

Análise da Variabilidade Acoplada Oceano-Atmosfera: Oscilação de *Madden-Julian*, *La Niña*, e Ondas de Instabilidade Tropical – Um estudo de caso da atividade convectiva sobre o Estado do Ceará durante o ano de 2010

Analysis of Coupled Ocean-Atmosphere Variability: Madden-Julian Oscillation, *La Niña*, and Tropical Instability Waves – A case study of convective activity over the State of Ceará during the year 2010

Análisis de la Variabilidad Acoplada Océano-Atmósfera: Oscilación *Madden-Julian*, *La Niña* y ondas de inestabilidad tropical - Un estudio de caso de la actividad convectiva sobre el estado de Ceará durante 2010

Recebido: 05/08/2024 | Revisado: 20/08/2024 | Aceitado: 21/08/2024 | Publicado: 25/08/2024

Jose Mauricio da Silva Ferreira

ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-1313-1451>
Universidade Estadual do Ceará, Brasil
E-mail: jmauricio.f01@gmail.com

Augusto César Barros Barbosa

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8509-2853>
Universidade Estadual do Ceará, Brasil
E-mail: augusto.barbosa@uece.br

Matheus Dos Reis Brandão

ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-0666-0455>
Universidade Estadual do Ceará, Brasil
E-mail: matheusbrandaostorm@gmail.com

Francisca Alana Nascimento da Silva

ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-0718-1575>
Universidade Federal do Ceará, Brasil
E-mail: alana@fisica.ufc.br

Timóteo Lopes Carneiro da Silva

ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-0086-3420>
Universidade Federal do Ceará, Brasil
E-mail: timoteolopes.tl@gmail.com

Brendo Rodrigues Garcia

ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-4916-6529>
Universidade Estadual do Ceará, Brasil
E-mail: brendo.rodrigues30@gmail.com

Resumo

A interação oceano-atmosfera e a variabilidade climática global têm sido amplamente estudadas. Este trabalho investiga o impacto das mudanças atmosféricas no total pluviométrico do Nordeste do Brasil, focando no Ceará. Fenômenos como a Oscilação de Madden-Julian (OMJ), *La Niña* e as Ondas de Instabilidade Tropical (OIT) podem influenciar a atividade convectiva na região. O objetivo deste estudo foi analisar, através da variabilidade espectral obtida com a Transformada em Ondas (Morlet), o acoplamento energético intrassazonal (20-70 dias) entre a OMJ e as OIT durante um período de forte *La Niña*, e seu impacto na precipitação no Ceará. O período estudado foi de junho a outubro de 2010, quando a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) não influencia diretamente nas chuvas no Nordeste. Nesse período, um evento extremo da OMJ em 28.09.2010 teve uma resposta remota no Ceará em 23.10.2010, e foi observado aumento da atividade intrassazonal das OIT no Atlântico tropical em 1°N21°W. Os resultados mostraram que aproximadamente 80% da energia espectral intrassazonal gerada pela OMJ na região do Oceano Índico chegou ao Ceará, provocando forte atividade convectiva e altos índices pluviométricos. A conservação dessa energia pode ser explicada pelo estado básico da atmosfera, favorecido pela forte *La Niña* entre setembro e outubro. Conclui-se que a interação entre o Oceano Índico e o Ceará, e entre o Ceará e as OIT (1°N21°W), ocorre na escala de 24 dias, com transferência de energia da escala de 32 dias para a de 24 dias, resultando em altos índices de chuva em várias regiões do Ceará.

Palavras-chave: Oscilação de *Madden-Julian*; Nordeste do Brasil; Ondas de instabilidade tropical; Ondas de instabilidade tropical; Ondas de instabilidade tropical.

Abstract

The ocean-atmosphere interaction and global climate variability have been extensively studied. This work investigates the impact of atmospheric changes on the total rainfall in Northeast Brazil, focusing on Ceará. Phenomena such as the Madden-Julian Oscillation (MJO), *La Niña*, and Tropical Instability Waves (TIW) can influence convective activity in the region. The objective of this study was to analyze, through the spectral variability obtained with the Morlet's Mother Wavelet Transform, the intraseasonal energy coupling (20-70 days) between the MJO and TIW during a period of strong *La Niña*, and its impact on precipitation in Ceará. The study period was from June to October 2010, when the Intertropical Convergence Zone (ITCZ) does not directly influence rainfall in the Northeast. During this period, an extreme MJO event on 28.09.2010 had a remote response in Ceará on 23.10.2010, and increased intraseasonal activity of the TIW was observed in the tropical Atlantic at 1°N21°W. The results showed that approximately 80% of the intraseasonal spectral energy generated by the MJO in the Indian Ocean region reached Ceará, causing strong convective activity and high rainfall indices. The conservation of this energy can be explained by the basic state of the atmosphere, which was favored by the strong *La Niña* between September and October. It is concluded that the interaction between the Indian Ocean and Ceará, and between Ceará and the TIW (1°N21°W), occurs on a 24-day scale, with energy transfer from the 32-day scale to the 24-day oscillation scale, resulting in high rainfall indices in various regions of Ceará.

Keywords: Madden-Julian Oscillation; Northeast Brazil; Tropical instability waves; Wavelets.

Resumen

La interacción océano-atmósfera y la variabilidad climática global han sido ampliamente estudiadas. Este trabajo investiga el impacto de los cambios atmosféricos en el total de precipitación en el Nordeste de Brasil, con un enfoque en Ceará. Fenómenos como la Oscilación de Madden-Julian (OMJ), *La Niña* y las Ondas de Inestabilidad Tropical (OIT) pueden influir en la actividad convectiva en la región. El objetivo de este estudio fue analizar, mediante la variabilidad espectral obtenida con la Transformada de Ondas (Morlet), el acoplamiento energético intraseasonal (20-70 días) entre la OMJ y las OIT durante un período de fuerte *La Niña*, y su impacto en la precipitación en Ceará. El período estudiado fue de junio a octubre de 2010, cuando la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT) no influye directamente en las lluvias en el Nordeste. Durante este período, un evento extremo de la OMJ el 28.09.2010 tuvo una respuesta remota en Ceará el 23.10.2010, y se observó un aumento en la actividad intraseasonal de las OIT en el Atlántico tropical en 1°N21°W. Los resultados mostraron que aproximadamente el 80% de la energía espectral intraseasonal generada por la OMJ en la región del Océano Índico llegó a Ceará, provocando una fuerte actividad convectiva y altos índices de precipitación. La conservación de esta energía puede ser explicada por el estado base de la atmósfera, favorecido por el fuerte *La Niña* entre septiembre y octubre. Se concluye que la interacción entre el Océano Índico y Ceará, y entre Ceará y las OIT (1°N21°W), ocurre en una escala de 24 días, con transferencia de energía de la escala de 32 días a la de 24 días, resultando en altos índices de lluvia en varias regiones de Ceará.

Palabras clave: Oscilación de Madden-Julian; Noreste de Brasil; Ondas de inestabilidad tropical; Ondaletas.

1. Introdução

A região tropical assume uma importância significativa na regulação do clima global, uma vez que é nesse domínio onde a radiação de onda curta incide com maior intensidade sobre o planeta. Através de processos atmosféricos e oceânicos, o calor é transportado da região equatorial em direção aos polos, contribuindo para a manutenção do equilíbrio energético global (Hall, 2002). A literatura mostra que a interação oceano-atmosfera modula o clima do planeta. Dessa forma, nos últimos anos inúmeras questões têm sido levantadas sobre a variabilidade climática entre o oceano e a atmosfera em escala global. As perturbações termodinâmicas na atmosfera têm impacto significativo nos padrões climáticos regionais. Em escala global, um dos principais sistemas climáticos são o *El Niño*-Oscilação Sul (ENOS)/*La Niña*, cujas fases, estão intimamente ligadas às mudanças na circulação atmosférica e na interação oceano-atmosfera no Pacífico e Atlântico Tropical (Limberger; Silva, 2016; Uele *et al.*, 2017). Essas mudanças influenciam as anomalias de temperatura do ar e, especialmente, os padrões de chuva em várias regiões do globo (Sobral, B. S. *et al.*, 2017). O ENOS pode causar alterações significativas no regime de chuvas regionais, levando a secas severas ou chuvas extremas, o que tem impactos significativos nos padrões de precipitação e assim, nas atividades humanas (Wang, X., & Lu, J., 2023, Collins, D. C., & Sinsky, E. 2022).

Do ponto de vista de influências remotas na atividade convectiva sobre a América do Sul/Ceará, deve-se destacar a influência das oscilações intrassazonais (frequência de 10 – 100 dias), como por exemplo, a Oscilação de 30-60 dias – assim denominada por seus descobridores (Madden e Julian, 1972). Também conhecida como Oscilação de *Madden-Julian* ou

simplesmente OMJ. Ela consiste basicamente na propagação de perturbações atmosféricas – geradas no oceano Índico, através de um sistema convectivo de grande escala, propagando-se na direção zonal (sentido leste) ao longo do globo terrestre e entorno do Equador (Valadão et al., 2015, Alvarez et al., 2016). Observa-se, na sua passagem, uma perturbação nos campos de pressão e convergência de ventos nos baixos níveis, que por sua vez, contribui para a formação das nuvens convectivas, cuja origem se dá sobre o Pacífico Oeste (Sousa, 2007).

No entanto, dando a devida importância dos oceanos e o avanço da tecnologia foram desenvolvidos diversos meios de monitoramento dos oceanos, através de satélites, resultando na identificação das Ondas de Instabilidade Tropical (OIT) (Olivier, L., Reverdin, G., Hasson, A., & Boutin, J. (2020), Shi, W., & Wang, M, 2021). A formação das OIT tem início nas instabilidades geradas pelo cisalhamento das correntes zonais e os intensos gradientes meridionais de TSM induzidas pela ressurgência equatorial. Dessa forma, é possível observar entre as latitudes de 4°N até 4°S uma língua fria equatorial, entre os meses de junho a agosto (Lima Dos Reis, 2020).

Nesse contexto, sistemas atmosféricos-oceânicos como a Oscilação de Madden-Julian (OMJ), *El Niño* Oscilação Sul (ENOS) e as Ondas de Instabilidade Tropical (OIT) exercem influências diretas ou indiretas nos padrões de precipitação em diversas regiões do planeta, incluindo o Nordeste do Brasil (NEB). A hipótese central deste estudo parte do pressuposto de que as anomalias de precipitação na região do Nordeste do Brasil (NEB) em especial no estado do Ceará (CE) podem ser remotamente influenciadas pela Oscilação de Madden-Julian (OMJ, no contexto atmosférico) e pelas Ondas de Instabilidade Tropical (OIT, no contexto oceânico), com períodos de variação de 20 a 70 dias. Essa influência está intrinsecamente ligada à presença do fenômeno *El Niño* Oscilação Sul (ENOS).

Portanto, o objetivo deste estudo foi analisar, através da variabilidade espectral obtida com a Transformada em Ondaletas, o acoplamento energético intrassazonal (20-70 dias) entre a OMJ e as OIT durante um período de forte *La Niña*, e seu impacto na precipitação no Ceará. O ano de 2010 foi selecionado como o período de acoplamento entre os fenômenos intrassazonais (OIT e OMJ) durante um evento de forte *La Niña*, com potencial influência na precipitação total sobre o CE. Esse processo envolve a utilização de variáveis como a Temperatura da Superfície do Mar (TSM), a Radiação de Onda Longa (ROL) e *proxies* associadas a esses eventos. A análise se apoia em métodos estatísticos e análises espectrais em Ondaletas – com a ondaleta-mãe de *Morlet*, buscando quantificar a energia gerada pelo início de um sinal da OMJ (sobre a região do oceano Índico), seu término na Região CE, o acoplamento com as OIT e sua possível resposta sobre o Ceará em termos de quantitativo de chuva.

2. Metodologia

Esse estudo propõe uma nova metodologia, adaptando técnicas desenvolvidas por Barbosa (2007) e Barbosa (2012) *apud* Torrence & Compo, 1998 e Grinsted *et al.*, 2004, entre outros. Dessa forma, foi abordado uma análise espectral do sinal intrassazonal relativos às OIT e também a OMJ, e assim, quantificar o acoplamento entre esses fenômenos de grande escala e sua possível relação no aumento/supressão da atividade convectiva sobre a região de estudo NEB/Ceará. Os dados passaram por filtragem na banda intrassazonal de 20-70 dias com a metodologia *Lanczos* (Duchon, 1979), e assim, isolando os fenômenos em suas frequências de oscilação. Séries temporais de dados diários médias nas regiões de controle foram geradas, e análises estatísticas foram aplicadas para quantificar o grau de correlação durante o acoplamento. Importante ressaltar que os critérios de organização da pesquisa científica aqui apresentada teve fundamentos encontrados em Pereira A. S. *et al.*, (2018) e Koche, J. C. (2011).

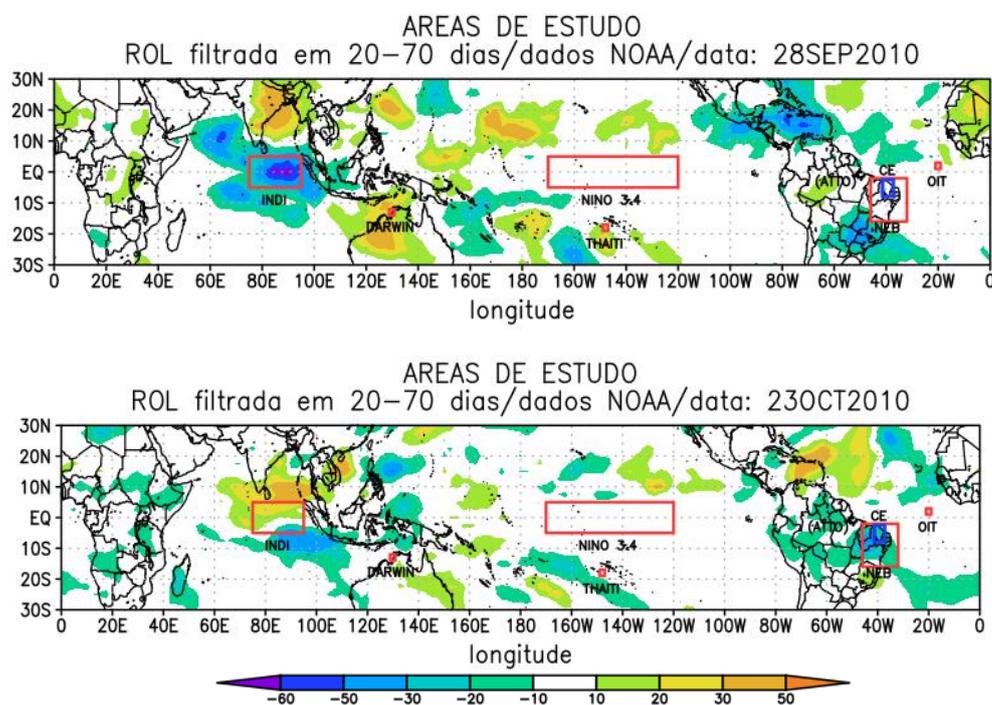
2.1 Dados

Foram utilizados os seguintes conjuntos de dados (i) Radiação de Onda Longa (ROL) de $2,5^\circ \times 2,5^\circ$ de resolução espacial em pontos de grades obtidos em: https://psl.noaa.gov/data/gridded/data.cpc_blenved_olr-2.5deg.html (ii) Temperatura da Superfície do Mar (TSM) de $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ de resolução espacial em pontos de grades obtidos <https://psl.noaa.gov/data/gridded/data.noaa.oisst.v2.highres.html>.

2.2 Regiões De Controle

Visando estudar as características espaciais e temporais, como também os padrões de propagação da OMJ e OIT imersos em um período de *La Niña*, foram selecionadas áreas de controle sobre o Oceano Índico (INDI), regiões de DARWIN, TAHITI e Oceano Pacífico (NINO3.4), Nordeste do Brasil (NEB) e Estado do Ceará (CE). A Figura 1 mostra as regiões (áreas) de controle de onde foram geradas as séries temporais para as análises – as caixas foram selecionadas seguindo critérios específicos encontrados na literatura para o estudo dos fenômenos discutidos no presente trabalho de pesquisa, ou seja, OMJ, OIT e *La Niña*. Ao fundo, mostra-se a Radiação de Onda Longa filtrada em 20 – 70 dias para os dias 28 de setembro de 2010 e 23 de outubro de 2010, respectivamente de cima para baixo – percebe-se forte evento da OMJ no oceano Índico (Barbosa, 2012).

Figura 1 – Determinação das Áreas de Estudo: INDI, NIÑO 3.4, DARWIN, TAHITI, NEB, CE e região das OIT ($1^\circ\text{N}21^\circ\text{W}$). Ao fundo a ROL filtrada em 20 – 70 dias evidenciando atividade convectiva no INDI em 28.09.2010 associado à OMJ.



Fonte: Autoria própria (2024).

A Figura 1 (superior) mostra forte atividade convectiva na região de controle INDI – com anomalias negativas de ROL de -60 W/m^2 na data de 28.set.2010 – indicando a gênese de um evento da OMJ sobre o oceano Índico. De outra forma, a Figura 1 (inferior) mostra anomalias positivas de ROL na região INDI – indicando que o padrão mudou em função da meia oscilação do evento intrassazonal da Madden-Julian. Os padrões inversos podem ser observados na região CE no dia 23.out.2010, apresentando um lag temporal de 25 dias após a origem da OMJ na região do INDI.

2.3 A Filtragem Dos Dados

Tendo como objetivo eliminar oscilações transitórias de escala de tempo sinótica e oscilações de frequência mais baixa, como as sazonais, interanuais e decadais, das séries temporais analisadas, empregou-se a técnica de filtragem de séries temporais, seguindo a metodologia de *Lanczos* (Duchon, 1979; Barbosa, 2012). O Filtro de *Lanczos* é uma ferramenta que visa destacar o comportamento de um sinal em frequências específicas, podendo atuar como um filtro passa-baixas ou para interpolar suavemente os valores de um sinal digital entre suas amostras. Neste estudo, foi utilizado para isolar o sinal intrassazonal da Oscilação de *Madden-Julian* e das Ondas de Instabilidade Tropical em uma faixa de frequência de 20 a 70 dias, com o intuito de isolar características desses fenômenos, e assim, estudá-los.

2.4 A Transformada em Ondaletas Contínua (CWT)

Segundo Barbosa (2012) a Transformada em Ondaletas Contínua (*Continuous Wavelet Transform* - CWT) é uma técnica de análise de sinais que permite examinar os componentes de frequência variável em um sinal ou série temporal. Ela é especialmente útil quando se deseja entender as características de frequência em diferentes partes de um sinal ao longo do tempo.

A CWT produz um espectro de escala, mostrando os componentes de frequência do sinal em diferentes escalas de tempo. Isso significa que a técnica pode identificar frequências que são mais proeminentes em diferentes partes do sinal e, assim, capturar informações sobre a evolução temporal das características de frequência.

Utilizou-se a metodologia de Torrence & Compo (1998) com a ondaleta-mãe de *Morlet*, com adaptações específicas para melhor se ajustar ao conjunto de dados empregado neste estudo (Barbosa, 2015). O resultado desse processo é representado pelo *Wavelets Power Spectrum* (WPS), onde o arco contínuo em linha preta no WPS é denominado cone de influência (COI), indicando que períodos fora dessa região devem ser desconsiderados devido à falta de confiança estatística. Os contornos em preto no WPS representam áreas com índices de energia estimados com base no Método de Monte Carlo, a um nível de confiança estatística de 95%, assumindo o ruído vermelho de fundo definido pela variância e o número de pontos da série temporal original (Barbosa, 2015, Fonseca da Silva, D. 2016).

2.5 A Transformada em Ondaletas Cruzada (XWT)

A Transformada em Ondaletas Cruzada (*Cross Wavelets Transform* - XWT) é uma técnica de análise de sinais que permite examinar a relação de fase entre dois sinais ou séries temporais em diferentes escalas de tempo e frequência. Ela é uma extensão da Transformada em Ondaletas Contínua e é usada para determinar como dois sinais estão relacionados em termos de suas oscilações periódicas e frequências em comum (Grinsted *et al.*, 2004).

A XWT é frequentemente aplicada para analisar a covariação ou a relação de fase entre dois sinais, revelando se eles estão sincronizados em termos de suas oscilações periódicas em diferentes escalas de tempo. Isso é particularmente útil quando se trabalha com dados temporais em que se deseja entender como dois fenômenos estão relacionados em termos de sua variação temporal (Barbosa, 2007).

A técnica envolve a aplicação da CWT a ambos os sinais em questão e, em seguida, a comparação das componentes de frequência e fase entre eles. O resultado é geralmente representado em um mapa de espectro de escala cruzada, que destaca as regiões onde os sinais têm uma forte relação de fase em função da frequência e da escala de tempo.

2.6 A Interpretação dos Vetores de Fase

Uma análise minuciosa pode ser feita em períodos extremamente específicos e para cada dia do ano em estudo, o que de certa forma vai depender exclusivamente do estudo que se quer realizar e dos objetivos empreendidos. Assim, para uma

completa interpretação da diferença de fase entre as séries analisadas, deve-se seguir a lista que mostra a forma de orientação dos vetores de fase entre duas séries temporais, quando da aplicação da *XWT*. Uma observação importante é a de que se deve saber qual série temporal é processada primeiramente, para que seja válido o esquema da figura ilustrativa. Esta atenção deve ser tomada quando da construção dos espectros cruzados.

O significado dos ângulos de fase relativos aos indicadores numéricos das figuras são os seguintes:

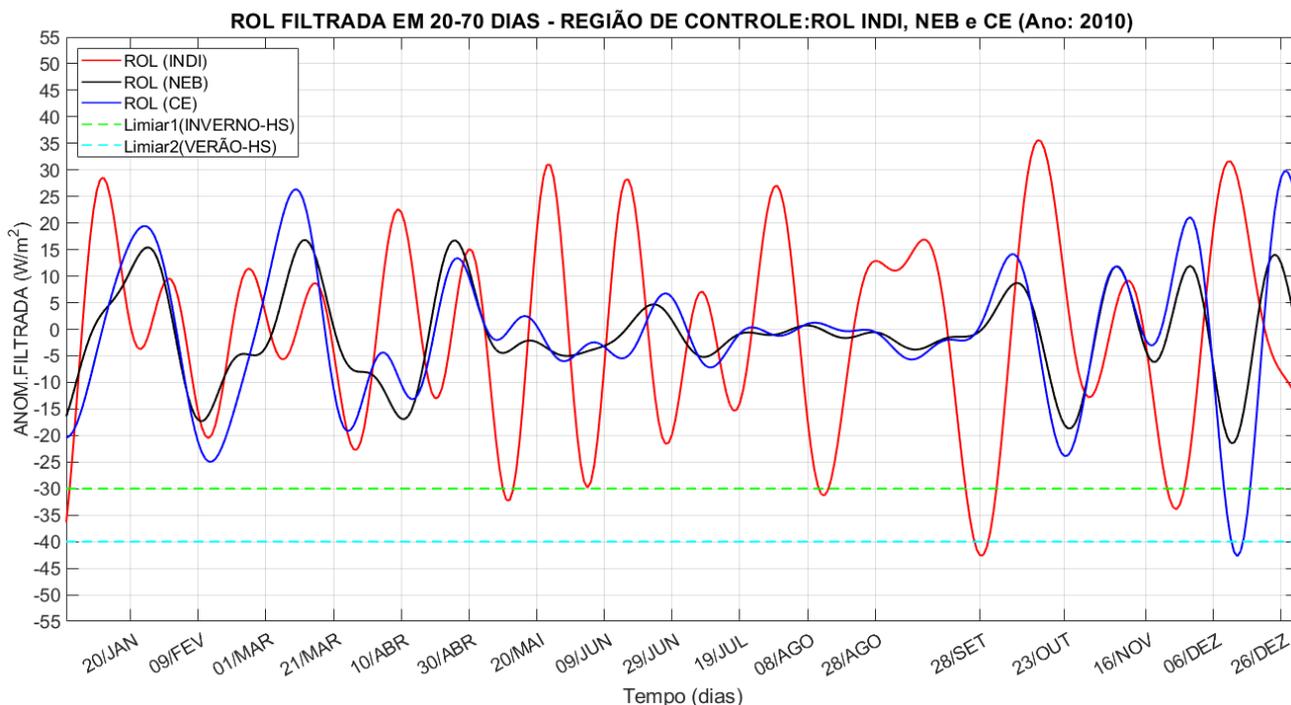
- 1) → : Série 1 e Série 2 completamente em fase;
- 2) ↘ : Série 2 avançada 45° da Série 1. A Série 1 responde em 1/8 do período;
- 3) ↓ : Série 2 avançada 90° da Série 1. A Série 1 responde em 1/4 do período;
- 4) ↙ : Série 2 avançada 135° da Série 1. A Série 1 responde em 3/8 do período;
- 5) ← : Série 1 e Série 2 estão em fase completamente opostas;
- 6) ↖ : Série 2 defasada 225° da Série 1, ou a Série 1 avançada 135° da Série 2, ou seja a Série 2 responde com 3/8 do período;
- 7) ↑ : Série 2 defasada 90° da Série 1. A Série 2 responde em 1/4 do período;
- 8) ↗ : Série 2 defasada 45° da Série 1. A Série 2 responde em 1/8 do período.

2.7 Critério Da Seleção do Eventos de Estudo

A Oscilação de *Madden-Julian* é responsável pelo modo atmosférico na escala intrassazonal de 20 – 70 dias atuando sobre o Estado do Ceará disparada remotamente na região do oceano Índico e provocando aumento de nebulosidade e dos índices de precipitação – a explicação física para isso baseia-se na fase positiva da onda de *Rossby* gerada e que se propaga na atmosfera através dos guias de ondas, alcançando a América do Sul (AS) em questão de dias. Dessa forma, em sua fase positiva da onda (um cavado – baixa pressão), pode gerar instabilidades atmosféricas e provocar movimentos ascendentes e o transporte de calor e umidade para os níveis mais elevados da atmosfera. A convergência dos ventos em níveis mais baixos da troposfera, transportam calor e umidade que são ingredientes essenciais para o desenvolvimento de nuvens convectivas de grande porte, por exemplo, as nuvens do tipo *Cumulus*.

A Figura 2 mostra a determinação dos eventos da OMJ para o ano de 2010 – a metodologia adotada para a seleção de eventos extremos da OMJ na região de controle INDI e sua resposta remota sobre o NEB/CE, baseia-se na intensidade das anomalias filtradas da ROL nessas regiões de estudo. Eventos independentes da OMJ são determinados quando as anomalias filtradas de ROL na região INDI oscilam entre -30 e -40 W/m² e considerados extremos quando as anomalias ficam abaixo de -40 W/m². Dessa forma, considera-se uma resposta remota da OMJ sobre o NEB/CE, quando as anomalias de ROL filtradas em 20 -70 dias, oscilam na metade de suas intensidades sobre o INDI, o que dependerá muito do período do ano e se o sinal está imerso em eventos *El Niño/La Niña* devido às mudanças da circulação atmosférica global. A filtragem serve para evidenciar/isolar a frequência de oscilação do fenômeno em estudo, eliminando períodos de oscilação que possam mascarar ou mesmo atenuar o sinal dos eventos analisados.

Figura 2 – Determinação dos eventos extremos da Oscilação de *Madden-Julian* no oceano Índico: estudo de caso para o ano de 2010. Séries geradas da média da ROL em cada caixa de controle por dia evidenciando as anomalias filtradas em cada região de estudo – unidade em W/m^2 .



Fonte: Autoria própria (2024).

Estudos mostram que a OMJ é o principal fenômeno na escala intrassazonal (modo atmosférico) que atua remotamente para contribuir/inibir a atividade convectiva sobre a América Sul (AS), em particular sobre o NEB/CE (Barbosa, 2012). Em acordo ao que foi exposto no parágrafo acima, baseando-se nos critérios assumidos, podemos determinar um evento extremo da OMJ na região INDI em 28.09.2010 com sua atuação (resposta remota, fase positiva da onda) sobre a região CE em 23.10.2010 (*lag* temporal de 25 dias) – com limiares de $-42 W/m^2$ e $-24 W/m^2$, respectivamente. Ressalta-se que os eventos selecionados se encontram imersos em um período intenso de *La Niña* – conforme mostra a Tabela 1 abaixo, e que segundo a literatura favorecem uma maior frequência de eventos extremos da OMJ e conseqüentemente uma maior teleconexão atmosférica do sinal sobre a AS. Por outro lado, além dos limiares, o período do ano foi escolhido por não haver atividade convectiva causada pela ZCIT (atuando de fev-mai), sendo assim, possível avaliar a contribuição individual e conjunta da OMJ com outros fenômenos atmosféricos e oceânicos.

Por outro lado, no oceano Atlântico Tropical, existe um fenômeno oceânico na escala intrassazonal de 20 - 70 dias (modo oceânico), que surge na costa sudoeste da África, o qual denomina-se Ondas de Instabilidade Tropical (OIT). Essas ondas caracterizam-se por regiões frias nos campos de Temperatura da Superfície do Mar (TSM, chamadas de línguas frias). Essas ondas ao alcançarem águas mais quentes ao norte resfriam essas regiões e liberam vapor e radiação infravermelha em forma de calor latente (resfriamento evaporativo) para a atmosfera, contribuindo para a geração e manutenção de nuvens sobre a região NEB/CE (vide figura 3).

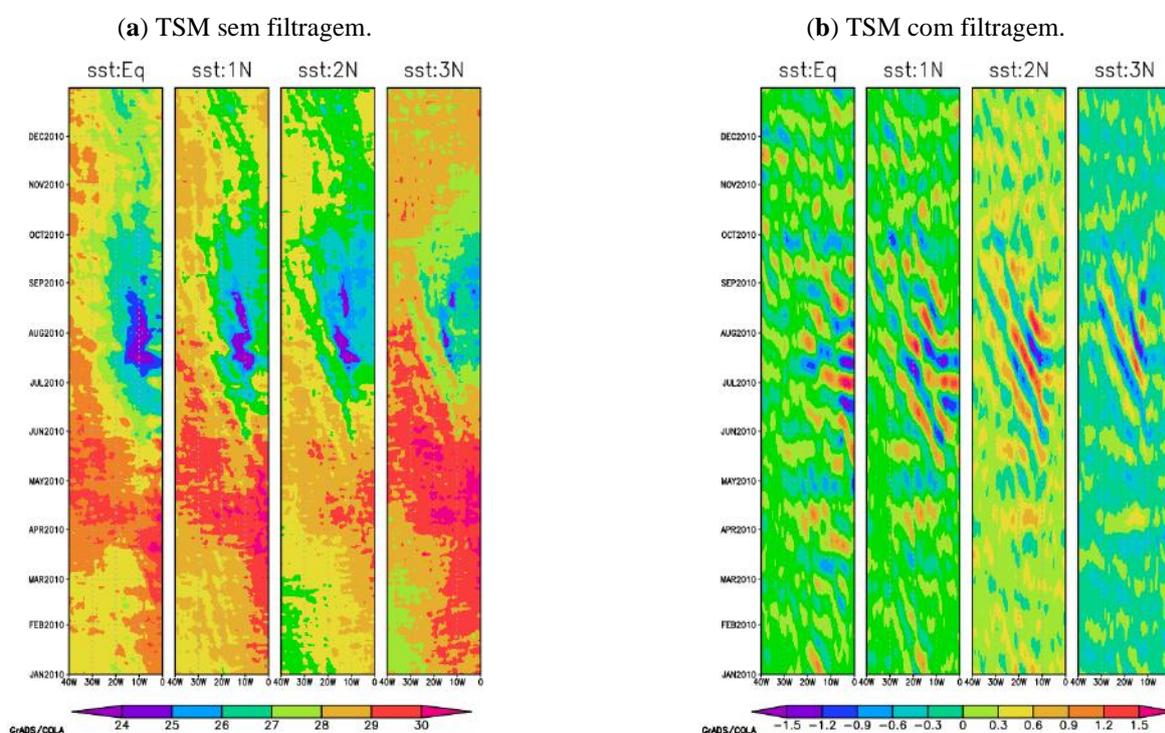
Corroborando ao que foi discorrido acima sobre a atuação termodinâmica das OIT sobre as áreas NEB/CE e adjacências, torna-se importante ressaltar a região de maior intensidade das mesmas, ou seja, considera-se que existe atuação significativa

sobre o Estado do Ceará quando essas ondas passam o meridiano de 21° W (em direção a costa do Brasil) e atingem as latitudes Equador, 1° N, 2° N, e 3° N transportando vapor e umidade.

A Figura 3(a) mostra a língua fria de instabilidade termodinâmica do campo de TSM se propagando para oeste desde a costa da África a partir de meados de junho e seu ápice acontecendo em 10 julho de 2010 (inverno no Hemisfério Sul – HS), mostrando grande intensidade no Equador e diminuindo gradativamente em 3° N. Observa-se que a língua fria se estende além do meridiano de 21° W em praticamente todo o mês de outubro de 2010 – sugerindo influência atmosférica sobre as regiões NEB/CE, e podendo assim, contribuir no quantitativo de chuva – fornecendo ingredientes essenciais, como calor e umidade para a formação e manutenção de sistemas convectivos.

A Figura 3(b) mostra a TSM filtrada evidenciando o fenômeno das OIT na escala intrassazonal de 20 – 70 dias se propagando para oeste em forma de ondas de *Rossby* oceânicas, e as quais apresentam forte intensidade em 1° N passando o meridiano 21° W e alcançando a costa do NEB/CE.

Figura 3 – Diagramas de *Hovmöller* (longitude *versus* tempo) da TSM no Equador, 1° N, 2° N e 3° N.



Fonte: Autoria própria (2024).

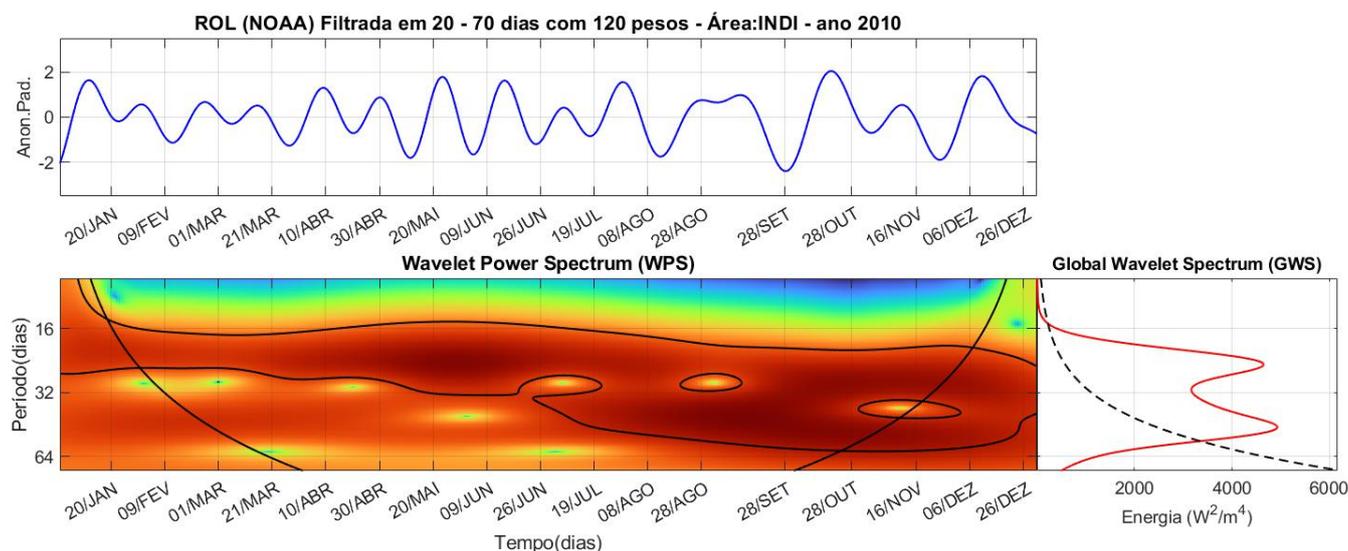
3. Resultados e Discussão

A análise espectral em Ondas torna-se bastante útil para determinar a energia espectral em tempo-frequência em uma série temporal não-estacionária, e quantificar a variabilidade energética nas escalas de tempo e a transferência de energia entre as escalas com sua localização temporal.

A Figura 4 mostra a Transformada em Ondas Contínua da ROL filtrada na região de controle INDI para o ano de 2010 – o WPS mostra forte energia espectral intrassazonal durante o mês de setembro a outubro com um pico negativo de anomalia de ROL em 28.09.2010 – indicando o evento extremo da OMJ no oceano Índico. O WPS mostra que a partir do dia 28 inicia-se uma separação da energia espectral direcionada para as escalas de 24 dias – com pico de energia no GWS de 4.800

W^2/m^4 e de 48 dias – com pico de energia no GWS de $5.000 W^2/m^4$ comprovando que o evento da OMJ foi muito intenso sobre a região do oceano Índico.

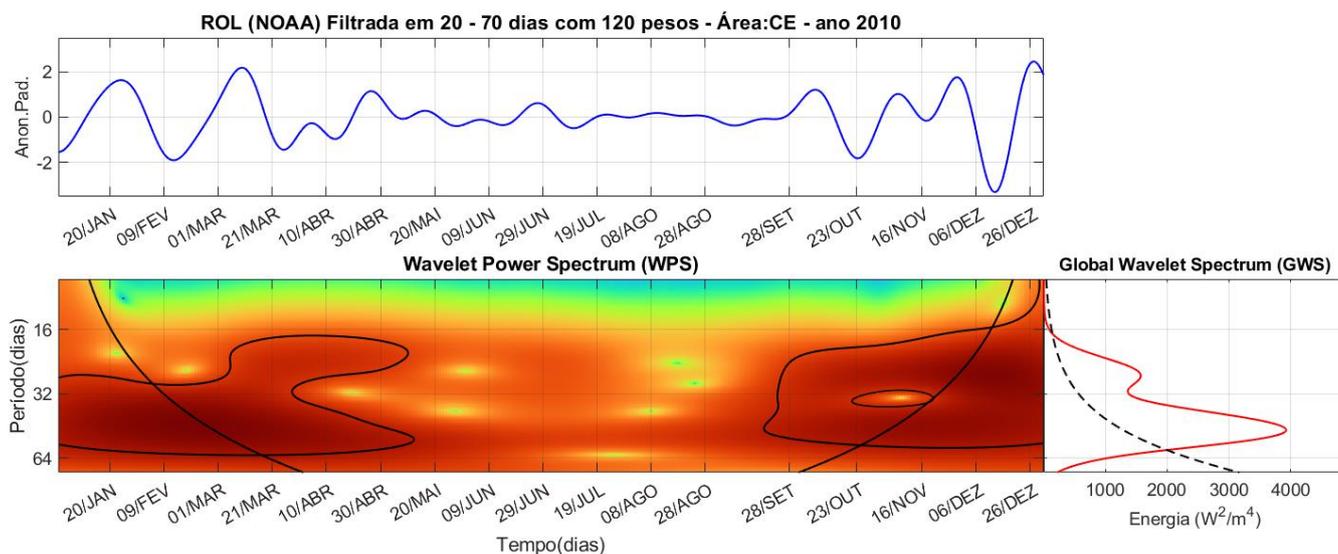
Figura 4 – Mostra o WPS e o GWS da série temporal da ROL filtrada em 20 – 70 dias na região de controle INDI para o ano de 2010.



Fonte: Autoria própria (2024).

A Figura 5 mostra a CWT da ROL filtrada na região de controle CE para o ano de 2010 – percebe-se forte atividade intrassazonal nos primeiros meses e nos últimos meses do ano, nenhuma variabilidade espectral indicando atividade convectiva sobre o CE é apresentada no WPS de maio até meados de setembro, possivelmente indicando forte estiagem e períodos de seca sobre a região. Todavia, no final de setembro forte energia intrassazonal aparece no WPS tendo um pico negativo em 23 de outubro de 2010 – resposta da OMJ sobre o CE através dos padrões de teleconexão atmosférica. Nessa data, existe uma separação do espectro nas escalas de 24 e 48 dias, essa última com energia no GWS de $4.000 W^2/m^4$. Conclui-se que cerca de 80% da energia espectral intrassazonal gerada pela OMJ na região INDI chegou ao Ceará, podendo gerar forte atividade convectiva e elevados índices pluviométricos. Uma possível explicação para a conservação da energia da região INDI para a região CE, deve-se ao estado básico da atmosfera ser favorecido pela forte *La Niña* atuante nos meses de setembro a outubro – ou seja, o sinal intrassazonal da OMJ se propagou imerso em um episódio de *La Niña* intensa que favorece os guias de ondas atmosféricas, vide Tabela 1.

Figura 5 – Mostra o WPS e o GWS da série temporal da ROL filtrada em 20 – 70 dias na região de controle CE para o ano de 2010.



Fonte: Autoria própria (2024).

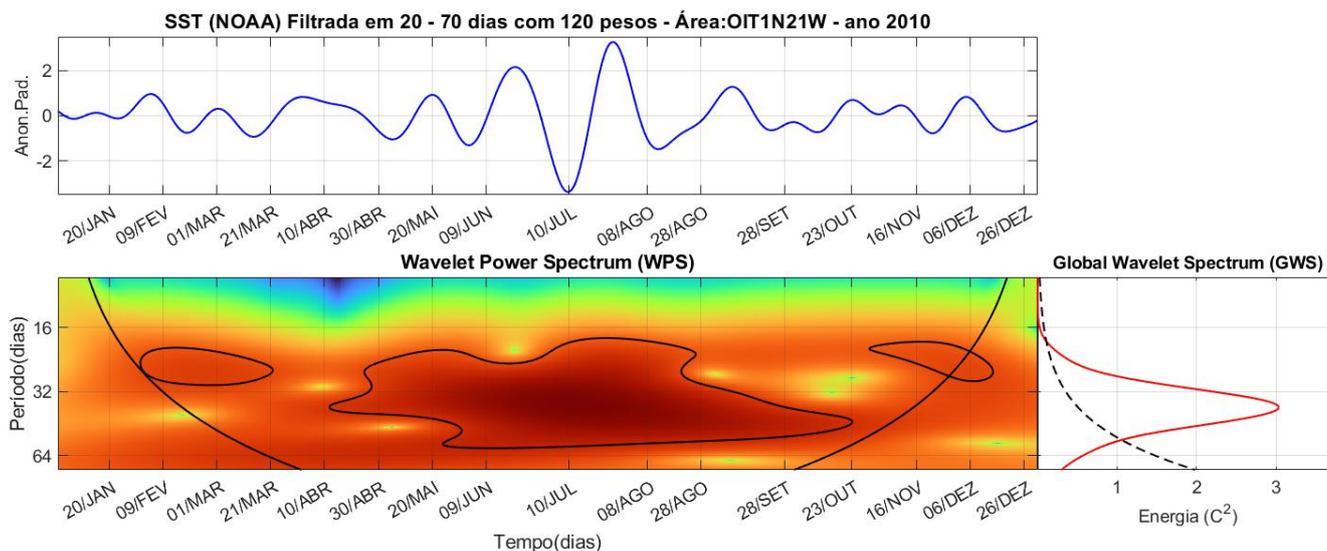
Tabela 1 - Mostra o *Oceanic Niño Index* (ONI) definido como a média móvel mensal das anomalias de TSM na região NIÑO 3.4 (coordenadas 5°N-5°S; 120°-170°W). Os limiares são adotados em que valores acima +0.5 °C repetidos por 3 vezes indicam período de *El Niño* e valores abaixo de -0.5 °C repetidos por 3 vezes indicam período de *La Niña*.

ANO	DJF	JFM	FMA	MAM	AMJ	MJJ	JJA	JAS	ASO	SON	OND	NDJ
2010	1.5	1.2	0.8	0.4	-0.2	-0.7	-1.0	-1.3	-1.6	-1.6	-1.6	-1.6

Fonte: Autoria própria (2024).

A Figura 6 mostra a CWT da TSM filtrada em 20 – 70 dias evidenciando o sinal das OIT na região de máxima variabilidade 1°N21°W para o ano de 2010. O WPS mostra um pico de energia espectral intrassazonal em 10 de julho de 2010 (anomalia negativa de TSM) indicando forte pico de atividade intrassazonal das OIT no oceano Atlântico Tropical. O sinal das OIT estende-se de abril a outubro do corrente ano e alcança grandes extensões oceânicas liberando umidade para a atmosfera.

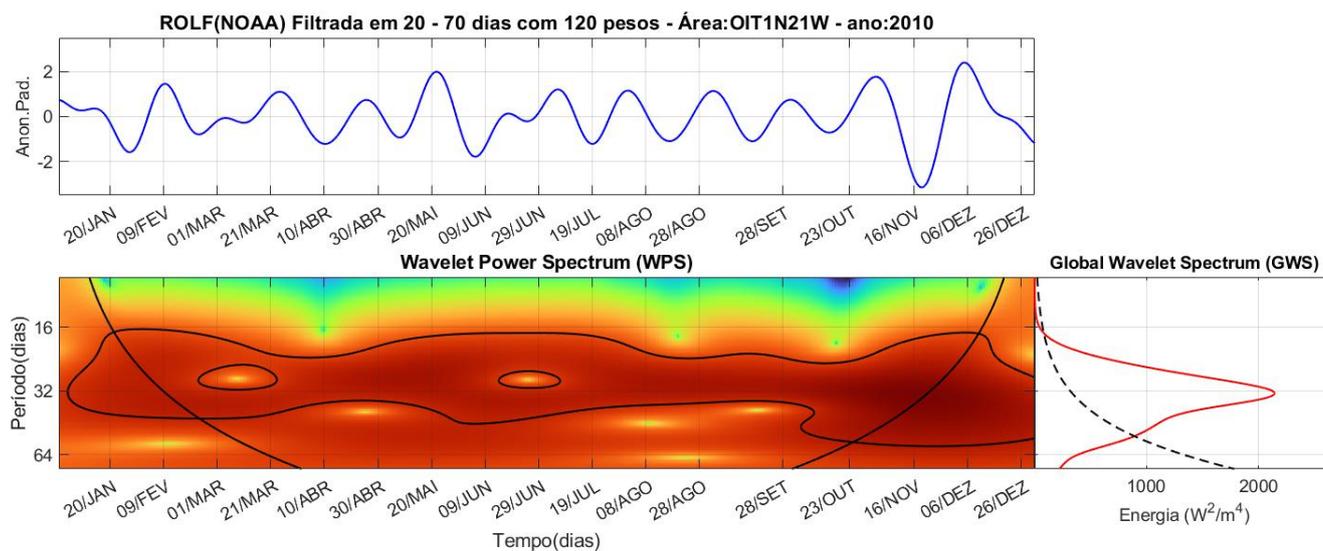
Figura 6 – Mostra o WPS e o GWS da série temporal da TSM filtrada em 20 – 70 dias na região de controle OIT (1N21W) para o ano de 2010.



Fonte: Autoria própria (2024).

A Figura 7 mostra a CWT da ROL filtrada em 20 – 70 dias na região 1N21W, evidenciando atividade intrassazonal das OIT sobre o oceano Atlântico Tropical atuando na escala de 32 dias com pico de energia espectral no GWS de $2.100 \text{ W}^2/\text{m}^4$ – metade na energia intrassazonal da OMJ atuando sobre o Estado do Ceará. O WPS mostra forte atividade de energia espectral no dia 23 de outubro de 2010 – dia da resposta remota da OMJ sobre o NEB/CE.

Figura 7 – Mostra o WPS e o GWS da série temporal da ROL filtrada em 20 – 70 dias na região de controle OIT (1N21W) para o ano de 2010.

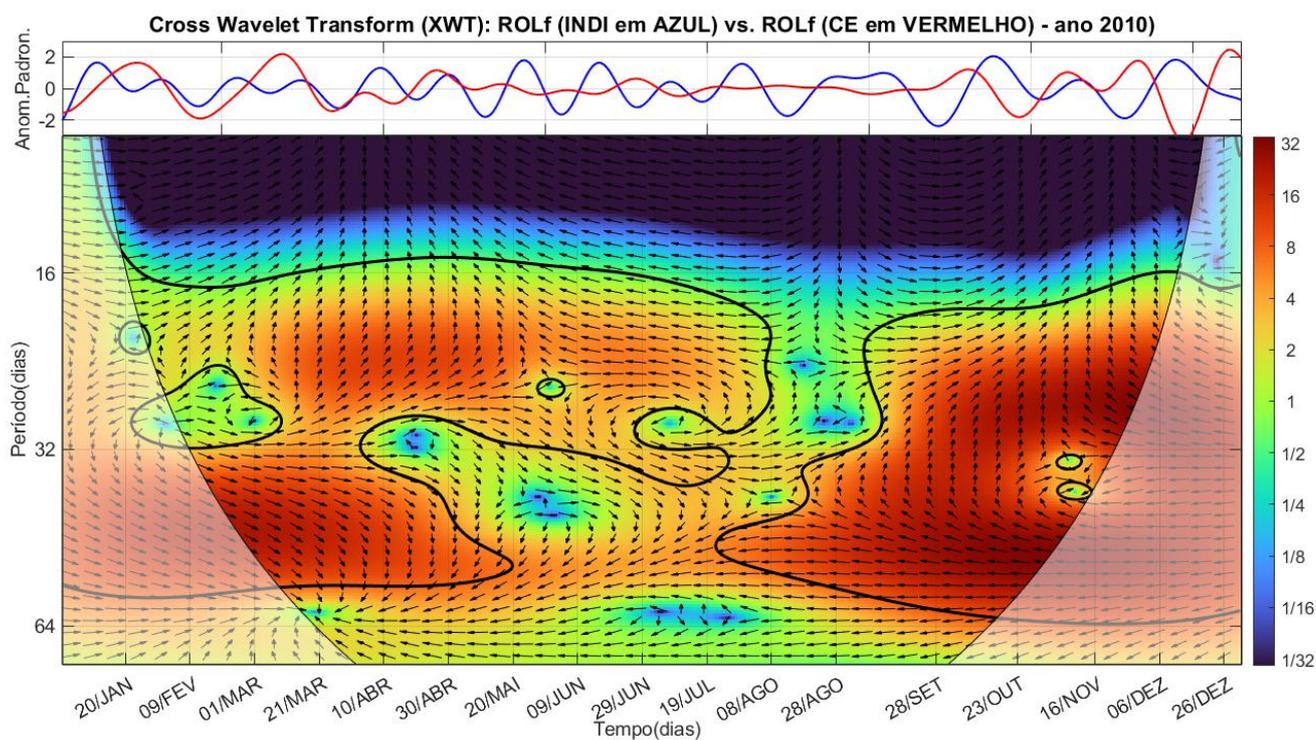


Fonte: Autoria própria (2024).

A Figura 8 mostra o espectro de energia cruzado entre a ROL (INDI) e a ROL (CE), séries filtradas em 20 – 70 dias para o ano de 2010. Observa-se forte energia intrassazonal no dia 23 de outubro do corrente ano, chegando ao máximo da escala de energia. Os vetores de fase mostram que para esse dia as duas séries estão completamente fora de fase na escala de 48 dias, e

tendendo a entrar em fase na escala de 24 dias. Todavia, forte atividade intrassazonal entre as duas séries evidencia uma forte relação entre as duas regiões do globo, que apesar de muito distantes trocam informações no fluxo de energia através dos guias de ondas atmosféricos.

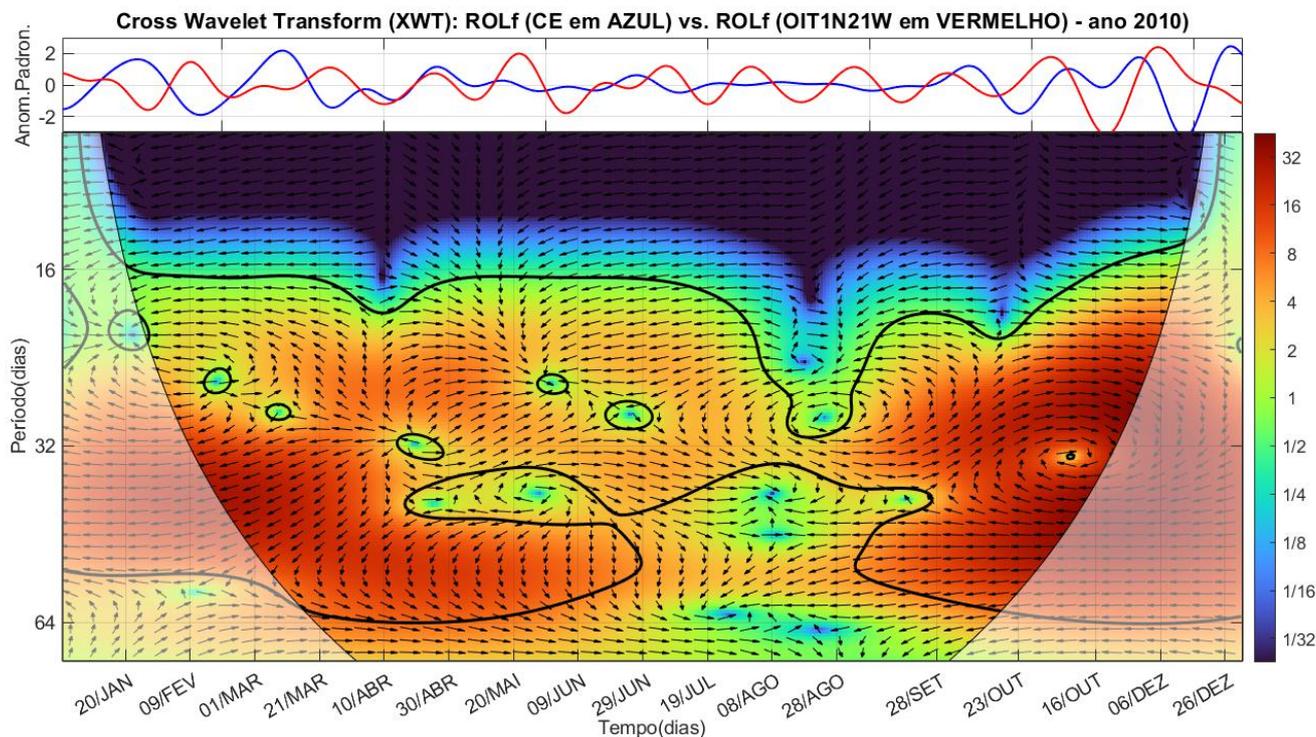
Figura 8 – Mostra a Transformada em Ondas Cruzada (XWT) entre a ROL (INDI) vs. ROL (CE) para o ano de 2010.



Fonte: Autoria própria (2024).

Figura 9 mostra forte energia espectral conjunta em 23 de outubro de 2010 – dia da resposta remota da OMJ sobre o CE, observa-se que as duas séries estão fora de fase na escala de 48 dias de oscilação, o mesmo acontece com a ROL INDI e a ROL CE. Todavia, evidencia-se um fato interessante, a partir de 28 de setembro de 2010 – dia do evento extremo da OMJ no oceano Índico, existe uma tendência de transferência de energia espectral da escala de 32 dias de oscilação (escala de maior energética nos campos de TSM e ROL na região 1N21W, relacionados a atividade das OIT) para a escala de 24 dias (escala com pico de energia no GWS da ROL no CE em torno de $1.700 \text{ W}^2/\text{m}^4$ – vide Figura 5) mostrando uma tendência de acoplamento entre as duas séries para essa escala de tempo. Os vetores de fase para a escala de 24 dias mostram estarem completamente em fase, no dia 16 de novembro de 2010 – apresentando um acoplamento perfeito entre as duas séries temporais. Dessa forma, conclui-se que a interação entre o INDI e CE e CE e OIT (1N21W) se dá na escala de 24 dias com transferência de energia entre a escala de 32 dias para a escala de 24 dias de oscilação.

Figura 9 – Mostra a Transformada em Ondas Cruzada (XWT) entre a ROL (CE) vs. ROL (1N21W) para o ano de 2010.



Fonte: Autoria própria (2024).

A Tabela 2 mostra a correlação de *Pearson* da ROL (INDI) vs. ROL (CE) no período de 23.10.2010 – chegada do sinal intrassazonal da OMJ sobre a região do Ceará até 01.11.2010. Totalizando dez dias de interação remota entre as duas regiões de controle, percebe-se que nos dias 23 e 24 de outubro de 2010 a ROL é positiva sobre a região INDI e negativa sobre o Ceará, estando em acordo com a inversão do sinal de meio ciclo da OMJ e como corrobora o coeficiente de *Pearson* de -0.8182 indicando uma forte correlação negativa – vide Figura 1. Todavia, a ROL permanece negativa durante os dez dias de interação na região CE, indicando atividade convectiva sobre o Estado do Ceará (vide figura 1(b)).

Tabela 2 – Mostra a correlação de *Pearson* entre a ROL (INDI) vs. ROL (CE) iniciando no dia da resposta remota da OMJ sobre o CE – 23 de outubro de 2010.

DATA	ROL (INDI)	ROL (CE)
23/10/2010	9,14118	-23,9077
24/10/2010	4,18383	-23,7305
25/10/2010	-0,421665	-22,7406
26/10/2010	-4,48754	-20,987
27/10/2010	-7,85647	-18,5549
28/10/2010	-10,41	-15,5594
29/10/2010	-12,0718	-12,1413
30/10/2010	-12,8114	-8,45941
31/10/2010	-12,6462	-4,68118
01/11/2010	-11,6406	-0,97782
Correlação Pearson		-0,818233925

Fonte: Autoria própria (2024).

A Tabela 4 mostra a correlação de *Pearson* entre a ROL (CE) vs. ROL (OIT1N21W) de 23.10.2010 – resposta do sinal da OMJ na região de controle CE, até 01.11.2010 – 10 dias de interação, período que inclui a atividade convectiva (chuva) sobre o CE (vide figura 10).

A correlação apresenta um valor numérico de +0,943142 – isso pode indicar uma correlação muito forte entre os dados e representa o acoplamento entre as duas regiões de estudo em uma relação estritamente linear. A interpretação física para o valor numérico encontrado, resume-se na certeza de 94% de existir uma interação entre a ROL sobre o CE disparada remotamente pela OMJ através dos padrões de teleconexões atmosféricas e a ROL gerada pelo resfriamento evaporativo da OIT – ambos os fenômenos na escala intrassazonal de 20 – 70 dias com acoplamento na escala de 24 dias de oscilação.

Tabela 3 – Mostra a correlação de *Pearson* entre a ROL (CE) vs. ROL (OIT1N21W) iniciando no dia da resposta remota da OMJ sobre o CE – 23 de outubro de 2010.

DATA	ROL (CE)	ROL (OIT1N21W)
23/10/2010	-23,9077	0,599978
24/10/2010	-23,7305	2,61448
25/10/2010	-22,7406	4,69599
26/10/2010	-20,987	6,78281
27/10/2010	-18,5549	8,80909
28/10/2010	-15,5594	10,7053
29/10/2010	-12,1413	12,3975
30/10/2010	-8,45941	13,8117
31/10/2010	-4,68118	14,8754
01/11/2010	-0,97782	15,5199
Correlação <i>Pearson</i>	+0,943142	

Fonte: Autoria própria (2024).

Segundo a CLIMANÁLISE – VOL. 25, NÚMERO 10, OUT/2010 a ZCIT atuou aproximadamente entre 5° N e 10° N, durante o mês de outubro. De modo geral, oscilou em torno de sua posição climatológica, quando atuou mais ao sul, na faixa tropical do Atlântico Norte. Notou-se que a maior frequência de nebulosidade convectiva associada à ZCIT ocorreu na área mais central do Atlântico e próximo à costa da África, onde a sua atuação costuma ser maior neste período do ano. Em resumo, a ZCIT, principal fenômeno de grande escala que atua sobre o NEB/CE, não teve influência sobre essas regiões durante o mês de outubro de 2010 – também, segundo o boletim, não houve outros fenômenos atuando sobre o NEB/CE durante o período de estudo analisado no presente trabalho.

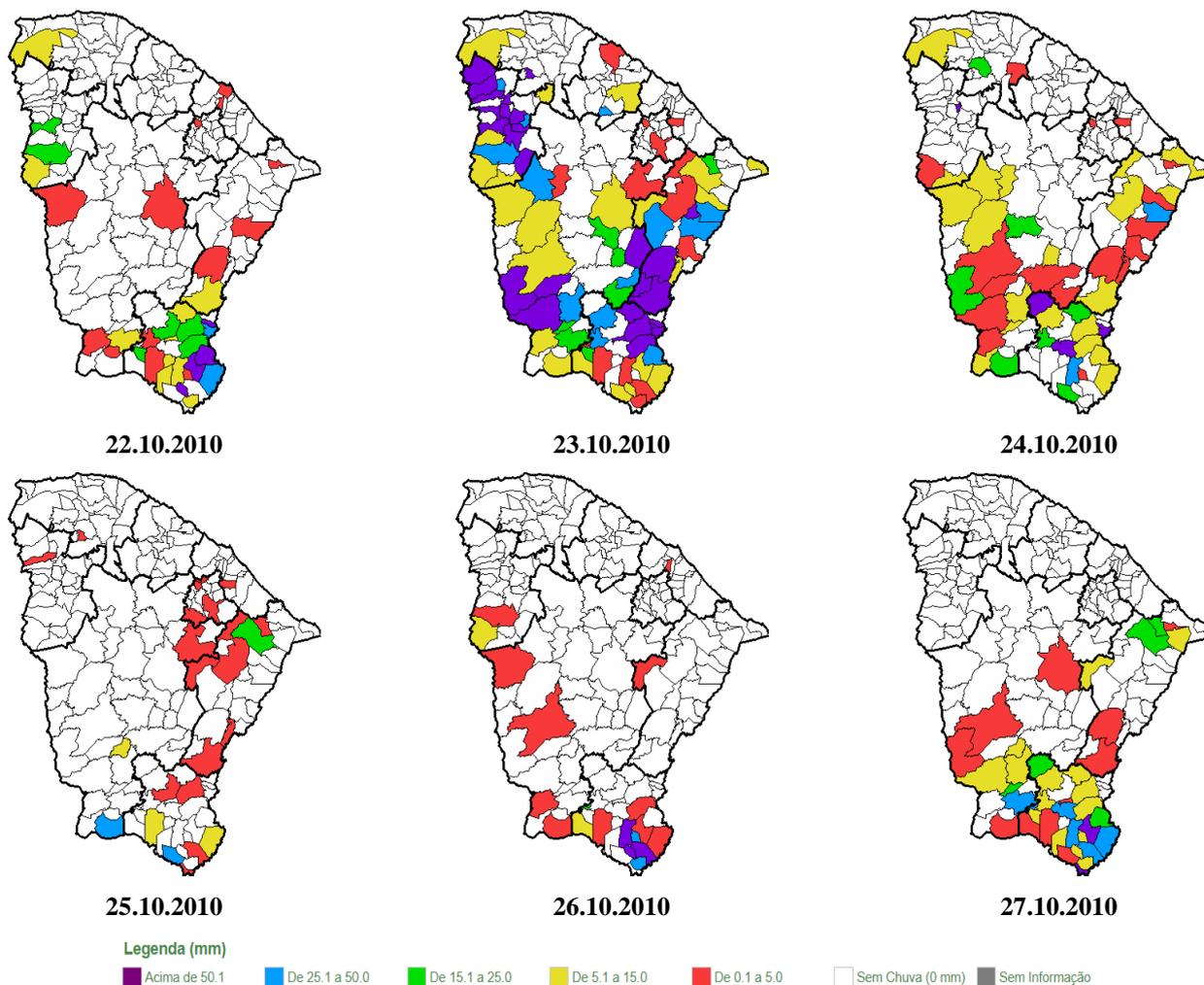
Analisando os mapas de chuva da FUNCEME observa-se que o mês de novembro de 2010 foi um período de forte estiagem. Dessa forma, conclui-se que apesar das OIT fomentar vapor para a região até meados de novembro, sem a atuação do sinal da OMJ desestabilizando a atmosfera sobre a região CE e gerando movimentos verticais com convergência de umidade em baixos níveis, não há formação de nuvens e conseqüentemente não há precipitação – A Figura 2 mostra que após o evento da OMJ de 28 de setembro de 2010 não houve outro evento subsequente para atuar como gatilho remoto da precipitação sobre o CE utilizando-se do vapor fornecido pela atuação das OIT.

Em função da correlação da ROL entre as regiões de controle INDI vs. CE e CE vs. OIT(1N21W) e fazendo uma análise de outros possíveis fenômenos meteorológicos que poderiam atuar entre 23.10.2010 e 01.11.2010, conclui-se que “possivelmente” apenas a interação dos eventos intrassazonais, OMJ e OIT, fomentar a atividade convectiva sobre o CE no mês de outubro do ano de 2010. O quantitativo das chuvas é determinado segundo os boletins da Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos – FUNCEME, como descrito a seguir.

A atuação de duas regiões de convergência de umidade contribuiu para que as chuvas ocorressem acima da média na maior parte da Região Nordeste. No dia 23, depois de mais de três meses de estiagem, voltou a chover na região do Cariri, no

Ceará. Os totais diários de precipitação excederam 100 mm em algumas cidades no sul do Ceará, especialmente entre os dias 22 e 23, como foi registrado em Milagres (132 mm), Barro (103 mm), Ubajara (146 mm), Graças (215 mm) e Icó (105,3 mm) – segundo dados da FUNCEME (vide Figura 10). Estas chuvas foram associadas ao deslocamento da região de convergência de umidade que se formou sobre o Nordeste no período de 19 a 22 de outubro – período de atuação conjunta da OMJ e OIT sobre as regiões NEB/CE.

Figura 10 – Chuva Média Diária por Município para os dias 22 a 27.10.2010.



Fonte: *Funceme* (2024.)

4. Conclusão

Este artigo objetivou a análise da atividade remota da OMJ e da atividade da língua fria das OIT - liberando calor latente e vapor d'água para a região do NEB/CE. Em função do período do ano analisado, o total pluviométrico alcançado sobre a região deve-se a interação conjunta desses depois eventos em assinaturas da ROL, TSM. Em que o vapor aquecido na atmosfera, foi instabilizado pelas ondas atmosféricas geradas pela OMJ sobre o NEB.

As características espectrais desses fenômenos puderam ser analisadas através dos ângulos de fase das Ondaletas cruzada e simples, através do tempo de resposta mais conhecido como *lag* temporal. A utilização destes ângulos foi totalmente possível no sentido de representar perfeitamente as interações entre a ROL, TSM, onde observamos um aspecto muito

interessante da covariabilidade intrassazonal oceano-atmosfera para o ano de 2010, já que a ZCIT, principal fenômeno de grande escala que atua sobre o NEB/CE, não teve influência sobre essas regiões durante o mês de outubro do mesmo ano.

Em função da correlação entre a ROL entre as regiões de controle INDI vs. CE e CE vs. OIT(1N21W) e fazendo uma análise de outros possíveis fenômenos meteorológicos que poderiam atuar entre 23.10.2010 e 01.11.2010, conclui-se que “possivelmente” apenas a interação dos eventos intrassazonais, OMJ e OIT, fortalecidos por um evento de *La Nina*, fomentaram a atividade convectiva sobre o CE incomum para o período.

Em função da complexidade envolvida nas interpretações físicas dos resultados apresentados no presente trabalho de pesquisa científica, algumas questões podem ser levantadas a respeito do escoamento dos altos e baixos níveis da atmosfera, para o acoplamento entre os fenômenos OMJ e OIT na escala intrassazonal. Dessa forma, pretende-se realizar uma análise com modelagem numérica desses eventos utilizando-se o modelo WRF v4.4.1, e assim, verificar quanto do escoamento em altos e baixos níveis da troposfera podem contribuir para a existência ou não do acoplamento e interferir no quantitativo de chuva sobre o Estado do Ceará.

Agradecimentos

Os autores expressam sua gratidão às seguintes agências de fomento – Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico/FUNCAP e a Fundação Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior/CAPES, pela concessão da bolsa. Agradecemos também ao Curso de Mestrado Acadêmico em Ciências Físicas Aplicadas/CMACFA da Universidade Estadual do Ceará/FUNECE.

Referências

- Alvarez, M. S., Vera, C., Kiladis, G. N., & Liebmann, B. (2015). Influence of the Madden-Julian Oscillation on precipitation and surface air temperature in South America. *Climate Dynamics*, 44(7-8), 2057–2071. <https://doi.org/10.1007/s00382-015-2581-6>
- Barbosa, A. C. B. (2007). *Estudo da variabilidade acoplada oceano-atmosfera no Atlântico tropical* (Dissertação de Mestrado). Universidade de São Paulo, São Paulo.
- Barbosa, A. C. B. (2012). *Oscilações intrassazonais no Indo-Pacífico e na zona de convergência do Atlântico Sul: Estudo observacional e numérico* (Tese de doutorado). Universidade de São Paulo. <https://doi.org/10.11606/T.14.2012.tde-25062013-120942>
- Barbosa, A. C. B. (2015). *De Fourier a ondletas: Histórico & aplicação*. Universidade de São Paulo. <https://doi.org/10.11606/T.14.2015.tde-25062013-120942>
- Collins, D. C., & Sinsky, E. (2022). ENSO and its influence on global precipitation patterns: A review of recent findings. *Journal of Climate*, 35(4), 1550–1565. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-21-0502.1>
- Duchon, C. E. (1979). Lanczos filtering in one and two dimensions. *Journal of Applied Meteorology*, 18(8), 1016–1022. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1979\)018<1016>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1979)018<1016>2.0.CO;2)
- Fonseca da Silva, D. (2016). Aplicação de análises de ondaletas para detecção de ciclos e extremos pluviométricos no leste do Nordeste do Brasil. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 32(2), 187-198. <https://doi.org/10.1590/0102-77863220002>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbmet/a/77RZdZy9dwSy6V4rNZL6pKK/?lang=pt>. Acesso em 6 de fevereiro de 2023.
- Grimm, A. M., & Reason, C. J. C. (2015). Intraseasonal teleconnections between South America and South Africa. *Journal of Climate*, 28(23), 9489–9497. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-15-0116.1>
- Grinsted, A., Moore, J. C., & Jevrejeva, S. (2004). Application of the cross wavelet transform and wavelet coherence to geophysical time series. *Nonlinear Processes in Geophysics*, 11(6), 561–566. <https://doi.org/10.5194/npg-11-561-2004>
- Hall, A., & Visbeck, M. (2002). Synchronous variability in the Southern Hemisphere atmosphere, sea ice, and ocean resulting from the annular mode. *Journal of Climate*, 15(21), 3043–3057. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2002\)015<3043>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2002)015<3043>2.0.CO;2)
- INPE/CPTEC. (2010). *Climanálise: Boletim de monitoramento e análise climática. Boletim de monitoramento do clima do Nordeste*. Disponível em <http://climanalise.cptec.inpe.br/~rcliman/boletim/pdf/pdf02/out10.pdf>. Acesso em 18 de janeiro de 2023.
- Lima dos Reis, G. N. (2020). *Estudo das ondas de instabilidade tropical no oceano Atlântico e seus impactos na atmosfera* (Dissertação de Mestrado). Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto, São José dos Campos. Disponível em <http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34R/428TANB>. Acesso em 4 de janeiro de 2023.

Köche, J.C. (2011). Fundamentos de metodologia científica: teoria da ciência e iniciação à pesquisa. (29ª ed). Petrópolis: Vozes.

Madden, R. A., & Julian, P. R. (1972). Description of global-scale circulation cells in the tropics with a 40–50-day period. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 29(6), 1109–1123. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1972\)029<1109>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1972)029<1109>2.0.CO;2)

NOAA's Climate Prediction Center. (2001). NOAA's climate prediction center. https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php

Olivier, L., Reverdin, G., Hasson, A., & Boutin, J. (2020). Tropical instability waves in the Atlantic Ocean: Investigating the relative role of sea surface salinity and temperature from 2010 to 2018. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 125, e2020JC016641. <https://doi.org/10.1029/2020JC016641>

Pereira, A. S., Shitsuka, D. M., Parreira, F. J., & Shitsuka, R. (2018). Metodologia da Pesquisa Científica. Santa Maria, UFSM.

Shi, W., & Wang, M. (2021). Modulação de onda de instabilidade tropical de clorofila-a no Pacífico Equatorial. *Scientific Reports*, 11, 22517.

Sobral, B. S., Oliveira-Júnior, J. F., Gois, G., Terassi, P. M. de B., & Muniz-Júnior, J. G. R. (2021). Variabilidade espaço-temporal e interanual da chuva no estado do Rio de Janeiro. *Revista Brasileira de Climatologia*, 22, 1-20. <https://doi.org/10.5380/abclima.v22i0.55592>

Torrence, C., & Compo, G. P. (1998). A practical guide to wavelet analysis. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 79(1), 61–78. [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1998\)079<0061>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1998)079<0061>2.0.CO;2)

Valadão, C., Lucio, P. S., Chaves, R. R., & Carvalho, L. M. V. (2015, outubro). The influence of the Madden-Julian oscillation on rainfall in the Seridó/RN, Northeast Brazil. Trabalho apresentado no VI Simpósio Internacional de Climatologia (VI SIC), Natal, RN, Brasil.

Wang, X., & Lu, J. (2023). The influence of El Niño and La Niña on regional climate extremes: A global perspective. *Climate Dynamics*, 61(3), 2375–2392. <https://doi.org/10.1007/s00382-022-06541-7>