



Revista Brasileira de Geografia Física

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



Variabilidade sazonal da Zona de Convergência Intertropical e sua influência sobre o norte da América do Sul

Reinaldo Matheus Reis Ribeiro¹, Maria Isabel Vitorino², Mauricio do Nascimento Moura³

¹Graduando em Meteorologia, Universidade Federal do Pará, Rua Augusto Corrêa, 01, Guamá, CEP 66075-110, Belém, Pará. (91) 98078-4530. mrbeirorais2001@gmail.com (autor correspondente). ²Dra. em Meteorologia, Professora Associada I, Departamento de Meteorologia, Universidade Federal do Pará, Rua Augusto Corrêa, 01, Guamá, CEP 66075-110, Belém, Pará. (91) 982145137. vitorino@ufpa.br. ³Dr. Em Meteorologia, Universidade Federal do Pará, Rua Augusto Correa, 01, Guamá, CEP 66075-110, Belém, Pará. (91) 8341-7758. Mauriciomoura90@gmail.com.

Artigo recebido em 26/03/2023 e aceito em 18/09/2023

RESUMO

A Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) é um importante sistema de escala sinótica que contribui para os acumulados pluviométricos das regiões norte e nordeste da América do Sul (AS), influenciando o regime de precipitação nessas áreas. As variações e interações sazonais da ZCIT com fenômenos climáticos resultam em eventos extremos que afetam diversos setores vulneráveis da AS. O objetivo deste estudo é analisar qualitativamente as condições geradas pelas interações oceano-atmosfera representadas pelo Modo Meridional do Atlântico (MMA), Índice de Oscilação Sul (IOS) e precipitação, com ênfase na influência da ZCIT sobre a região norte da AS. Foram utilizados dados mensais de precipitação, componentes horizontais do vento, MMA e IOS obtidos pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e pela National Atmospheric Oceanic Administration (NOAA) no período de 1981 a 2018. Através da estatística descritiva (média) e cálculo de anomalias, aplicados aos índices e à precipitação observada, respectivamente, foi possível observar a variabilidade sazonal da ZCIT ao longo da série histórica, bem como a variabilidade multidecadal dos índices climáticos relacionados diretamente com as anomalias de precipitação em Belém – PA. As análises indicaram que o Oceano Atlântico desempenha um papel importante como modulador do clima na região norte. Da mesma forma, as atividades convectivas mais intensas concentraram-se durante os meses do outono austral, quando ocorreu o deslocamento máximo da ZCIT em direção ao sul do equador, com a Alta Subtropical do Atlântico Norte (ASAN) atuando como suporte para a advecção de umidade para o norte da AS.

Palavras-chave: ZCIT, climatologia, circulação atmosférica, índices climáticos, regime pluviométrico.

Seasonal variability of the Intertropical Convergence Zone and its influence on northern South America

ABSTRACT

The Intertropical Convergence Zone (ITCZ) is an important synoptic-scale system that contributes to the rainfall patterns in the northern and northeastern regions of South America (SA), thus governing the precipitation regime in the region. The variabilities and interactions of the ITCZ, seasonally with climate phenomena, cause extreme events that have impacts on various vulnerable sectors in SA. This study aims to qualitatively analyze the conditions generated by the ocean-atmosphere interactions represented by the Atlantic Meridional Mode (AMM), Southern Oscillation Index (SOI), and precipitation, with emphasis on the role of the ITCZ in the northern sector of SA. Monthly precipitation data, horizontal wind components, AMM, and SOI obtained from the National Institute of Meteorology (INMET) and the National Atmospheric Oceanic Administration (NOAA) for the period 1981 to 2018 were used. By using descriptive statistics (mean) and calculating anomalies applied to the indices and observed precipitation, respectively, it was possible to observe the seasonal variability of the ITCZ throughout the historical series, as well as the multidecadal variability of the related climate indices directly associated with precipitation anomalies for Belém - PA. The analyses indicated that the Atlantic plays an important role as a climate modulator in the northern sector. Similarly, the most intense convective activities were concentrated during the months of the austral autumn when the ITCZ shifted south of the equator with the North Atlantic Subtropical High (NASH) acting as a support for moisture advection towards the northern SA.

Keywords: ZCIT, climatology, atmospheric circulation, climatic indices, rainfall regime.

Introdução

A Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) é um sistema atmosférico resultante da confluência dos ventos Alísios em superfície, vindos de nordeste a partir do hemisfério norte (HN) e de sudeste no hemisfério sul (HS), que convergem sobre a região equatorial, formando nuvens convectivas que resultam em uma banda de nebulosidade com interrupções na região tropical (Aimola e Moura, 2016; Moura e Freitas, 2018; Carpenedo e Ambrizzi, 2020). Estudos evidenciam que sua largura e posição variam sazonalmente de acordo com a época do ano. Definindo-se como o sistema precipitante de maior importância para a região equatorial, a ZCIT apresenta uma variabilidade sazonal em virtude do movimento aparente do sol, em outras palavras, quando um determinado hemisfério recebe mais radiação solar, estação do verão (Waliser e Gautier, 1993; Teodoro et al., 2019; Escobar e Matoso, 2020).

A ZCIT caracteriza-se por se posicionar sobre áreas cuja temperatura da superfície oceânica encontra-se anormalmente aquecida, correspondendo ao acoplamento oceano-atmosfera e identificada por diversos campos meteorológicos, como: radiação de onda longa (ROL), linhas de corrente do vento, divergência, vortacidade, velocidade vertical, temperatura da superfície do mar (TSM) e através de imagens de satélite (Rocha, 2019; Escobar e Matoso, 2020; Souza Neto, 2021).

A Terra apresenta constante distribuição de calor e umidade entre os hemisférios por meio da componente oceânicas (correntes oceânicas) e atmosféricas (circulação geral da atmosfera) (Muanza et al., 2022). Os movimentos atmosféricos surgem a partir do aquecimento diferencial no globo, em decorrência da inclinação do eixo de rotação do planeta em relação ao plano da órbita no sentido equador - polo, continente - oceano e leste - oeste, e por causa da rotação e da translação (Carpenedo e Ambrizzi, 2020). Os movimentos surgem para possibilitar a redistribuição de calor, transportando o ar mais aquecido do equador para os polos e o ar menos aquecido dos polos para o equador, compondo assim o balanço energético do planeta (Moura e Freitas, 2018).

A ZCIT sofre influência de moduladores climáticos de diferente escala espaço-temporal, corroborando para a intensidade e posição do sistema. Madden-Julian (OMJ), Modo Meridional do Atlântico (MMA), Índice de Oscilação Sul (IOS), El Niño Oscilação Sul (ENOS) e a Oscilação Quase Bial (OQB) destacam-se como importantes moduladores sobre a ZCIT, via

processo de teleconexão atmosférica (Moura e Vitorino, 2012; Limberger e Silva, 2021; Reboita et al., 2021; Monteiro, 2022). Além desses moduladores oceano-atmosféricos tropicais, alguns extratropicais influenciam o sistema, como a Oscilação Antártica (OAA), Oscilação do Atlântico Norte (OAN) e a Oscilação Decadal do Pacífico (ODP) (Souza e Reboita, 2021).

Os moduladores climáticos representam a variabilidade atmosférica relacionada as mudanças do clima, devido aos efeitos dos fenômenos naturais. No entanto, as mudanças de uso e cobertura da terra em áreas urbanas se somam aos efeitos combinados dos moduladores climáticos (Varquez e Kanda, 2018). Assim, a resposta esperada da precipitação sazonal, devido a atuação da ZCIT e dos moduladores pode estar associado as mudanças climáticas globais.

O objetivo deste trabalho é realizar uma análise qualitativa das condições oceano-atmosfera representadas pelos índices climáticos do MMA e do IOS na modulação do regime de precipitação associado ao período de atuação da ZCIT sobre a capital paraense, Belém. A variabilidade na intensidade e na dimensão espacial do sistema convectivo sobre a região equatorial e a forma como a precipitação é regida, impacta em vários graus os setores econômicos e sociais, cuja área fica sob atuação da ZCIT. Portanto, torna-se essencial o estudo da variabilidade sazonal desse sistema e sua influência sobre o norte da América do Sul (AS), tornando as informações úteis geradas neste estudo para o planejamento das atividades humanas, planejamento urbano, desenvolvimento agrícola, geração de energia, aviação civil, gestão de recursos hídricos, de modo que, viabilize o crescimento social e econômico, amenizando os impactos climáticos.

Material e métodos

Área de estudo

A região analisada abrange desde o oeste da África até o norte do continente sul-americano, ressaltando também a porção central do oceano Atlântico (Figura 1A). Na Figura 1B, denota-se uma região de grande escala, cujos oceanos Pacífico Oriental e Atlântico aparecem com maior destaque, uma vez que, há pontos analisados que relacionam precipitação com os índices IOS e MMA que podem modular a intensidade e a posição da ZCIT. O município de Belém (Figura 1A) localiza-se no extremo norte do estado do Pará, na latitude de 1°27'21" S e longitude de 48°27'21" W.

A capital paraense apresenta um clima quente e úmido, com acumulado anual de precipitação maior que 3.000 mm, tendo seu regime pluviométrico modulado principalmente por efeitos de brisa marítima e fluvial, além de sistemas meteorológicos de mesoescala e escala sinótica, como exemplo das Linhas de

Instabilidade (LI), Sistemas Convectivos de Mesoescala Circular (SCMC) e a ZCIT, respectivamente (Reboita et al., 2010; Amanajás e Braga, 2012; Sodré et al., 2015; Santos et al., 2016).



Figura 1. Localização da área de estudo, com destaque para o norte da América do Sul, bem como a região de análise dos índices do MMA e IOS (painel B). O ponto destacado ao norte do território brasileiro (painel A),

Dados

Utilizou-se os dados de reanálise e índices climáticos fornecidos pela *National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)*, além dos dados observacionais de precipitação em superfície, disponibilizados pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Todos dados mensais, num período de 1981 a 2018

Método

Transformando-os em dados mensais em trimestrais, fora aplicada ferramentas estatísticas descritiva, além dos cálculos de anomalias, aplicada na série da precipitação observada. Desta maneira, através da média trimestral: verão (dez-jan-fev), outono (mar-abr-mai), inverno (jun-jul-ago) e primavera (set-out-nov) analisou-se os dados espaciais do ROL, vento e precipitação com 4 períodos, separados por estações.

Com cada período contendo a média de um trimestre (Equação 1), assim obtendo a climatologia das variáveis.

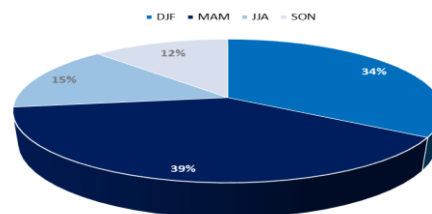


Figura 2. Representação do regime de precipitação sazonal em relação ao acumulado médio anual em Belém/PA. Destaque para o período

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n (M6a_i + M7a_i + M8a_i)}{N} \quad (1)$$

Onde $\bar{x}$ representa a média aritmética, M6 os respectivos meses, N é total de anos (36 anos) e, i e n os anos da série temporal (1981-2018).

Nos índices climáticos mensais, por serem variáveis contínuas utilizou-se a média anual para a análise multidecadal. Para o cálculo de anomalia de precipitação (Equação 2) foram utilizadas as informações mensais da precipitação que, posteriormente, foram transformadas em anual (PRP_{obs}). Deste modo, com os acumulados anuais, foram feitas as médias com todos os 36 resultados ($PRP_{média}$), para enfim executarmos a diferença entre os termos para assim obter os módulos de anomalia ($aPRP$) (Wilks, 2006).

$$aPRP = PRP_{obs} - PRP_{média} \quad (2)$$

A partir da normal climatologia mensal disponibilizada pelo INMET, foi feito a soma trimestral da precipitação, a fim de conhecer o quanto o acumulado do outono representa, em termos de percentual para total anual em Belém (Figura 2), usando a seguinte equação:

$$PRP(\%) = \left(\frac{\sum (M6a_i + M7a_i + M8a_i)}{PRP_{média}} \right) \times 100$$

Assim, todos os resultados gerados nas análises, foram desenvolvidos por meio de *softwares* de acesso, manipulação e visualização de dados geofísicos - *Grid Analysis and Display System* (GrADS) - e o *Climate Data Operators* (CDO).

Resultados e discussão

O regime pluviométrico de Belém apresenta uma variabilidade sazonal evidenciada

pela interação de sistemas atmosféricos de diferentes escalas e, durante os meses de março a maio a ZCIT o modula (Figura 2), de forma que o acumulado durante este trimestre é de 1.295 mm, cujo representação é de aproximadamente 39% do acumulado anual (Moura e Vitorino, 2012; Souza Neto et al., 2021). A partir da climatologia dos índices (IOS e MMA), obteve-se uma melhor compreensão da fase dominante ao longo dos 37 anos (1981-2018). A fase positiva do MMA no Atlântico Tropical Sul (ATS) coincide com anomalias negativas da TSM e, na fase negativa coincide com anomalias positivas, tornando a superfície do ATS mais fria ou mais quente, respectivamente (Hounsou-Gbo, 2015; Correa et al. 2020).

A ocorrência da fase positiva do modo meridional acarreta na inibição do deslocamento máximo da ZCIT para o HS, diminuindo os acumulados de chuva sobre o Norte e o Nordeste brasileiro nos meses de outono (Campos e Muehe, 2014; Monteiro, 2022).

Observa-se na Figura 3 que há uma concordância entre as fases do MMA e as anomalias de precipitação sobre a cidade de Belém, demonstrando duas fases completas da oscilação. Com as anomalias anuais de precipitação, relacionou-se as fases dominantes ao longo da série, a fim de denotar os possíveis efeitos que levam aos acumulados pluviométricos – acima ou abaixo – da média climatológica. Analisando a oscilação em dois períodos, observou-se as fases do MMA que se destacaram e o *feedback* da precipitação, nas respectivas fases e períodos (Figura 3) (Carvalho, 2019)

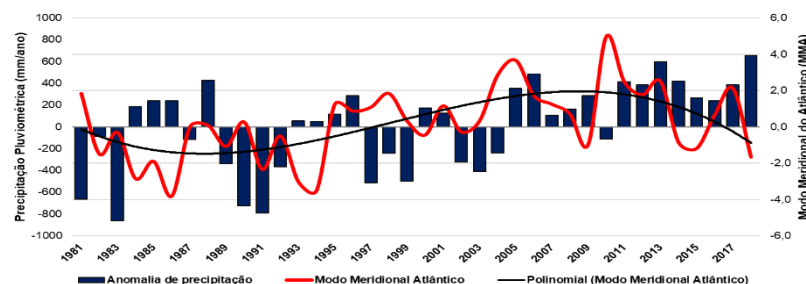


Figura 3. Variabilidade multidecadal do MMA (linha vermelha), relacionada com as anomalias de precipitação (barras azuis) em Belém/PA (1981-2018). A linha preta

A primeira fase compreende os anos desde 1981 a 1999, onde se observou que a linha de tendência do índice destaca as fases negativas do MMA, ocasionando anomalias negativas de chuva, na capital paraense, ou seja, a precipitação comportou-se de maneira oposta ao modulador Atlântico, mostrando que em poucos anos houve concordância, a exemplo dos anos de 1983-1986, 1988, 1995 e 1996 que mantiveram uma anomalia superior a 100 mm acima da média climatológica.

A segunda fase estendeu-se de 2000 a 2018, cujas fases dominantes do MMA foram positivas e, a linha de tendência deixou explícito, com anomalia positiva. Assim como ocorreu no período anterior, o regime de precipitação não convergiu para um padrão esperado.

Com as águas do Atlântico Tropical Norte (ATN) mais aquecida há redução no volume pluviométrico, em virtude do enfraquecimento da Alta Subtropical do Atlântico Norte (ASAN) que auxilia na entrada de umidade sobre o norte da AS (Carpenedo e Ambrizzi, 2020).

Na Figura 4 é possível observar mais uma vez a concordância de sinais, desta vez entre as fases do IOS e as anomalias de precipitação, onde no primeiro período, a fase do IOS foi negativa, apesar da menor frequência, houve anomalia negativa, sugerindo um cenário com maior número de episódios de El Niño. O El Niño afeta principalmente a intensidade dos Alísios de nordeste na parte oeste da bacia, que através do mecanismo de variação de fluxo oceano-atmosfera influencia a TSM, favorecendo assim o estabelecimento do MMA negativo (Saravanan e Chang, 2000; Hounsou-Gbo, 2015).

O segundo período (1991-2018) apresentou uma tendência positiva nas fases do IOS, com a magnitude maiores e valores de aPRP também positivas na maioria dos anos. Fases positivas do ENOS no Pacífico coincidem geralmente com fortes eventos da fase positiva do MMA (Hounsou-Gbo 2015), além de tratarmos de forma separada à análise dos índices com o aPRP, procurou-se relacionar também a variabilidade multidecadal do IOS e MMA, para compreensão da intercorrência nas séries temporais.

O IOS é um índice padronizado baseado nas diferenças de pressão ao nível do mar observadas entre Taiti e Darwin. Segundo a *National Centers for Environmental Information (NCEP/NOAA)*, IOS é uma medida das flutuações em grande escala na pressão do ar que ocorrem entre o oeste e o leste do Pacífico tropical (ou seja, o estado da Oscilação Sul) durante os episódios de El Niño e La Niña. A fase negativa do IOS representa a pressão do ar abaixo do normal em Taiti e a pressão do ar acima do normal em Darwin, o contrário percebe-se na fase positiva. Períodos prolongados de valores IOS negativos (positivos) coincidem com águas oceânicas anormalmente quentes (frias) em todo o Pacífico tropical oriental, típicos de episódios de El Niño (La Niña) (Souza e Reboita, 2021)

A Figura 5 mostra a variabilidade multidecadal do IOS e do MMA, relacionadas diretamente, com padrões temporais semelhantes, havendo diferença de magnitude, as quais podem ser ocasionadas por meio de eventos de ENOS no Pacífico oriental e do aquecimento anômalo nas águas do Atlântico equatorial.

Segundo Campos e Muehe (2014), ENOS é caracterizado por um aquecimento ou resfriamento anormal das águas do Oceano Pacífico equatorial leste. No primeiro caso, é denominado El Niño e no segundo, recebe o nome de La Niña. Essas alterações da TSM deflagram uma série de mudanças na circulação atmosférica, que afetam o clima de várias regiões do mundo.

Cabe destacar o ano de 1983, onde o IOS obteve o valor médio anual de -0,8 e o MMA -0,3, havendo um acumulado de chuva muito abaixo da média, diferença entre o valor médio da climatologia e o acumulado do respectivo ano, de -843,21 mm. Em contraste com 1983, o ano de 2010 apresentou uma anomalia de precipitação infimamente negativa, com -92,41 mm, e o MMA apresentou uma fase extrema positiva de +5,0 e o IOS foi superior a 0,5, de aproximadamente 0,9.

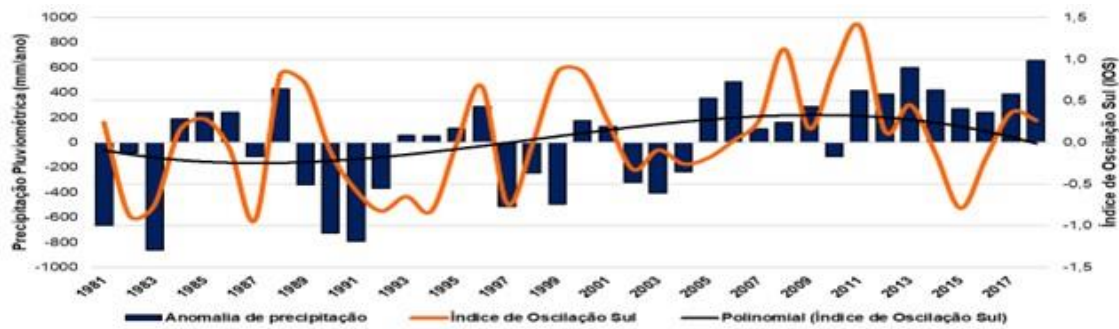


Figura 4. Variabilidade multidecadal do IOS (linha laranja), relacionada com as anomalias de precipitação (barras azuis) em Belém/PA (1981-2018). A linha preta representa o cálculo da média polinomial, evidenciando duas fases dentro da série temporal.

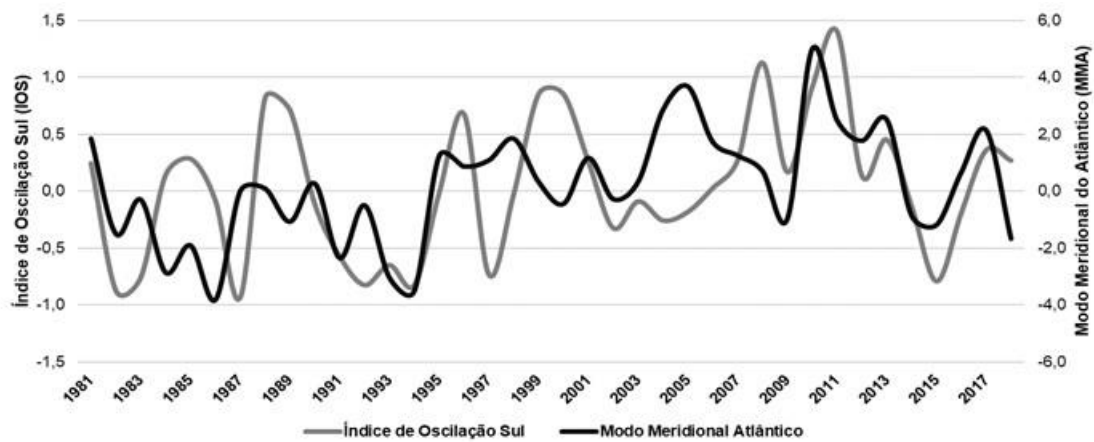


Figura 5. Variabilidade multidecadal dos índices IOS (linha cinza) e o MMA (linha preta), caracterizando semelhança nos padrões temporais, com diferentes magnitudes ao longo da série.

Variabilidade sazonal da precipitação e ROL

Estimativas do ROL são usadas para distinguir atividades convectivas e estimar o balanço de radiação da terrestre, com valores abaixo de 240 W/m^2 caracterizando áreas de convecção profundas, precipitação abundante e divergência intensificada em altos níveis (Liebmann e Smith, 1996; Liebmann et al., 1998; Nobre et al., 2009; Silva, 2020).

Na Figura 6, apresenta-se espacialmente distribuída a precipitação e a radiação de onda longa sobre a região equatorial. Esses dois elementos climáticos são essenciais para a caracterização da ZCIT e sua área de atuação. Observou-se que na Figura 6A, B, um núcleo de precipitação formado, aproximadamente, entre as latitudes de 0° a 5° N , sobre o Atlântico Equatorial havendo uma maior atividade convectiva com um valor de 230 W/m^2 .

Pode-se afirmar que há um início da migração da ZCIT para o HS, coincidindo com o período de verão. É importante salientar que, entre

dezembro e fevereiro, o regime de chuva sobre o norte da AS, mais precisamente sobre a região norte e nordeste do Brasil, é modulada principalmente por outros sistemas meteorológicos, como: Vórtice Ciclônico de Altos Níveis (VCAN), Complexo Convectivo de Mesoescala (CCM), Linhas de Instabilidade (LI) (Reboita et al. 2009 Moura e Vitorino, 2012), embora em alguns anos específicos, o mês de fevereiro já esteja sob a atuação da ZCIT (Melo et al., 2009; dos Santos Franco et al., 2019).

Na Figura 6B, intensificação da precipitação sobre o norte do estado do Pará e sobre o Amapá é evidenciada, com os valores máximos de precipitação e ROL, havendo também uma atividade convectiva sobre a região, na qual se pode afirmar que a ZCIT começa afetar mais diretamente os regimes pluviométricos sobre a região norte, no equinócio de outono do HS. As isolinhas que correspondem aos valores de ROL mostram uma convecção mais profunda nas áreas

que apresentam os maiores acumulados de chuva, notadamente os aglomerados convectivos tornam-se frequentes neste período do ano.

No solstício de inverno (junho-julho-agosto), constata-se a migração da ZCIT para o norte do equador, havendo uma diminuição da atividade convectiva e dos acumulados de chuva sobre o norte AS. Todo o sistema encontra-se sobre o Atlântico equatorial, onde há uma intensificação das atividades convectivas, com valores inferiores a 240 W/m^2 . Importante destacar, que há com uma disponibilidade maior de radiação solar sobre o HN, e o continente sul-americano possui uma considerável extensão territorial acima da linha do equador, nota-se ainda, na Figura 6C, que a ZCIT tem uma atuação, excepcionalmente sobre divisa da Venezuela com a Colômbia, apresentando convecção profunda acentuada sobre a região, havendo também um acumulado pluviométrico superior a 1.300 mm. A Figura 6D mostra que toda atividade convectiva se concentra sobre o Atlântico tropical, visto que, encontra-se no período do equinócio de primavera (setembro-outubro-novembro), onde ambos os hemisférios recebem uma quantidade igual de energia proveniente do sol, logo o gradiente inter-hemisférico é amenizado, com a máxima concentração sobre a região equatorial. Os mecanismos de vento, TSM e evaporação corroboram assim como nas demais estações climáticas, para a centralização da ZCIT e sua atividade sobre esta região. É possível notar, que a ZCIT se apresenta mais intensa longitudinalmente e essa característica tem uma acentuação na região central do Atlântico, de meados de julho até meados de dezembro (Carvalho e Oyama, 2013; Custodio, 2020).

Estudos observacionais mostram que a ZCIT pode atuar de duas formas indiretas no norte do Brasil. Primeiro, através de aglomerados convectivos que se formam ao longo dela e que ao se propagarem para oeste atingem a bacia Amazônica; e segundo, através da interação dos Alísios com a circulação da brisa marítima formando linhas de instabilidade (LI) que adentram no continente e se regeneram durante a propagação para oeste, sendo que muitas alcançam os Andes (Reboita et al. 2009; Carmona et al., 2015; Germano et al, 2015). Durante os meses que compreendem o verão (dezembro – janeiro – fevereiro), em razão da declinação solar e com máxima incidência de radiação sobre o HS, há grande quantidade de calor e umidade disponível na região corroborando para a manutenção e desenvolvimento da ZCIT, as ilustrações que compõem a Figura 6 evidenciam os valores médios de precipitação e do ROL sobre a região. Estudos já ratificaram que a ZCIT é um dos principais sistemas meteorológicos responsáveis pela qualidade da estação chuvosa na região norte e nordeste do Brasil (Moura e Vitorino, 2012; Lyra et al., 2019, Gomes et al, 2019; Monteiro, 2022).

Especificamente sobre o Atlântico equatorial, a ZCIT possui a máxima intensidade em torno de 6° , alcançando sua posição média mais boreal (aproximadamente 14° N) e mais austral (aproximadamente 2° S) durante agosto-setembro e março-abril, respectivamente (N (Waliser e Gautier, 1993; Melo et al., 2009; Souza Neto, 2021)

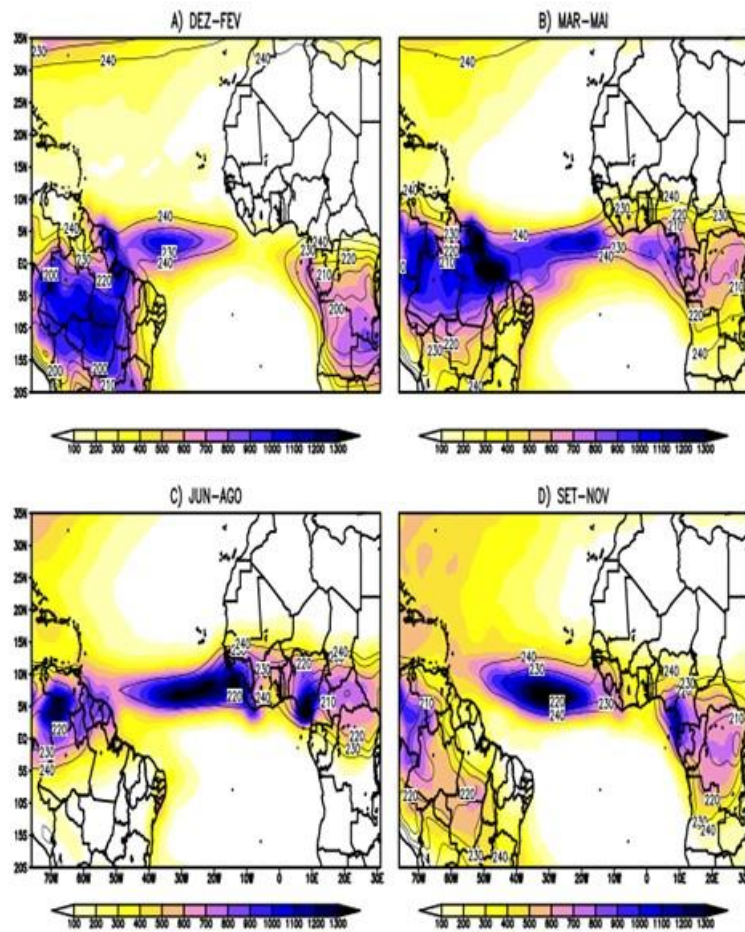


Figura 6. Variabilidade sazonal da precipitação (preenchimento) e ROL (isolinhas) sobre o Atlântico tropical, incluindo os continentes, sul americano e africano, para o período de 1981-2018.

Variabilidade sazonal do campo de vento

Na Figura 7 apresenta-se a climatologia sazonal do vento próximo à superfície (925 hPa), onde a interação dos Alísios de sudeste e de nordeste são claramente destacadas. No verão austral (Figura 7A) os Alísios de nordeste apresentaram grande intensidade sobre a região oceânica, confluindo junto aos Alísios de sudeste sobre a região equatorial, direcionando a posição da ZCIT para as adjacências da costa norte da AS, o núcleo de precipitação apresenta uma área de

ação de baixa intensidade adentrando o norte da AS, sobre o estado do Pará (Figura 6A). Relacionando-se diretamente com a direção e escoamento dos ventos provenientes do Atlântico que transportam umidade até o continente, houve aumento na magnitude da entrada de ventos úmidos em razão da convergência de massa próximo ao equador (Silva, 2020). Deste modo, os resultados apontam para uma atuação direta da ZCIT sobre a região, entre os meses de março e maio, no outono (Figura 7B).

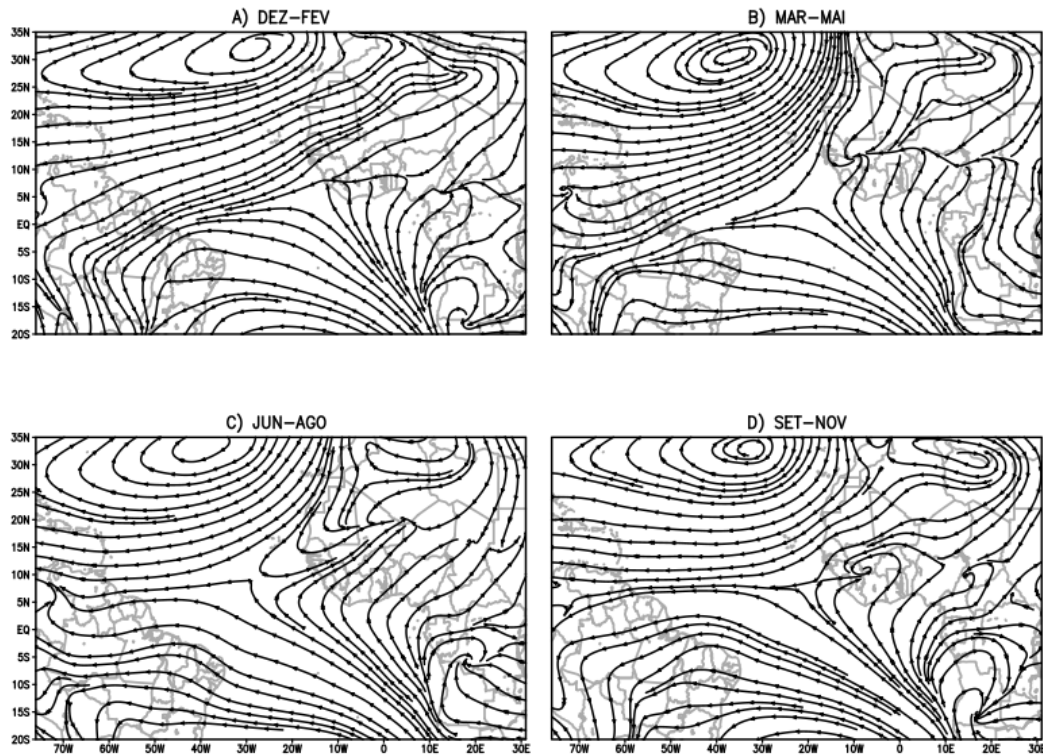


Figura 7. Variabilidade sazonal das linhas de corrente sobre a região do Atlântico equatorial em 925 hPa, com um expressivo transporte de umidade e calor para o norte da AS no verão e no outono, ao longo do período de 1981-2018.

Os padrões médios das linhas de corrente não apresentaram variabilidade notável entre o primeiro e segundo período, verão e inverno, respectivamente. Indubitavelmente, no inverno austral (Figura 7C), os Alísios de sudeste tendem a compelir a ZCIT mais ao norte do equador, onde se apresenta uma convecção intensa no centro do Atlântico tropical – padrão observado na Figura 6C – levando ao afastamento da influência deste sistema sobre o norte e nordeste brasileiro e marcando a transição da ZCIT para o hemisfério norte em razão da disponibilidade de radiação solar (Muanza et al., 2022).

A Figura 7D (primavera austral) mostra os ventos Alísios de sudeste apresentando uma convergência mais voltada mais para o norte do equador. Mantendo assim a ZCIT com um deslocamento próximo de 10° N e sua máxima atividade sobre o Atlântico equatorial.

Em paralelo, no nível de 700 hPa, nota-se mudanças nos padrões de escoamento do vento. Porém, o sentido permanece semelhante à 850 hPa, vindo de leste na região equatorial. Sobre a área oceânica temos um fluxo mais homogêneo. De maneira geral, os ventos em 700 hPa mantêm um curso bem característico ao longo dos quatro períodos.

Durante os períodos analisados é possível notar a presença de circulações fechadas, cujo giro é anticiclônico (alta pressão), sobre as latitudes 15° N e 23° N; seu deslocamento varia entre 15° N e 30° N. Destacou-se o sistema anticiclônico posicionado sobre o norte da África, o qual parece modular de forma direta o fluxo de vento sobre a região equatorial.

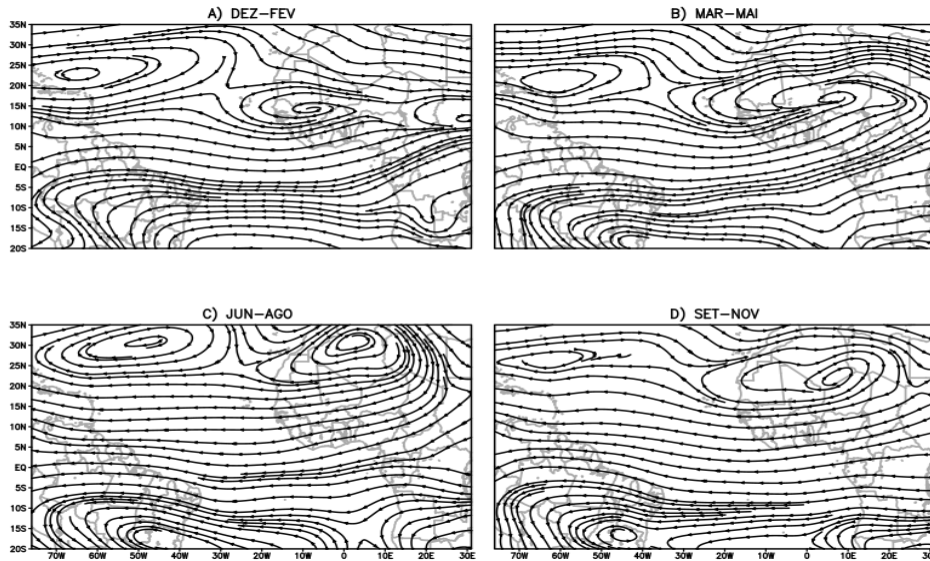


Figura 8. Variabilidade sazonal das linhas de corrente sobre a região do Atlântico equatorial em 700 hPa, com um expressivo transporte de umidade e calor para o norte da AS no verão e no outono, ao longo do período de 1981-2018.

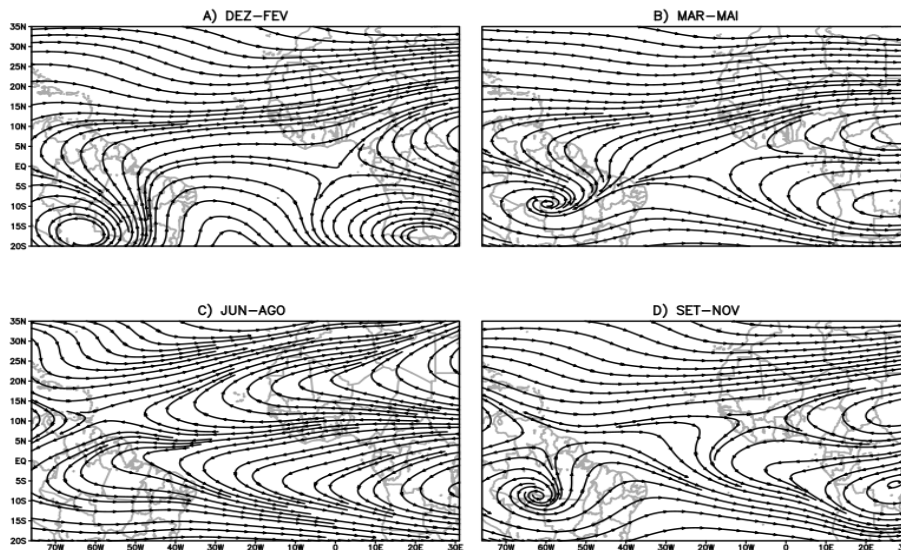


Figura 9. Variabilidade sazonal das linhas de corrente sobre a região do Atlântico equatorial em 200 hPa, com um expressivo transporte de umidade e calor para o norte da AS no verão e no outono, ao longo do período de 1981-2018.

No nível de 200 hPa (Figura 9), os fluxos de vento apresentam uma maior intensidade e mudança no sentido do escoamento. Na Figura 9A, os padrões de fluxo modulados pela presença da Alta da Bolívia (AB), que se posiciona sobre os altiplanos bolivianos gerando um cavado sobre a região norte e nordeste do Brasil durante o verão austral (Reboita et al. 2009; Moura e Freitas, 2018).

Estudos anteriores mostraram que o principal mecanismo para que ZCIT se desenvolva e se mantenha é a interação entre a convergência em baixos níveis e a liberação de calor latente nos níveis médios (Waliser; Sommerville, 1994; Carvalho e Oyama, 2013). A variabilidade dos ventos neste nível possui uma certa particularidade, na qual a região equatorial apresenta uma baixa

intensidade de fluxo, tendo uma dinâmica mais intensa nas regiões de média latitude. No inverno (Figura 9C), os ventos sobre o equador, que nos dois primeiros períodos apresentavam um escoamento no sentido continente-oceano, muda o sentido agora vindo do oceano e adentrando no continente sul-americano, mas com uma intensidade infimamente menor (Lyra e Arraut, 2020). Esse padrão se mantém entre setembro e novembro, havendo uma variação na intensidade desse fluxo sobre o norte da América do Sul. De modo geral, o sistema de alta pressão que, inicialmente mostrou-se mais ativo sobre a Bolívia, permaneceu presente durante três dos quatro períodos de análise em 200 hPa. Seu deslocamento apresentou uma tendência para o sul da Amazônia acompanhando o movimento aparente do Sol ao longo do ano.

Conclusões

Durante as distintas fases apresentadas pelo MMA e IOS houve uma variabilidade diferente nas anomalias de precipitação relacionada à ZCIT, com as seguintes características: i) O MMA e IOS se mostram bons moduladores da variabilidade do clima sobre a cidade de Belém-PA, apresentando concordâncias entre o sinal das fases de atuação e o valor das variáveis escolhidas para este estudo; ii) A variação do MMA apresentou fases preponderantemente negativas, com consequência na liberação de calor latente que, consequentemente, levando a expressivos acumulados de precipitação; iii) O Atlântico se mostrou mais atuante na modulação do clima nessa parte da Amazônia, embora o Pacífico tenha uma importância fundamental na determinação desta variabilidade, principalmente quando há uma combinação de fases de ambos os mecanismos. iv) O IOS mostrou-se em fase semelhante ao MMA, mas suas magnitudes foram explicitamente diferentes. v) As atividades convectivas mais intensas se concentraram durante o período entre os meses de março e maio, com o máximo deslocamento da ZCIT sobre o norte da AS. Como consequência da intensificação dos alísios de nordeste, devido ao fortalecimento da ASAN levando à convergência de umidade transportada do Atlântico sobre a região de estudo. Os três níveis do campo das linhas de corrente mostram um favorecimento para a intensificação da ZCIT e tanto de forma direta, como através de interação entre outros sistemas sinóticos que podem consolidá-la.

Referências

- Aimola, L.; Moura, M. 2016. A Influência da Circulação de Revolvimento Meridional do Atlântico na Definição Média da ZCIT ao norte do Equador. *Revista Brasileira de Meteorologia* [Online] 31. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/01027786312314b20150059>. Acesso: 23 jun. 2020.
- Amanajás, J. C.; Braga, C. C. 2012. Padrões Espaço-Temporal Pluviométricos Na Amazônia Oriental Utilizando Análise Multivariada. *Revista Brasileira de Meteorologia*, [Online] 27. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S010277862012000400006>. Acesso: 23 jun.. 2020.
- Carmona, F., Rivas, R., & Caselles, V. 2014. Estimation of daytime downward longwave radiation under clear and cloudy skies conditions over a sub-humid region. *Theoretical and applied climatology* [Online] 115. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00704-013-0891-3>. Acesso: 27 jun 2023.
- Carvalho, M.; Oyama, M, 2013. Variabilidade da largura e intensidade da Zona de Convergência Intertropical Atlântica: Aspecto observacionais. *Revista Brasileira de Meteorologia* [Online] 28. Disponível: <https://doi.org/10.1590/S0102-77862013000300007>. Acesso: 15 abr. 2020.
- Carpenedo, C. B.; Ambrizzi, T, 2020. Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul Associado ao Modo Anular Sul e Impactos Climáticos no Brasil. *Revista Brasileira de Meteorologia* [Online] 35. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/0102-77863540066>. Acesso: 05 abr. 2022.
- Campos, E.; Muehe. D, 2013. Observações Costeiras e Oceânicas, in: Ambrizzi, T.; Araujo, M (Org.), *Contribuição do Grupo de Trabalho 1 ao Primeiro Relatório de Avaliação Nacional do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas*, Rio de Janeiro, pp. 64-125.
- Correa, C. S., Guedes, R. L., Rocha, A. M. M. D., & Corrêa, K. A. B., 2020. Multidecadal Cycles of the Climatic Index Atlantic Meridional Mode: Sunspots that Affect North and Northeast of Brazil. *Journal of Aerospace Technology and Management* 12.
- Souza Custodio, M., Gozzo, L. F., & Machado, J. P. (2020). Análise dos Eventos Extremos de Precipitação sobre a Amazônia em Modelos Climáticos de Alta Resolução-Parte I: Variabilidade Interanual. *Anuário do Instituto de Geociências* [Online] 43(4). Disponível: http://dx.doi.org/10.11137/2020_4_350_363. Acesso: 11 mai. 2023

- Rocha, L. B., Calheiros, A. J. P., & Calheiros, S. R. G., 2019. Uma revisão das propriedades da convecção na região tropical da América do Sul: variabilidade e análise de tendência. São José dos Campos, INPE.
- Souza Neto, P. F.; da Silva, D. F.; de Carvalho Almeida, H. R. R., 2021. Análise da variabilidade climática dos oceanos Atlântico e Pacífico. *Revista Brasileira de Geografia Física* [Online] 12(1). Disponível: <http://dx.doi.org/10.26848/rbgf.v12.1.p057-070>. Acesso: 23 mai. 2023.
- Escobar, G. C. J.; Matoso, V., 2019. Zona de Convergência Intertropical (ZCIT): critério de detecção para uso em centros operacionais de previsão de tempo. São José dos Campos, INPE.
- Germano, M. F., & Oyama, M. D. 2020. Local circulation features in the eastern Amazon: high-resolution simulation. *Journal of Aerospace Technology and Management* [Online] 12. Disponível: <https://doi.org/10.5028/jatm.v12.1100>. Acesso: 05 abr. 2023.
- Gomes, H. B., Ambrizzi, T., Pontes da Silva, B. F., Hodges, K., Silva Dias, P. L., Herdies, D. L., Gomes, H. B. 2019. Climatology of easterly wave disturbances over the tropical South Atlantic. *Climate Dynamics* [Online] 53. Disponível: <https://doi.org/10.1007/s00382-019-04667-7>. Acesso: 20 abr. 2022.
- Gomes, R. C.; Zanella, M. E.; de Oliveira, V. P. V., 2022. Identificação das áreas de riscos relacionadas aos eventos pluviométricos extremos na zona urbana de independência. *REDE-Revista Eletrônica do PRODEMA* [Online] 15. Disponível: <http://www.revistarede.ufc.br/rede/article/view/728>. Acesso: 28 ago. 2022.
- Limberger, L., & Silva, M. E. S. 2021. Teleconexões atmosféricas e vazão fluvial na Bacia Amazônica Brasileira por meio de mapas de correlação linear. *ENTRE-LUGAR* [Online] 12. <https://doi.org/10.30612/rel.v12i24.15158>. Acesso: 12 nov. 2022.
- Liebmann, B. et al., 1998. A Comparison of Rainfall, Outgoing Longwave, and Divergence over the Amazon Basin. *Journal of Climate* [Online] 11. Disponível: [https://doi.org/10.1175/15200442\(1998\)011%3C2898:ACOROL%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/15200442(1998)011%3C2898:ACOROL%3E2.0.CO;2). Acesso: 15 jun. 2021.
- Liebmann B., Smith, C. A., 1996. Description of a Complete (Interpolated) Outgoing Longwave Radiation Dataset. *Bulletin of American Meteorological Society* [Online] 77. Disponível: <https://www.jstor.org/stable/26233278>.
- Lyra, M. J. A. et al., 2019. Ligação entre extremidade frontal e Zona de Convergência Intertropical sobre a região nordeste do Brasil. *Anuário do Instituto de Geociências* 42. Disponível: http://dx.doi.org/10.11137/2019_1_413_424. Acesso: 23 nov. 2022.
- Lyra, M. J. A., Arraut, J. M., 2020. Análise termodinâmica de um vórtice ciclônico de altos níveis sobre o nordeste do Brasil. *Anuário do Instituto de Geociências* 43. Disponível: http://dx.doi.org/10.11137/2020_4_302_309. Acesso: 10 mai. 2022.
- Monteiro, J. B., 2022. A influência de teleconexões e sistemas meteorológicos produtores de precipitação no semiárido nordestino. *Revista Brasileira de Geografia Física*
- Moura J. G. L.; Freitas, A. C. V. 2018. Alterações na Circulação de Hadley Regional e na Alta Subtropical do Atlântico Sul em um Cenário de Aquecimento Global. *Anuário do Instituto de Geociências* [Online] 43. Disponível: http://doi.org/10.11137/2020_3_227_239. Acesso: 27 mai. 2023
- Moura, M.; Vitorino, M., 2012. Variabilidade da precipitação em tempo e espaço associada à zona de convergência intertropical. *Revista Brasileira de Meteorologia* [Online] 27. Disponível: <https://doi.org/10.1590/S0102-77862012000400010>. Acesso: 24 jun. 2021
- Moura, A.; Shukla, J., 1981. On the dynamics of droughts in the northeast Brazil: observations, theory and numerical Experiments with a General Circulation Model. *Journal of the Atmospheric Sciences* 38. Disponível: [https://doi.org/10.1175/15200469\(1981\)038<2653:OTDODI>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/15200469(1981)038<2653:OTDODI>2.0.CO;2). Acesso 24 jun. 2021
- Muanza, G. A.; Fedorova, N.; Levit, V., 2022. Ligação da extremidade frontal com zona de convergência intertropical (zcit) e análise de fenômenos associados. *Revista de Geociências do Nordeste* [Online] 8. Disponível: <https://periodicos.ufrn.br/revistadoregne/article/view/24618>. Acesso em: 28 mai. 2023

- Nobre, A. et al. 2009. Característica do Clima Amazônico: Aspectos Principais. *Amazonia and Global Change Geophysical* 186, pp. 146-162
- Reboita, M. S., Gan, M. A., Rocha, R. P. D., & Ambrizzi, T., 2010. Regime de Precipitação na América do Sul: Uma revisão bibliográfica. *Revista Brasileira de Meteorologia* [Online] 25. Disponível: <https://doi.org/10.1590/S010277862010000200004>. Acesso: 28 abr. 2021.
- Rabelo, D. R.; de Araújo, J. C., 2019. Estimativa e mapeamento da erosão bruta na bacia hidrográfica do rio seridó, Brasil. *Revista Brasileira de Geomorfologia* [Online] 20. Disponível: <https://doi.org/10.20502/rbg.v20i2.1414>. Acesso: 31 set. 2022.
- Reboita, M. S., Ambrizzi, T., Crespo, N. M., Dutra, L. M. M., Ferreira, G. W. D. S., Rehbein, A., ... & Souza, C. A. D. 2021. Impacts of teleconnection patterns on South America climate. *Annals of the New York Academy of Sciences* [Online] 1504. Disponível: <https://doi.org/10.1111/nyas.14592>. Acesso: 28 jul. 2022.
- Saravanan, R.; Chang, P., 2000. Interaction between tropical Atlantic variability and El Niño-Southern Oscillation. *Journal of Climate* [Online] 13. Disponível: [https://doi.org/10.1175/15200442\(2000\)013<2177:IBTAVA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/15200442(2000)013<2177:IBTAVA>2.0.CO;2). Acesso: 12 jun. 2022.
- Silva, B. F. P.; da Rocha, R. P.; GOMES, H. B., 2020. Easterly Wave Disturbances Activity over the Eastern Northeast Brazil during 2006–2010 Rainy Seasons. *Rev. Cient. Foz* 3, pp. 3-30.
- Sodré, G. R. C. et al. 2015. Estudo observacional da convecção de mesoescala em diferentes superfícies no estado do Pará. *Revista Brasileira de Geografia Física* [Online] 8.
- Souza Neto, P. F.; Silva, D. F.; Carvalho Almeida, H. R. R. 2021. Análise da variabilidade climática dos oceanos Atlântico e Pacífico. *Revista Brasileira de Geografia Física* [Online] 14. Disponível:
- Souza, C. A. de; Reboita, M. S. 2021. Ferramenta para o Monitoramento dos Padrões de Teleconexão na América do Sul. *Terrae Didactica* [Online] 17. Disponível: <https://doi.org/10.20396/td.v17i00.8663474>. Acesso: 12 set. 2022.
- Teodoro, T. A.; Reboita, M. S.; Escobar, G. C. J., 2019. Caracterização da banda dupla da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) no oceano Atlântico. *Anuário do Instituto de Geociências* [Online] 42. Disponível: http://dx.doi.org/10.11137/2019_2_282_298. Acesso: 05 set. 2021.
- Varquez, A. C., & Kanda, M. 2018. Global urban climatology: a meta-analysis of air temperature trends (1960–2009). *npj Climate and Atmospheric Science* [Online] 1. Disponível: <https://doi.org/10.1038/s41612-018-0042-8>. Acesso: 28 mai. 2023.
- Vásquez, I. L. et al. 2022. Multidecadal variability of the ITCZ from the Last Millennium Extreme Precipitation Changes in Northeastern Brazil. *EGUsphere*. Disponível: <https://doi.org/10.5194/egusphere-2022-785>. Acesso: 10 jan. 2023.
- Vimont, D.; Kossin, J., 2007. The Atlantic Meridional and Hurricane activity. *Geophysical Research Letters* 34. Disponível: <https://doi.org/10.1029/2007GL029683>. Acesso: 11 abr. 2021.
- Waliser, E.; Gautier, C., 1993. Satellite-derived Climatology of the ITCZ. *Journal of Climate* 6. Disponível: [https://doi.org/10.1175/15200442\(1993\)006<2162:ASDCOT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/15200442(1993)006<2162:ASDCOT>2.0.CO;2). Acesso: 01 jul. 2021
- Waliser, D.; Sommerville, R. 1994. Preferred Latitudes for the Intertropical Convergence Zone. *Journal of the Atmospheric Sciences* 51. Disponível: [https://doi.org/10.1175/15200469\(1994\)051<1619:PLOTIC>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/15200469(1994)051<1619:PLOTIC>2.0.CO;2). Acesso: 15 ago. 1994.
- Wilks, D. S., 2006. Statistical methods in the atmospheric sciences. Academic press.