, 1987. DOI:[https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1987\)017<1518:ACOSTS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1987)017<1518:ACOSTS>2.0.CO;2)

HIGGINSON, M. J.; ALTABET, M. A.; WINCZE, L.; HERBERT, T. D.; MURRAY, D. W. A solar (irradiance) trigger for millennial-scale abrupt changes in the southwest monsoon?. **Paleoceanography**, v. 19, n. 3, p. PA3015-1-PA3015-18, 2004. DOI:10.1029/2004PA001031.

HOLLAND, H. A.; SCHÖNE, B. R.; LIPOWSKY, C.; ESPER, J. Decadal climate variability of the North Sea during the last millennium reconstructed from bivalve shells (*Arctica islandica*). **The Holocene**, v. 24, n. 7, p. 771-786, 2014. DOI: 10.1177/0959683614530438.

HOWE, R.; CHRISTENSEN-DALSGAARD, J.; HILL, F.; KOMM, R. W.; LARSEN, R. M.; SCHOU, J.; TOOMRE, J. Dynamic variations at the base of the solar convection zone. **Science**, v. 287, n. 5462, p. 2456-2460, 2000.

INMET (Instituto Nacional de Meteorologia), Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, Tempo e Clima, Disponível em : <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=home/page&page=tempo_clima>. Acesso em: 30 de nov. 2016.

INPE, EMBRACE (Estudo e Monitoramento do Clima Espacial no Brasil), Definição de Clima Espacial, Disponível em: <<http://www2.inpe.br/climaespacial/portal/definicao-de-clima-espacial/>>. Acesso em: 18 de nov. 2016a.

INPE / EMBRACE (Estudo e Monitoramento do Clima Espacial no Brasil), O Programa Embrace, 2016. Disponível em: <<http://www2.inpe.br/climaespacial/portal/o-programa-embrace/>>. Acesso em: 18 de nov. 2016b.

INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais), Portal de Acesso à Informação, Clima Espacial: perguntas, 2016c. Disponível em: <http://www.inpe.br/acessoainformacao/sobre_clima_especial>. Acesso em: 25 de out. 2016.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), IPCC Fourth Assessment Report: Climate Change, 2007. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg1/en/faq-1-1.html>. Acesso em: 29 de jul. 2017.

JANARDHAN, P.; BISOI, S. K.; ANANTHAKRISHNAN, S. A 20 year decline in solar magnetic fields and solar wind micro-turbulence levels: Are we heading towards a Maunder-like minimum?. In: URSI ASIA-PACIFIC RADIO SCIENCE CONFERENCE (URSI AP-RASC). IEEE, 2016. Seoul, Korea, p. 1079-1082. DOI: 10.1002/2015JA021123.

JENKINS, G. M.; WATTS, D. G. **Spectral Analysis and Its Applications**. San Francisco: Holden-Day, 1968, 525 p.

JIANG, J.; CAMERON, R. H.; SCHUESSLER, M. The cause of the weak solar cycle 24. **The Astrophysical Journal Letters**, v. 808, n. 1, p. L28, 2015. DOI: 10.1088/2041-8205/808/1/L28.

KAISER, G. **A Friendly Guide to Wavelets**. Birkhäuser, 1994, 300p. DOI:10.1007/978-0-8176-8111-1

KAYANO, M. T.; ANDREOLI, R. V. Relationships between rainfall anomalies over northeastern Brazil and the El Niño–Southern Oscillation. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 111, n. D13, p. D13101-1-D13101-11, 2006. DOI:10.1029/2005JD006142.

KAYANO, M. T.; ANDREOLI, R. V. Variabilidade Decenal a Multidecenal. In: CAVALCANTI, IFA; FERREIRA, NJ; DA SILVA, MGAJ; SILVA DIAS, MAF. (Org.). **Tempo e Clima no Brasil**. São Paulo: Oficina de Textos, 2009a. p. 375-383.

KAYANO, M. T.; ANDREOLI, R. V. Clima da Região Nordeste do Brasil. In: CAVALCANTI, IFA; FERREIRA, NJ; DA SILVA, MGAJ; SILVA DIAS, MAF. (Org.). **Tempo e Clima no Brasil**. São Paulo: Oficina de Textos, 2009b. p. 214-233.

KAYANO, M. T.; CAPISTRANO, V. B. How the Atlantic multidecadal oscillation (AMO) modifies the ENSO influence on the South American rainfall. **International Journal of Climatology**, v. 34, n. 1, p. 162-178, 2014.

KODERA, K.; COUGHLIN, K.; ARAKAWA, O. Possible modulation of the connection between the Pacific and Indian Ocean variability by the solar cycle. **Geophysical Research Letters**, v. 34, n.3, L03710, 2007. doi:10.1029/2006GL027827

KONDRATYEV, K. Y. Radiant Energy. The Main Concepts and Definitions: The Sun as the Source of Radiation. The Concept of Stellar Temperatures. In: MIEGHEM, J. V. e HALES, A. L. (Eds.). *International Geophysics Series: Radiation in the Atmosphere*. New York: Academic Press, Inc., 1969. p. 1-48.

KURTHS, J.; SPIERING, C; MÜLLER-STOLL, W.; STRIEGLER, U. Search for solar periodicities in Miocene tree ring widths. **Terra Nova**, v. 5, n. 4, p. 359-363, 1993. DOI:10.1111/j.1365-3121.1993.tb00269.x.

LABITZKE, K.; VAN LOON, H. Associations between the 11-year solar cycle, the QBO and the atmosphere. Part I: the troposphere and stratosphere in the northern hemisphere in winter. **Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics**, v. 50, n. 3, p. 197-206, 1988. DOI:10.1016/0021-9169(88)90068-2.

LABITZKE, K.; H. VAN LOON, Some recent studies of probable connections between solar and atmospheric variability. **Annales Geophysicae-atmospheres Hydrospheres and Space Sciences**, v.11, n. sf, p.1084-1094, 1993

LAU, K. M.; WENG, H. Climate signal detection using wavelet transform: How to make a time series sing. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 76, n. 12, p. 2391-2402, 1995.

LEAN, J.; ROTTMAN, G.; HARDER, J.; KOOP, G. SORCE contributions to new understanding of global change and solar variability. In: **The Solar Radiation and Climate Experiment (SORCE)**. Springer New York, 2005. p. 27-53. DOI: 10.1007/0-387-37625-9_3.

LIN, R. P.; ANDERSON, K. A.; ASHFORD, S.; CARLSON, C.; CURTIS, D.; ERGUN, R.; REME, H. A three-dimensional plasma and energetic particle investigation for the Wind spacecraft. **Space Science Reviews**, v. 71, n. 1, p. 125-153, 1995. DOI:https://doi.org/10.1007/BF00751328

LIVSHITS, I. M.; OBRIDKO, V. N. Variations of the dipole magnetic moment of the Sun during the solar activity cycle. **Astronomy reports**, v. 50, n. 11, p. 926-935, 2006.

LÜST, R. Interplanetary plasma. **Space Science Reviews**, v. 1, n. 3, p. 522-552, 1963.

MARENGO, J. A. Água e mudanças climáticas. **Estudos avançados**, v. 22, n. 63, p. 83-96, 2008. DOI: http://dx.doi.org/10.1590/S0103-40142008000200006.

MARTINS, F. R.; PEREIRA, E. B.; ECHER, M. P. de S. Levantamento dos recursos de energia solar no Brasil com o emprego de satélite geoestacionário—o Projeto Swera. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 26, n. 2, p. 145-159, 2004. DOI:http://dx.doi.org/10.1590/S0102-47442004000200010

MCCRACKEN, G.; STOTT, P. **Fusion: the Energy of the Universe**. Segunda Edição. Cambridge: Elsevier, 2012. 228 p.

MEEHL, G. A.; ARBLASTER, J. M. A lagged warm event-like response to peaks in solar forcing in the Pacific region. **Journal of Climate**, v. 22, n. 13, p. 3647-3660, 2009. DOI:<http://dx.doi.org/10.1175/2009JCLI2619.1>.

MOFFA-SÁNCHEZ, P.; BORN, A.; HALL, I. R.; THORNALLEY, D. J.; BARKER, S. Solar forcing of North Atlantic surface temperature and salinity over the past millennium. **Nature Geoscience**, v. 7, n. 4, p. 275-278, 2014. DOI:10.1038/ngeo2094

MOLION, L. C. B. Aquecimento global: uma visão crítica. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 3, n. 4, p. 7-24, 2008. DOI: <http://dx.doi.org/10.5380/abclima.v3i0.25404>

MOURA, A. D.; SHUKLA, J. On the dynamics of droughts in northeast Brazil: Observations, theory and numerical experiments with a general circulation model. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 38, n. 12, p. 2653-2675, 1981. DOI:[http://dx.doi.org/10.1175/1520-0469\(1981\)038<2653:OTDODI>2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0469(1981)038<2653:OTDODI>2.0.CO;2).

NASA (National Aeronautics and Space Administration), Southwest Research Institute, IBEX (Interstellar Boundary Explorer), How does the Sun's magnetic field work?, 2016. Disponível em: <http://ibex.swri.edu/students/How_does_the_Sun.shtml>. Acesso em: 10 de jul. 2017.

NASA (National Aeronautics and Space Administration), Marshall Space Flight Center, 2016. Disponível em: <<http://solarscience.msfc.nasa.gov>>. Acesso em: 10 de nov. 2016.

NASA (National Aeronautics and Space Administration), Solar Storm and Space Weather - Frequently Asked Questions, 2016. Disponível em: <https://www.nasa.gov/mission_pages/sunearth/spaceweather/index.html>. Acesso em: 10 de nov. 2016.

OCHADLICK, A. R.; KRITIKOS, H. N.; GIEGENGACK, R. Variations in the period of the sunspot cycle. **Geophysical research letters**, v. 20, n. 14, p. 1471-1474, 1993.

OLIVEIRA FILHO, K. S.; SARAIVA, M. F. O. **Astronomia e astrofísica**. Departamento de Astronomia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2014. Disponível em: <<http://astro.if.ufrgs.br/livro.pdf>>. Acesso em 18 de nov. 2016.

OLIVEIRA FILHO, K. S.; SARAIVA, M. F. O. **O Sol - a nossa estrela**. 2016. Disponível em: <<http://astro.if.ufrgs.br/esol/esol.htm>>. Acesso em: 04 de abr. 2016.

OLIVEIRA, V. *Influência do Oceano Atlântico Sul na precipitação do Brasil com ênfase sobre o Rio Grande do Sul*. 2010. 104 f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Universidade Federal de Alagoas, Maceió. 2010. <<http://www.repositorio.ufal.br/handle/riufal/878>>

OMM (World Meteorological Organization), SPACE WEATHER IMPACTS, 2016. Disponível em: <http://www.wmo.int/pages/prog/sat/spaceweather-intro_en.php>. Acesso em: 15 de dez. 2016.

PARKER, E. N. Dynamical theory of the solar wind. **Space Science Reviews**, v. 4, n. 5-6, p.666-708, 1965.

PENEIREIRO, J. C. Recifes de Corais como Arquivos Paleoambientais: Uso da Concentração de 14C na Reconstrução da Atividade Solar e a Conexão Sol-Terra. **Millenium**, v. 20, n. 48, p. 7-29, 2016.

PERISTYKH, A. N.; DAMON, P. E. Persistence of the Gleissberg 88-year solar cycle over the last~ 12,000 years: Evidence from cosmogenic isotopes. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 108, n. A1, 1003, p. SSH1-SSH15, 2003. DOI: 10.1029/2002JA009390.

PESNELL, W. D. Predictions of Solar Cycle 24: How are we doing?. **Space Weather**, v. 14, n. 1, p. 10-21, 2016. DOI: 10.1002/2015SW001304.

PHILANDER, S. G. **El Niño, La Niña, and the Southern Oscillation**. New York: Academic Press, 1990. 293p.

PIELKE, R. A. Sr. Heat storage within the Earth system. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 84, n. 3, p. 331-335, 2003. DOI: 10.1175/BAMS-84-3-331

POLLOCK, A. L.; VAN BEYNEN, P. E.; DELONG, K. L.; POLYAK, V.; ASMEROM, Y.; REEDER, P. P. A mid-Holocene paleoprecipitation record from Belize. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, v. 463, p. 103-111, 2016. DOI:<http://dx.doi.org/10.1016/j.palaeo.2016.09.021>

PRESTES, A. *Relacao Sol-Terra estudada através de anéis de crescimento de coníferas do holoceno recente e do triassico*. 2006. 142 f. Tese (Doutorado em Geofísica Espacial)-Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 2006.

RASMUSSEN, E. M.; CARPENTER, T. H. Variations in tropical sea surface temperature and surface wind fields associated with the Southern Oscillation/El Niño. **Monthly Weather Review**, v. 110, n. 5, p. 354-384, 1982.

REID, G. C. Solar variability and its implications for the human environment. **Journal of Atmospheric and solar-terrestrial physics**, v. 61, n. 1, p. 3-14, 1999.

RICHARDSON, J. D.; PAULARENA, K. I.; BELCHER, J. W.; LAZARUS, A. J. Solar wind oscillations with a 1.3 year period. **Geophysical Research Letters**, v. 21, n. 14, p. 1559-1560, 1994. DOI: 10.1029/94GL01076

RIGOZO, N. R.; NORDEMANN, D. J. R. Registros da atividade solar nos anéis de crescimento de árvores em São Francisco de Paula-RS (Brasil). **Brazilian Journal of Geophysics**, v. 18, n. 1, p. 91-97, 2000.

RIGOZO, N. R.; VIEIRA, L. E. A.; ECHER, E.; NORDEMANN, D. J. R. Wavelet analysis of solar-ENSO imprints in tree ring data from southern Brazil in the last century. **Climatic Change**, v. 60, n. 3, p. 329-340, 2003.

RIND, D. The Sun's role in climate variations. **Science**, v. 296, n. 5568, p. 673-677, 2002.

RODRIGUES, O. M. A. C. *O Ciclo solar*. 2000. 120f. Dissertação (Mestrado em Ensino da Astronomia) - Faculdade de Ciências da Universidade do Porto, Porto. 2000. <https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/10010/3/3225_TM_01_P.pdf>

ROY, I.; COLLINS, M. On identifying the role of Sun and the El Niño Southern Oscillation on Indian Summer Monsoon Rainfall. **Atmospheric Science Letters**, v. 16, n. 2, p. 162-169, 2015. DOI: 10.1002/asl2.547.

ROY, I.; HAIGH, J. D. Solar cycle signals in sea level pressure and sea surface temperature. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 10, n. 6, p. 3147-3153, 2010.

ROY, I.; HAIGH, J. D. Solar cycle signals in the Pacific and the issue of timings. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 69, n. 4, p. 1446-1451, 2012. DOI:<https://doi.org/10.1175/JAS-D-11-0277.1>

SARAVANAN, R.; CHANG, P. Interaction between tropical Atlantic variability and El Niño-southern oscillation. **Journal of Climate**, v. 13, n. 13, p. 2177-2194, 2000. DOI:[http://dx.doi.org/10.1175/1520-0442\(2000\)013<2177:IBTAVA>2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0442(2000)013<2177:IBTAVA>2.0.CO;2).

SCUDERI, L. A. A 2000-year tree ring record of annual temperatures in the Sierra Nevada mountains. **Science-New York then Washington-**, v. 259, n. 5100, p. 1433-1433, 1993.

SCHOVE, D. J. The sunspot cycle, 649 B.C. to A.D. 2000. **Journal of Geophysical Research**, v. 60, n. 2, p.127-146. 1955

SERVAIN, J.; PICAUT, J.; MERLE, J. Evidence of remote forcing in the equatorial Atlantic Ocean. **Journal of Physical Oceanography**, v. 12, n. 5, p. 457-463, 1982.

SERVAIN, J. Simple climatic indices for the tropical Atlantic Ocean and some applications. **Journal of Geophysical Research: Oceans**, v. 96, n. C8, p. 15137-15146, 1991. DOI: 10.1029/91JC01046.

SHEPHERD, S. J.; ZHARKOV, S. I.; ZHARKOVA, V. V. Prediction of solar activity from solar background magnetic field variations in cycles 21-23. **The Astrophysical Journal**, v.795, n. 1, p. 46, 2014. DOI: 10.1088/0004-637X/795/1/46.

SHUE, J. H.; SONG, P.; RUSSELL, C. T.; STEINBERG, J. T.; CHAO, J. K.; ZASTENKER, G.; KAWANO, H. Magnetopause location under extreme solar wind conditions. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 103, n. A8, p. 17691-17700, 1998.

SKOUG, R. M.; GOSLING, J. T.; STEINBERG, J. T.; MCCOMAS, D. J.; SMITH, C. W.; NESS, N. F.; HU, Q.; BURLAGA, L. F. Extremely high speed solar wind: 29–30 October 2003. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 109, n. A9, p. A09102-1-A09102-9, 2004. DOI: 10.1029/2004JA010494

SOON, W.; HERRERA, V. M. V.; SELVARAJ, K.; TRAVERSI, R.; USOSKIN, I.; CHEN C. T. A., LOU, J. Y.; KAO, S. J.; CARTER, R. M.; PIPIN, V.; SEVERI, M.; BECAGLI, S. A review of Holocene solar-linked climatic variation on centennial to millennial timescales: Physical processes, interpretative frameworks and a new multiple cross-wavelet transform algorithm. **Earth-Science Reviews**, v. 134, p. 1-15, 2014. DOI:<http://dx.doi.org/10.1016/j.earscirev.2014.03.003>

SOUZA, E. B.; NOBREGA, P. Uma revisão sobre o padrão de dipolo no Atlântico Tropical. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 13, n. 3, p. 1-44, 1998.

STAGER, J. C.; RUZMAIKIN, A.; CONWAY, D.; VERBURG, P.; MASON, P. J. Sunspots, El Niño, and the levels of Lake Victoria, East Africa. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 112, n. D15, p. D15106 1-13, 2007. DOI:10.1029/2006JD008362.

STAUNING, P. Solar activity–climate relations: A different approach. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 73, n. 13, p. 1999-2012, 2011. DOI:10.1016/j.jastp.2011.06.011.

STEINHILBER, F.; ABREU, J. A.; BEER, J.; BRUNNER, I.; CHRISTL, M.; FISCHER, H.; HEIKKILÄ, U.; KUBIK, P. W.; MANN, M.; McCracken, K. G.; MILLER, H.; MIYAHARA, H.; OERTERF, H.; WILHELMS, F. 9,400 years of cosmic radiation and solar activity from ice cores and tree rings. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v.109, n. 16, p. 5967-5971, 2012. DOI: 10.1073/pnas.1118965109.

SVENSMARK, H.; FRIIS-CHRISTENSEN, E. Variation of cosmic ray flux and global cloud coverage—a missing link in solar-climate relationships. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 59, n. 11, p. 1225-1232, 1997. DOI:10.1016/S1364-6826(97)00001-1.

TAVARES, M. Meteorologia espacial. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 22, n. 4, p.496-502, 2000.

THOMPSON, J.J. Space Station Advanced EVA Systems Design Requirements Boeing Aerospace Company, 1986. Reference n. 289, Doc n. D180-28806-3. Disponível em <https://msis.jsc.nasa.gov/volume2/Appx_a_Bibli.htm#289>. Acesso em: 04 de ago. de 2017.

TINSLEY, B. A.; BROWN, G. M.; SCHERRER, P. H. Solar activity, the QBO, and tropospheric responses. In International Council of Scientific Unions: Middle Atmosphere

Program, v. 29, Part 1: Extended Abstracts, International Symposium on Solar Activity Forcing of the Middle Atmosphere. Part 2: MASH Workshop, Williamsburg, 1989 p 53-61, 1989. ID 19900018856

TORRENCE, C.; COMPO, G. P., A practical guide to wavelet analysis. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v.79, n. 1, p. 61-78, 1998.

TORRENCE, C.; WEBSTER, P. Interdecadal Changes in the ENSO-Monsoon System, **Journal of Climate**, v.12, n. 8, p. 2679-2690, 1999.

TOURRE, Y. M.; RAJAGOPALAN, B.; KUSHNIR, Y. Dominant patterns of climate variability in the Atlantic Ocean during the last 136 years. **Journal of Climate**, v. 12, n. 8, p.2285-2299, 1999.

TRIPATHY, S. C.; JAIN, K.; HILL, F.; LEIBACHER, J. W. Unusual trends in solar p-mode frequencies during the current extended minimum. **The Astrophysical Journal Letters**, v.711, n. 2, p. L84, 2010.

TSIROPOULA, G. Signatures of solar activity variability in meteorological parameters. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 65, n. 4, p. 469-482, 2003.

UVO, C. R. B.; REPELLI, C. A.; ZEBIAK, S. E.; KUSHNIR, Y. The Relationships between Tropical Pacific and Atlantic SST and Northeast Brazil Monthly Precipitation. **Journal of Climate**, v. 11, n.4, p. 551- 562, 1998.

VAN LOON, H.; MEEHL, G. A. The Indian summer monsoon during peaks in the 11 year sunspot cycle. **Geophysical Research Letters**, v. 39, n. 13, p. L13701-1-L13701-5, 2012. DOI: 10.1029/2012GL051977.

VAQUERO, J. M. Historical sunspot observations: a review. **Advances in Space Research**, v. 40, n. 7, p. 929-941, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.asr.2007.01.087>

VAROTSOS, C. A.; TZANIS, C.; CRACKNELL, A. P. Precursory signals of the major El Niño Southern Oscillation events. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 124, n. 3, p.903–912, 2016.

WANG, Y. M.; SHEELEY JR, N. R. On the fluctuating component of the Sun's large-scale magnetic field. **The Astrophysical Journal**, v. 590, n. 2, p. 1111, 2003.

WENG, H.; LAU, K. M. Wavelets, period doubling, and time-frequency localization with application to organization of convection over the tropical western Pacific. **Journal of the atmospheric sciences**, v. 51, n. 17, p. 2523-2541, 1994.

WHITE, W. B.; LEAN, J.; CAYAN, D. R.; DETTINGER, M. D. Response of global upper ocean temperature to changing solar irradiance. **Journal of Geophysical Research: Oceans**, v. 102, n. C2, p. 3255-3266, 1997. DOI: 10.1029/96JC03549

WHITE, W. B.; CAYAN, D. R.; DETTINGER, M. D.; AUAD, G. Sources of global warming in upper ocean temperature during El Niño. **Journal of Geophysical Research: Oceans**, v. 106, n. C3, p. 4349-4367, 2001. DOI: 10.1029/1999JC000130.

WHITE, W. B.; TOURRE, Y. M. Global SST/SLP waves during the 20th century. **Geophysical research letters**, v. 30, n. 12, p. 53.1-53.4, 2003. DOI:10.1029/2003GL017055.

WOLF, R. Sonnenflecken-Beobachtungen in der zweiten Hälfte des Jahres 1849. **Mitteilungen der Naturforschenden Gesellschaft in Bern** v.1, n.283, p.167 – 168, 1850.

WOLTER, K.; TIMLIN, M. S. El Niño/Southern Oscillation behaviour since 1871 as diagnosed in an extended multivariate ENSO index (MEI.ext). **International Journal of Climatology** v. 31, n. 7, p. 1074–1087, 2011. DOI:10.1002/joc.2336.

XAVIER, T. M. B. S.; SILVA, J. F.; REBELLO, E. R. **A Técnica dos Quantis e suas aplicações em Meteorologia, Climatologia, Hidrologia, com ênfase para as regiões brasileiras**. Brasília: Ed. Thesaurus, 2002, 141 p.

XAVIER, T. M. B. S.; XAVIER, A. F. S. Caracterização de períodos secos e ou excessivamente chuvosos no Estado do Ceará através da técnica dos quantis: 1964-1998. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 14, n. 2, p. 63-78, 1999.

ZEBIAK, S. E. Air-sea interaction in the equatorial Atlantic region. **Journal of Climate**, v. 6, n. 8, p. 1567-1586, 1993.

ZHAI, Qian. Evidence for the effect of sunspot activity on the El Niño/Southern Oscillation. **New Astronomy**, v. 52, p. 1-7, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.newast.2016.09.004>

ZHOU, J.; TUNG, K. K. Solar cycles in 150 years of global sea surface temperature data. **Journal of Climate**, v. 23, n. 12, p. 3234-3248, 2010. DOI: 10.1175/2010JCLI3232.1.

ZHOU, Q.; CHEN, W.; ZHOU, W. Solar cycle modulation of the ENSO impact on the winter climate of East Asia. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 118, n. 11, p.5111-5119, 2013.