



Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe>



Aplicando Decomposição em Modos Empíricos para Estudar Oscilação em Escala Decenal nos Dados Pluviométricos da Paraíba

Lourivaldo Mota Lima¹ e Valneli da Silva Melo²

¹Universidade Estadual da Paraíba, Departamento de Física, CCT: e-mail lourivaldo@servidor.uepb.edu.br (Autor Correspondente), <https://orcid.org/0000-0002-9393-2370>

²Universidade Estadual da Paraíba, Programa de Pós-Graduação em Ciências e Tecnologia Ambiental, PPCGTA: e-mail valnelismello@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-6695-3029>

Artigo recebido em 23 /01/2024 e aceito em 17/07/2024

RESUMO

A decomposição em modos empíricos foi usada para extrair oscilações em escala decenal nos dados de precipitação no Estado da Paraíba e comparar as variações com aquelas presentes nos índices climáticos. O método da decomposição em modos empíricos é considerado uma ferramenta útil na extração de informações fisicamente significativas de sinais não lineares e não estacionários. Os dados usados foram obtidos a partir de 170 estações distribuídas no território da Paraíba, entre 1948 e 2016, os quais foram tratados para gerar regiões homogêneas de precipitação. As funções de modos intrínsecos referentes as oscilações com períodos de quase 10 anos, presentes nos dados de precipitação, evidenciaram anticorrelações significativas com as oscilações decenais presente no Modo Meridional do Atlântico e ocasionalmente com as do índice Niño 3.4. A pluviometria das regiões da Paraíba também manifestou oscilação de quase 21 anos, a qual também aparece no Modo Meridional do Atlântico, porém não foi observada no índice Niño 3.4. Os residuais indicaram tendência de queda na precipitação das regiões homogêneas para o intervalo de tempo estudado. Os resultados alcançados através da aplicação da decomposição em modos empíricos, mostraram que as oscilações em escala decenal, presentes na precipitação do Estado da Paraíba e nos índices climáticos analisados, exibiram amplitude e períodos que variam no tempo. Essas variações confirmam que as mudanças na circulação meridional do Atlântico, a qual tem relação com a posição da Zona de Convergência Intertropical, modulam a estação chuvosa do Estado da Paraíba, principalmente das regiões central e oeste do Estado.

Palavras-chave: Climatologia, Precipitação, Índice Climático, Decomposição em Modos Empíricos, Paraíba

Applying Empirical Mode Decomposition to Study Decadal Scale Oscillation in Rainfall Data at Paraíba State

ABSTRACT

The empirical mode decomposition method was used to extract decadal-scale oscillations in precipitation data in the state of Paraíba and compare the variations with those presented in climate indexes. The method is one of the most powerful signal processing techniques and was applied to extract physically meaningful information from nonlinear and nonstationary signals. The data used was obtained from 170 stations distributed in the territory of Paraíba, between 1948 and 2016, which were treated to generate homogeneous precipitation regions. The intrinsic mode functions referring to oscillations with periods of quasi 10 years of the precipitation data showed significant anti-correlations with the decadal oscillations presented in the Atlantic Meridional Mode and occasionally with those of the Niño 3.4 index. The rainfall in the regions of Paraíba also showed an oscillation of almost 21 years, which also appears in the Atlantic Meridional Mode, but it was not observed in the Niño 3.4 index. The residuals indicated a downward trend of precipitation in homogeneous regions for the time interval studied. The results obtained through the application of the empirical mode decomposition shows that the oscillations on a decadal scale, presented in the rainfall of the State of Paraíba and in the analyzed climate indexes, exhibited amplitude and periods that vary over time. These variations confirm that changes in the Atlantic Meridional circulation, which is related to the position of the Intertropical Convergence Zone, modulate the rainy season in the State of Paraíba, mainly in the central and western regions of the State.

Keywords: Precipitation, Climate index, Empirical Mode Decomposition, Paraíba

Introdução

As alterações climáticas têm levado a mudança no padrão de chuvas em algumas regiões, o que possivelmente acarretará num aumento da ocorrência de períodos de secas prolongadas e/ou de chuvas intensas ocasionais, bem como tornar os eventos extremos mais frequentes e intensos, prejudicando assim o ciclo hidrológico e, conseqüentemente, irá comprometer ainda mais a disponibilidade de água tanto para consumo como para às atividades agrícolas.

As previsões reproduzidas a partir de simulações realizadas com modelos climáticos regionalizados, sugerem que, com as alterações climáticas em curso, haverá um aumento da temperatura e desconforto térmico no Nordeste do Brasil, bem como uma grande variabilidade no regime de chuvas, podendo ocorrer uma redução da mesma em diversas regiões, principalmente no Semiárido (Marengo et al., 2017, Costa et al., 2021).

Na região tropical existe uma concentração de umidade associada a incidência de energia solar (Reboita et al., 2012), o que causa uma maior quantidade de chuvas na faixa equatorial. Porém, a distribuição dessas chuvas na região tropical é bastante irregular tanto no espaço como no tempo.

No caso da região Nordeste do Brasil, a variabilidade do clima está relacionada às variações da temperatura da superfície do mar nos oceanos Pacífico e Atlântico (Kayano e Capistrano, 2014; Marengo et al., 2017), bem como da Zona de Convergência Intertropical - ZCIT (Utida et al., 2019) e El Niño-Oscilação Sul - ENOS (Alves et al., 2017), os quais possuem conexões entre si.

Em regiões como o Nordeste do Brasil, principalmente no Semiárido, a precipitação é uma variável hidroclimática determinante das condições do clima local e um fenômeno representativo de sistemas climáticos complexos, bem como da sua variabilidade e mudança em longo prazo. A análise da tendência de séries históricas de precipitação é uma das maneiras de se determinar a ocorrência de mudança climática local, possibilitando a avaliação de suas conseqüências sobre as bacias hidrográficas, e seus impactos na gestão dos recursos hídricos.

Em geral, os estudos da variabilidade em séries históricas são realizados a partir da identificação e extração dos modos presentes usando as formas tradicionais de análise espectral, que têm como base a síntese de Fourier, em que é assumido que uma série temporal pode ser decomposta em um conjunto de componentes lineares (Andrade et al., 2018, Hayden e Liu, 2021).

No entanto, os sinais hidrometeorológicos não são estacionários e, portanto, os seus processos físicos geralmente se manifestam em uma ampla faixa de escalas que se estende desde dias a décadas, o que tem levado ao uso da transformada wavelet contínua, em que a mesma foi introduzida e desenvolvida e vem sendo amplamente utilizada para revelar as características de múltiplas escalas de tempo desses sinais não estacionários (Torrence e Compo, 1998, Araújo et al., 2012).

Por natureza o sistema climático é complexo e não linear, e a maioria das variações presentes nos fatores climáticos revelam processos não lineares e não estacionários, como é o caso da precipitação (Zhang et al., 2019), de modo que as técnicas de análise espectral baseadas na síntese de Fourier frequentemente produzem conjuntos de harmônicos sem sentido físico (Huang et al., 1998) e, apesar do seu bom desempenho quando se trata de sinais não estacionários, o método da transformada de wavelet não consegue discriminar as frequências instantâneas.

Para lidar com sinais não estacionários, diversas técnicas avançadas de análise no domínio do tempo e da frequência foram introduzidas. Uma técnica empírica para análise de sinais não lineares para variações complexas e não estacionárias de sinais no domínio do tempo foi proposta por Huang et al. (1998) a qual é referida como Decomposição em Modos Empíricos (Empirical Mode Decomposition - EMD). A série temporal é decomposta em diferentes escalas chamadas funções de modo intrínseco (Intrinsic Mode Functions - IMF), que podem revelar mudanças intrínsecas no sistema climático (Wu e Huang, 2009).

O método da decomposição em modos empíricos foi usado para investigar tendências de longo prazo nos dados de médias mensais de precipitação, vazões dos rios e temperaturas mínimas do ar na Colômbia (Carmona et al., 2014). A presença de variabilidades e tendências hidroclimáticas na Bacia do Rio Paraná também foram analisadas utilizando o método da decomposição em modos empíricos (Antico et al., 2014).

Usando uma adaptação do método, denominado decomposição em modos empíricos por agrupamento, Guo et al. (2016), estudaram as características intrínsecas em multiescala da variabilidade da precipitação na região noroeste da China. Kim et al. (2018) usaram a mesma adaptação do método para identificar padrões ou

ciclos oscilantes nos índices climáticos obtidos a partir dos totais mensais de precipitação da Coreia do Sul, enquanto Alizadeh et al. (2019) decompueram séries temporais de dados mensais de precipitação, extraídos de pluviômetros no Irã, em funções de modos intrínsecos e identificaram diferentes períodos. Os dados de médias mensais de precipitação e temperatura para uma região na África do Sul também foram decompostos em funções dos modos intrínsecos em diferentes escalas de tempo usando o método da decomposição em modos empíricos por agrupamento, em que as funções dos modos intrínsecos apresentaram uma variabilidade interanual a interdecenal, além de identificarem influências de oscilações associados a fenômenos climáticos (Zvarevashe et al., 2019).

Alguns estudos têm sido realizados para investigar as relações entre variáveis hidroclimáticas e índices climáticos. Empregando transformada de wavelet e correlação linear, Kayano e Andreoli (2004) usaram índices climáticos para estudar a variabilidade decenal da precipitação no norte do Nordeste do Brasil e sua relação com a temperatura da superfície do mar tropical e anomalias globais de pressão no nível do mar. Prado e Waine (2013) também aplicaram transformada de wavelet e correlação linear para analisarem as relações entre índices climáticos e a precipitação no Nordeste e Sul do Brasil, em escala decenal, sugerindo que os principais fenômenos que modulam a precipitação e a estação chuvosa do Nordeste são o ENOS e o ciclo anual da ZCIT.

Ademais, a probabilidade de ocorrência de eventos de seca com maior frequência é maior durante períodos decenais de anomalias de precipitação negativas, e positivas para o caso de inundações (Cayan et al., 1998). Portanto, o estudo dos padrões decenais do clima é importantes para melhor entender a dinâmica das conexões entre a

precipitação da região da Paraíba e os principais modos de variabilidade que a modulam.

No presente estudo, o método da decomposição em modos empíricos é empregado para extrair as oscilações nos dados de precipitação pluviométrica do Estado da Paraíba e analisar possíveis relações com as oscilações nos índices climáticos, em escala decenal.

Material e métodos

Área de Estudo

O clima do Estado da Paraíba é caracterizado como tropical semiárido, cujas temperaturas são elevadas ao longo do ano, tendo como destaque a irregularidade das chuvas, as quais apresentam dois regimes definidos, com chuvas de fevereiro a maio, nas regiões do Sertão, Cariri e Curimataú, enquanto no Agreste, Brejo e Litoral as chuvas ocorrem de abril a julho.

Os dados pluviométricos usados no presente estudo foram coletados em 170 postos/estações no Estado da Paraíba, distribuídos em todo o estado conforme mostrado no mapa da Figura 1. As observações compreendem o período entre 1948 e 2016, e foram obtidos do banco de dados da Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste (SUDENE) e da Agência Nacional de Águas (ANA). Os dados pluviométricos foram submetidos a análises de consistência, homogeneização e preenchimento de falhas, utilizando pares de pontos com máxima correlação, gerando assim superfícies homogêneas de precipitação (Depiné et al., 2014).

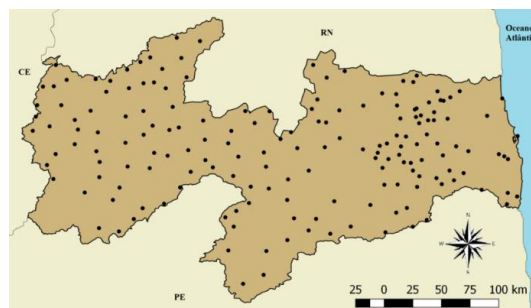


Figura 1: Distribuição espacial dos locais de coleta dos dados pluviométricos.

Para delimitar as sub regiões climatologicamente homogêneas e distintas entre si, o método de Análise de Agrupamento (AA) foi

aplicado aos dados pluviométricos. Os grupos homogêneos foram identificados por meio do corte transversal no dendrograma, utilizando o critério

matemático da inércia para divisão prévia de grupos seguindo o método de Ward, o qual tem como base o mínimo incremento de variância, ou seja, busca minimizar a distância média entre as séries históricas dos postos (Terassi e Galvani, 2017).

A partir da análise de agrupamento foram identificados três grupos homogêneos com relação às características climáticas da precipitação do estado da Paraíba, como pode ser visto no mapa da Figura 2.

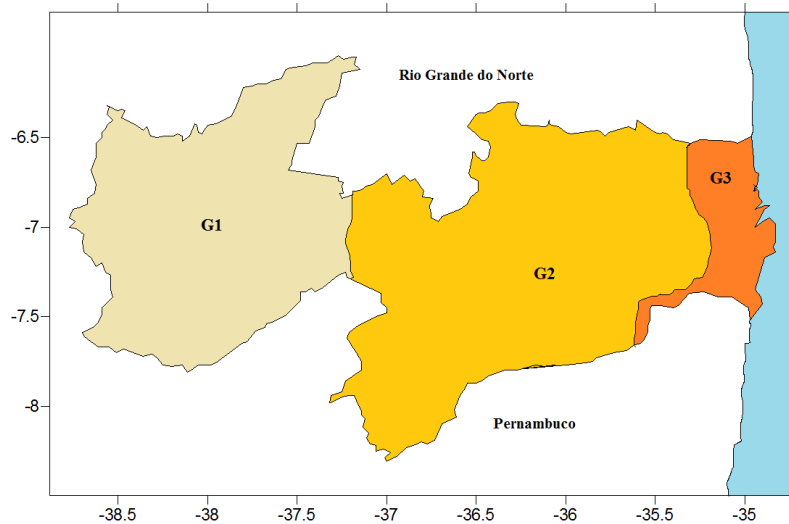


Figura 2: Regionalização da análise de agrupamento (AA) no estado da Paraíba, PB.

Método da Decomposição em Modos Empíricos

O método de decomposição em modos empíricos, introduzido pela primeira vez por (Huang et al., 1998), essencialmente decompõe em um número limitado de funções de modos intrínsecos qualquer conjunto de dados complexos. O procedimento de decomposição é realizado da seguinte maneira:

Toma-se a série original de dados que se pretende decompor como sendo $S_o(t)$. Estimam-se os envelopes superior e inferior dos máximos e mínimos locais, usando uma interpolação spline cúbica. Em seguida, o valor médio dos envelopes superior e inferior, $m_1(t)$, é subtraído da série temporal original, ou seja:

$$IMF_1(t) = S_o(t) - m_1(t) \quad \text{Eq (1)}$$

em que, $IMF_1(t)$ seria a primeira função de modo intrínseco. Após a função de modo intrínseco inicial ser encontrada, ela é subtraída da série temporal original, e o procedimento é repetido para localizar a segunda função de modo intrínseco. Cada função em modo intrínseco deve satisfazer as seguintes condições: (1) em todo o conjunto de dados, o número de extremos deve ser igual ao número de cruzamentos de zero ou diferir dele no máximo em um; e (2) em qualquer ponto, o valor médio dos dois envelopes determinado

pelos máximos e mínimos locais deve ser zero (Huang et al., 1998). O processo é então repetido até satisfazer as duas condições acima.

Índices Climáticos

Os índices usados para caracterizar as relações entre as variações decenais na pluviometria e fenômenos climáticos foram os seguintes:

(i) o Modo Meridional do Atlântico (Atlantic Meridional Mode - AMM), o qual representa flutuações sazonais a decenais no gradiente inter-hemisférico da temperatura da superfície do mar no Atlântico tropical, próximo a Zona de Convergência Intertropical, e o método de obtenção pode ser encontrado em Chiang e Vimont (2004) e Amaya et al. (2017), cujos índices estão disponíveis no endereço eletrônico: <https://psl.noaa.gov/data/timeseries/monthly/AMM/>.

(ii) o índice Niño 3.4 definido por Barnston et al. (1997), representa as anomalias da temperatura do oceano, pacífico e é amplamente utilizado para definir as fases do ENOS, foram obtidas no endereço eletrônico: https://psl.noaa.gov/gcos_wgsp/Timeseries/Nino34/.

Resultados e discussão

Funções de modos empíricos

Nas Figuras 3, 4 e 5 estão representadas as médias mensais dos dados pluviométricos resultantes dos agrupamentos para cada região G1, G2 e G3 (painéis superiores de cada figura), respectivamente, bem como as cinco principais funções de modos intrínsecos, da mais alta frequência para a mais baixa, indicados nas figuras por IMF-1, IMF-2, IMF-3, IMF-4 e IMF-5. O residual referente a precipitação mensal de cada região homogênea é representado no último painel de cada figura.

Cada componente das funções de modos intrínsecos (IMFs) representa a variação da precipitação em diferentes escalas de tempo.

Fazendo uma análise preliminar dos resultados obtidos da decomposição da

precipitação pluviométrica, verifica-se a variabilidade temporal nos diferentes modos, ou seja nos períodos, o que é mais claro naqueles cujas frequências são menores. Observa-se ainda as amplitudes da variação de alta frequência (IMF-1) é menor na região homogênea G2 do que nas regiões G1 e G3. Note-se que a região homogênea G2 é aquela que apresenta os menores níveis de precipitação quando comparada com as G1 e G3.

Os residuais para o intervalo de tempo considerado no presente estudo, mostram tendências de queda na precipitação para as regiões G1 e G2, enquanto para a região G3 observa-se uma breve elevação na precipitação entre 1948 e 1966, contudo, após 1966, a precipitação passa a sofrer uma diminuição com o tempo.

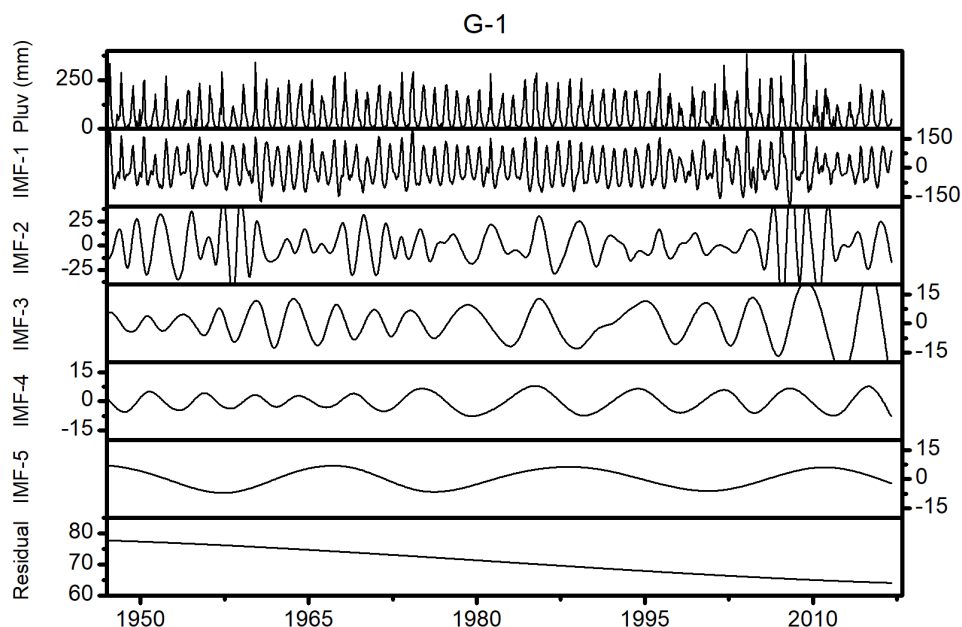


Figura 3: Evolução temporal da precipitação média mensal da região G1 para o período de 1948 a 2016, no estado da Paraíba (Painel superior). As 5 principais funções de modos intrínsecos (IMFs) extraídos do método de decomposição em modo empírico e o residual são representadas conforme indicados.

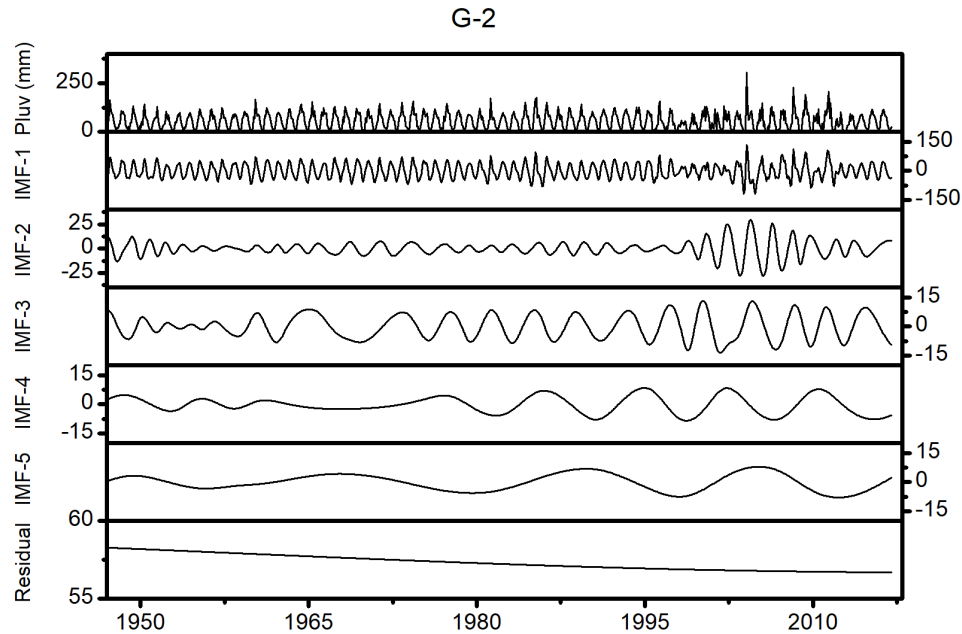


Figura 4: O mesmo que a Figura 3, porém para a região G2.

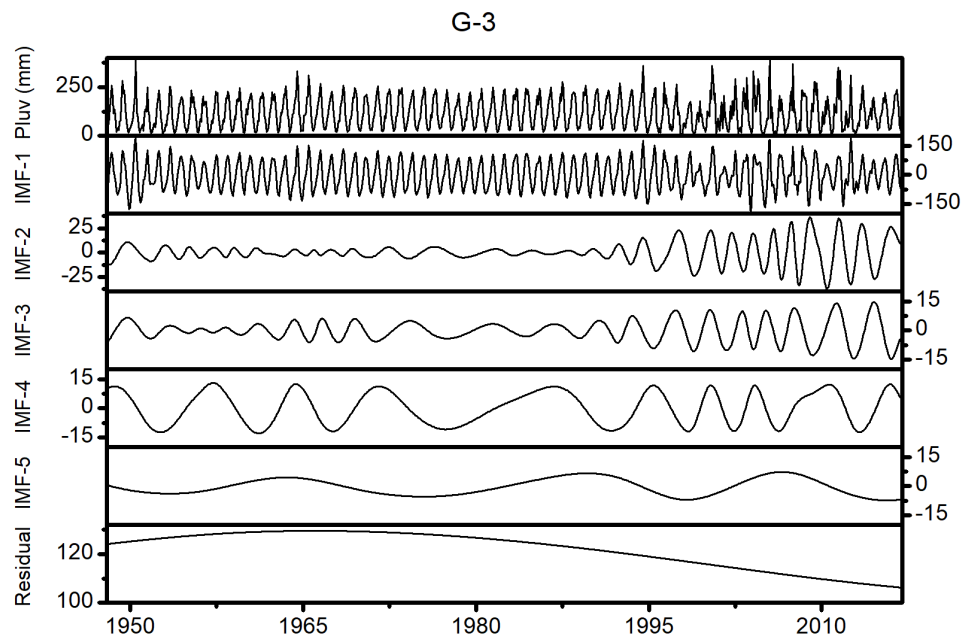


Figura 5: O mesmo que a Figura 3, porém para a região G3

Períodos dominantes nas IMFs da Pluviosidade

Para caracterizar as oscilações com períodos dominantes, cada série temporal de dados pluviométricos e de funções de modos intrínsecos (IMFs), foram submetidos à análise espectral usando a técnica do periodograma de Lomb-Scargle (Scargle, 1982). O método do periodograma de Lomb Scargle é equivalente a uma análise de mínimos quadrados para

harmônicos puros, em que os dados são ponderados por ponto e não por intervalo de tempo, podendo também ser aplicada no caso em que a série temporal é constituída de dados não igualmente espaçados. Os resultados dos periodogramas de Lomb-Scargle correspondentes as séries de dados mensais pluviométricos (painel superior) e das funções de modos intrínsecos (IMFs), são representados na Figura 6 para as regiões G1 (linha preta), G2 (linha vermelha) e G3

(linha azul), respectivamente. É importante ressaltar que todos os picos de energia espectral presentes nos gráficos, ultrapassam o nível de significância de 95%.

Conforme pode ser constatado, os espectros das pluviosidades para as 3 regiões agrupadas são dominados pela ocorrência anual de chuvas, o que também define a oscilação periódica dominante da primeira função de modo intrínseco (IMF-1) para as 3 regiões.

No caso da segunda função de modo intrínseco (IMF-2), a região G1 apresenta uma oscilação em que o período de 1,6 anos predomina. Na região G2, a oscilação tem período predominante de quase dois anos, enquanto na região G3 a oscilação tem período predominante de 2,4 anos, com picos secundários de 1,9 e 2,8 anos.

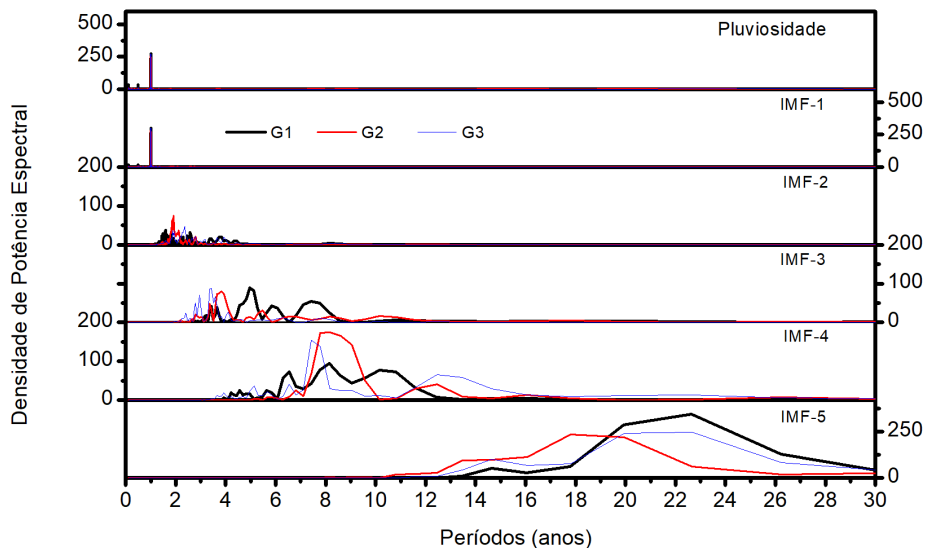


Figura 6: Periodogramas de Lomb-Scargle correspondentes às séries de dados mensais pluviométricos (painel superior) e às funções de modos intrínsecos (IMFs), para as regiões G1 (linha preta), G2 (linha vermelha) e G3 (linha azul).

De acordo com os periodogramas obtidos para terceira função de modo intrínseco (IMF-3), verifica-se que para a região G1 a oscilação apresenta um pico principal em torno do período de 5 anos, além de picos secundários em 3,4, 5,8 e 7,4 anos. Para a região G2, a oscilação é dominada por período centrado em 3,8 anos, com pico secundário em 5,4 anos, enquanto para a região G3 prevalece o período em torno de 3,4 anos, com pico secundário em 2,9 anos.

A quarta função de modo intrínseco (IMF-4), mostra que para a região G1 a oscilação apresenta um pico centrado em 8,1 anos, além de picos secundários em 6,5 e 10,4 anos. Para a região G2 a oscilação apresenta um pico principal de energia espectral em 7,7 anos e pico secundário em 12,4 anos. Já para a região G3, tem-se que a oscilação extraída apresenta duas periodicidades igualmente importantes, uma em 7,4 anos e outra em 12,4 anos.

Para a quinta função de modo intrínseco (IMF-5) a oscilação presente na precipitação da

região G1 tem período em torno de 22 anos. A região G2 apresenta energia espectral em torno do período de 19 anos. A oscilação para região G3 tem período em torno de 21 anos.

Correlação entre IMFs da Pluviometria e dos IMFs dos índices AMM

Uma vez que os efeitos das teleconexões envolvendo a Zona de Convergência Intertropical e El Niño-Oscilação Sul sobre a precipitação, na região do estudo, podem ser avaliados a partir de índices climáticos, as correlações entre as variações nos índices climáticos e na pluviosidade foram estimadas.

O Modo Meridional do Atlântico (AMM) está relacionado ao gradiente meridional da temperatura da superfície do oceano nos trópicos nas proximidades da ZCIT (Chiang e Vimont 2004). Portanto, o índice AMM foi usado para representar as variações na ZCIT na estimativa da correlação com as oscilações na precipitação das regiões G1, G2 e G3.

As correlações foram significativas entre as oscilações de longos períodos (quase decenais - 6,5 a 12,4 anos) da pluviosidade (IMF-4) e do índice AMM (IMF-5), como também para as oscilações de 18 a 22 anos. Para as oscilações quase decenais, os coeficientes de correlação estimados foram de $r=-0,70$ (Pearson) e $\sigma=-0,69$ (Sperman) para a região G1; $r=-0,26$ e $\sigma=-0,27$ para região G2; e $r=-0,23$ e $\sigma=-0,23$ para região G3. No caso das oscilações de quase 20 anos, os coeficientes obtidos foram de $r=-0,45$ e $\sigma=-0,43$ para a região G1; $r=-0,34$ e $\sigma=-0,34$ para região G2; e $r=-0,23$ e $\sigma=-0,23$ para região G3.

A anticorrelação obtida dos coeficientes estimados estão em acordo com o esperado, já que, durante a fase positiva da AMM, a ZCIT é deslocada para o norte, causando redução de precipitação no Nordeste do Brasil, já para a fase negativa do AMM tem-se a migração da ZCIT para a direção sul (Nobre e Shukla 1996; Chiang e Vimont 2004; Rugg et al, 2016).

Espectro em Wavelet

Para ilustrar a evolução temporal das oscilações quase decenais, a transformada em

wavelet de Morlet foi aplicada as IMFs-4 da pluviosidade das regiões G1, G2 e G3, e a IMF-5 do índice AMM, sendo os resultados mostrados na Figura 7.

A partir dos espectros em wavelets, observa-se na IMF-4 para a região G1 uma oscilação com período de quase 10 anos com início em 1965 e centrada no ano de 1983, tem seu período decaindo a partir de 1991 para quase 8 anos em 2016. Para a região G2, a oscilação de quase 10 anos também aparece em torno de 1965, porém o período de quase 8 anos predomina entre 1983 e 2016. Para a região G3, a IMF-4 exibe energia espectral para período de quase 8 anos entre 1948 e 1974 e entre 1990 e 2016, enquanto o período em torno de 12 anos domina o espectro entre 1965 e 1995.

No caso da IMF-5 obtido da série temporal do índice AMM, o espectro é dominado por dois núcleos, o primeiro centrado em torno de 1980 com período em torno de 10 anos, que decai a partir de 1983 até 2016, caracterizando assim o segundo núcleo centrado em 2005, em que o período de quase 8 anos domina.

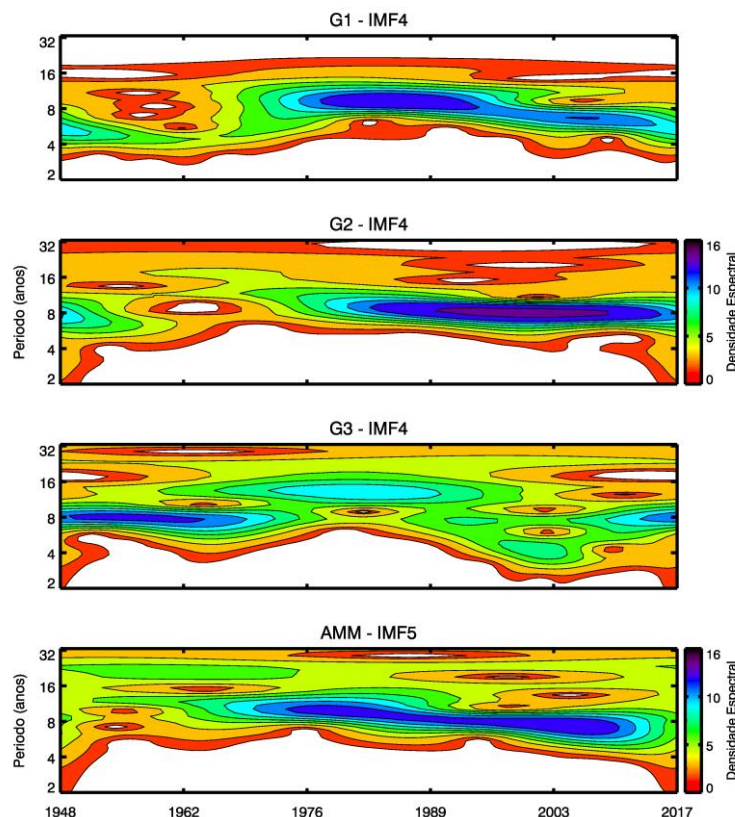


Figura 7: Espectros em wavelet de Morlet referentes as IMFs 4 pluviométricos, para as regiões G1, G2 e G3 (conforme indicações) e a IMF 5 do índice AMM (painel inferior).

Correlação cruzada entre IMFs da Pluviometria e dos IMFs dos índices AMM e Niño 3.4

Analisando os espectros em wavelet das IMFs-4 pluviométricos das três regiões homogêneas, é possível sugerir semelhanças no tempo com o espectro em wavelet para a IMF-5 do AMM. Com o intuito de captar a relação entre as oscilações nas IMFs-4 de cada região e na IMF-5 do AMM em termos de tempo-escala, as séries foram submetidas à análise de espectro cruzado em wavelet e os resultados são apresentados na Figura 8 (coluna do lado direito). Na coluna do lado esquerdo são representados as IMFs-4 da

precipitação pluviométrica para cada região (linhas contínuas pretas) e a IMF-5 do índice AMM sobreposto em cada gráfico (linha pontilhada vermelha).

A evolução temporal das IMFs-4 da precipitação pluviométrica e da IMF-5 do índice AMM (gráficos da coluna do lado esquerdo), para a região G1 e G2, mostram que as oscilações que seguem com diferenças de fase que variam no tempo a partir de 1962, enquanto para a região G3 não se mostram coerentes ao longo do período estudado.

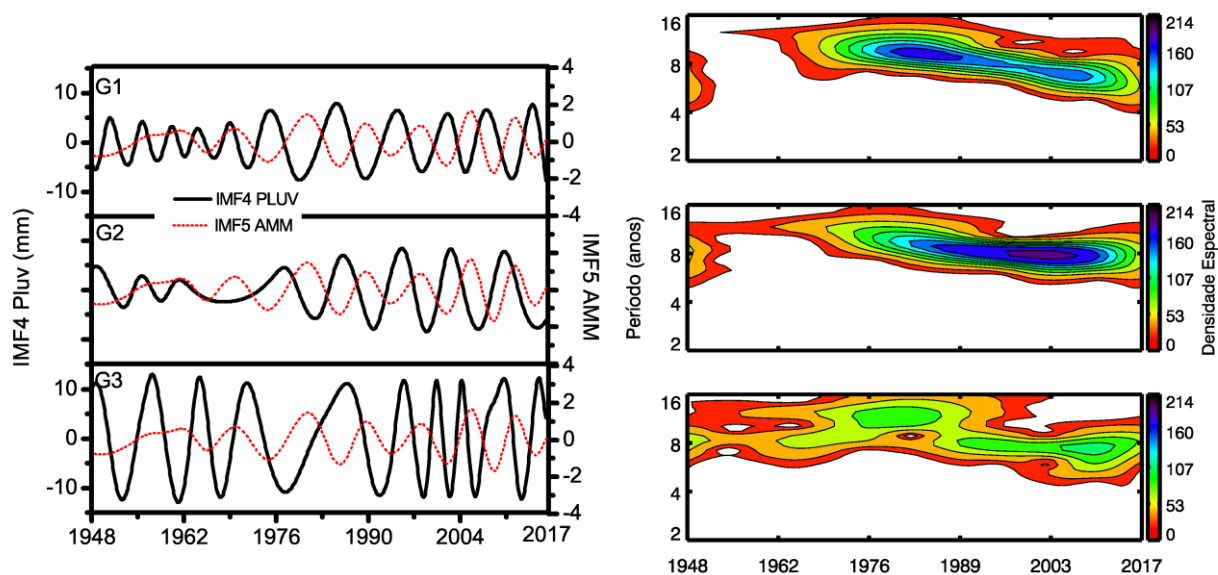


Figura 8: IMFs-4 pluviométricos (linhas contínuas pretas), para as regiões G1 (superior), G2 (centro) e G3 (inferior) e a IMF-5 do índice AMM (linha pontilhada vermelha) e respectivos espectros cruzados em wavelet (coluna do lado direito).

Conforme pode ser visto a partir dos gráficos, as semelhanças são confirmadas pelos espectros cruzados, em que as variações nos períodos exibem evolução temporal seguindo aproximadamente as mesmas características dos espectros originais referentes às oscilações obtidas das IMFs da precipitação e do índice AMM. Também fica evidente que a energia resultante dos espectros cruzados em wavelet é mais intensa para as regiões G1 e G2, sugerindo que as oscilações em períodos quase decenais na precipitação dessas duas regiões estão conectadas com as referidas oscilações no índice AMM, o qual possui relação com a posição da ZCIT.

No caso das oscilações com períodos em torno de 22 anos, os espectros cruzados em wavelet referentes aos IMFs-5 de cada região e na IMF-6 do AMM em termos de tempo-escala são apresentados na Figura 9 (coluna do lado direito),

onde também são representados, na coluna do lado esquerdo, as IMFs-5 da precipitação para cada região (linhas contínuas pretas) e a IMF-6 do índice AMM sobreposto em cada gráfico (linha pontilhada vermelha).

As IMFs-5 pluviométricos e a IMF-6 do índice AMM (gráficos da coluna do lado esquerdo), para as três regiões mostram que as oscilações seguem em fases opostas até em torno do ano de 2004.

Os gráficos referentes aos espectros cruzados evidenciam semelhanças entre as oscilações de quase 22 anos nos dados de precipitação e nos dados de AMM, para as regiões G1 e G3 ao longo de todo o período considerado no presente estudo. Para a região G2, as semelhanças entre as oscilações podem ser observadas entre 1960 e 2003.

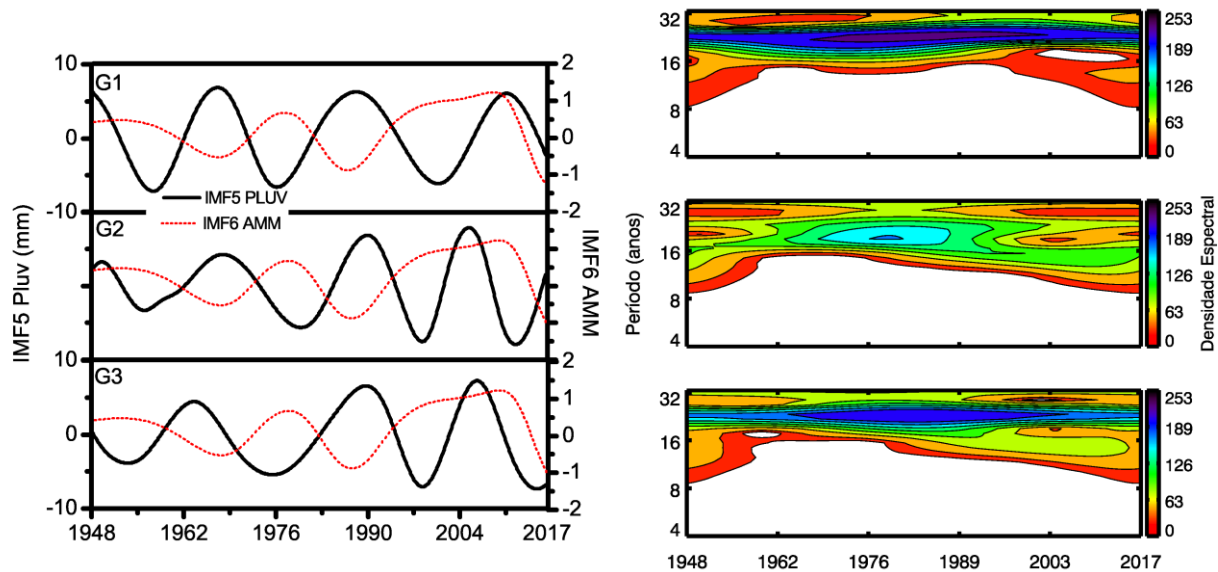


Figura 9: IMFs-5 pluviométricos (linhas contínuas pretas), para as regiões G1 (superior), G2 (centro) e G3 (inferior) e a IMF-6 do índice AMM (linha pontilhada vermelha) e respectivos espectros cruzados em wavelet (coluna do lado direito).

Estudos têm mostrado que o AMM pode ser provocado por variações na Oscilação do Atlântico Norte (North Atlantic Oscillation - NAO) e no ENOS (Chiang et al., 2002). Acredita-se que a variabilidade decenal presente no AMM pode ser devida a Oscilação Multidecadal do Atlântico (Atlantic Multi-decadal Oscillation - AMO), visto que, tanto a AMM como o AMO estão relacionados a um gradiente anômalo da temperatura da superfície do mar nos trópicos, bem como a um fluxo inter-hemisférico equatorial e ao deslocamento meridional da ZCIT. De acordo com Veiga et al. (2020), o AMO modula o AMM em escalas decenais, contudo, aponta para a possibilidade das mesmas serem influenciadas por um terceiro fenômeno.

A partir da série temporal do índice Niño 3.4 do ENOS, as IMFs também foram obtidas com o intuito de analisar possíveis relações com as IMFs pluviométricas das regiões G1, G2 e G3 da Paraíba, em escala decenal.

Na Figura 10 estão representados as IMFs-4 pluviométricos (linha contínua preta) para as regiões G1 (superior), G2 (centro) e G3 (inferior), juntamente com as IMF-4 (linha pontilhada vermelha) e a IMF-5 (linha tracejada azul) obtidos do índice Niño 3.4. Na coluna do lado direito são apresentados os espectros cruzados em wavelet entre as IMFs-4 da precipitação pluviométrica das 3 regiões e IMF-4 do índice Niño 3.4. O período da oscilação da IMF-4 do Niño 3.4 (linha pontilhada vermelha) varia ao longo do tempo, porém para os intervalos de tempo entre 1948 e 1962, 1970 e 1980 e, 1989 e 2000, a oscilação se repetiu a cada 6 anos. No caso da IMF-5 do ENOS, o período da oscilação é de quase 10 anos nos intervalos entre 1948 e 1967 e, entre 1995 e 2016, no entanto, entre 1967 e 1995 o período da oscilação aumenta para quase 14 anos.

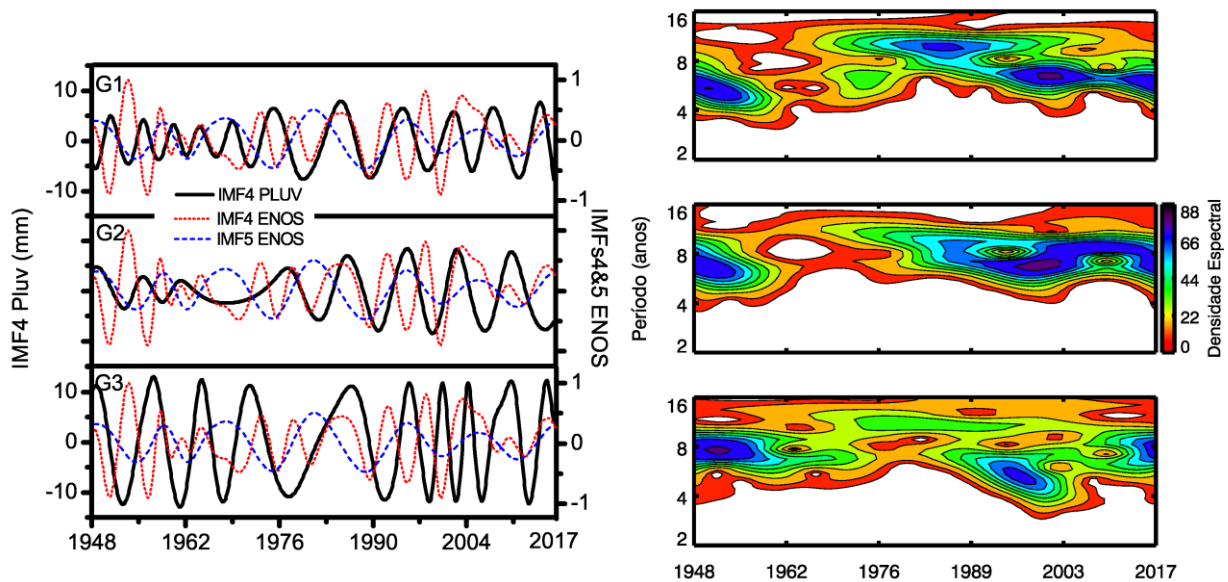


Figura 10: IMFs-4 pluviométricos (linhas contínuas pretas), para as regiões G1 (superior), G2 (centro) e G3 (inferior) e as IMFs 4 (linha pontilhada vermelha) e 5 (linha tracejada azul) do índice Niño 3.4 e espectros cruzados em wavelet entre IMFs-4 pluviométricos e IMF-4 do índice Niño 3.4 (coluna do lado direito).

Para os intervalos de tempo dos anos de 1948 a 1962 e, de 1990 a 2000, as IMFs-4 da precipitação para as três regiões do Estado da Paraíba oscilam com fases opostas as da IMF-4 do Niño 3.4, sugerindo que para esses intervalos, as oscilações das IMFs-4 da precipitação possuem relação com a oscilação da IMF-4 do Niño 3.4, indicando que as precipitações foram menores nas fases positivas do ENOS. As correlações entre as IMFs-4 da pluviometria e a IMF-4 do índice Niño 3.4 foram baixas quando considerado todo o período, contudo, para os intervalos entre 1948 e 1962 e entre 1990 e 2000, os coeficientes de correlação de Pearson foram significativos assumindo valores de -0,71 e -0,45 (G1 x Niño), de -0,67 e -0,28 (G2 x Niña) e de -0,42 e -0,68 (G3 x Niño).

Os espectros cruzados entre as IMFs-4 (gráficos na coluna esquerda da Figura 10), revelam semelhanças entre as oscilações de 6 a 8 anos nos dados de precipitação e nos dados do índice Niño 3.4, para as três regiões durante o intervalo de tempo entre 1948 e 1962, como também após 1989, em conformidade com as correlações apresentadas aqui.

No caso da IMF-5 do índice Niño 3.4, verifica-se algumas semelhanças, no entanto não é possível indicar relação com as oscilações das IMFs-4 pluviométricas das três regiões.

Na Figura 11 são apresentados os gráficos referentes as IMFs-5 pluviométricos (linha contínua preta) para as três regiões, conforme indicado, juntamente com a IMF-6 (linha

pontilhada vermelha) obtido do índice Niño 3.4. A oscilação da IMF-6 do Niño 3.4 tem período em torno de 27 anos, enquanto a oscilação do IMF-5 da precipitação apresenta período em torno de 22, 19 e 21 anos para as regiões G1, G2 e G3, respectivamente.

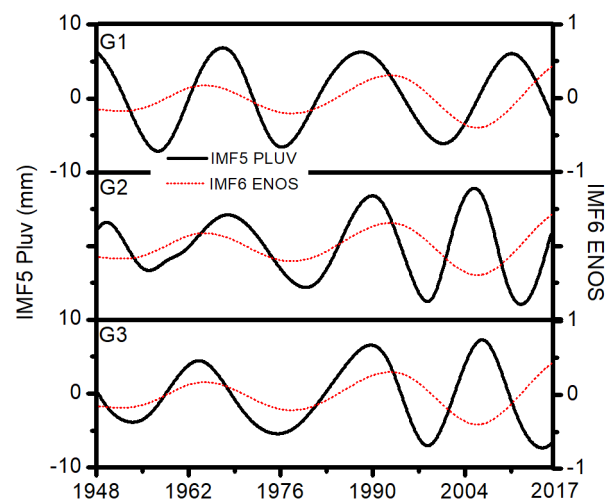


Figura 11: IMFs-5 pluviométricos (linhas contínuas pretas), para as regiões G1 (superior), G2 (centro) e G3 (inferior) e as IMF-6 (linha pontilhada vermelha) do índice Niño 3.4.

Analisando o comportamento das oscilações na Figura 11, percebe-se uma aparente semelhança entre as IMFs-5 da pluviosidade e IMF-6 do índice Niño 3.4 para a região G1, em que

o coeficiente de correlação foi de $\sigma=0,38$, no entanto, as correlações foram baixas para as regiões G2 ($\sigma=0,0008$) e G3 ($\sigma=0,05$), não evidenciando-se, assim, uma relação plausível entre as oscilações nas pluviosidades das três regiões e a oscilação de quase 27 anos no índice Niño 3.4, a partir das variações referentes as IMFs-5 da precipitação do Estado da Paraíba e a IMF-6 do índice Niño 3.4, durante o período analisado.

Deve-se lembrar que, assim como ocorre com outros padrões de anomalias climáticas, as variações nas anomalias que caracterizam o ENOS também é influenciadas pela sua interação com outros padrões, como por exemplo do AMO (Levine et al., 2017).

O fato da frequência relativa de eventos de El Niño e La Niña variar em associação com a variabilidade da Oscilação Decenal do Pacífico (Pacific Decadal Oscillation - PDO) tem sido tratado tanto no campo observacional, como também sob o ponto de vista de modelagem numérica (Hu e Fedorov, 2018; Levine et al., 2017).

Embora estudos recentes, usando modelagem, apontem que a modulação do ENOS pela PDO seja robusta (Lin et al., 2018), a natureza dessa conexão ainda não foi completamente esclarecida. De acordo com Okumura et al. (2017) a PDO afeta a frequência dos eventos de El Niño e de La Niña através da modulação dos ventos de superfície sobre o Pacífico equatorial ocidental.

Como já fora mencionado, as alterações na posição da ZCIT em escala temporal superior são devidas a vários fatores que abrangem fenômenos tropicais e extratropicais, bem como de suas interações complexas. Mudanças na circulação meridional do Atlântico e na variabilidade multidecenal do Atlântico têm um impacto considerável na posição da ZCIT que, por sua vez, se constitui num dos principais fenômenos que modula a estação chuvosa do Nordeste brasileiro e, conseqüentemente, do Estado da Paraíba.

Conforme observado nos resultados obtidos a partir da decomposição em modos empíricos das séries temporais de precipitação, das regiões homogêneas do Estado da Paraíba, e dos índices climáticos, é possível ver que as oscilações com períodos em torno de 10 anos na precipitação exibem algumas semelhanças entre as regiões G1 e G2, principalmente entre 1948 e 1962 e entre 1975 e 2011, porém características distintas são observadas com relação a região G3, ao longo do intervalo de tempo estudado, refletindo assim o fato da região G3 ter como principal sistema que

gera chuvas os distúrbios ondulatórios de Leste, que também afetam o Agreste e o Brejo, que encontram-se na porção mais a leste da região G2. As variações decenais nas precipitações das regiões G1 e G2, representadas pela oscilação de quase 10 anos da IMF-4, concordam bem com as do índice AMM (IMF-5), a partir de 1962, estando em fases opostas, que também é observado para o índice Niño 3.4 nos intervalos de tempo dos anos de 1948 a 1962 e, de 1990 a 2000, sugerindo um acoplamento entre eles, em que por vezes os efeitos de um dos fenômenos parece sobrepor o outro.

No caso da periodicidade em torno de 21 anos na IMF-5 do índice AMM, que representa o padrão da ZCIT, e também presente nas oscilações das regiões G1, G2 e G3, mas não na IMF-6 do índice Niño 3.4, sugere que, embora o ENOS seja um dos principais fenômenos responsáveis pela variabilidade interanual da precipitação no Nordeste, a sua influência pode conter assinaturas de modulação em escalas de tempo mais longas.

Conclusão

Neste estudo, os dados de precipitação pluviométrica do Estado da Paraíba, observados entre 1948 e 2016, foram usados para caracterizar as variações em escala decenal e comparar com as oscilações nos índices AMM e Niño 3.4. Para tanto, as séries temporais foram submetidas a decomposição em modos empíricos e as oscilações obtidas das IMFs foram analisadas.

A primeira função de modo intrínseco (IMF-1) foi dominada pelo período anual para as 3 regiões, enquanto a IMF-2 apresentou período predominante de 1,6 anos, 2 anos e 2,4 anos, para as regiões G1, G2 e G3, respectivamente. Na IMF-3 verificou-se períodos de 5 anos (G1), 3,8 anos (G2) e 3,4 anos (G3). A IMF-4 foi marcada por oscilações de 8,1 anos (G1), de 7,7 anos (G2) e, de 7,4 anos e 12,4 anos (G3). A quinta função de modo intrínseco (IMF-5) teve a oscilação presente na precipitação com período em torno de 21 anos para as três regiões. Períodos secundários também foram detectados nas IMFs.

Os residuais indicaram tendências de queda na precipitação para as regiões G1 e G2, enquanto para a região G3 uma breve elevação no regime de precipitação foi observada no início da série, que após 1966 passou a indicar tendência de queda.

Comparação entre as oscilações quase decenais evidenciaram correlações significativas entre as IMFs-4 da pluviosidade e a IMF-5 do

índice AMM, como também para as oscilações de quase 21 anos.

Os resultados obtidos mostraram que as oscilações decenais na precipitação pluviométrica das regiões G1 e G2 apresentam similaridades principalmente entre 1948 e 1962 e entre 1975 e 2011, contudo discordâncias foram observadas com relação a região G3, o que pode ser interpretado como devido as diferenças nos sistemas que atuam durante a estação chuvosa de cada região.

Para as regiões G1 e G2, a partir de 1962 as oscilações de quase 10 anos, na IMF-4 da precipitação, seguem em fases opostas as oscilações da IMF-5 presente no índice AMM. Por sua vez, a oscilação quase decenal na IMF-4 no índice Niño 3.4, também manifestou ocasiões em que aparece em oposição de fase com as oscilações da precipitação das regiões G1 e G2, sugerindo que ocasionalmente os efeitos do ENOS parecem sobrepor os da ZCIT na variação quase decenal da precipitação dessas regiões.

A precipitação pluviométrica das regiões G1, G2 e G3 da Paraíba exibiram uma oscilação com período de quase 21 anos, a qual também aparece na IMF-5 do índice AMM, porém a mesma não foi observada no índice Niño 3.4.

Em suma, os resultados alcançados com o uso da decomposição em modos empíricos, mostram que as oscilações em escala decenal, presentes na precipitação pluviométrica do Estado da Paraíba e nos índices climáticos analisados, exibem amplitudes e períodos que variam no tempo e confirmam que as mudanças na circulação meridional do Atlântico, que tem relação com a posição da ZCIT, modulam a estação chuvosa do Estado da Paraíba, principalmente das regiões representadas pelos grupos homogêneos G1 e G2.

Agradecimentos

Esta pesquisa foi apoiada pela Fundação de Apoio a Pesquisa do Estado da Paraíba, FAPESQ, (termo de outorga: 3069/2021), pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, CAPES e pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, CNPq. Os dados da precipitação pluviométrica do Estado da Paraíba foram obtidos do banco de dados da Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste (SUDENE) e da Agência Nacional de Águas (ANA). Os índices do Modo Meridional do Atlântico (AMM) foram obtidos no endereço eletrônico:

<https://psl.noaa.gov/data/timeseries/monthly/AM>

[M/](https://psl.noaa.gov/gcos_wgsp/Timeseries/Nino34/), enquanto as anomalias Niño 3.4 do ENOS foram obtidas no endereço: https://psl.noaa.gov/gcos_wgsp/Timeseries/Nino34/.

Referências

- Alizadeh, F., Roushangar, K., Adamowski, J., 2019. Investigating monthly precipitation variability using a multiscale approach based on ensemble empirical mode decomposition. *Paddy Water Environ* 17, 741–759. <https://doi.org/10.1007/s10333-019-00754-x>.
- Alves, T.L.B., de Azevedo, P.V., Costa dos Santos, C.A., 2017. Influence of climate variability on land degradation (desertification) in the watershed of the upper Paraíba River. *Theor Appl Climatol* 127, 741–751. <https://doi.org/10.1007/s00704-015-1661-1>.
- Amaya, D.J., Deflorio, M.J., Miller, A.J.; Xie, S.P., 2107. WES feedback and the Atlantic Meridional mode: observations and CMIP5 comparisons. *Climate Dynamics* 49, 1665–1679.
- Antico, A., Schlotthauer, G., Torres, M.E., 2014. Analysis of hydroclimatic variability and trends using a novel empirical mode decomposition: Application to the Paraná River Basin, J. *Geophys. Res. Atmos.*, 119, 1218–1233, doi:10.1002/2013JD020420.
- Araújo, W.S., Sousa, F.A.S., Brito, J.I.B., Lima, L.M., 2012. Aplicação de Wavelets a Grupos Homogêneos Pluviais no Nordeste do Brasil. *Revista Brasileira de Geografia Física* 04 (2012) 741-760.
- Barnston, A.G., Chelliah, M., Goldenberg, S.B., 1997. Documentation of a highly ENSO-related SST region in the Equatorial Pacific. *Atmosphere-Ocean* 35, 367–383.
- Carmona, A.M., Poveda, G., 2014. Detection of long-term trends in monthly hydro-climatic series of Colombia through Empirical Mode Decomposition. *Climatic Change* 123, 301–313. <https://doi.org/10.1007/s10584-013-1046-3>.
- Cayan, D.R., Dettinger, M.D., Diaz, H.F., Graham, N.E., 1998. Decadal variability of precipitation over western north america. *J. Clim.* 11, 3148–3166.
- Chiang, J.C.H., Kushnir, Y., Giannini, A., 2002. Deconstructing Atlantic intertropical convergence zone variability: Influence of the local cross-equatorial sea surface temperature gradient and remote forcing from the eastern

- equatorial Pacific. *J. Geophys. Res.* 107, 4004, doi:10.1029/2000JD000307.
- Chiang, J.C.H., Vimont, D.J., 2004. Analogous Pacific and Atlantic meridional modes of tropical atmosphere–ocean variability. *J. Climate* 17, 4143–4158, doi:10.1175/JCLI4953.1.
- Costa, R.L., Baptista, G.M.M., Gomes, H.B., Silva, F.D.S., Da Rocha Júnior, R.L., Nedel, A.S., 2021. Analysis of future climate scenarios for northeastern Brazil and implications for human thermal comfort. *Anais da Academia Brasileira de Ciências* 93, e20190651. DOI 10.1590/0001-3765202120190651.
- Depiné, H., Castro, N.M.R., Pinheiro, A., Pedrollo, O., 2014. Preenchimento de Falhas de Dados Horários de Precipitação Utilizando Redes Neurais Artificiais. *Rev. Bras. Rec. Hídr.* 19, 51–63, 2014.
- Guo, B., Chen, Z., Guo, J., Liu, F., Chen, C., Liu, K., 2016. Analysis of the Nonlinear Trends and Non-Stationary Oscillations of Regional Precipitation in Xinjiang, Northwestern China, Using Ensemble Empirical Mode Decomposition. *Int J Environ Res Public Health* 13, 345. doi: 10.3390/ijerph13030345.
- Hu, S., Fedorov, A.V., 2018. Cross-equatorial winds control El Niño diversity and change. *Nature Climate Change* 8, 798. <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0248-0>.
- Huang, N.E., Shen, Z., Longa, S.R., Wu, M.C., Shih, H.H., Zheng, Q., Yen, N-C., Tung, C.C., Liu, H.H., 1998. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and nonstationary time series analysis, *Proceeding of the Royal Society of London Series A* 454, 903–995.
- Kayano, M.T., Andreoli, R.V., 2004. Decadal variability of northern northeast Brazil rainfall and its relation to tropical sea surface temperature and global sea level pressure anomalies, *J. Geophys. Res.*, 109, C11011, doi:10.1029/2004JC002429.
- Kayano, M.T., Capistrano, V.B., 2014. How the Atlantic multidecadal oscillation (AMO) modifies the ENSO influence on the south American rainfall. *International Journal of Climatology*, 34, 162–178.
- Kim, T., Shin, J.-Y., Kim, S., Heo, J.-H., 2018. Identification of relationships between climate indices and long-term precipitation in South Korea using ensemble empirical mode decomposition, *Journal of Hydrology* 557, 726–739, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.12.069>.
- Levine, A.F., McPhaden, M.J., Frierson, D.M., 2017. The impact of the AMO on multidecadal ENSO variability. *Geophysical Research Letters* 44, 3877–3886.
- Marengo, J.A., Torres, R.R., Alves, L.M., 2017. Drought in Northeast Brazil-past, present, and future. *Theoretical and Applied Climatology*, 129, 1189–1200.
- Nobre, C., Shukla, J., 1996: Variations of sea surface temperature, wind stress, and rainfall over the tropical Atlantic and South America. *J. Climate* 9, 2464–2479, doi:10.1175/1520-0442(1996)009<2464:VOSTW>2.0.CO;2.
- Prado, L.F., Wainer, I., 2013. Planetary-scale climatic indices and relationship between decadal variability of rainfall in Northeastern and Southern Brazil. *Revista Brasileira de Geofísica*, 31, 31–41.
- Reboita, M.S., Krusche, N. Ambrizzi, T., Rocha, R.P. da., 2012. Entendendo o tempo e o clima na América do Sul. *Terrae Didática* 8, 34–50, DOI: 10.20396/td.v8i1.8637425.
- Rugg, A., Foltz, G.R., Perez, R.C., 2016. Role of Mixed Layer Dynamics in Tropical North Atlantic Interannual Sea Surface Temperature Variability. *J. Climate* 29, 8083–8101, <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-15-0867.1>.
- Scargle, J., 1982. *Studies in Astronomical Time series Analysis. II. Statistical Aspects of Spectral Analysis of Unevenly Spaced Data.* *Astrophysical Journal* 263, 835–853.
- Terassi, P.M.D.B.; Galvani, E., 2017. Identification of Homogeneous Rainfall Regions in the Eastern Watersheds of the State of Paraná, Brazil. *Climate* 5, 53. <https://doi.org/10.3390/cli5030053>.
- Torrence, C., Compo, G.P., 1998. A Practical Guide to Wavelet Analysis. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 79, 61–78. [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1998\)079<0061:APGTWA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1998)079<0061:APGTWA>2.0.CO;2)
- Utida, G., Cruz, F.W., Etourneau, J., Bouloubassi, I., Schefuß, E., Vuille, M., Novello V.F., Prado, L.F., Sifeddine, A., Klein, V., Zular, A., Viana, J.C.C., Turcq, B., 2019. Tropical South Atlantic influence on Northeastern Brazil precipitation and ITCZ displacement during the past 2300 years. *Scientific Reports* 9, 1698. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-38003-6>.
- Veiga, S.F.; Giarolla, E.; Nobre, P.; Nobre, C.A., 2020. Analyzing the Influence of the North Atlantic Ocean Variability on the Atlantic

- Meridional Mode on Decadal Time Scales. Atmosphere 11, 3. <https://doi.org/10.3390/atmos11010003>.
- Wu, Z., Huang, N.E., 2009. Ensemble empirical mode decomposition: a noise-assisted data analysis method. Advances in Adaptive Data Analysis 1, 1–41. <https://doi.org/10.1142/S1793536909000047>.
- Zhang, X., Zhang, G., Luo, L., Zhang, B., Sun, Y., Gui, Z., Zhang, Q., 2019. A Modified Multifractal Detrended Fluctuation Analysis (MFDFA) Approach for Multifractal Analysis of Precipitation in Dongting Lake Basin, China. Water 11, 891. <https://doi.org/10.3390/w11050891>.
- Zvarevashe, W., Krishnannair, S., Sivakumar, V., 2019. Analysis of Rainfall and Temperature Data Using Ensemble Empirical Mode Decomposition. Data Science Journal 18, 1–9. <https://doi.org/10.5334/dsj-2019-046>.