



UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
INSTITUTO DE CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM METEOROLOGIA

DAVID DUARTE CAVALCANTE PINTO

**PREVISIBILIDADE CLIMÁTICA DO NORDESTE DO BRASIL ASSISTIDA PELO
INDICADOR TÉCNICO MACD, COM LASTRO EM CICLICIDADES
ASTRONÔMICAS EM ESCALAS INTERANUAL A MULTIDECADAL**

MACEIÓ
2019

DAVID DUARTE CAVALCANTE PINTO

**PREVISIBILIDADE CLIMÁTICA DO NORDESTE DO BRASIL ASSISTIDA PELO
INDICADOR TÉCNICO MACD, COM LASTRO EM CICLICIDADES
ASTRONÔMICAS EM ESCALAS INTERANUAL A MULTIDECADAL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Meteorologia do Instituto de Ciências Atmosféricas da Universidade Federal de Alagoas, como requisito para obtenção do título de Mestre em Meteorologia.

Orientador: Prof. Dr. Fabrício Daniel dos Santos Silva

MACEIÓ
2019

Catálogo na fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca Central

Bibliotecário: Marcelino de Carvalho

P659p Pinto, David Duarte Cavalcante.
Previsibilidade climática do Nordeste do Brasil assistida pelo indicador técnico
MACD, com lastro em ciclicidades astronômicas em escalas interanual a multidecadal /
David Duarte Cavalcante Pinto. – 2019.
160 f. : il.

Orientador: Fabrício Daniel dos Santos Silva.
Coorientadora: Maria Luciene Dias de Melo.
Dissertação (mestrado em Meteorologia) – Universidade Federal de Alagoas.
Instituto de Ciências Atmosféricas. Maceió, 2019.

Bibliografia: f. 150-160.

1. Mudanças climáticas. 2. Precipitação (Meteorologia) - Brasil - Nordeste. 3.
Interação oceano-atmosfera. 4. Ciclo solar. 5. Precessão apsidal. 5. *Moving Average*
Convergence Divergence. I. Título.

CDU: 551.509(812/813)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
INSTITUTO DE CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS
COORDENAÇÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM METEOROLOGIA

CERTIFICADO DE APRESENTAÇÃO

N.º de ordem: MET-UFAL-MS-164.

**“PREVISIBILIDADE CLIMÁTICA DO NORDESTE DO BRASIL ASSISTIDA PELO
INDICADOR TÉCNICO MACD, COM LASTRO EM CICLICIDADES ASTRONÔMICAS
EM ESCALAS INTERANUAL A MULTIDECADAL.”**

David Duarte Cavalcante Pinto

Dissertação submetida ao colegiado do Curso de Pós-Graduação em Meteorologia da Universidade Federal de Alagoas - UFAL, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Meteorologia.

Aprovado pela Banca Examinadora composta por:

Fabricio Daniel dos Santos Silva

Prof. Dr. Fabricio Daniel dos Santos Silva
(Orientador)

Maria Luciene Dias de Melo

Profa. Dra. Maria Luciene Dias de Melo
(Coorientadora)

Rafaela Lisboa Costa

Dra. Rafaela Lisboa Costa
(Membro Interno)

Luiz Carlos Baldicero Molion

Prof. Dr. Luiz Carlos Baldicero Molion
(Membro Externo)

Julho/2019

Profa. Dra. Maria Luciene Dias de Melo
(Coorientadora)

AGRADECIMENTOS

A Deus, por não ser indiferente a esta ínfima *quintessência de pó*; por um coração ávido por lograr a união de *Graça e Verdade, Justiça e Paz*, ideal que somente por Sua amorosa graça se inspira nos corações humanos e somente em Seu amado *Logos* pode ser consumado.

Aos pais, familiares e verdadeiros amigos, que, não obstante as imperfeições naturais à condição humana, comigo compartilham o mais sublime sentimento do Amor, sendo ainda graciosos o bastante em me fazer cômulo disso.

Aos amigos do Centro de Estudos Astronômicos de Alagoas e aos demais membros da comunidade astronômica brasileira que generosamente me honram com fraternos laços de mútua estima. Ao Prof. Luiz Molion, pelas valiosas e solícitas instruções, ao orientador, Prof. Fabrício e à coorientadora, Prof^a Luciene, bem como aos demais docentes e colegas discentes do Instituto de Ciências Atmosféricas e a todos os outros que, ao compartilhar precioso conhecimento, me impeliram sempre mais a progredir no honroso e eficiente método de compreender a natureza e seus belos enigmas, que, condignamente, detém o nome de Ciência, e com especial afeto à Climatologia, que tem a ilustre prerrogativa de contemplar fenômenos que se iniciam em minúsculas partículas subatômicas fabricadas nos mais longínquos recantos da Galáxia e encontram nobre destino na atmosfera deste vívido e *Pálido Ponto Azul*, contribuindo para, por fim, precipitar o precioso líquido da vida onde ele se faz necessário.

Enfim, registro, também, a devida gratidão aos inúmeros pesquisadores elencados na seção de Referências, que me precederam nos temas abordados e cujos trabalhos serviram de honroso esteio a este, seguindo o exemplo de dois grandes pensadores renascentistas:

“Caminham os homens, quase sempre, por vias já trilhadas... deve um homem prudente seguir sempre pelas sendas batidas pelos que se tornaram grandes”

(Maquiavel, em *O Príncipe*)

“Se vi mais longe foi por estar de pé sobre ombros de gigantes”

(Isaac Newton, reproduzindo metáfora originalmente atribuída a Bernard de Chartres)

E, por ter a irreplicável convicção da relevância da Poesia à consciência e à vida, e por entender que o fascínio da natureza é raiz e inspiração de todo conhecimento científico, reproduzo aqui, a título de epígrafe, esta breve reflexão do poeta britânico Percy Shelley:

“Se qualquer artista, não digo que tivesse chegado a executar, mas meramente concebido em sua mente o sistema do sol, das estrelas e planetas, se eles já não existissem, e o tivesse retratado para nós em palavras, ou sobre uma tela de pintura, o espetáculo agora oferecido pelo manto noturno do firmamento e glorificado pela sabedoria da Astronomia, grande seria a nossa admiração. Ou tivesse ele imaginado o cenário desta Terra, suas montanhas, mares e os rios; a relva e as flores, e a variedade das formas e massas das folhagens dos bosques, e as cores que se fazem presentes na alvorada e no crepúsculo, e os tons da atmosfera, túrbida ou serena, estas coisas não já existindo anteriormente, nós verdadeiramente ficaríamos atônitos, deslumbrados, e não seria um vão elogio dizer sobre tal homem, *‘Non merita nome di creatore, se non Iddio ed il Poeta’*.”

Mas, atualmente, essas coisas são observadas com pequena maravilha, e ser cômico delas com intenso deleite é estimado ser a marca distinta de uma pessoa refinada e extraordinária. A multidão dos homens não liga para elas. E assim é com a Vida... aquela que engloba tudo”.

RESUMO

Séries temporais de precipitação, coletadas de cinco estações pluviométricas da região Nordeste do Brasil (NEB) – representativas de suas diferentes sub-regiões climatológicas e compreendendo mais de um século de dados para cada estação – foram submetidas a uma análise estatística por meio do indicador/oscilador técnico Moving Average Convergence Divergence (MACD), com reconhecida eficiência em prever tendências, *momentum* e reversões no mercado financeiro, tendo sido já aplicado a outros campos das ciências naturais. Dada a natureza versátil dessa técnica, seus parâmetros foram adaptados para implementação neste estudo, com o propósito de auxiliar na previsibilidade climática de uma região cuja maior parte da área é historicamente afetada por secas colossais, mas também pela ocorrência de mordazes inundações e deslizamentos de terra nas cidades costeiras. Às médias móveis exponenciais (EMA), inerentes à técnica, atribuíram-se períodos alusivos a ciclos astronômicos. Dois ciclos orbitais lunares – as Precessões Lunares Nodal (18,6 anos) e Apsidal (8,85 anos) – assim como o Ciclo Solar de Schwabe (11 anos) – foram empregados. Um vasto exame da literatura revelou que há um entendimento crescente quanto ao potencial de variações orbitais lunares alterarem forças gravitacionais que intensificam ou atenuam as correntes oceânicas, bem como as amplitudes de marés, a mistura vertical, o transporte de calor aos polos e, por conseguinte, as TSM. Ainda mais abundantes na literatura são os achados concernentes à influência das variações magnéticas solares na variabilidade climática, com sinais de 11 e 22 anos tendo sido encontrados, inclusive, na pluviometria do NEB. O magnetismo solar é reconhecidamente capaz de produzir efeitos no clima terrestre por meio de vários mecanismos físicos propostos, como variações na Irradiância Solar Total (TSI), na faixa espectral do UV, mudanças no circuito elétrico global e a modulação do suprimento de Núcleos de Condensação de Nuvens (CCN) pelo fluxo de Raios Cósmicos Galácticos (RCG). Com base nos ciclos supracitados, a MACD foi avaliada quanto à sua aplicabilidade a dados pluviométricos e sua efetividade, tendo, consistentemente, obtido sucesso na maior parte dos períodos passados analisados, antevendo reversões até três anos antes de ocorrerem e tendências que perdurariam por aproximadamente uma década – ou até duas, nas séries de Petrolina/PE e Barreiras/BA. Os variados parâmetros gráficos diferiam em eficiência ao emitir sinais de previsão. Portanto, uma análise cautelosa, que contemple todos eles, é recomendável. Um comentário análogo se deve às discrepâncias encontradas entre os dois conjuntos de EMA testados, i.e., devem ser ambos consultados. Uma análise de natureza climatológica propriamente dita, à semelhança da análise fundamentalista em econometria, deve também ser empreendida, de modo a refinar e suplementar sua contraparte técnica. Previsões para o comportamento da precipitação nos anos vindouros também foram realizadas para cada cidade. São Luís/MA, Natal/RN e Barreiras/BA devem experimentar estações chuvosas mais úmidas no futuro próximo, deixando, definitivamente, para trás a longa seca que se iniciou em 2012 e culminou com o El Niño de 2015-16. O mesmo pode-se inferir a respeito de Petrolina/PE, mas com menos assertividade. A análise de Maceió/AL se mostrou mais difícil, possivelmente devido a influências conflitantes do Pacífico e do Atlântico.

Palavras-chave: Variabilidade climática. Precipitação. Nordeste do Brasil. Oceano-atmosfera. Ciclo Solar de Schwabe. Ciclo Nodal Lunar. Precessão Apsidal. MACD. Análise técnica.

ABSTRACT

Time-series of precipitation, collected from five rainfall stations across the Northeast region of Brazil (NEB) – representatives of its different climatological subregions and comprising more than a century of data – were submitted to statistical analysis via the technical indicator/oscillator Moving Average Convergence Divergence (MACD), with recognized efficiency in forecasting trends, momentum and reversals in the financial market, having already been applied to other fields of the natural sciences. Given the versatile nature of this technique, its parameters were easily adapted for implementation in this study, with the purpose of assisting in climate predictability of a region whose most of the area has been historically affected by colossal droughts, but also by the occurrence of slashing floods and landslides in the coastal cities. The periods assigned to the exponential moving averages (EMA) are allusions to astronomical cycles. Two Lunar orbital cycles – the Nodal (18.6-year) and Apsidal (8.85-year) Precessions – as well as the Schwabe Solar Cycle (11-year), were employed. A comprehensive examination of the literature has revealed that there is a growing understanding that lunar orbital variations alter gravitational forces that strengthen or weaken the ocean currents, as well as the tidal ranges, changing the vertical mixing, the heat transport to the poles and, in turn, the sea surface temperatures (SST). Even more abundant in literature are findings regarding the influence of solar magnetic variations in climate variability, with signals of 11-year and 22-year having also been found in the precipitation over NEB. Indeed, the solar magnetism is known to produce effects on the terrestrial climate through several proposed physical mechanisms, such as variations in Total Solar Irradiance (TSI), in the UV spectrum, changes in the electric global circuit and the modulation of the supply of Cloud Condensation Nuclei (CCN) which is modulated by the Galactic Cosmic Ray (GCR) flux. With grounds on the aforementioned cycles, the MACD was assessed regarding its applicability to rainfall data and effectiveness, being proven to be consistently successful for most of the analysed past periods, foreseeing reversals up to three years earlier and trends that would last for about a decade, or even two, in the series of Petrolina/PE and Barreiras/BA. The several graphical parameters that make up the indicator were observed to vary in efficiency. Therefore, a cautious analysis, contemplating all of them, is recommended. An analogous thought is due to the discrepancies found between the two tested sets of EMA, i.e., they should be preferably consulted simultaneously. Also, an analysis of climatological nature, similar to the fundamental analysis in econometrics, should also be carried on, in order to refine and supplement its technical counterpart. Predictions of rainfall behaviour in the forthcoming years were also formulated for each city. São Luís/MA, Natal/RN and Barreiras/BA should experience wetter rain seasons in the near future, leaving definitely behind the long drought that started in 2012 and culminated with the El Niño of 2015-16. The same can be inferred about Petrolina/PE. The analysis for Maceió/AL was more challenging, possibly owing to conflicting influences from the Pacific and the Atlantic.

Key words: Climate variability. Rainfall. Northeast of Brazil. Ocean-atmosphere. Schwabe Solar Cycle. Lunar Nodal Precession. Apsidal Precession. MACD. Technical Analysis.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 2.1.1** – América do Sul, com ênfase no NEB. As áreas demarcadas são A1 (norte); A2 (interior); A3 (leste); e A4 (sul). 26
- Figura 2.1.2** – As diferentes regiões pluviométricas do NEB e suas características mensais da distribuição de precipitação. 27
- Figura 2.1.3** – Os dois “hemisférios” da Oscilação Sul. As linhas sólidas demarcam regiões de correlações positivas com PNM em Darwin/Jacarta, enquanto as linhas tracejadas demarcam regiões de correlações negativas com o Taiti durante anos de El Niño. 35
- Figura 2.1.4** – Diagrama esquemático exibindo como o El Niño do Pacífico afeta as anomalias de TSM em TNA. As células anômalas de Walker e Hadley são desenhadas com base nos dados apresentados à Figura 2.1.20. 38
- Figura 2.1.5** – Setores geográficos compreendidos pelas regiões atlânticas de TNA (55°W-15°W, 5°N-25°N), TSA (30°W-10°E, 20°S-0°), NAT (40°W-20°W, 5°N-20°N) e SAT (15°W-5°E, 20°S-5°S). 40
- Figura 2.2.1** – Imagem da granulação na superfície do Sol, exibindo fluidos quentes e brilhantes ascendentes cercados por linhas intergranulares mais escuras e frias. Os grânulos costuram a superfície solar e são a característica dominante da convecção. 45
- Figura 2.2.2** – Estrutura interna do Sol, com as diversas camadas especificadas. O “dínamo solar” é gerado entre a zona convectiva e a radiativa. As manchas solares são vistas na fotosfera. 47
- Figura 2.2.3** – Imagem real do disco e parte da atmosfera solares, incluindo eventos coronais, obtida no comprimento de onda de 656 nm (H-alfa). 48
- Figura 2.2.4** – Lei da Polaridade de Hale. À esquerda, o magnetograma do Ciclo 22 (2 de agosto de 1989); à direita, do ciclo 23 (6 de junho de 2000). A cor amarela denota polaridade magnética positiva, enquanto a azul denota polaridade negativa. As maiores manchas de um hemisfério têm polaridade oposta às maiores do outro hemisfério, e as polaridades se invertem de um ciclo a outro. 50
- Figura 2.2.5** – Registro do Número de Manchas desde 1611. O ciclo de 11 anos é patente, bem como outras características e periodicidades a serem discutidas adiante. 52
- Figura 2.2.6** – Reconstrução de manchas solares a partir de $\Delta_{14}\text{C}$ (azul), médias de 10 anos do Número de Grupos de Manchas Solares (GSN, vermelho) desde 1610 e a reconstrução de manchas solares a partir de $_{10}\text{Be}$ sob duas suposições extremas de produções locais (verde) e globais (magenta, tracejado), respectivamente. Os valores ligeiramente negativos da reconstrução durante os *Grand Minima* são artefatos, sendo compatíveis com valores nulos dentro da incerteza dessas reconstruções, como indicado pelas barras de erro. 54
- Figura 2.2.7** – “O Tâmis Congelado, olhando para o Leste, em direção à Velha 56

Ponte de Londres”, Abraham Hondius, 1677. Este quadro retrata pessoas se divertindo no gelo do Rio Tâmbisa. No século XVII, os invernos na Europa foram longos e rigorosos devido ao Mínimo de Maunder da atividade solar, que durou de 1645 a 1700. Apenas 50 manchas solares foram vistas durante todo o período.

Figura 2.2.8 – Detalhes do registro da variação de ^{14}C para os últimos 1.100 anos. Na figura A, os anos estão em AD (anno domini ou depois de Cristo) e, na B, em anos BP (antes do presente). A curva de manchas solares em A está em vermelho. A escala de variação de C (eixo-Y) está invertida, de modo que um mínimo em ^{14}C corresponde a um máximo no número de manchas solares. Notável também é o fato de que os máximos em ^{14}C estão à frente dos mínimos em manchas solares, devido ao atraso de 20 a 60 anos necessário para o sinal de radiocarbono na atmosfera terrestre responder às variações na atividade solar. 57

Figura 2.2.9 – Medições diárias da Irradiância Solar Total (TSI) por instrumentos de diferentes satélites. Os deslocamentos sistemáticos entre as medidas de diferentes instrumentos complicam a determinação do comportamento a longo prazo. 61

Figura 2.2.10 – Comparação entre tendências atualizadas de TSI e de anomalias de temperatura em diversas regiões rurais, devidamente identificadas. 63

Figura 2.2.11 – Médias mensais do fluxo solar em rádio a 10,7 cm, medido pelo Conselho Nacional de Pesquisa do Canadá e ajustado para a distância média Terra-Sol. A unidade do fluxo solar é de 104 Jansky = $10^{-22} \text{ W.m}^{-2}\text{.Hz}^{-1}$. O último máximo é atipicamente fraco, e o mínimo precedente, excepcionalmente extenso. 65

Figura 2.2.12 – Uma CME observada da Terra (Maringá-PR, Brasil), no comprimento de onda de 656 nm (H-alfa), com o disco solar oculto por uma máscara negra, em virtude da grande diferença de brilho entre a fotosfera solar e o fenômeno da CME. O planeta Terra é representado graficamente, em escala. 69

Figura 2.3.1 – Perturbações orbitais lunares. Ambos os eixos percorridos nesse estudo (eixo dos nodos AN-DN e linha das apsidés X1-X2) estão ilustrados. 72

Figura 2.3.2 – Padrões de ciclos de marés; (a) Ciclo diurno de marés; (b) Ciclo semidiurno de marés; (c) Ciclo misto semidiurno. 75

Figura 2.4.1 – (a) Amplitude da modulação de 18,61 anos nos níveis de maré. (b) Amplitude da modulação de 4,4 anos nos níveis de maré. 80

Figura 2.4.2 – (a) O 99,9 percentil anual. (b) Os sinais harmônicos de 18,61 e 4,4 anos calculados pelas séries temporais dos percentis de 99,9 para variações no nível do mar em quatro regiões ao redor do mundo. (c) As localizações das quatro regiões. 81

Figura 3.1 – Distribuição geográfica das estações meteorológicas convencionais do INMET no NEB cujos dados foram usados neste estudo (círculo negro), e respectivos pontos de grade (círculos azuis). 87

Figura 3.2 – Parâmetros característicos da MACD. 91

Figura 3.3 – A Divergência Bearish e a eficácia do Histograma em relação ao Crossover de Sinal.	94
Figura 4.1 – Curva dos totais anuais de precipitação (azul, em mm.ano ⁻¹) registrados para a cidade de Maceió/AL, no período de 1911-2018, segundo os critérios de obtenção de dados expressos à seção 3.1. Na mesma escala e de mesma unidade, também são plotadas as EMA rápida (11 anos; vermelha) e lenta (28 anos; verde), indicadores básicos da MACD.	102
Figura 4.2 – Linhas da MACD (cinza) e de Sinal (vermelha) para os totais anuais de precipitação na cidade de Maceió/AL, entre 1911 e 2018, com períodos de EMA de 11, 28 e 9 anos. O Histograma da MACD (colunas azuis) também é exibido.	103
Figura 4.3 – Curva dos totais anuais de precipitação (azul, em mm.ano ⁻¹) registrados para a cidade de Maceió/AL, no período de 1911-2018, segundo os critérios de obtenção de dados expressos à seção 3.1. Na mesma escala e de mesma unidade, também são plotadas as EMA rápida (9 anos; vermelha) e lenta (19 anos; verde), indicadores básicos da MACD.	106
Figura 4.4 – Linhas da MACD (cinza) e de Sinal (vermelho) para os totais anuais de precipitação na cidade de Maceió/AL, entre 1911 e 2018, com períodos de EMA de 9, 19 e 4 anos. O Histograma da MACD (colunas azuis) também é exibido.	107
Figura 4.5 – Curva dos totais anuais de precipitação (azul, em mm.ano ⁻¹) registrados para a cidade de Natal/RN, no período de 1900-2018, segundo os critérios de obtenção de dados expressos à seção 5.1. Na mesma escala e de mesma unidade, também são plotadas as EMA rápida (11 anos; vermelha) e lenta (28 anos; verde), indicadores básicos da MACD.	109
Figura 4.6 – Linhas da MACD (cinza) e de Sinal (vermelho) para os totais anuais de precipitação na cidade de Natal/RN, entre 1900 e 2018, com períodos de EMA de 11, 28 e 9 anos. O Histograma da MACD (colunas azuis) também é exibido.	110
Figura 4.7 – Curva dos totais anuais de precipitação (azul, em mm.ano ⁻¹) registrados para a cidade de Natal/RN, no período de 1900-2018, segundo os critérios de obtenção de dados expressos à seção 3.1. Na mesma escala e de mesma unidade, também são plotadas as EMA rápida (9 anos; vermelha) e lenta (19 anos; verde), indicadores básicos da MACD.	111
Figura 4.8 – Linhas da MACD (cinza) e de Sinal (vermelho) para os totais anuais de precipitação na cidade de Natal/RN, entre 1900 e 2018, com períodos de EMA de 9, 19 e 4 anos. O Histograma da MACD (colunas azuis) também é exibido.	112
Figura 4.9 – Como na Figura 4.5, mas para São Luís/MA.	114
Figura 4.10 – Como na Figura 4.6, mas para São Luís/MA.	114
Figura 4.11 – Como na Figura 4.7, mas para São Luís/MA.	115
Figura 4.12 – Como na Figura 4.8, mas para São Luís/MA.	116

Figura 4.13 – Como na Figura 4.5, mas para Barreiras/BA.	118
Figura 4.14 – Como na Figura 4.6, mas para Barreiras/BA.	118
Figura 4.15 – Como na Figura 4.7, mas para Barreiras/BA.	119
Figura 4.16 – Como na Figura 4.8, mas para Barreiras/BA.	120
Figura 4.17 – Como na Figura 4.5, mas para Petrolina/PE.	121
Figura 4.18 – Como na Figura 4.6, mas para Petrolina/PE.	122
Figura 4.19 – Como na Figura 4.7, mas para Petrolina/PE.	124
Figura 4.20 – Como na Figura 4.8, mas para Petrolina/PE.	124
Figura 5.1 – Imagens do satélite GOES-16 em seu canal 13 (IR “limpo”; esquerda) e no canal 9 (vapor d'água; direita) registradas aos horários de 07:00 e 07:10 UTC, respectivamente, no dia 21 de maio de 2019. É possível observar uma provável LI como resquício de Sistema Frontal que chegou às latitudes do ENEB. Na imagem da esquerda, também é possível ver a nebulosidade subjacente, típica de DOL, intensificando-se a partir do oceano à medida que avança pelo ENEB, o que, até então, não havia sido observado nessa temporada.	139
Figura 5.2 – Imagens do satélite GOES-16 em seu canal 13 (IR “limpo”), obtidas às 09 h UTC do dia 13/03/2019 (esquerda), às 00 h UTC do dia 29/03/2019 (centro) e às 09 h UTC do dia 25/04/2019, todas acusando forte atividade convectiva sobre o NNEB, especialmente RN e CE, associada à ZCIT.	141
Figura 5.3 – Imagens do modelo ICON (resolução de 22 km) exibindo os padrões de escoamento atmosférico de grande escala ao nível de 950 hPa, sobre o Oceano Atlântico tropical e subtropical e setores da Europa, África e América do Sul, para as mesmas datas informadas na Figura 5.2, e na mesma ordem. É possível identificar a confluência dos alísios e/ou o trecho de velocidades baixas ou nulas de vento que assinalam a posição da ZCIT, entre vários outros sistemas.	141

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resumo dos meios pelos quais a variabilidade solar pode influenciar o clima na baixa atmosfera.	59
Tabela 2 – Núcleos Cosmogênicos.	67
Tabela 3 – Efemérides do Ciclo Nodal Lunar desde 1885.	84
Tabela 4 – Metadados das estações utilizadas.	87
Tabela 5 – Conjunto de sinais de compra e venda sugeridos por Wiles & Encke (2015).	95

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AB	Alta da Bolívia
ACP	Análise de Componente Principal
AERONET	<i>Aerosol Robotic Network</i>
AL	Alagoas
AMJJA	Período de abril a agosto
AN	<i>Ascending Node</i>
ASAN	Alta (ou Anticiclone) Subtropical do Atlântico Norte
ASAS	Alta (ou Anticiclone) Suptropical do Atlântico Sul
ASPS	Alta (ou Anticiclone) Subtropical do Pacífico Sul
BA	Bahia
BMT	Brisas Marítima e Terrestre
CC	<i>Crossover</i> de Centro
CCM	Complexos Convectivos de Mesoescala
CCN	<i>Cloud Condensation Nuclei</i>
CE	Ceará
CJNEB	Corrente de Jato do Nordeste Brasileiro
CME	<i>Coronal Mass Ejections</i>
CS	<i>Crossover</i> de Sinal
DN	<i>Descending Node</i>
DNOCS	Departamento Nacional de Obras Contra as Secas
DOL	Distúrbios Ondulatórios de Leste
EMA	<i>Exponential Moving Average</i>
EN-S	El Niño Seco
EN-U	El Niño Úmido
ENEB	Leste do Nordeste do Brasil
ENOS	El Niño-Oscilação Sul
EUA	Estados Unidos da América
EUV	Ultravioleta extremo
FD	<i>Forbush Decrease</i>
GHCN2	<i>Global Historical Climatology Network</i>
GSOD	<i>Global Surface Summary of Day</i>

HN	Hemisfério Norte
HS	Hemisfério Sul
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
IOS	Índice da Oscilação Sul
IR	Radiação Infravermelha
ISCCP	<i>International Satellite Cloud Climate Project</i>
LI	Linhas de Instabilidade
LIG	<i>Latitudinal Insolation Gradient</i>
LN-S	La Niña Seca
LN-U	La Niña Úmida
LTG	<i>Latitudinal Temperature Gradient</i>
MA	Maranhão
MACD	<i>Moving Average Convergence Divergence</i>
MMA	Modo Meridional do Atlântico
MODIS	<i>Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer</i>
MZA	Modo Zonal do Atlântico
NCAR	<i>National Center of Atmospheric Research</i>
NCEP	National Centers for Environmental Prediction
NEB	Nordeste do Brasil
NNEB	Norte do Nordeste do Brasil
NOAA	<i>National Oceanic and Atmospheric Administration</i>
OAN	Oscilação do Atlântico Norte
ODP	Oscilação Decadal do Pacífico
OMA	Oscilação Multidecadal do Atlântico
OMJ	Oscilação de Madden-Julian
OQB	Oscilação Quasi-Bienal
OS	Oscilação Sul
PB	Paraíba
PE	Pernambuco
PEG	Pequena Era Glacial
PI	Piauí
PNM	Pressão ao Nível do Mar
POA	Perturbações Ondulatórias no campo dos ventos Alísios
PQM	Período Quente Medieval

RCG	Raios C3smicos Gal3cticos
RLM	Regress3o Linear M3ltipla
RN	Rio Grande do Norte
SANEB	Semi3rido do Nordeste do Brasil
SAWP	<i>South Atlantic Warm Pool</i>
SCM	Sistemas Convectivos de Mesoescala
SE	Sergipe
SF	Sistemas Frontais
SNEB	Sul do Nordeste do Brasil
SSM/I	<i>Special Sensor Microwave/Imager</i>
SUDENE	Superintend3ncia do Desenvolvimento do Nordeste
SWPC	<i>Space Weather Prediction Center</i>
SWS	<i>Solar Wind Speed</i>
TNA	<i>Tropical North Atlantic</i>
TSA	<i>Tropical South Atlantic</i>
TSM	Temperatura de Superf3cie do Mar
UAI	Un3o Astron3mica Internacional
UDEL	Universidade de Delaware
UF	Unidade Federativa
UTK	<i>The University of Tennessee, Knoxville</i>
UV	Radia3o Ultravioleta
VCAN	V3rtices Cicl3nicos em Altos N3veis
VCMN	V3rtices Cicl3nicos em M3dios N3veis
WHF	<i>Worsening Heart Failure</i>
ZCAS	Zona de Converg3ncia do Atl3ntico (ou da Am3rica do) Sul
ZCEN	Zona de Converg3ncia do Leste do Nordeste
ZCIT	Zona de Converg3ncia Intertropical

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	017
1.1 Objetivo Geral	022
1.2 Objetivos Específicos	022
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	023
2.1 Climatologia Inerente à Área de Estudo	023
2.1.1 Caracterização geopolítica, socioeconômica e os biomas presentes	023
2.1.2 Variabilidade pluviométrica espacial e temporal: sub-regiões	024
2.1.3 Sistemas meteorológicos a influenciar os regimes pluviométricos	026
2.1.4 Classificação climatológica das nuvens precipitantes	032
2.1.5 Grandes Oscilações Oceânicas: seus impactos diretos e teleconexões	032
2.1.5.1. El Niño-Oscilação Sul	033
2.1.5.2. Oscilação Decadal do Pacífico	038
2.1.5.3. Modo Meridional do Atlântico	039
2.1.5.4. Modo Zonal do Atlântico	041
2.1.5.5. Contribuições do HN: sistemas frontais e teleconexões com a OAN	042
2.2 Ciclo de Atividade Solar	043
2.2.1 Campos Magnéticos no Sol	043
2.2.2 A Zona Convectiva e o Magnetismo	044
2.2.3 Manchas Solares: Natureza e Propriedades	046
2.2.4 Ciclos de Atividade Solar e o Número de Manchas Solares	050
2.2.5 Outros Parâmetros de Atividade Solar	058
2.2.6 Mecanismos Físicos de Interação com o Clima Terrestre	058
2.3 Ciclos Orbitais Lunares	071
2.3.1 Precessão Nodal	071
2.3.2 Precessão Apsidal	073
2.3.3 Marés Diurnas e Semidiurnas – Variações Latitudinais e Longitudinais – Equinócios e Solstícios	074
2.4 Influências das forças solar e lunar sobre o clima terrestre e o NEB	076
2.4.1 Respostas climáticas à variabilidade magnética solar	076
2.4.2 Respostas climáticas a ciclicidades orbitais lunares e mecanismos	078

2.4.3 Periodicidades do regime pluviométrico do NEB e forçantes externas	085
3 MATERIAIS E MÉTODOS	086
3.1 Dados Utilizados	086
3.2 Metodologia: Convergência e Divergência de Médias Móveis	088
3.2.1 Indicadores Técnicos	088
3.2.2 Médias Móveis	089
3.2.3 Médias Móveis Exponenciais	089
3.2.4 Cálculo da MACD	089
3.2.5 Padrões e Interpretações de Sinais	091
3.2.6 Precedentes de emprego da MACD e otimizações de períodos de EMA	095
3.2.7 Especificidades da Aplicação à Previsão Climática no Presente Estudo	097
4 RESULTADOS	100
4.1 Totais Pluviométricos Anuais de Maceió/AL	100
4.2 Totais Pluviométricos Anuais de Natal/RN	108
4.3 Totais Pluviométricos Anuais de São Luís/MA	113
4.4 Totais Pluviométricos Anuais de Barreiras/BA	117
4.5 Totais Pluviométricos Anuais de Petrolina/PE	121
5 DISCUSSÃO	125
6 CONCLUSÕES	144
REFERÊNCIAS	150

1 INTRODUÇÃO

A precipitação é a mais importante variável meteorológica nos sistemas terrestres e oceânicos nas regiões tropicais, devido à sua influência nos processos físicos e biogeoquímicos (Hastenrath, 1985).

No Nordeste do Brasil (NEB) – região que abarca todas as séries de dados pluviométricos submetidas ao rigor técnico da análise estatística ora empreendida – variações na precipitação em diferentes escalas temporais, especialmente as que levam a condições de seca, impõem sérias restrições ao uso de recursos hídricos, com profundo impacto socioeconômico na região. Durante anos de secas severas, a população do semiárido depende dos planos emergenciais do governo brasileiro para alocação de água. Deste modo, saber quando e onde os intervalos prolongados podem ocorrer na pluviometria é algo crítico para o gerenciamento de agricultura, recursos hídricos e saúde pública (Valadão et al. 2017).

A caracterização dos padrões espaciais e temporais da precipitação – e dos sistemas meteorológicos que a influenciam – contribui para o embasamento de planejamento, estabelecimento e gerenciamento de várias políticas públicas e privadas em áreas como a agricultura (tempo de semeadura, irrigação e drenagem, zoneamento agroclimático, riscos climáticos), silvicultura (distribuição espacial de espécies, incêndios florestais, restauração de áreas degradadas), defesa civil (riscos de deslizamentos ou inundações), poluição atmosférica (deposição seca ou úmida de material particulado), hidrologia (estimativas de vazão de rios, transporte de sedimentos, risco de inundação), geração de energia hidrelétrica, entre outras (Lyra et al. 2014).

Todos os pesquisadores que já dissertaram cientificamente a respeito de aspectos climatológicos do NEB são uníssonos em defender uma divisão em sub-regiões climáticas, dada a grande variação espacial nos valores de precipitação anual média, os distintos intervalos de meses no decorrer do ano que denotam a estação chuvosa em cada uma delas (climatologia anual), os biomas predominantes e a ação de diferentes sistemas meteorológicos a protagonizar a modulação de seu regime pluviométrico. Os autores tendem a diferir apenas quanto ao número de fragmentos em que o NEB deve ser climatologicamente dividido, mas comumente propõem de três (Kousky, 1979; Barbosa et al. 2006; Vieira et al. 2015; Molion & Bernardo, 2002; Costa et al. 2018) a quatro (Palharini & Vila, 2017) ou cinco áreas (Oliveira et al. 2017; Mariano et al. 2018), como será melhor discorrido à seção 2.1.2.

Especialmente na sub-região do semiárido, também conhecida como “região da

Caatinga” ou “Polígono da Seca” (Silva et al. 2018), desastres naturais costumam resultar de variabilidades climáticas que reduzem a chuva necessária para a produção agrícola e desencadeiam fome, morte e deslocamento social (Caviedes, 2001). Hastenrath & Heller (1977) chegam a afirmar que o NEB tem sido reiteradamente “assombrado” por secas ao longo dos registros históricos.

Alvarez et al. (2015) refletem que é necessário admitir que não há uma solução única para os impactos da seca no semiárido (do NEB), uma das regiões de clima semiárido mais populosas e extensas do mundo. Várias medidas têm sido adotadas, em maior ou menor grau, para lidar com a seca e mitigar o problema, incluindo cisternas (cacimbas), barragens (represas), barragens subterrâneas em leitos secos de rios, poços artesianos, caminhões-pipa e até canais artificiais para distribuição ou transposição de águas.

Em contrapartida ao problema da seca, a ocorrência de estações chuvosas prolongadas ou excessivas pode comprometer vários setores da sociedade, aumentando riscos a vidas humanas e propriedades, com consequências socioeconômicas possivelmente devastadoras (Valadão et al. 2017). Chaves & Cavalcanti (2001) também salientam que chuvas intensas sobre a área costeira, causando deslizamentos de terra e perda de vidas, constituem, também, um problema social e merecem atenção.

É amplo o conhecimento revelado na literatura de que a incidência de precipitação no NEB está intrinsecamente relacionada a interações oceano-superfície-atmosfera. Tais interações físicas e dinâmicas induzem sistemas climáticos complexos, associados, principalmente, ao Dipolo de Temperatura de Superfície do Mar (TSM) do Atlântico (Servain, 1991), à El Niño-Oscilação Sul (ENOS), e teleconexões características, como com a Oscilação Decadal do Pacífico (ODP), a Oscilação Multidecadal do Atlântico (OMA) e a Oscilação de Madden-Julian (OMJ), de tal forma que, a depender das suas fases de comportamento, positiva ou negativa, o nível médio anual de precipitação tende a ser superior ou inferior à média histórica (Mariano et al. 2018; Marengo et al. 2013; Uvo et al. 1998; Souza & Ambrizzi, 2006; Valdão et al. 2017).

Tais oscilações oceânicas exercem controle sobre vários dos sistemas meteorológicos que afetam a região. A respeito destes, são mais contumazes, em termos de efetividade enquanto regentes da pluviometria, os de meso a grande escala, nomeadamente, os Sistemas Frontais (SF), a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), as Perturbações Ondulatórias no campo dos ventos Alísios (POA), Sistemas e Complexos Convectivos de Mesoescala (SCM e CCM), as Brisas Marítima e Terrestre (BMT), os Distúrbios Ondulatórios de Leste (DOL), os

Vórtices Ciclônicos em Altos Níveis (VCAN), Vórtices Ciclônicos em Médios Níveis (VCMN), o Anticiclone Suptropical do Atlântico Sul (ASAS), a Alta da Bolívia (AB), a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), a Zona de Convergência do Leste do Nordeste (ZCEN), a Corrente de Jato do Nordeste Brasileiro (CJNEB) e as Linhas de Instabilidade (LI) (Uvo et al. 1998; Molion & Bernardo, 2002; Hounsou-Gbo et al., 2016; Moscati & Gan, 2007; Pontes da Silva et al. 2011; Lyra et al. 2014; Lyra et al. 2016; Palharini & Vila, 2017; Oliveira et al. 2017; Costa et al. 2018).

Embora as oscilações climáticas sejam induzidas por dinâmicas oceânicas internas ainda pouco compreendidas, os principais modos de variabilidade climática, como ENOS, ODP e OMA, podem ser induzidos, segundo Scafetta (2010, 2012), por forçamentos periódicos extraterrestres complexos, que agem sobre o clima por meio de mecanismos de amplificação e de retroalimentação.

Em sequência a pesquisas pioneiras de fins do século XIX e princípio do século XX, estudos conduzidos nas últimas décadas, apresentados neste trabalho, indicam, com robustez estatística, uma relação de vários desses ciclos climáticos com variações nos parâmetros orbitais lunares e na atividade magnética solar. Pelo que resta incontestemente a assertiva de que uma série de ciclos de atividade solar e de parâmetros orbitais astronômicos produzem, em variadas medidas, efeitos nos climas terrestres.

Os parâmetros orbitais apresentam diferentes ciclos de mudança que afetam a quantidade de insolação recebida pela Terra. As causas das variações orbitais terrestres estão relacionadas à influência dos movimentos dos corpos do Sistema Solar. Ou seja, os parâmetros orbitais de Terra oscilam de acordo com a variação dos campos gravitacionais e magnéticos gerados pelo Sol, pela Lua e pelos outros planetas, especialmente Júpiter e Saturno (Scafetta 2010).

O Sol é constituído de plasma, i.e., gás ionizado, condutor elétrico, que se move continuamente em seu interior em variadas direções e sentidos. Um dos resultados efetivos desses movimentos é a produção do campo magnético solar, notoriamente complexo, mas que basicamente se resume em dois componentes, o polar e o toroidal, que se alimentam mutuamente. Sobretudo por força do último e sua interação com os fluxos convectivos solares, glóbulos de campo magnético excepcionalmente intenso são criados e afloram à superfície solar (fotosfera), produzindo o fenômeno das manchas solares. Tais características fornecem uma medida da atividade magnética solar e sua observação começou a ser registrada nos anos 1610, por pioneiros como Galileu Galilei, Thomas Harriot, Johannes Fabricus e

Christoph Scheiner, dando início a uma série de dados que chega aos dias hodiernos.

A análise desses dados revelou, posteriormente, periodicidades na atividade solar, sendo mais relevantes, para o escopo deste estudo, as de 11 anos (Ciclo de Schwabe) e 22 anos (Ciclo de Hale).

Fenômenos como a rotação diferencial do Sol e a convecção – o dínamo solar – dando origem aos campos magnéticos polar e toroidal, os processos eruptivos na atmosfera solar (como flares e Ejeções de Massa Coronal – CME, na sigla em inglês), a radiação eletromagnética (IR, UV e raios-X), o vento solar e o campo magnético interplanetário são todas manifestações da atividade solar (Dobrica et al., 2017). A força associada ao ciclo solar de 11 anos inclui não somente a Irradiância Solar Total (TSI, na sigla em inglês), mas também comprimentos de onda mais curtos, como UV, EUV e raios-X, bem como raios cósmicos altamente energéticos (Davis & Brewer, 2011), de modo que a variabilidade solar pode afetar o ambiente de várias maneiras e a várias escalas temporais, tanto diretamente, por modificações de longo prazo nas emissões radiativas solares, afetando o balanço de energia da superfície da Terra, como indiretamente, por efeitos do vento solar na magnetosfera e ionosfera (atividade geomagnética) e pela modulação do fluxo de raios cósmicos por meio de efeitos combinados dos campos magnéticos solar e terrestre (Dobrica et al. 2017; Haigh, 2007; Miyhara et al. 2009; Morton, 2014).

As oscilações nos raios cósmicos devem contribuir para regular a cobertura de nuvens e causar oscilações de albedo, que, em última análise, induzem oscilações na circulação e na temperatura atmosférica, assim como nos oceanos, ocasionando mudanças climáticas (Svensmark et al. 2009; Scafetta, 2012).

Segundo Zhou et al. (2016), respostas climáticas a variações na TSI e irradiância em UV tem sido inferidas por muitos autores, com mais de mil relatos ao longo dos dois últimos séculos. Ciclos em inúmeros fenômenos climáticos, incluindo temperaturas troposféricas e estratosféricas, TSM, Pressão ao Nível do Mar (PNM) e cobertura de nuvens de baixos níveis tem-se observado correlacionar-se com o ciclo solar de 11 anos (Pierce & Adams, 2009).

O ciclo de marés de sizígia e quadratura, identificado pelo homem comum há milênios, sofre, consoante devidamente demonstrado na literatura recente (Haigh et al. 2011), modulações entre as escalas decadal e bidecadal, nomeadamente causadas pela Precessão Apsidal Lunar (ou ciclo do perigeu-apogeu), com periodicidade de 8,85 anos, e pelo Ciclo Nodal Lunar, com periodicidade de 18,6 anos. Sua influência no transporte de calor pelas correntes oceânicas e, conseqüentemente, nas estruturas do clima global, é matéria de

crescente consenso na literatura atual, que encontra relações de oscilações climáticas, como a Oscilação Decadal do Pacífico (ODP) (Ullman et al. 2016) e El Niño-Oscilação Sul (ENOS) (Ceverny & Shaffer, 2001; McKinnell & Crawford, 2007) com frações e múltiplos desses ciclos – especialmente o meio período, no caso da precessão das apsides, de 4,4 anos – e o múltiplo de 56 anos, em se tratando do Ciclo Nodal (3x18,6).

Para Maksimov e Smirnov (1965), é a variação da força gravitacional promovida por Lua e Sol que alteram a intensidade das correntes oceânicas e marés e provocam variações persistentes nas TSM.

Rogachev & Shlyk (2018) argumentam que a mistura diapícnica relacionada às marés é um dos fatores relevantes a manter a circulação oceânica e o clima e é modulada pelo ciclo orbital lunar de 18,6 anos. Além das anomalias de salinidade, anomalias de TSM com mesma periodicidade são observadas na região de Kuroshio, no extremo oriente russo.

Marés fortes podem trazer águas profundas e frias à superfície, e levar a um resfriamento global. De outro modo, marés fracas podem resultar em aquecimento global. Correlações positivas significativas sugerem que a gravidade lunar tem uma influência nas variações de temperatura na região de Weichang, China (Wang et al. 2018)

Em adição à tacitamente esperada influência das forçantes solar e lunar no clima do NEB, de modo indireto, por meio dos efeitos produzidos nas oscilações oceânicas que impactam a pluviometria da região, é salutar mencionar que vários autores têm encontrado periodicidades especificamente condizentes aos ciclos astronômicos acima descritos (Sampaio Ferraz, 1950; Moura & Shukla, 1981; Molion & Bernardo, 2002; Lyra et al. 2016; Da Silva, 2017).

Centros nacionais e internacionais divulgam previsões climáticas sazonais nas quais se percebe que, em boa parte da região Nordeste, principalmente o norte, os modelos climáticos apresentam boa destreza, notadamente quando padrões oceânicos se mostram bem configurados. No entanto, o horizonte de uma boa previsão climática se restringe, muitas vezes, apenas ao trimestre seguinte, havendo uma demanda crescente da sociedade em conhecer como se comportará o regime pluviométrico nos anos seguintes.

Destarte, com respaldo nas variações astronômicas supracitadas, tendo ciência de que elas, de fato, promovem efetivas influências no clima, e de que o NEB é uma das regiões do Brasil que melhor respondem aos padrões de acoplamento oceano-atmosfera – receptores e propagadores dessas forçantes extraterrenas – nasce, com naturalidade, a iniciativa de se efetuar uma contribuição à previsibilidade climática da região, por meio de uma técnica que

viabilize beneficiar-se estatisticamente das correlações existentes.

Do ponto de vista pragmático, também se vê como natural, para tal propósito, a adoção de uma ferramenta estatística nascida num ambiente que lida com séries temporais de natureza caótica, o mercado de ações. O indicador/oscilador financeiro “Convergência e Divergência de Médias Móveis” (MACD, na sigla em inglês) foi desenvolvido (Appel, 2005) com o objetivo de antever tendências de alta e baixa nos preços de ações em bolsas de valores, mas mostra-se incrivelmente versátil quanto à sua aplicação a séries de dados de distintas escalas temporais e grandezas físicas, bem como quanto aos parâmetros atribuídos às suas médias móveis exponenciais, que podem, a critério do usuário e seus objetivos, sofrerem otimizações/adequações de modo a corresponder às periodicidades dos ciclos aludidos.

1.1 Objetivo Geral

Valer-se dos acurados parâmetros cíclicos astronômicos a fim de, possivelmente, visualizar tendências futuras na variável climatológica da precipitação, por meio de promissora ferramenta estatística originária da econometria, contribuindo, assim, para a ampliação, lapidação e extensão das previsões climáticas, especialmente, na presente ocasião, para o Nordeste do Brasil (NEB).

1.2 Objetivos Específicos

- Submeter as extensas séries temporais de dados pluviométricos ora utilizadas a uma cautelosa e criteriosa análise estatística por meio da técnica empregada, absorvida de área diversa;
- Avaliar a adaptação e a eficácia do oscilador estatístico como um todo e, individualmente, de cada um dos seus parâmetros, com base na aferição de tendências nos dados passados das próprias séries;
- Em caso de sucesso, beneficiar-se do caráter de atualização dos dados, que se estendem até o ano anterior ao da execução deste trabalho – portanto, até o último valor conhecido da variável – para explorar as tendências futuras, nos anos vindouros, das diferentes regiões, provendo, desde então, aos pesquisadores e à sociedade, uma útil adição às ferramentas de previsibilidade climática.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Climatologia Inerente à Área de Estudo

2.1.1 Caracterização geopolítica, socioeconômica e os biomas presentes

Todas as cinco séries de dados pluviométricos de que se beneficia o presente estudo advêm de diferentes, propositalmente espaçadas, estações situadas na região Nordeste do Brasil (NEB).

O NEB se localiza na zona equatorial, compreendido entre 1 e 18° S de latitude e entre 35 e 47,1° W de longitude (Moura & Shukla, 1981). Representa a extremidade oriental do continente americano, com uma região costeira separada por “meros” 3000 km do continente africano (Caviedes, 2001).

A região consiste de nove estados da federação: Maranhão (MA), Piauí (PI), Ceará (CE), Rio Grande do Norte (RN), Paraíba (PB), Pernambuco (PE), Alagoas (AL), Sergipe (SE) e Bahia (BA), cobrindo uma área de aproximadamente 1.561.177,8 km², equivalente a 18,3% do território brasileiro, limitando-se a leste e ao norte com o Oceano Atlântico, a oeste e sudoeste, com os Estados do Pará, Tocantins e Goiás e, ao sul, com Minas Gerais e Espírito Santo (Barbosa et al., 2006; Da Silva, 2017). É considerada uma região anômala na zona equatorial porque, em contraste a outras, como a Amazônia, o NEB tem um clima tropical semi-árido como dominante (Barbosa et al., 2006).

Localmente conhecida apenas como “Nordeste”, a região é fortemente caracterizada por questões socioeconômicas regionais, como altas taxas de analfabetismo, baixa renda, migração a centros urbanos, exclusão social, entre outras (Vieira et al., 2015). É a terceira maior e a mais populosa região do Brasil (Valadão et al., 2017), e contém a mais populosa região semi-árida do mundo (Marengo et al., 2016). A economia tem sido fortemente baseada no setor primário (agricultura e pecuária), segundo Lyra et al. (2016), enquanto Mariano et al. (2018) acrescenta que a agricultura da região é majoritariamente de subsistência, com destaque para feijão, cassava, batatas e pasto, com emprego de baixos níveis de tecnologia.

Devido às altas taxas de evaporação e à breve duração da estação chuvosa, muitos dos rios são temporários, e inundações abruptas ocorrem somente durante a estação chuvosa. A vegetação natural inclui florestas tropicais (Mata Atlântica), florestas ribeirinhas, savanas e florestas de montanhas, entre outras; entretanto, a vegetação natural que domina 62% do

semiárido é a Caatinga (Vieira et al., 2015).

2.1.2 Variabilidade pluviométrica espacial e temporal: sub-regiões

O NEB possui diferentes regimes de precipitação, com uma distribuição espaço-temporal variável e irregular, apresentando uma alta intensidade de eventos hidrológicos extremos (Costa et al., 2018; Pereira et al., 2014). Apresenta uma distribuição de precipitação anual altamente variável, de mais de 2000 mm nas áreas costeiras do leste a uma média de menos de 400 mm no interior. Essas áreas interioranas, de clima mais árido, possuem a maior variabilidade interanual, por vezes recebendo apenas 25% da média e, noutras ocasiões, mais de 200% (Kousky, 1979).

Para Palharini & Vila (2017), o NEB é predominantemente uma região semiárida, apresentando precipitação escassa e afetado, com frequência, por longos períodos de seca.

Hastenrath & Heller (1977) chegam a afirmar que o NEB tem sido reiteradamente “assombrado” por secas ao longo dos registros históricos (Hastenrath & Heller, 1977). O sofrimento humano engendrado pelas secas é mencionado em inúmeras análises sociais e históricas (Caviedes, 2001).

De fato, o problema da seca no Nordeste é não somente diuturno em si, mas o próprio interesse científico por ele despertado também remonta a diligentes estudos realizados desde as primeiras décadas do século XX, como se atesta pelos trabalhos de Sampaio Ferraz (1925), Walker (1928) e Freise (1938).

Mas alguns autores (Palharini & Vila, 2017; Costa et al. 2018) também enfatizam que áreas costeiras podem atingir mais de 1500 mm de chuva anual, havendo casos de precipitação significativa, capaz de causar inundações e deslizamentos de terra em áreas vulneráveis, levando a perdas econômicas e humanas.

Oliveira et al. (2017) argumentam que a análise do NEB por sub-regiões proporciona um quadro mais detalhado da variabilidade climática na região, uma vez que cada uma das sub-regiões do NEB tem características climáticas diferentes, devido à ação de diferentes sistemas atmosféricos, como a ZCIT, os VCAN, os DOL, as LI, os SF e a ZCAS (estes dois últimos especialmente na parte mais austral de BA). Com base em seu estudo por análise de clusters segundo distância Euclidiana e método de Ward, chegaram a cinco sub-regiões climatológicas para o NEB, de acordo com a variação mensal de precipitação: Costa Norte (NC); Semiárido Norte (NS); Noroeste (NW); Semiárido Sul (SS) e Costa Sul (SC). As sub-

regiões NS e NW apresentam variabilidade semelhante, mas a intensidade da precipitação foi diferente.

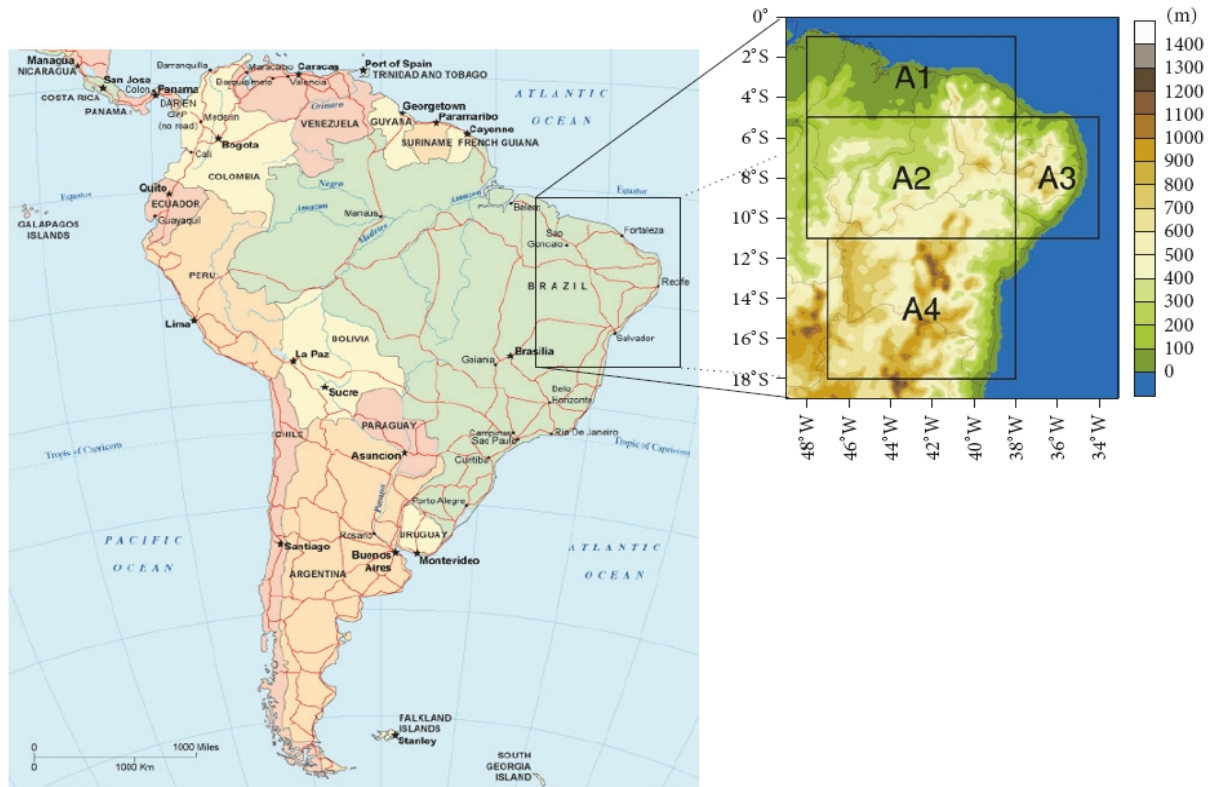
Palharini & Vila (2017) propõem as seguintes delimitações climatológicas para o NEB, segundo os sistemas meteorológicos de atuação predominante. Suas demarcações são melhor observadas na Figura 2.1.1.

- Área A1, contendo as coordenadas (1° S, 48° W) (5° S, 38° W), que compreendem o norte dos estados do Maranhão, Piauí e Ceará. Os sistemas mais frequentes nesta região são a ZCIT, Linhas de Instabilidade, a convergência de umidade (brisas e perturbações nos Alísios) e a convecção local;
- Área A2, contendo as coordenadas (11° S, 48° W) (5° S, 38° W), que compreendem parte dos estados do Maranhão, Piauí, Ceará, Paraíba, Pernambuco e Bahia. Esta região é marcada pelo baixos valores acumulados de precipitação, no entanto resquícios de sistemas que ocorrem nas áreas A1, A2 e A3 podem influenciar esta região.
- Área A3, contendo as coordenadas (11° S, 38° W) (5° S, 34° W), que compreendem os estados do Rio Grande do Norte, Paraíba, Pernambuco, Alagoas, e Sergipe. Região caracterizada pela convergência de umidade dos Alísios, as ondas de leste e as brisas marítima e terrestre, associadas a topografia e a convergência de umidade;
- Área A4, contendo as coordenadas (11° S, 47° W) (18° S, 38° W), que compreendem grande parte do estado da Bahia. Esta região é influenciada pela presença da ZCAS, sistemas frontais, convecção local e brisas.

Costa et al. (2018) observam que os diferentes regimes de precipitação têm em comum o fato de se concentrarem em poucos meses. A divisão climatológica do NEB adotada por Costa et al. (2018), com base, segundo os próprios, especialmente, em Kousky (1979) e Grimm (2011), pode ser vista na Figura 2.1.2, acompanhada da disposição gráfica da distribuição anual de chuva sobre cada sub-região. Ainda segundo os autores: no norte do NEB, a estação chuvosa está associada ao deslocamento austral da ZCIT, de março a maio; no leste do NEB, a estação chuvosa se concentra no período de maio a julho (MJJ) e é relacionada fortemente a anomalias das TSM do Oceano Atlântico Tropical sul, com eventos máximos de precipitação e consequentes episódios de inundações influenciados por Distúrbios Ondulatórios de Leste; no sul do NEB, a estação chuvosa é influenciada

principalmente pela invasão de frentes frias, de dezembro a fevereiro (DJF).

Figura 2.1.1 – América do Sul, com ênfase no NEB. As áreas demarcadas são A1 (norte); A2 (interior); A3 (leste); e A4 (sul).



Fonte: Palharini & Vila (2017).

2.1.3 Sistemas meteorológicos a influenciar os regimes pluviométricos

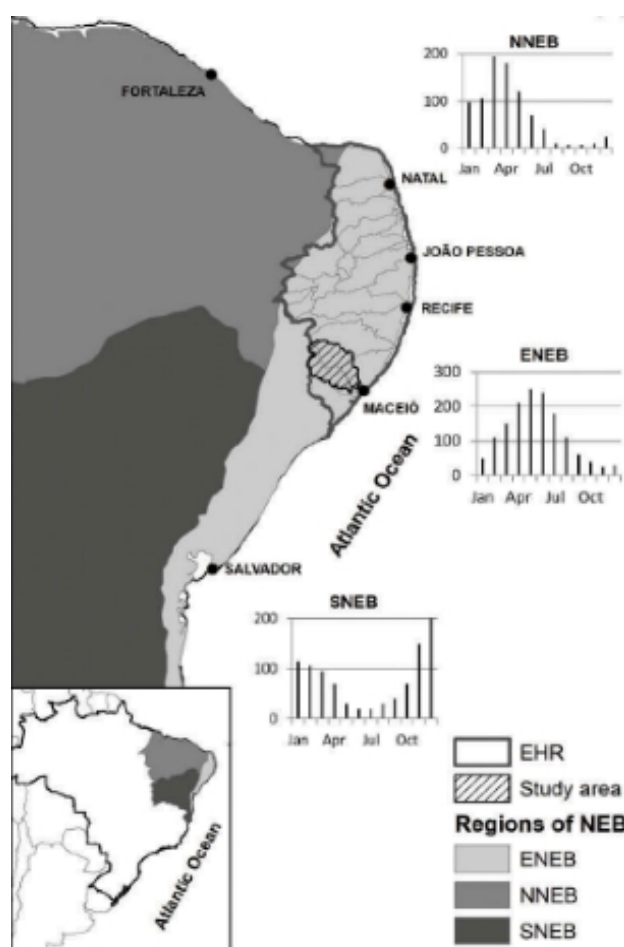
O NEB exibe não somente uma grande variabilidade no total de precipitação de ano para ano, mas também uma alta variabilidade espacial e temporal na precipitação que ocorre em sua estação chuvosa. Tal variabilidade mensal está relacionada a diferentes sistemas que causam precipitação ao longo da região (Uvo et al. 1998).

De fato, como comentam Molion & Bernardo (2002), a própria existência de múltiplos regimes para partes distintas do NEB sugere que mais de um mecanismo da circulação geral seja responsável pela precipitação pluvial regional.

Os mecanismos dinâmicos que produzem chuvas no NEB podem ser classificados em mecanismos de grande escala, responsáveis por cerca de 30% a 80% da precipitação observada dependendo do local, e mecanismos de micro e mesoescalas, que completam os totais observados. Dentre os mecanismos de grande escala, destacam-se os Sistemas Frontais

(SF) e a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT). Perturbações Ondulatórias no campo dos ventos Alísios (POA), Complexos Convectivos de Mesoescala (CCM) e Brisas Marítima e Terrestre (BMT) fazem parte da mesoescala, enquanto circulações orográficas e pequenas células convectivas constituem fenômenos da microescala (Molion & Bernardo, 2002).

Figura 2.1.2 – As diferentes regiões pluviométricas do NEB e suas características mensais da distribuição de precipitação. Obs: a “área de estudo” que consta da legenda da figura se refere ao estudo original dos autores, não ao presente trabalho.



Fonte: Costa et al. (2018).

Em adição a tais sistemas, outros autores nomeiam como importantes influências no regime de precipitação da região: os Distúrbios Ondulatórios de Leste (DOL), os Vórtices Ciclônicos em Altos Níveis (VCAN), Vórtices Ciclônicos em Médios Níveis (VCMN), Sistemas (e Complexos) Convectivos de Mesoescala (SCM e CCM), o Anticiclone Suptropical do Atlântico Sul (ASAS), a Alta da Bolívia (AB), a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), a Zona de Convergência do Leste do Nordeste (ZCEN), a Corrente de

Jato do Nordeste Brasileiro (CJNEB) e as Linhas de Instabilidade (LI) (Uvo et al. 1998; Hounsou-Gbo et al., 2016; Moscati & Gan, 2007; Pontes da Silva et al. 2011; Lyra et al. 2014; Lyra et al. 2016; Palharini & Vila, 2017; Costa et al. 2018), alguns dos quais serão pormenorizados em subseções a seguir.

2.1.3.1 Zona de Convergência Intertropical (ZCIT)

Hastenrath e Heller (1977), a partir de dados pluviométricos, bem como vazões de rios e dados oceânicos de sete elementos meteorológicos (velocidade e direção dos ventos, pressão ao nível do mar, nebulosidade, temperatura de superfície do mar, do ar e frequência de precipitação), coletados por navios, compreendendo mais de sete milhões de observações individuais entre 1911 e 1972, dentre as latitudes de 30°N e 30°S, da costa da África ao Pacífico oriental, concluíram que a estação chuvosa do NEB está relacionada à migração sazonal da ZCIT ao sul. As secas são caracterizadas por uma expansão do (da Alta Subtropical do) Atlântico Sul ao Equador e uma retração do (da Alta Subtropical do) Atlântico Norte ao polo, fortemente associadas ao deslocamento para o norte da ZCIT. Concomitantemente, as bandas zonalmente orientadas de máxima nebulosidade e precipitação se posicionam muito ao norte, os Alísios do Atlântico Norte se enfraquecem, e os do Atlântico Sul se tornam mais intensos que a média de longo prazo.

Estudos observacionais citados por Nobre e Molion (1988) indicaram a existência de ligação entre a ZCIT e as anomalias de chuva sobre o Norte do NEB (NNEB). Em anos de seca no NNEB, a ZCIT fica bloqueada mais ao norte de sua posição normal. O NNEB fica, então, debaixo de uma região de subsidência que inibe a precipitação.

Em anos úmidos, ao contrário, a ZCIT move-se até cerca de 5°S e torna-se intensa com o aumento da convergência. As chuvas (secas) no NNEB, portanto, coincidem com o posicionamento da ZCIT mais para o sul (norte), acrescentam Molion & Bernardo (2002).

2.1.3.2 Sistemas Frontais (SF)

Molion & Bernardo (2002) ponderam que um mecanismo importante de produção de chuva para o sul do Nordeste (SNEB) e para o leste do Nordeste (ENEb) é a penetração de sistemas frontais, ou seus restos, entre as latitudes 5°S e 18°S. A penetração até latitudes equatoriais ocorre mais frequentemente no inverno do Hemisfério Sul (HS), pois o

posicionamento médio da ZCIT, o equador meteorológico, é em torno de 10°N a 14°N nessa época.

Kousky (1979) demonstra que sistemas frontais ou seus resquícios: 1) penetram a parte sul do NEB ao longo de todo o ano; 2) desempenham um papel importante no máximo de precipitação de dezembro-janeiro no sul do NEB; 3) estão relacionados a mais chuva na costa da BA ao RN nos meses de outono e inverno; 4) às vezes atinge latitudes mais ao norte, afetando o Ceará; 5) reduzem a pressão à superfície nas baixas latitudes, favorecendo assim um movimento da ZCIT em direção ao sul. Num breve adendo ao autor acerca desta última observação: ocasionando, assim, indiretamente, uma maior precipitação também sobre o norte do NEB.

Acerca disto, Fedorova et al. (2016) salientam que as frentes frias mais comumente influenciam a precipitação e a formação de fenômenos adversos no NEB quando separadas do centro ciclônico. São raros os casos em que as zonas frontais começam a mostrar alguma influência no NEB antes de se separarem do ciclone. Mas, em todos os eventos, após a separação ocorrer, a parte destacada forma uma banda de nebulosidade, que, por sua vez, afeta o tempo na região.

2.1.3.3 Perturbações Ondulatórias nos Alísios (POA) e Brisas Marítima e Terrestre (BMT)

Distúrbios que são formados pela convergência dos ventos que acompanham os SF com os ventos Alísios. Dão origem a grande nebulosidade ao se aproximarem de áreas costeiras, devido à convergência do fluxo de umidade e contraste de temperatura entre oceano e continente (Pontes da Silva et al. 2011; Lyra et al. 2014).

Nobre & Molion (1988) sugeriram que a confluência dos Alísios com a brisa de terra (noturna) pode ser um dos mecanismos importantes na produção de chuva na região costeira. O campo dos ventos Alísios é frequentemente perturbado por penetrações de sistemas frontais em latitudes baixas, quer sobre o oceano quer sobre o continente. No Atlântico Sul, a convergência dos ventos de sul, associados aos sistemas frontais, com os ventos de leste, provocam essas ondulações que se propagam para oeste imersas no campo dos Alísios. Em fase com a brisa marítima, essas perturbações chegam a penetrar até 300 km para o interior do continente (Molion & Bernardo, 2002).

2.1.3.4 Ondas (ou Distúrbios Ondulatórios) de Leste (DOL)

Muitos autores, como os citados nesta subseção, fazem distinção entre as POA e os DOL, especialmente devido ao nível atmosférico em que ocorrem estes fenômenos (POA em baixos níveis, usualmente diagnosticadas até 925 hPa; e DOL alcançando os médios níveis, usualmente diagnosticados de 850 hPa a 500 hPa) e à escala (POA, por vezes, classificadas como de mesoescala; sendo DOL de macroescala).

Na maioria dos casos, os DOL podem ser identificados em imagens de satélite como aglomerados de nuvens de crescimento vertical raso, avançando do Atlântico Sul tropical e, ocasionalmente, intensificando-se ao atingir o ENEB, gerando nuvens de forte desenvolvimento vertical (Gomes et al. 2019).

Para Lyra et al. (2014) e Costa et al. (2018), os DOL têm comprimentos de onda entre 1500 e 4000 km, velocidade de 8 m/s e períodos de oscilação entre 2,5 e 5,5 dias. Conversões de energia de barotrópica a baroclínica ocorrem durante sua trajetória por meio da interação com o Jato de Leste Africano a 600 hPa. São responsáveis por variações de nebulosidade, mudanças na intensidade do vento e na pressão atmosférica próximo à superfície e fortes precipitações sobre o ENEB.

Segundo apurado em recente estudo (Gomes et al. 2019), os DOL contribuem com 60% do total pluviométrico da estação chuvosa (AMJJA) numa estreita faixa do ENEB, da costa de AL a PB, caindo para 55% quando considerada uma porção maior do ENEB, nomeadamente, do leste da BA ao leste do RN.

Gomes et al. (2019) argumentam que, quando os DOL interagem com circulações locais induzidas, por exemplo, pela topografia (ou pelas BMT, como defendido acima, quanto às POA, por Nobre & Molion, 1988; Moura & Shukla, 1981), pode ocorrer convergência de baixos níveis, resultando em precipitação aumentada ao longo das costas norte e leste do NEB.

2.1.3.5 Alta da Bolívia (AB)

Nobre e Molion (1988) sugeriram que a semiaridez do NEB é devida à adjacência à Região Amazônica, onde ocorrem movimentos convectivos amplos e intensos, sendo um dos ramos ascendentes da Circulação de Walker. O ar ascendente sobre a Amazônia adquire movimento anticiclônico nos níveis altos (Alta da Bolívia), diverge e, parte dele, desloca-se

para leste, criando o ramo descendente e uma forte inversão psicrotérmica.

2.1.3.6 Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis (VCAN)

Circulação ciclônica situada nos altos níveis da troposfera. Os VCAN são caracterizados por movimentos descendentes no centro do vórtice e ascendentes na sua periferia; o ar frio e seco no centro inibe a formação de nuvens, produzindo céu claro, enquanto o ar quente e úmido na periferia a favorece, provocando intenso desenvolvimento de nuvens convectivas. Muitos estudos mostram casos de VCAN sendo observados durante o verão do HS, quando tendem a se localizar logo ao leste da Amazônia, sendo mais frequentes em janeiro (Pontes da Silva et al. 2011; Fedorova et al. 2018; Palharini & Vila, 2017).

2.1.3.7 Corrente de Jato do Nordeste Brasileiro (CJNEB)

Uma corrente de ventos fortes, em níveis superiores, atuante no NEB especialmente no inverno austral. Geralmente, a CJNEB não desenvolveria nebulosidade capaz de produzir precipitações intensas. No entanto, se, abaixo dela, as condições forem favoráveis, por exemplo, se houver um cavado, POA ou uma extremidade frontal, as circulações transversais da CJNEB organizarão os movimentos verticais, dando suporte àqueles sistemas (Pontes da Silva et al. 2011).

Fedorova et al. (2018) classificaram os eventos de CJNEB três tipos, diferindo quanto à localização e à direção:

- Tipo I: CJNEB de sul, entre a AB e um VCAN e/ou um cavado de altos níveis;
- Tipo II: CJNEB de norte, entre a ASAS e um VCAN (e/ou cavado);
- Tipo III: CJNEB de oeste, entre um VCAN no HN e um cavado de altos níveis no HS.

2.1.3.8 Fenômenos de mesoescala e microescala

Consoante Pontes da Silva et al. (2011) e Molion & Bernardo (2002), sistemas meteorológicos de escalas espaçotemporais menores que a dos anteriormente citados, também devem ser mencionados como, por exemplo, os Complexos Convectivos de Mesoescala (CCM) e as Linhas de Instabilidade (LI), por vezes denominadas pré-frontais. Em ainda

menor escala, maior aquecimento provoca intensificação da convergência e a convecção local que, embora produza pequenas células de chuva e baixos totais pluviométricos, não deve ser desprezada por constituir-se um mecanismo muito importante para a vida do semiárido. Porém, a convecção local pode ser inibida quando os mecanismos de escala maior não forem favoráveis (Molion & Bernardo, 2002; Pontes da Silva et al. 2011).

2.1.4 Classificação climatológica das nuvens precipitantes

Palharini & Vila (2017) estimam que nuvens estratiformes e de convecção profunda são mais significativas ao norte e ao oeste da região, enquanto as de convecção rasa são importantes sobre o oceano e áreas costeiras, sobre as quais obtiveram um forte sinal de modulação da precipitação por nuvens deste último tipo.

Comparando o número de eventos de nuvens precipitantes sobre o continente e o oceano, encontraram que a quantidade sobre o continente é maior nos meses de dezembro a abril para nuvens de convecção profunda, e nos meses de novembro a fevereiro para as estratiformes, enquanto as de convecção rasa ocorrem mais frequentemente – sobre oceano e áreas costeiras – de março a agosto.

2.1.5 Grandes Oscilações Oceânicas: seus impactos diretos e teleconexões

Os oceanos são os maiores reservatórios de calor na Terra. Entre os oceanos e a atmosfera, a troca de calor impulsiona os ventos e a circulação atmosférica em todo o mundo. Os ventos, por sua vez, geram as correntes oceânicas superficiais e a circulação termo-halina. Assim, a imensa quantidade de calor dos oceanos e a estreita relação com atmosfera corroboram o efeito extremamente importante dos oceanos sobre o clima global (Oliveira et al. 2017).

As anomalias de TSM em baixas latitudes estão entre as forçantes mais importantes para a variabilidade interanual de médias mensais de precipitação no NEB. Devido a uma alta relação não-linear entre temperatura e pressão de vapor de saturação, pequenas anomalias de TSM alteram a evaporação e a convecção úmida substancialmente. As anomalias de vento térmico também são relativamente mais altas nos trópicos (Moura & Shukla, 1981).

As regiões tropicais de ambos os oceanos, Pacífico e Atlântico, desempenham papéis importantes na variabilidade climática interanual sobre o NEB (Kayano & Andreoli, 2006),

por meio do controle exercido sobre vários dos sistemas meteorológicos que afetam a região (descritos na seção anterior), indiretamente regidos por modos climatológicos de variabilidade induzidos por grandes oscilações oceânicas, como ENOS, Oscilação Decadal do Pacífico (ODP) e anomalias de TSM no Oceano Atlântico. A combinação de fases dessas oscilações influencia o deslocamento de anticiclones subtropicais sobre o Atlântico Norte e o Atlântico Sul, que, por sua vez, afetam a ZCIT, os DOL, os VCAN, entre outros sistemas associados à precipitação em cada região da América do Sul. Além destes modos, que têm variabilidade interanual, a região é também afetada por modos intrasazonais e submensais, como a Oscilação de Madden-Julian (OMJ) (Lyra et al. 2016).

Costa et al. (2018) também apuraram que a variabilidade temporal de precipitação sobre o ENEB é influenciada por condições climáticas de grande escala. Em sua análise por componente principal (ACP), o coeficiente de Spearman indicou que há correlações significativas com índices climáticos. As influências de cinco índices climáticos sobre a precipitação na região foram examinadas: o Modo Meridional do Atlântico (MMA), a Oscilação Multidecadal do Atlântico (OMA), a Oscilação do Atlântico Norte (OAN), a Oscilação Decadal do Pacífico (ODP) e a El Niño-Oscilação Sul (ENOS). Seus resultados demonstraram que o primeiro modo da ACP é correlacionado à OAN e à MMA; o segundo modo, com o IOS (Índice de Oscilação Sul – representando a ENOS); e o terceiro modo, com a ODP. Os autores arrazoam que, além dos conhecidos padrões de variabilidade interanual, seu trabalho também mostrou a ocorrência de uma teleconexão multianual entre oscilações climáticas e a precipitação sobre o ENEB, revelando que oscilações climáticas globais têm uma relação não-estacionária com a estação chuvosa da região, impactando sua hidrologia em diferentes escalas temporais, mas principalmente num modo de longo prazo por eles identificado (com intervalos de 8 a 16 anos), destacando que o estado de ambos os oceanos – Atlântico Tropical e Pacífico Tropical têm um efeito de longo prazo sobre a estação chuvosa da região.

Nas subseções que, a seguir, se ramificam, empreender-se-á uma concisa explicação dos modos de oscilação oceano-atmosférica de maior relevância para o NEB, seguida dos impactos particularmente por elas produzidas e dos mecanismos pelos quais se dão.

2.1.5.1 El Niño-Oscilação Sul

El Niño-Oscilação Sul (ENOS) é um processo geofísico que ocorre no Oceano

Pacífico Tropical e é um exemplo admirável de interação oceano-atmosfera que interfere no clima global e regional. É constituído de dois componentes, o oceânico, denominado El Niño propriamente dito, e o atmosférico, a Oscilação Sul (OS) (Molion, 2017), daí seu nome composto, o qual, em tendo como substantivo determinante o termo “Oscilação” será doravante precedido pelo artigo feminino (a ENOS) e suas locuções, em que pese, na literatura em português, ser mais usualmente tratado como um termo de gênero masculino (o ENOS).

O componente oceânico da ENOS é caracterizado por um aquecimento (El Niño) ou resfriamento (La Niña) das águas superficiais do Pacífico centro-oriental (Souza et al. 2004).

A ENOS responde pela maior contribuição individual para a variabilidade climática global na escala interanual (Zebiak, 1993). Eventos El Niño fortes aumentam a temperatura da baixa troposfera global, pois injetam grandes quantidades de calor sensível e calor latente na atmosfera tropical como foi constatado em eventos recentes (Molion, 2017).

Relações entre precipitação no Nordeste e a ENOS têm sido sugeridas desde, pelo menos, Walker (1928). Durante a fase positiva da ENOS, o Semiárido Nordestino (SANEB) experimenta um decréscimo sazonal nas chuvas e, conseqüentemente, um aumento na intensidade das secas (Neves et al. 2016; Caviedes, 2001; Molion, 2017).

Períodos de seca severa tendem a ocorrer durante anos de El Niño, causando pobreza extrema e subsequente migração da população para áreas urbanas, com grandes implicações sociais e políticas (Rodrigues et al., 2011).

Embora essa correlação com eventos El Niño já tenha sido por vezes questionada na literatura (como em Kane, 1997), Marengo et al. (2017) partilha do entendimento acima e relaciona episódios de secas intensas durante períodos de fortes El Niño: 1877-79, 1897, 1899, 1902-03, 1919, 1951, 1958, 1966, 1982-83, 1986-87, 1997-98, 2005, 2010 e 2015.

Molion & Bernardo (2002) ponderam que os El Niño fortes sempre estiveram associados a secas de moderadas a severas no NEB e afirmam que o aumento do albedo planetário, devido à injeção de aerossóis vulcânicos na estratosfera, aparenta ser um mecanismo produtor de secas.

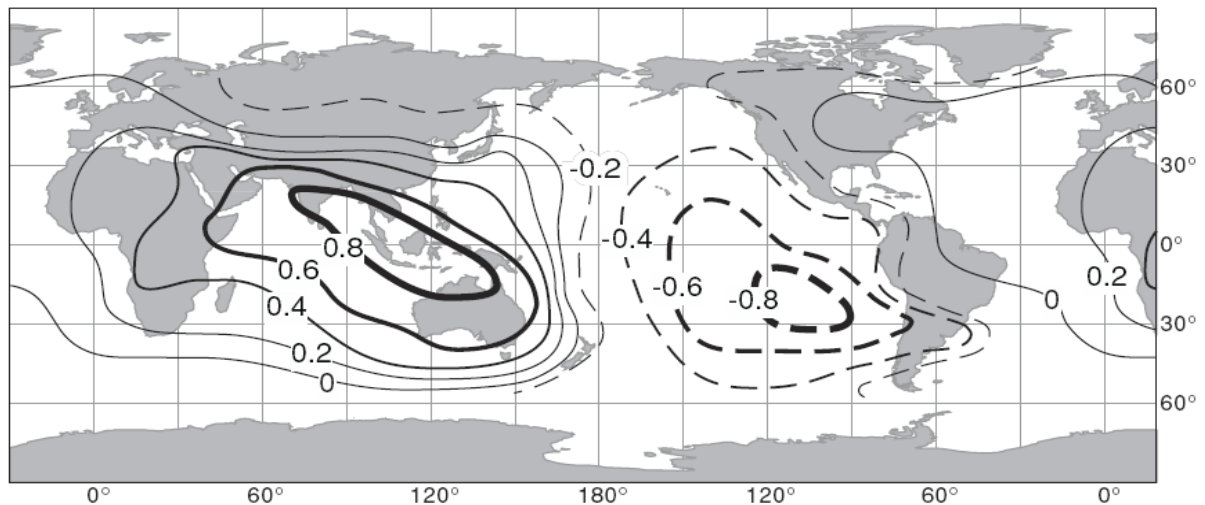
Marengo et al. (2013) notam que, de 45 secas registradas desde o século XVI, somente duas (1907 e 2012) ocorreram durante anos de La Niña. Lembram também que a seca extrema de 1998 se deveu ao El Niño simultâneo e aquecimento do Atlântico Tropical Norte, afetando quase toda a região, prejudicando a produção agrícola e ameaçando o suprimento local de alimentos. A mesma configuração de El Niño e anomalia positiva de TSM do ATN, ainda

segundo eles, foi observada em outro evento de seca extrema, em 1982-1983.

2.1.5.1.1 O componente atmosférico (Oscilação Sul)

As anomalias de TSM no Pacífico central e oriental, que caracterizam o componente oceânico da ENOS, estão dinamicamente ligadas à Oscilação Sul, que primariamente designa uma onda em escala global, predominantemente estacionária, consistindo numa gangorra de PNM com os centros de ação sobre uma região de baixa pressão que se estende do Oceano Índico da África à Indonésia e norte da Austrália (Darwin) e sobre a Alta Subtropical do Pacífico Sul (ASPS), no sudeste do Pacífico (Taiti) (Souza et al. 2004; Rao & Hada, 1990). A Figura 2.1.3 exhibe as zonas de influência de cada um dos dois centros de pressão.

Figura 2.1.3 – Os dois “hemisférios” da Oscilação Sul. As linhas sólidas demarcam regiões de correlações positivas com PNM em Darwin/Jacarta, enquanto as linhas tracejadas demarcam regiões de correlações negativas com o Taiti durante anos de El Niño.



Fonte: Caviedes (2001).

Caviedes (2001) chega a afirmar que as mudanças de temperatura no Pacífico tropical são o resultado da forçante atmosférica, isto é, variações no campo de pressão e ventos resultantes no HS, de modo que as anomalias de temperatura e precipitação pelo mundo relacionadas ao fenômeno El Niño estão também relacionadas ao IOS, uma vez que o último é uma expressão acurada das variabilidades atmosféricas que afetam a circulação sobre os oceanos tropicais. O autor ainda pontua que a maioria dos estudos sobre teleconexões com anomalias relacionadas à ENOS usam o IOS como principal referência.

Hastenrath e Heller (1977) argumentam que haveria uma forte relação negativa entre a precipitação sobre o NEB e as TSM ao longo da costa do Equador e Peru, que seria causada por uma inversão das variações de pressão de longo prazo sobre o Pacífico Sul e Atlântico Sul, que, por sua vez, seriam parte dos ajustes de grande escala da Oscilação Sul.

2.1.5.1.2 Casos canônicos e não-canônicos de ENOS quanto a respostas no NEB

Em que pese a correlação apontada pelos autores acima (que são apenas representativos de inúmeros outros) da ENOS com a variabilidade de precipitação sobre o NEB, e até a coerente e palpável descrição dos mecanismos termodinâmicos envolvidos (seção seguinte), o estudo de Kane (1997) vem frequentemente sido apontado como prova de que tal associação não é absoluta. De fato, segundo por ele apurado, a correlação entre o IOS (representativo da ENOS) com secas no NEB “não é tão boa”, de apenas 0,4 ou menos. Assim, comenta esse autor, prever secas no NEB com base em ocorrências de El Niño seria temerário, recomendando que previsões operacionais sérias para o NEB devem considerar outros parâmetros, como as TSM do Atlântico, cuja significativa correlação com a precipitação na região é bem conhecida.

Diversos pesquisadores (Kayano & Andreoli, 2006; Rodrigues et al. 2011; Rodrigues & McPhaden, 2014) têm, portanto, investigado as prováveis razões termodinâmicas responsáveis pela discrepância observada entre os eventos de El Niño e La Niña que produzem os sinais esperados nas anomalias de precipitação sobre o NEB e os que produzem sinais opostos.

Kayano & Andreoli (2006) referem-se a eles pelos adjetivos “canônico” e “não-canônico”, respectivamente. Os casos canônicos são os de El Niño Seco (EN-S) e La Niña Úmida (LN-U), os quais exibem diferentes evoluções quando comparados aos não-canônicos, quais sejam, El Niño Úmido (EN-U) e La Niña Seca (LN-S). Para os casos canônicos, as teleconexões da ENOS no Atlântico tropical resultam num gradiente meridional de anomalias de TSM, com as maiores amplitudes no Atlântico Norte tropical, que exhibe o mesmo sinal do Pacífico equatorial oriental. De modo inverso, os casos não-canônicos de EN-U e LN-S não apresentam fortes relações com a ENOS. Antes, os modos de variabilidade do Atlântico parecem exercer um papel mais crucial nestes casos. Particularmente, para LN-S, um padrão positivo (norte quente/sul frio) de gradiente de anomalias de TSM no Atlântico tropical devido às fortes anomalias negativas de TSM no Atlântico Sul tropical e equatorial, um

padrão que suprime as esperadas anomalias negativas no Atlântico Norte induzidas pela La Niña.

2.1.5.1.3 Influências sobre a circulação de Walker e outros mecanismos dinâmicos

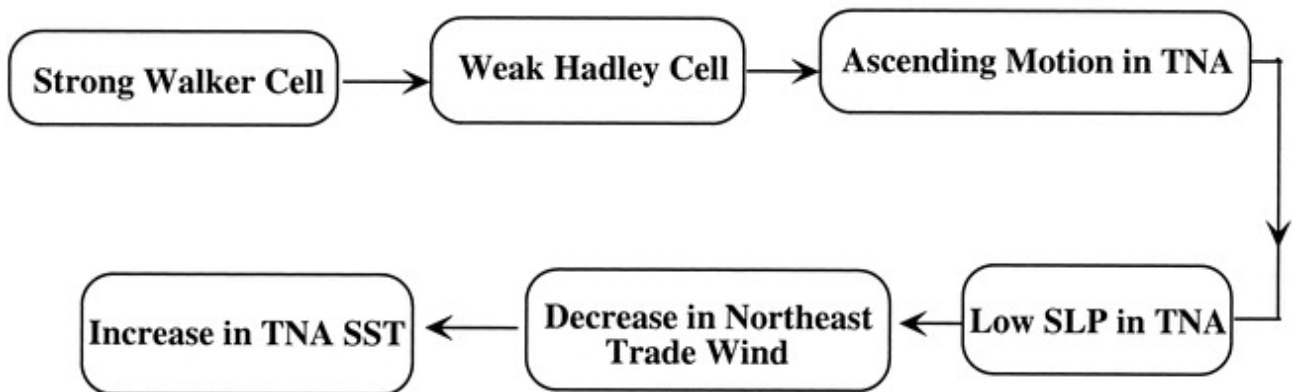
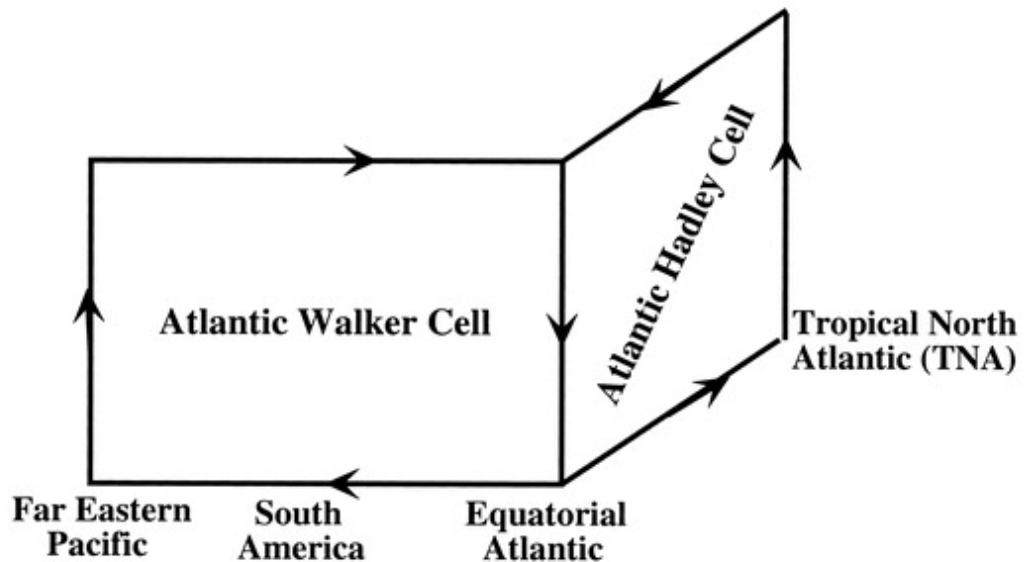
Nobre e Molion (1988) sugeriram, e Kayano & Andreoli (2006) reiteraram, que, na fase quente da ENOS (El Niño), o ramo ascendente da Circulação Hadley-Walker, usualmente sobre a Amazônia, seria deslocado para sobre as águas anomalmente quentes do Pacífico oriental ou central, produzindo centros ciclônicos nos altos níveis sobre o norte/nordeste da América do Sul e uma forte subsidência sobre essa região e sobre o Atlântico tropical. Essa subsidência enfraqueceria a ZCIT e a convecção sobre o NEB, diminuindo as chuvas. Analogamente, parece existir uma relação oposta entre a fase fria (La Niña) e as chuvas, que seriam intensificadas durante esse período como, por exemplo, nos anos de 1974, 1985 e 1995.

Com efeito, Chaves & Cavalcanti (2001) assertam que o clima do NEB é associado às circulações locais de Hadley e Walker. Anomalias na circulação de Walker induzidas pela ENOS podem produzir subsidência sobre a região, que também pode ser afetada por subsidência de grande escala associada à célula de Hadley, quando a ZCIT está posicionada mais ao norte, de modo que a variabilidade interanual das chuvas do NEB pode ser associada à ENOS por meio de efeitos combinados de variações na intensidade e posição dessas células. Ainda segundo as autoras, a influência da ENOS também pode ocorrer por meio de teleconexões com padrões de circulação em altas latitudes.

Kucharski et al. (2008), por sua vez, fazem referência a uma teleconexão com o Atlântico Norte, ao efetuar uma comparação das águas do Pacífico quando quentes ou frias, revelando, nas topografias da alta troposfera, um pacote de ondas do Pacífico equatorial ao Atlântico Norte tropical; o padrão de desvios no fluxo naqueles altos níveis e a divergência associada diminuem a subsidência no flanco equatorial da Alta Subtropical do Atlântico Norte (ASAN, também conhecida como Alta dos Açores), o que causa a redução da pressão ali, enfraquecendo o gradiente meridional de pressão e, assim, os ventos Alísios do Atlântico Norte. Tal teleconexão é também referida na seção 2.1.5.5, em termos da Oscilação do Atlântico Norte. O quadro geral da conexão entre o El Niño no Pacífico e o TNA durante a primavera (boreal) seguinte, segundo observações por reanálises do NCEP-NCAR, é esquematicamente resumida à Figura 2.1.4.

Figura 2.1.4 – Diagrama esquemático exibindo como o El Niño do Pacífico afeta as anomalias de TSM em TNA.

Connection of Pacific ENSO with the Tropical North Atlantic (TNA)



Fonte: Wang (2002).

2.1.5.2 Oscilação Decadal do Pacífico

Enquanto a ENOS é caracterizada por ciclos periódicos de 18-36 meses, a Oscilação Decadal do Pacífico (ODP) – um modo de variabilidade associado a anomalias de TSM sobre o Pacífico norte e equatorial – tem sua periodicidade sido reportada como ciclos de 20-30 anos. Durante fases positivas (negativas) da ODP, são esperadas mais ocorrências de eventos intensos de El Niño (La Niña) e eventos fracos e menos frequentes de La Niña (El Niño)

(Lyra et al. 2016; Oliveira et al. (2017).

2.1.5.3 Modo Meridional do Atlântico

O regime pluviométrico do NEB é forçado por uma soma de vários componentes climáticos, três dos quais concernentes à bacia do Atlântico tropical (Hounsou-Gbo et al. 2015). Hastenrath & Heller (1977) sugeriram que TSM positivas (negativas) no Atlântico Sul e TSM negativas (positivas) no Atlântico Norte estão associadas a anos chuvosos (secos) no NEB.

Assim como Moura & Shukla (1981), Lyra et al. (2016) advogam que o principal mecanismo de impacto desse modo de variabilidade na pluviometria da região Nordeste se dá pela alteração da posição da célula de Hadley, influenciando o posicionamento da ZCIT. Na fase positiva, faz com que o ramo subsidente da célula de Hadley se localize sobre o NEB, reduzindo evaporação, formação de nuvens e chuva, o oposto ocorrendo na fase negativa. Para estes últimos autores, o modo teria uma periodicidade de 10-12 anos.

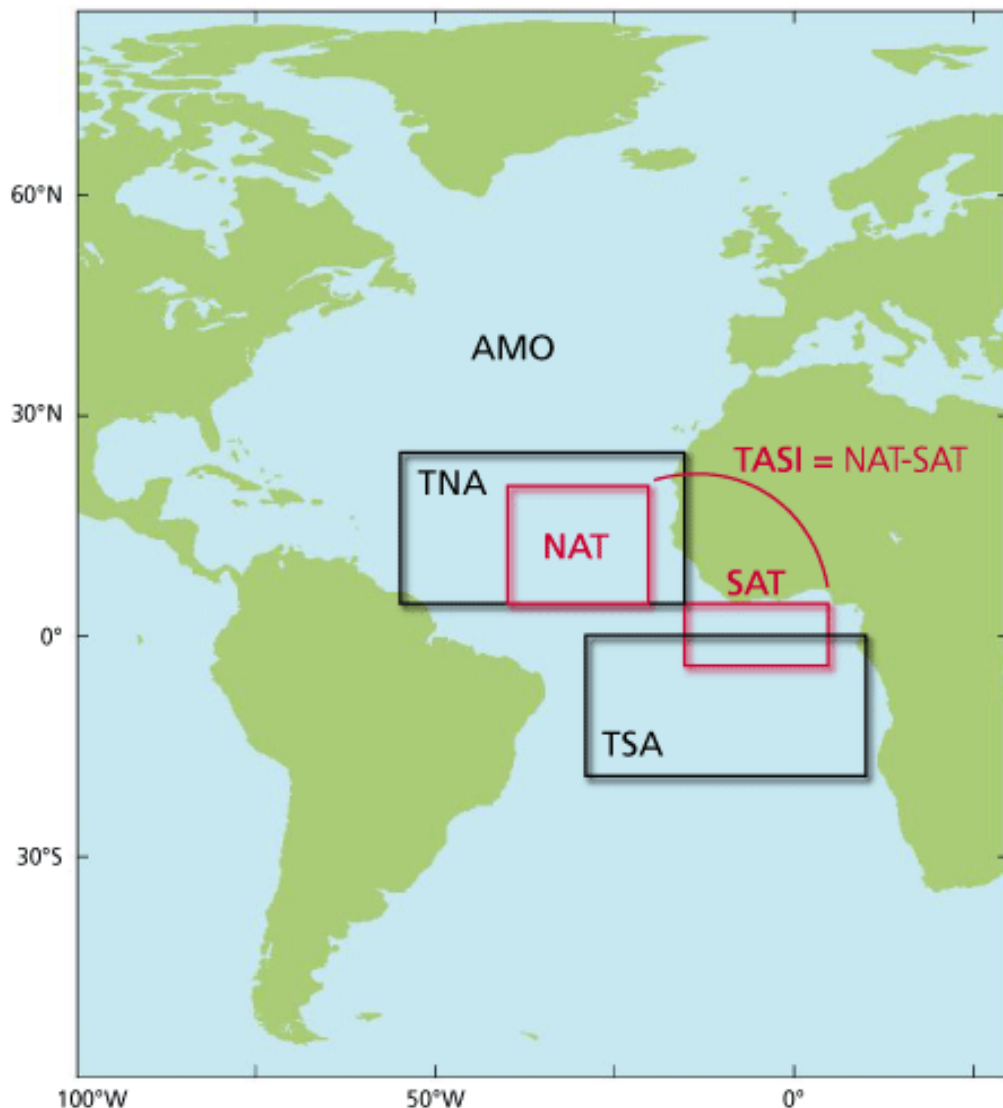
Hounsou-Gbo et al. (2016) chegam a afirmar que, exceto por episódios de El Niño ou La Niña muito fortes, a influência do Pacífico é apenas uma contribuição secundária na variabilidade de precipitação no NEB; a razão primária para episódios úmidos ou secos na região é o desenvolvimento de padrões de gradiente meridional negativo ou positivo no Atlântico. Com propriedade, Wang et al. (2006) se refere a esse gradiente como um dos mais importantes fenômenos climáticos do Atlântico tropical, consistindo na variabilidade do gradiente meridional de anomalias de TSM, definido pela diferença entre as do Atlântico Tropical Norte (TNA, na sigla em inglês: 6°–22°N, 60°–15°W) e o Atlântico Tropical Sul (TSA, na sigla em inglês: 0°–20°S, 30°W–10°E), como se observa à Figura 2.1.5.

Uvo et al. (1998) arrazoam que o desenvolvimento de um “padrão de dipolo” nos gradientes meridionais de TSM requer anomalias de sinais opostos entre as duas regiões. Um dos responsáveis por tal premissa foi Servain (1991), que afirmara que o índice por ele cunhado para a oscilação exibe uma periodicidade na escala decadal, e sua manutenção estaria relacionada a outras variações climáticas a nível mundial, como episódios extremos de ENOS e variabilidade de precipitação sobre o NEB e o Sahel africano.

Diversos autores costumavam usar – e alguns ainda usam, com frequência cada vez menor – o termo “Dipolo do Atlântico”, para se referirem ao fenômeno (Hastenrath & Heller, 1977; Servain, 1991; Chang et al. 1997; Molion & Bernardo, 2002; Da Silva, 2017; Figliuolo,

2017). Muitos outros optam pelo termo que mais proximamente denota a descrição física deste modo de variabilidade, referindo-se a ele por “Gradiente Meridional (ou Inter-hemisférico) de TSM do Atlântico Tropical” ou variações dessa expressão (Kayano & Andreoli, 2006; Wang et al. 2006; Souza et al. 2004; Kucharski et al. 2008; Amorim et al. 2014; Marengo et al. 2018; Hounsou-Gbo et al. 2016; Silva et al. 2018; Lyra et al. 2016). A propósito, Lyra et al. (2016) expressamente mencionam que a oscilação era “anteriormente conhecida como Dipolo do Atlântico”, numa clara sugestão de que este termo se tornara obsoleto.

Figura 2.1.5 – Setores geográficos compreendidos pelas regiões atlânticas de TNA (55°W-15°W, 5°N-25°N), TSA (30°W-10°E, 20°S-0°), NAT (40°W-20°W, 5°N-20°N) e SAT (15°W-5°E, 20°S-5°S).



Fonte: NOAA, 2019.

Todavia, observa-se que há uma iniciativa recente da comunidade científica internacional de padronizar o termo que nomeia o fenômeno por uma outra expressão, “Modo Meridional do Atlântico (MMA)”, iniciativa com a qual o presente estudo visa colaborar. Uma elucidação que se faz necessária, no entanto, é que, ao definir o Dipolo do Atlântico, assim como o Gradiente Meridional de TSM do Atlântico, muitos autores se atêm às anomalias de TSM, ignorando os ventos em baixos níveis e a PNM, enquanto os que usam o termo MMA sempre incluem tais variáveis na descrição, especialmente ventos ao nível de 10 m, denotando-o, inequivocamente, como um modo acoplado oceano-atmosfera.

A respeito da influência no NEB, em consonância com o discorrido acima, Kayano & Andreoli (2006) afirmam que a dinâmica envolvida neste modo é tal que o gradiente meridional de TSM induz uma circulação termicamente anômala na direção meridional, afetando a posição e intensidade da ZCIT, modulando as chuvas sobre o NEB. De fato, para Rodrigues & McPhaden (2014), o gradiente que define a MMA é a força dominante a ditar o posicionamento da ZCIT e a precipitação sobre o NEB. Durante os anos em que o gradiente é negativo de março a maio, i.e., anomalias frias em TNA e quentes em TSA, a ZCIT migra para sul, trazendo chuva ao NEB, ao que acrescentam Hounsou-Gbo et al. (2015) que este padrão físico é particularmente importante para a estação chuvosa do NNEB.

Hounsou-Gbo et al. (2015) e Marengo et al. (2017) ratificam a tese precedente afirmando que a migração latitudinal sazonal da ZCIT sobre o Atlântico tropical é o principal mecanismo a induzir precipitação sobre a região, uma vez que, durante o pico da estação chuvosa do NNEB (fevereiro-maio), como observado acima, um TNA (TSA) quente (frio) favorece o posicionamento anormalmente boreal (austral) da ZCIT, determinando menos (mais) chuva na região.

Convém elucidar que, como observam Molion & Bernardo (2002), embora atue principalmente sobre o NNEB, quando muito ativa, a ZCIT aumenta o gradiente de pressão entre o Equador e os subtrópicos. O gradiente aumentado facilita uma maior penetração de sistemas frontais em latitudes equatoriais, que produzem mais chuvas sobre todo o NEB.

2.1.5.4 Modo Zonal do Atlântico

Zebiak (1993) fez uso de uma análise de observações dinamicamente motivada e de um modelo de acoplamento de nível intermediário para estudar a variabilidade interanual no Atlântico equatorial, apurando que uma parte significativa da variabilidade observada na

região pode ser descrita por um modo acoplado de oceano-atmosfera à semelhança da ENOS e, portanto, também conhecido como “Niño do Atlântico”, sendo, este modo, até mais restritamente focado no Equador e situado proporcionalmente mais a oeste na bacia, que seu irmão no Pacífico. Esse modo quasi-periódico, atuando na direção zonal, resulta na alternância entre aquecimento/resfriamento da superfície do mar, acompanhado por mudanças na circulação atmosférica (Oliveira et al. 2017).

No que concerne à pluviometria do NEB, o estabelecimento do MMA de novembro-dezembro a março-abril influencia o NNEB, enquanto o ENEB é principalmente influenciado pelo MZA (Hounsou-Gbo et al. 2015). A conclusão soa, de fato, razoável, uma vez que, como apontado por Okumura & Xie (2006), o MZA adquire maior amplitude durante a estação chuvosa do ENEB e, ademais, afeta muito mais intensamente o escoamento na direção zonal, que flui quase que perpendicularmente à costa leste do NEB.

2.1.5.5 Contribuições do HN: sistemas frontais e teleconexões com a OAN

Um outro importante fenômeno climático no Atlântico é a Oscilação do Atlântico Norte (OAN), cuja fase positiva é caracterizada por forte escoamento de oeste entre a Baixa da Islândia e a Alta dos Açores, particularmente no inverno boreal (Wang, 2002; Caviedes, 2001). Hounsou-Gbo et al. (2015), oportunamente, assevera que a fase positiva (negativa) da OAN, que corresponde a uma intensificação da circulação atmosférica nas médias latitudes do Atlântico Norte, é geralmente associada a uma evolução negativa (positiva) do MMA.

Com efeito, Namias (1972), ao explorar a inter-relação de um centro de baixa pressão sobre a Groenlândia e Newfoundland e a circulação atmosférica sobre o NEB, já propusera que, quando a atividade ciclônica (mau tempo) no Atlântico Norte é intensa, a Alta dos Açores e os Alísios de nordeste, que empurram a ZCIT para sul durante os verões austrais, são fortalecidos. Deste modo, ele comenta que um maior vigor da célula de Hadley, sua maior proximidade ao NNEB (representado em seu estudo por Quixeramobim), e um maior fluxo de umidade advindo do Atlântico Sul resultariam em precipitação acima da média na região.

No que concerne à invasão de frentes originárias do HN, Molion & Bernardo (2002) mencionam que, durante o verão e primavera de 2000, algumas POA, associadas a trovoadas intensas, se propagaram do quadrante norte, supondo que foram causadas pela penetração profunda de sistemas frontais do HN no Atlântico equatorial. Os mesmos autores comentam que essas penetrações parecem ser mais frequentes em anos de LN, durante o inverno do HN.

2.2 Ciclo de Atividade Solar

2.2.1 Campos Magnéticos no Sol

O Sol é uma imensa esfera de plasma em cujo interior gases sobremaneira aquecidos fluem, ascendem e afundam. Dentro desse complexo, um campo magnético, de estrutura fundamental similar ao da Terra, é gerado, na forma de um dipolo, cujas linhas de força emergem da superfície pelos polos solares. O campo magnético é, no entanto, vinculado ao gás quente e condutor elétrico, e este gás faz o campo magnético se esticar e se deformar em um modo bastante complexo, “como ligas de borracha imersas em um pote de mel que é agitado”. Uma linha de força originalmente ordenada em paralelo com o eixo de rotação do Sol é portanto forçada a alinhar-se com o gás em rotação. Entretanto, no equador, o gás se move demasiado mais rápido que em médias e altas latitudes (Phys.org, 2015). Medições recentes indicam que o período de rotação do Sol é de aproximadamente 25 dias nas cercanias do equador, de 28 dias a 40° de latitude e de 36 dias nas proximidades dos polos; a rotação é direta, isto é, no mesmo sentido do movimento dos planetas ao redor do Sol (UTK, 2015). A cada rotação do Sol, é atribuído um número único, chamado de número de Rotação de Carrington, iniciando em 9 de novembro de 1853 (Lovely, 2009).

O Sol está no quarto estado da matéria, i.e., plasma, que se comporta de modo distinto de gás normal (Lovely, 2009). Isso, aliado ao fato de o Sol sofrer o fenômeno da rotação diferencial descrito acima, faz com que as linhas de força na região equatorial sejam esticadas longitudinalmente e se torçam agudamente ao longo de várias rotações; um novo campo magnético (além do polar), em forma de anel, se forma na direção leste-oeste, sendo este chamado de campo toroidal (Phys.org, 2015).

Cameron & Schüssler (2015) argumentam que os dois campos estão fortemente vinculados um ao outro: “o conceito básico para o dínamo solar, em larga escala, envolve um ciclo durante o qual o campo polar e o toroidal são mutuamente gerados um pelo outro. O torcer do campo polar pela rotação diferencial cria o campo toroidal. Um campo polar invertido resulta da formação de arcos magnéticos no campo toroidal, que são torcidos pela força de Coriolis, devido à rotação solar. Por sua vez, o campo polar invertido se torna a causa da inversão do campo toroidal”. Os autores elaboraram um estudo pelo qual, por meio do Teorema de Stokes, puderam comprovar, mediante comparação com os dados observacionais, que o campo polar é, de longe, a fonte dominante do campo toroidal, segundo sua conclusão:

“o papel-chave desempenhado pelos campos polares na geração do fluxo toroidal explica a forte correlação empírica entre a intensidade do campo polar e o fluxo aberto do Sol ao longo da atividade mínima com o número de manchas solares do ciclo subsequente”.

Destarte, os fenômenos na superfície são a principal fonte de dados para os estudos científicos, e os arcos do campo toroidal, mencionados anteriormente, são uma característica flagrante da interação da atmosfera solar com os campos magnéticos, pois as linhas de força do campo toroidal podem se fundir e formar espessos feixes que ascendem até eventualmente emergirem da superfície e formar um arco externo; as familiares manchas escuras na superfície solar se formam em dois pontos de emergência, ocorrendo, portanto, aos pares, na direção leste-oeste, formando um polos magnéticos norte e sul, respectivamente (Phys.org, 2015). As manchas solares são, portanto, identificadas como regiões ativas, localizadas na superfície solar, que se desenvolvem a partir de dipolos magnéticos, e observá-las e entender esses fenômenos solares com tecnologias modernas guardam relevância para um entendimento da relação entre o Sol e a Terra (Lovely, 2009), pois são uma medida da atividade magnética do Sol (Solanki et al. 2006).

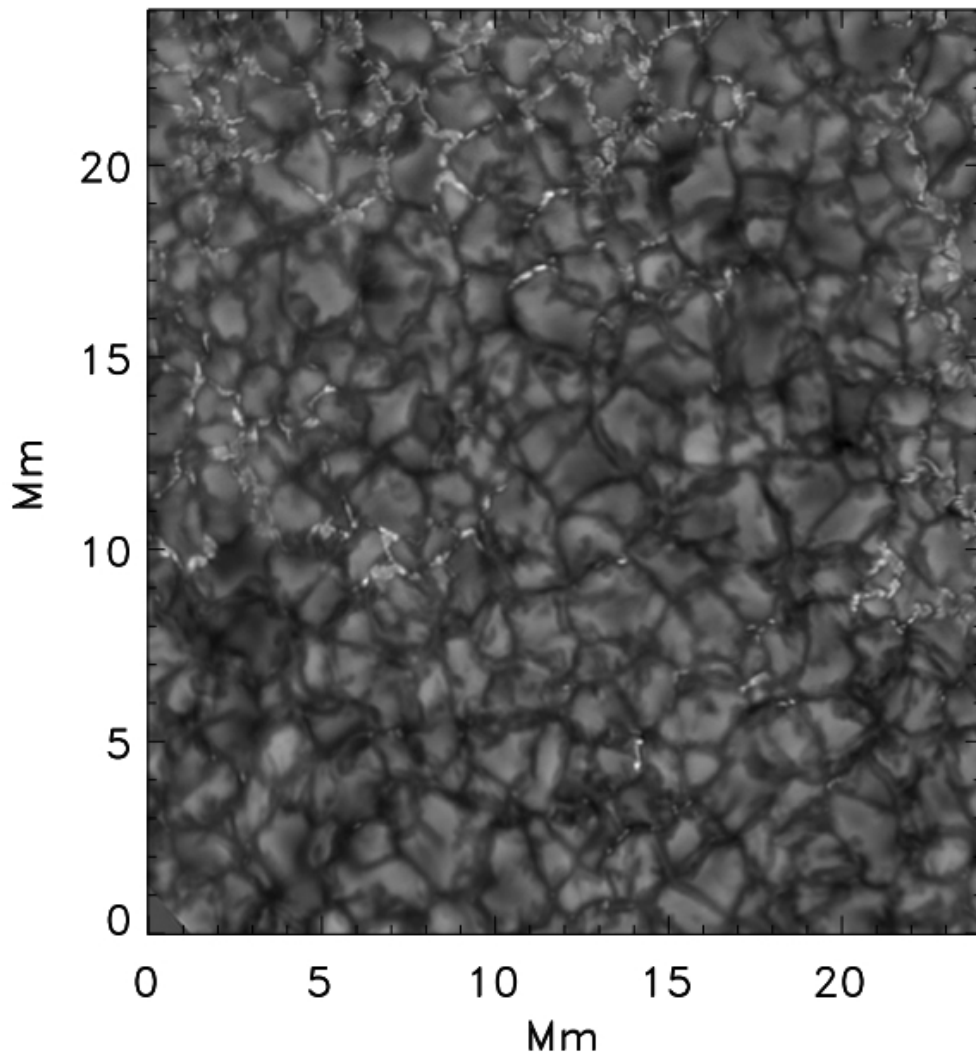
2.2.2 A Zona Convectiva e o Magnetismo

A superfície solar, nomeadamente sua Fotosfera, se apresenta, na ausência de manchas ou poros, em um padrão granular. Como bem relembra Nordlund (2009), tal padrão foi primordialmente observado e descrito por Friedrich Wilhelm Herschel (1801), que o interpretou como sendo devido a “nuvens quentes” flutuando sobre uma superfície solar mais fria. Nasmyth (1865) posteriormente descreveu o padrão como sendo similar a “folhas de salgueiro”. Dawes (1864) foi o responsável por cunhar o termo “grânulos”. As primeiras fotografias de boa resolução espacial, publicadas por Janssen em 1896 puseram fim à controvérsia. O padrão de granulação está, na verdade, como sabemos hoje, associado ao transporte de calor por convecção em escalas horizontais e da ordem de mil quilômetros, ou um megâmetro (Mm).

A convecção é primariamente gerada por resfriamento radiativo de uma fina camada térmica na superfície visível do Sol, a camada pela qual a maior parte dos fótons escapa para o espaço. E as mais proeminentes variações de intensidade na superfície do Sol, excetuando-se as manchas e faculae, são, exatamente os grânulos – áreas quentes e brilhantes cercadas por contornos mais frios e escuros que ladrilham a superfície solar. O aspecto de grânulos, bem

como as linhas que os contornam, podem ser vistos na Figura 2.2.1.

Figura 2.2.1 – Imagem da granulação na superfície do Sol, exibindo fluidos quentes e brilhantes ascendentes cercados por linhas intergranulares mais escuras e frias. Os grânulos costumam a superfície solar e são a característica dominante da convecção.



Fonte: Telescópio Solar Sueco de 1m e Instituto de Astrofísica Teórica de Oslo, 2015.

Os diâmetros são tipicamente da ordem de 1 Mm e esta é a escala horizontal na qual o resfriamento radiativo causa os movimentos convectivos. Os grânulos brilhantes são resultado de plasma quente ascendente, enquanto as linhas escuras intergranulares ficam onde o plasma resfriado desce de volta ao interior. O plasma que atinge a superfície tem parte de sua energia térmica levada por fótons e, ao resfriarem-se, os íons de hidrogênio capturam elétrons para tornarem-se átomos neutros de hidrogênio, liberando, no processo uma grande quantidade de energia de ionização, que é também levada ao espaço por fótons (Nordlund,

2009).

A força de Lorentz inibe movimento perpendicular ao campo. Como resultado, os movimentos de inversão/capotamento que são essenciais para a convecção são suprimidos, e o transporte de energia convectiva do interior para a superfície é reduzido. A perda de energia radiativa para o espaço continua. Então, as regiões de forte campo magnético resfriam em relação à circunvizinhança. Essas concentrações de fluxo magnético são mais frias que suas cercanias na mesma camada geométrica. Entretanto, como são evacuadas, sua opacidade é reduzida, e os fótons escapam de camadas mais profundas da atmosfera, num fenômeno descrito como “Depressão de Wilson”. Nas regiões onde as concentrações magnéticas são estreitas, há aquecimento pelas paredes quentes, e elas se apresentam como pontos brilhantes. Onde as concentrações são mais espaçadas, o aquecimento advindo das paredes não é significativo, e essas regiões se tornam mais escuras, formando poros e manchas solares.

Solanki et al. (2006) condensa o entendimento do campo magnético do Sol e seus efeitos na zona convectiva e fotosfera remontando ao mecanismo de geração do campo, como segue: “um mecanismo de dínamo operando na parte inferior da zona de convecção solar é geralmente considerado a fonte do campo magnético do Sol. Modelos atuais situam o dínamo na interface entre a zona convectiva e a zona radiativa (Figura 2.2.2), uma camada marcada por forte cisalhamento radial na rotação diferencial do Sol; glóbulos de forte campo magnético toroidal (azimutal) gerado pelo dínamo rompem a camada limite, ascendem através da zona convectiva e emergem à superfície visível solar na forma de regiões magnéticas bipolares, formando, finalmente, estruturas de arco cujos topos geralmente atingem a coroa. Os locais onde as pernas de um arco interceptam a superfície solar são visíveis como manchas solares ou faculae. Mais alto na atmosfera, na cromosfera, elas se apresentam como pontos brilhantes. As camadas mais altas de um arco irradiam nos comprimentos de onda EUV (ultra-violeta extremo) e raios-X”. A Figura 2.2.2 remete a uma ilustração gráfica de várias das camadas solares e dos fenômenos referidos acima, enquanto a Figura 2.2.3 provê uma visualização real de alguns dos fenômenos descritos.

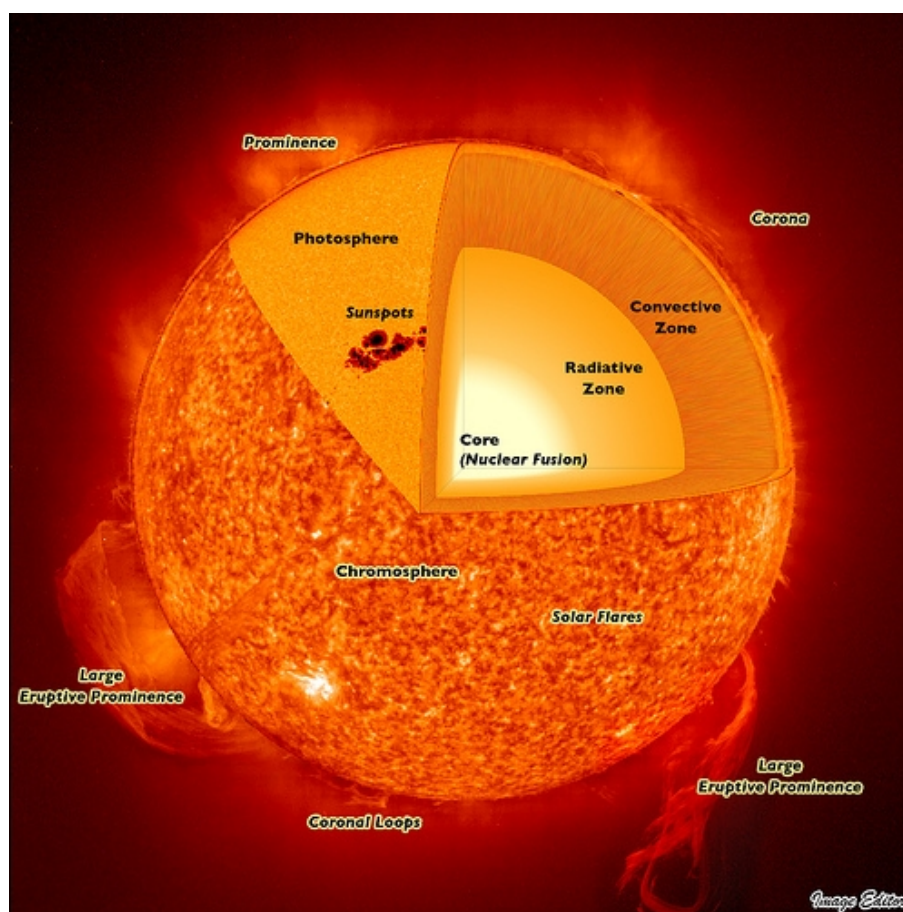
2.2.3 Manchas Solares: Natureza e Propriedades

Registros de observação de manchas solares a olho nu remontam há, pelo menos, 28 a.C., na China. Entretanto, foi somente no início do século XVII, após a invenção do telescópio, que se observou com mais definição o fenômeno, abrindo-se a possibilidade para

um melhor entendimento. Galileu foi um dos pioneiros na observação telescópica e registro das manchas solares, utilizando-as, inclusive, para estimar o período de rotação do Sol, que se mostrou próximo do mês lunar.

As observações de Galileu, ainda na primeira década daquele século, foram contemporâneas às de Thomas Harriot [1560-1621], Johannes Fabricius [1564-1617] e Christoph Scheiner [1573-1650]. Alguns observadores acreditavam que as manchas solares eram nuvens que flutuavam na atmosfera do Sol, obscurecendo um pouco de sua luz. Outros observadores, como Wilson e Herschel, no final do século XVII e princípio do XIX acreditavam que as manchas eram “buracos” pelos quais o interior mais “frio” do Sol poderia ser visto (Lovely, 2009; Oliveira et al. 2017).

Figura 2.2.2 – Estrutura interna ilustrada do Sol, com as diversas camadas especificadas. O “dínamo solar” é gerado entre a zona convectiva e a radiativa. As manchas solares são vistas na fotosfera.

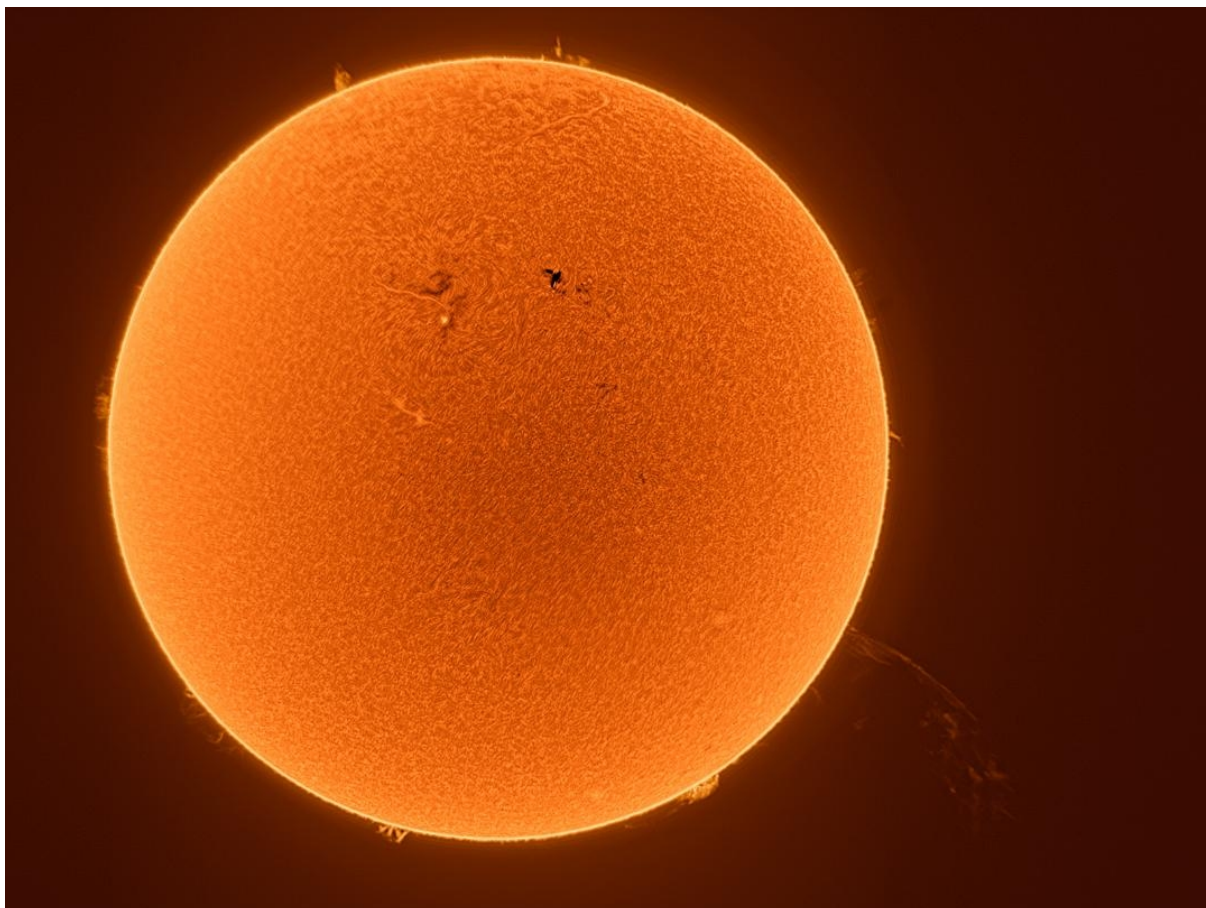


Fonte: Universidade de Alberta, 2015.

Já no início do século XX, em 1908, George Hale identificou campos magnéticos nas manchas solares, fazendo delas os primeiros objetos astronômicos, i.e., fora da Terra, a portar

tal fenômeno. Ele fez a descoberta por meio do Efeito Zeeman, pelo qual as linhas de emissão de um espectro eletromagnético são fragmentadas na presença de um campo magnético (Solanki, 2003).

Figura 2.2.3 – Imagem real (fotografia) do disco e parte da atmosfera solares, incluindo eventos coronais, obtida no comprimento de onda de 656 nm (H-alfa).



Fonte: A imagem, realizada desde Maringá-PR, Brasil, é uma cortesia de Ronnie Clayton Pereira para este trabalho.

2.2.3.1 Morfologia

Manchas solares são normalmente identificadas com base na sua aparência luminosa. Elas são notadamente mais escuras que a normal fotosfera solar e são todas compostas de uma parte mais interna e escura chamada de umbra (que irradia aproximadamente 20 a 30% do fluxo integrado do Sol calmo) e uma parte externa, menos escura, chamada de penumbra (que irradia de 75 a 85% do fluxo de energia do Sol calmo; Solanki, 2003).

2.2.3.2 Tamanho e Duração

As manchas solares exibem uma ampla distribuição de tamanhos. Manchas demasiado grandes podem atingir diâmetros de 60.000 km ou mais. Manchas particularmente imensas (ou aglomerados de manchas menores) são visíveis a olho nu sob certas condições favoráveis, como logo antes do ocaso solar num dia de neblina, ou quando o brilho do disco solar é reduzido por meio de filtros. As menores manchas são da ordem de 3.500 km de diâmetro, tornando-as menores que os maiores poros, que podem chegar a 7.000 km (Solanki, 2003). Manchas próximas dos 60 Mm ou abaixo de 3 Mm são raras (Lovejoy, 2009).

2.2.3.3 Magnetismo e Temperatura

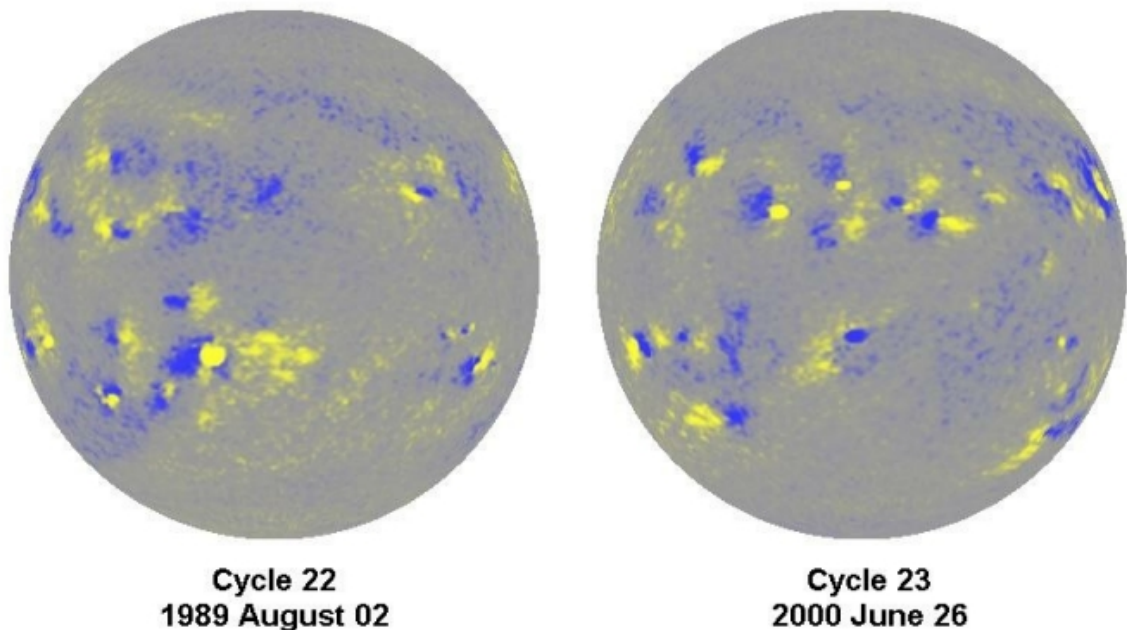
O brilho e, portanto, a temperatura de uma mancha solar é função da posição espacial dentro da mancha. Ela varia em larga escala (da umbra para a penumbra) e em pequena escala (pontos brilhantes na umbra, filamentos e grãos penumbrais). A umbra é de 1000 a 1900 K mais fria que o Sol calmo, enquanto a penumbra é de 250 a 400 K mais fria. Pensa-se que a temperatura é reduzida pela inibição da energia convectiva por atuação do campo magnético (Solanki, 2003).

A energia que falta às manchas solares em calor é compensada por energia do campo magnético. Os campos magnéticos ascendem acima da superfície e permanecem fortes, enquanto o resto do Sol tem campos magnéticos mais fracos e distribuídos. Os campos magnéticos fortes formam arcos que confinam plasma solar e o aquecem a temperaturas extremas que excedem 1 milhão de Kelvins. A essas temperaturas, não é possível ver o plasma na luz visível, mas este se torna a característica dominante em ultravioleta e raios-X. Variações nesses campos magnéticos são a principal fonte de eventos da Meteorologia Espacial, como flares solares e Ejeções de Massa Coronal (CME, na sigla em inglês; NOAA, 2015).

Por fim, Hathaway (2010) lembra que Hale e Nicholson, em 1938, encontraram uma relação entre as polaridades magnéticas das manchas nos dois hemisférios solares e também entre ciclos consecutivos, e elaboraram a seguinte lei, conhecida como lei de Hale, com redação a seguir e ilustrada na Figura 2.2.4: “...as manchas precedentes e subsequentes de grupos binários, com raras exceções, são de polaridade oposta, e que as manchas correspondentes de tais grupos nos hemisférios Norte e Sul são também de sinal oposto.

Ademais, as manchas do ciclo presente são opostas em polaridade às das do último ciclo”.

Figura 2.2.4 – Lei da Polaridade de Hale. À esquerda, o magnetograma do Ciclo 22 (2 de agosto de 1989); à direita, do ciclo 23 (6 de junho de 2000). A cor amarela denota polaridade magnética positiva, enquanto a azul denota polaridade negativa. As maiores manchas de um hemisfério têm polaridade oposta às maiores do outro hemisfério, e as polaridades se invertem de um ciclo a outro.



Fonte: Hathaway, 2010.

2.2.4 Ciclos de Atividade Solar e o Número de Manchas Solares

Embora o campo magnético solar seja fortemente estruturado em termos de escalas ao limite de resolução observacional, ele exhibe, ao mesmo tempo, um grau notável de organização espaço-temporal de larga escala. Propriedades das regiões magnéticas bipolares na superfície solar, como a latitude média de emergência e a orientação espacial de suas polaridades, bem como a direção do campo polar global variam sistematicamente ao longo do ciclo de atividade solar (Solanki et al. 2006).

Há quatro séculos, a atividade solar vem sendo medida por meio do número de manchas solares observadas. Na Assembleia Geral da União Astronômica Internacional (UAI) ocorrida em Honolulu (Havaí – EUA) em agosto de 2015, a UAI anunciou uma nova padronização da série de dados histórica do número de manchas solares e declarou esse como “o mais longo experimento científico em curso”, asseverando que esse conjunto de dados é a chave para acompanhar a evolução do Sol. Dada a sua natureza fundamental, o número de

manchas é amplamente usado em Astrofísica Estelar e para estudos do impacto de longo prazo da evolução estelar na vida na Terra (Berghmans, 2015).

A partir de 1843, um astrônomo amador alemão, Heinrich Schwabe [1789-1875], se devotou a estudar estatisticamente a evolução do número de manchas, concluindo que este variava com o tempo, num ciclo que se repetia num período aproximado de 11 anos. Observações posteriores refinaram esse número para 11,2 anos. No decorrer desse período, o número de manchas e a intensidade de outros fenômenos transientes variam apreciavelmente (Lovely, 2009).

Para Oliveira et al. (2017), do ponto de vista da Ciência do Clima, esta periodicidade das manchas solares foi a mais importante descoberta feita no campo científico desde o Renascimento. E, em homenagem ao descobridor, o fenômeno foi posteriormente denominado de Ciclo de Schwabe.

Schwabe, no entanto, só tinha acesso até aproximadamente dois ciclos precedentes. Rudolf Wolf interessou-se em obter dados históricos que remontassem a datas mais antigas, conseguindo-os desde 1749. Wolf reconheceu que era muito mais fácil identificar grupos de manchas do que cada mancha individual. Elaborou, portanto, uma equação para um número “relativo” de manchas solares, o qual enfatizava o número de grupos, pela seguinte relação matemática:

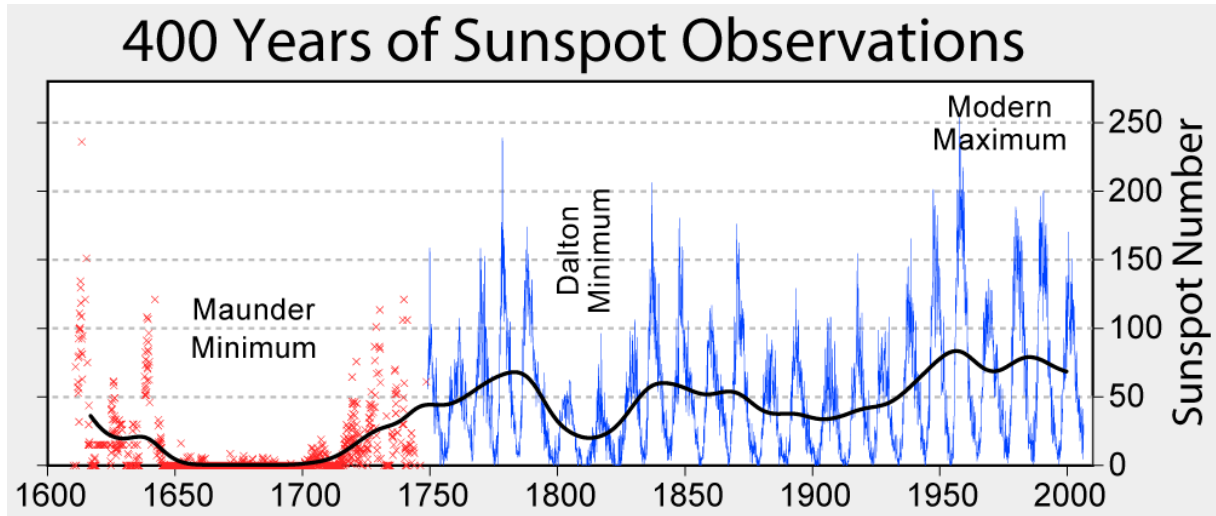
$$R = k(10g + n)$$

onde k é o fator de correção para as circunstâncias da observação, g é o número de grupos de manchas identificados e n é o número de manchas individuais.

Tal relação ficou conhecida como Número de Wolf ou Número de Zurich ou, ainda, Número Internacional de Manchas Solares (Hathaway, 2010).

A Figura 2.2.5 exhibe o número de manchas solares desde sua primeira observação com telescópios, em 1610. Num importante artigo científico revisando a história das observações de manchas solares, Eddy (1976) descreveu como Rudolf Wolf começara uma contagem sistemática logo após a descoberta de Schwabe e estimara os números que retrocediam até 1700 por meio de pesquisa de registros antigos. Posteriormente, Gustav Spörer e Edward Maunder estenderam essas investigações históricas, a fim de fornecer os números precedentes, que remontam às primeiras observações de 1610 (Morton, 2014).

Figura 2.2.5 – Registro do Número de Manchas desde 1611. O ciclo de 11 anos é patente, bem como outras características e periodicidades a serem discutidas adiante.



Fonte: NOAA, via Morton, 2014.

2.2.4.1 A Periodicidade e suas Causas

O período médio de um ciclo pode ser relativamente bem determinado simplesmente pela subtração da data do mínimo que precedeu o ciclo 1 da data do mínimo que precedeu o ciclo 23, e dividindo o resultado pelos 22 ciclos que aquelas datas compreendem. Isso resulta num período médio para os ciclos de 1 a 22 de 131,7 meses – quase exatamente 11 anos (Hathaway, 2010), o já referido ciclo de Schwabe.

As inversões sistemáticas dos campos magnéticos polares e da polaridade dos grupos de manchas demonstram que um ciclo magnético completo compreende dois ciclos de atividade de 11 anos (Solanki et al. 2006). Portanto, quando as polaridades magnéticas são levadas em consideração, um ciclo completo tem um período de aproximadamente 22 anos, que é conhecido como Ciclo Magnético de 22 anos, o Ciclo de Hale (Lovely, 2009; Morton, 2014).

Scafetta (2010) defende que os planetas, em particular Júpiter e Saturno, com seus movimentos em torno do Sol, dão origem a grandes oscilações gravitacionais e magnéticas que fazem vibrar o Sistema Solar. As vibrações têm as mesmas frequências das órbitas planetárias.

A faixa de frequência da série histórica de Zurique, do número de manchas solares, desde 1749, é composta de três maiores ciclos, com períodos de cerca de 9,98, 10,9 e 11,86 anos. Tais frequências parecem estar intimamente relacionadas ao período de sizígia de

Júpiter e Saturno (mediana de 9,93 anos) e ao período sideral de Júpiter (cerca de 11,86 anos). O ciclo central (10,9) pode estar associado ao ciclo do dínamo solar que parece estar aproximadamente sincronizado à média dessas duas frequências planetárias (Scafetta, 2012).

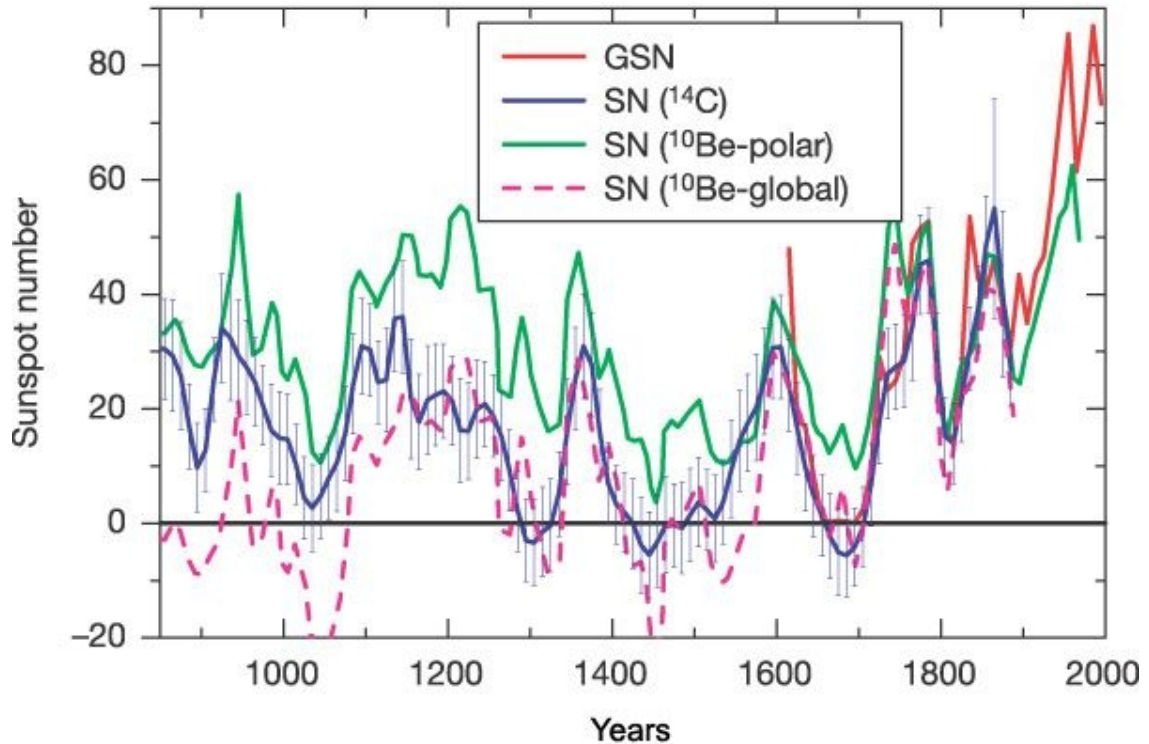
2.2.4.2 Reconstrução por isótopos radioativos e modulações de longo prazo

Em que pese o ciclo de 11 anos ser óbvio, há também modulações da atividade de manchas solares em escalas de tempo mais longas (Solanki et al. 2006). Variações sistemáticas ciclo-a-ciclo e também no decorrer de vários ciclos podem ser discriminadores significativos em modelos de atividade solar e podem auxiliar a prever ciclos futuros. Vários aspectos-chave da variabilidade de longo prazo têm sido notados (Hathaway, 2010).

Solanki et al. (2004) arrazoa que observações diretas do número de manchas solares estão disponíveis pelos últimos quatro séculos, mas séries temporais mais longas são necessárias, por exemplo, para, identificar uma possível influência do Sol no clima e testar modelos para o dínamo solar. Esses autores obtiveram uma reconstrução do número de manchas para os últimos 11.400 anos, com base em concentrações de radiocarbono dendrocronologicamente datadas. De acordo com sua reconstrução, o nível de atividade solar durante os 70 anos que antecederam seu estudo (2004), foi excepcional, e o período de atividade igualmente alta ocorreu há mais de 8000 anos. Durante toda a série, de 11.400 anos, o Sol passou apenas 10% do tempo num nível semelhantemente alto de atividade magnética, e quase todos os períodos anteriores de atividade alta foram mais curtos que o episódio recente.

Comentando a Figura 2.2.6, de Solanki et al. (2004), Oliveira et al. (2017) ponderam que, observando a reconstrução nos últimos 1.000 anos, os períodos de baixa (alta) produção de ^{14}C correspondem a períodos de alta (baixa) atividade solar. No período de 950 a 1.300, elevadas atividades solares coincidem com o período conhecido na história humana como Período Quente Medieval (PQM). Logo após, uma sucessão de períodos excepcionalmente frios na Terra, chamada de Pequena Era Glacial (PEG), coincide com períodos que apresentaram número drasticamente reduzido de manchas solares: Mínimo de Oort [1010-1050], Mínimo de Wolf [1280-1340], Mínimo de Spörer [1420-1530] e Mínimo de Maunder [1645-1715]. Dessa forma, continuam os autores, o padrão correspondente de manchas solares indica que as atividades solares afetam diretamente o clima da Terra, demonstrando claramente a variabilidade natural do clima e a coincidência com eventos conhecidos na história humana.

Figura 2.2.6 – Reconstrução de manchas solares a partir de $\Delta_{14}\text{C}$ (azul), médias de 10 anos do Número de Grupos de Manchas Solares (GSN, vermelho) desde 1610 e a reconstrução de manchas solares a partir de ^{10}Be sob duas suposições extremas de produções locais (verde) e globais (magenta, tracejado), respectivamente. Os valores ligeiramente negativos da reconstrução durante os Grand Minima são artefatos, sendo compatíveis com valores nulos dentro da incerteza dessas reconstruções, como indicado pelas barras de erro.



Fonte: Solanki et al. (2004).

2.2.4.2.1. Ciclos de mais extensas periodicidades

Inúmeros autores (aproximadamente todos os citados nesta seção) têm notado periodicidades de multiciclos, flutuações ou modulações de maior escala temporal, de amplitude do Ciclo de Schwabe. Wolfgang Gleissberg, em 1939, notou uma periodicidade de sete ou oito ciclos em amplitudes no período de 1750 a 1928. Tal modulação recebeu posteriormente o nome de Ciclo de Gleissberg e tem periodicidade não muito definida, variando entre 70 e 100 anos, normalmente sendo aferida a média de 87 anos (Hathaway, 2010). O próprio Hathaway (2010) sugere, como melhor aproximação, uma periodicidade de 9,1 ciclos.

Por sua vez, Oliveira et al. (2017) lidam com a indefinição da periodicidade definindo dois Ciclos de Gleissberg: o ciclo inferior de Gleissberg, de 88 anos, e o ciclo superior de Gleissberg, de 120 anos.

Uma periodicidade que surge em muitos estudos por radiocarbono da atividade solar tem um período bem definido de cerca de 210 anos, que é frequentemente denominado de Ciclo de Suess ou Ciclo de De Vries (Hathaway, 2010). Ciclos mais longos, como de 1000, 2200-2300 anos e 6000 anos também são referenciados na literatura (Solanki et al. 2006).

2.2.4.2.2 O Mínimo de Maunder e o Máximo Medieval

Em suas investigações históricas, Gustav Spörer e Edward Maunder demonstraram uma ausência de manchas solares ou auroras no período de 1645 a 1715. Morton (2014) chega a comentar que, durante algumas décadas neste intervalo, manchas eram tão infrequentes, que um astrônomo poderia escrever um artigo científico se avistasse uma, e especula que, se Galileu e os demais pioneiros das observações solares telescópicas tivessem começado a monitorar o Sol 40 anos depois, poder-lhes-ia ter simplesmente passado despercebido, o fenômeno.

Na Figura 2.2.5, é possível observar o baixíssimo número de manchas nesse período – sobre o qual Eddy, em 1976, forneceu referências adicionais e o chamou de Mínimo de Maunder – e nutro período de baixa atividade solar, hoje conhecido como Mínimo de Dalton.

Os Mínimos de Maunder e de Dalton são especialmente interessantes porque ocorreram quando as temperaturas globais eram atipicamente frias. Durante a Pequena Era Glacial (PEG), aproximadamente de 1430 a 1850, geleiras avançaram pelos Alpes europeus, enquanto canais na Holanda e o Rio Tâmsa em Londres congelaram durante alguns invernos (Morton, 2014). Esse período de pequena idade do gelo, ocasionado pelo Mínimo de Maunder, fez a Europa experimentar invernos atipicamente longos e severos, levando a perdas de plantações e fome em larga escala (Lovely, 2009). A Figura 2.2.7 demonstra um dos eventos incomuns causados pelo fenômeno, o já comentado congelamento do Rio Tâmsa.

Investigações históricas posteriores revelaram períodos quentes, hoje conhecidos como os Máximos Romano (250 a.C a 400 d.C) e Medieval (950 a 1250). Este último é contemporâneo à colonização nórdica da Groenlândia e às explorações da costa nordeste da América do Norte até, pelo menos, L'Anse-aux-Meadows em Newfoundland e uma região produtora de uvas chamada de Vinland. O período de resfriamento seguinte deve ter contribuído para o abandono das colônias (Morton, 2014).

Figura 2.2.7 – “O Tâmis Congelado, olhando para o Leste, em direção à Velha Ponte de Londres”, Abraham Hondius, 1677. Este quadro retrata pessoas se divertindo no gelo do Rio Tâmis. No século XVII, os invernos na Europa foram longos e rigorosos devido ao Mínimo de Maunder da atividade solar, que durou de 1645 a 1700. Apenas 50 manchas solares foram vistas durante todo o período.



Fonte: Museu de Londres.

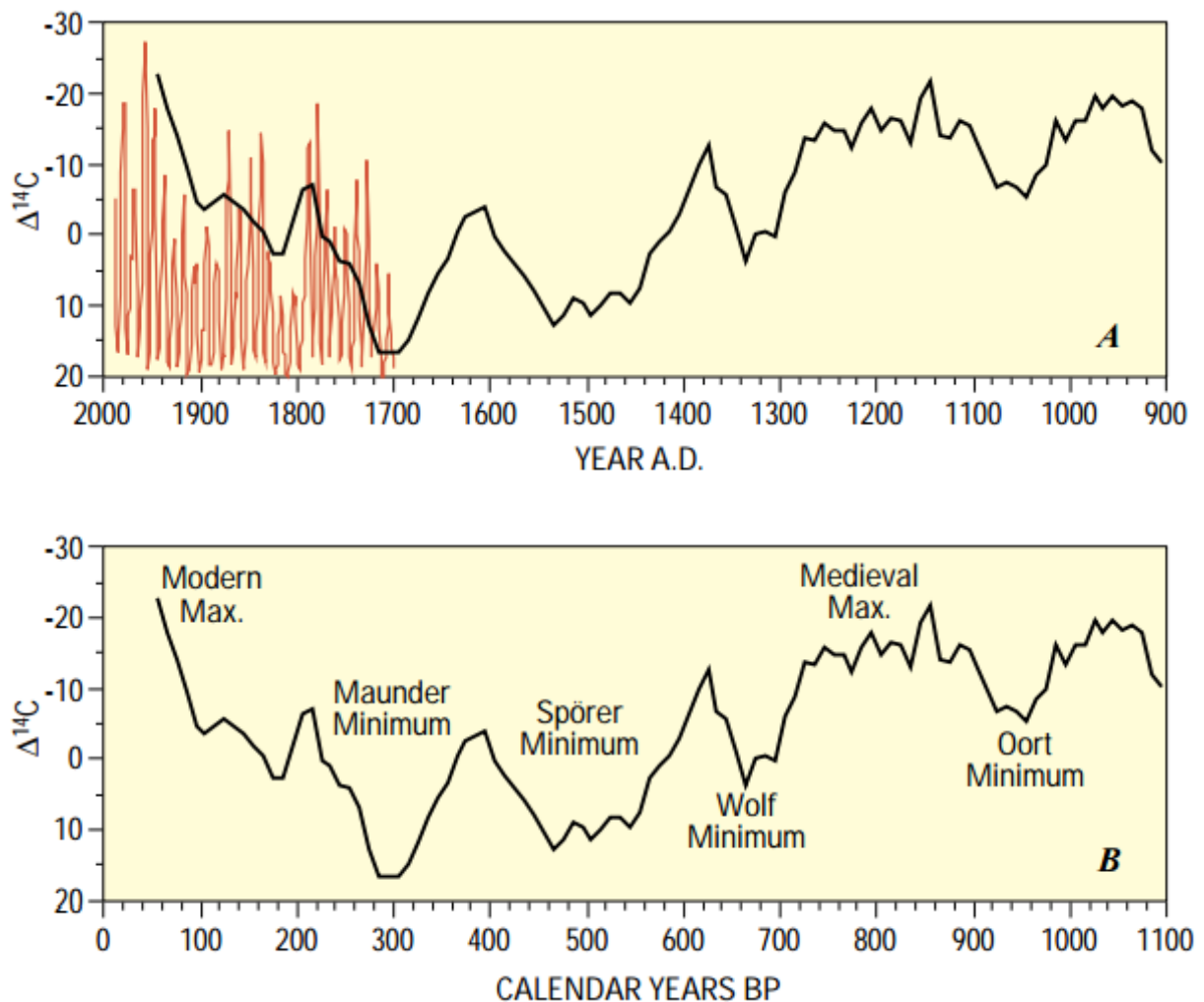
Morton (2014) também reporta que Ljungqvist et al. (2012) e Christiansen & Ljungqvist (2012) examinaram uma variedade de dados por aproximação (*proxies*) dos últimos 2000 anos, apurando que a magnitude do aquecimento do século XX está dentro da variabilidade ocorrida ao longo dos últimos 12 séculos, embora a presente taxa de aquecimento tenha sido excepcionalmente rápida.

Dean (2000), por meio de reconstrução por ^{14}C para os últimos 1000 anos, identificou dois outros períodos – semelhantes ao do Mínimo de Maunder e de Spörer – de elevada produção de ^{14}C , inferindo serem também períodos de mínima atividade solar, que são chamados de mínimos de Wolf e Oort, respectivamente (Figura 2.2.8). Esses ciclos na produção de ^{14}C e, por inferência, na atividade solar, têm periodicidades de aproximadamente 200 anos (Ciclo de Suess).

Miyahara et al. (2008), por dados de ^{14}C , assinalam que há variação na periodicidade do ciclo de Hale. Ele constatou que as temperaturas mostram significativos ciclos, atribuídos à atividade solar, de 19 anos, no período de 880 e 960 (Máximo Medieval), mas chega a 29 anos entre 1645 e 1715 (Mínimo de Maunder).

De modo análogo, Miyahara et al. (2009), obtiveram variações no ciclo de Schwabe, desde 9 a 14 anos, do Máximo Medieval ao Mínimo de Maunder, o que leva à conclusão de que, quando o Sol está experimentando um período persistente de baixa atividade (*Grand Minimum*), a periodicidade do ciclo de Schwabe tende a se estender, o contrário ocorrendo em períodos de pronunciada e prolongada alta atividade (os *Maxima*).

Figura 2.2.8 – Detalhes do registro da variação de ^{14}C para os últimos 1.100 anos. Na figura A, os anos estão em AD (anno domini ou depois de Cristo) e, na B, em anos BP (antes do presente). A curva de manchas solares em A está em vermelho. A escala de variação de C (eixo-Y) está invertida, de modo que um mínimo em ^{14}C corresponde a um máximo no número de manchas solares. Notável também é o fato de que os máximos em ^{14}C estão à frente dos mínimos em manchas solares, devido ao atraso de 20 a 60 anos necessário para o sinal de radiocarbono na atmosfera terrestre responder às variações na atividade solar.



Fonte: Dean et al. (2000).

2.2.5 Outros parâmetros de atividade solar

Fenômenos como a rotação diferencial do Sol e a convecção – o dínamo solar – dando origem aos campos magnéticos polar e toroidal, os processos eruptivos na atmosfera solar (como flares e CME), a radiação eletromagnética (IR, UV e raios-X), o vento solar e o campo magnético interplanetário são todas manifestações da atividade solar (Dobrica et al., 2017).

Dobrica et al. (2017) sustentam que a principal característica da variabilidade solar é o ciclo de atividade no período de 11 anos, o já referido Ciclo de Schwabe, mas que ele é modulado pelo ciclo de Hale, relacionado à inversão do campo magnético solar global. Isso pode ser quantificado por médias de índices de atividade solar que são diretamente relacionados aos processos solares, como o número de manchas solares (a mais longa série de observação solar instrumental), e o fluxo solar de rádio a 10,7 cm, disponível por um intervalo mais curto (1947-presente), ou indiretamente, via efeitos induzidos pela atividade solar na magnetosfera terrestre, como o índice geomagnético, que reflete variações no campo magnético toroidal do Sol, enquanto o fluxo de rádio é geralmente relacionado à radiação UV.

2.2.6 Mecanismos físicos de interação com o clima terrestre

Consoante expõem Dobrica et al. (2017), embora seja de entendimento comum que o Sol define o clima terrestre, fornecendo energia ao sistema climático por meio da radiação dele recebida, o papel da variabilidade solar está longe de ser completamente esclarecido. A variabilidade solar pode afetar o ambiente de várias maneiras e a várias escalas temporais, tanto diretamente, por modificações de longo prazo nas emissões radiativas solares, afetando o balanço de energia da superfície da Terra, como indiretamente, por efeitos do vento solar na magnetosfera e ionosfera (atividade geomagnética) e pela modulação do fluxo de raios cósmicos por meio de efeitos combinados dos campos magnéticos solar e terrestre.

Segundo Zhou et al. (2016), respostas climáticas a variações na TSI e irradiância em UV tem sido inferidas por muitos autores, com mais de mil relatos ao longo dos dois últimos séculos.

Radiação advinda do Sol, em última análise, fornece a única fonte de energia para a atmosfera terrestre, e variações na atividade solar claramente têm o potencial de afetar o clima. Há evidências estatísticas da influência solar nos vários parâmetros meteorológicos em todas as escalas temporais (Haigh, 2007). Todo o clima na Terra, da superfície do planeta até a

fronteira com o Espaço, começa com o Sol. Fenômenos meteorológicos espaciais e terrestres (o tempo que nós sentimos na superfície) são influenciados pelas pequenas variações que o Sol sofre ao longo de seu ciclo (SWPC).

Acerca dos diversos mecanismos de influência no clima terrestre, Solanki et al. (2006), elencam três principais:

- A variabilidade da irradiância solar (TSI), com efeitos potenciais no clima terrestre, tanto na escala de tempo do ciclo solar quanto em escalas seculares e até mais longas;
- A variabilidade de radiação UV, relativamente muito mais alta que a TSI, afetando a estrutura térmica da estratosfera por meio de reações fotoquímicas envolvendo o ozônio;
- Modulação do fluxo de raios cósmicos pela variação do campo magnético da heliosfera, possivelmente desencadeando formação de nuvens baixas.
-

Haigh (2007), por seu turno, classifica os efeitos em quatro fatores elementares, segundo a Tabela 1:

Tabela 1 – Resumo dos meios pelos quais a variabilidade solar pode influenciar o clima na baixa atmosfera.

Fator Forçante	Mecanismo Genérico
Irradiância Solar Total (TSI)	Forçante radiativa do clima. Impacto direto na Temperatura de Superfície do Mar e ciclo hidrológico.
Irradiância Solar em UV	Aquecimento da média e alta atmosfera. Acoplamento dinâmico atingindo a troposfera. Composição química da média e alta atmosfera; impactos na estrutura térmica e forçante radiativa.
Partículas Energéticas Solares	Ionização da média e alta atmosfera; impacto na composição e temperaturas. Acoplamento Magnetosfera-Ionosfera-Termosfera.
Raios Cósmicos Galácticos	Ionização da baixa atmosfera; impacto no campo elétrico. Impacto nos núcleos de condensação.

Fonte: Haigh (2007).

Para Morton (2014), no nosso presente estado de entendimento, os maiores contribuintes para mudanças climáticas, em ordem decrescente de escala temporal, são:

- a) O aumento gradual evolucionário do brilho do Sol ao longo de quase 5×10^9 anos;
- b) Variações na TSI, com limitações a serem determinadas por medições de satélite e melhores modelagens solares;
- c) Variações na irradiância em UV;
- d) Variações na formação de nuvens, devido aos Raios Cósmicos Galácticos (RCG), tanto no longo prazo, pela dependência da proximidade de supernovas ao longo da órbita galáctica do Sol, como em escalas temporais mais curtas, de acordo da intensidade do escudo magnético fornecido pelo Sol.

Na sequência, quando devidamente abordados e evidenciados na literatura, os efeitos descritos acima serão explanados mais minuciosamente.

2.2.6.1 Irradiância Solar Total

As variações solares referem-se às mudanças na quantidade de radiação total emitida pelo Sol e na sua distribuição espectral. A partir do Sol, a Terra recebe continuamente, no topo de sua atmosfera, um fluxo de energia eletromagnética cujo valor, em média, é de aproximadamente $1.365 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ (ou $81,66 \text{ kJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{min}^{-1}$). Anteriormente à existência de satélites de alta precisão, a radiação solar emitida era considerada constante por muitos cientistas. Tal fato é refletido no termo *constante solar*. Devido às interferências atmosféricas, fracassaram todas as tentativas de detectar, em solo, as variações na constante solar. Foi então que, com o uso de satélites fora da atmosfera, o monitoramento da radiação solar permitiu identificar pequenas variações. Devido à variação da distância entre a Terra e o Sol, a irradiância solar no topo da atmosfera varia cerca de 6,9% durante o ano. Quando a Terra e o Sol estão mais próximos (periélio) ou mais distantes (afélio), a constante solar é, respectivamente, de $1.412 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ no início de janeiro e $1.321 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ no início de julho (Oliveira et al. 2017).

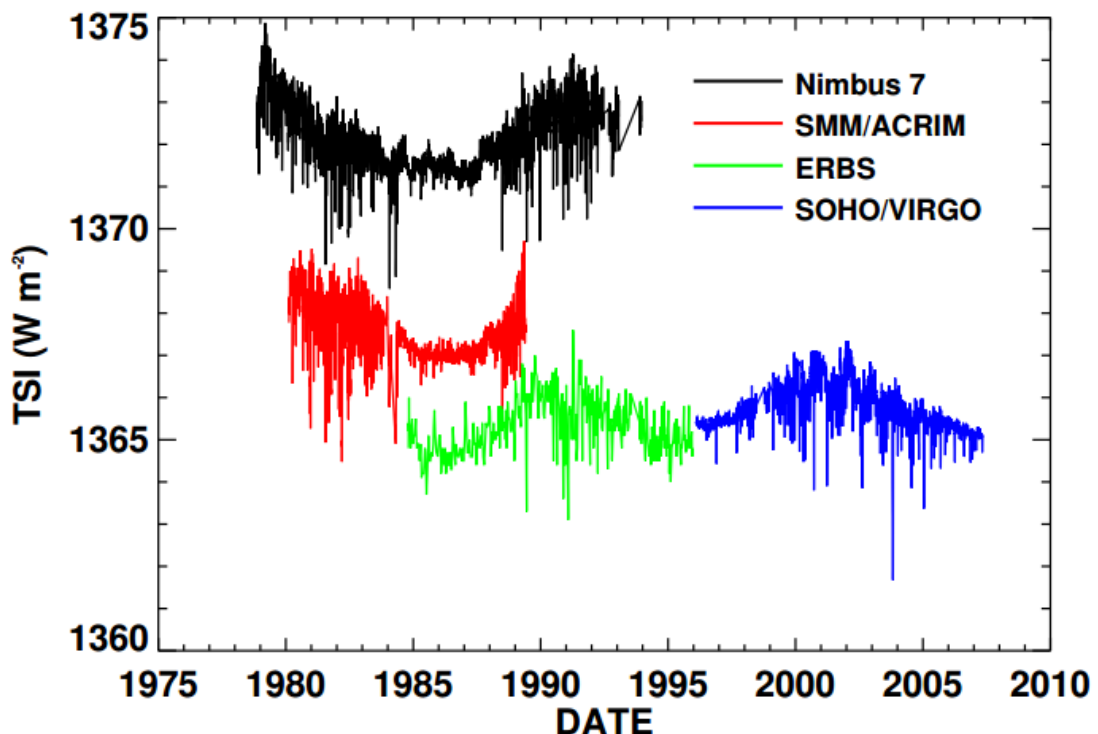
Tal emissão radiativa do Sol também é modulada em fase com o ciclo solar. Essa variação é particularmente pronunciada pela radiação originada no plasma quente das camadas mais altas da atmosfera solar (cromosfera e coroa). Lá, as forças magnéticas dominantes e a dissipação de energia magnética determinam a estrutura atmosférica, a qual, por sua vez, varia fortemente ao longo do ciclo de atividade. Como consequência, a radiação na faixa do UV, EUV (extremo ultravioleta) e rádio variam por fatores que vão de 2 a 10 entre o mínimo e o máximo solares, enquanto o fluxo de raios-X muda na ordem de 100. Ademais,

a Irradiância Solar Total (TSI, na sigla em inglês), medida na órbita da Terra no espaço, varia sutilmente (da ordem de 0.1%) em fase com o ciclo solar (Solanki et al. 2006).

O desvio, em longo prazo, no balanço médio anual de energia da Terra, do estado de equilíbrio (excesso de TSI acumulado pelos oceanos ou seu déficit) praticamente determina uma mudança correspondente no estado de energia do sistema Terra-Atmosfera e uma consequente variação climática em sua amplitude. Variações cíclicas de longo prazo na energia total advinda da radiação solar adentrando as camadas superiores da atmosfera são a causa fundamental de variações climáticas (Abdussamatov, 2015).

Ainda quanto à TSI na órbita terrestre, Hathaway (2010) comparou medições diárias desta variável (que, em longa escala, é considerada constante) com o ciclo de manchas e encontrou correlação positiva para a maioria dos ciclos. A Figura 2.2.9 exibe medições diárias da TSI feitas por quatro diferentes instrumentos.

Figura 2.2.9 – Medições diárias da Irradiância Solar Total (TSI) por instrumentos de diferentes satélites. Os deslocamentos sistemáticos entre as medidas de diferentes instrumentos complicam a determinação do comportamento a longo prazo.



Fonte: Hathaway (2010).

De acordo com Dean (2000), medições de radiômetros de satélite feitas nos 20 anos precedentes a seu estudo têm demonstrado que a TSI varia em 0.1% ao longo do ciclo de 11

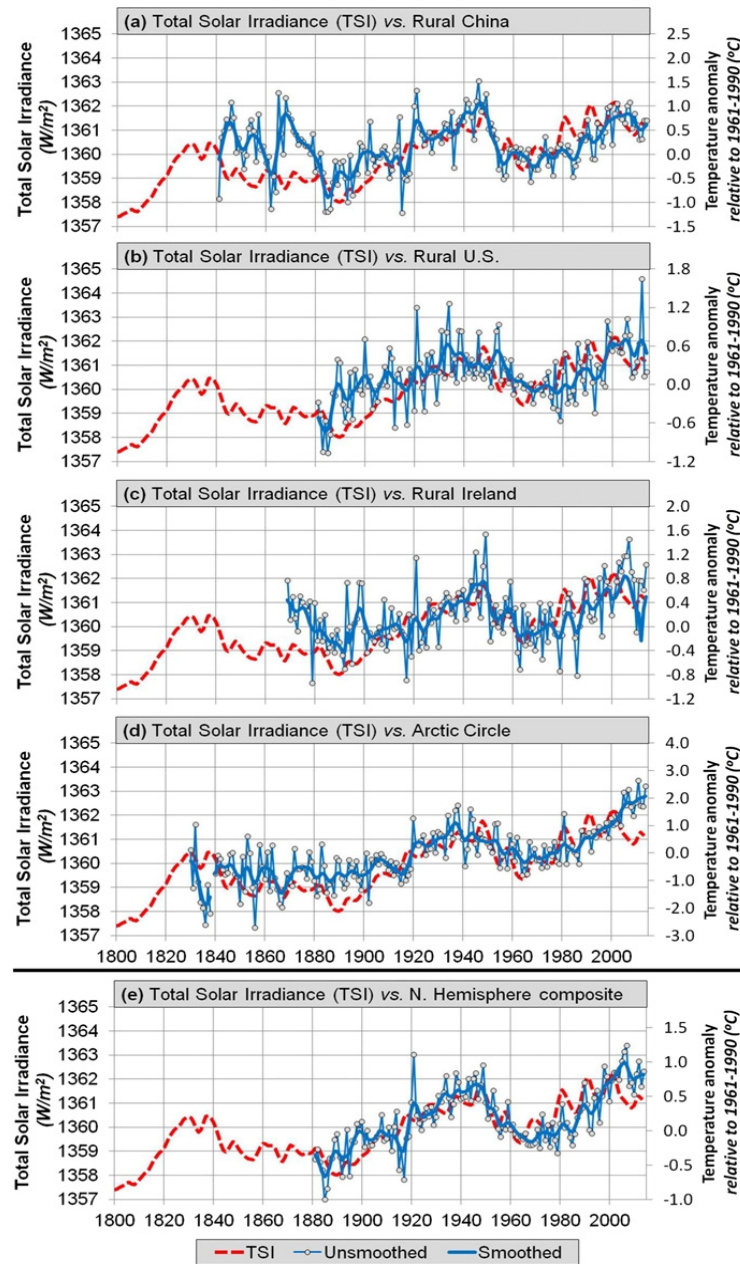
anos, e tal variação se traduz em diferenças na temperatura troposférica global de 0.5° a 1.0°C. Citando Lean et al. (1995), ele argumenta que, durante o Mínimo de Maunder, a TSI foi reduzida em 0.2% em comparação com o mínimo da década de 1990, e que a radiação UV total foi reduzida em 1.04%. Citando Crowley & Kim (1996), ele lembra que o aquecimento total do Mínimo de Maunder a meados do século XX foi de 0.8°-0.9°C e que, de acordo com Lean et al. (1995), a superfície da Terra foi aquecida em 0.55°C desde 1860 e metade disso pode ser atribuído à forçante solar desde o Mínimo de Maunder. Entretanto, um aumento de 0.36°C dos 0.55°C ocorreu desde 1970. A forçante solar só pode ter contribuído com 0.11°C do aumento de 0.36°C. Dean (2000) conclui que realmente parece haver uma relação entre a atividade solar e a temperatura global relacionada à TSI, com temperaturas mais frias durante os mínimos do ciclo de manchas.

Para Abdussamatov (2015), sempre que a TSI expressou seu pico do ciclo quasi-bicentenário de até ~0,5%, um aquecimento global começou com um atraso de 20 ± 8 anos, definido pela inércia térmica do oceano, e toda queda profunda de TSI, na mesma periodicidade, causou uma pequena era glacial (simultânea a subseqüentes efeitos não-lineares de feedback).

Por meio de uma série de comparações de estimativas de tendência de temperatura regionais e reconstruções de outros autores, Soon et al. (2015) encontraram, para todos os casos, uma concordância surpreendente entre as tendências de temperatura e atividade solar (Figura 2.2.10). Isso sugere, segundo os autores, que as tendências de temperatura do ar à superfície, no HN, têm sido fortemente influenciadas pelas variações na Irradiância Solar Total (TSI) desde, pelo menos, 1881, acrescentando, os autores, que esses resultados contradizem diretamente as conclusões dos últimos relatórios do IPCC, em que se argumenta que as tendências de temperatura do ar à superfície têm sido dominadas por mudanças nas concentrações de gases de efeito estufa desde, pelo menos, 1950. Eles ainda esclarecem que seus dados são predominantemente rurais, bem como as reconstruções usadas, de Hoyt e Schatten (1993), atualizadas por Scafetta e Wilson (2014) e, por isso, livres de contaminação pelo fenômeno da Ilha de Calor Urbano, que, pelo alcance naturalmente limitado, não deve ser levado em consideração na aferição de tendências de temperaturas globais.

É digno de nota, ainda, que o estudo de Soon et al. (2015), mais recente que o de Dean (2000), o contradiz, em defesa da dominância do Sol como forçante climatológica, mesmo após 1970, uma vez que a correlação apresentada, entre as temperaturas rurais e a atividade solar, vão até o fim da série.

Figura 2.2.10 – Comparação entre tendências atualizadas de TSI e de anomalias de temperatura em diversas regiões rurais, devidamente identificadas.

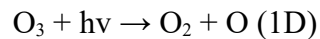


Fonte: Soon et al. (2015).

2.2.6.2 Radiação ultravioleta

De acordo com Svensmark et al. (2016), variações na faixa da radiação ultravioleta (UV) são importantes para a fotoquímica da atmosfera, e podem, portanto, influenciar a formação de aerossóis e microfísica das nuvens. Como consequência, é razoável que uma mudança repentina nos comprimentos de onda UV relevantes durante decaimentos de Forbush

(FD, na sigla em inglês) possam explicar variações em concentrações de aerossóis e na cobertura de nuvens. Um dos gases-traço mais importantes é o ácido sulfúrico. Uma redução nas frequências de UV concomitantes a um FD levaria a menos ácido sulfúrico, resultando em menos partículas nucleadas e crescimento mais lento. A seguinte reação fotoquímica:



Onde $h\nu$ representa um fóton, inicia a maior parte da produção de ácido sulfúrico, uma vez que O (1D) produz o radical hidroxila (OH), que, por sua vez, reage com SO_2 para formar H_2SO_4 .

Já Morton (2014) informa que, do mínimo ao máximo nos ciclos solares recentes, a radiação próxima aos 200 nm, que produz Ozônio (O_3) a partir do Oxigênio (O_2) na estratosfera, aumentou em até 6%, e, entre 240 e 320 nm – bandas de absorção de O_3 – até 4%, enquanto o fluxo total aumentou em apenas 0,12%. O autor argumenta que há mecanismos para acoplamento desse calor até a baixa atmosfera, e isso poderia explicar o fato de as temperaturas subirem e descerem com a atividade solar mesmo com a TSI exibindo variações mínimas.

De fato, Huo & Xiao (2017) apontam para a radiação UV como meio de a variabilidade solar influenciar a variação climática na superfície “de cima para baixo”, pela interação estratosfera-troposfera. A irradiância UV muda ao longo do ciclo de 11 anos, cumulada com um mecanismo de feedback do ozônio, causado por uma variação na estrutura térmica da estratosfera. O aumento do gradiente meridional de temperatura pode alterar a dinâmica da estratosfera-troposfera. Anomalias no vento zonal interagem com ondas planetárias para transportar o sinal solar às regiões polares e a camadas inferiores da atmosfera durante o inverno no HN.

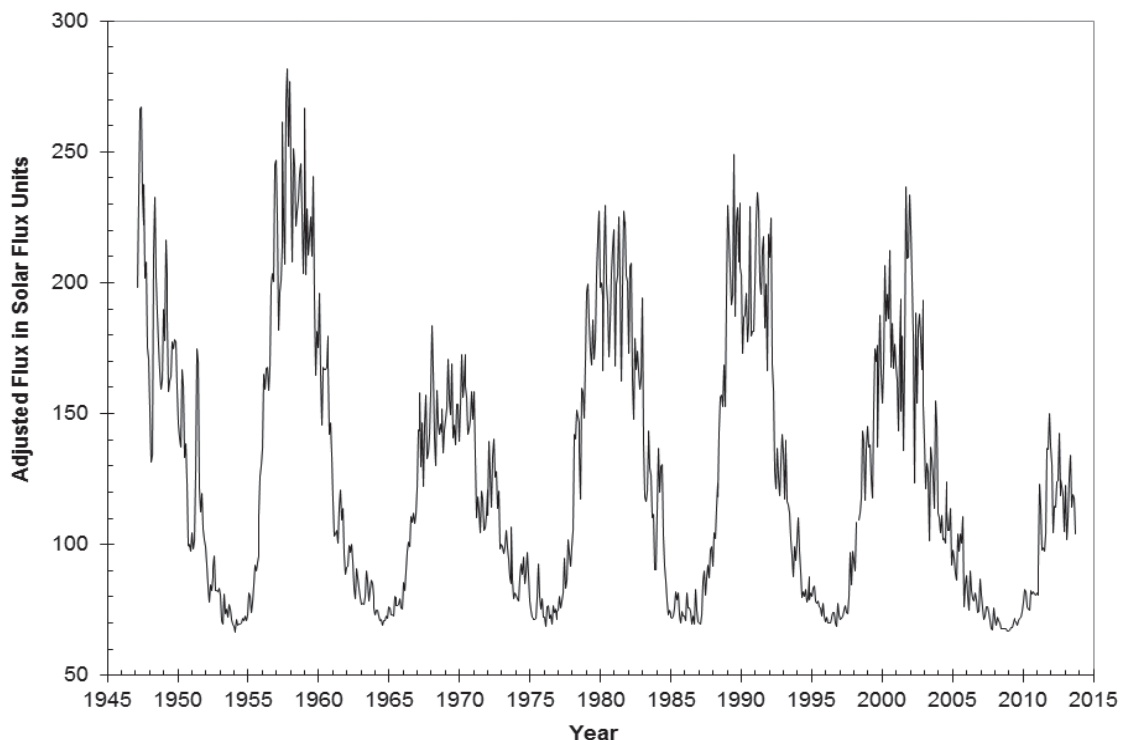
2.2.6.3 Fluxo de rádio a 10,7 cm

É o fluxo integrado de emissão do disco solar no comprimento de onda de rádio de 10.7 cm (2800 MHz). Esta medida da atividade solar tem vantagens sobre os números de manchas e as áreas, pois é completamente objetiva e pode ser feita sob praticamente qualquer condição meteorológica. Hathaway (2010) demonstra que essa variável está relacionada com o número de manchas ao nível de 99.7%.

Tal medida objetiva da atividade solar, notada pelo pesquisador canadense Morton (2014) como uma importante contribuição do Canadá ao monitoramento solar, teve início em 1947 em Ottawa, por Arthur Covington, do Conselho Nacional de Pesquisa daquele país. As medições sistemáticas e calibradas ocorrem numa banda de frequência de um radar que havia operado durante a XX Guerra Mundial, mas que se mostrou também muito adequada para estudar o Sol.

Morton (2014) ainda assinala que não há efeito direto na Terra, mas que as emissões de rádio nessa frequência são uma boa medida do fluxo UV em aproximadamente 120 nm, e se correlaciona bem com o número de manchas, fornecendo uma medida consistente da variabilidade solar desde 1947, sendo, inclusive, um parâmetro da atividade quando não há manchas. No mínimo de 2009, por exemplo, o fluxo médio de rádio foi 4% inferior ao do mínimo anterior. Na Figura 2.2.11, que exhibe os registros do fluxo de rádio no decorrer dos últimos seis ciclos de Schwabe, o autor chama atenção para a maior extensão do último mínimo (2009) e a baixa intensidade do último máximo (2013-2014).

Figura 2.2.11 – Médias mensais do fluxo solar em rádio a 10,7 cm, medido pelo Conselho Nacional de Pesquisa do Canadá e ajustado para a distância média Terra-Sol. A unidade do fluxo solar é de 10^4 Jansky = 10^{-22} W.m².Hz⁻¹. O último máximo é atipicamente fraco, e o mínimo precedente, excepcionalmente extenso.



Fonte: Morton (2014).

A contagem de manchas solares mostra um padrão similar, possivelmente sugerindo, segundo o autor, que o Sol pode estar se direcionando a um outro Grand Minimum, à semelhança do Mínimo de Dalton ou de Maunder.

Para Maruyama et al. (2017), a relação entre o fluxo de rádio (a 10,7 cm) e a temperatura do ar na alta troposfera indica que a atividade solar a influencia. A mudança de regime climático ocorre quando o número de manchas solares aumenta, e o Sol se torna mais ativo, causando grande perturbação da atividade geomagnética. Ao conduzir análise de ondeletas, eles demonstram que a atividade solar se relaciona com – e influencia – a ODP. Assim, eles concluem que a ODP é, de fato, influenciada pela atividade solar, e sugerem que mudanças de regime climático também o são.

2.2.6.4 Raios Cósmicos Galácticos

As nuvens são um elemento fundamental do saldo de energia terrestre, e qualquer processo que cause mudanças sistemáticas na microfísica das nuvens é de interesse geral. Para que uma gotícula de nuvem se forme, vapor d'água precisa se condensar a aerossóis, que agem como núcleos de condensação de nuvens (CCN, na sigla em inglês), de tamanhos no mínimo entre 50 e 100 nm, de modo que variações no número de CCN influenciarão a microfísica das nuvens. Um processo que tem sido investigado é regido pela ionização causada por raios cósmicos, que, desta forma, têm sido apontados como de elevada importância ao influenciar a densidade de CCN na atmosfera e, assim, a cobertura de nuvens na Terra (Svensmark et al. 2017).

A maioria dos raios cósmicos são núcleos de átomos, mas também incluem elétrons de alta energia, pósitrons e outras partículas subatômicas. O termo “raios cósmicos” geralmente se refere a RCG que se originam em fontes fora do Sistema Solar distribuídas por toda a Via Láctea. No entanto, esse termo também inclui núcleos e elétrons acelerados em associação com eventos energéticos no Sol, chamados de partículas energéticas solares (Oliveira et al. 2017). Entretanto, como observa Morton (2014), os “raios cósmicos” do Sol são “mais fracos e são parcialmente repelidos pelo campo magnético terrestre”.

Prótons, elétrons, átomos ionizados e o campo magnético a eles associado, no fluxo do vento solar, a velocidades de alguns quilômetros por segundo, formam a Heliosfera. Além das órbitas de Netuno e Plutão, esse vento estabelece um equilíbrio de pressão com o meio interestelar numa região chamada de Heliopausa. Efeitos diretos do vento no clima da Terra

são incertos, mas o campo magnético solar, ao modular os raios cósmicos que atingem a Terra, podem ser uma importante variável astronômica a influenciar o clima. Este campo, que muda de polaridade a cada 11 anos e é distorcido pelo campo magnético da Terra e seu movimento ao longo do meio interestelar, fornece um escudo variável contra os RCG, que podem causar mutações em células de seres vivos e também semear núcleos de condensação para nuvens (Morton, 2014).

Para Solanki et al. (2004), as duas espécies mais abundantes de raios cósmicos são os prótons e as partículas-alfa. Morton (2014), corroborando a afirmação, dá o percentual de 87% para os prótons e 12% para as partículas-alfa, com os núcleos pesados ionizados respondendo por 1% restante. Tais partículas, ao colidirem com átomos na alta atmosfera, produzem uma grande variedade de partículas secundárias, incluindo isótopos raros, como ^2D , ^{13}C e ^{18}O , que podem servir de *proxies* (ver seção 2.2.4.2). Morton (2014) ainda classifica como especialmente úteis os núcleos radioativos secundários ^{10}Be e ^{14}C , formados por processos resumidos à Tabela 2. O ^{14}C se combina ao O para formar $^{14}\text{C}^{16}\text{O}^2$, que circula por cerca de 5 anos antes de a fotossíntese depositá-lo como ^{14}C em anéis de árvore anuais. Já o isótopo ^{10}Be se agrega a aerossóis para precipitar cerca de um ano depois. Em regiões polares, a neve vai sendo comprimida em camadas anuais de gelo. Assim, tem-se acesso a dois úteis históricos de fluxo de RCG que atinge a Terra e a atividade solar correspondente.

Tabela 2 — Núcleos Cosmogênicos.

Reaction	Half life (yr)	Product
$n + ^{14}\text{N} \rightarrow p + ^{14}\text{C}$	5730	^{12}C
Spallation of ^{14}N , $^{16}\text{O} \rightarrow ^{10}\text{Be}$	1.51×10^6	^8Be
Spallation of $^{40}\text{Ar} \rightarrow ^{36}\text{Cl}$	3.08×10^5	^{35}Cl

Fonte: Morton (2014).

A influência de RCG no clima terrestre tem sido verificada pela vertente de estudos que relacionam a Climatologia com a Astronomia. A Cosmoclimatologia, termo cunhado por Henrik Svensmark em 2007, sugere que a intensidade incidente de raios cósmicos na atmosfera terrestre correlaciona-se estreitamente com variações de cobertura global de nuvens. As nuvens refletem/absorvem a entrada e a saída de radiação e, portanto, desempenham um papel importante no balanço de radiação da Terra (Oliveira et al. 2017).

Morton (2014) assevera que, quando o campo magnético solar está fraco, mais raios cósmicos atingem a Terra, produzindo mais ^{14}C . A ionização por RCG secundários com energias de 10-20 GeV colaboram com a formação de aerossóis e ácido sulfúrico e água com raios de 2-3 mm. Alguns destes podem crescer ao ponto de se tornarem núcleos de condensação de nuvens (CCN, na sigla em inglês), com raios maiores que 50 nm, que aumentam a formação de nuvens baixas. Essas nuvens refletem a luz do Sol, causando um resfriamento da Terra.

Stozhkov (2017) apurou que, na hipótese de o fluxo de raios cósmicos até a superfície ser interrompido, o aumento na temperatura global da Terra chegaria a expressivos $\Delta T \approx 4^\circ\text{C}$. O fluxo de RCG também afeta processos de microfísica das nuvens e, conseqüentemente, a circulação atmosférica geral. Registros de poeira dos sedimentos laminados do Elk Lake, EUA, mostram variações de escala secular no aumento de pulverulência durante períodos de atividade solar reduzida, como durante a PEG e o Médio-Holoceno. Os registros de poeira nas amostras de gelo da Groelândia exibem ciclos com periodicidades distintas de 11, 22, 90 e 200 anos, que podem estar associados com os ciclos de Schwabe, Hale, Gleissberg e Suess, respectivamente. A conexão física entre a atividade solar e os aerossóis, postula-se, deve-se a variações nos padrões de precipitação nas regiões que são fontes de poeira para a Groelândia; variações essas causadas por mudanças na cobertura e microfísica das nuvens, que, por sua vez, são afetadas pelo fluxo de RCG.

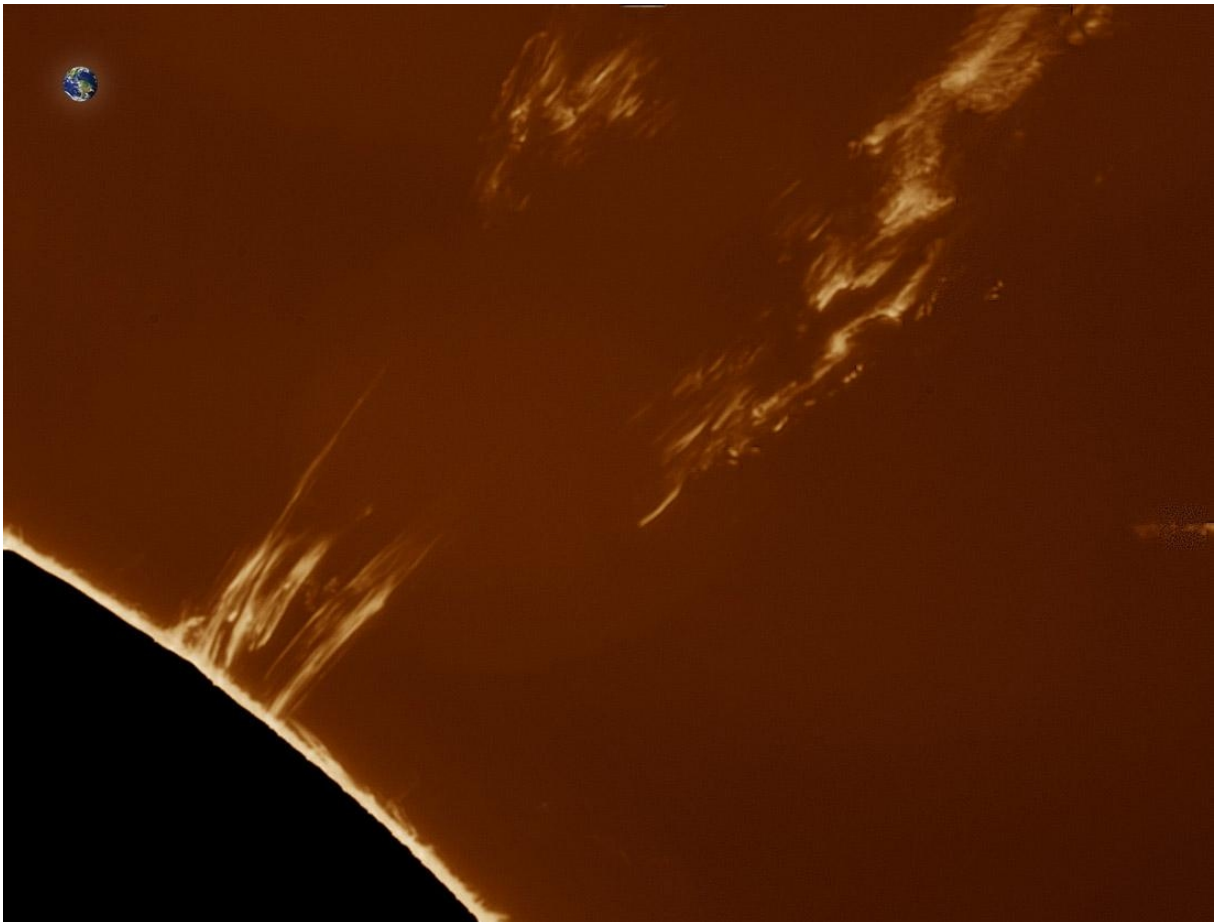
O fluxo de partículas galácticas carregadas (RCG) à baixa atmosfera terrestre varia em cerca de 15% ao longo do ciclo solar de 11 anos, forçado por variações no vento solar, com maior fluxo de RCG na troposfera durante o mínimo solar. O mecanismo “ion-aerossol” em “ar limpo” tem, em geral, recebido a maior atenção. Ocorre quando a formação de novas partículas atmosféricas (nucleação de aerossóis) é aumentada pela presença desses íons (nucleação induzida por íons). As partículas que acabaram de se formar, com diâmetros de aproximadamente 1 nm, podem crescer na atmosfera – por meio da condensação de gases, como o ácido sulfúrico e orgânicos de baixa volatilidade – a tamanhos suficientes para se tornarem CCN, geralmente entre 80-100 nm, para nuvens Stratus. Acréscimos no número de CCN levam a um aumento no número de gotículas de nuvens, que, por sua vez, podem levar a nuvens mais refletivas ou mais persistentes. Ao longo de toda a troposfera livre, a taxa de produção de par de íons varia em 15-30% entre o máximo e o mínimo solar, com alterações inferiores a 10% na Camada Limite Planetária (Pierce & Adams, 2009).

Uma abordagem predominante à ideia de que a ionização promovida por RCG produz

efeitos subsequentes em processos que envolvem aerossóis tem sido a de investigar os efeitos das CME, pelas quais nuvens de plasma magnetizado são ejetadas da coroa solar e viajam ao espaço interplanetário. Esta nuvem de plasma ejetado tende a varrer raios cósmicos em sua trajetória e, se atinge a Terra, pode resultar num decréscimo súbito na quantidade de raios cósmicos que atingem a atmosfera (Svensmark et al. 2016).

A Figura 2.2.12 é uma imagem real de uma CME emanando da atmosfera solar, como visto da Terra, com o disco do próprio planeta representado na mesma escala de dimensões do disco solar e da CME, fornecendo uma clara percepção da magnitude do evento, que, na eventualidade de vir na direção da Terra, produz, entre outros efeitos, um FD.

Figura 2.2.12 – Uma CME observada da Terra (Maringá-PR, Brasil), no comprimento de onda de 656 nm (H-alfa), com o disco solar oculto por uma máscara negra, em virtude da grande diferença de brilho entre a fotosfera solar e o fenômeno da CME. O planeta Terra é representado graficamente, em escala.



Fonte: A imagem é uma cortesia de Ronnie Clayton Pereira.

Com base nas observações de energia adentrando os oceanos ao longo de um ciclo solar, Svensmark et al. (2016) notam uma variação pico a pico de $1-1,5 \text{ W/m}^2$ no saldo de

radiação. Esta variação tem sido associada a uma variação absoluta de aproximadamente 2% na fração de nuvens baixas (correspondentes a cerca de 5% em variação relativa na fração de nuvens baixas). Os autores concluem que esses resultados favorecem a hipótese de que os íons desempenham um papel significativo no ciclo de vida das nuvens.

A consistente cadeia de reações é: menos raios cósmicos → menos ionização → menos nucleação de aerossóis → menos CCN formados → gotículas maiores → decréscimo em fração de nuvens, maior opacidade ótica e emissividade das nuvens. Finalmente, como as gotículas são maiores, a precipitação é mais efetiva, consistente com a redução no conteúdo de água líquida. De outro plano, com maior fluxo de RCG, há um aumento de CCN, resultando em aumento do número de gotículas e redução no tamanho das gotículas, produzindo menos chuva, tempo de vida mais longo e um aumento na fração de nuvens (Svensmark et al. 2016).

Para Svensmark et al. (2009), há evidência observacional e experimental que raios cósmicos facilitam a formação de aerossóis ultrafinos (10-30 nm) de ácido sulfúrico em poucas horas. Em experimentos e observações sobre terra, as concentrações de vapor d'água são tipicamente mais altas que sobre os oceanos, e resultam em maior taxa de crescimento. Essas partículas, inicialmente muito pequenas, tendem a crescer até CCN durante alguns dias, principalmente ao recrutar vapores condensáveis. Os autores ainda observaram que nuvens baixas contêm menos água líquida após um FD, e, para os eventos mais intensos, a água líquida na atmosfera oceânica pode diminuir em até 7%. O conteúdo de água líquida medido pelo Special Sensor Microwave/Imager (SSM/I) atinge um mínimo 7 dias após o FD, assim como a fração de nuvens baixas medida pelo MODIS e o International Satellite Cloud Climate Project (ISCCP). Observações paralelas da rede robóticas de aerossóis (AERONET) revelam quedas na abundância relativa de partículas finas de aerossóis que, em circunstâncias normais, teriam evoluído até o nível de CCN. Assim, um link entre o Sol, raios cósmicos e nuvens de água líquida parece existir em escala global (Svensmark et al. 2009).

Deve-se enfatizar que não há um único tipo ou intensidade de efeito de CCN nas nuvens, pelo contrário, o impacto dependerá das diferenças regionais e dos tipos de nuvens. Em regiões com um número relativo alto de CCN, os efeitos apresentados serão pequenos. Ademais, o efeito nas nuvens convectivas e de cristais de gelo deverá ser desprezível. Um número maior de CCN pode até resultar em menos nuvens. Como o efeito da condensação por íons é maior para concentrações baixas de ácido sulfúrico e de baixas densidades de aerossóis, acredita-se que o impacto seja maior nas estratiformes marinhas (Svensmark et al. 2017).

2.3 Ciclos Orbitais Lunares

Períodos de marés altas ocasionadas por fenômenos astronômicos contribuem para a ocorrência de aumentos extremos no nível do mar. Em escalas temporais interanuais, duas precessões associadas com a órbita da Lua causam variações sistemáticas das marés altas. Uma avaliação global de quando essas modulações podem ocorrer permite a previsão de períodos em que um maior risco de inundação costeira é provável em diferentes partes do mundo (Haigh et al. 2011). Como pondera Molion (2015), cerca de 40% da população mundial e 60% da população dos Estados Unidos da América vivem em regiões litorâneas.

As variações das forçantes de maré amplamente reconhecidas por seus efeitos a curto prazo se devem ao ciclo de marés sizígia-quadratura, causado pelo movimento relativo entre Terra, Lua e Sol. Em escala temporal mais longa, no entanto, esse ciclo está sujeito a modulações, em virtude de dois movimentos de precessão lunar, nomeadamente o Ciclo Nodal Lunar, de 18,61 anos, e o Ciclo Lunar das Apsides (ou do perigeu-apogeu), de 8,85 anos, que influencia o nível do mar em um ciclo aproximado de 4,4 anos. O termo precessão denota a rotação de um plano em relação a outro plano, de referência (Haigh et al. 2011). A seguir, uma explanação sobre como mecanicamente ocorrem esses dois fenômenos orbitais lunares. Posteriormente, uma revisão de sua influência no clima por meio de variados parâmetros, a descrição dos mecanismos pelos quais tais influências sobrevêm e sua relação com outras oscilações.

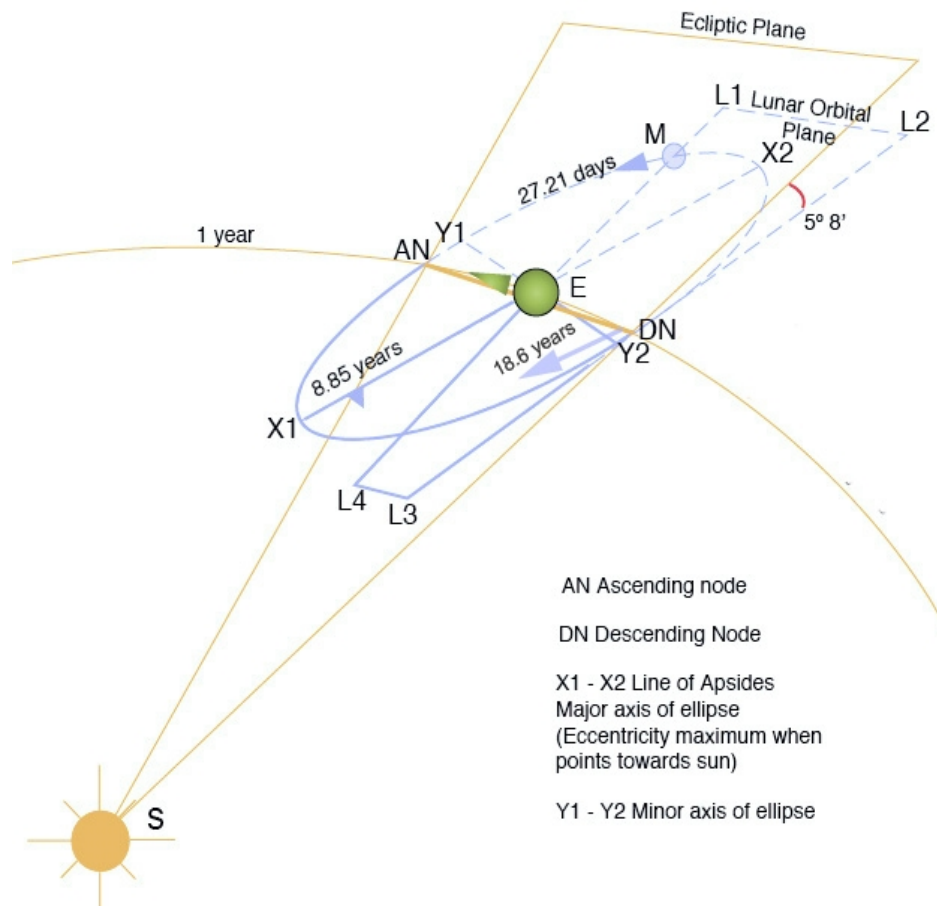
2.3.1 Precessão nodal

O ciclo nodal lunar é determinado pelo movimento relativo do plano no qual a Lua orbita a Terra. Este plano está inclinado em $5^{\circ}9'$ em relação ao plano no qual a Terra revoluciona em torno do Sol (plano da Eclíptica), que, por sua vez, está inclinado em $23^{\circ}27'$ em relação ao plano do equador terrestre. O ponto onde a Lua passa do sul para o norte da eclíptica é chamado de nodo ascendente (Haigh et al. 2011). O ciclo Draconiano (ou Dracônico) está relacionado com os caminhos da Lua e do Sol. Os dois pontos onde o caminho da Lua cruza o caminho aparente do Sol, na eclíptica, são chamados de nodos orbitais da Lua (Oliveira et al. 2017). Assim, os nodos são as intersecções da eclíptica com o plano de órbita da Lua (Keeling and Whorf, 1997; Figura 2.3.1).

A eclíptica deve seu nome ao fato de que um eclipse do Sol ou da Lua só pode

acontecer quando a Lua está nesses nodos, ficando o Sol, a Terra e a Lua alinhados. O termo Dracônico/Draconiano refere-se um dragão mitológico que supostamente vivia nos nodos e regularmente “comia” o Sol ou a Lua durante um eclipse (Oliveira et al. 2017).

Figura 2.3.1 – Perturbações orbitais lunares. Ambos os eixos percorridos nesse estudo (eixo dos nodos AN-DN e linha das apsidas X1-X2) estão ilustrados.



Fonte: Wikipedia, 2015.

A longitude média do nodo ascendente (denotada por N) é calculada em relação ao equinócio vernal, um dos dois pontos onde o Equador Celeste intersecta a Eclíptica. Devido, principalmente, à atração gravitacional do Sol, o plano de órbita da Lua sofre uma precessão no sentido retrógrado, de modo que, com o tempo, a taxa de variação de N é negativa. O período de precessão é de 18,61 anos. Essa é a razão pela qual um mês draconiano (o tempo que a Lua leva para retornar ao mesmo nodo) é mais curto que um mês sideral (o tempo que a Lua leva para completar uma revolução com relação às estrelas). O ciclo é também chamado de regressão dos nodos lunares. A longitude N pode ser obtida pela fórmula (Haigh et al. 2011):

$$N = 259,16^\circ - 1934,14^\circ T + 0,0021^\circ T^2$$

onde T é o número de séculos Julianos que se passaram desde a meia-noite de 1º de janeiro de 1900 no meridiano de Greenwich.

A precessão lunar nodal de 18.61 anos tem um grande efeito na declinação da Lua (seu ângulo ao norte ou ao sul do equador), maximizando a declinação quando $N = 0^\circ$, pois $23^\circ 27' + 5^\circ 9' = 28^\circ 36'$, e minimizando-a quando $N = 180^\circ$, pois $23^\circ 27' - 5^\circ 9' = 18^\circ 18'$, ou seja, fazendo a Lua revolucionar dentro da região tropical (Haigh et al. 2011; Ceverny & Shaffer, 2001). As últimas declinações mínimas ocorreram em março de 1997 e em outubro de 2015 (Haigh et al. 2011). A significância desta variação é que, quando a declinação é máxima, as forças de maré nas altas latitudes são intensificadas (Ceverny & Shaffer, 2001).

Assim, o ciclo nodal lunar determina a amplitude de variações mensais da declinação lunar, variando de $+28,5^\circ$ a $-28,5^\circ$. A declinação da Lua pode afetar o valor da força de maré e então causar flutuações de longo prazo nas marés oceânicas (Wang et al., 2018).

A força gravitacional da Lua sobre a Terra causa uma pequena oscilação periódica do eixo de rotação terrestre, com o mesmo ciclo de 18,6 anos, fenômeno conhecido na Astronomia como nutação, do latim *nutatione* (balanço) (Oliveira et al. 2017).

2.3.2 Precessão apsidal

O termo grego “apsis”, com plural “apsides” é o ponto de extrema distância na órbita de um objeto. Para órbitas elípticas, há duas apsidas, cujos nomes recebem o prefixo peri (mais próximo) e apo (mais distante) aos quais se acrescenta o nome do objeto que está sendo orbitado. Para qualquer satélite da Terra, incluindo a Lua, o ponto de menor distância é chamado de perigeu, e o de maior distância é chamado de apogeu (Wikipedia, 2015).

O ciclo do perigeu lunar é, portanto, determinado pela órbita elíptica da Lua ao redor da Terra. A linha que une perigeu e apogeu (a linha das apsidas, Figura 2.3.1) avança no mesmo sentido da revolução de Terra e Lua em torno do Sol, ou seja, em direção oposta à regressão lunar dos nodos (seção anterior) e completa uma revolução em 8,85 anos. É por essa razão que o mês anomalístico (o período em que a Lua se move do perigeu para o apogeu e para o perigeu novamente) é mais longo que o mês sideral (Haigh et al. 2011; Keeling & Whorf, 1997).

A longitude do perigeu lunar pode ser obtida pela fórmula:

$$p(T) = 334,39^\circ - 4069,04^\circ T + 0,0103^\circ T^2$$

onde T é o número de séculos julianos transcorridos desde a meia-noite de 1º de janeiro de 1900 no meridiano de Greenwich (Haigh et al. 2011).

A linha das apsides e a linha dos nodos atingem alinhamento mútuo duas vezes a cada 5,997 anos (Keeling & Whorf, 1997):

$$P_e = (1/8,8475y + 1/18,6134y)^{-1}$$

A principal influência do Ciclo Lunar de Apsides de 8,85 anos nas marés altas ocorre num ciclo aproximado de 4,4 anos, pois, após este intervalo, o Sol coincide novamente com a linha das apsides. Maiores amplitudes de maré são observadas durante tais anos, particularmente durante o equinócio, quando a declinação do Sol é zero (Haigh et al. 2011).

2.3.3 Marés diurnas e semidiurnas – variações latitudinais e longitudinais – equinócios e solstícios

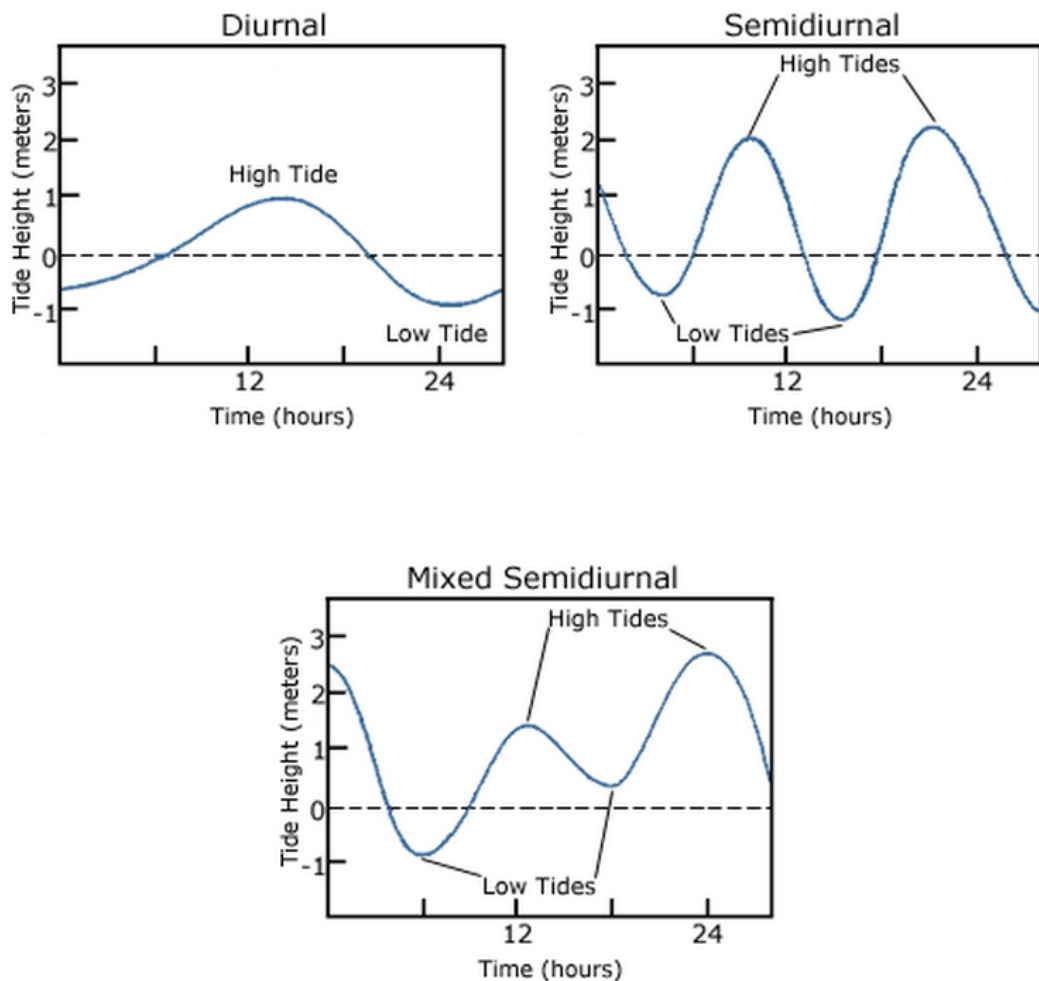
Uma área tem um ciclo de marés diurnas se nela ocorre uma maré alta e uma baixa para cada dia lunar. De modo antagônico, uma área tem um ciclo de marés semidiurnas se apresenta duas altas e duas baixas de tamanho aproximadamente igual a cada dia lunar. Há também os ciclos de marés mistas, quando ocorrem duas altas e duas baixas de diferentes alturas a cada dia lunar (NOAA, 2008). Os três tipos descritos estão ilustrados na Figura 2.3.2.

As modulações do ciclo de marés são desencadeadas por meio de variações no potencial gravitacional de marés em resposta às posições relativas de Terra, Sol e Lua. A influência dessas modulações sobre a frequência e amplitude das marés altas é determinada pela direção de variação relativa desses corpos e a fonte dos altos níveis de água. Em geral os altos níveis podem ser classificados de acordo com a forma dominante de marés, diurnas ou semidiurnas. Ambos os ciclos descritos acima podem influenciar os dois tipos de marés. Entretanto, há uma associação geral da influência das apsides nas áreas com marés semidiurnas e do ciclo nodal com áreas de marés diurnas (Haigh et al. 2011).

Sidorenkov (2016) realça que os pontos máximos das curvas das oscilações de marés e da velocidade de rotação da Terra se repetem, aproximadamente, a cada 4 (quatro) anos, concluindo que a sequência de configurações das posições relativas de Terra, Lua, Sol e os eixos maiores de suas órbitas (linhas das apsides) são quase repetidas com esta periodicidade.

Ainda segundo Sidorenkov (2016), a intensidade das forças de maré é função da declinação da Lua e do Sol e de suas distâncias geocêntricas. A declinação e a distância da Lua exibem um padrão complexo de variações, de modo que a amplitude das oscilações das forças de maré lunissolares muda ao longo do tempo com as periodicidades de 18,61, 8,85, 6, 1 e 0,5 anos, além, claro, dos períodos mais breves e menos relevantes, como mensalmente, semanalmente e diariamente. Todos esses períodos de oscilação das forças de maré afetam as variações na circulação atmosférica.

Figura 2.3.2 – Padrões de ciclos de marés; (a) Ciclo diurno de marés; (b) Ciclo semidiurno de marés; (c) Ciclo misto semidiurno.



2.4 Influências das forçantes solar e lunar sobre o clima terrestre e o NEB

Nesta seção, em conciso compêndio, são elencadas referências literárias que dão testemunho das influências de forçantes externas na variabilidade climática terrestre – especificamente do Sol e da Lua, nas escalas temporais condizentes aos ciclos previamente descritos, a saber, os ciclos solares de Schwabe e de Hale, o ciclo lunar nodal e a precessão lunar das apsides, abrangendo, portanto, via de regra, até a escala bidecadal – finalizando com os sinais percebidos especialmente no regime pluviométrico do NEB.

Davis & Brewer (2011) propõem que as forçantes citadas acima (solares, lunares e orbitais) exercem um controle comum sobre o Gradiente Latitudinal de Insolação da Terra (LIG, na sigla em inglês), que influencia o sistema climático por meio de aquecimento diferencial solar entre os trópicos e os polos, ocasionando um gradiente latitudinal de temperatura (LTG), que rege a circulação atmosférica e a oceânica (o componente que é impulsionado pelos ventos).

Eles analisaram variações no LTG do HN ao longo dos últimos 120 anos e encontraram picos significativos (99%) nas frequências espectrais, correspondendo a 11 anos no inverno e 18,6 anos no verão, consistentes com a forçante LIG. Tais variações, com periodicidades sazonalmente específicas, seriam uma característica-chave do LIG, fornecendo uma clara base para sua atribuição. Os autores comentam que não se pode pensar em nenhuma outra forçante que faça o LTG variar num ciclo de 11 anos no inverno e de 18,6 anos no verão, parecendo improvável, embora difícil de provar inteiramente, que tal combinação específica de periodicidades possa surgir do acaso como resultado de dinâmicas internas do sistema climático, o que faz os autores concluírem que essas periodicidades sazonalmente independentes fornecem uma “impressão digital” da forçante LIG.

Os autores concluem que uma característica favorável à atribuição do LTG é que ele provoca uma influência difusa, mas pervasiva, em quase a totalidade do sistema climático, por meio da circulação atmosférica e oceânica. Os autores ainda fazem a crítica de que tal hipersensibilidade do LTG ao LIG é pobremente reproduzida pelos modelos climáticos.

2.4.1 Respostas climáticas à variabilidade magnética solar

É mister salientar que esse tema já teve uma vasta abordagem introdutória empreendida às seções 2.2.4.2, que tratou das modulações de longo prazo do ciclo de

Schwabe e suas respostas no clima, e 2.2.6, que apresentou os diversos mecanismos físicos de interação da atividade solar com atmosfera e oceanos. Realizar-se-á aqui, portanto, apenas a conclusão do que lá foi iniciado, explorando o alcance final e efetivo dos efeitos solares na variabilidade climática nas escalas decadal a bidecadal.

Como visto anteriormente, a forçante associada ao ciclo solar de 11 anos inclui não somente a TSI, mas também comprimentos de onda mais curtos, como UV, EUV e raios-X, bem como raios cósmicos altamente energéticos. O ciclo solar de Schwabe tem sido identificado em registros de temperatura à superfície, PNM e alturas geopotenciais, nebulosidade, no deslocamento de tempestades e outros centros de ação, e na intensidade do vento zonal, assim como em grandes modos de oscilação da circulação atmosférica, incluindo a OAN, a Oscilação Ártica, o Modo Anular do Norte e o Modo Anular do Sul (Davis & Brewer, 2011).

Com efeito, considerando o papel dos oceanos como reservatórios e distribuidores de calor pelo globo, tem-se, neles, um componente de elevada importância no sistema climático, e a reportada sensibilidade destes à forçante solar advoga com fortes argumentos a relevância de tal influência sobre o clima. Oliveira et al. (2017) comentam que, embora as oscilações climáticas sejam induzidas por dinâmicas oceânicas internas ainda pouco compreendidas, os principais modos de variabilidade climática, como ENOS, ODP e OMA, podem ser induzidos, segundo Scafetta (2010, 2012), por forçamentos periódicos extraterrestres complexos que agem sobre o clima por meio de mecanismos de amplificação e de retroalimentação.

Em harmonia com este entendimento, Huo & Xiao (2017), afirmam que estudos anteriores notaram que os oceanos têm uma capacidade térmica imensa, podendo integrar variações pequenas, de longo prazo, na entrada de calor, e que a resposta histerética ao aquecimento pela forçante solar pode ser amplificada pela forte interação atmosfera-oceano.

Servain (1991) aponta também para a existência de variabilidade temporal associada a frequências decadais associadas ao Gradiente Meridional de TSM no Atlântico Tropical (MMA), porém suas análises indicam apenas qualitativamente a existência de variabilidade decadal, e não associam períodos ou frequências aos resultados, enquanto Tourre et al. (1999) demonstram a existência de variabilidade associada a frequências quase decadais (11,4 anos) (Sasaki, 2014).

Remontando à seção em que se discorreu especificamente sobre o MMA (2.1.5.3), cumpre reiterar que Lyra et al. (2016) atribuíram um período de 10-12 anos a esse peculiar modo do Atlântico, valores cuja média corresponde à periodicidade de Schwabe, enquanto os

experimentos com modelos acoplados realizados por Chang et al. (1997) indicaram que o modo oscila numa escala temporal de 12-13 anos, com processos estocásticos na atmosfera desempenhando um papel importante em excitar em ressonância o modo de dipolo e causar irregularidades em sua variabilidade.

Svensmark et al. (2009) define como uma interpretação radicalmente diferente das respostas meteorológicas aos eventos FD (que, vale lembrar, servem de laboratório para simulação da ciclicidade magnética solar em maiores escalas temporais) aquela que invoca os efeitos da densidade de corrente descendente da ionosfera, Jz, que é parte do circuito elétrico atmosférico global.

Embora as medições de Jz e do potencial elétrico sejam altamente dependentes das condições regionais e meteorológicas, foi sugerido por Tinsley et al. (2007), com base em modelagem, que há uma variação zonal sistemática na Jz posteriormente a episódios de FD, e que essas variações podem influenciar a microfísica das nuvens. Esses processos poderiam, então, influenciar concentrações de aerossóis vários dias depois (Zhou et al. 2016; Svensmark et al. 2009).

Análises de observações têm demonstrado correlações do índice da OAN e da temperatura de superfície com a precipitação energética de elétrons (EEP, na sigla em inglês) (de 30-100 keV e 100-300 keV), que são significativamente mais intensas durante a fase de leste da Oscilação Quasi-Bienal (OQB) que na fase de oeste (Zhou et al. 2016).

Zhou et al. (2016) estudaram os efeitos da velocidade do vento solar (SWS, na sigla em inglês) sobre as TSM na Terra, computando o coeficiente de correlação entre as duas variáveis com uma resolução de $1^\circ \times 1^\circ$. A correlação mais significativa para o HN é durante seu inverno, DJF, com uma alta correlação negativa ($R = -0,52$, ao nível de confiança de 99%) em baixas latitudes do Atlântico Norte, de 5° N a 20° N , e uma outra ao sul da Groenlândia ($R = -0,48$, ao nível de confiança de 99%), próximo a 58° N , 38° W , o que faz os autores comentarem que o padrão no Atlântico Norte é similar ao padrão espacial da OAN.

2.4.2 Respostas climáticas a ciclicidades orbitais lunares e mecanismos

Como indica o título da subseção, diferentemente do tratamento dispensado à forçante solar – segundo o qual os mecanismos e as respostas climáticas inerentes a essa forçante foram discutidos separadamente – aqueles relativos à forçante gravitacional lunar serão aqui abordados conjuntamente.

O ciclo nodal lunar exerce modulações de longo prazo nas marés oceânicas diurnas e semidiurnas, que eventualmente podem afetar o clima indiretamente (Ray, 2007; Agosta, 2013) por variações na TSM decorrentes de alterações de baixa frequência na mistura vertical promovida por marés (Maksimov & Smirnov, 1965).

As oscilações na órbita da Lua ao redor da Terra modulam a dissipação das marés regionalmente, com uma periodicidade de 18,6 anos. Nas regiões onde as marés diurnas dominam a mistura diapícnica, o Ciclo Nodal Lunar pode ser significativo o bastante para influenciar a circulação oceânica, a temperatura de superfície do mar (TSM) e a variabilidade climática (Ullman et al., 2016).

Wang et al. (2018) afirmam que marés fortes podem trazer águas profundas e frias à superfície, e levar a um resfriamento global. De outro modo, marés fracas podem resultar em aquecimento global. Correlações positivas significativas sugerem que a gravidade lunar tem uma influência nas variações de temperatura na região de Weichang, China.

Haigh et al. (2011), usando um modelo global de marés para aferir a influência dos ciclos lunares, concluem que a modulação nodal é maior (entre 0.5 e 0.8 m) em regiões de marés diurnas de amplitude maior que 4 m, enquanto a modulação de 4,4 anos é maior (entre 0.3 e 0.6 m) em regiões semidiurnas, onde a amplitude de marés é maior que 6 m. Também constataram que a modulação nodal domina sobre a de apsides nos máximos de declinação lunar (28,4°), enquanto a de apsides domina quando dos mínimos de declinação lunar (18,2°). A última declinação máxima ocorreu em 2006 e se repetirá em 2024. As últimas declinações mínimas ocorreram em 1997 e em 2015. Resultados de seu estudo estão ilustrados nas Figuras 2.4.1 e 2.4.2.

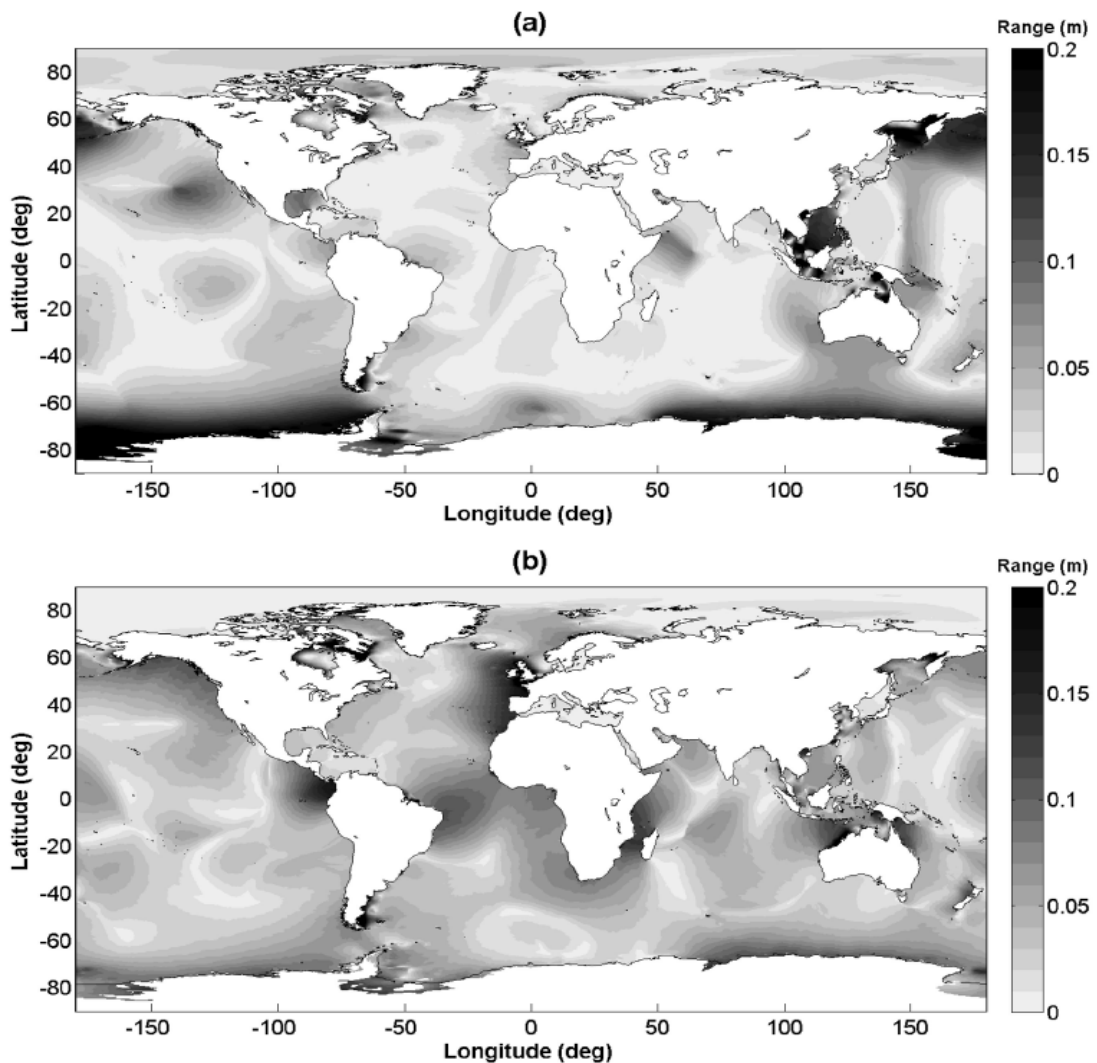
Yasuda et al. (2006) centraram seu estudo no Pacífico Norte e apuraram que o ciclo de marés de 18,6 anos ocorre em oceanos de médias e altas latitudes, e possivelmente influencia as circulações oceânicas de grande escala e a variabilidade climática. Analisando especificamente uma corrente no oeste do Pacífico, que segue no sentido do polo norte, eles concluem que esta é intensificada pelo ciclo nodal e ponderam que a mudança de transporte de calor para o polo associada ao ciclo de 18,6 anos pode estar relacionada com a variabilidade climática bi-decadal.

O meio ciclo da precessão lunar das apsides (4,4 anos) também tem se mostrado sobremaneira influente. Zebiak (1993) aponta periodicidades similares para o fenômeno El Niño e para o Niño do Atlântico (MZA), que seriam ambas de 4 anos. Molion (2017) lembra que, de fato, o processo geofísico inerente à ENOS se repete, como numa imensa “gangorra

oceânico-atmosférica”, numa oscilação leste-oeste de 4 a 5 anos.

Tourre et al. (1999) encontrou precisamente o período de 4,4 anos para a variabilidade de TSM da bacia do Atlântico Norte, e Sasaki (2014), um período de 5 anos para o Atlântico Sul tropical.

Figura 2.4.1 – (a) Amplitude da modulação de 18,61 anos nos níveis de maré. (b) Amplitude da modulação de 4,4 anos nos níveis de maré.

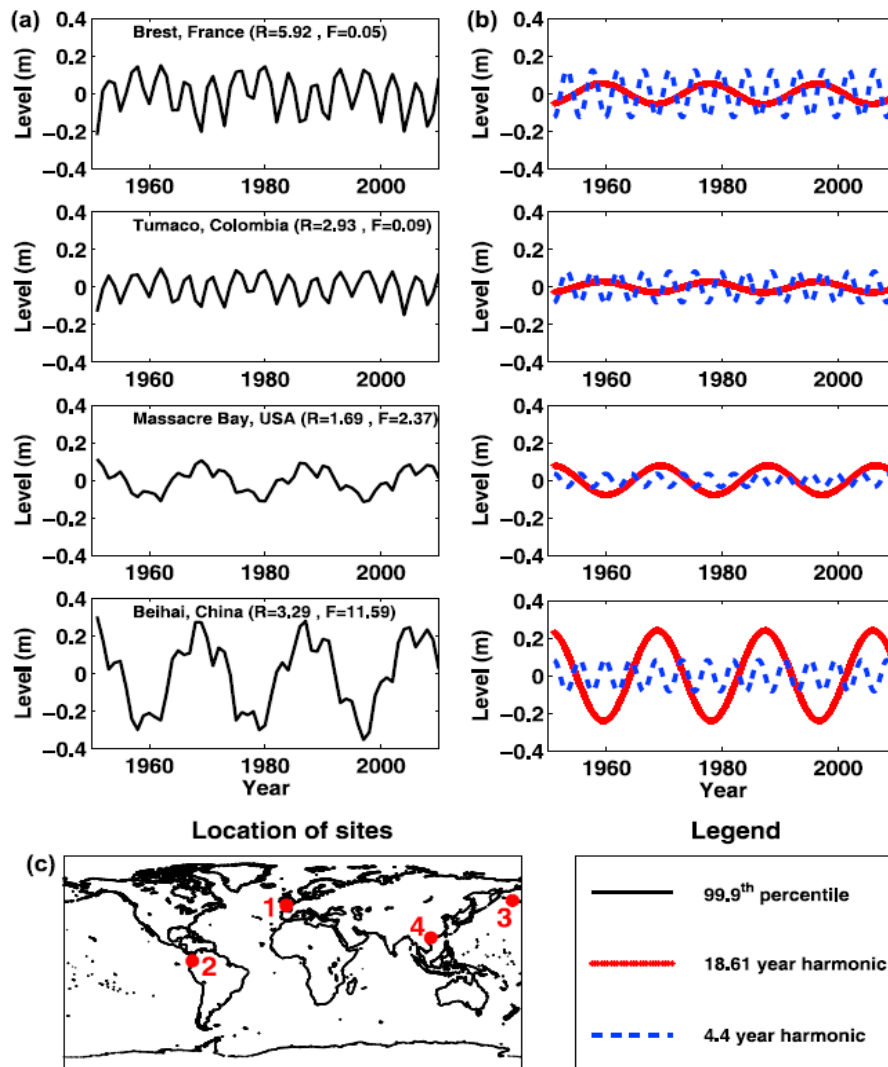


Fonte: Haigh et al. 2011.

O mecanismo proposto para a conexão entre o clima e as marés é relativamente simples: especialmente no verão, quando as colunas de água estão sendo aquecidas e estratificadas por insolação, correntes de maré controlam a mistura vertical oceânica, que pode afetar as TSM e, por conseguinte, outras variáveis climáticas, como a PNM. O mecanismo é mais efetivo sobre características topográficas proeminentes, como no entorno

de ilhas e plataformas continentais, bem como onde fortes gradientes horizontais de TSM se fazem presentes. Em períodos de marés intensas, a mistura diapícnica torna a salinidade e a densidade da superfície mais altas, e a corrente superior mais rasa. Destarte, o ajuste de profundidade na costa por onda baroclínica de Kelvin intensifica a circulação termoalina e o transporte de calor para o polo (Agosta, 2013).

Figura 2.4.2 – (a) O 99,9 percentil anual. (b) Os sinais harmônicos de 18,61 e 4,4 anos calculados pelas séries temporais dos percentis de 99,9 para variações no nível do mar em quatro regiões ao redor do mundo. (c) As localizações das quatro regiões.



Fonte: Haigh et al. 2011.

Em harmonia com esse entendimento, Rogachev e Shlyk (2018) argumentam que a mistura diapícnica relacionada às marés é um dos fatores relevantes a manter a circulação

oceânica e o clima e é modulada pelo ciclo orbital lunar de 18,6 anos. Além das anomalias de salinidade, anomalias de TSM com essa mesma periodicidade são observadas na região estudada por eles, a de Kuroshio, no extremo oriente russo. A fase positiva da anomalia de TSM aparece no período de forte mistura promovida por marés.

Para Davis & Brewer (2011), a forçante associada ao ciclo lunar de 18,6 anos inclui a mistura oceânica por marés e a advecção meridional, somada a outros fatores de ciclos bidecadais, como o ciclo heliomagnético de Hale (22 anos) e o ciclo de Júpiter-Saturno (19,9 anos). O sinal de 18,6 anos, ou um bidecadal, tem sido encontrado em registros de temperatura à superfície, pressão atmosférica e TSM, além de ter sido associado a secas na América do Norte e à variabilidade da ENOS.

2.4.2.1 Impactos na ODP

Wang et al. (2018) notam que o ciclo de 15,5 a 18,28 anos tem período muito próximo ao da ODP (aproximadamente 20 a 30 anos). A fase fria da ODP está associada a uma TSM abaixo do normal no leste e norte do Pacífico, acompanhada de uma forte Alta Subtropical no Pacífico Oeste e vice-versa na fase quente, devendo-se notar que a intensidade da Alta Subtropical é determinada pela sobreposição dos efeitos de ENOS e ODP; isso significa que a fase fria da ODP pode contribuir para um aumento da temperatura no norte da China, assim como a fase fria da ENOS.

De acordo com definição de Mantua et al. (1997) a ODP é uma oscilação das temperaturas da superfície do Pacífico semelhante à El Niño-Oscilação Sul, com duas fases, quente e fria, porém de longa duração, entre 25 e 30 anos em cada fase, totalizando um ciclo de 50 a 60 anos. É curioso o fato de que este período é aproximadamente o triplo daquele do Ciclo Nodal Lunar, pois $18,61 \times 3 = 55,8$ anos. De fato, Ullman et al. (2016) chegam a afirmar que a periodicidade do Ciclo Nodal, atuando como uma forçante externa, pode fornecer a fonte mecânica para a variabilidade decadal do Pacífico (Oscilação Decadal do Pacífico – ODP) nessas regiões.

Yasuda (2009) sustenta que os padrões de TSM, vento e pressão ao nível do mar (PNM) correspondentes à ODP sugerem que as TSM no leste do Pacífico Equatorial e ao longo do arco oriental do Pacífico tendem a se aquecer (resfriar), as TSM nas regiões centro-oeste Pacífico Norte a médias latitudes tendem a se resfriar (aquecer) e a Baixa das Aleutas a se intensificar (enfraquecer) no período fraco (forte) da maré diurna do ciclo nodal de 18,6

anos. Seu estudo efetivamente demonstrou a presença do ciclo nodal na ODP, com os seguintes efeitos: ODP negativa (positiva) tende a ocorrer no período de maré diurna forte (fraca); nos períodos de 3 e 5 anos (10, 11 e 13 anos) após a maré máxima diurna, a ODP média adquire valor significativamente negativo (positivo).

2.4.2.2 Impactos na ENOS

Ceverny & Shaffer (2001) sugerem que os ciclos climáticos em consonância com a periodicidade nodal lunar de 18,61 anos são criados por uma relação entre este ciclo e o fenômeno El Niño-Oscilação Sul (ENOS), pois tanto a TSM do Pacífico Equatorial quanto a pressão atmosférica no Pacífico Sul significativamente se relacionam com a máxima declinação lunar. Baixas declinações lunares estão associadas a TSM mais quentes no Pacífico Equatorial e a valores negativos da Oscilação Sul. Uma variação na circulação do Pacífico, influenciada pela Lua, apresenta um mecanismo físico para explicar essas relações. Eles propõem que a circulação é intensificada por forças de maré durante as máximas declinações lunares, induzindo advecção de águas frias na região equatorial, mas é restrita por fracas forças de maré quando de baixas declinações lunares, favorecendo, portanto, episódios de El Niño. Os autores argumentam ainda que muitos pesquisadores têm demonstrado que TSM regionais, particularmente no Pacífico Equatorial, têm associações climáticas intensas, por teleconexão, com grandes regiões do mundo. Se a declinação lunar influencia a ENOS, as teleconexões entre esta e o resto do mundo poderiam sugerir que vários climas regionais apresentam ciclos de declinação lunar.

McKinnell & Crawford (2007) notaram que existe uma forte relação entre períodos de baixa declinação lunar com ocorrência de alguns fortes eventos de El Niño em 1940/41, 1957/58 e 1997/98. Em 2007, os autores já alertavam que a ocorrência de um El Niño intenso em 2015 despertaria a atenção para esta, até então, “coincidência”, e, de fato, o ano de 2015 apresentaria um dos maiores eventos de El Niño já registrados. (Oliveira et al. 2017).

Molion (2017) adere à tese de que, se há uma força externa, uma possível candidata seria a força gravitacional lunar, sabidamente atuante sobre as marés, responsabilizando, especificamente, o Ciclo Nodal, pois, devido a este, em um intervalo de aproximadamente 10 anos, o plano da órbita lunar se situa fora dos trópicos, ou seja, sua declinação é maior que $23,5^\circ$ (latitude dos Trópicos do Câncer e Capricórnio). Nessas circunstâncias (declinação entre $23,5^\circ$ e $28,6^\circ$ de latitude), o componente da força gravitacional lunar é maior na direção

equador-polo e acelera as correntes marinhas, particularmente a do Golfo (América do Norte) e a de Kuroshio (Japão), transportando mais calor da região tropical para as latitudes mais elevadas. Isso faz com que as águas do Pacífico Norte e do Atlântico Norte fiquem mais aquecidas que o normal e torne o clima dos países banhados por elas, como a costa oriental da Ásia, América do Norte, Europa Ocidental, Inglaterra e Escandinávia, mais ameno e úmido.

Na outra fase do Ciclo Nodal, o plano da órbita lunar se situa dentro da região tropical (declinação entre 18,4° e 23,5°) durante cerca de 9 anos, e o componente de sua força gravitacional é maior na direção Leste-Oeste. A exportação de calor para fora dos trópicos é reduzida, mais calor é retido e redistribuído zonalmente dentro dos trópicos. Ao invés da oscilação natural, a força gravitacional da Lua, aliada aos Alísios, seriam responsáveis por empurrar e empilhar, inicialmente, as águas no Pacífico Ocidental, criando as condições oceânicas propícias (“gatilho”) que antecedem um evento El Niño forte.

Na Tabela 3, mostra-se o que o autor julga por “estranha coincidência”, isto é, o fato de eventos El Niño intensos, como os de 1941/42, 1957/58, 1977/79, 1997/98 e 2015/16, terem ocorrido quando a declinação do plano da órbita lunar se situou dentro dos trópicos, ou seja, entre o Ponto Médio #2 e o Ponto Médio #1, passando pelo mínimo lunar. Note-se que os eventos são espaçados de 19 anos. Se isso não for coincidência, é possível prever a ocorrência de futuros eventos El Niño fortes.

Tabela 3 – Efemérides do Ciclo Nodal Lunar desde 1885.

MINIMO	PONTO MÉDIO#1	MÁXIMO	PONTO MÉDIO#2
18,4°	23,5°	28,6°	23,5°
dd/mm/aa	dd/mm/aa	dd/mm/aa	dd/mm/aa
16/09/1885	16/10/1889	22/09/1894	25/09/1899
24/03/1904	05/05/1908	28/03/1913	15/04/1918
27/09/1922	12/02/1927	15/03/1932	23/01/1937
20/03/1941	16/09/1945	19/09/1950	26/08/1955
24/09/1959	04/04/1964	25/03/1969	15/03/1974
24/09/1978	05/11/1982	29/09/1987	01/10/1992
16/03/1997	01/08/2001	22/03/2006	06/05/2011
21/09/2015	05/03/2020	22/03/2025	12/02/2030
26/03/2034	05/10/2038	25/09/2043	01/09/2048
13/03/2053	24/04/2057	18/03/2062	21/03/2067
17/09/2071	26/11/2075	21/09/2080	22/10/2085

Fonte: Molion (2017).

2.4.3 Periodicidades do regime pluviométrico do NEB e forçantes externas

A discussão acima, nas duas subseções precedentes, já contemplou as influências das forçantes solar e lunar no clima, por meio de estudos que apresentaram periodicidades de correspondência plausível e efetuaram as devidas explanações acerca dos mecanismos inerentes. Tais efeitos foram observados, em última análise, especialmente, nas variáveis climatológicas de precipitação e temperatura do ar à superfície, além de TSM; e seus mecanismos, com frequência, incluíam a modulação destas por meio de modos oceânicos de oscilação, com a maioria destes sendo responsáveis por modular o regime pluviométrico do NEB, quer diretamente, quer por meio de teleconexões com anomalias em regiões mais longínquas do globo.

Para além disso, uma profusão de estudos tem investigado, por variadas ferramentas estatísticas, periodicidades que se fazem impor especificamente sobre a pluviometria do NEB em diferentes escalas temporais – especialmente das interanuais às multidecadais – e seus achados têm apontado para papéis preponderantes de forçantes extraterrestres, especialmente a solar, como se atesta desde, pelo menos, o trabalho de Sampaio Ferraz (1950). Outros exemplos ocorrem em: Kousky & Chu (1978), Zhou & Lau (2001), Barbosa et al. (2006), Moura & Shukla (1981), Molion & Bernardo (2002), Lyra et al. (2016) e Da Silva (2017)

Destes, Moura & Shukla (1981) fazem menção ao estudo de Sampaio Ferraz, publicado em 1950, e lembram que a relação entre a frequência dos mínimos de manchas solares e as secas tem sido reportada em estudos que remontam ao século XIX, como no de Derby, em 1885.

Da Silva (2017), por sua vez, empreendeu estudo com o objetivo de identificar ciclos de extremos pluviométricos e suas causas por meio de análise de séries de dados pluviométricos de 1961-2014 das cidades capitais do ENEB, empregando a ondaleta Morlet. A autora pontua que todas as capitais apresentaram a escala de 20,2-22 anos (ou ao menos a de 22 anos), mas a escala dominante encontrada foi a de 11 anos, mostrando relação direta, na opinião da autora, entre a precipitação local e o Dipolo do Atlântico, bem como com o ciclo de manchas solares (Ciclo de Schwabe).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Dados utilizados

Cinco cidades da região Nordeste foram especialmente escolhidas para esta pesquisa: São Luís/MA (NNEB), Natal/RN (transição entre NNEB e ENEB), Maceió/AL (ENEB), Petrolina/PE (SANEB) e Barreiras/BA (sudoeste do NEB). Os dados pluviométricos destes municípios foram obtidos do INMET, a partir de 1961 a 2018, que incorporou a seu banco de dados as séries temporais coletadas para essas mesmas localidades para o período anterior a 1961 pelo DNOCS/SUDENE, e, para auxiliar no preenchimento de falhas, foram selecionadas as séries temporais dos quatro pontos de grade mais próximos de cada município disponibilizadas pela Universidade de Delaware (UDEL), nos Estados Unidos (NOAA.ESRL, 2018). A UDEL mantém um banco de dados mensais de precipitação e temperaturas médias atualizado, de 1900 a 2017.

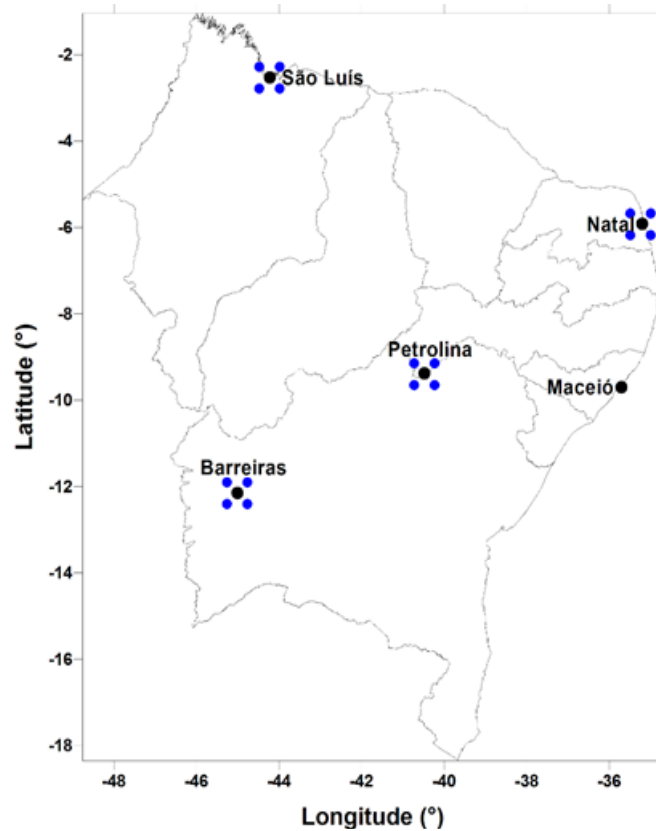
Sobre as séries temporais de precipitação da UDEL, a geração de tais dados gradeados contempla toda a superfície continental da Terra, e são obtidos de diversas fontes (Costa, 2012). A resolução espacial das séries é de $0,5^\circ \times 0,5^\circ$, onde os nós da grade são centrados em $0,25^\circ$, permitindo obter para o Brasil 2867 séries de precipitação. As principais fontes de dados desta análise gradeada vêm do *Global Historical Climatology Network* (GHCN2), do Serviço Atmosférico e Ambiental do Canadá; do Instituto Hidrometeorológico de São Petersburgo, Rússia; dados GC-Net (Steffen et al., 1996); registros de estações meteorológicas automáticas do Projeto Groenlândia, do *National Center of Atmospheric Research* (NCAR), dados diários da Índia; dados de precipitação do continente Africano (Nicholson, 2002); dados mensais de precipitação do continente sul-americano (Webber e Willmott's, 1998); e do *Global Surface Summary of Day* (GSOD).

Inicialmente, para cada localidade, foram confrontados os respectivos dados originais com os dados dos pontos de grade, a fim de estabelecer, via Regressão Linear Múltipla (RLM), equações que pudessem ser utilizadas para o preenchimento de falhas dos dados originais a partir das séries temporais completas dos pontos de grade. As equações obtidas permitiram a imputação confiável de dados, preservando os dados originais existentes.

Esse procedimento foi aplicado a quatro das cinco localidades: São Luís/MA, Natal/RN, Petrolina/PE e Barreiras/BA, com todas as séries temporais de precipitação se

iniciando em janeiro de 1900, até dezembro de 2018, perfazendo 119 anos de dados. A única exceção foi Maceió/AL, da qual se utilizou a série temporal da precipitação mensal coletada em uma usina de cana-de-açúcar instalada na região (Usina Utinga Leão), a partir de 1911 até 2018, perfazendo 108 anos de dados. A Tabela 4 exibe os metadados das estações utilizadas.

Figura 3.1 – Distribuição geográfica das estações meteorológicas convencionais do INMET no NEB cujos dados foram usados neste estudo (círculo negro), e respectivos pontos de grade (círculos azuis).



Fonte: Autor.

Tabela 4 – Metadados das estações utilizadas.

Estação	UF	Latitude (°)	Longitude (°)	Altitude (m)
São Luís	MA	-2,53	-44,22	3,7
Natal	RN	-5,80	-35,22	30
Maceió	AL	-9,53	-35,85	118
Petrolina	PE	-9,40	-40,50	376
Barreiras	BA	-12,15	-45,00	454

Fonte: Autor.

3.2. Metodologia: Convergência e Divergência de Médias Móveis

A Convergência e Divergência de Médias Móveis (MACD, na sigla em inglês) foi desenvolvida por Gerald Appel ao fim dos anos 1970. O oscilador MACD é um dos mais simples e mais efetivos indicadores de tendência disponíveis. A MACD transforma dois indicadores, médias móveis, em um oscilador de *momentum* ao subtrair a média móvel de período mais longo de uma de período mais curto; Como resultado, a MACD oferece o melhor de dois mundos: acompanhamento de tendência e *momentum* (Stockcharts.com; Benlahouar e Bougataya, 2018).

É uma ferramenta de análise técnica que pode ser usada para determinar tendências futuras no mercado de ações ao usar atividade real do mercado para estabelecer padrões de intensidade e debilidade (Appel, 2003).

3.2.1 Indicadores técnicos

Os indicadores técnicos são usados para interpretar tendências no mercado de ações e facilitar decisões de investimentos. Consistem em uma série de pontos de dados derivados ao se aplicar uma fórmula a uma série de dados de preços. Tais dados incluem qualquer composição de valores de abertura, alta, baixa ou fechamento ao longo de um determinado período. Alguns indicadores requerem somente os preços de fechamento (preço final do dia), outros incluem volume, ou qualquer outro tipo de informação nas suas fórmulas. Cada ponto da série de dados é produzido usando a informação selecionada.

Oferecem uma perspectiva diferente para se analisar a evolução do preço das ações. Tenta capturar o comportamento e, por vezes, a psicologia do investidor. Alguns indicadores, como as médias móveis, são derivados de fórmulas simples e seus mecanismos não são difíceis de entender. Outros, como os estocásticos, contêm fórmulas mais complexas e demandam um estudo mais profundo para se obter um bom entendimento deles (Fernández-Blanco et al. 2008).

Um indicador analisa a atividade de preços e tenta enxergar os padrões subjacentes ao eliminar os ruídos de mercado. Também verifica quando há uma quebra súbita no padrão e um novo padrão se forma. Essas mudanças geram sinais de mercado. Os mesmos padrões também ajudam a compreender possíveis bases e resistências, bem como situações de tendência (ForexAbode.com, 2018).

3.2.2 Médias móveis

Uma média móvel é meramente uma média, com a particularidade de movimentar-se. É, portanto, calculada para um certo período no passado, para cada ponto dele. Assim, uma média móvel de 10 dias, no dia 1, é calculada ao somar-se os preços dos 10 dias anteriores e dividi-los por 10. No dia 2, novamente se calcula pela soma dos 10 últimos preços, de modo que o cálculo se repete, eliminando-se um dia e adicionando-se o preço do último. Tenta, portanto, identificar a tendência envolvida ao suavizar as flutuações de período a período no preço. Um período pode ser uma hora, um dia, uma semana etc. (ForexAbode.com, 2018).

3.2.3 Médias móveis exponenciais

As Médias Móveis Exponenciais (EMA, sigla em inglês) visam reagir mais rápido e precisamente às variações de tendências. Fazem-no ao refinar o método de cálculo de modo a dar um peso bem maior aos preços mais recentes, e tal peso decresce exponencialmente à medida que se volta no tempo ao começo da série. O preço mais recente tem uma importância muito mais alta do que aqueles que o antecedem (ForexAbode.com, 2018).

Uma EMA pode ser calculada de acordo com a expressão:

$$EMA_t = \frac{2}{n} \times P_t + \left(1 - \frac{2}{n}\right) EMA_{t-1}$$

em que EMA_t é a média exponencial móvel para o instante t , n é a amplitude do período, e P_t é o preço de fechamento do dia. A EMA inicial ($t-1$) é a média móvel simples para o período n (anterior) da série (Chong, 2008).

3.2.4 Cálculo da MACD

A MACD é usada para encontrar pontos de inflexão no mercado, que indicam sinais de compra e venda. A MACD é originalmente calculada como segue: primeiro, calcula-se uma EMA de 12 dias do preço da *commodity*, chamada de EMA rápida; depois, calcula-se uma EMA de 26 dias da mesma série de preços, denominada de EMA lenta. A linha da

MACD é criada pela subtração da EMA lenta da EMA rápida. Então uma EMA de 9 dias da própria MACD é calculada, dando origem à Linha de Sinal (Wiles e Encke, 2015).

O cerne da MACD é a diferença entre essas duas médias móveis: uma mais rápida, (que reflete tendências de mercado de curto prazo) menos uma mais lenta (que reflete tendências de longo prazo) (Appel, 2003). O idealizador da MACD, Gerald Appel, também sugere o par 19-39.

A linha, ou curva, da MACD é obtida ao subtrair-se a EMA mais lenta (e.g. 26) da mais rápida (e.g. 12), isto é (Fernández-Blanco et al. 2008):

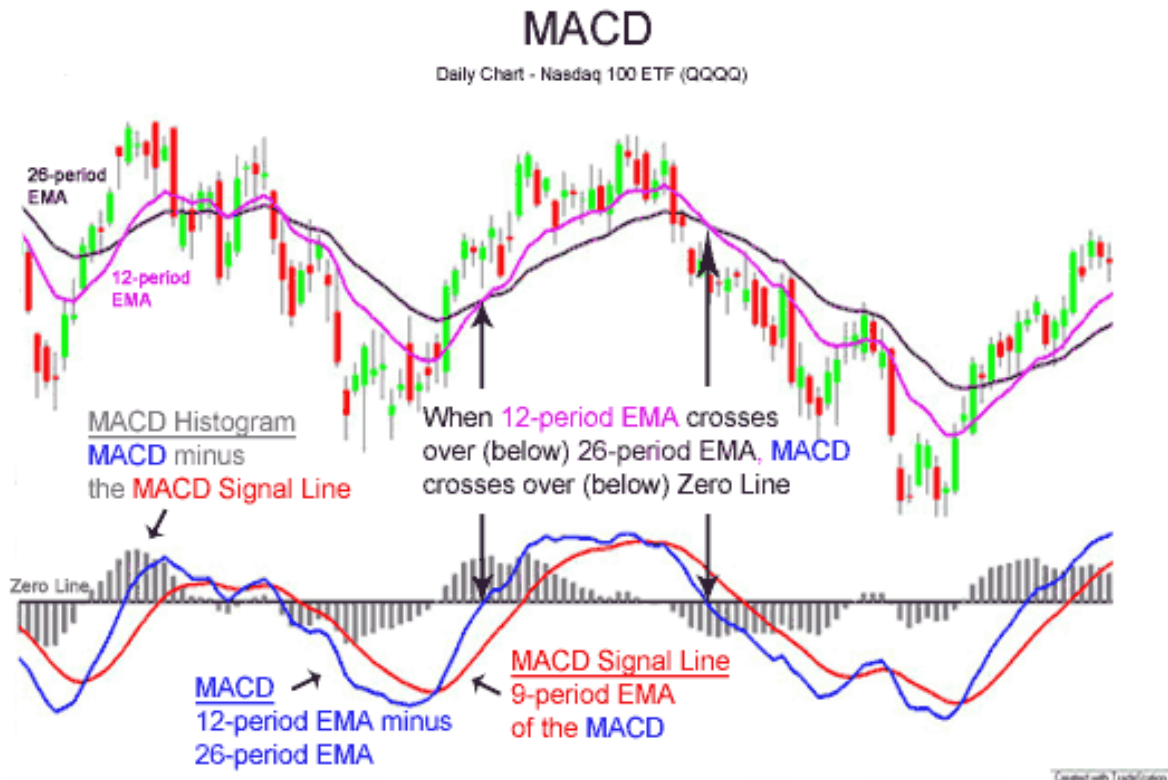
$$\text{MACD} = \text{EMA}(12) - \text{EMA}(26)$$

Os preços de encerramento do dia são geralmente usados para essas EMA. A terceira EMA, normalmente de 9 períodos, como mencionado, é plotada, de modo a agir como Linha de Sinal (ou de “gatilho”) e identificar reviravoltas. Essa é uma EMA da própria MACD, não mais da variável original (preços das ações). Esses três parâmetros definem o indicador MACD. No entanto, é frequente também o uso de um quarto, o Histograma da MACD, que representa a diferença entre a MACD e sua EMA de 9 períodos. O Histograma é positivo quando a linha da MACD está acima da Linha de Sinal e negativo quando o inverso ocorre (Stockcharts.com, 2018; ForexAbode.com, 2018). Destarte, podem-se resumir os parâmetros encontrados na MACD usual pela seguinte relação:

- EMA de 26 períodos
- EMA de 12 períodos
- Linha (ou Curva) da MACD: EMA de 12 menos EMA de 26
- Linha de Sinal (ou de Gatilho): EMA de 9 períodos da MACD
- Histograma da MACD: Linha da MACD menos a Linha de Sinal

A MACD flutua acima ou abaixo da Linha Zero, à medida que as EMA convergem, se cruzam ou divergem. Investidores podem procurar por Crossovers de Centro, Crossovers da Linha de Sinal e divergências para gerar os sinais (Stockcharts.com, 2018). Tais características são explanadas na seção a seguir e algumas delas estão ilustradas na Figura 3.2.

Figura 3.2 – Parâmetros característicos da MACD.



Fonte: Wikimedia Commons.

3.2.5 Padrões e interpretações de sinais

Duas das mais importantes características da MACD são sua posição acima ou abaixo da Linha Zero e o sinal da derivada da curva, isto é, se ela está subindo ou descendo. Via de regra, o clima do mercado é mais desfavorável quando a MACD está caindo e abaixo de zero, significando que as tendências de mercado de curto prazo estão mais fracas que as de longo prazo (Appel, 2003).

Com respeito aos termos que dão nome à MACD, diz-se que há uma Convergência quando as EMA se movem uma em direção à outra. Divergência ocorre quando as EMA se distanciam uma da outra. A EMA mais curta (12 períodos) é mais rápida e responsável pela maior parte dos movimentos da MACD. A EMA mais longa (26 períodos) é mais lenta e menos reativa às variações de preços (Stockcharts.com, 2018).

3.2.5.1 Crossovers da Linha Central

Como já explanado, a Linha da MACD oscila acima ou abaixo da Linha Zero, também

conhecida como Linha Central. Esse tipo de Crossover indica que a EMA 12 cruzou a EMA 26. O sentido que a MACD adquire, claro, depende do sentido do cruzamento entre as EMA. Uma MACD positiva (acima da Linha Central) indica que a EMA 12 está acima da EMA 26. O valor fica cada vez mais positivo à medida que a EMA mais rápida diverge da EMA mais lenta. Isso significa que o *momentum* de subida está se intensificando. De modo antagônico, valores negativos de MACD (abaixo da Linha Central) indicam que a EMA 12 está abaixo da EMA 26 e aumentam em valores absolutos à medida que a primeira diverge para baixo da segunda, indicando que o *momentum* de queda está se intensificando.

Ainda no que se refere aos Crossovers de Centro, dá-se o nome de crossover do tipo *bullish* (tendência de alta, ou altista) quando a Linha da MACD se move para cima da Linha Zero, adquirindo sinal positivo. O movimento contrário, i.e., quando a MACD cruza a Linha Zero no sentido negativo, recebe o nome de crossover *bearish* (tendência de baixa, ou baixista).

Crossovers desse tipo podem durar alguns dias ou alguns meses no mercado de ações. Tudo depende da intensidade da tendência. A MACD permanece positiva enquanto houver base para a tendência de alta, ou subida, e permanece negativa enquanto for sustentável a tendência de baixa, ou queda (Stockcharts.com, 2018).

Fernández-Blanco et al. (2008) resumem que o cruzar da linha da MACD do lado negativo para o positivo é um sinal de compra (*bullish*), enquanto o crossover do tipo *bearish* é um indicativo de venda.

3.2.5.2 Crossovers da Linha de Sinal

Crossovers da Linha de Sinal constituem o tipo mais comum de sinal do indicador/oscilador MACD. Como visto, a Linha de Sinal é uma EMA de 9 períodos da curva MACD. Sendo uma EMA do indicador, ela rastreia a MACD e torna mais fácil perceber suas reviravoltas. Um crossover *bullish* ocorre quando a MACD cruza para cima da Linha de Sinal. Um crossover *bearish* ocorre quando a MACD cruza para baixo da Linha de Sinal. Os crossovers deste tipo podem durar alguns dias ou algumas semanas, a depender da intensidade do movimento (Stockcharts.com, 2018).

Em consonância com o disposto acima, Fernández-Blanco et al. (2008) asseveram que os principais sinais de compra e venda acontecem quando a curva da MACD intersecta sua própria EMA (a de 9 períodos). Os sinais de compra são gerados quando a linha da MACD

cruza a Linha de Sinal de modo ascendente; enquanto a primeira permanecer acima da segunda, deve-se adotar uma posição de compra. De modo contrário, um sinal de venda ocorre quando a linha da MACD intersecta a Linha de Sinal no sentido descendente; enquanto permanecer abaixo, a posição de venda deve ser mantida.

3.2.5.3 Divergências

Divergências se formam quando a MACD diverge do comportamento dos preços. Uma divergência *bullish* se dá quando uma ação denota uma baixa inferior e a MACD exibe uma baixa superior. A baixa inferior afirma a tendência atual de queda, mas a baixa superior na MACD indica um *momentum* de queda menos intenso. Uma divergência *bearish* ocorre quando uma ação registra altas superiores e a MACD indica altas inferiores. Uma alta superior no preço de uma ação é normal para uma tendência crescente, mas a baixa inferior da MACD denota menos *momentum* de subida (Stockcharts.com, 2018). Segundo Investopedia.com, tais divergências simplesmente sinalizam o fim da tendência que se fazia presente.

Novamente, em harmonia com o exposto acima, Fernández-Blanco et al. (2008) afirmam que “a divergência também pode ser usada como um indicador. Quando o preço da ação está subindo e a MACD está caindo (divergência negativa), ou vice-versa, pode-se considerar tal observação como um sinal, sendo possível o seu uso para previsão de mudanças dentro de uma tendência, isto é, uma previsão de comportamento do mercado e não diretamente do preço” (ou outra variável).

3.2.5.4 Subidas intensas

De acordo com Investopedia.com, subidas dramáticas da MACD – isto é, quando a EMA rápida se distancia sobremaneira da EMA lenta – caracterizam um sinal de sobrecompra (*overbuying*) da ação, e que logo ela voltará a seu preço normal.

3.2.5.5 Histograma

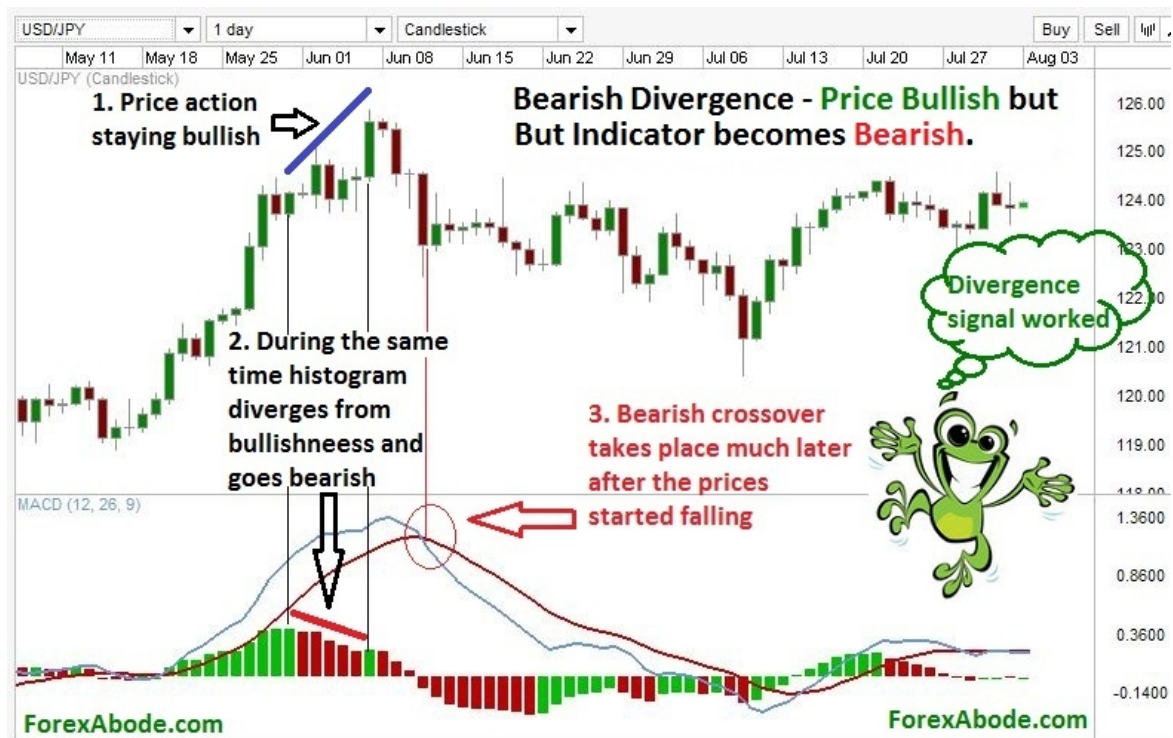
Embora esta seção remonte a conceitos abordados nas duas precedentes, mostra-se aqui individualizada a funcionalidade do Histograma, para fins didáticos. O Histograma da

MACD foi desenvolvido em 1986 por Thomas Aspray, com vistas a antecipar os sinais dos Crossovers da Linha de Sinal.

Como já explanado, o Histograma da MACD representa a diferença entre a MACD e sua Linha de Sinal, e é plotado na forma de barras. Nota-se que, após um crossover, quando o espaço entre a MACD e o Sinal se expande, obtêm-se barras mais longas, que passam a se encurtar conforme as lacunas se reduzem, isto é, quando passa a ocorrer uma convergência. As barras do Histograma tendem a mostrar divergências positivas (*bullish*) ou negativas (*bearish*) muito antes do Crossover de Sinal, indicando, assim, antecipadamente a possibilidade de uma reversão nos preços (ForexAbode.com, 2018).

Como exemplo, é analisado um caso de divergência *bearish*, que, como já discorrido anteriormente, nada mais é do que uma situação em que o preço da ação continua a apresentar tendência de aumento (*bullish*) enquanto o Histograma da MACD já exibe sinais de comportamento *bearish*. Na Figura 3.3, observa-se que o Histograma começa a decrescer (barras vermelhas) quando o preço ainda está a subir, bem antes de começar a diminuir. O sinal do Histograma também antecede bastante o Crossover de Sinal, que só acontece após o preço já ter começado sua trajetória de queda.

Figura 3.3 – A Divergência *Bearish* e a eficácia do Histograma em relação ao Crossover de Sinal.



Fonte: ForexAbode.com, 2018.

Nesse caso, portanto, o lucro com a venda das ações teria sido maior se o investidor tivesse optado por seguir o indicativo do Histograma ao invés do Crossover de Sinal (ForexAbode.com, 2018). Todavia, nota-se, também, que o preço ainda subiu um pouco após o sinal de queda do Histograma. Portanto, sugere-se aguardar de 3 a 5 barras no Histograma antes de se tomar uma posição.

Para Wiles e Encke (2015), todavia, uma atitude mais cautelosa deve levar em consideração a ocorrência de três indicativos simultaneamente, resumidos na Tabela 5, para concretização de um efetivo sinal de compra ou de venda, e foram esses os parâmetros que lhes foram mais eficientes em sua pesquisa.

Tabela 5 – Conjunto de sinais de compra e venda sugeridos por Wiles & Encke (2015).

Buy	$(MACD < 0) \text{ and } (MACD_{\text{histogram}(i-1)} < 0)$ $\text{and } (MACD_{\text{histogram}(i)} > 0)$
Sell	$(MACD > 0) \text{ and } (MACD_{\text{histogram}(i-1)} > 0)$ $\text{and } (MACD_{\text{histogram}(i)} < 0)$
Hold	Else

Fonte: Wiles & Encke (2015).

3.2.6 Precedentes de emprego da MACD e otimizações de períodos de EMA

O oscilador MACD tem sido empregado com sucesso em diversas áreas do conhecimento, incluindo exemplos no campo das ciências naturais, ao ponto de já haver razoável literatura a respeito. Na maioria dos casos, observa-se a tentativa (bem sucedida) de otimizar os períodos das três diferentes EMA inerentes à técnica a fim de adequá-los à variável em estudo, melhorando a eficiência das previsões.

Zhang et al. (2009) testaram a utilidade de algoritmos de ganho de peso para prever episódios de agravamento de insuficiência cardíaca (WHF, na sigla em inglês), usando dados de telemonitoramento residencial.

Comparando a MACD com uma simples *rule-of-thumb* (RoT), a análise tinha o objetivo principal de prever eventos de hospitalização por WHF com 14 dias de antecedência. O objetivo secundário era prever a ocorrência de ganho de peso em episódios associados a sintomas substancialmente agravantes.

O algoritmo MACD teve um desempenho superior aos de simples RoT ao tentar detectar ganho de peso associado a episódios de WHF. Entretanto, tendo obtido uma taxa de alerta real de apenas 20%, eles concluem que há, claramente, outros mecanismos além de

retenção de fluidos que antecipam eventos de WHF e comentam, exaltando a técnica: “a alta especificidade da MACD oferece a possibilidade de ela ter um papel útil na detecção de alguns aspectos dos quadros de WHF, e o algoritmo pode ser melhorado com a inclusão de outras medições, como pressão sanguínea e taxa de batimentos, podendo se consolidar como ferramenta útil para prever o início de um WHF”.

Wiles e Encke (2015) empregaram algoritmos genéticos para a otimização dos parâmetros para o mercado de soja, realçando que tais algoritmos têm a habilidade de testar várias soluções possíveis num espectro infindável de soluções, à maneira da seleção natural, tendo também a capacidade de obter resultados quando há múltiplos máximos e mínimos numa função e, contrariamente aos métodos de gradiente, não se confundem com máximos e mínimos subótimos. Valendo-se desse algoritmo, eles encontraram valores otimizados, após 54 gerações, de 6,866 para a EMA rápida, 33,812 para a EMA lenta e 4,575 para a linha de sinal.

Ao empregá-los e comparar os resultados com os obtidos segundo os valores tradicionais, chegaram à conclusão de que estes não proporcionam um lucro tão alto quanto aqueles, isto é, os valores otimizados pelo algoritmo genético, ponderando que a inteligência computacional pode ser usada para criar melhores modelos, mais adequados a contratos individuais, e aumentando a rentabilidade de técnicas existentes (como a MACD).

Benlahouar e Bougataya (2018) lançaram mão da MACD para propor uma previsão de consumo de energia de uma residência, destacando que é um novo método na área, visando uma previsão instantânea eficiente, a fim de que a capacidade de geração de energia seja equivalente à demanda futura, com base nos dados de demanda passados e presentes.

Em seu estudo, os dados de demanda foram discretizados a cada 2 (dois) minutos, compondo uma série de referência para prever a demanda dos dois minutos à frente. Após testar várias combinações de parâmetros, eles concluíram que a melhor combinação foi a de uma EMA curta (rápida) de 18 minutos, uma EMA longa (lenta) de 24 minutos e a EMA da MACD (linha de sinal) de 6 (seis) minutos, com o histograma representando a diferença entre a MACD e a sua EMA, sendo positivo quando a MACD está acima da linha de sinal e negativo quando abaixo.

Foi, então, desenvolvido um algoritmo específico com base nos parâmetros da MACD, que se mostrou capaz de prever acuradamente a energia consumida nos 2 (dois) minutos futuros em 86% dos casos. Benlahouar e Bougataya (2018) concluíram, então, que o indicador MACD é muito útil para ajudar no planejamento e gerenciamento em tempo real da

geração de eletricidade e identificar várias informações, especialmente com a possibilidade de perceber mudanças no consumo com antecedência, evitando produção insuficiente.

Voltando ao campo nativo da técnica, o mercado de ações, convém citar o minucioso trabalho de Kwon e Moon (2003), propuseram um algoritmo genético combinado com uma rede neural recorrente para otimização dos parâmetros da MACD. Os resultados exibiram um desempenho significativamente melhor que a estratégia “buy-and-hold” (compre-e-espere, em tradução *ipsis litteris*), para uma variedade de empresas pelos 10 anos que precederam o estudo.

3.2.7 Especificidades da aplicação à previsão climática no presente estudo

A MACD, embora, como já mencionado, tenha origem e finalidade no mercado de ações, é uma técnica versátil com relação à escala temporal que se pode empregar. Em que pese seu uso massivo para os valores diários (de encerramento) de preços de ações, valores semanais, mensais e até anuais também são utilizados.

O presente estudo foi conduzido lançando-se mão deste oscilador técnico, do qual já há precedentes de sua aplicação a ciências naturais (Zhang et al., 2009; Autor, 2015; Benlahouar e Bougataya, 2018), para prever comportamentos, tendências e *momentum* em séries temporais de dados pluviométricos. Após a devida abordagem explanativa da técnica, no que se refere aos seus mecanismos, características, formas de cálculo, padrões e meios de interpretação dos resultados, nas subseções acima, proceder-se-á, adiante, com as particularidades de sua aplicação a este estudo.

As cinco séries de dados aludidas à seção 3.1, correspondentes aos totais anuais de precipitação de três capitais litorâneas de Unidades Federativas do NEB e a dois importantes polos do interior, foram submetidas à MACD. A relação das variáveis climatológicas com os parâmetros astronômicos foi realizada por meio da escolha dos intervalos das EMA, com base nos precedentes de flexibilização destes valores (seção 3.2.6), para fins de adequação/otimização a cada caso.

Assim, foram adotados dois conjuntos de períodos para o cálculo de cada EMA, de acordo com os ciclos astronômicos percorridos na Revisão Bibliográfica. A seguir, o primeiro conjunto de intervalos, acompanhado do ciclo que, estatisticamente, justifica seu emprego:

EMA rápida = 11 anos: Ciclo Solar de Schwabe (~11 anos);

EMA lenta = 28 anos: Meio Ciclo aproximado da ODP (ciclo total de ~56 anos);

EMA de Sinal = 9 anos: Ciclo Lunar das Apsides (8,85 anos) e Meio Ciclo Nodal Lunar (18,6 anos).

Obtendo-se, para este conjunto de intervalos, os seguintes parâmetros MACD:

- EMA de 28 períodos da série original
- EMA de 11 períodos da série original
- Linha (ou Curva) da MACD: EMA de 11 menos EMA de 28
- Linha de Sinal (ou de Gatilho): EMA de 9 períodos da MACD
- Histograma da MACD: Linha da MACD menos a Linha de Sinal

Os valores foram arredondados, embora haja o importante precedente de Wiles e Encke (2015), para o uso de expoentes não-inteiros das EMA. Mas, adiante, fez-se a experiência com o período do Ciclo Nodal.

De modo análogo, portanto, o segundo conjunto:

EMA rápida = 9 anos: Ciclo Lunar das Apsides (8,85 anos) e Meio Ciclo Nodal Lunar (9,3 anos);

EMA lenta = 18,6 anos: Ciclo Nodal Lunar (18,6 anos);

EMA de Sinal = 4 anos: Meio Ciclo Lunar das Apsides (4,4 anos).

Recebendo-se os seguintes parâmetros MACD:

- EMA de 18,6 períodos
- EMA de 9 períodos
- Linha (ou Curva) da MACD: EMA de 9 menos EMA de 18,6
- Linha de Sinal (ou de Gatilho): EMA de 4 períodos da MACD
- Histograma da MACD: Linha da MACD menos a Linha de Sinal

Destarte, observa-se que o primeiro conjunto de períodos visa estabelecer uma correspondência das variáveis estudadas com três ciclos distintos, um Solar, outro Lunar e, o terceiro, oceânico, a ODP, embora esta, por sua vez, sugere-se, com assertividade cada vez

maior na literatura, ser influenciada pelo Ciclo Nodal Lunar, tendo uma periodicidade total aproximada de três Ciclos Nodais Lunares ($3 \times 18,6 =$ harmônico de 56 anos). Já o segundo é caracterizado pelo uso exclusivo de parâmetros orbitais lunares.

Para a organização dos dados, cálculos dos parâmetros necessários, como as EMA, a MACD e o Histograma, bem como os respectivos gráficos, fez-se uso do *software* LibreOffice Calc.

4 RESULTADOS

Esta seção está organizada como segue: para cada índice pluviométrico anual, são apresentados os resultados de ambos os conjuntos de períodos de Médias Móveis Exponenciais (EMA) aplicados por intermédio da MACD, i.e., o conjunto “misto”, de períodos de 11, 28 e 9 anos, para as EMA rápida, lenta e a da própria MACD, respectivamente, e o conjunto “lunar”, de períodos de 9, 18,6 e 4 anos, para as EMA rápida, lenta e a da própria MACD, respectivamente.

Acerca da ordem de exibição dos resultados dos importantes municípios de diferentes Unidades Federativas (UF) do NEB, representativos de suas sub-regiões, iniciar-se-á por Maceió/AL, sendo apresentados, para os índices desta cidade, ambos os gráficos gerados para cada conjunto de parâmetros de EMA, o primeiro a conter as curvas da variável original e suas duas EMA, e o segundo, a ilustrar as linhas da MACD, de sua própria EMA (Linha de Sinal) e Histograma. Na sequência, são exibidos e comentados os resultados obtidos para as pluviometrias de Natal/RN, São Luís/MA, Petrolina/PE e Barreiras/BA, nesta ordem.

Posteriormente à exibição dos gráficos de cada subseção, discorrer-se-á devidamente acerca da interpretação dos resultados, à luz do conhecimento científico vigente já apreciado na Revisão Bibliográfica.

4.1. Totais Pluviométricos Anuais de Maceió/AL

Liminarmente, assim como se dará na análise de cada série derivada de sua respectiva estação, foi aplicado o conjunto de EMA de 11, 28 e 9 anos.

Da Figura 4.1, constam a curva que ilustra a variação da precipitação total anual ao longo do intervalo estudado, i.e., entre 1911 e 2018, e as que exibem o comportamento das EMA de 11 e 28 anos. Os valores da EMA de 11 anos só passam a se fazer presentes a partir de 1921, pois há uma perda natural dos 11 valores iniciais na construção da primeira média móvel de 11 anos. Pelas mesmas razões, a EMA de 28 anos só exhibe seu primeiro valor em 1938.

É oportuno salientar que esta é a face mais elementar da MACD, e a de interpretação mais dificultosa e menos imediata, por três razões: há menos parâmetros da MACD visíveis; o principal destes (o Crossover de Centro) tem de ser percebido pelos cruzamentos entre as curvas de ambas as EMA, i.e., forçando o usuário, ou analista, a observar cautelosamente

duas linhas a fim de efetuar a interpretação de um único sinal; e é de um visual mais confuso, uma vez que três curvas são exibidas simultaneamente, interpondo-se variadas vezes, por deterem a mesma escala temporal e amplitudes de valores semelhantes. Contudo, há uma importante vantagem: somente nesta forma de apresentação, é possível ver, também, a curva da variável original e perceber, de imediato, se a técnica é eficiente para um dado período ou não, ainda que a realização de tal juízo deva, idealmente, aguardar a outra apresentação gráfica do indicador.

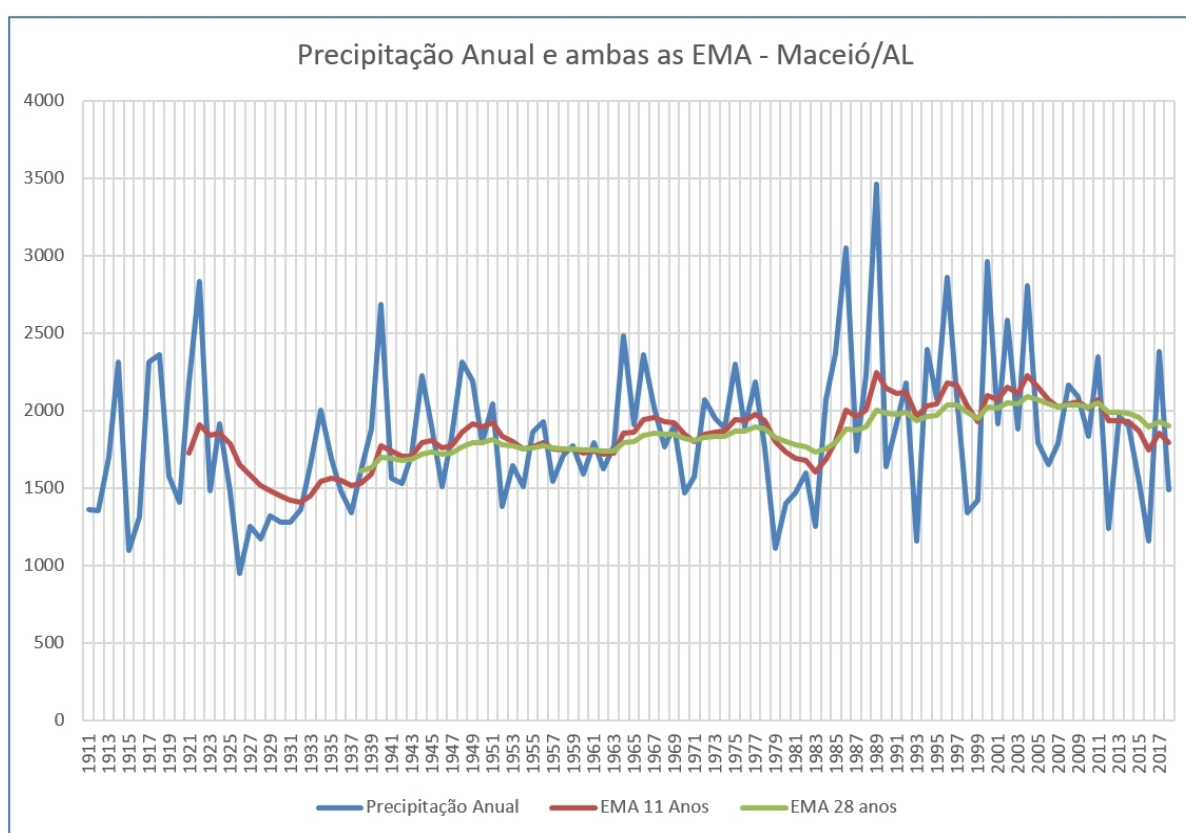
Procedendo-se à análise do caso específico, considerando o exposto acima, observa-se, de pronto, que o previsto teoricamente quanto aos sinais demonstrados pelo comportamento das EMA se evidencia. Via de regra, quando as linhas se intersectam, com a EMA de 11 anos cruzando a EMA de 28 para ficar acima, os valores de precipitação tendem a aumentar – ou, mais corretamente, permanecerem em tendência de alta – e o contrário ocorre quando a EMA de 11 anos cruza a EMA de 28 para baixo. Tais padrões podem melhor ser observados para os Crossovers dos anos de 1939, 1963, 1979, 1985, 2000 e 2011, por exemplo.

Entretanto, nota-se que tais sinais ocorrem com atraso em relação ao máximo ou mínimo valor de precipitação, pois as médias móveis impõem um atraso à série original. Por exemplo, para o Crossover de 1985, que indicou elevação dos valores de precipitação para os anos seguintes, o mínimo valor de precipitação já havia sido atingido em 1983, ou seja, as precipitações já haviam começado a subir antes do CC de 1985, e teria sido útil, portanto, uma sinalização mais extemporânea, como ocorreria com parâmetros exibidos à Figura 4.2.

Digno de nota também é o fato de que a análise de curtos períodos meramente pelo gráfico das EMA não parece ser eficiente para períodos de pequenas variações nos valores da variável original, como, por exemplo, de 1955 a 1963, pois as linhas estão muito próximas ao longo daqueles 8 anos. Todavia, uma análise de longo prazo para o mesmo período teria concluído que isso estava a indicar que não haveria uma mudança significativa no comportamento da precipitação até que uma EMA cruzasse a outra e divergisse um pouco desta, o que eventualmente ocorreria a partir de 1964. E isso é consistente com o previsto para as ocorrências de convergências e divergências, que dão nome à técnica. Uma “indefinição” semelhante ocorreu no período de 2007 a 2011, porém, com menor demérito para esses parâmetros específicos da técnica, uma vez que a variação no período foi menos significativa, permanecendo os índices pluviométricos um pouco acima da média por todo aquele período. Um último ponto a se aludir com respeito à Figura 4.1 é a eficiência das grandes divergências do tipo *bearish*, culminadas em 1949, 1989, 1996 e 2004, sinalizando quedas acentuadas na

precipitação nos anos seguintes e, por vezes, prolongadas, isto é, apontaram para significativas mudanças de regime no futuro próximo. Outrossim, no que tange às divergências do tipo *bullish*, notáveis são as de 1984 e 2016, antevendo picos absolutos e relativos importantes na série.

Figura 4.1 – Curva dos totais anuais de precipitação (azul, em $\text{mm}\cdot\text{ano}^{-1}$) registrados para a cidade de Maceió/AL, no período de 1911-2018, segundo os critérios de obtenção de dados expressos à seção 3.1. Na mesma escala e de mesma unidade, também são plotadas as EMA rápida (11 anos; vermelha) e lenta (28 anos; verde), indicadores básicos da MACD.



Fonte: Autor.

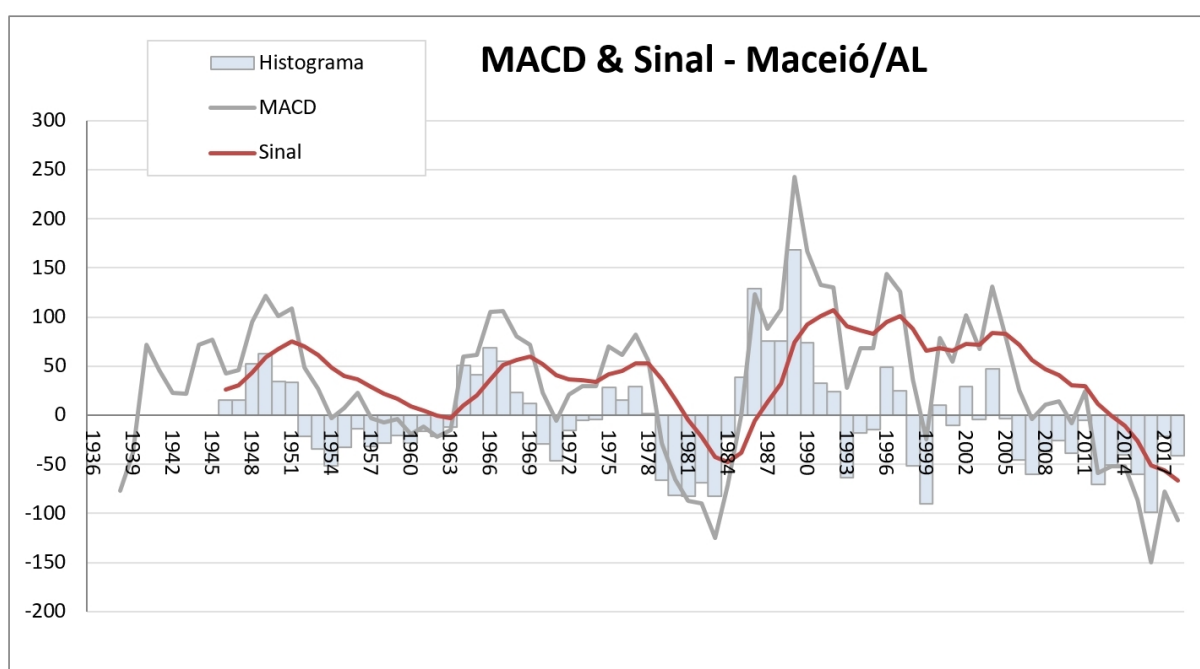
A Figura 4.2, por sua vez, denota os outros três parâmetros gráficos da MACD, a saber, a Linha da MACD (dada pela diferença entre as EMA de 11 e 28 anos), a Linha de Sinal (EMA de 9 anos da MACD) e o Histograma (diferença entre a MACD e a Linha de Sinal).

Como já explicado anteriormente, a EMA de 28 anos só passa a ser calculada e, por conseguinte, plotada, a partir de 1938. Considerando que a MACD é dada pela subtração entre as duas EMA, ela só passa a existir quando há valores para ambas e, portanto, a curva da

MACD também só é plotada a partir de 1938, na Figura 4.2. De modo análogo, a Linha de Sinal demanda a existência de 9 valores prévios da MACD e, assim, só é gerada a partir de 1946.

O parâmetro de Crossover de Centro já fora analisado na Figura 4.1, pois os Crossovers da Linha Zero (ou Linha Central), por definição, ocorrem exatamente quando há um crossover entre as duas EMA, tendo os mais relevantes sido já descritos e comentados. A Figura 4.2 permite a análise dos demais padrões e sinais da MACD, que só podem ser avaliados à luz desses outros parâmetros gráficos.

Figura 4.2 – Linhas da MACD (cinza) e de Sinal (vermelha) para os totais anuais de precipitação na cidade de Maceió/AL, entre 1911 e 2018, com períodos de EMA de 11, 28 e 9 anos. O Histograma da MACD (colunas azuis) também é exibido.



Fonte: Autor.

Em avaliação dos Crossovers de Sinal (CS), percebe-se que este é, em geral, mais eficiente, em termos de antecedência, na previsão das inversões de tendências de queda ou de alta nos valores de precipitação, na comparação com os Crossovers de Centro (CC).

Um exemplo paradigmático é a diferença entre o CS de 1951 e o CC de 1954, ambos do tipo *bearish*. O CS, neste caso, previu o início de uma fase persistente de relativas baixas precipitações que se estenderia até 1963, enquanto o CC só foi capaz de indicá-la quando praticamente já em sua metade, somente no advento de uma queda relativa, secundária, dentro

da tendência global de alta. Outro ponto a se realçar é que, neste caso, a MACD foi de uma eficiência inatacável na sua principal função, que é a de oscilador de *momentum*, mais que previsão. Observe-se que, neste período, i.e., de 1951 a 1963, não houve um outro CS, isto é, não houve uma manifestação notória da MACD e, de fato, ao atentar-se aos valores originais de precipitação, não houve variações significativas, com predominância de baixos índices anuais, mas, tão logo houve uma nova variação realmente relevante, a MACD lhe foi sensível, acusando-a com um CS e um CC concomitantes, devido à abrupta variação interanual que houve de 1963 (da ordem de 1700 mm) para 1964 (beirando os 2500 mm). Já o CS *bearish* de 1968 foi de oportuna eficácia ao prever um período mais seco que perduraria até 1984-85 (se o CS *bullish* de 1974 e o *bearish* de 1978 forem interpretados como indicando variações de menor expressividade).

Ainda concernente aos CS, nota-se que, via de regra, antecedem os CC em cerca de 2 a 3 anos, como se deu em 1951 (1954), 1969 (1971), 1996 (1999) e 2005 (2007), curiosamente, todos do tipo *bearish*. Nos últimos dois casos, aliás, o CC só ocorreu quando o valor da precipitação já mostrava comportamento oposto ao indicado (tanto, que os CC ocorridos em 1999 e 2007 são ambos do tipo duplo, i.e., *bearish* e *bullish* no mesmo valor anual, pois cruzam a linha zero para baixo e, imediatamente a seguir, para cima). Ademais, o Crossover de Sinal também expressa variações que não chegam a ser aparentes por um Crossover de Centro, como em 1974 (*bullish*) 1992 (*bearish*) e 1995 (*bullish*), e alguns outros casos alternados ocorridos entre 2000 e 2003. Por outro lado, casos opostos ocorrem entre 2007 e 2011, período em que cinco Crossovers de Centro (quatro dos quais devidos a dois do tipo duplo) ocorreram sem que houvesse manifestação pelo parâmetro do Crossover de Sinal.

Acerca das Divergências, subidas intensas e previsões pelo Histograma, já discorridas em sua essência teórica na seção 3.2.5, nota-se que essas características podem viabilizar uma previsão com antecedência ainda maior que os Crossovers de Sinal, embora ofereçam maior risco.

De plano, vê-se que as subidas (e descidas) intensas, também vislumbradas na Figura 4.1 – quando de divergências acentuadas entre as duas EMA – de fato precedem muitos Crossovers de Sinal e de Centro. A interpretação é que, se o valor está subindo (descendo) demais, logo chegará a um máximo (mínimo), e tenderá a voltar a valores médios, ou seja, uma inversão de comportamento está por acontecer. Os mais efetivos picos ou vales intensos ocorreram em 1949, 1966, 1975, 1983, 1989, 1996, 2004 e 2016.

O Histograma auxilia na percepção dessas alterações e mesmo a conferir mais segurança na previsão de reversões que antevêm um Crossover de Sinal. Tomando-se, por exemplo, a queda na precipitação ocorrida em 1967, vê-se que foi expressa pelo Histograma, enquanto a tendência só seria marcada por um CS em 1969. O mesmo ocorreu com os CS de 1951-52 e 1992, cujas alterações já eram sinalizadas pelo Histograma em 1950 e 1990, respectivamente. Entretanto, é preciso cautela, pois o Histograma, se considerado isoladamente e baseando-se em apenas uma ou duas barras, poderia induzir ao erro, haja vista, por exemplo, o comportamento nada elucidador deste parâmetro durante as oscilações de 2000 a 2005. Por outro lado, o Histograma exibiu flutuações importantes, que passaram despercebidas aos Crossovers, fossem do tipo CS ou CC, como em 2013 e 2017, e, a partir de 2005, sinalizara o advento de um importante período seco futuro.

De modo análogo às Figuras 4.1 e 4.2, as Figuras 4.3 e 4.4 exprimem os gráficos gerados para a mesma variável (totais anuais de precipitação em Maceió), com os mesmos parâmetros do oscilador MACD, alterando-se apenas os períodos de EMA, que passam a ser de 9 anos (EMA rápida), 19 anos (EMA lenta) e 4 anos (EMA de Sinal). Como indicado anteriormente, este conjunto de intervalos corresponde a periodicidades dos Ciclos Orbitais Lunares.

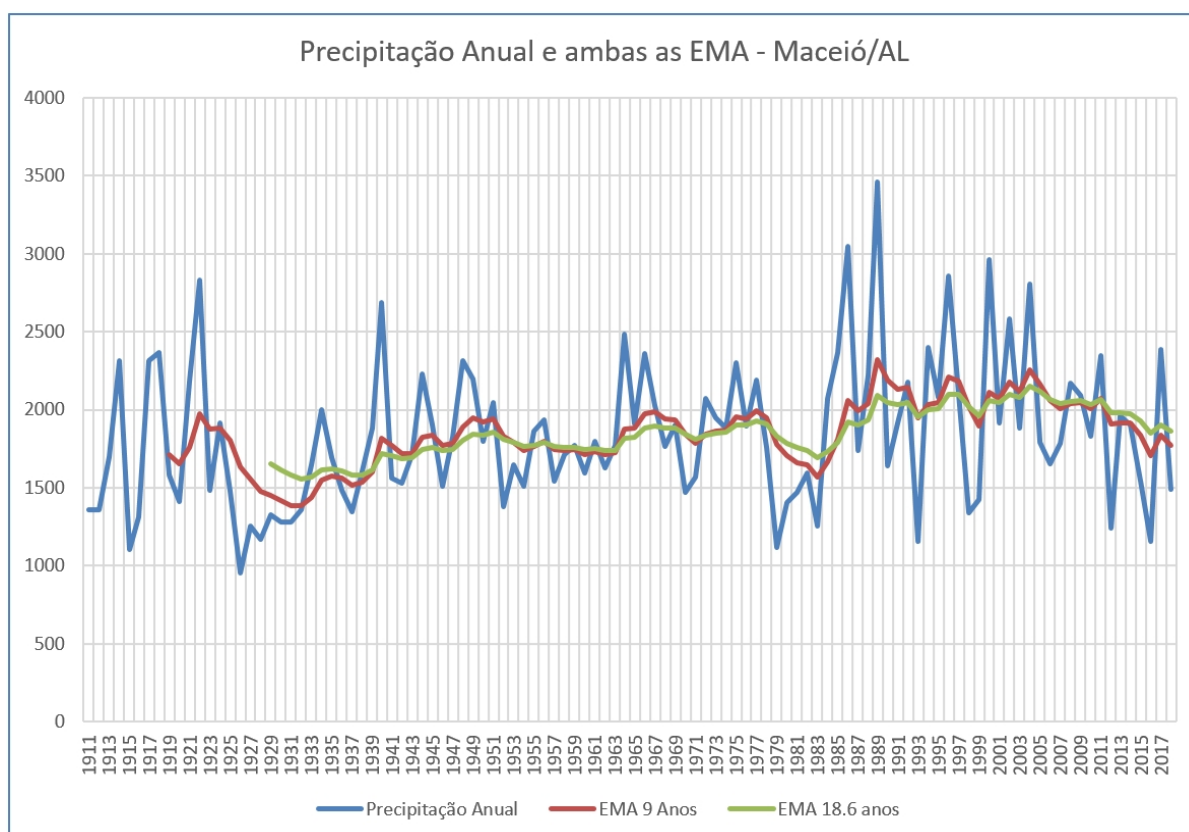
Descrições gerais, para essa mesma série de dados, das interpretações com base nas interações entre as EMA lenta e rápida, bem como da MACD, da Linha de Sinal e do Histograma já foram fornecidas quando da análise anterior. Agora, portanto, procede-se apenas com a avaliação de eventuais discrepâncias significativas entre os resultados gerados por esse novo conjunto de parâmetros.

De pronto, é possível constatar que, sendo mais curtas, as EMA naturalmente começam a ser exibidas na Figura 4.3 em pontos anteriores da série, a saber, 1919 para a EMA rápida (9 anos), e 1929 para a EMA lenta (19 anos). Na Figura 4.4, isso se reflete em pontos anteriores também para a MACD (1929) e Linha de Sinal (1932). Outra diferença patente em relação aos resultados anteriores é que a Linha de Sinal está sempre bem mais próxima da Linha da MACD, pelo mero motivo de ser uma EMA mais curta, de apenas 4 anos, em referência à metade do Ciclo Lunar das Apsides. Isso implica em um maior número de Crossovers de Sinal.

Mas deve-se um último comentário à Figura 4.3: uma outra dissonância visível em relação ao conjunto de EMA anterior é que, como consequência do menor intervalo entre as duas EMA (10 períodos no conjunto misto *versus* 17 no conjunto lunar), elas se apresentam

sempre mais próximas, o que atenua o sinal de divergência e aumenta a ocorrência de crossovers (neste caso, de centro).

Figura 4.3 – Curva dos totais anuais de precipitação (azul, em $\text{mm}\cdot\text{ano}^{-1}$) registrados para a cidade de Maceió/AL, no período de 1911-2018, segundo os critérios de obtenção de dados expressos à seção 3.1. Na mesma escala e de mesma unidade, também são plotadas as EMA rápida (9 anos; vermelha) e lenta (18,6 anos; verde), indicadores básicos da MACD.

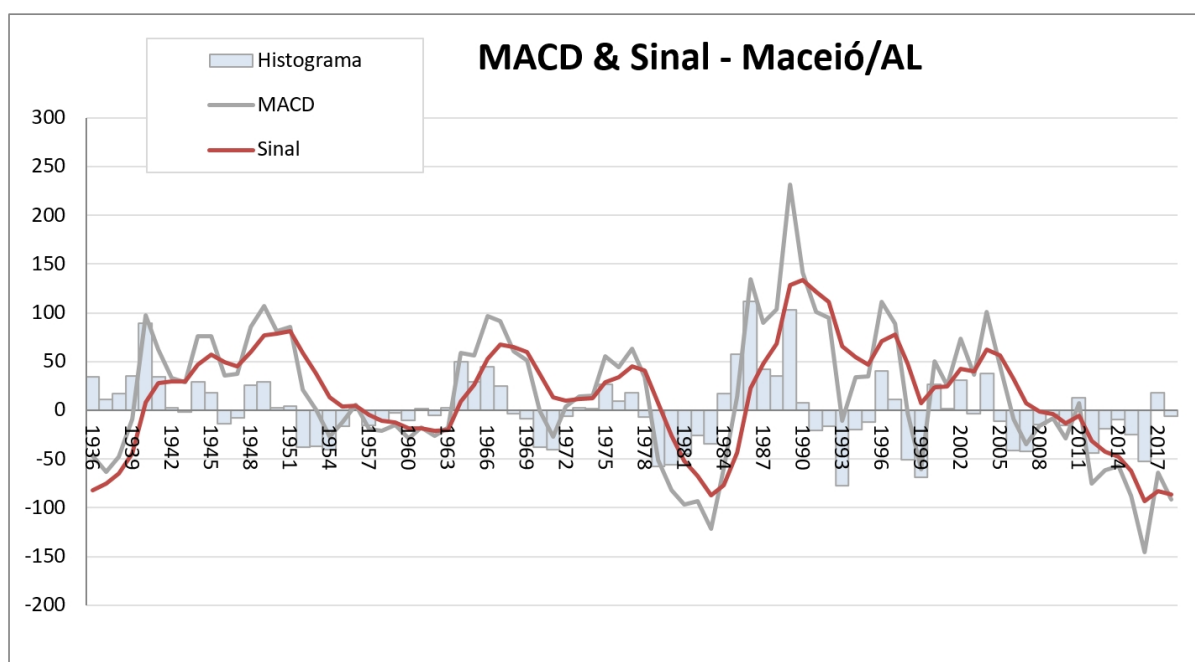


Fonte: Autor.

A propósito, no que se refere aos Crossovers de Centro – que podem ser observados na Figura 4.3, mas, com melhor definição, na Figura 4.4 – alguns surgem antes do exposto pelos resultados anteriores, como os do tipo *bearish* que, lá, ocorreram em 1954, 1971, 1999 e 2007, e, aqui, em 1953, 1970, 1998 e 2006, respectivamente, todos antecipando em um ano os gerados pelas curvas segundo os intervalos “mistos” de EMA, da Figura 4.2. No intervalo de 1953-1963, observa-se que a MACD mostra valores mais negativos, e que a Linha de Sinal, de maneira geral, se manteve ligeiramente acima da MACD, indicando um período com tendência de baixa pluviosidade, pelos totais anuais. Essa situação, no entanto, ficou melhor caracterizada com o conjunto anterior de intervalos de EMA (Figura 4.2). Nota-se, também,

que houve, aqui, um CC duplo (*bearish-bullish*) em 1993, que fora apenas fragilmente ensaiado na Figura 4.2. Essa situação é complexa porque, neste ano, ocorreram efeitos da erupção do vulcão Pinatubo, cumulados com os de El Niño.

Figura 4.4 – Linhas da MACD (cinza) e de Sinal (vermelho) para os totais anuais de precipitação na cidade de Maceió/AL, entre 1911 e 2018, com períodos de EMA de 9, 18,6 e 4 anos. O Histograma da MACD (colunas azuis) também é exibido.



Fonte: Autor.

Já no que tange aos Crossovers de Sinal, há um número razoavelmente maior de ocorrências, e, com mais relevância, nota-se, com satisfação, que, via de regra, os que se repetiram nos dois resultados, ocorrem neste com alguma antecedência em relação às curvas geradas pelo conjunto 11-28-9 (Figura 4.2), como o *bearish* de 1951-52, que, aqui, ocorre inequivocamente em 1951, o de 1969, que passa a ocorrer em 1968, além de outros exemplos de precedência de aproximadamente um ano, como em 1974 (1972-73), e o notável caso *bearish* de 1990 que, no conjunto anterior de EMA, ocorreria apenas em 1992. Outras observações de que se tornam merecedores estes últimos resultados referem-se ao início e ao fim da série. No início, embora não seja possível efetuar comparações quanto ao período anterior a 1946, observa-se que, precisamente neste ano, um importante CS *bearish* foi expresso por este conjunto de EMA (Figura 4.4), enquanto apenas uma discreta convergência foi mostrada pelo anterior (Figura 4.3). Quanto aos últimos anos da série, o crossover duplo

de 2011, que lá fora apenas do tipo CC, aqui, foi também indicado por um CS. Em 2017, um CS duplo denotou a abrupta elevação de precipitação ocorrida e a queda subsequente.

Na comparação entre os Histogramas, é possível verificar que o número de barras positivas ou negativas contínuas é menor, pelo fato de a EMA estar sempre próxima da MACD, notando-se também a menor amplitude geral, reduzindo-se nalguma medida a proficiência deste parâmetro, o mesmo ocorrendo para o das Divergências (entre a Linha da MACD e a Linha de Sinal), pois são atenuadas, como ponderado a respeito das Divergências entre as EMA originais, na Figura 4.2.

4.2 Totais Pluviométricos Anuais de Natal/RN

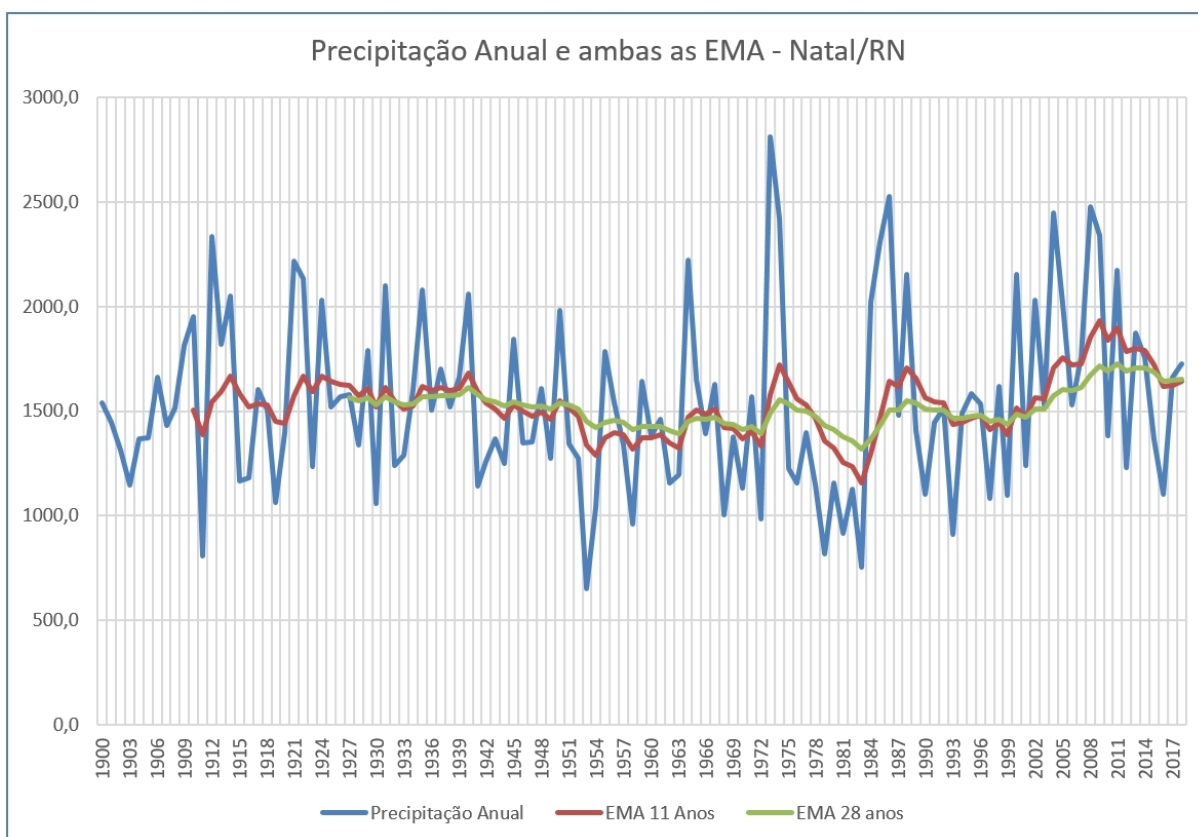
De modo congênere à subseção anterior, aplicou-se a MACD, na totalidade de seus parâmetros, à série de dados pluviométricos de Natal/RN, inicialmente com as EMA de intervalos referentes ao Ciclo Solar de Schwabe para a EMA rápida (11 anos), ao Meio Ciclo (fase) da ODP para a EMA lenta (28 anos) e ao Ciclo Lunar das Apsides para a EMA de Sinal (9 anos). Os resultados estão dispostos nas Figuras 4.5 (totais anuais e ambas as EMA da variável original) e 4.6 (Linha da MACD, Linha de Sinal e Histograma). Na sequência, implementaram-se os intervalos de 9 anos para a EMA rápida (Ciclo Lunar das Apsides), 19 anos para a EMA lenta (Ciclo Nodal Lunar) e 4 anos para a EMA de Sinal (Meio Ciclo das Apsides), cujos resultados estão ilustrados nas Figuras 4.7 (totais anuais e ambas as EMA da variável original) e 4.8 (Linha da MACD, Linha de Sinal e Histograma).

Cumprе ressaltar que não se procederá com uma análise tão minuciosa quanto a que foi feita para a série de Maceió/AL, pois, tendo em vista que há uma profusão de similaridades entre os dois casos, como as interpretações dos sinais da MACD, as mesmas periodicidades e ciclos, e, a fim de evitar repetições desnecessárias, faz-se apenas uma breve constatação das semelhanças e uma explanação mais detalhada somente sobre as divergências evidentes resultantes da aplicação da técnica para os dois casos e das particularidades climatológicas de cada região.

Nas Figuras 4.5 e 4.7, faz-se mister nomear uma importante distinção em relação às Figuras 4.1 e 4.3. Como consta da seção 3.1, que especifica os dados utilizados no presente estudo, a série pluviométrica histórica de Maceió/AL fora a única iniciada em 1911. As demais, incluindo Natal/RN, têm seus totais anuais expressos aqui desde 1900. Desta forma, para as séries representativas desta e das próximas cidades, os valores da EMA de 11 anos já

passam a se fazer presentes a partir de 1910, considerando a perda natural dos 11 valores iniciais na construção da primeira média móvel de 11 anos. Pelas mesmas razões, a EMA de 28 anos exhibe seu primeiro valor em 1927.

Figura 4.5 – Curva dos totais anuais de precipitação (azul, em mm.ano⁻¹) registrados para a cidade de Natal/RN, no período de 1900-2018, segundo os critérios de obtenção de dados expressos à seção 3.1. Na mesma escala e de mesma unidade, também são plotadas as EMA rápida (11 anos; vermelha) e lenta (28 anos; verde), indicadores básicos da MACD.

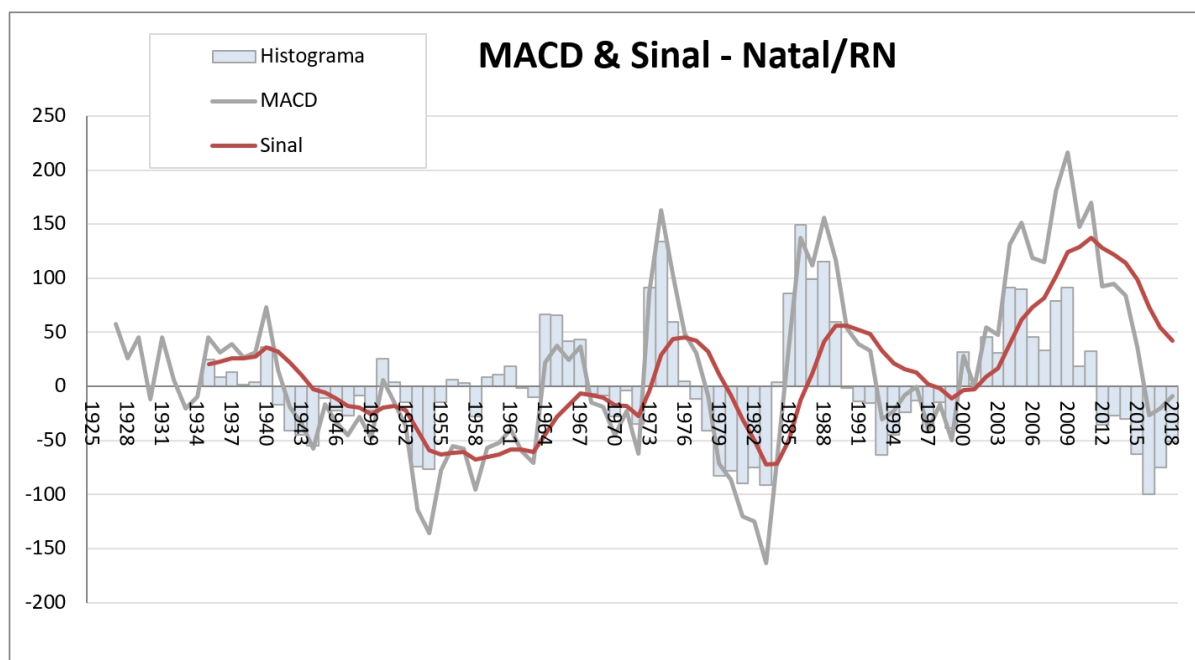


Fonte: Autor.

Nas Figuras 4.5 e 4.6, portanto, sob aplicação do conjunto misto de EMA (11-28-9), os típicos padrões de previsibilidade do oscilador MACD se fazem presentes. Os CC de 1934, 1941, 1964, 1973, 1985 e 2000 – todos do tipo *bullish*, à exceção do de 1941 – estão entre os mais eficientes para cruzamentos desse tipo, pois ocorreram quase que simultaneamente aos respectivos CS, com, no máximo, um ano de atraso. De desempenho ainda mais louvável foram o CC de 1968, que precedeu o CS em quase um ano, e o CC *bearish* (distinção que se faz necessária por ter sido do tipo duplo) de 1950, que se antecipou ao CS de mesmo sinal em quase dois anos. Os demais crossovers do tipo Central ocorrem com certo atraso, como os de

1978, 1993 e 2016, o que prejudica uma previsão baseada unicamente nesse tipo de parâmetro.

Figura 4.6 – Linhas da MACD (cinza) e de Sinal (vermelho) para os totais anuais de precipitação na cidade de Natal/RN, entre 1900 e 2018, com períodos de EMA de 11, 28 e 9 anos. O Histograma da MACD (colunas azuis) também é exibido.



Fonte: Autor.

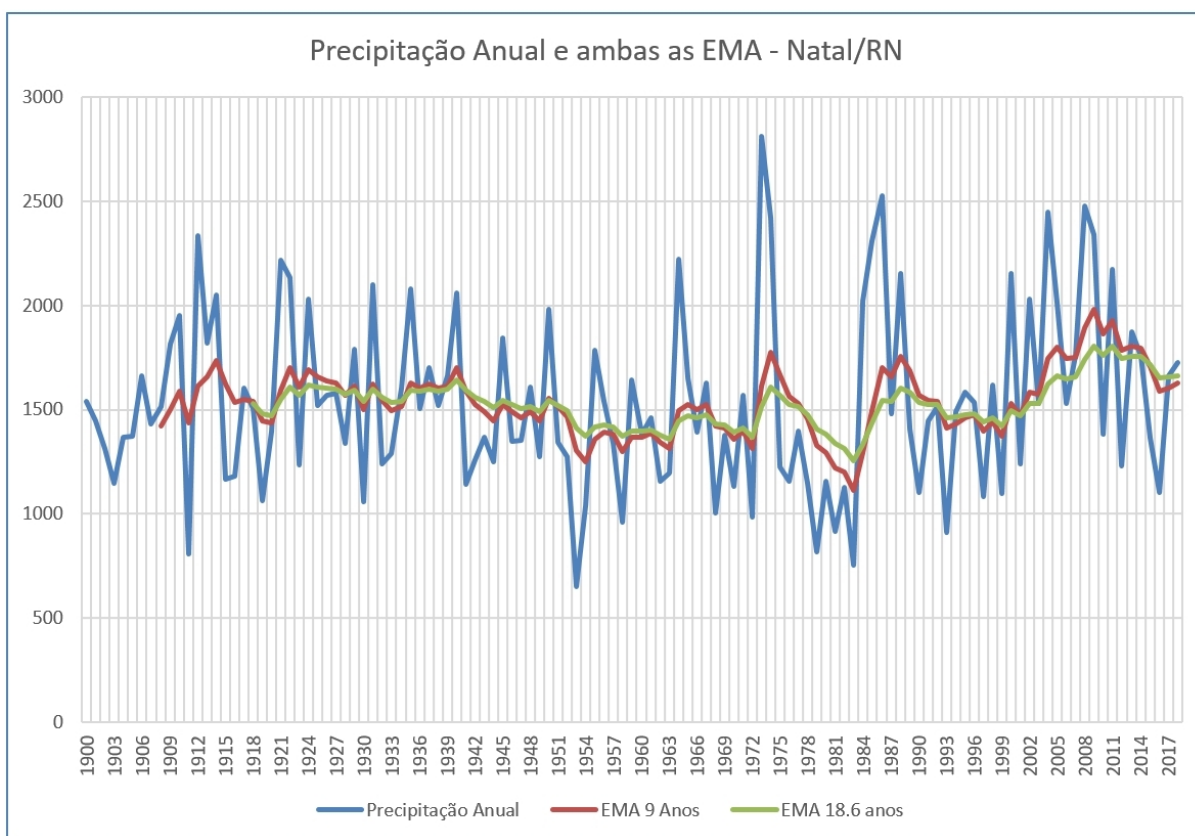
Ainda em análise da Figura 4.6, os Crossovers de Sinal, em boa parte das ocorrências, exibiram apreciável eficácia. O *bearish* de 1941 sinalizou uma tendência global de queda nos índices (período de seca prolongada) que perduraria até 1958, intensificando-se em 1952 (com outro importante CS *bearish*). Um outro CS (agora *bullish*), em 1959, marcaria o fim da pior fase, e, o de 1963, o início de uma fase bem mais úmida. Os CS de 1973, 1976, 1984, 1992, 2000 e 2012 também foram de eficiência notável em marcar inícios de regimes longevos de alta ou baixa pluviosidade. Dentre esses, as mais justas menções, na comparação a outros parâmetros da técnica, são devidas aos CS do tipo *bearish* de 1976 e 1990, que antecederam em três anos os respectivos CC, e, sobretudo, o CS *bearish* de 2012, que chegou a antecipar o CC de mesmo sinal em quatro anos.

O Histograma também apresentou desempenho dignamente satisfatório. Cumpriu o papel de maior sensibilidade que os Crossovers de Sinal, acusando flutuações de menor expressividade (*úteis per se*), mas também outras que, de maior relevância, saltam aos olhos a

ponto de possivelmente sinalizar, a critério do analista, um ponto de inflexão anos antes da consolidação por um CS. Tal ocorreu, e.g., em 1966 (CS em 1968), 1987 (CS em 1990) e 2010 (CS em 2012). As Divergências e Subidas (ou Descidas) Intensas também foram particularmente efetivas nesta série. Os picos e vales pronunciados raramente deixaram de antever reversões de tendência, antecipando-se a todos os outros parâmetros, como em 1974, 1983, 1988 e 2009.

Nas Figuras 4.7 e 4.8, para os intervalos de EMA exclusivamente em alusão aos ciclos lunares, nota-se, mais uma vez, como diferença mais evidente em relação aos resultados dos cálculos com os outros períodos, que as curvas das EMA da variável original se apresentam mais próximas, atenuando um pouco as divergências (Figura 4.7) e, principalmente, que a Linha de Sinal fica sobremodo mais próxima da Linha MACD, implicando novamente num número maior de Crossovers de Sinal (Figura 4.8).

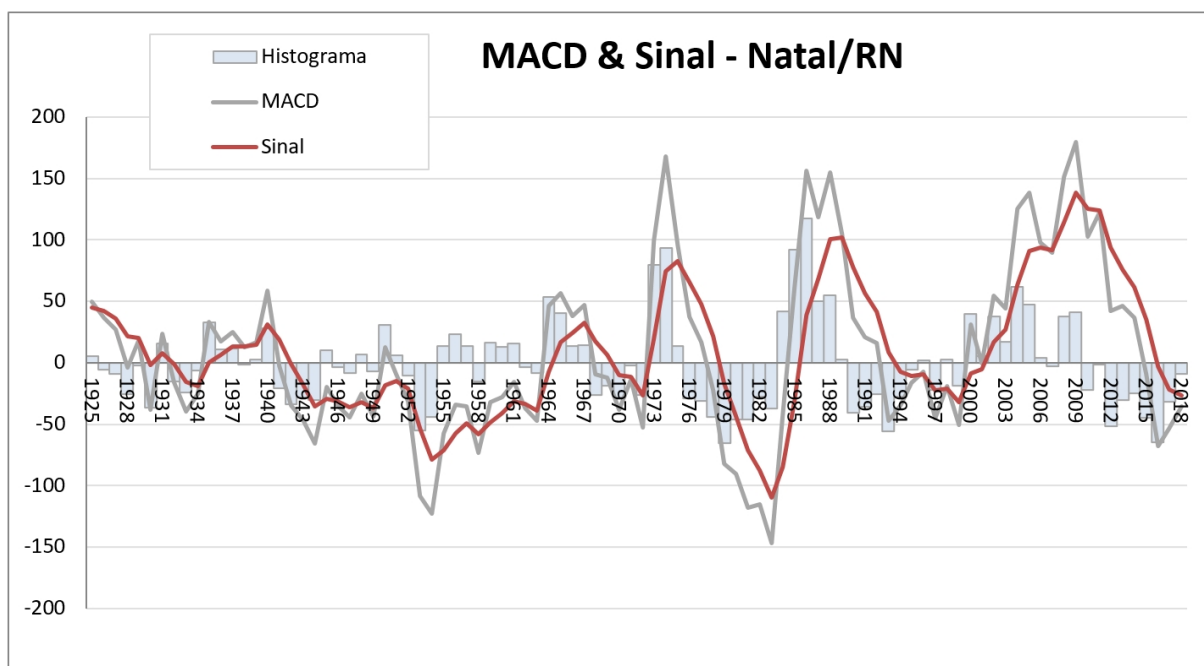
Figura 4.7 – Curva dos totais anuais de precipitação (azul, em $\text{mm}\cdot\text{ano}^{-1}$) registrados para a cidade de Natal/RN, no período de 1900-2018, segundo os critérios de obtenção de dados expressos à seção 3.1. Na mesma escala e de mesma unidade, também são plotadas as EMA rápida (9 anos; vermelha) e lenta (18,6 anos; verde), indicadores básicos da MACD.



Fonte: Autor.

Os Crossovers de Centro ocorrem quase exatamente ao mesmo tempo que os da Figura 4.6, precedendo-os, via de regra em, no máximo, alguns meses. Assim, no caso de Natal/RN, pode-se afirmar, com segurança, que não houve diferença minimamente significativa, com respeito a esse parâmetro, entre os dois conjuntos empregados de EMA. Os Crossover de Sinal, além de consideravelmente mais numerosos, são também ligeiramente mais rápidos, na maioria dos casos, como no CS *bullish* de 1983 e no CS *bearish* de 1989, que precederam, ambos, os CS respectivos do conjunto misto em um ano. Uma notável exceção ocorre em 2010, cujo CS antecipou-se em dois anos ao CS *bearish* de 2012 da Figura 4.6. Assim como ocorrera com os dados de Maceió/AL (Figura 4.4), o Histograma do conjunto 9-19-4 se mostrou menos suave e de menor relevância que o do conjunto 11-28-9, pela mesma razão, i.e., de a diferença entre a MACD e sua EMA (Linha do Sinal) ser sempre menor. Porém, há que se dizer que o Histograma não ficou tão deficiente aqui como na série de Maceió/AL quando do emprego das EMA lunares (Figura 4.4); há exemplos relevantes de ocasiões em que ele se antecipou a importantes Crossovers de Sinal, como em 1965 (um CS *bearish* só ocorreria em 1967), 1987 (CS *bearish* apenas em 1989) e, mais apreciadamente, o sinal *bullish* do Histograma de 1980 (antevendo o CS *bullish* de 1983).

Figura 4.8 – Linhas da MACD (cinza) e de Sinal (vermelho) para os totais anuais de precipitação na cidade de Natal/RN, entre 1900 e 2018, com períodos de EMA de 9, 18,6 e 4 anos. O Histograma da MACD (colunas azuis) também é exibido.



Fonte: Autor.

4.3 Totais Pluviométricos Anuais de São Luís/MA

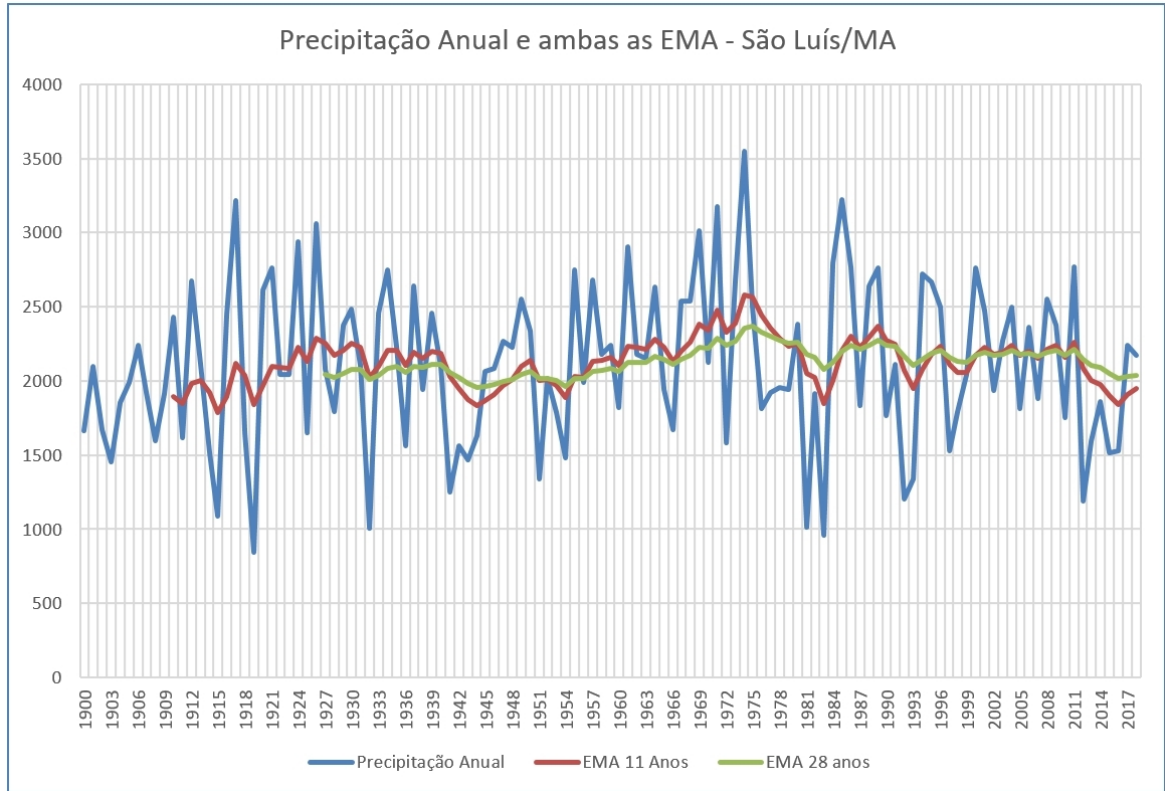
Mais uma vez, de forma análoga às subseções anteriores, os resultados da implementação da técnica MACD a uma variável climatológica são exibidos, descritos e comentados. Os índices de precipitação total anual de São Luís/MA – representativa do mais ocidental recanto urbano, capital de UF, do NNEB – são avaliados quanto à eficiência da previsibilidade da MACD. As Figuras 4.9 e 4.10 apresentam o obtido após aplicação da técnica segundo os períodos de 11 anos para a EMA rápida, 28 anos para a EMA lenta e 9 anos para a EMA de Sinal, em alusão aos ciclos astronômicos e oceânicos já descritos e referidos à exaustão.

De plano, é notório que essa série apresenta o maior número de Crossovers de Centro dentre todos os resultados já demonstrados até aqui. Os mais proeminentes, em termos de eficácia – por quase não apresentarem defasagem em relação aos outros parâmetros MACD –, são o CC *bullish* de 1985 e o CC *bearish* de 2012, que indicaram inícios de regimes pluviométricos que se estenderiam por cerca de meia década ou mais, e, mormente, o *bearish* de 1996, que determinou o princípio de um período seco que perduraria até 2000, e, mais meritosamente, antecipando-se ao sinal do Histograma em um ano e com o advento de um CS a indicar o mesmo apenas no ano seguinte, isto é, este é um dos raros casos em que um CC foi o principal parâmetro MACD a comunicar um sinal. Contudo, como esperado, os Crossovers de Sinal precederam a maior parte dos de Centro e ajudaram a filtrar ruídos registrados por alguns de Centro, como o CC *bearish* de 2002, que provou ser precipitado no médio prazo, pois a tendência geral permaneceria sendo de pluviosidade acima da média nos anos seguintes. Outros destaques são devidos ao CS *bullish* de 1946, que precede o CC de 1948, e ao CS *bearish* de 1975-76, que se antecipa ao CC de 1978-79. Já os CS de 1965, 1967, 1972 e 1973 acusaram importantes flutuações de curto prazo – dentro de uma tendência geral – que passariam despercebidas pelo parâmetro do cruzamento central, e só seriam denotadas pelo Histograma ao mesmo tempo dos CS, mas sem a mesma confiabilidade.

O Histograma, em geral, exerce sua relevante função de antever variações não previstas pelos Crossovers, ou antecede-los em certa medida. Assim ocorre com o sinal *bullish* de 1944 (um CS só viria a ocorrer em 1946). Outro papel de reconhecida significância do Histograma foi o de colaborar com a dificultosa interpretação em períodos de aparentemente confusas oscilações, como entre 1994 e 2010. E com um importante sinal *bullish* ocorre no fim da série, em 2017, precedendo o CS consecutivo em um ano e

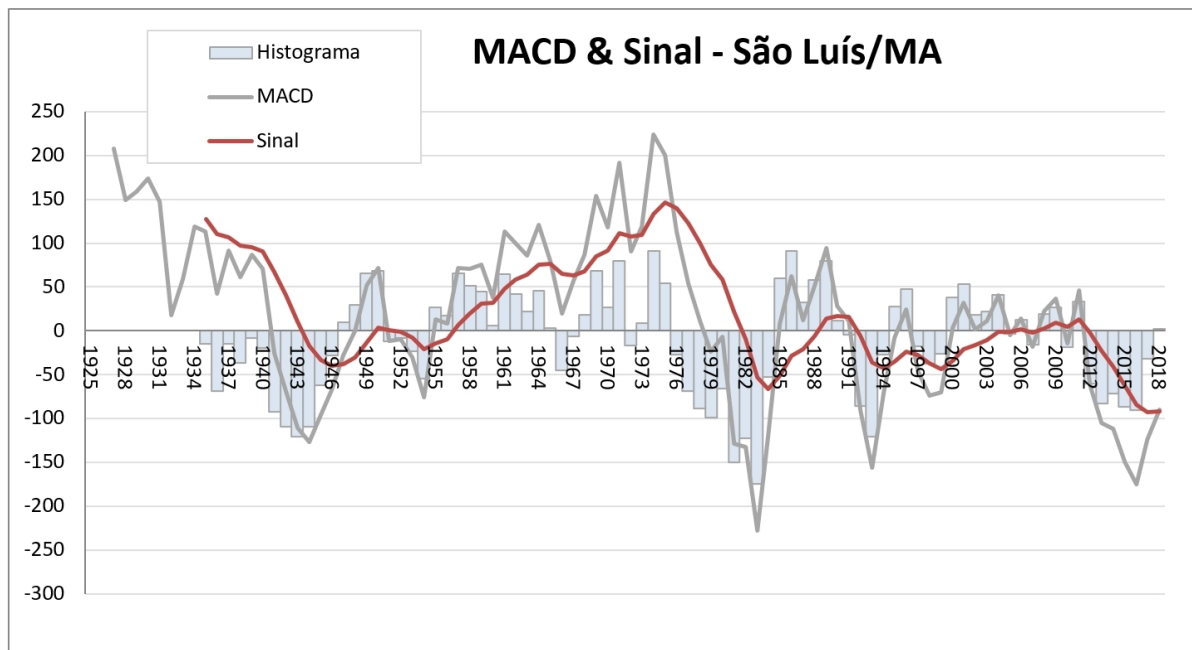
potencialmente denotando uma reversão de regime.

Figura 4.9 – Como na Figura 4.5, mas para São Luís/MA.



Fonte: Autor.

Figura 4.10 – Como na Figura 4.6, mas para São Luís/MA.



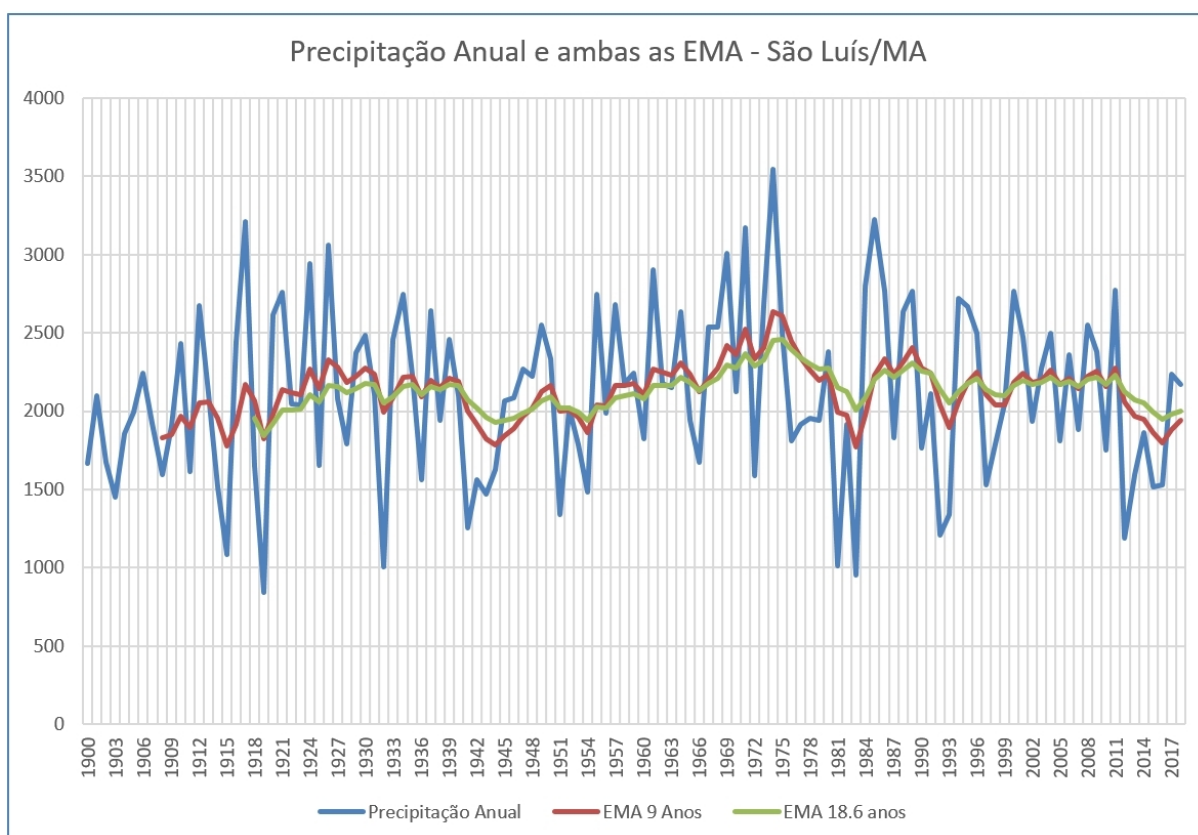
Fonte: Autor.

A respeito das Divergências e Subidas (ou Descidas) Intensas, merecem menção os sinais havidos em 1944, 1950, 1964, 1974, 1983, 1989, 1993 e 2016.

Nas Figuras 4.11 e 4.12, agora com os intervalos de EMA exclusivamente referentes aos Ciclos Lunares, nas periodicidades de 9 anos para a EMA rápida, 19 anos para a lenta e 4 anos para a de Sinal, percebe-se, à semelhança da análise das variáveis anteriores, que a Linha de Sinal acompanha a Linha da MACD bem mais intimamente, tendo, mais uma vez, como principais efeitos, um número maior de Crossovers de Sinal e um Histograma menos preciso.

Os Crossovers de Centro são ainda mais numerosos, e, via de regra, quando precedem os do conjunto misto, fazem-no discretamente, equivalendo a menos de um ano de antecedência. As exceções são o CC de 1940, que, na Figura 4.10, ocorre em 1941 e, ainda mais cedo, o de 1977, que lá se dá apenas na divisa entre 1978-79. Três CC do tipo duplo surgem neste cenário: 1933-1934, 1936 e 1966. No último caso, o elemento *bullish* do par é de elevada significância, vez que se antecipa ao CS *bullish* do ano seguinte.

Figura 4.11 – Como na Figura 4.7, mas para São Luís/MA.

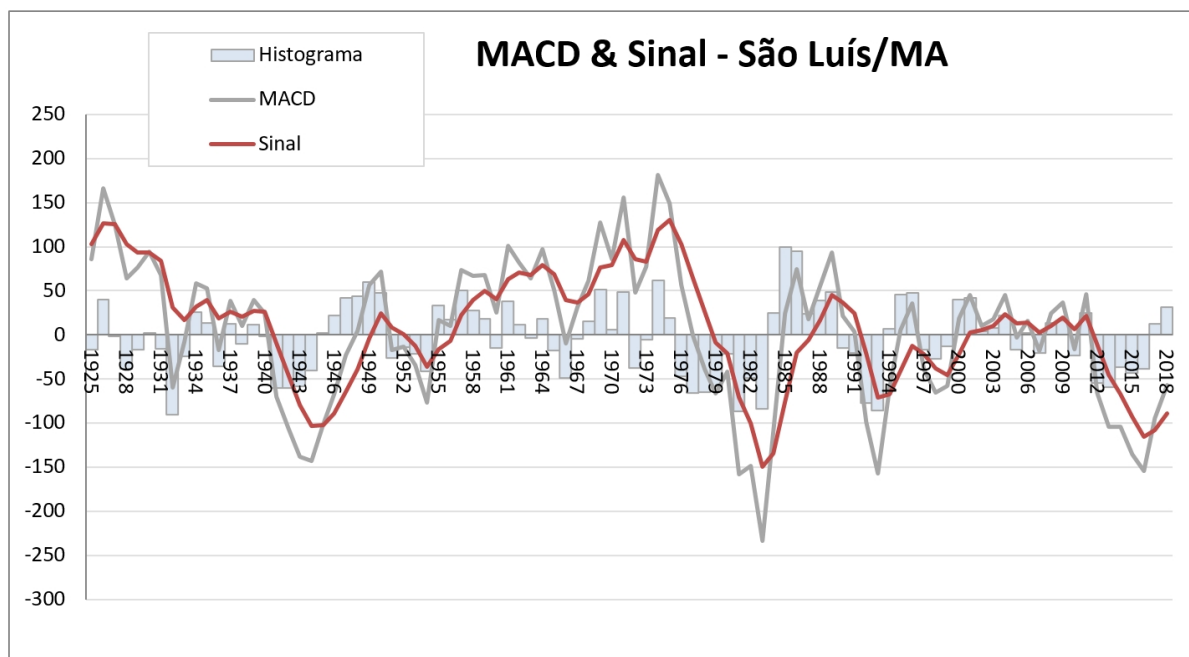


Fonte: Autor.

Também convém observar os intervalos em que a MACD do conjunto lunar indicou

flutuações de curto prazo por múltiplos Crossovers de Sinal, enquanto, nas mesmas ocasiões, a Linha de Sinal no conjunto misto apenas acompanhou ao largo as oscilações, chegando, quando muito, a tangenciá-las. Tal comportamento distinto entre os dois casos ocorreu nos períodos entre 1935 e 1940 e entre 1959 e 1964.

Figura 4.12 – Como na Figura 4.8, mas para São Luís/MA.



Fonte: Autor.

Ainda no que concerne ao Histograma e aos Crossovers de Sinal, é digna de menção uma discreta, mas relevante, discrepância no fim da série. O penúltimo valor de Histograma era consideravelmente negativo no conjunto misto, mas chega a ser ligeiramente positivo neste último cenário, e o último valor era apenas timidamente positivo na circunstância anterior, mas já se constata evidentemente positivo aqui. Adicionando-se o parâmetro do Crossover de Sinal à análise, observa-se que isso implica na antecipação em um ano do CS *bullish* correspondente, aqui se expressando já em 2017; lá, apenas em 2018. Destarte, uma correta leitura dos gráficos implica em que, para o conjunto misto de EMA (Figura 4.10), o acentuado aumento de precipitação registrado em 2017 não foi suficiente para sinalizar, ainda, uma mudança com relevância de médio ou longo prazo no regime pluviométrico da cidade, mas o foi para o conjunto lunar de EMA (Figura 4.12), mudança tal ainda ratificada pelo dado de 2018, para este mesmo cenário.

4.4 Totais Pluviométricos Anuais de Barreiras/BA

Outra série pluviométrica histórica, compreendendo mais de um século de dados, é submetida ao indicador técnico MACD e à pluralidade de seus parâmetros. De longitude ainda um pouco mais ocidental que São Luís/MA, Barreiras/BA é a série mais a oeste de todo o NEB a ter sua pluviometria analisada segundo o escopo deste estudo, e, por larga margem, a mais austral, sendo efetiva representante do SNEB, mormente de sua parte ocidental, em zona de transição entre a Caatinga e o Cerrado, sendo considerado o mais importante polo urbano, político, econômico e tecnológico do oeste do estado da Bahia, o maior do NEB, mas de economia centrada no primeiro setor (agricultura e pecuária). A estação, assim, congrega propriedades climatológicas do SNEB e do SANEB, porém já sob certa influência, também, de biomas característicos da região Norte do Brasil.

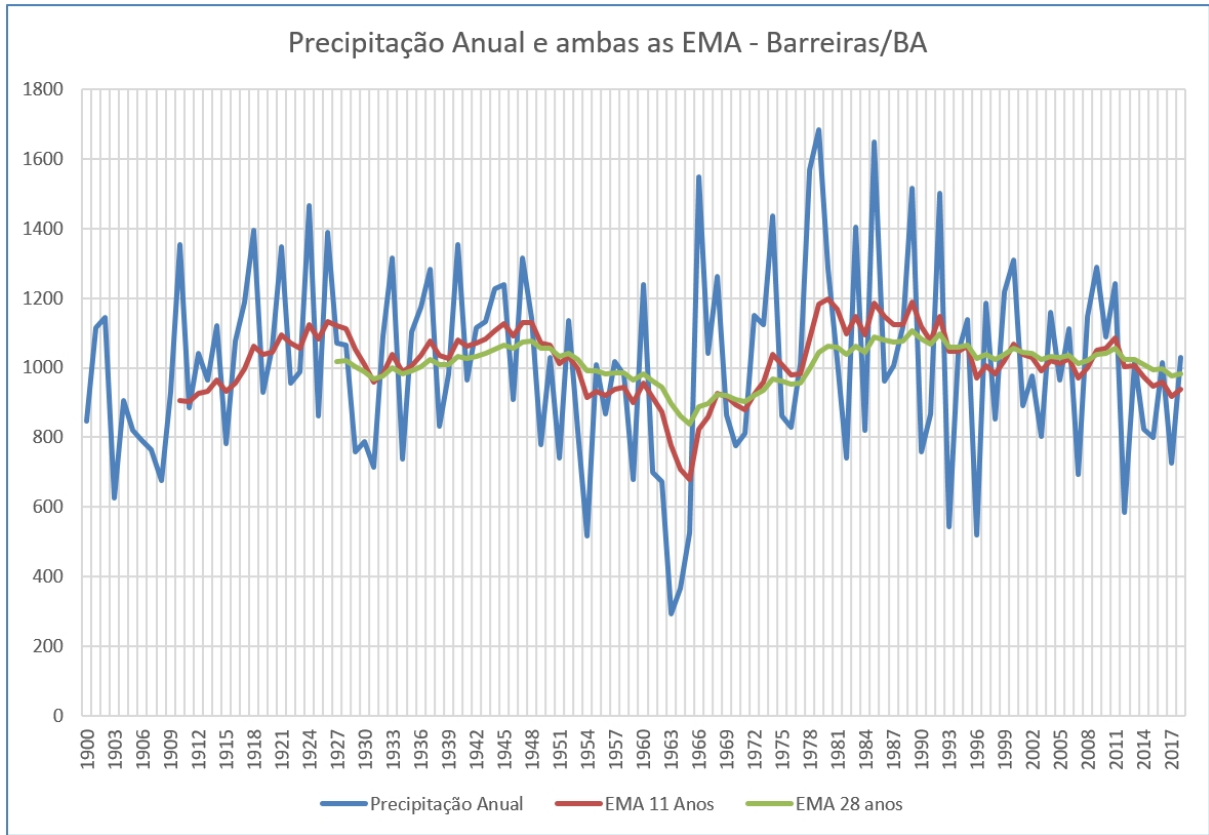
As Figuras 4.13 e 4.14 correspondem à implementação do conjunto misto (Sol, Lua e ODP) de intervalos de EMA. Curiosamente, esta é, ao mesmo tempo, a série que apresenta o menor número de Crossovers de Centro para este conjunto de EMA, mas também uma das que exibem o maior número de Crossovers de Sinal para os mesmos parâmetros. Para reforçar ainda mais a natureza peculiar da série, ainda a respeito dos Crossovers de Centro, é uma das que possuem os maiores intervalos entre CC subsequentes, com 18 anos separando o CC *bullish* de 1932 do CC *bearish* de 1950, 18 anos separando este do CC *bullish* de 1968, e 21 anos se interpondo entre o CC *bullish* de 1972 e o CC *bearish* de 1993.

Em termos de eficiência dos Crossovers de Centro no que diz respeito à sua concomitância com outros parâmetros da técnica, esta foi mais apreciável no fim da série, para os dados de 2000 em diante, isto é, bem mais no século XXI que no XX.

No que concerne aos Crossovers de Sinal, serviram para acusar as flutuações de curto prazo ignoradas pelos Crossovers de Centro – dentro das tendências de longo prazo cujos princípios e fins foram demarcados por esses – e também para antever, com frequência, as inflexões indicadas por eles (os CC). Assim, por exemplo, o CS *bearish* de 1948 precedeu o CC de 1950 de mesmo sinal, o CS *bullish* de 1966 se antecipou em dois anos o CC *bullish* de 1968, e o CS *bearish* de 1989-90 anteviu em pelo menos 3 anos a reversão sinalizada pelo CC de 1993.

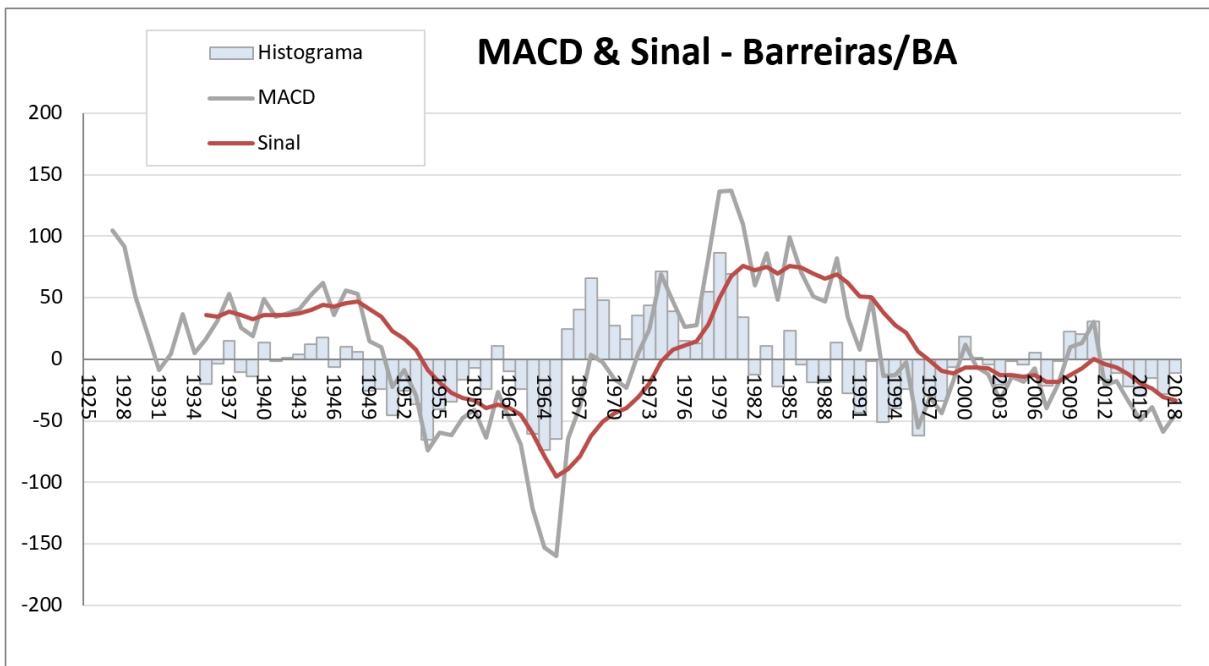
Com respeito ao Histograma, foi bastante impreciso, mais uma vez, nos períodos de variações interanuais abruptas, como nos anos 1980 e a partir dos anos 2000, mas meritoso nos intervalos de maior suavidade, em que variações mais tênues, mas significativas, dentro

Figura 4.13 – Como na Figura 4.5, mas para Barreiras/BA.



Fonte: Autor.

Figura 4.14 – Como na Figura 4.6, mas para Barreiras/BA.

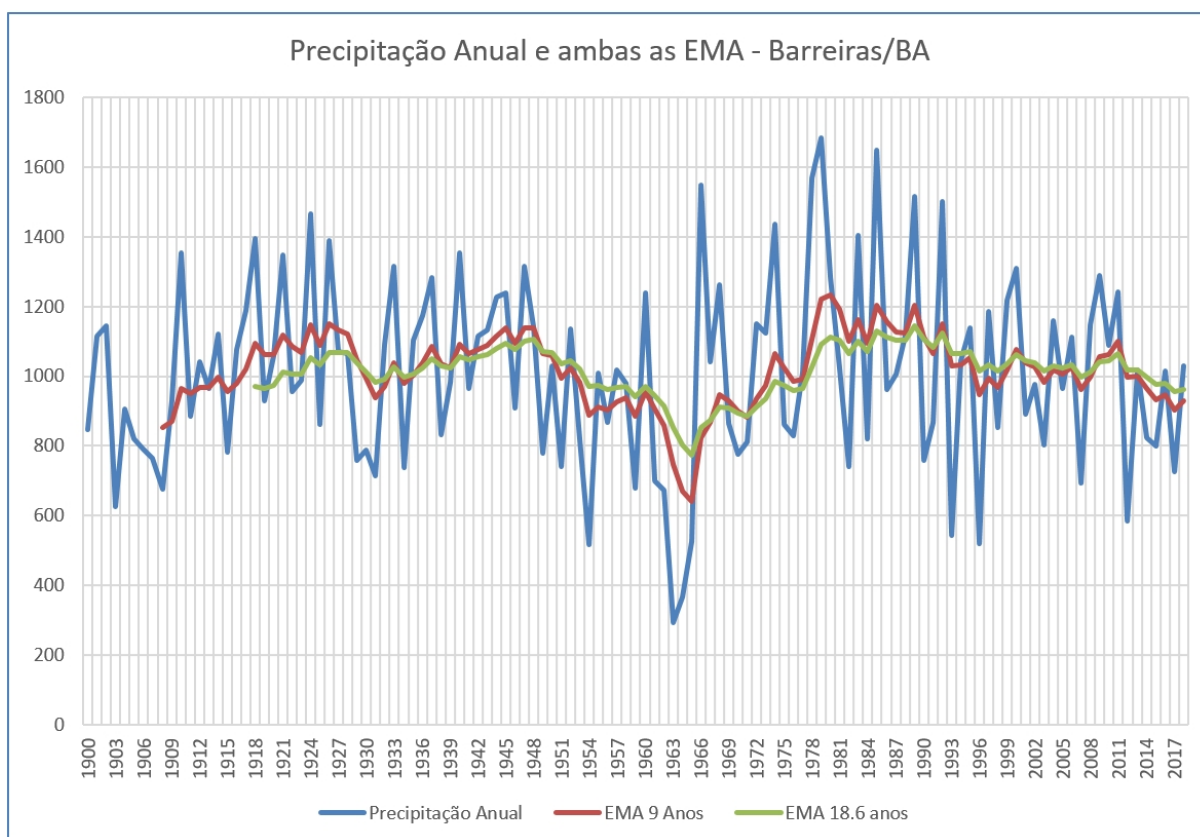


Fonte: Autor.

de uma tendência de maior escala, passaram despercebidas pelos parâmetros de cruzamento, fossem eles de centro ou de sinal. Nesse sentido, digno de nota foi o sinal *bullish* de 1955 a 1958, sinalizando uma tendência menor de alta que perduraria por aqueles 3 anos e traria alívio dentro da tendência de uma tendência global de queda que se imporá ainda por cerca de uma década. Em relação às subidas, descidas intensas e divergências, exerceram papel semelhante ao do Histograma, assinalando máximos e mínimos na série que, em sua maioria, teriam sido de útil percepção por parte de um analista, como os havidos em 1954, 1980, 1996, 2007 e 2011, além do de 2017, confirmado por um sinal *bullish* do Histograma em 2018.

As Figuras 4.15 e 4.16 trazem graficamente os resultados segundo a aplicação das EMA alusivas aos ciclos orbitais lunares. Como já pacificado pelas análises anteriores, o número de cruzamentos é aumentado, muito especialmente aqueles entre a Linha de Sinal e a Linha da MACD (CS).

Figura 4.15 – Como na Figura 4.7, mas para Barreiras/BA.



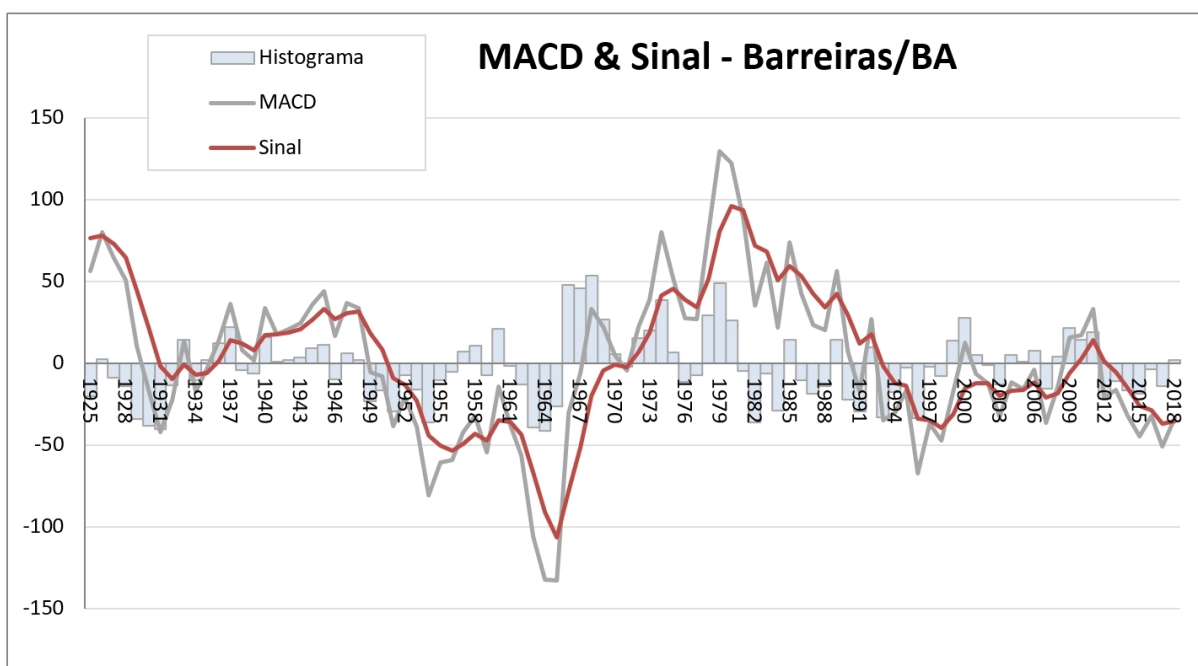
Fonte: Autor.

Os Crossovers de Centro têm seu desempenho melhorado, principalmente, na primeira metade da série. Os maiores destaques são para o CC de 1949, de sinal *bearish*, que, no

conjunto anterior, só ocorreria na transição entre 1950 e 1951, o CC *bullish* de 1967, que lá só ocorre em 1968, e o CC *bearish* de 1929, que lá se dá apenas em 1931. Aliás, com respeito a esses dois últimos casos, vale realçar que ambos, no conjunto anterior (melhor visualizado na Figura 4.14, eram do tipo duplo – um *bearish* seguido de um *bullish* em 1931, e o contrário ocorrendo em 1968 – enquanto, aqui, ambos os pares de tendência foram melhor resolvidos, apresentados em maior definição, com as pernas ascendente e descendente (em relação à Linha Central) separadas em alguns anos.

Curioso observar que, com relação aos Crossovers de Sinal, embora mais numerosos e indicadores de bem mais variações de curto prazo (até mesmo interanuais), um par aqui deixa de ocorrer, produzindo exatamente o efeito inverso ao esperado e observado como regra, isto é, acaba filtrando uma dessas variações de menor duração e amplitude. Isto ocorreu em meados dos anos de 1980, quando os CS havidos nas transições 1982-83 e 1983-84, na Figura 4.14, deixaram de existir na Figura 4.16.

Figura 4.16 – Como na Figura 4.8, mas para Barreiras/BA.



Fonte: Autor.

Assim como ocorrera com as análises anteriores sobre os resultados do conjunto lunar de EMA, o Histograma decepciona pela hipersensibilidade, tornando-se de aptidão inferior em relação ao do conjunto misto, e os picos intensos não oferecem vantagem na mesma comparação. Por outro lado, alguns CS, antecedem os daquela configuração e substituem o

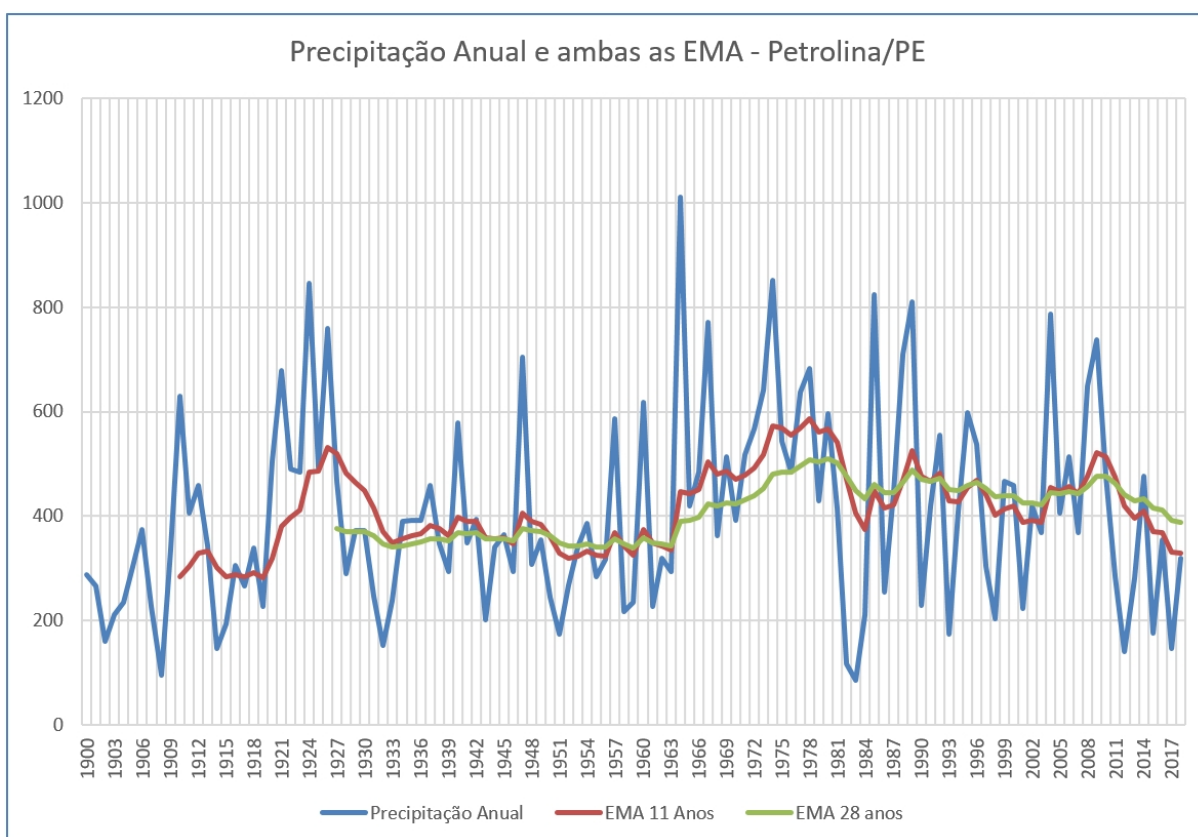
Histograma ao promover os respectivos sinais, como em 1956, 1965, 1974 e 1980 e 2018.

4.5. Totais Pluviométricos Anuais de Petrolina/PE

Última série pluviométrica a submeter-se a uma análise técnica via MACD neste estudo, para rigorosa dissecação de sua variabilidade, consoante seus parâmetros, Petrolina/PE, situada no coração do semiárido nordestino, é uma genuína representante do SANEB. Situada ao extremo sul do estado de Pernambuco, separada de sua cidade “gêmea”, Juazeiro/BA – com a qual constitui um importante polo urbano no sertão – pelo Rio São Francisco, não estando distante da usina hidrelétrica de Sobradinho e sua imensa represa.

Em observância à ordem de apresentação dos resultados seguida até aqui, as Figuras 4.17 e 4.18 permitem, inicialmente, a visualização gráfica dos resultados obtidos pela aplicação das EMA mistas à série (11-28-9).

Figura 4.17 – Como na Figura 4.5, mas para Petrolina/PE.



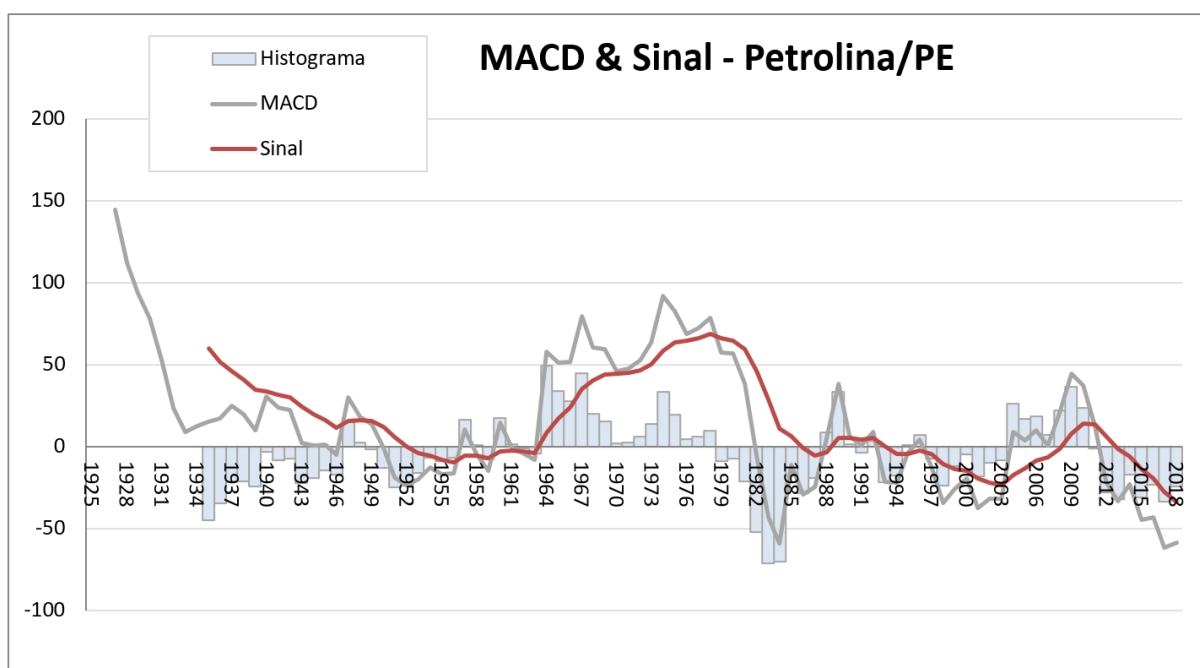
Fonte: Autor.

Um razoável número de Crossovers de Centro se faz presente, a maioria sem muito

atraso em relação aos Crossovers de Sinal. Via de regra, ocorrem menos de um ano após os seus pares do outro tipo. Algumas exceções, entretanto, são dignas de realce, por precederem, ainda que por menos de um ano inteiro os respectivos CS: 1946, 1958 e 1961. Todavia, trata-se de cruzamentos duplos, em que já se espera um comportamento assim, isto é, a segunda “perna” tende a preceder o CS de mesmo sinal, que, por vezes, sequer existe, pois tende a filtrar essa flutuação.

Por outras razões, alguns CC têm menção merecida na presente análise discursiva. O CC *bullish* de 1963 e o CC *bearish* de 1982, intercalaram um período relativamente longo (19 anos) de prevalência de um dado comportamento da variável, assim como o CC *bearish* de 1992 e o CC *bullish* de 2004 demarcaram início e fim de um outro (12 anos), de comportamento oposto – com a ressalva de que o tímido CC duplo de 1996 deve ser, para que se chegue a tal conclusão, ignorado – havendo ainda um terceiro período notável, delimitado entre o CC *bullish* de 2004 e o CC *bearish* de 2012.

Figura 4.18 – Como na Figura 4.6, mas para Petrolina/PE.



Fonte: Autor.

Os Crossovers de Sinal são, surpreendentemente, na série de Petrolina/PE, quase todos, simultâneos aos centrais, de tal forma, que são quase dispensáveis, se considerados apenas enquanto cruzamentos *per se*, mas não se pode negligenciar uma outra importante função, secundária, decorrente de sua natureza, que é a geração do Histograma. Antes de

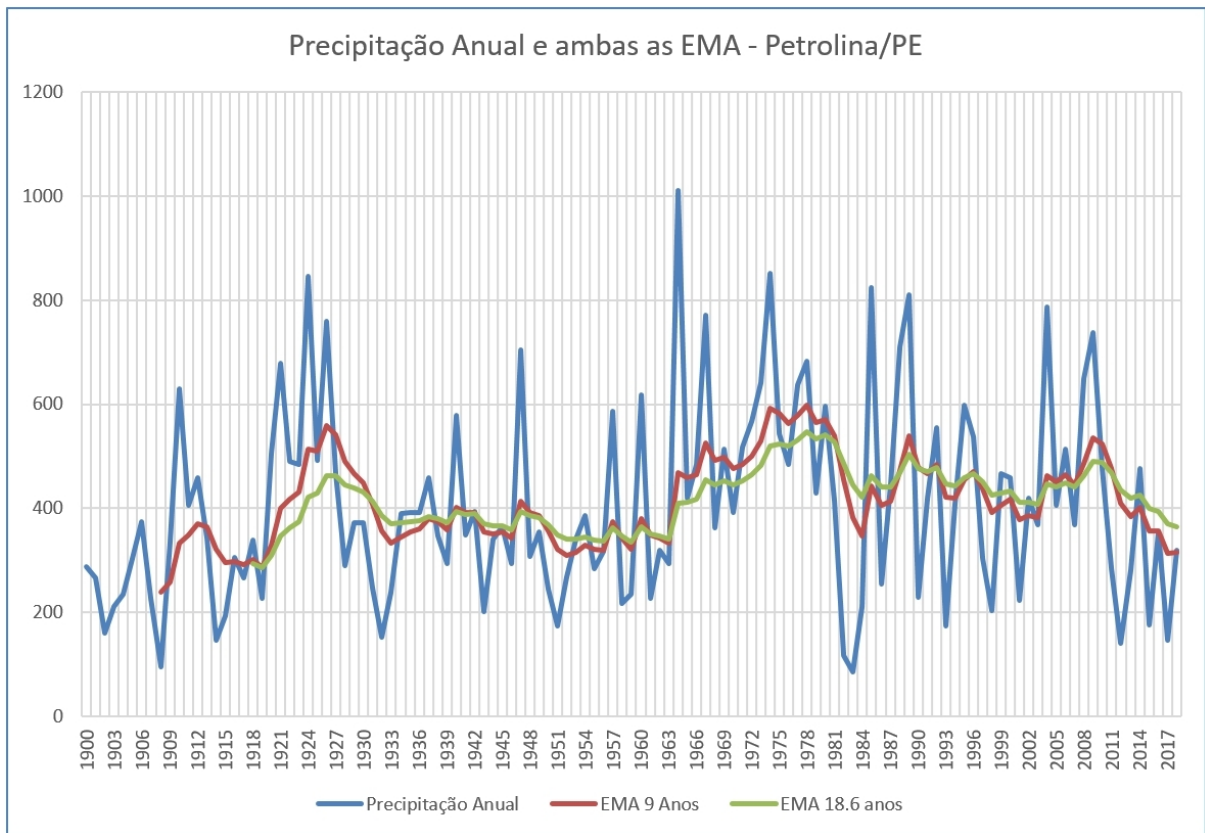
discorrer sobre este, todavia, convém pontuar os desempenhos mais satisfatórios, que, nesse caso, ante o já exposto, foram exceções. Por este critério, há o CS *bearish* de 1948, o CS *bearish* de 1978-79, o também *bearish* de 1990, o *bullish* de 2003, e o *bearish* de 2011, antecipando-se a seus pares centrais de 1950, 1982, 1992, 2004 e 2012, respectivamente; estes quatro últimos, a propósito, mencionados no parágrafo precedente como demarcando períodos importantes que, se tendo seus limites, de modo diverso, delimitados pelos CS aqui mencionados, seriam ligeiramente alterados em sua extensão.

O Histograma teve aqui um dos desempenhos mais louváveis entre todas as séries, acusando oscilações de menor prazo no interior de tendências globais mais persistentes, como as referidas, e antevendo algumas inflexões, como o sinal *bullish* em 1953 (CS de mesmo sinal somente ocorreria em 1956), o sinal também *bullish* de 1985 (CS se manifestaria apenas em 1988), e o sinal *bullish* ao fim da série, em 2018, de potencial relevância, especialmente por haver um pico negativo intenso no ano anterior.

Concluindo a seção, os resultados decorrentes da implementação do conjunto lunar de EMA à série histórica de Petrolina são exibidos às Figuras 4.19 e 4.20. Aqui, os cruzamentos centrais permanecem virtualmente concomitantes aos obtidos pela aplicação dos parâmetros anteriores, apenas ocorrem em maior número.

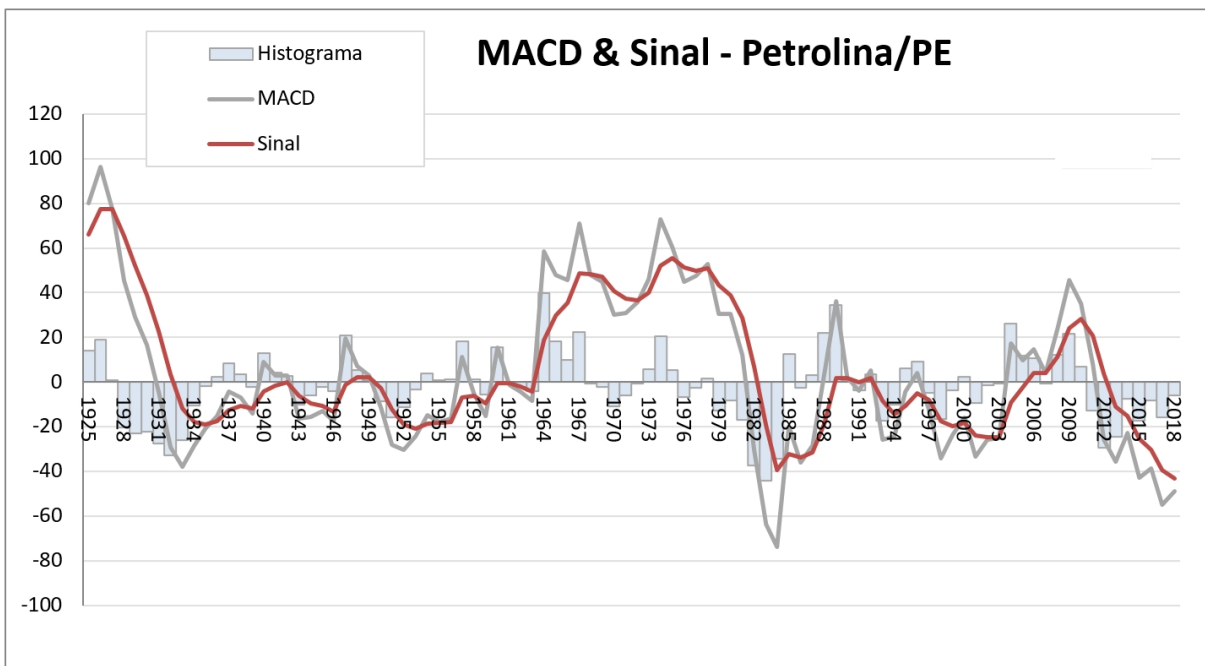
Os Crossovers de Sinal apresentam, aqui, o maior aumento relativo em número, na comparação com as circunstâncias antecedentes. Percebe-se que fracionam os períodos mais longos de persistência de uma dada tendência ou comportamento, denotando suas oscilações de menor prazo, uma tarefa outrora levada a cabo pelo Histograma. Isso ocorre, por exemplo, com os novos CS de 1968 (*bearish*), 1972 (*bullish*) e 1975 (*bearish*). Já os períodos de 2003 a 2011 e daí em diante permanecem sem cruzamentos intermediários, sejam do tipo central ou de sinal. Ao fim da série, no entanto, observa-se uma importante discrepância: o sinal *bullish* do Histograma na Figura 4.18, ressaltado alguns parágrafos acima, aqui se mostra mais proeminente (coluna negativa de menor tamanho/valor), e a distância entre a Linha de Sinal e a Linha da MACD, naturalmente, bem menor, possivelmente, ensaiando um CS do tipo *bullish*. Do ponto de vista geral, o Histograma, mais uma vez confuso e quase dispensado pelos CS, exibiu alguns raros sinais dignos de apreço, como em 1933, quando se antecipou ao CS *bullish* de 1935 que, aliás, em dupla com o CS precedente, de 1927, demarcou um período de médio prazo de baixos valores de precipitação, o que teria sido impossível de se visualizar pela aplicação do conjunto misto de EMA, dada a maior perda de dados iniciais para confecção das primeiras médias.

Figura 4.19 – Como na Figura 4.7, mas para Petrolina/PE.



Fonte: Autor.

Figura 4.20 – Como na Figura 4.8, mas para Petrolina/PE.



Fonte: Autor.

5. DISCUSSÃO

Considerando que, efetivamente, argumentações e comentários introdutórios já foram, devida e oportunamente, realizados nas seções de revisão bibliográfica e de apresentação dos resultados, discorrer-se-á, aqui, concisamente, a título de complemento, sobre o desempenho da técnica metodológica empregada no estudo, realçando as circunstâncias em que operou com excelência ou mostrou suas vulnerabilidades e deficiências, elucidando, assim, o modo pelo qual pode ser melhor aproveitada no âmbito da Climatologia.

Também será referenciada uma significativa porção dos trabalhos apresentados na revisão bibliográfica, a fim de patentemente estabelecer as relações entre as diversas áreas e melhor embasar as interpretações dos resultados e prognósticos para o futuro, explorando, inclusive, as relações entre a variável climatológica aqui dissecada pela técnica e suas forçantes externas ou internas ao sistema oceano-atmosfera, e os mecanismos pelos quais atuam.

Procedendo-se a uma avaliação dos variados parâmetros técnicos da MACD, é prudente deter-se, inicialmente, às particularidades inerentes a cada um dos dois tipos de visualizadores gráficos que compõem o indicador. Conforme comentado quando da apresentação dos resultados (seção 4), os gráficos exibidos às Figuras de numeração ímpar na referida seção são a face mais elementar da técnica. Neles, os únicos parâmetros visíveis a fornecerem sinais capazes de fundamentarem efetiva interpretação são os cruzamentos entre as duas EMA (rápida e lenta), e as divergências entre ambas, que tendem a se alternar. Entretanto, ambos os parâmetros (cruzamentos e divergências) são também exibidos, e até observados com melhor resolução, no outro gráfico decorrente das definições da MACD (Figuras de numeração par na seção de Resultados). Na segunda forma, as divergências entre as EMA originais são vistas como picos intensos da Linha da MACD, quer negativos (correspondentes a divergências do tipo *bullish*), quer positivos (correspondentes a divergências do tipo *bearish*), e os cruzamentos entre as EMA são observados como cruzamentos da Linha da MACD com a Linha Zero, ou Central, dando origem ao termo “Crossovers de Centro”. Conclui-se que a única real vantagem do primeiro gráfico é expor, simultaneamente às EMA, a variável original, que, neste estudo, são os totais anuais de precipitação. Mas, mesmo esse dado, pode ser deduzido a partir da segunda forma de visualização, a ponto de quase poder-se prescindir da primeira.

De forma coerente à análise inicial empreendida na seção de Resultados, os comentários aqui desenvolvidos se aterão, via de regra, à segunda forma gráfica do indicador técnico, na qual se vislumbra os Crossovers de Centro, os Crossovers de Sinal, o Histograma, e os Picos Intensos.

Acerca destes últimos, também denominados originalmente de “Subidas” ou “Descidas” intensas, tendem, de fato, a assinalar máximos ou mínimos na série, respectivamente, sejam absolutos ou relativos, gerando, para o analista, a natural interpretação de que o valor subira ou descera demasiadamente, e que logo tenderá a voltar a valores medianos. No mercado de ações, berço da MACD, diz-se de tais circunstâncias que a ação ou commodity está “precificada” demais (quando em valor acentuadamente alto) ou “descontada” demais (quando em valor demasiadamente baixo), e que logo o mercado fará um “ajuste”. Tal percepção é intuitiva e, portanto, de fácil observação e interpretação. Entretanto, mesmo naquele ambiente, “marcar uma posição” (outra expressão de lá proveniente) com base apenas nisso é sobremodo temerário; daí o surgimento da MACD e outras técnicas de previsão. No presente caso, do emprego da ferramenta aos dados de uma variável climatológica, o uso de parâmetros mais fidedignos da própria técnica – como os cruzamentos ou o histograma – se faz também necessário, sendo também desejável, evidentemente, o uso aliado ao conhecimento teórico acerca dos padrões dos variados modos de oscilação oceânico-atmosférica e outras forçantes que sabidamente regem a variabilidade climática daquele índice nas escalas temporais relevantes para o estudo, o que seria análogo à análise “fundamentalista” no ambiente do mercado financeiro.

Aludindo, ainda, aos picos intensos, um destaque é devido a uma descida intensa ocorrida na série de São Luís/MA, em 2016 (Figura 4.10). É louvável que, na ocasião, mesmo com o Histograma crescendo apenas timidamente o seu valor negativo em relação a 2015, a linha da MACD desceu sobremaneira – naturalmente, em resposta a uma elevada divergência *bearish* entre as EMA da variável original – mas de tal modo que qualquer analista reconheceria a atipicidade desse comportamento e, considerando também o incomum longo período de aridez que vinha vitimando a região, concluiria que o valor não poderia se manter tão negativamente alto no ano seguinte e que, portanto, aquela grande seca se acercava do ansiado fim.

O parâmetro do Histograma, por sua vez, como introdutoriamente comentado na seção de Resultados, auxilia na percepção dessas alterações (também denotadas por picos intensos) e mesmo a conferir mais segurança na previsão de reversões que se dão previamente a um

Crossover de Sinal, de modo que, em desejando-se efetuar uma previsão na ausência de um CS, é prudente aguardar, ao menos, a manifestação conjunta dos dois outros parâmetros que costumam precedê-lo, tornando-se desejável a confirmação, pelo Histograma, de um sinal emitido por um pico intenso, que normalmente virá no ano seguinte, nos casos de uma inflexão, de fato, na série, e não apenas um “alarme falso”.

Na comparação entre os cruzamentos centrais e de sinal, observa-se, em linhas gerais, que os Crossovers de Centro são naturalmente mais lentos, na maioria dos casos, que os Crossovers de Sinal, e que estes tendem a filtrar oscilações menos expressivas (a julgar-se pela amplitude ou pela escala temporal). Na série de Maceió/AL, por exemplo, Figura 4.2, cinco CC ocorreram no curto intervalo entre 2007 e 2011, mas com total indiferença do parâmetro de CS. A interpretação é de que as variações foram pequenas e de forma alternada no período, estando, as EMA da variável original, muito próximas e cruzando-se mutuamente reiteradas vezes, não sendo observada a mesma interação entre a linha MACD e a linha de Sinal, vez que a função de uma interação dessa natureza (Crossovers de Sinal) é, como fora anteriormente comentado, a de oscilador de *momentum*, de tal forma que o fato de não haver CS no período implica em que a tendência global de queda em relação ao período precedente persistiria, e as variações indicadas pelos CC não passariam de flutuações de curto prazo, i.e., prolongada variabilidade interanual, mas de baixa expressividade, ou amplitude. Contudo, também é mister notar o fugaz esboço de um CS *bullish* em 2011. Isto ocorreu devido à alta relativa na precipitação havida especificamente àquele ano, por força de um episódio de La Niña, apontado por Marengo et al. (2017), exatamente, como o responsável por interromper a tendência de aridez no período, mas apenas momentaneamente. Entretanto, de modo admirável, a MACD não chegou a concretizar o CS *bullish*, como se ciente fosse da seca prolongada que se abateria sobre a região nos 4 anos seguintes (2012-2016), que viria a ser classificada como uma das mais importantes e longas secas experimentadas pelo NEB em todo o registro histórico (Marengo et al. 2017).

Um comportamento semelhante (filtragem por CS) ocorrera na mesma série, da cidade de Maceió/AL (ainda na Figura 4.2), no período de 1951 a 1963, em que três CC foram registrados, sem manifestação de um único CS.

Também em Natal/RN (Figura 4.5), os Crossovers de Sinal foram eficientes em determinar, com segurança, início e fim de distendidos períodos de comportamentos anômalos de viés positivo ou negativo da variável, filtrando os ruídos internos a eles, isto é, ignorando flutuações parciais em favor da tendência global, com maiores destaques para os períodos de

1941 a 1958 (seco), ignorando um CC duplo em 1950; 1959 a 1968 (úmido); 1973 a 1975 (úmido); 1976 a 1983 (seco); 1984 a 1989 (úmido); 1990 a 1999 (seco); 2000 a 2011 (úmido); e 2012 em diante (seco).

A exitosa função ora destacada dos Crossovers de Sinal é coerente com o preconizado pela literatura. Fernández-Blanco et al. (2008), para os quais a MACD é um dos melhores indicadores técnicos existentes, também exaltam esse atributo da técnica, dizendo ser capaz de “filtrar ruído aleatório e oferecer uma perspectiva suavizada” da atividade da variável, “tornando mais fácil a identificação de uma tendência”.

Via de regra, portanto, os Crossovers de Sinal denotariam lucros maiores, na bolsa de valores, para o investidor, do que os Crossovers de Centro. No presente estudo, significa a apreciável utilidade de se prever com mais antecedência e efetividade a variação nos índices de precipitação, e sem deixar-se induzir a erro por variações de natureza meramente momentânea.

São consideráveis as dissonâncias entre os resultados obtidos consoante a aplicação dos intervalos de EMA referentes ao ciclo solar de Schwabe (11 anos), à ODP (28 anos) e à precessão lunar das apsides (ou meio ciclo nodal; 9 anos), denominado anteriormente de “conjunto misto”, e aquele referido por “conjunto lunar”, por ter, naturalmente, suas EMA relativas a ciclos orbitais lunares, nomeadamente, a precessão apsidal lunar (ou meio ciclo nodal; 9 anos), o ciclo nodal lunar (18,6 anos) e o meio ciclo apsidal (4,4 anos).

A Linha de Sinal aparece mais próxima no conjunto lunar, quase que tangenciando a Linha da MACD nas ocasiões ou trechos em que, no conjunto misto, é distante, ou chegando a promover Crossovers de Sinal quando, lá, já se apresentava próxima. Assim, para o conjunto lunar, há um maior número de cruzamentos, muito especialmente os de Sinal. Outra relevante diferença, também associada a essa menor distância da Linha de Sinal, é que esses cruzamentos, de modo geral, tendem a preceder os do conjunto misto, normalmente por meses, mas havendo exceções que podem chegar a mais de um ano e, noutros casos, até se atrasarem em relação àqueles.

A característica geral de maior antevisão dos Crossovers de Sinal no conjunto lunar pode fazê-lo soar mais atrativo, num primeiro momento. Entretanto, após empreendida a devida reflexão, em atenção aos efeitos produzidos nos outros parâmetros e no próprio CS, percebe-se que o saldo não é positivo para tal versão, não devendo, de modo algum, ser usada isoladamente.

Na série de São Luís/MA, como fora registrado à seção de Resultados, nos períodos

entre 1935 e 1940 e, novamente, entre 1959 e 1964, por exemplo, o conjunto lunar se mostrou hipersensível a oscilações de curto prazo.

Ambos são períodos em que, no conjunto misto, os CS demonstraram a devida prudência de aguardar uma concreta inflexão no regime pluviométrico. No último caso, por exemplo, houvera um CS do tipo *bullish* em 1955, acusando o início de um período de alta pluviosidade que perduraria até 1964, com um CS do tipo *bearish* em 1965 que denotaria o princípio de um regime de provável deficit hídrico para os anos seguintes. No primeiro caso, é impossível assinalar o início do regime de baixas precipitações segundo interpretado pela MACD, uma vez que a série já começa com a Linha de Sinal acima da Linha da MACD e só haveria um CS (e do tipo *bullish*, naturalmente), em 1947. Mas é razoável, com base no conjunto lunar, a conjectura de que o CS *bearish* que o precedeu teria ocorrido em 1927, i.e., um período de quase 20 anos em que a MACD do conjunto misto sabiamente ignorou flutuações menores em favor de uma tendência global, filtrando, assim, as flutuações de curto prazo, e desempenhando, com excelência, a função primaz de “oscilador de momentum”, enquanto o conjunto lunar foi assaz sensível para indicar as oscilações de menor prazo e amplitude, mas falharia em apontar inícios e fins de regimes de baixa ou alta pluviosidade no médio ou longo prazo, ou seria confuso no cumprimento dessa função, uma vez que o analista não teria um parâmetro confiável para firmar uma posição de prognóstico a esse respeito, pois os CS estariam a acusar flutuações as mínimas possíveis, frequentemente até variações interanuais.

De fato, como também se observa na série de Petrolina/PE, os Crossovers de Sinal lamentavelmente perdem sua capacidade de sinalizar comportamentos ou tendências de médio e longo prazo na pluviometria, devido à inquietantemente estreita proximidade entre a Linha de Sinal e a Linha da MACD, resultando, inclusive, no indesejável efeito de produção exacerbada de cruzamentos duplos, de interpretação sobremodo arriscada para quem tem de emitir parecer sobre condições futuras e, naturalmente, portanto, ainda desconhecidas.

Devido à hipersensibilidade aqui apontada da Linha de Sinal, além de uma maior profusão de Crossovers de Sinal, tem-se um Histograma mais dúbio e impreciso no conjunto lunar. Curioso observar, todavia, na série de Natal/RN, que os CS no conjunto lunar caem, por vezes, nos períodos em que, no conjunto misto, ocorrem os sinais por Histograma. Destarte, se, por um lado, têm-se atenuada a relevância de um parâmetro – o Histograma, por torná-lo menos expressivo com a EMA demasiado curta, de 4 anos – por outro, ganha-se na antecipação dos sinais por um outro parâmetro, o dos Crossovers de Sinal, de modo que estes,

antecedendo seus pares no conjunto misto, acabam por fornecer substitutos profícuos, nalgumas ocasiões.

Discorrendo agora a respeito das diferenças de comportamento, diante da técnica, havidas entre as séries concernentes à pluviometria de cada região, nota-se, com maior clareza, *a priori*, uma maior suavidade geral nas duas cidades interioranas, em comparação às três litorâneas, e naquelas, por vezes, o parâmetro dos Crossovers de Centro são mais efetivos em filtrar flutuações de menor prazo, abstendo-se de manifestar-se nestes casos, relegando o papel de indicá-las aos Crossovers de Sinal.

Exemplos ocorrem, na série de Barreiras/BA (Figura 4.14), entre o CC *bullish* de 1932 do CC *bearish* de 1950, entre este e o CC *bullish* de 1968, e entre o CC *bullish* de 1972 e o CC *bearish* de 1993, com intervalos de 18 anos nos dois primeiros casos e de 21 anos no terceiro.

Uma atenta e diligente análise sob o prisma climatológico atribuiria um caráter de maior suavidade à série, mormente, nesses dois grandes períodos, com a MACD reconhecendo a coerência denotada pela pluviometria da região em obediência a forçantes que impuseram duas únicas alternâncias de regimes de longo prazo, entre estiagem e abundância de chuvas, ao longo de todo aquele período, isto é, de 1932 a 1993.

Em Petrolina/PE, alguns cruzamentos centrais exemplificam o mesmo comportamento, como o par *bullish-bearish* de 1963-1982, intercalando um período de 19 anos, os ocorridos em 1992 e 2004, demarcando período de 12 anos de sinal oposto, e a sucessão do CC *bullish* de 2004 pelo CC *bearish* de 2012. Julgando-se pelos CS, entretanto, há uma ligeira alteração na extensão dos últimos períodos, que seriam de 1978 a 1990, de 1990 a 2003 e de 2003 a 2012.

Curioso notar que o período de chuvas mais generosas (sinal *bullish*) delimitado pelos CS de 1963 e 1982 em Petrolina/PE quase coincide com um período denotado pelo mesmo parâmetro em Barreiras/BA (1965-1982).

Nesse sentido, é mais que oportuno notar a inequívoca a dominância da periodicidade de 18-21 anos nos períodos acima delineados, com auxílio da MACD, para a série de Barreiras/BA, compreendendo uma generosa porção do século XX, denotando uma clara influência do ciclo lunar nodal (18,6 anos) e/ou do ciclo solar de Hale (22 anos), conferindo ainda mais valor à técnica da MACD, na forma de um “bônus”, uma vez que, mesmo não sendo esse um de seus atributos naturais (o de identificar periodicidades nas séries), acabou atuando, com louvor, para tal fim. As mesmas periodicidades são encontradas na série de

Petrolina/PE, especialmente no período de 1963 a 1982, observando-se, também, o sinal solar relativo ao ciclo de Schwabe (11 anos), entre 1978 a 2012, em que dois períodos úmidos com aproximadamente 11 anos de extensão, intercalam um período mais seco, nos anos 1990, em que houve prevalência geral de eventos El Niño, culminando com o evento extremo de 1997-98.

Também nas cidades costeiras do ENEB ora estudadas (Maceió/AL e Natal/RN) – talvez até mais especialmente nelas – é devidamente identificada pela MACD a escala de 11 anos; em Natal/RN, as variações de mais alta frequência foram melhor filtradas, sendo mais patentemente reconhecível. Em tal série, avaliada segundo o conjunto misto de EMA (Figura 4.6), nota-se que, de 1976 até o presente, houve não mais que cinco Crossovers de Sinal, espaçados, em média, por essa escala temporal. O CS *bearish* de 1976 e o CS *bullish* de 1984 intercalaram um período de baixa pluviosidade; o CS *bullish* de 1984 e o CS *bearish* de 1990, um de altas precipitações; e, a partir de 1990, o sinal de 11 anos se torna ainda mais evidente, com o CS *bearish* daquele ano sinalizando um período de seca predominante que perduraria até o ano 2000, quando um CS *bullish* indicaria a reversão de tendência, para uma nova condição climatológica, mais úmida, que se estenderia até 2011, quando um novo CS, do tipo *bearish*, acusaria o princípio do mais recente período de estresse hídrico, iniciado no ano seguinte.

Com efeito, Barbosa et al. (2006) encontraram respostas condizentes – aos períodos secos e úmidos sinalizados pela MACD e acima referidos – no NDVI da região, notando uma tendência de queda no verdor da vegetação de 1993 a 1999, em contraste a uma tendência de aumento, na mesma variável, observada de 1984 a 1990.

Convém lembrar que diversos outros autores reportaram a periodicidade de 11 anos para variáveis climatológicas ao redor do globo (Solanki et al. 2006; Haigh, 2007; Scafetta, 2010, 2012; Davis & Brewer, 2011; Morton, 2014; Abdussamatov, 2015; Soon et al. 2015; Zhou et al. 2016; Svensmark et al. 2009, 2016, 2017; Oliveira et al. 2017; Huo & Xiao, 2017; Maruyama et al. 2017; Stozkhov, 2017) e também no NEB e adjacências (Sampaio Ferraz, 1950; Kousky & Chu, 1978; Molion & Bernardo, 2002; Lyra et al. 2016; Da Silva, 2017). Marengo et al. (2017), por exemplo, paralelamente, cita os anos de 1989, 1999 e 2009 como particularmente úmidos na Amazônia, o que sugere mais um exemplo de influência solar, na pluviometria, de uma região climatologicamente vizinha.

Já a periodicidade bidecadal, acima observada nas séries de Barreiras/BA e Petrolina/PE, também fora identificada por alguns autores precedentes, inclusive, no NEB

(Kousky & Chu, 1978; Da Silva, 2017), embora a relação com o ciclo nodal não tenha sido explicitamente nomeada.

A título de exemplo, Da Silva (2017) encontrou, para todas as capitais de UF do ENEB, a escala temporal de 20,2-22 anos, mas, como melhor hipótese, a autora a atribui à ODP. Todavia, convém realçar, aqui, a maior coincidência de valores com as forçantes ora defendidas, isto é, o ciclo da polaridade solar de Hale (22 anos) e o ciclo nodal lunar (18,6 anos), observando-se, ainda, que a escala de 20,2 anos, tantas vezes encontrada por aquele trabalho, situa-se, admiravelmente, quase exatamente, na média entre aqueles dois ciclos, que corresponderia, precisamente, a 20,3, divergindo, os números, portanto, em apenas um décimo.

Retomando a análise discursiva a respeito da escala de 11 anos, vários autores (Chang et al. 1997; Lyra et al. 2016; Da Silva, 2017), a associam não somente ao ciclo magnético solar, mas também ao MMA.

Com efeito, essa mesma periodicidade (variando, entre os autores, de 10 a 13 anos) vem sendo identificada como relacionada ao Modo, como já referido na seção 2.1.5.3 (Sasaki, 2014; Mélice & Servain, 2003; Chang et al. 1997; Tourre et al. 1999; Lyra et al. 2016).

Dentre estes, Mélice & Servain (2003), segregando, em seu estudo, o Atlântico tropical nos dois hemisférios, constataram a escala de 9,6 anos para o Atlântico Norte, e a de 14 anos, para o Atlântico Sul.

Uma importante distinção identificada entre o comportamento da MACD ante as cidades litorâneas e as interioranas diz respeito às escalas decadal e bidecadal acima referidas. Como já notado anteriormente, Petrolina/PE e Barreiras/BA exibiram uma maior suavidade. Numericamente, em geral, isso implicou em que a MACD mais comumente acusou inflexões nas periodicidades bidecadais, enquanto São Luís/MA, Natal/RN e Maceió/AL raramente chegaram a exibir intervalos nessa ordem temporal, por qualquer que fosse o parâmetro da técnica, e mesmo no conjunto misto de EMA (que, como já discutido à exaustão, tende a filtrar melhor as flutuações de alta frequência).

No caso destas últimas cidades, suas séries, mais usualmente, exibiram intervalos entre Crossovers na escala decadal ou em escalas inferiores, como a de 4-5 anos e, por vezes, até a interanual (esta quase unicamente para o conjunto lunar de EMA). Postula-se, aqui, que isso se deve a uma maior proximidade do oceano, deixando-as naturalmente sujeitas ao fenômeno das BMT, que induz uma variabilidade de mais alta frequência. Isto se dá mais notoriamente no ENEB, como observado por Pontes da Silva et al. (2011); Lyra et al. (2014);

Nobre & Molion (1988); e Moura & Shukla (1981), somado ao fato de os Alísios soprarem na direção perpendicular à costa da região, como frisado por Hounsou-Gbo et al. (2015).

Ademais, e, talvez mais especialmente, situam-se em região costeira que exhibe ciclo de marés semidiurnas, com as quais há uma associação geral da influência da precessão apsidal lunar, que lhes impõe uma maior modulação de seu meio-ciclo (4,4 anos), segundo Haigh et al. (2011), exercendo, sobre a região, uma influência mais preponderante que a do ciclo nodal, como observado à Figura 2.4.3.

Acerca, ainda, do período de 4-5 anos, Sidorenkov (2016) sustenta que as configurações das posições relativas de Terra, Lua, Sol e os eixos maiores de suas órbitas (linhas das apsides) são quase repetidas a cada 4 anos, e que a amplitude das oscilações das forças de maré lunissolares muda ao longo do tempo, também, com a periodicidade de 6 anos.

Ora, tais períodos foram observados no presente estudo em quase todas as séries e, mais notadamente, naquelas correspondentes às cidades costeiras, com ainda maior clareza, em Maceió/AL. Nesta, encontram-se, por exemplo, períodos de sustentada tendência de alta ou baixa pluviosidade, demarcados por Crossovers de Sinal, entre 1963 e 1969, entre 1969 e 1974, entre 1978 e 1984, e entre 1984 e 1990. Este último, forçado pelos fortes episódios de La Niña de 1984 e 1989, e também encontrado, intercalado pelo mesmo parâmetro da MACD, nas séries de São Luís/MA e Natal/RN. E um outro período de 6 anos de extensão, mais para o fim da série, foi observado para todas as cidades, o de persistentes baixas precipitações de, *grosso modo*, 2012 a 2018, abarcando, portanto, a grande seca de 2012 a 2016 (Marengo et al. 2017; Costa et al. 2018), mas com um sinal final mais contundente da MACD, via de regra, manifestado apenas em 2018, embora o Histograma e o parâmetro dos picos intensos tenham vocalizado sinais desde pouco antes.

Voltando ao período de 4-5 anos, dada a reconhecida influência da ENOS e do Niño do Atlântico (MZA) sobre o NEB, é pertinente lembrar que esta é exatamente a escala temporal descrita na literatura como dominante para ambas as oscilações. No caso da ENOS, manifesta-se, nesse sentido, Molion (2017). Quanto ao MZA, Zebiak (1993), Tourre et al. (1999) e Sasaki (2014) chegaram a periodicidades semelhantes.

Ressalta-se, aqui, que tais modos equatoriais de oscilação atuam na direção leste-oeste e, portanto, no caso do MZA, perpendicularmente à costa leste do NEB, o mesmo ocorrendo com o outro lado do continente e sua interação com a ENOS.

Como exaustivamente demonstrado à seção de Revisão Bibliográfica (especialmente na subseção 2.1.5.1), o papel da ENOS como de caráter dominante na variabilidade

climatológica do NEB vem sendo cada vez mais debatido e contestado (Kane, 1997; Kayano & Andreoli, 2006; Rodrigues et al. 2011; Rodrigues & McPhaden, 2014), mas resiste e se fortalece o consenso a respeito da pujante influência ao menos dos episódios extremos dessa oscilação sobre o regime de precipitação na região.

De fato, os eventos mais intensos de El Niño e La Niña, havidos no período comum aos registros aqui estudados, foram apropriadamente acusados ou até previstos pela MACD, mormente, em sua aplicação às séries de Maceió/AL, Natal/RN, São Luís/MA e Petrolina/PE. Barreiras/BA, por sua vez, não forneceu similar clareza quanto a esta interpretação, possivelmente por situar-se mais ao sul e a oeste da região, praticamente na divisa do NEB com outras macrorregiões climáticas do continente, que não compartilham da mesma correlação negativa entre a ENOS e a pluviometria.

O El Niño de 1941-42 foi indicado na série de Maceió/AL por um pico intenso em 1940 em ambos os conjuntos de EMA e por um sinal *bearish* no Histograma do ano seguinte, no conjunto lunar. Em Natal/RN, um CS do tipo *bearish* ainda na transição entre 1940-41 confirmaria o sinal emitido pelo pico intenso do ano anterior. Para os dados de São Luís/MA, um CS em 1940 no conjunto lunar de EMA foi o sinal mais evidente, enquanto o conjunto misto exibiu um CC na transição entre 1940 e 1941. Em Petrolina/PE, a Linha de Sinal do conjunto misto já vinha acima da Linha da MACD, mas chegou a tangenciar o pico relativo de 1940.

O evento de 1957-58 é considerado o responsável pelo auge de uma das secas mais severas que já se abateram sobre a região, ou mesmo a mais impactante, a julgar-se pelos números absolutos do parâmetro de emigração da região, que registraram a saída de 10 milhões de pessoas do NEB (Caviedes, 2001; Barbosa et al. 2006; Marengo et al. 2017). Embora, na maioria das séries, este ano já estivesse imerso numa tendência global de queda, a MACD ainda conseguiu indicá-lo em quase todas, por ao menos um de seus parâmetros. Em Maceió/AL e Petrolina/PE, um CC *bearish* em 1957 o sinalizou efetivamente. Em Natal/RN, foi apontado por um CS *bearish* naquele mesmo ano. Em São Luís/MA, apenas o Histograma se manifestou a esse respeito, mostrando-se, essa série, mais sensível ao evento La Niña de 1955-56.

As persistentes condições de La Niña observadas entre 1973 e 1976 foram previstas na série de Maceió por um CC *bullish* já em 1971 e consecutivas colunas favoráveis do Histograma até a consolidação da tendência por um CS *bullish* em 1974 (Figura 4.2). Em Natal/RN (Figura 4.6), foram o pico negativo intenso de 1972 e os CS e CC simultâneos,

ambos de sinal *bullish*, em 1973, que sinalizaram a tendência de altas precipitações para os anos seguintes. Na série de São Luís/MA (Figura 4.10), o principal indicador foi um CS *bullish* em 1972. Para Petrolina/PE, o conjunto lunar de EMA (Figura 4.20) se mostrou mais efetivo quanto a esta inflexão, denotando-a por um CS *bullish* também em 1972.

O El Niño de 1977-78 inaugurou uma tendência de altas TSM no Pacífico (mas nem sempre acima do limiar de deflagração de El Niño), que culminaria com o forte episódio de 1982-83, em que as anomalias positivas de TSM no Pacífico oriental superaram os 2°C, e só se reverteria com as prolongadas condições de La Niña de 1984-85. As duas inflexões foram sinalizadas mais coerentemente em Maceió/AL (CS *bearish* em 1978 e CS *bullish* em 1984), Natal/RN (CS *bearish* em 1976 e CS *bullish* em 1984) e São Luís/MA (CS *bearish* em 1976 e CS *bullish* em 1984). É mister esclarecer que, aqui, se mencionou apenas o parâmetro mais efetivo da técnica (Crossovers de Sinal), mas previsões mais adiantadas seriam possíveis por sinais expressos pelos outros parâmetros, como se depreende pelos picos intensos de 1974 (positivo) e 1983 (negativo) em todas as séries mencionadas, além do acompanhamento do Histograma. A MACD exibiu comportamento semelhante, para Petrolina/PE, ao das outras séries apenas no conjunto lunar de EMA (Figura 4.20). No conjunto misto (Figura 4.18), os sinais foram mais tardios, caindo somente no auge dos respectivos episódios (CS *bearish* em 1978 e CS *bullish* em 1988), este último, possivelmente, já sinalizando o evento La Niña de 1988-89.

Os anos de 1990 apresentaram anomalias positivas de TSM no Pacífico em quase toda a primeira metade da década, com um El Niño moderado ocorrendo entre 1991-92 e, após uma tímida La Niña de 1995-96, um outro intenso El Niño, à semelhança do de 1982-83, ocorreria em 1997-98, seguido por condições de La Niña moderada que prevaleceriam de 1999 a 2001.

Segundo o parâmetro dos Crossovers de Sinal, Maceió/AL apresentou uma previsão mais extemporânea dessas variações por meio do conjunto lunar (Figura 4.4), com um CS *bearish* em 1990, seguido de um *bullish* em 1995 e um *bearish* em 1997. Natal/RN, segundo o próprio conjunto misto (Figura 4.6), já exibiu um CS *bearish* em 1990, com um pico intenso precedente já em 1988 e um sinal *bearish* no Histograma ainda em 1989, denotando desempenho digno de apreço. As flutuações intradecadais foram acompanhadas pelo Histograma, e um novo CS, do tipo *bullish*, somente ocorreria em 2000, concomitante a um Crossover Central. São Luís/MA anteviu melhor as variações por seu conjunto lunar (Figura 4.10), com CS *bearish* em 1990, *bullish* em 1994, *bearish* em 1997 e *bullish* em 1999. Em

Petrolina/PE, o conjunto lunar se mostrou impossivelmente hipersensível no período, restando recorrer unicamente ao conjunto misto, que expôs um CS *bearish* em 1992, um *bullish* em 1995, um *bearish* em 1997 e um novo *bullish* apenas em 2003.

Nos anos 2000, a ENOS mostrou uma inquietante indefinição, com prevalência geral de anomalias positivas de TSM, mas muito tímidas e raramente acima do limiar da neutralidade, sendo, portanto, temerária, qualquer tentativa de associação com sinais emitidos pela MACD. Todavia, faz-se mister registrar que Maceió/AL, São Luís/MA e Barreiras /BA exprimiram notável variabilidade de alta frequência nesse período, possivelmente refletindo aquela indefinição da ENOS, enquanto Natal/RN e Petrolina/PE indicaram uma única tendência para o período, de alta pluviosidade, intercalada por um CS *bullish* em 2000 e um *bearish* em 2011 (Natal/RN, Figura 4.6) e por um CS *bullish* em 2003 e um *bearish* em 2010 (Petrolina/PN, Figura 4.18).

As flutuações observadas acima, quanto aos anos 2000, nas séries de Maceió/AL, São Luís/MA e Barreiras/BA, em contraste a uma maior suavidade nas décadas precedentes, possibilitam conjecturar que a MACD é favorecida, ou auxiliada, em sua tarefa de apontar tendências de maior prazo quando em períodos de maior definição da ENOS em médios e longos prazos, isto é, quando de manifestações evidentes de fase da sua modulação de longo prazo – a ODP – valendo frisar que esta fora relacionada à forçante gravitacional lunar por meio do ciclo nodal (Zhang et al. 2018; Yasuda, 2009; Ullman et al. 2016; Hansen et al. 2016; Ceverny & Shaffer, 2001; McKinnell & Crawford, 2007; Molion, 2017).

Dentre esses autores, convém realçar que Hansen et al. (2016) obtiveram oscilações superiores à periodicidade exata do ciclo nodal, mas que sugerem estar relacionadas a este como múltiplos ou modulações, entre elas, uma de 27,9 anos, que é quase exatamente o período de uma fase da ODP, razão pela qual tem o valor aplicado a um dos intervalos de EMA (EMA lenta do conjunto misto) no presente estudo. Já McKinnell & Crawford (2007), assim como Molion (2017) defendem, especificamente, a relação dos períodos de mínima declinação lunar ao longo de um ciclo nodal com os episódios mais intensos de El Niño. E, de fato, os El Niño mencionados nos parágrafos acima como causadores de inícios ou picos de regimes de baixa pluviometria foram, em sua maioria, coincidentes com aquela posição orbital lunar.

Retomando, em caráter conclusivo, a discussão acerca da periodicidade solar de 11 anos observada especialmente no ENEB neste e em estudos precedentes (Da Silva, 2017; Lyra et al. 2016), é oportuno lembrar que a modulação do fluxo de RCG que atinge a atmosfera é

considerada um dos principais mecanismos físicos de interação da forçante solar com o clima terrestre (Solanki et al. 2004; Solanki et al. 2006; Haigh, 2007; Miyahara et al. 2008; Hathaway, 2010; Morton, 2014; Oliveira et al. 2017; Stozkhov, 2017; Svensmark et al. 2009, 2016, 2017), e que seu efeito na formação de nuvens pela modulação da oferta de aerossóis atmosféricos e, por conseguinte, a concentração de CCN, é desprezível nas nuvens convectivas ou de cristais de gelo, produzindo maior impacto em nuvens estratiformes oceânicas (Svensmark et al. 2017). Assim, postula-se que aí reside uma das principais razões para essa periodicidade ter sido encontrada mais veementemente nas cidades litorâneas e, ainda mais especialmente, em Maceió/AL, pois esta cidade tem o regime pluviométrico regido predominantemente por precipitação estratiforme ou de convecção rasa (Palharini & Vila, 2017), enquanto Natal/RN e São Luís/MA sofrem maior influência da convecção profunda (Palharini & Vila, 2017), característica da ZCIT, com Petrolina/PE e Barreiras/BA, além de interioranas, tendo seu regime ditado em boa parte pelo fenômeno da convecção local (Molion & Bernardo, 2002; Pontes da Silva et al. 2011) e, no caso da última, também, sazonalmente, sob influência da Alta da Bolívia (Chaves & Cavalcanti, 2001), ambos sistemas causadores de precipitação associada a convecção profunda.

Uma importante ressalva, contudo, que se faz necessária, é que Natal/RN, em geral, foi uma das séries que melhor exprimiram a periodicidade de 11 anos, em detrimento do teórico favorecimento a Maceió/AL explanado acima. A razão para tal comportamento reside na sua forte sensibilidade ao MMA, por constituir exatamente a extremidade da protuberância nordestina que se lança em direção ao Atlântico tropical/equatorial.

Encerrando a seção, é fornecida uma análise do comportamento da técnica ao fim de cada série e, por conseguinte, seus vislumbres estatísticos para os anos vindouros.

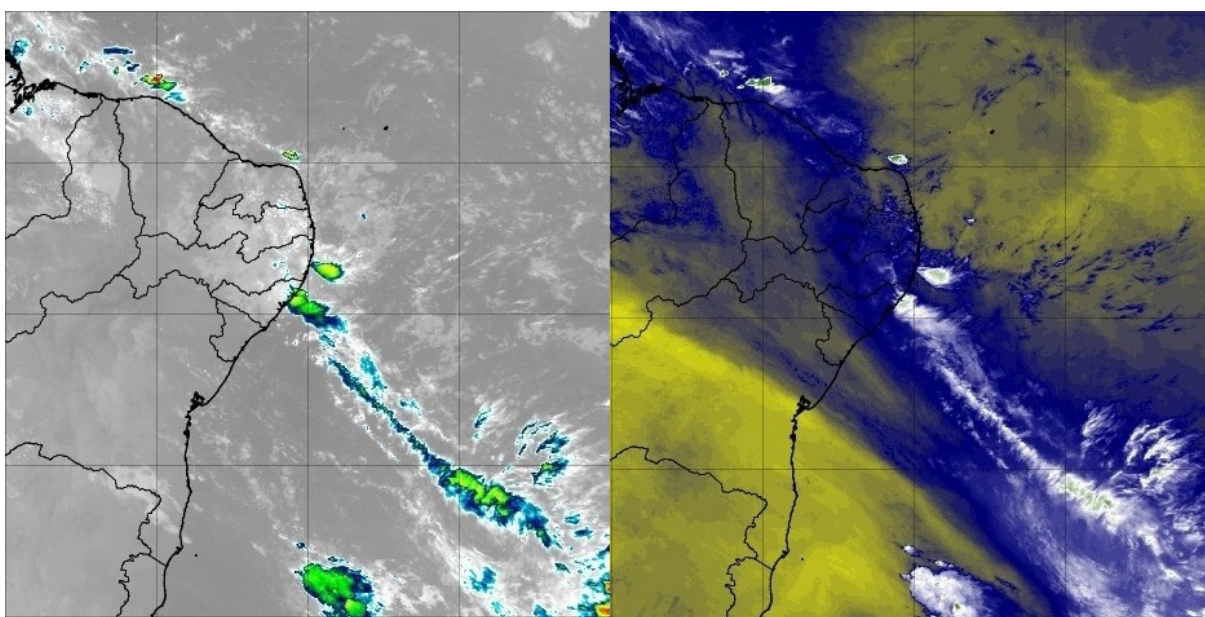
A condição climática recentemente predominante na região, sentida pela MACD em todas as séries, sem exceção, era de baixas precipitações, chegando, seu auge (2012-2016), a ser descrito como uma das piores secas já experimentadas pela região, como já referida acima, notadamente, por sua longevidade. A pergunta que se propõe à MACD é se essas condições ainda persistirão ou se acercam-se do fim, isto é, se uma nova inflexão, que sinalize a reversão da tendência recente para uma de alta pluviosidade, pode ser vislumbrada. A fim de se obter tal resposta, uma análise individual é empreendida mais criteriosamente a seguir quanto ao fim de cada série.

Para Maceió/AL, o conjunto misto de EMA, segundo o parâmetro do Crossover de Sinal, denota uma tendência de queda nas precipitações desde 2005, sem a presença de um

novo CS desde então, embora ensaios tenham ocorrido nos anos de 2011 e 2017, e flutuações de mais alta frequência tenham sido captadas por Crossovers de Centro entre 2007 e 2012. Observa-se que o Histograma, negativo desde 2005 e que vinha emitindo sinais *bearish* consistentemente de 2012 a 2016, exibiu um sinal *bullish* em 2017, após o mais intenso pico negativo de toda a série no ano anterior, que se dera em resposta ao agressivo El Niño de 2015-16. Entretanto, o Histograma voltou a se manifestar de modo *bearish* em 2018. No conjunto lunar de EMA, a tendência de queda global também se estabeleceu desde 2005, porém, devido à maior sensibilidade da Linha de Sinal, houve CS duplos (*bullish-bearish*) em 2011 e 2017, com o Histograma ligeiramente positivo, pontualmente, nesses anos. Assim, como, até no conjunto lunar, o último CS da série, na transição entre 2017 e 2018, foi do tipo *bearish*, a previsão, com base na MACD, é de que a alta pluviometria registrada em 2017 foi uma exceção dentro da tendência global de baixa, e que não necessariamente significa o fim do período de estiagem para a região. Todavia, a relativa baixa precipitação de 2018, causadora do pessimismo exprimido pela MACD, pode também ter ocorrido por força da vigorosa variação interanual, inerente à climatologia da região, como observado, por exemplo, por Barbosa et al. (2006) e por Gomes et al. (2019) – o primeiro, notando-a em dados de verdor de vegetação em todo o ENEB, e o último, especialmente quanto à frequência de DOL no ENEB, sub-região que abarca Maceió/AL. Tais “correções” interanuais funcionam à semelhança do mecanismo de “ajuste” do mercado financeiro após uma hipervalorização abrupta de uma dada ação, que é exatamente uma perfeita analogia à abundante precipitação verificada em 2017 na cidade. É curioso observar que, no que tange à ENOS, o mesmo comportamento de La Niña moderada havido entre fins de 2016 e princípio de 2017 – ao menos parcialmente responsável pela generosa quadra chuvosa daquele ano – seria também notado entre 2017 e 2018, e com valores até negativamente mais intensos ao fim do ano, nas anomalias de TSM, e permanecendo acima do limiar de neutralidade até o mês de abril, sem contudo, provocar novas precipitações abundantes naquele ano de 2018, tamanha é a força da variação interanual na pluviometria da cidade. Devido a essa mesma variação interanual, é possível que haja uma recuperação em 2019 em relação a 2018, mesmo porque o Atlântico Sul tropical tem apresentado anomalias de TSM demasiadamente positivas, e o mês de maio já apresentou algumas incursões de sistemas frontais até o ENEB, com uma provável Linha de Instabilidade à sua vanguarda (Figura 5.1), como preconizado por Molion & Bernardo (2002), ou, uma banda de nebulosidade desprendida do ciclone originalmente associado à zona frontal, um modo similar de influência de SF sobre a parte mais boreal do ENEB, como

demonstrado por Fedorova et al. (2016) – seja como for, independentemente da descrição sinótica mais precisa – é o mesmo tipo geral de fenômeno que parece ter funcionado como gatilho para o início da contumaz temporada de DOL de 2017, sistema que – como sustentam, por exemplo, Amorim et al. (2014); Palharini & Vila, (2017), Costa et al. (2018) e Gomes et al. (2019) – é o principal modulador da intensidade da quadra chuvosa do ENEB. E estes últimos até defendem, inclusive, que a maioria dos DOL identificados sobre o Atlântico Sul tropical parecem ter uma conexão com os “restos de frentes frias que se propagam até baixas latitudes durante outono e inverno austrais”, o que estaria em total acordo com a interpretação de que as LI ou as bandas de nebulosidades também desprendidas dos SF podem, de fato, servir de gatilho para os DOL, como acima advogado.

Figura 5.1 – Imagens do satélite GOES-16 em seu canal 13 (IR “limpo”; esquerda) e no canal 9 (vapor d’água; direita) registradas aos horários de 07:00 e 07:10 UTC, respectivamente, no dia 21 de maio de 2019. É possível observar uma provável LI como resquício de Sistema Frontal que chegou às latitudes do ENEB. Na imagem da esquerda, também é possível ver a nebulosidade subjacente, típica de DOL, intensificando-se a partir do oceano à medida que avança pelo ENEB, o que, até então, não havia sido observado nessa temporada.



Fonte: Autor.

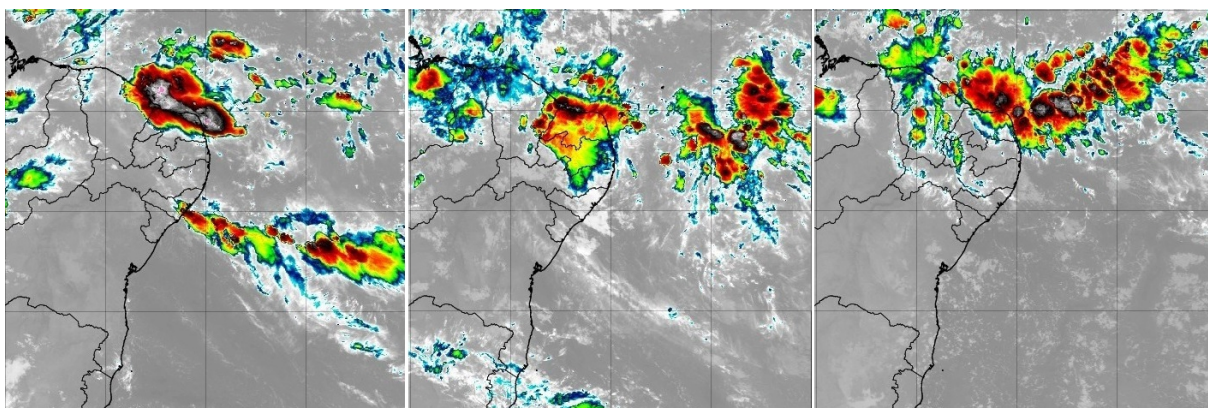
Entretanto, a conjectura acima exposta quanto ao início da temporada chuvosa de 2019 não seria apoiada estatisticamente pela MACD com os dados inseridos até o momento. Ademais, os DOL e a precipitação em geral de outono e inverno nas áreas costeiras do ENEB dependem de uma maior intensidade da ASAS (Valadão et al. 2017) e são favorecidos pelo seu posicionamento mais ao norte, favorecendo o transporte de umidade do oceano ao

continente (Palharini & Vila, 2017). No entanto, tais circunstâncias são exatamente opostas ao que se observa neste outono até então, com a situação da Figura 5.1 tendo representado uma exceção até o momento, seguida por uma prevalência de centros de alta pressão sobre o sudeste do Brasil, que têm impedido o avanço de frentes até o NEB.

Natal/RN havia, também, sinalizado o início do recente período de estiagem com um CS *bearish* em 2011, no conjunto misto, e em 2010, no conjunto lunar, com ambos denotando o auge da seca em 2016, com um pico negativo na Linha da MACD, como consequência do forte El Niño de 2015-2016, como, aliás, já fora comentado quando da análise de Maceió/AL. Há, no entanto, duas importantes dissonâncias entre os finais das duas séries. Em Natal/RN, o Histograma tem sido consistentemente *bullish* desde então, e as Linhas MACD e de Sinal seguem avidamente na direção do encontro, enquanto, para Maceió/AL, passaram a distanciar-se no conjunto misto e chegaram a efetuar um CS *bullish*, mas seguido, imediatamente, de um *bearish*, no conjunto lunar (CS duplo). A outra diferença diz respeito à análise climatológica propriamente dita, das duas pluviometrias, análoga à análise fundamentalista do mercado financeiro e que, como esta em seu ambiente, deve, aqui, também, ser empregada de modo a complementar e embasar, ou, eventualmente, corrigir, a análise técnica. Assim, procedendo com tal análise para Natal/RN, considerando sua maior sensibilidade ao MMA, devido à influência direta da ZCIT (Hastenrath & Heller, 1977; Molion & Bernardo, 2002; Barbosa et al. 2006; Amorim et al. 2014; Hounsou-Gbo et al. 2016; Costa et al. 2018), e que, recentemente, esse modo de oscilação virou para sua fase negativa, com anomalias fortemente positivas (como, também, já observado acima), é possível ratificar o que a MACD vem vocalizando com o pico negativo intenso de 2016 e o sinal *bullish* do Histograma desde 2017, isto é, que o ponto de inflexão já ocorreu e a tendência geral para os próximos anos é de alta pluviosidade para a cidade. Corroborar ainda mais essa perspectiva a altura privilegiada do ano em que é redigida esta seção, isto é, o mês de maio de 2019, portanto, já se aproximando do fim da estação chuvosa daquela cidade no ano seguinte ao último dado da série então submetida à MACD. Neste ano, as precipitações têm sido abundantes em Natal/RN, especialmente em março-abril, com um Atlântico Sul quente trazendo a ZCIT para uma posição austral como não se via há anos, como nos casos de máximo deslocamento para sul descritos na literatura (Okumura & Xie, 2006; Hastenrath & Heller, 1977; Molion & Bernardo, 2002; Barbosa et al. 2006; Chaves & Cavalcanti, 2001; Kucharski et al. 2008; Amorim et al. 2014; Hounsou-Gbo et al. 2016; Costa et al. 2018). As Figuras 5.2 e 5.3 correspondem a imagens de satélite e padrão de escoamento atmosférico em

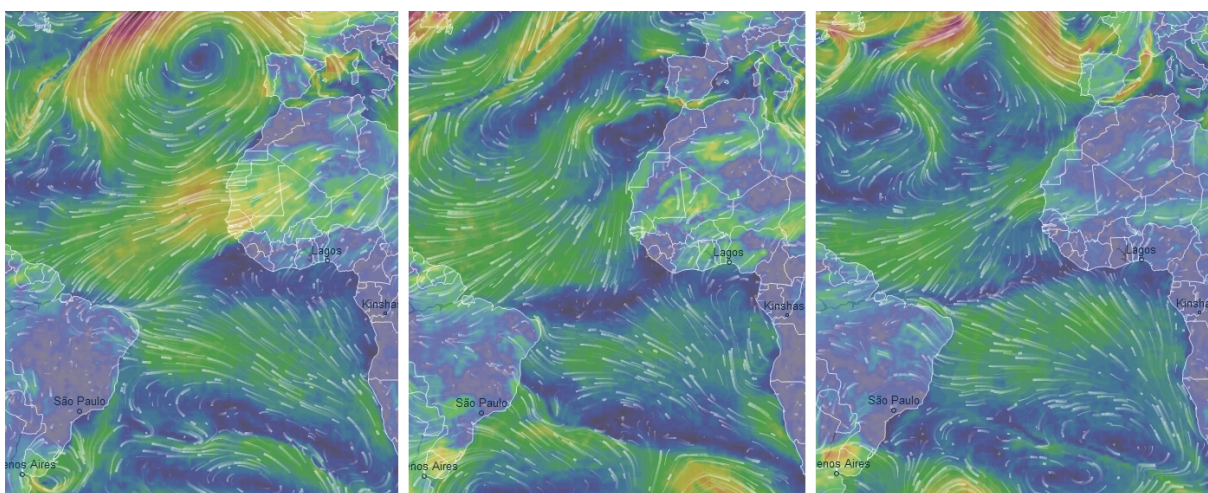
baixos níveis para dias alternados entre março e abril de 2019, ilustrando a configuração frequentemente observada ao longo daquele período.

Figura 5.2 – Imagens do satélite GOES-16 em seu canal 13 (IR “limpo”), obtidas às 09 h UTC do dia 13/03/2019 (esquerda), às 00 h UTC do dia 29/03/2019 (centro) e às 09 h UTC do dia 25/04/2019, todas acusando forte atividade convectiva sobre o NNEB, especialmente RN e CE, associada à ZCIT.



Fonte: Autor.

Figura 5.3 – Imagens do modelo ICON (resolução de 22 km) exibindo os padrões de escoamento atmosférico de grande escala ao nível de 950 hPa, sobre o Oceano Atlântico tropical e subtropical e setores da Europa, África e América do Sul, para as mesmas datas informadas na Figura 5.2, e na mesma ordem. É possível identificar a confluência dos Alísios e/ou o trecho de velocidades baixas ou nulas de vento que assinalam a posição da ZCIT, entre vários outros sistemas.



Fonte: Autor.

São Luís/MA indicara o início do período de estiagem de modo inequívoco, com ambos um CC e um CS – do tipo *bearish*, naturalmente – já na transição entre 2011 e 2012, tanto para o conjunto misto de EMA quanto para o conjunto lunar. Em ambas as versões, o

parâmetro do Histograma foi igualmente bem-sucedido ao acusar flutuações de curto prazo, com um discreto sinal *bullish* de 2013 a 2014, mas um novo sinal *bearish* em 2015-2016, devido ao forte evento El Niño já referido, e um dos mais intensos picos negativos da Linha da MACD de toda a série, em 2016. No que concerne ao fim (ou não) daquele período de seca – questão indagada no início da fase final desta discussão – a MACD para São Luís/MA é ainda mais eloquente ao assertar a reversão de tendência, de baixa, para alta pluviosidade nos próximos anos, exprimindo a inflexão por meio de um CS *bullish* em 2017, no conjunto lunar, e em 2018, no conjunto misto de EMA, com o Histograma ratificando a nova tendência de alta que por ele vinha sendo prevista com sinais *bullish* desde 2016, no conjunto lunar, e desde 2017, no conjunto misto. Devido à sensibilidade do regime pluviométrico da cidade ao deslocamento meridional da ZCIT, à semelhança de Natal/RN, a análise climatológica propriamente dita, como ocorreu com aquela série também coopera, aqui, para ratificar este entendimento.

Barreiras/BA expressa um comportamento semelhante ao de São Luís/MA quanto à sinalização do início da grande seca cujo início se daria em 2012, e um similar ao de Natal/RN a respeito da inflexão subsequente. Diz-se que o início é indicado similarmente a São Luís/MA porque, também aqui, foi por CC e CS do tipo *bearish* simultâneos na transição entre 2011 e 2012, e para ambos os conjuntos lunar e misto de EMA. O Histograma, também em ambos os casos, exibiu, com consistência, sinais *bearish* de 2013 a 2015, indicando que a tendência de aridez se intensificaria até então. A diferença notável entre esta e as três séries, de localização costeira, avaliadas até então, ocorre em 2017, ano em que ao menos o Histograma se manifestava de modo *bullish* nas outras séries – quando não havia até um CS de mesmo sinal – e o pico negativo intenso, relativo ou absoluto, no período, havia sido deixado para trás, no ano de 2016. Mas, aqui, houve dois picos negativos relativos no período, um havido em 2015, e o outro, precisamente, neste ano de 2017, em total contraste, portanto, às outras séries. Sob o prisma climatológico, isso pode indicar que as precipitações abundantes de 2017, observadas – e previstas pela MACD – nas cidades litorâneas, podem ter-se dado por uma mera particularidade restritamente oceânica, de alcance limitado ao interior do NEB, devendo-se também notar que Barreiras/BA tem sua climatologia regida por sistemas mais comuns a regiões adjacentes, como a Alta da Bolívia (pela proximidade com a Amazônia; Chaves & Cavalcanti, 2001) e a invasão de sistemas frontais de sul (pela proximidade com a região sudeste e centro-oeste; Kousky, 1979; Molion & Bernardo, 2002; Chaves & Cavalcanti, 2001;), de modo que a cidade nem sempre compartilha das típicas

forçantes e sistemas sinóticos que influenciam o NEB de modo geral. Todavia, o próprio pico negativo intenso de 2017 acima registrado como incomum, e o sinal *bullish* do Histograma em 2018 no conjunto misto de EMA, assim como, mais evidentemente, o CS *bullish* nesse mesmo ano no conjunto lunar, viabilizam estimar, segundo a MACD, à semelhança de Natal/RN, uma reversão, com tendência global de alta, para os próximos anos.

Em Petrolina/PE, o início da última grande seca havia sido previsto, por um CS *bearish*, em 2011, pelo conjunto misto de EMA, antecipado por um sinal *bearish* do Histograma no ano anterior, que também ocorreu no conjunto lunar, mas concomitante a um CS *bearish* já naquele ano, 2010. De 2012 a 2017, o comportamento do Histograma de ambos os conjuntos é semelhante àquele exibido pelo de Barreiras/BA. A diferença ocorre em 2017, quando o pico negativamente intenso na Linha da MACD foi ainda mais intenso, não mais disputando com 2015 o título de maior pico relativo no período, mas, aqui, chegando a ser o pico negativo absoluto de toda a série, no conjunto misto, superando o de 1984 e com este rivalizando no conjunto lunar. Isso reforça a tese postulada acima, de que a generosa pluviometria verificada em 2017 nas cidades litorâneas, de fato, permaneceu mais restrita às áreas de maior proximidade ao Atlântico. Em 2018, um sinal *bullish* se faz perceber pelo Histograma, e as Linhas da MACD e de Sinal parecem ensaiar um CS de mesmo sinal no conjunto lunar, mas sem concretizá-lo, diferindo, portanto, do observado em Barreiras/BA, em que não só tal inflexão chegou a ser efetivada no conjunto lunar, como também foi ao menos esboçada no conjunto misto, não podendo se dizer o mesmo a respeito do conjunto misto de Petrolina/PE, dada a maior distância entre as linhas. Climatologicamente, esta é a série que impõe maior dificuldade a uma análise sob esse prisma, uma vez que, localizada no coração do semiárido, tem seus eventos pluviométricos modulados pela justaposição de dois ou mais sistemas sinóticos simultâneos, como bem observa Moscati & Gan (2007). Contudo, os VCAN são citados pelo mesmo autor como um dos protagonistas quanto a chuvas volumosas no SANEB e, considerando, mais uma vez, a posição temporal privilegiada desse estudo, que avança pelo ano seguinte ao último dado assimilado pela MACD, ano que apresentou, em seu verão, também por força de uma OMJ favorável, uma temporada razoável quanto à presença e atuação de VCAN e da CJNEB, é possível conjecturar que o sinal *bullish* do Histograma verificado em 2018 e o ensaio de um CS no conjunto lunar possam significar o início de um período de recuperação hídrica para a região.

6 CONCLUSÕES

Via de regra, a aplicação do indicador técnico MACD, como ferramenta analítica, às séries históricas da variável hidrometeorológica estudada, provou ser adequada para auxiliar a tomada de decisão na gestão de recursos hídricos. Algumas características gerais relevantes foram observadas em todos os resultados, e especificidades de sua implementação a cada série e a cada conjunto de intervalos de médias móveis exponenciais (EMA) também demandam comentários mais pormenorizados.

De plano, uma constatação comum a todas as análises é que há uma disparidade de eficácias entre os diversos componentes da técnica quanto à antevisão dos sinais de tendência de alta, baixa e suas reversões. Em geral, os Crossovers de Centro são mais lentos, seguidos dos Crossovers de Sinal e do Histograma, que se mostrou o mais célere dos parâmetros genuínos da MACD, uma vez que os picos intensos, por si só, não são de total originalidade da técnica e, ademais, precisam ter seus sinais ratificados por um segundo meio a ela inerente. Mesmo o Histograma, no entanto, apresenta riscos mais altos nas interpretações das tendências futuras das variáveis meteorológicas, em comparação aos cruzamentos, particularmente, quando são tomados apenas um ou dois valores (colunas), podendo induzir o analista ao erro. Em analogia à Econometria, portanto, berço da MACD, o emprego de variados níveis de previsibilidade encontrados nos diferentes parâmetros oferecidos pela técnica estaria associado à existência de diferenciados perfis de investidor, do conservador ao arrojado, de modo que os Crossovers de Centro seriam de uso preferível por parte daqueles de perfil conservador, enquanto os Crossovers de Sinal seriam o parâmetro de uso mais frequente pelos investidores moderados, e o Histograma e os picos intensos forneceriam aos de perfil arrojado a possibilidade de maiores lucros, dado o maior potencial de presciência, embora com maior risco de sinais falsos.

Todavia, convém lembrar que, na esfera da Ciência do Clima, a responsabilidade com as previsões efetuadas é ainda maior, pois lida-se, em última análise, com vidas humanas, qualidade de vida, ou, quando menos, propriedades e estabilidade socioeconômica de uma região ou país. Assim, um maior nível de prudência é mais que desejável. Pondera-se, portanto, que o emprego da MACD à área se faz muito mais efetivo se utilizada a totalidade de seus parâmetros, com análise criteriosa da relevância de cada um deles, mas sem se tomar decisões com base em apenas um, de modo isolado, evitando-se, assim, o risco de agir de modo temerário com relação a tão preciosos “ativos”.

Nesse sentido, é bem-vinda, também, uma análise climatológica propriamente dita, que verse sobre o conhecimento teórico acerca dos padrões vigentes dos modos de oscilações oceânicas e/ou atmosféricas, bem como de eventuais forçantes externas que modulam, nas escalas temporais pertinentes, o comportamento da variável ora em análise, de modo que cumpra, aqui, a função da análise denominada fundamentalista, no mercado financeiro e, como analogia daquela, possa embasar, complementar ou corrigir os resultados da análise técnica fornecida pela MACD.

Com relação aos conjuntos de intervalos selecionados para gerar as EMA, os períodos referentes exclusivamente aos ciclos orbitais lunares, nomeadamente a Precessão das Apsides Lunares (8,85 anos = EMA de 9 anos), o Ciclo Nodal Lunar (18,6 anos = EMA de 18,6 anos) e o Meio Ciclo da Precessão Apsidal (4,4 anos = EMA de Sinal de 4 anos), mostraram-se bem mais sensíveis a variações de frequência maior, sendo, usualmente, um pouco mais eficientes nas previsões de curto prazo, a julgar pelos Crossovers de Sinal. Entretanto, por vezes, essa hipersensibilidade da Linha de Sinal, denotada por uma frequência às vezes indesejável de interações com a MACD, mostrou-se contraproducente, chegando ao ponto de inutilizar o parâmetro do Histograma, e causar uma profusão de sinais falsos, que são até autoevidentes, por meio de Crossovers duplos (*bullish* e *bearish*, ou vice-versa, no mesmo ano ou ladeando um mesmo ano). Tais cruzamentos, de fato, exprimem uma variação na série, mas de prazo limitado, não consistindo, com frequência, numa inflexão que, de modo fidedigno, sinalize uma reversão de tendência de maior longevidade na pluviometria da região.

O conjunto misto de intervalos, contemplando o Ciclo Solar de Schwabe (11,2 anos = EMA de 11 anos), o Meio Ciclo da ODP (28 anos = EMA de 28 anos) e a Precessão Apsidal Lunar ou o Meio Ciclo Nodal (8,85 anos = EMA de Sinal de 9 anos) provou ser mais eficaz para previsões e identificações de tendências de médio e até de longo prazo, pois, competentemente, é capaz de filtrar ruídos na série, na forma de variações de alta frequência, reconhecendo-as como flutuações parciais e ignorando-as, devidamente. Assim, é com esse conjunto de intervalos de EMA que a MACD exerce, com apreciável desempenho, a sua função primaz de oscilador de *momentum*. O Histograma desse conjunto também foi capaz de captar flutuações menores, como ensaios de recuperação hídrica em períodos de tendência global de queda e prevalência de condições áridas, ou o contrário, mas reconhecendo-as como tais, isto é, não concretizando os cruzamentos potencialmente precipitados do conjunto lunar. Contudo, como também fora observado na Discussão, o conjunto lunar não deve,

absolutamente, ser desprezado, uma vez que, embora quase inutilize seu Histograma, seus CS tendem a anteceder os do conjunto misto e nem sempre comunicam sinais falsos. Deve-se apenas ter a prudência de não utilizá-lo isoladamente, mas *pari passu* ao conjunto misto e a uma zelosa, diligente, análise climatológica.

Na forma de bônus, a MACD também foi capaz de apontar periodicidades nas séries analisadas, ao intercalar, por meio de seus Crossovers de Sinal e/ou de Centro, períodos de comum tendência de alta ou baixa pluviosidade. A escala temporal de 11 anos, mais comum às cidades costeiras, está associada ao ciclo solar de Schwabe e ao Modo Meridional do Atlântico (MMA). A influência solar no ENEB, especialmente em Maceió/AL, seria melhor justificada pela natureza das nuvens que dominam o regime pluviométrico da região, que são as estratiformes e de convecção rasa e, portanto, mais sensíveis aos impactos da variabilidade solar por meio dos efeitos de RCG nos aerossóis atmosféricos e oferta de CCN. Os períodos de 4-6 anos – também encontrados mais usualmente no litoral – estariam relacionados ao meio ciclo da precessão apsidal lunar (4,4 anos) e a oscilações no Pacífico e no Atlântico, nomeadamente, seus modos equatoriais/zonais, isto é, ENOS e Niño do Atlântico (MZA), respectivamente. Já os períodos de 18 a 21 anos, que marcaram as séries de Petrolina/PE e Barreiras/BA – as quais apresentaram uma maior suavidade e, via de regra, portanto, uma maior aptidão ao emprego da MACD – são similares ao ciclo nodal lunar (18,6 anos) e ao ciclo da polaridade de Hale (22 anos), podendo dever-se, também, parcialmente, à ODP. Os eventos de El Niño e La Niña mais intensos, a propósito, foram captados ou antecipados.

Uma análise criteriosa foi empreendida para o fim de cada série, explorando-se as faces técnica (via MACD) e climatológica, a fim de se firmar uma posição a respeito da tendência do regime pluviométrico para cada cidade nos próximos anos.

Todas as séries foram uníssonas em comunicar ou antecipar o início do período de grande escassez hídrica experimentada pela região nos anos recentes, variando apenas o ano em que, consoante a MACD, isso ocorreria, com Crossovers de Sinal do tipo *bearish* ocorrendo em 2011 para umas cidades, e em 2012, para outras, segundo o conjunto misto. Também foi comum a todas o fato de não ter havido novo CS nos anos que se seguiram (ainda pelo conjunto misto), indicando a longevidade da seca, que culminaria por ocasião do intenso El Niño de 2015-2016. Entretanto, após esse período, todas as séries exibiram sinais *bullish*, ao menos por um dado tempo, e ao menos por um dado parâmetro da técnica, com algumas até consolidando tais sinais por meio de Crossovers de Sinal no conjunto lunar de EMA.

Tal comportamento ocorreu em São Luís/MA e Barreiras/BA, havendo o CS *bullish*, para a primeira, em ambos os conjuntos lunar e misto. Natal/RN, por sua vez, vem consistentemente exibindo sinais *bullish* em seu Histograma nos últimos anos, com as Linhas MACD e de Sinal avidamente dirigindo-se ao mútuo encontro.

A análise climatológica ratifica, inequivocamente, a reversão para tendência de alta pluviosidade nos próximos anos, ao menos para São Luís/MA e Natal/RN, com o início de uma fase vigorosamente negativa do MMA e um deslocamento meridional da ZCIT no sentido austral, no ano de 2019, como não se testemunhava há anos, mantendo-a influenciando a região com forte atividade convectiva até o mês de maio, devendo-se registrar, também a ocorrência de penetração de sistemas frontais do HN a latitudes equatoriais, especialmente, nos meses de janeiro e fevereiro.

Petrolina/PE, assim como Barreiras/BA, não compartilharam do surto pluviométrico de 2017, experimentado pelas cidades litorâneas. Ao contrário, ambas exibiram picos negativos na Linha da MACD em 2015 e 2017, enquanto as outras tiveram um único pico bastante pronunciado em 2016 e expressaram forte recuperação hídrica no ano seguinte, ainda que apenas momentânea, no caso de Maceió/AL. No entanto, em 2018, Petrolina/PE voltou a ensaiar um CS no conjunto lunar e, mesmo não o havendo concretizado (como ocorrera para Barreiras/BA), mas, considerando a generosa atividade convectiva no verão de 2018-2019, por força de uma OMJ favorável e de uma ativa temporada de VCAN, conjectura-se, embora não tão assertivamente, que o sinal *bullish*, até então visível apenas pelo Histograma, logo se consolidará por um CS, denotando a reversão de tendência pluviométrica para o interior.

Maceió/AL é a série de cenário mais complexo e de mais difícil previsão, no presente instante. O conjunto misto não exprime um novo CS desde o do tipo *bearish* de 2005, e o lunar apenas acusou as duas ocasiões de momentânea recuperação em 2011 e 2017, mas sucedidos imediatamente por um CS *bearish*, inclusive no último dado da série, de 2018. Assim, a julgar-se unicamente pela MACD, Maceió/AL permanecerá numa tendência de baixas precipitações nos próximos anos. As circunstâncias sob o prisma climatológico também não são elucidativas a ponto de efetivamente retificar ou corroborar o parecer técnico emitido da MACD, haja vista o notório conflito entre os sinais comunicados pelas forçantes oceânicas.

Por um lado, há um MMA em fase negativa, principal responsável pelas abundantes chuvas observadas no NNEB neste ano até então, e que, como advogam Molion & Bernardo

(2002), favorecem não somente aquela sub-região, mas também a metade austral do NEB, ao teoricamente causar anomalias negativas de pressão na região equatorial e convidar a penetração de sistemas frontais a latitudes mais baixas. Além disso, para Hounsou-Gbo et al. (2015), durante a fase negativa do MMA, anomalias positivas de TSM na região da Piscina Quente do Atlântico Sul (SAWP, na sigla em inglês), de fevereiro-março a junho-julho, favorecem a acumulação de calor na porção oeste da bacia, o que induz eventos úmidos no ENEB. Por outro lado, Valadão et al. (2017) defendem que a intensificação da ASAS fortalece a convergência dos Alísios nas áreas costeiras do ENEB, chegando a afirmar que a precipitação nessas áreas no outono e inverno do HS (exatamente o período da quadra chuvosa da região) depende disso, e, expressando entendimento harmônico e complementar, Palharini & Vila (2017) se pronunciam no sentido de que os DOL, principal sistema sinótico a modular a pluviometria da estação chuvosa na região, são favorecidos por um posicionamento mais ao norte da ASAS. Ora, tais condições, de maior intensidade e posicionamento mais boreal, da ASAS, são exatamente o oposto ao que se observa em períodos de fase negativa do MMA e, por conseguinte, um Atlântico Sul tropical quente, que os autores anteriormente citados defendem como circunstâncias fomentadoras de anomalias positivas de precipitação no ENEB, fazendo-os diferir, portanto, dos últimos. Assim, para esses, o mesmo fenômeno (um MMA notavelmente negativo) que provocou uma abundante quadra chuvosa para o NNEB estaria agora a inibir os DOL e a convergência de umidade sobre o ENEB.

Ademais, ajudaria a corroborar o último sinal *bearish* da MACD e a tese defendida pelos últimos autores acima citados o fato de o Pacífico ter produzido um El Niño durante a última primavera e verão austrais, fenômeno que, apesar de ora fraco – com anomalias de TSM próximas da neutralidade na região responsável por caracterizar o fenômeno – se relaciona com o NNEB, especialmente, por uma teleconexão com o Atlântico Norte tropical, e, com todo o NEB, incluindo, naturalmente, o ENEB, pela intensificação da circulação de Walker, e deslocamento de seu ramo subsidente, fazendo-o pousar mais diretamente sobre o NEB. Isso poderia ajudar a explicar a tímida quadra chuvosa experimentada pelo ENEB até o momento, mesmo porque Gomes et al. (2019) sugerem que a ocorrência anual dos DOL parece ser menor durante episódios de El Niño.

Enfim, considerando que, como já proferido à exaustão, a interpretação climatológica é vital para aduzir valor analítico aos sinais técnicos da MACD, é com certo desassossego que se relata a relativa insipiência, acima exposta, por exemplo, a respeito da correlação com as TSM

do Atlântico Sul tropical com a pluviometria do ENEB, não havendo ainda – contrariamente ao NNEB, por exemplo – um robusto conhecimento das reais e contumazes causas da variabilidade pluviométrica da região. Muitos estudos, mais gerais sobre o NEB, limitam-se a apontar o MMA como de correlação negativa para toda a região, em detrimento de suas particularidades sub-regionais, à semelhança do que ocorria a respeito da relação entre ENOS e secas no NEB. Entretanto, avanços tem havido nessa área, de modo a identificar os tipos de El Niño e La Niña que exercem, ou não, impactos relevantes nas chuvas sobre o NEB e que sinal de anomalias provocam. Acima, foi demonstrada a carência de esforços similares quanto ao MMA, sob pena de se agir com negligência para com o ENEB, cuja relevância socioeconômica para o NEB como um todo e sua contribuição para o Produto Interno Bruto do país são inquestionáveis. Neste estudo, em sua revisão de literatura, foram elencados trabalhos que, embora indireta e secundariamente, sugeriram correlações da SAWP e do MZA com a região. Audazes esforços também se fazem necessários com vistas a investigar a real dimensão do impacto desses e eventuais outros fenômenos na pluviometria do ENEB e, enfim, contribuir mais efetivamente com a acurácia da previsibilidade climática para a região.

No que tange à própria MACD, por tudo o que precede, as análises conduzidas sinalizam um futuro promissor para o indicador técnico na previsibilidade climática, a municiar os pesquisadores e profissionais da área com mais uma ferramenta, que se provou estatisticamente efetiva e versátil, viabilizando a implementação de variados conjuntos de intervalos em referência a ciclos e índices de oscilações que sabidamente influenciem as regiões a serem estudadas.

REFERÊNCIAS

- ABDUSSAMATOV, H., 2015, “Current long-term negative average annual energy balance of the earth leads to the new little ice age”, *Thermal Science* 19 (2): S279-S288.
- AGOSTA, E. A., 2013, “The 18.6-year nodal tidal cycle and the bi-decadal precipitation oscillation over the plains to the east of subtropical Andes, South America”, *International Journal of Climatology*, 34: 1606-1614. DOI: 10.1002/joc.3787
- ALVAREZ M.S., VERA C.S., KILADIS G.N., LIEBMANN B., 2015, “Influence of the Madden Julian Oscillation on precipitation and surface air temperature in South America”, *Climate Dynamics* 46 (1): 245-262. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s00382-015-2581-6>
- ALVES, E. I., 2006, “Earthquake Forecasting Using Neural Networks: Results and Future Work”, *Nonlinear Dynamics*; 44:341-349. DOI: 10.1007/s11071-006-2018-1
- AMORIM, A., CHAVES, R., SILVA, C., 2014, “Influence of the Tropical Atlantic Ocean’s Sea Surface Temperature in the Eastern Northeast Brazil Precipitation”, *Atmospheric and Climate Sciences*, 4, 874-883. DOI: 10.4236/acs.2014.45077
- APPEL, G., 2003, “Become Your Own Technical Analyst How to Identify Significant Market Turning Points Using the Moving Average Convergence-Divergence Indicator or MACD”, *The Journal of Wealth Management*, 6: 27-36. DOI: 10.3905/jwm.2003.320471
- BAPTISTA, G.M., “Aquecimento Global: Ciência ou Religião?”, Brasília: *Hinterlândia Editorial*, 2009.
- BARBOSA, H.A., HUETEA, A.R., BAETHGENUB, W.E., 2006, “A 20-year study of NDVI variability over the Northeast Region of Brazil”, *Journal of Arid Environments*, 67: 288-307. DOI:10.1016/j.jaridenv.2006.02.022
- BENLAHOUAR, A. & BOUGATAYA, M., 2018, “On The Use Of The Macd To Predict Power Production And Hers Sizing”, *Asia Pacific Journal of Contemporary Education and Communication Technology*. 2018, vol. 4, issue 1. DOI: 10.25275/apjcectv4i1ict6
- BRITO, S.S.B., CUNHA, A.P.M.A., CUNNINGHAM, C.C., ALVALÁ, R.C., MARENGO, J.A., CARVALHO, M.A., 2018, “Frequency, duration and severity of drought in the Semiarid Northeast Brazil region”, *Int. J. Climatol.* 38: 517–529. DOI: 10.1002/joc.5225
- CAMERON, R; SCHÜSSLER, M., 2015, “The crucial role of surface magnetic fields for the solar dynamo”, *Science Magazine*, 347, 1333-1335. DOI: 10.1126/science.1261470
- CAVIEDES, C., “El Niño in history: storming through the ages”, Gainesville: *University Press of Florida*, 2001.
- CERVENY, R. S. & SHAFFER, J. A., 2001, “The Moon and El Niño”, *Geophysical Research Letters*, 28: 25-28. DOI: 10.1029/2000GL012117

CHANG, P., JI, L., LI, H., 1997, “A decadal climate variation in the tropical Atlantic Ocean from thermodynamic air-sea interactions”, *Nature*, 385: 516–518. DOI: <https://doi.org/10.1038/385516a0>

CHAVES, R.R., CAVALCANTI, I.F.A., 2001 “Atmospheric Circulation Features Associated with Rainfall Variability over Southern Northeast Brazil”, *Monthly Weather Review*, 129: 2614–2626. DOI: [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(2001\)129<2614:ACFAWR>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(2001)129<2614:ACFAWR>2.0.CO;2)

CHONG, T. T. L. et al., 2008, “Structural Change in the Stock Market Efficiency after the Millennium: The MACD Approach”, *Economics Bulletin*, 7: 1–6.

COSTA, D.D., UVO, C.B., PAZ, A.R., CARVALHO, F.O., FRAGOSO JR, C.R., 2018, “Long-term relationships between climate oscillation and basin-scale hydrological variability during rainy season in eastern Northeast Brazil”, *Hydrological Sciences Journal*, 63:11, 1636–1652. DOI: 10.1080/02626667.2018.1523614

COSTA, R.L., SILVA, F.D.S., SARMANHO, G.F., LUCIO, P.S., 2012, “Imputação Multivariada de dados Diários de Precipitação e Análise de Índices de Extremos Climáticos”, *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 5, p. 661–675.

CUNHA, A., ALVALÁ, R., NOBRE, C., CARVALHO, M., 2015, “Monitoring vegetative drought dynamics in the Brazilian semiarid region”. *Agric. For. Meteorol.*, 214–215, 494–505. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.agrformet.2015.09.010>

CÚRRIE, R. G., 1984, “Periodic (18.6-year) and cyclic (11-year) induced drought and flood in western North America”, *Journal of Geophysical Research*, 89: 7215–7230. DOI: 10.1029/JD089iD05p07215

CÚRRIE, R. G., 1991, “Luni-solar 18.6-year signal in tree-rings from Argentina and Chile”, *PAGEOPH*, 37: 281–300. DOI: 10.1007/BF00876993

DA SILVA, Djane F., 2017, “Aplicação de Análises de Ondaletas para Detecção de Ciclos

e Extremos Pluviométricos no Leste do Nordeste do Brasil”, *Revista Brasileira de Meteorologia*, 32: 187–198. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/0102-77863220002>

DAVIS, B.A.S. & BREWER, S., “A unified approach to orbital, solar, and lunar forcing based on the Earth’s latitudinal insolation/temperature gradient”, *Quaternary Science Reviews*, 30: 1861–1874. DOI: 10.1016/j.quascirev.2011.04.016

Department of Physics and Astronomy, University of Tennessee, “The Magnetic Field of the Sun”. Disponível em: <<http://csep10.phys.utk.edu/astr162/lect/sun/magnetic.html>>. Acesso em: agosto de 2015.

DEAN, W. E., 2000, “The Sun and Climate”, USGS: Science for a changing world. Disponível em: <<http://pubs.usgs.gov/fs/fs-0095-00/fs-0095-00.pdf>>. Acesso em: agosto de 2015.

DOBRICA, V., 2017, “Inferring geoeffective solar variability signature in stratospheric and tropospheric Northern Hemisphere temperatures”, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* xxx (2017) 1–11.

EVAN, A.T., FOLTZ, G.R., ZHANG, D., 2012, “Physical response of the tropical-subtropical North Atlantic Ocean to decadal-multidecadal forcing by African dust”, *J. Climate*, 25, 5817-5829. DOI:10.1175/JCLI-D-11-00438.1

EVAN, A.T., FOLTZ, G.R., ZHANG, D., VIMONT, D.J., 2011, “Influence of African dust on ocean–atmosphere variability in the tropical Atlantic”, *Nature Geoscience*, 4: 762–765. DOI: 10.1038/NGEO1276

FEDOROVA, N., DOS SANTOS, D.M.B., SEGUNDO, M.M.L., LEVIT, V., 2017, “Middle Tropospheric Cyclonic Vortex in Northeastern Brazil and the Tropical Atlantic”, *Pure Appl. Geophys.*, 174: 397. <https://doi.org/10.1007/s00024-016-1381-1>

FEDOROVA, N., LEVIT, V. & CAMPOS, A.M.V., 2018, “Brazilian Northeast Jet Stream: association with synoptic-scale systems”, *Meteorol. Appl.* 25: 261–268. DOI: 10.1002/met.1693

FEDOROVA, N., LEVIT, V. & CAMPOS, A.M.V., 2018, “Brazilian Northeast Jet Stream: frequency, wind speed and direction”, *Meteorol. Appl.* 25: 254–260. DOI: 10.1002/met.1688

FEDOROVA, N., LEVIT, V. & DA CRUZ, C.D., 2016, “On Frontal Zone Analysis in the Tropical Region of the Northeast Brazil”, *Pure Appl. Geophys.*, 173: 1403. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00024-015-1166-y>

FERNÁNDEZ-BLANCO, P. et al., 2008, “Technical market indicators optimization using evolutionary algorithms”, *Proceedings of the 10th annual conference companion on Genetic and evolutionary computation*, p.1851-1858. DOI: 10.1145/1388969.1388989

FIGLIUOLO, Guilherme Cordeiro, “Variabilidade de TSM no Atlântico Tropical em resposta às teleconexões de diferentes ENOS e seus impactos na precipitação na América do Sul”, 105f. Dissertação (Clima e Ambiente (CLIAMB)) – Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia, Manaus, 2017.

FOREXABODE, “4.30 Trading with MACD Indicator”, Disponível em: <<http://www.forexabode.com/forex-school/technical-indicators/macd/>>. Acesso em: maio de 2018.

FREISE, F.W., 1938, "The Drought Region of Northeastern Brazil", *Geographical Review* 28, 3: 363-78. DOI:10.2307/209736

GOMES, H.B., AMBRIZZI, T., HERDIES, D.L., HODGES, K., PONTES DA SILVA, B.F., 2015, “Easterly Wave Disturbances over Northeast Brazil: An Observational Analysis,” *Advances in Meteorology*, vol. 2015, ID: 176238, 20 p. DOI: <https://doi.org/10.1155/2015/176238>.

GOMES, H.B., AMBRIZZI, T., PONTES DA SILVA, B.F. et al., 2019, “Climatology of easterly wave disturbances over the tropical South Atlantic”, *Climate Dynamics*: 1-19. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00382-019-04667-7>

HAIGH, J. D., 2007, “The Sun and the Earth’s Climate”, *Living Rev. Solar Phys.*, 4, 2, <http://www.livingreviews.org/lrsp-2007-2>

HAIGH, I. D., 2011, “Global influences of the 18.61 year nodal cycle and 8.85 year cycle of lunar perigee on high tidal levels”, *Journal of Geophysical Research*, 116, C06025. DOI: 10.1029/2010JC006645

HANSEN, J.M., 2016, “Reply to Schmith, T.; Thejll, P., and Nielsen, J.W., 2016. Discussion of Hansen, J.M.; Aagaard, T., and Kuijpers, A., 2015. Sea-Level Forcing by Synchronization of 56- and 74-Year Oscillations with the Moon’s Nodal Tide on the Northwest European Shelf (Eastern North Sea to Central Baltic Sea)”. *Journal of Coastal Research*, 31(5): 1041–1056. *Journal of Coastal Research*, 32(2): 452–455. 2016. DOI: 10.2112/JCOASTRES-D-15A-00004.1

HASTENRATH, S., HELLER, L., 1977, “Dynamics of climatic hazards in northeast Brazil”, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 103 (435): 77-92. DOI: <https://doi.org/10.1002/qj.49710343505>

HATHAWAY, D. H., 2010, “The Solar Cycle”, *Living Rev. Solar Phys.*, 7, 1, <http://www.livingreviews.org/lrsp-2010-1>

HOUNSOU-GBO, G.A., ARAUJO, M., BOURLÈS, B., VELEDA, D., SERVAIN, J., 2015, “Tropical Atlantic Contributions to Strong Rainfall Variability Along the Northeast Brazilian Coast”, *Advances in Meteorology*, vol. 2015, Article ID 902084, 13p. DOI: <https://doi.org/10.1155/2015/902084>

HOUNSOU-GBO, G., SERVAIN, J., ARAUJO, M., MARTINS, E., BOURLÈS, B., CANIAUX, G., 2016, “Oceanic Indices for Forecasting Seasonal Rainfall over the Northern Part of Brazilian Northeast”. *American Journal of Climate Change*, 5, 261-274. DOI: 10.4236/ajcc.2016.52022

IAU Press Release, 2015, “Corrected sunspot history suggests climate change not due to natural solar trends”, *Astronomy Now*. Disponível em: <http://astronomynow.com/2015/08/08/corrected-sunspot-history-suggests-climate-change-not-due-to-natural-solar-trends/>. Acesso em: agosto de 2015.

INVESTOPEDIA, “Definition of Moving Average Convergence Divergence – MACD”. Disponível em: <http://www.investopedia.com/terms/m/macd.asp>. Acesso em: setembro de 2015.

KANE, R.P., 1997, “Prediction of Droughts in North-East Brazil: Role of ENSO and Use of Periodicities”, *International Journal Of Climatology*, 17: 655–665.

KAYANO, M. T. & R. V. ANDREOLI, 2006, “Relationships between rainfall anomalies over northeastern Brazil and the El Niño–Southern Oscillation”, *J. Geophys. Res.*, 111, D13101. DOI:10.1029/2005JD006142

KEELING, C. D. & WHORF, T. P., 1997, “Possible forcing of global temperature by the oceanic tides”, *Proc. Natl. Acad. Sci.*, 94: 8321–8328.

KOUSKY, V.E., 1979, “Frontal Influences on Northeast Brazil”, *Monthly Weather Review*, 107: 1140–1153. DOI: [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1979\)107<1140:FIONB>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1979)107<1140:FIONB>2.0.CO;2)

KOUSKY, Vernon E., 1985, "Atmospheric Circulation Changes Associated with Rainfall Anomalies over Tropical Brazil", *Monthly Weather Review*, 113 (11), 1951. DOI: 10.1175/1520-0493(1985)113<1951:ACCAWR>2.0.CO;2

KOUSKY, V.E. & CHU, P.S., 1978, "Fluctuations in Annual Rainfall for Northeast Brazil", *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 56 (5): 457-465.

KUCHARSKI, F., POLZIN, D., HASTENRATH, S., 2008, "Teleconnection mechanisms of Northeast Brazil droughts: Modeling and empirical evidence". *Revista Brasileira De Meteorologia*. 23. 10.1590/S0102-77862008000200001

KWON YK., MOON BR. (2003) Daily Stock Prediction Using Neuro-genetic Hybrids. In: Cantú-Paz E. et al. (eds) Genetic and Evolutionary Computation — GECCO 2003. GECCO 2003. Lecture Notes in Computer Science, vol 2724. Springer, Berlin, Heidelberg.

LOVELY, M. R., "Study of Dynamics and Magnetic Field Structure of the Solar Convective Envelope using Sunspot Activity", Tese de Doutorado – Indian Institute of Astrophysics, Bangalore, INDIA, 2009. Disponível em: <http://shodhganga.inflibnet.ac.in/bitstream/10603/3912/11/11_chapter%201.pdf>. Acesso em: agosto de 2015.

LYRA, G.B., OLIVEIRA-JÚNIOR, J.F., ZERIB, M., 2014, "Cluster analysis applied to the spatial and temporal variability of monthly rainfall in Alagoas state, Northeast of Brazil", *Int. J. Climatol*. 34: 3546–3558. DOI: 10.1002/joc.3926

LYRA, G. B., OLIVEIRA-JÚNIOR, J. F., GOIS, G., CUNHA-ZERI, G., ZERI, M., 2016, "Rainfall variability over Alagoas under the influences of SST anomalies", *Meteorology and Atmospheric Physics*, 129 (2): 157-171. DOI: 10.1007/s00703-016-0461-1.

MAKSIMOV, I. V. & SMIRNOV, N. P., 1965, "A contribution to the study of causes of long-period variations in the activity of the Gulf Stream", *Oceanology*, 5: 15-24.

MANTUA, N.J., S.R. Hare, Y. Zhang, J.M. Wallace, and R.C. Francis, 1997, "A Pacific decadal climate oscillation with impacts on salmon", *Bulletin of the American Meteorological Society*, 78: 1069-1079.

MARENGO, J.A., LINCOLN, M.A., SOARES, W.R., RODRÍGUEZ, D.A., CAMARGO, H., RIVEROS, M.P., PABLÓ, A.D., 2013, "Two Contrasting Severe Seasonal Extremes in Tropical South America in 2012: Flood in Amazonia and Drought in Northeast Brazil", *Journal of Climate*, 26: 9137-9153. DOI: 10.1175/JCLI-D-12-00642.1

MARENGO, J.A., TORRES, R.R., ALVES, L.M., 2017, "Drought in Northeast Brazil – past, present and future", *Theor Appl Climatol*. 129:1189–1200. DOI 10.1007/s00704-016-1840-8

MARIANO, D.A., SANTOS, C.A.C., WARDLOWA, B.D., ANDERSON, M.C., SCHILTMAYERA, A.V., TADESSEA, T., SVOBODA, M.D., 2018, "Use of remote sensing indicators to assess effects of drought and human-induced land degradation on ecosystem health in Northeastern Brazil", *Remote Sensing of Environment* 213: 129–143. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.04.048>

- MARUYAMA, F., 2017, “Wavelet-based multifractal analysis on a time series of solar activity and PDO climate index”, *Advances in Space Research* 60: 1363–1372. <http://dx.doi.org/10.1016/j.asr.2017.06.004>
- MAUAS, Pablo J. D. et al., 2010, “Long-term solar activity influences on South American rivers”, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics on Space Climate* 1, March 2010.
- MECHOSO, C.R., LYONS, S.W., SPAHR, J.A., 1990, “The Impact of Sea Surface Temperature Anomalies on the Rainfall over Northeast Brazil”, *Journal of Climate*, 3: 812-826. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1990\)003<0812:TIOSST>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1990)003<0812:TIOSST>2.0.CO;2)
- MITRA, K. et al., 1991, “Some indications of 18·6 year LUNI-Solar and 10–11 year solar cycles in rainfall in North-West India, the plains of Uttar Pradesh and North-Central India”, 11: 645-652. DOI: 10.1002/joc.3370110606
- MIYAHARA, H., 2008, “Possible link between multi-decadal climate cycles and periodic reversals of solar magnetic field polarity”, *Earth and Planetary Science Letters* 272: 290–295.
- MIYAHARA, H., 2009, “Influence of the Schwabe/Hale solar cycles on climate change during the Maunder Minimum Solar and Stellar Variability: Impact on Earth and Planets”, *Proceedings IAU Symposium* No. 264.
- MOLION, L.C.B., 2017, “Gênese do El Niño”, *Revista Brasileira de Climatologia*, Ano 13, 21: 2237-8642 (Eletrônica).
- MOLION, L.C.B., BERNARDO, S.O., 2002, “Uma revisão da dinâmica das chuvas no Nordeste Brasileiro”, *Revista Brasileira de Meteorologia*, 17:1–10.
- MORTON, D.C., “An Astronomer’s View on Climate Change”, 2014, *Journal of the Royal Astronomical Society of Canada*, 108: 27. DOI: 10.1142/9789814590112_0030
- MOSCATI, M.C.L. & GAN, M.A., 2007, “Rainfall variability in the rainy season of semiarid zone of Northeast Brazil (NEB) and its relation to wind regime”, *Int. J. Climatol.* 27: 493–512. DOI: 10.1002/joc.1408
- MOURA, A.D. & J. SHUKLA, 1981, “On the Dynamics of Droughts in Northeast Brazil: Observations, Theory and Numerical Experiments with a General Circulation Model”, *J. Atmos. Sci.*, 38; 2653–2675. DOI: [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1981\)038<2653:OTDODI>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1981)038<2653:OTDODI>2.0.CO;2)
- MUÑOZ, E., WEIJER, W., GRODSKY, S., BATES, S.C., 2011, “Tropical Atlantic Oceanic Variability in the CCSM4”, *Journal of Climate*.
- NAMIAS, J., 1972, 1972, “Influence of northern hemisphere general circulation on drought in northeast Brazil”, *Tellus* XXIV, 4.
- NEVES, J.A., MELO, S.B., SAMPAIO, E.V.S.B, 2016, “An Index of Susceptibility to Drought (ISD) for the Semiarid Brazilian Northeast”, *Revista Brasileira de Meteorologia*, 31: 177-195.

NOAA Ocean Services Education. “Tides”. Disponível em: <http://oceanservice.noaa.gov/education/kits/tides/media/supp_tide07a.html>. Acesso em: agosto de 2015.

NOAA.ESRL – University of Delaware Air Temperature & Precipitation. Disponível em: http://www.cdc.noaa.gov/data/gridded/data.UDel_AirT_Precip.html. Acesso em 24/08/2018.

NOBRE, C. A. & MOLION, L.C.B., “The Climatology of Droughts and Drought Prediction”, *In: “Impacts of Climatic Variations on Agriculture”, v.2: “Assesments in semi-arid regions”, M. P. Parry, T.R. Carter e N. T. Konijn (eds.), 1988, D. Reidel Pub. Co., 764p.*

NORDLUND, A. et al., 2009, “Solar Surface Convection”, *Living Rev. Solar Phys.*, 6, 2, <http://www.livingreviews.org/lrsp-2009-2>

OKUMURA, Y. & S. XIE, 2006, “Some Overlooked Features of Tropical Atlantic Climate Leading to a New Niño-Like Phenomenon”, *J. Climate*, 19, 5859–5874. DOI: <https://doi.org/10.1175/JCLI3928.1>

OLIVEIRA, M.J., CARNEIRO, C.D.R., VECCHIA, F.A.S., BAPTISTA, G.M.M., 2017, “Ciclos climáticos e causas naturais das mudanças do clima”, *Terræ Didactica*, 13 (3): 149-184. DOI: <https://doi.org/10.20396/td.v13i3.8650958>

OLIVEIRA, P.T., SANTOS e SILVA, C.M., LIMA, K.C. “Climatology and trend analysis of extreme precipitation in subregions of Northeast Brazil”. *Theor Appl Climatol*, 130: 77. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00704-016-1865-z>

PALHARINI, R.S.A., VILA, D.A., 2017, “ Climatological Behavior of Precipitating Clouds in the Northeast Region of Brazil,” *Advances in Meteorology*, Article ID 5916150, 12 p. DOI: <https://doi.org/10.1155/2017/5916150>

PEÑA, J. C. et al., 2015, “Influence of solar forcing, climate variability and modes of low-frequency atmospheric variability on summer floods in Switzerland”, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 19, 3807–3827.

PEREIRA, M.P.S., JUSTINO, F., MALHADO, A.C.M., BARBOSA, H., MARENGO, J., 2014, “The influence of oceanic basins on drought and ecosystem dynamics in Northeast Brazil”, *Environ. Res. Lett.* 9 (2014) 124013-124021. DOI:10.1088/1748-9326/9/12/124013

PERRY, C. A.; HSU, K. J., 2000, “Geophysical, archaeological, and historical evidence support a solar-output model for climate change”, *PNAS*, vol. 97, No. 23, 12433–12438. DOI: 10.1073/pnas.230423297

Phys.org. *A new look at the sun's magnetic field*. Disponível em: <<http://phys.org/news/2015-03-sun-magnetic-field.html>>. Acesso em: agosto de 2015.

RAY, R. D., 2007, “Decadal Climate Variability: Is There a Tidal Connection?”, *Journal of Climate*, 20: 3542-3560. DOI: 10.1175/JCLI4193.1

PONTES DA SILVA, B.F.P., FEDOROVA, N., LEVIT, V., PERESETSKY, A., BRITO, B.M., 2011, “Sistemas Sinóticos Associados às Precipitações Intensas no Estado de Alagoas”, *Revista Brasileira de Meteorologia*, 26 (3): 323-338.

RAO, V.B., HADA, K., 1990, “Characteristics of Rainfall over Brazil: Annual Variations and Connections with the Southern Oscillation”. *Theor. Appl. Climatol.* 42: 81- 91. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF00868215>

REID, G. C., 2015, “Solar Variability and the Earth's Climate: Introduction and Overview”, *Space Science Reviews* 94: 1–11.

RODRIGUES, R.R., HAARSMA, R.J., CAMPOS, E.J.D., AMBRIZZI, T., 2011, “The Impacts of Inter–El Niño Variability on the Tropical Atlantic and Northeast Brazil Climate”, *Journal of Climate*, 24: 3402-3422. DOI: 10.1175/2011JCLI3983.1

RODRIGUES, R.R., MCPHADEN, M.J., 2014, “Why did the 2011–2012 La Niña cause a severe drought in the Brazilian Northeast?”, *Geophys. Res. Lett.*, 41: 1012–1018. DOI:10.1002/2013GL058703

ROGACHEV, K. A. & SHLYK, N. V., 2018, “Salinity Variations of the Intermediate Oyashio Waters and Their Relation with the Lunar Nodal Cycle”, *Oceanology* 58(1): 1–7. DOI: 10.1134/S0001437018010113

ROYER, T. C., 1993, “High-Latitude Oceanic Variability Associated With the 18.6-Year Nodal Tide”, *Journal of Geophysical Research*, 98: 4639-4644.

SAMPAIO FERRAZ, J., 1925, “Causas prováveis das secas do Nordeste brasileiro (Probable causes of droughts in Northeast Brazil)”. Ministerio da Agricultura, Diretoria de Meteorologia, Rio de Janeiro, 12 pp.

SASAKI, D.K., “Mudanças dos modos de variabilidade do Atlântico Tropical no Século XX”, Dissertação apresentada ao Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.

SCAFETTA, N., 2010, “Empirical evidence for a celestial origin of the climate oscillations and its implications”, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 72: 951-970. DOI: 10.1016/j.jastp.2010.04.015

SCAFETTA, N., 2012, “Multi-scale harmonic model for solar and climate cyclical variation throughout the Holocene based on Jupiter-Saturn tidal frequencies plus the 11-year solar dynamo cycle”, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* (2012). doi:10.1016/j.jastp.2012.02.016

SERVAIN, J., 1991, “Simple climatic indices for the tropical Atlantic Ocean and some applications”, *JGR: Oceans*, 96 (C8): 15137-15146. DOI: <https://doi.org/10.1029/91JC01046>

SHEFFIELD, J., GOTETI, G., WOOD, E.F., 2006, “Development of a 50-yr High-Resolution Global Dataset of Meteorological Forcings for Land Surface Modeling”, *Journal of Climate*, n. 19 (13), p. 3088-3111.

SIDORENKOV, N.S., 2016, “Celestial Mechanical Causes of Weather and Climate Change” *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics* (2016) 52: 667-682. <https://doi.org/10.1134/S0001433816070094>

SILVA, L.W., XAVIER, L.N.R., MACEIRA, M.E.P., ROTUNO, O.C., 2018, “Climatological and hydrological patterns and verified trends in precipitation and streamflow in the basins of Brazilian hydroelectric plants”, *Theor Appl Climatol*: 1-19. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00704-018-2600-8>

SOUZA, E.B., AMBRIZZI, T., 2006, “Modulation of the intraseasonal rainfall over tropical Brazil by the Madden–Julian oscillation”, *Int. J. Climatol.* 26: 1759–1776. DOI: 10.1002/joc.1331

SOUZA, E.B., KAYANO, M.T., AMBRIZZI, T., 2004, “The Regional Precipitation over the Eastern Amazon/Northeast Brazil Modulated by Tropical Pacific and Atlantic SST anomalies on Weekly Timescale” *Revista Brasileira de Meteorologia*, 19 (2): 113-122. <http://dx.doi.org/10.1590/S0102-77862007000100007>

SOLANKI, S. K., 2003, “Sunspots: An overview”, *The Astron Astrophys Rev*, 11: 153–286. DOI: 10.1007/s00159-003-0018-4

SOLANKI, S.K., USOSKIN, I.G., KROMER, B., SHÜSSLER, M., BEER, J., 2004, “Unusual activity of the Sun during recent decades compared to the previous 11,000 years”, *Nature*, 431: 1084–1087.

SOLANKI, S. K. et al., 2006, “The Solar Magnetic Field”, *Rep. Prog. Phys.* 69, 563–668. DOI:10.1088/0034-4885/69/3/R02

SOON, W., CONNOLLY, R., CONNOLLY, M., 2015, “Re-evaluating the role of solar variability on Northern Hemisphere temperature trends since the 19th century”, *Earth-Science Reviews* 150: 409–452.

STEFFEN, K., BOX, J.E., ABDALATI, W., 1996, “Greenland Climate Network: GCNet”. Colbeck, S. C. Ed. *CRREL 9627 Special Report on Glaciers, Ice Sheets and Volcanoes*, trib. to M. Meier, 98-103.

STEIN, R., 2012, “Solar Surface Magneto-Convection”, *Living Rev. Solar Phys.*, 9, 4, <http://www.livingreviews.org/lrsp-2012-4>.

STOCKCHARTS, “Moving Average Convergence/Divergence Oscillator (MACD)”. Disponível em: http://stockcharts.com/school/doku.php?id=chart_school:technical_indicators:moving_averages_convergence_divergence_macd. Acesso em: maio de 2018.

STOZHKOVA, Y. I., 2017, “Cosmic Rays, Solar Activity, and Changes in the Earth’s Climate”, ISSN 1062-8738, *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*, 2017, Vol. 81, No. 2, pp. 252–254.

SVENSMARK, H., BONDO, T., SVENSMARK, J., 2009, “Cosmic ray decreases affect atmospheric aerosols and clouds”, *Geophys. Res. Lett.*, 36, L15101. DOI: 10.1029/2009GL038429

SVENSMARK, H., ENGHOFF, M.B., PEDERSEN, J.O.P., 2013, “Response of cloud condensation nuclei (>50nm) to changes in ion-nucleation”, *Physics Letters A*, 377 (37): 2343-2347. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.physleta.2013.07.004>

SVENSMARK, J., ENGHOFF, M. B., SHAVIV, N., SVENSMARK, H., 2016, “The response of clouds and aerosols to cosmic ray decreases”, *J. Geophys. Res. Space Physics*, 121: 8152–8181. DOI:10.1002/2016JA022689

SVENSMARK, H., ENGHOFF, M.B., SHAVIV, N.J., SVENSMARK, J., 2017, “Increased ionization supports growth of aerosols into cloud condensation nuclei”, *Nature Communications*, 8: 2199. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41467-017-02082-2>

UALBERTA, “The Internal Structure of the Sun”, Chapter 16, 8th Ed. pages 403-413. Disponível em: http://www.ualberta.ca/~pogosyan/teaching/ASTRO_122/lect8/lecture8.html. Acesso em: agosto de 2015.

ULLMAN, D. et al., 2016, “Determining the Effect of the Lunar Nodal Cycle on Tidal Mixing and North Pacific Climate Variability”, *Ocean Sciences Meeting*, 2016, New Orleans, Louisiana, EUA. American Geophysical Union.

UVO, C.B., REPELLI, C.A., ZEBIAK, S.E., KUSHNIR, Y., 1998, “The Relationships between Tropical Pacific and Atlantic SST and Northeast Brazil Monthly Precipitation”, *Journal of Climate*, 11: 551-562.

VALADÃO, C.E.A., CARVALHO, L.M.V., LUCIO, P.S., CHAVES, R.R., 2017, “Impacts of the Madden-Julian oscillation on intraseasonal precipitation over Northeast Brazil”, *Int. J. Climatol.* 37: 1859–1884. DOI: 10.1002/joc.4818

VIEIRA, R. M. S. P., TOMASELLA, J., ALVALÁ, R. C. S., SESTINI, M. F., AFFONSO, A. G., RODRIGUEZ, D. A., BARBOSA, A. A., CUNHA, A. P. M. A., VALLES, G. F., CREPANI, E., DE OLIVEIRA, S. B. P., DE SOUZA, M. S. B., CALIL, P. M., DE CARVALHO, M. A., VALERIANO, D. M., CAMPELLO, F. C. B., AND SANTANA, M. O., 2015, “Identifying areas susceptible to desertification in the Brazilian northeast”, *Solid Earth*, 6: 347-360. <https://doi.org/10.5194/se-6-347-2015>.

WALKER, G.T., 1928, “Ceara (Brazil) famines and the general air movement”. *Beitr. Phys. Frein Atmos.*, 14, 88-93.

WANG, C., 2002: Atlantic Climate Variability and Its Associated Atmospheric Circulation Cells. *J. Climate*, 15, 1516–1536. DOI: [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2002\)015<1516:ACVAIA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2002)015<1516:ACVAIA>2.0.CO;2)

WANG, C., ENFIELD, D.B., LEE, S-K, LANDSEA, C.W., 2007, “Influences of the Atlantic Warm Pool on Western Hemisphere Summer Rainfall and Atlantic Hurricanes”, *Journal of Climate*, 19: 3011-3028. DOI: <https://doi.org/10.1175/JCLI4304.1>

WANG, Y., LIU, Y., ZHANG, H. et al., 2018, “Temperature variability inferred from tree-ring records in Weichang region, China, and its teleconnection with large-scale climate forcing”, *Climate Dynamics*: 1-13. <https://doi.org/10.1007/s00382-018-4213-4>

WEBBER, S.R., WILLMOTT, J., 1998, “South American Precipitation: Gridded Monthly and Annual Climatologies”. Version 1.02, with support from NASA's Seasonal to Interannual ESIP, created October 28.

WIKIPEDIA, “MACD”. Disponível em: <<https://en.wikipedia.org/wiki/MACD>>. Acesso em: setembro de 2015.

WILES, P. S. & ENCKE, D., 2015, “Optimizing MACD Parameters via Genetic Algorithms for Soybean Futures”, *Procedia Computer Science* 61 (2015) 85 – 91. DOI: 10.1016/j.procs.2015.09.157

YASUDA, I. et al., 2006, “Possible explanation linking 18.6-year period nodal tidal cycle with bi-decadal variations of ocean and climate in the North Pacific”, *Geophysical Research Letters*, 33, L08606. DOI: 10.1029/2005GL025237

YASUDA, Ichiro, 2009, “The 18.6-year period moon-tidal cycle in Pacific Decadal Oscillation reconstructed from tree-rings in western North America”, *Geophysical Research Letters*, 36, L05605. DOI: 10.1029/2008GL036880

YNDESTAD, Harald, 2006, “The influence of the lunar nodal cycle on Arctic climate”, *ICES Journal of Marine Science*, 63: 401-420. DOI: 10.1016/j.icesjms.2005.07.015

ZEBIAK, S.E., 1993, “Air–Sea Interaction in the Equatorial Atlantic Region”, *J. Climate*, 6: 1567–1586. DOI: [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1993\)006<1567:AIITEA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1993)006<1567:AIITEA>2.0.CO;2)

ZHANG, J. et al., 2009, “Predicting hospitalization due to worsening heart failure using daily weight measurement: analysis of the Trans-European Network-Home-Care Management System (TEN-HMS) study”, *European Journal of Heart Failure* (2009) 11, 420–427. DOI:10.1093/eurjhf/hfp033

ZHOU, J. & LAU, K.M., 2001, “Principal Modes of Interannual and Decadal Variability of Summer Rainfall over South America” *Int. J. Climatol.* 21: 1623–1644. DOI: 10.1002/joc.700.