



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
INSTITUTO DE CIÊNCIAS DO MAR
CURSO DE OCEANOGRAFIA

FRANCISCO LUCAS DOS SANTOS MACIEL

RELAÇÃO DA ANOMALIA SEMANAL DE TEMPERATURA
DA SUPERFÍCIE DO MAR COM A CHUVA NO CEARÁ

FORTALEZA

2023

FRANCISCO LUCAS DOS SANTOS MACIEL

RELAÇÃO DA TEMPERATURA DA SUPERFÍCIE DO MAR SEMANAL DO
ATLÂNTICO TROPICAL COM A CHUVA NO CEARÁ

Monografia apresentada ao Curso de Oceanografia do Instituto de Ciências do Mar (LABOMAR), como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Oceanografia.

Orientador: Prof. Dr. Gbekpo Aubains Hounsou Gbo.

FORTALEZA

2023

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

D762r dos Santos Maciel, Francisco Lucas.

Relação da anomalia semanal de temperatura da superfície do mar com a chuva no Ceará / Francisco Lucas dos Santos Maciel. – 2023.
48 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Instituto de Ciências do Mar, Curso de Oceanografia, Fortaleza, 2023.

Orientação: Prof. Dr. Gbekpo Aubains Hounsou Gbo.

1. Precipitação. 2. Gradiente inter-hemisférico do Atlântico. 3. Sub sazonal. I. Título.

CDD 551.46

FRANCISCO LUCAS DOS SANTOS MACIEL

**RELAÇÃO DA TEMPERATURA DA SUPERFÍCIE DO MAR SEMANAL DO
ATLÂNTICO TROPICAL COM A CHUVA NO CEARÁ**

Monografia apresentada ao Curso de Oceanografia do Instituto de Ciências do Mar (LABOMAR), como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Oceanografia.

Aprovada em: ___/___/_____.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Gbekpo Aubains Hounsou Gbo (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Antônio Geraldo Ferreira
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Dr. Francisco das Chagas Vasconcelos Junior
Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCEME)

À minha irmã.

À minha família.

AGRADECIMENTOS

À minha irmã, Jayce, por todo amor e conhecimento compartilhado com o seu irmão que, por muito tempo, foi o seu caçula.

Imensamente à minha avó, Eliza, e minha tia, Márcia, pelo carinho e pelo excelente cuidado.

Ao meu pai, Márcio, e aos irmãos, Davi e Sara, pelo exemplo de simplicidade.

Aos meus irmãos de outras casas, Letícia, Nairla, Nayrlon e Mateus, pelo nas minhas escolhas ao longo desse caminho.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Gbekpo Aubains Hounsou Gbo, pelo acolhimento, confiança, parceria e paciência. Expresso, também, minha gratidão por compartilhar com maestria os saberes sobre linguagem de programação, uma ferramenta que, sem dúvida alguma, levarei para além do âmbito científico em minha jornada.

Agradeço aos ilustres Prof. Dr. Antônio Geraldo Ferreira e Dr. Francisco das Chagas Vasconcelos Junior, da banca examinadora, pela atenção dedicada à avaliação deste trabalho.

À tutora do PET Oceanografia, Profa. Dra. Danielle Sequeira Garcez, por mostrar que é possível construir laços tão fortes em uma equipe como os feitos no PET Oceano.

Aos professores e servidores do Laboratório de Oceanografia Física, bem como aos demais laboratórios e projetos do Instituto de Ciências do Mar, da Universidade Federal do Ceará, por me ensinarem a fazer pesquisa.

Aos meus parceiros do PET Oceanografia, Ana Livia, Clara, Emerson, Gustavo, Hellen, Lara, Loran, Ícaro, João, Lucas, Rebeca e Rose, pelo companheirismo ao longo da vivência universitária.

Aos meus exemplos de oceanógrafos, Ocione e Tiffany, assim como à Hanna e Julie por tornarem o início dessa jornada verdadeiramente memorável.

Aos meus queridos do Instituto Federal de Fortaleza, Charliane, Iasmin, Maria Júlia, Sarah e Rodrigo, por mostrarem que a amizade não conhece limites.

Ao Mateus, por entender quase tudo de mim, por estar sempre ao meu lado, por ilustrar que o mundo é feito de diversas cores e por dizer muitas das palavras mais significativas que já ouvi.

Também, expresso a minha sincera gratidão aos amigos que conquistei nos corredores do Labomar, na sala do PET, nas colaborações em equipe, nas viagens de campo e

também àqueles que, mesmo de fora da faculdade, foram fontes de inspiração ao longo dos últimos anos.

E, por fim, aos fornecedores dos dados que fundamentaram este estudo, a Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCEME) e a National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), pelo compromisso com a comunidade científica.

회색 빛 하늘 위엔 분명히 더 밝은 빛이
먹구름 걷힌 뒤엔 눈부시게 빛날 테니.

“No céu cinzento, certamente há uma luz mais
brilhante. Depois que as nuvens escuras
passarem, brilhará de forma deslumbrante”.

Trecho da música *Been Through* do álbum
Universe – Winter Special Album, 2017.

Artista: EXO.

RESUMO

O ciclo anual de precipitação do Ceará revela duas fases distintas: cinco meses com alta precipitação, seguidos por meses de baixo volume. A Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), observada próxima aos 2° de latitude Sul nos meses de março e abril, é o principal responsável pelas chuvas na região. Entre os fatores que influenciam no posicionamento da ZCIT, o gradiente inter-hemisférico de temperatura da superfície do mar (TSM) do Atlântico Tropical (AT) se destaca como um dos mais significativos. Diante da correlação entre o volume de chuvas no Ceará e a TSM do AT, esse estudo explora a interligação entre as anomalias de TSM e precipitação em uma escala semanal. Para esta pesquisa, foram feitas análises de correlação e compostos utilizando dados de precipitação do Ceará disponibilizados pela Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCEME) e de TSM da *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA). As climatologias semanais elaboradas revelaram que os índices mais elevados de precipitação no Ceará, em média, são registrados na semana 13 (março) do ano. Além disso, a TSM no Atlântico Tropical Sul atinge seus valores máximos em torno da semana 14 (outono austral) e mínimos na semana 34 (primavera austral), enquanto a TSM do Atlântico Norte atinge seu pico em torno da semana 42 (outono boreal) e seus valores mínimos na semana 8 (primavera boreal), informações que corroboram com trabalhos anteriores. O gradiente inter-hemisférico se mostrou significativamente correlacionado com a precipitação semanal, principalmente entre as semanas 11 e 18. Durante os anos de chuvas expressivas entre as semanas 11 e 18, os valores de TSM do AT apresentaram um gradiente negativo marcante. Nos anos de pouca chuva, um gradiente positivo. Esses resultados corroboram com a influência das condições do AT nas variações da precipitação no estado do Ceará.

Palavras-chave: Precipitação; Gradiente inter-hemisférico do Atlântico; Sub sazonal.

ABSTRACT

The annual precipitation cycle in Ceará reveals two distinct phases: five months with high precipitation, followed by months with low volume. The Intertropical Convergence Zone (ITCZ), observed near the 2° South latitude in March and April, is the main driver of rainfall in the region. Among the factors influencing the positioning of the ITCZ, the interhemispheric gradient of sea surface temperature (SST) in the Tropical Atlantic (TA) stands out as one of the most significant. Considering the correlation between rainfall volume in Ceará and SST in the TA, this study explores the linkage between SST anomalies and precipitation on a weekly scale. For this research, correlation analyses and composites were conducted using precipitation data from Ceará provided by the Ceará Foundation for Meteorology and Water Resources (FUNCEME) and SST data from the National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). The weekly climatologies revealed that the highest precipitation indices in Ceará, on average, occur in week 13 (March) of the year. Additionally, SST in the Southern Tropical Atlantic reaches its maximum values around week 14 (southern autumn) and minimum values in week 34 (southern spring), while SST in the Northern Tropical Atlantic peaks around week 42 (northern autumn) and hits its minimum values in week 8 (northern spring), findings consistent with prior studies. The interhemispheric gradient demonstrated a significant correlation with weekly precipitation, particularly between weeks 11 and 18. During years of substantial rainfall between weeks 11 and 18, the TA SST values showed a notable negative gradient. In years of low rainfall, a positive gradient was observed. These results support the influence of TA conditions on precipitation variations in the state of Ceará.

Keywords: Rainfall; Atlantic inter-hemispheric mode; Sub-seasonal.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Série Diária de Precipitação do Ceará no período 2020 – 2022.	11
Figura 2 – Climatologia Mensal de Precipitação do Ceará. Referência (1982 – 2020).	12
Figura 3 – Célula de Hadley.	15
Figura 4 – Média Global de TSM. Referência (1982 – 2020).....	16
Figura 5 – Célula de Circulação de Walker. Condição Neutra.	18
Figura 6 – Célula de Circulação de Walker. Condição El Niño.....	18
Figura 7 – Estrutura da OMJ.	20
Figura 8 – Fases da OMJ.	21
Figura 9 – Mapa de Localização da Área de Estudo.	23
Figura 10 – Mapa Representativo da Área de Estudo.	24
Figura 11 – Média Semanal de Precipitação do Ceará.....	28
Figura 12 – Anomalia de Precipitação da Semana 13 ao longo dos anos.	29
Figura 13 – Climatologia Semanal de TSM do AT.....	30
Figura 14 – Anomalia de TSM do ATN.....	30
Figura 15 – Anomalia de TSM do ATS.	31
Figura 16 – Dipolo (Gradiente Inter-hemisférico) do AT.	31
Figura 17 – Climatologia Semanal de ROL.	32
Figura 18 – Correlação entre o Dipolo do Atlântico e a Anomalia de Precipitação do Ceará.	34
Figura 19 – Evolução Temporal da Correlação entre o Dipolo do AT da Semana 11 e a Precipitação do Ceará da Semana 11.....	35
Figura 20 – Evolução Temporal da Correlação entre o Dipolo do AT da Semana 11 e a Precipitação do Ceará da Semana 18.....	35
Figura 21 – Série Temporal Destacando os Anos com Anomalia de Precipitação, Acima e Abaixo do Limiar Estabelecido, na semana 11.	36
Figura 22 – Série Temporal Destacando os Anos com Anomalia de Precipitação, Acima e Abaixo do Limiar estabelecido, na semana 18.	37
Figura 23 – Comparação dos mapas compostos de anomalia de TSM na semana 11 e de Precipitação na semana 11.....	38
Figura 24 – Comparação dos mapas compostos de anomalia de TSM na semana 11 e de Precipitação na semana 18.....	39
Figura 25 — Comparação espacial entre a anomalia de precipitação do Ceará e a anomalia de TSM do AT de algumas semanas.	45
Figura 26 — Comparação espacial da correlação espacial do Dipolo do Atlântico com três semanas de precipitação.	46

LISTA DE ABREVIACÕES

FMA: fevereiro, março e abril.

ATN: Atlântico tropical Norte.

ATS: Atlântico tropical Sul.

FMA: fevereiro, março e abril.

ENOS: *El Niño* – Oscilação Sul.

FUNCEME: Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos.

m²: metros quadrados.

W/m²: Watts por metro quadrado.

N: Norte;

NOAA: *National Oceanic and Atmospheric Administration*.

OI: *Optimum interpolation*.

S: Sul

SST: *Sea surface temperature*.

TSM: Temperatura da superfície do mar.

W: Oeste

ZCIT: Zona de Convergência Intertropical.

SUMÁRIO

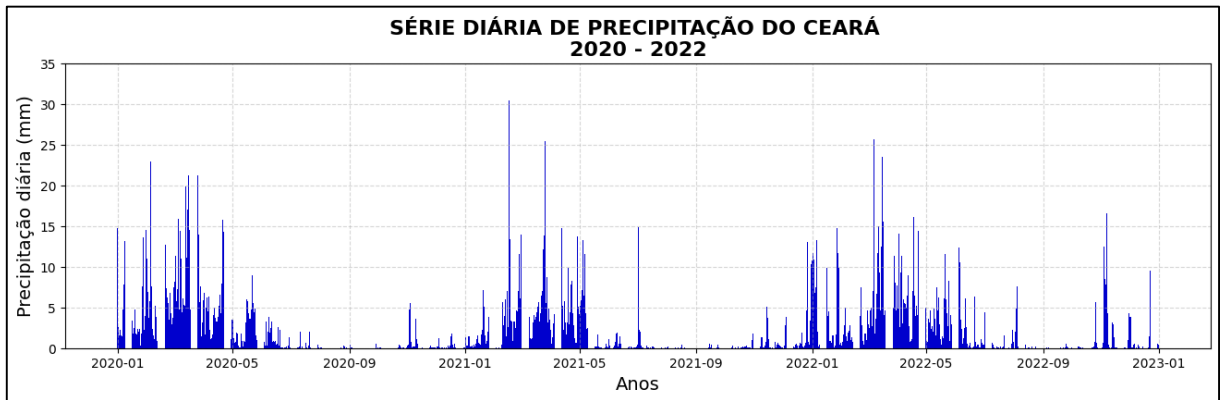
1 INTRODUÇÃO	11
1.1 O Clima, a Atmosfera e o Oceano nos Trópicos.	14
1.2 Dipolo do Atlântico	16
1.3 El Niño-Oscilação Sul	17
1.4 Oscilação de Madden e Julien	19
2 OBJETIVOS	22
2.1 Geral	22
2.2 Específicos	22
3 METODOLOGIA	23
3.1 Área de Estudo	23
3.2 Dados Utilizados	24
3.3 Métodos	25
<i>3.3.1 Dipolo do Atlântico</i>	25
<i>3.3.2 Correlação Semanal entre TSM e Precipitação.</i>	26
<i>3.3.3 Mapas de compostos</i>	27
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	28
4.1 Variabilidade de Precipitação do Ceará	28
<i>4.1.1 Climatologia de Precipitação</i>	28
<i>4.1.2 Anomalia de Precipitação</i>	28
4.2 Variabilidade de TSM do Atlântico Tropical	29
<i>4.2.1 Climatologia</i>	29
<i>4.2.2 Anomalias</i>	30
<i>4.2.3 Dipolo</i>	31
4.2 Radiação de Onda Longa	31
4.3 Influência da TSM na precipitação semanal	32
5 CONCLUSÕES	40
REFERÊNCIAS	42
APÊNDICE A – MAPAS COMPARATIVOS	45

1 INTRODUÇÃO

Encontrado no Nordeste do Brasil (NEB), o estado do Ceará constitui uma das vinte e sete (27) unidades federativas do país, estende-se por 148.894,447 quilômetros quadrados e estabelece limites territoriais com os estados da Paraíba, Pernambuco, Piauí e Rio Grande do Norte (GOVERNO DO ESTADO DO CEARÁ, 2010; IBGE, 2022). O clima predominante, tal como em grande parte da Região Nordeste, é o semiárido (MINISTÉRIO DA INTEGRAÇÃO NACIONAL, 2017). A precipitação anual apresenta duas fases distintas: a primeira, de janeiro a maio, caracterizada por um período úmido com elevados índices pluviométricos e a seguinte, de junho a dezembro, com pouca ou nenhuma precipitação.

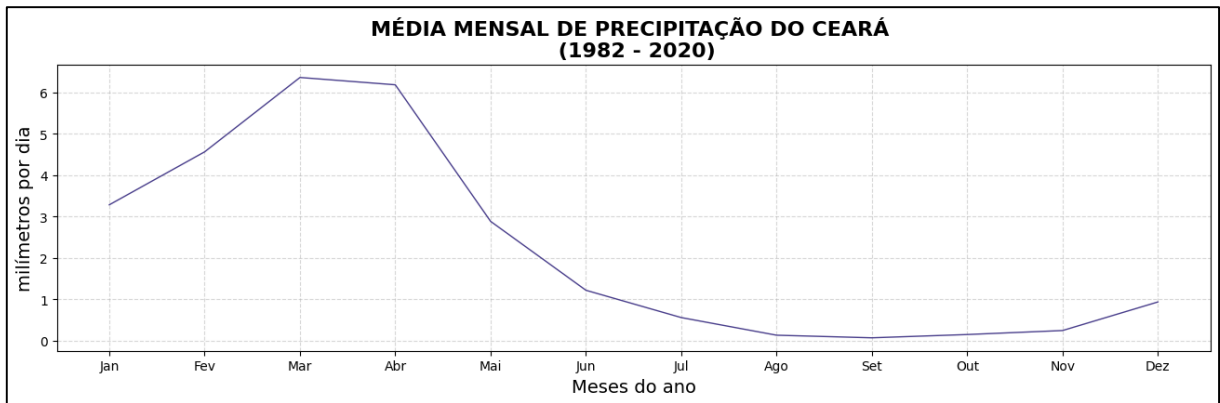
Um exemplo da quantidade anual de chuva no estado pode ser visto na figura 1: uma série temporal da precipitação dos três últimos anos no Ceará. A quantidade mensal de chuvas no Ceará corresponde aproximadamente aos valores indicados na figura 2, uma climatologia de precipitação onde se observa que fevereiro, março e abril (FMA) são os meses mais chuvosos do ano. Os gráficos foram elaborados utilizando dados de precipitação provenientes da Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCEME).

Figura 1 – Série Diária de Precipitação do Ceará no período 2020 – 2022.



Fonte: Elaborado pelo autor. Dados diários de precipitação, obtidos da FUNCEME, ao longo de três anos.

Figura 2 – Climatologia Mensal de Precipitação do Ceará (mm/dia). Referência (1982 – 2020).



Fonte: Elaborado pelo autor. Climatologia mensal de precipitação do Ceará, construída a partir de dados obtidos da FUNCEME, para o período 1982 – 2020.

Os fatores que modulam as chuvas no estado são sistemas meteorológicos complexos que têm origem tanto no próprio continente quanto nos oceanos adjacentes. A Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), um cinturão de nuvens formadas pelas massas de ar quente e úmido que são transportadas para os trópicos pelos ventos alísios e migra latitudinalmente de forma sazonal, é o principal fator que influencia as chuvas no Ceará. Nos meses de agosto e setembro, a ZCIT se encontra próximo dos 14° N de latitude (sua posição mais ao norte), e nos meses de março e abril, se posiciona por volta dos 2° S de latitude (sua posição mais ao sul) (SCHNEIDER et al., 2014), meses onde se concentram os maiores valores médios de chuva no Norte do NEB.

A ZCIT é um sistema de extrema importância para o perfil de precipitação da região tropical dos oceanos e continentes. Sua migração sazonal, e até mesmo interanual, de norte a sul, possui um papel significativo na determinação da estação chuvosa do norte da região Nordeste, onde se encontra a capital cearense e uma considerável porção do estado. Dentre os principais agentes do deslocamento da ZCIT, destacam-se a variação da diferença de anomalia da Temperatura da Superfície do Mar (TSM) do Atlântico Tropical Norte (ATN) e Sul (ATS), conhecida como Dipolo do Atlântico, os ventos alísios e até mesmo o El Niño – Oscilação Sul (ENOS) (BOMVENTI, 2006; CAVALCANTI et al., 2009 HOUNSOU-GBO et al., 2015; PINHEIRO, 2017). Hounsou-Gbo et al. (2015) afirma que os extremos de precipitação na capital cearense estão correlacionados com a disparidade de anomalia de TSM entre o ATN e ATS. O padrão de precipitação do sul do estado, por sua vez, teve sua conexão com a TSM

elucidada por Ferreira et al. (2018), em sua pesquisa que demonstra que toda a mesorregião sul do Ceará teve seu período úmido associado às anomalias de TSM do Atlântico e do Pacífico.

Quando não causada pela posição da ZCIT, a chuva no Ceará também pode surgir devido à formação de um Vórtice Ciclônico de Alto Nível (VCAN), um anel de alta pressão, resultante da subsidência de massas de ar que desloca nuvens causadoras de chuva em direção às extremidades, ou devido às Linhas de Instabilidade, uma fileira de nuvens precipitantes formadas em decorrência da radiação solar que chega aos trópicos. No período seco, o principal catalisador evidente das chuvas está relacionado às ondas de alta pressão atmosféricas que viajam pelos trópicos impulsionadas pelos ventos alísios. (CAVALCANTI et al., 2009; FUNCEME, 2014). Outros sistemas meteorológicos, como Complexos Convectivos de Mesoescala, Frentes Frias e Ondas de Leste podem ser relacionados ao clima do NEB (FERREIRA e MELO, 2005; FUNCEME, 2014).

A precipitação no Nordeste é uma consideração de extrema importância. Os índices de chuva impactam na segurança alimentar, saúde, abastecimento de água, infraestrutura, educação e economia de cada local de forma distinta. Portanto, a análise da climatologia do NEB e seus principais mecanismos impulsionadores tem sido o objeto de estudo de muitas pesquisas ao longo dos últimos anos. As pesquisas de Bomventi et al. (2006), Hounsou-Gbo et al. (2015), Pinheiro et al. (2018), bem como a literatura acerca da interação oceano-atmosfera para o Norte do NEB destacam que a investigação sobre a relação entre a precipitação e a TSM tem sido amplamente explorada.

Diante da prevalência da ZCIT nas causas das chuvas tropicais, considerando que a posição da mesma é influenciada também pela TSM, o presente estudo tira proveito da conexão entre a TSM e as chuvas tropicais para propor uma relação entre as anomalias semanais de TSM do AT e a precipitação no estado do Ceará, ou seja, uma avaliação sub sazonal, visando enriquecer a perspectiva atual dessa área de pesquisa.

Acredita-se que as descobertas desta pesquisa podem ter um impacto positivo real na compreensão da climatologia da região e, conseqüentemente, beneficiar os campos da previsão do tempo, do planejamento urbano e infraestrutura, da agricultura, dos recursos hídricos, da saúde pública e, ainda, na mitigação e adaptação às mudanças climáticas, em

concordância com o Objetivo de Desenvolvimento Sustentável 13: Ação contra a mudança global do clima (ODS13)¹.

1.1 O Clima, a Atmosfera e o Oceano nos Trópicos.

O clima é a média descrita estatisticamente de uma variável meteorológica específica sobre um período de tempo compreendido em um intervalo relativamente longo (FUNCEME, 2013). Para Cavalcanti et al. (2009), o clima da Terra é essencialmente determinado pelo ar e pela água. Ambos são fluidos que envolvem o planeta de maneiras distintas, uma vez que o ar compõe a atmosfera e a água recobre a maior porção do globo com os oceanos. Então, ao entender a atmosfera e os oceanos, viabiliza-se a descrição do clima do planeta.

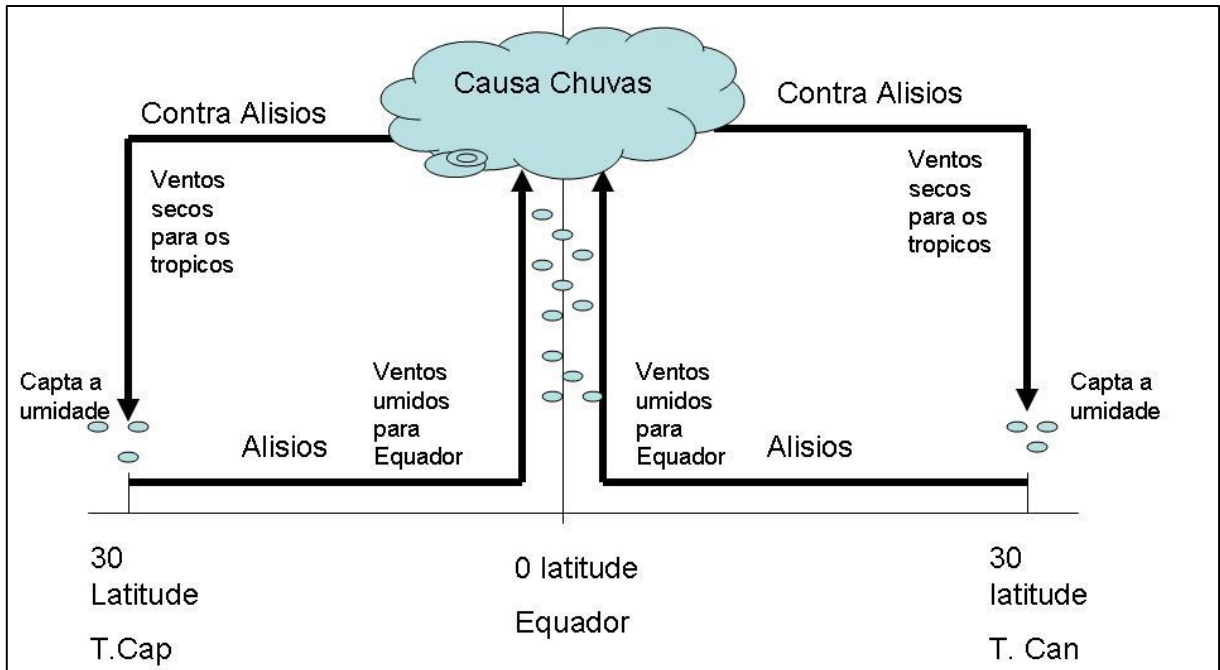
Para iniciar o raciocínio, é fundamental compreender o personagem central na propulsão do clima global, a radiação solar. O movimento de translação expõe a Terra a diferentes quantidades de radiação solar, que dependem da distância entre o planeta e o sol e a inclinação da incidência dos raios solares resulta nas estações do ano (CAVALCANTI et al., 2009). Incorporando outros fatores como a distância de um ponto até o equador, a influência dos oceanos adjacentes e a altitude, podemos estimar um clima para qualquer região do planeta.

Marshall e Plumb (2008) sustentam que o movimento do ar define a circulação atmosférica. A diferença de calor entre as regiões do planeta induz um gradiente de pressão horizontal onde as massas de ar viajam de alta pressão para baixa pressão. O calor excessivo nos trópicos caracteriza uma zona de baixa pressão. Então, naturalmente, o ar expande-se, torna-se menos denso, sendo transportado em altas altitudes em direção aos polos e, por volta dos 30° de latitude e se esfria, liberando o seu calor para o espaço. O ar, então mais denso, afunda e retorna ao equador deslocando-se sempre próximo à superfície. A rota percorrida pelo ar é denominada “Célula de Circulação Atmosférica”. Diversos modelos de células são descritos, sendo o aqui mencionado o modelo da Célula de Circulação de Hadley (Figura 3) (GARRISON, 2021). Há duas células de Hadley na região tropical, as células de Hadley Norte e Sul, conduzindo o ar frio da região próxima aos 30° de latitude para o equador, enquanto o ar quente

¹Objetivo de desenvolvimento sustentável 13: Ação contra a mudança global do clima. NAÇÕES Unidas no Brasil. Objetivo de Desenvolvimento Sustentável 13: Ação Contra a Mudança Global do Clima. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs/13>. Acesso em: 21, novembro de 2023.

viaja em elevadas altitudes do equador para os polos. A convergência de massas de ar nessa zona de baixa pressão é o que dá origem à ZCIT. (AYOADE, 1996).

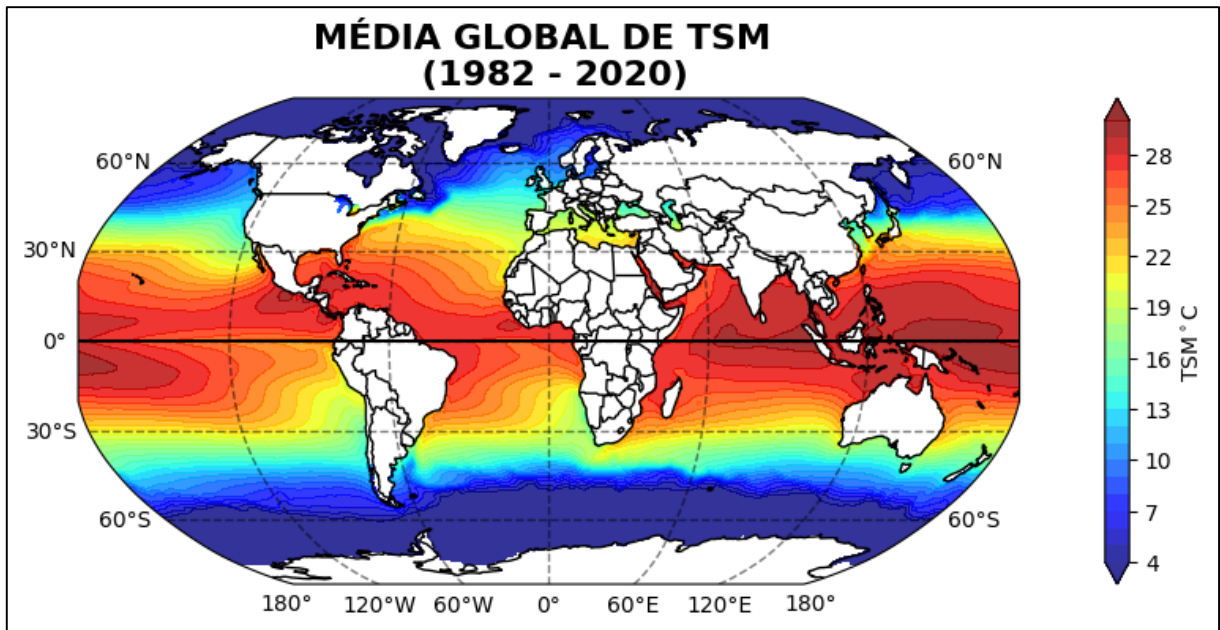
Figura 3 – Célula de Hadley.



Fonte: Geo. – Conceição (2012). Representação da Célula de Hadley. *T.Cap*: Trópico de Capricórnio. *T.Can*: Trópico de Câncer. Alísios: ventos alísios.

O oceano global abrange 71% da superfície terrestre e, em virtude da sua considerável quantidade de água e de sua expressiva capacidade térmica, superior à da atmosfera em 1.000 unidades, os oceanos contribuem com o clima de modo equiparável à atmosfera (MARSHALL e PLUMB, 2009). A distribuição espacial da TSM global pode ser contemplada na figura 4.

Figura 4 – Média Global de TSM. Referência (1982 – 2020).



Fonte: Elaborado pelo autor. Média anual de TSM Global, elaborada com dados da NOAA, sobre o período 1982 – 2020.

1.2 Dipolo do Atlântico

O termo Dipolo do Atlântico é frequentemente associado ao gradiente inter-hemisférico de TSM que, por sua vez, descreve o contraste de anomalia de TSM entre ATN e ATS, e é identificado como um dos principais sistemas de variabilidade climática do Oceano Atlântico. Baseado nos estudos de Chang (2000); Hounsou-Gbo (2015); Moura e Shukla (1981); Nobre e Shukla (1996), o Dipolo mantém uma relação inversa com a precipitação no Nordeste Brasileiro. Visto que afeta as condições de precipitação nas áreas continentais próximas, essa diferença de TSM regional assume significativa relevância climática e por essa razão, é atualmente utilizado na previsão climática, além de um objeto de pesquisa habitual.

O trabalho de Moura e Shukla (1981) integra o grupo inicial de pesquisas sobre o tema. O estudo evidenciou o gradiente inter-hemisférico como um dos principais impulsionadores da atmosfera no oceano atlântico. Quando a anomalia de TSM do ATS tem valores mais altos que a anomalia TSM do ATN, temos um dipolo negativo, que empurra a ZCIT para o sul de sua posição média. No caso contrário, temos um dipolo positivo, que por sua vez, empurra a ZCIT para o norte de sua posição média. Isso evidencia que a correlação

entre as anomalias de TSM do AT e as anomalias de precipitação no continente se estabelece por meio do posicionamento da ZCIT (Nobre e Shukla 1996).

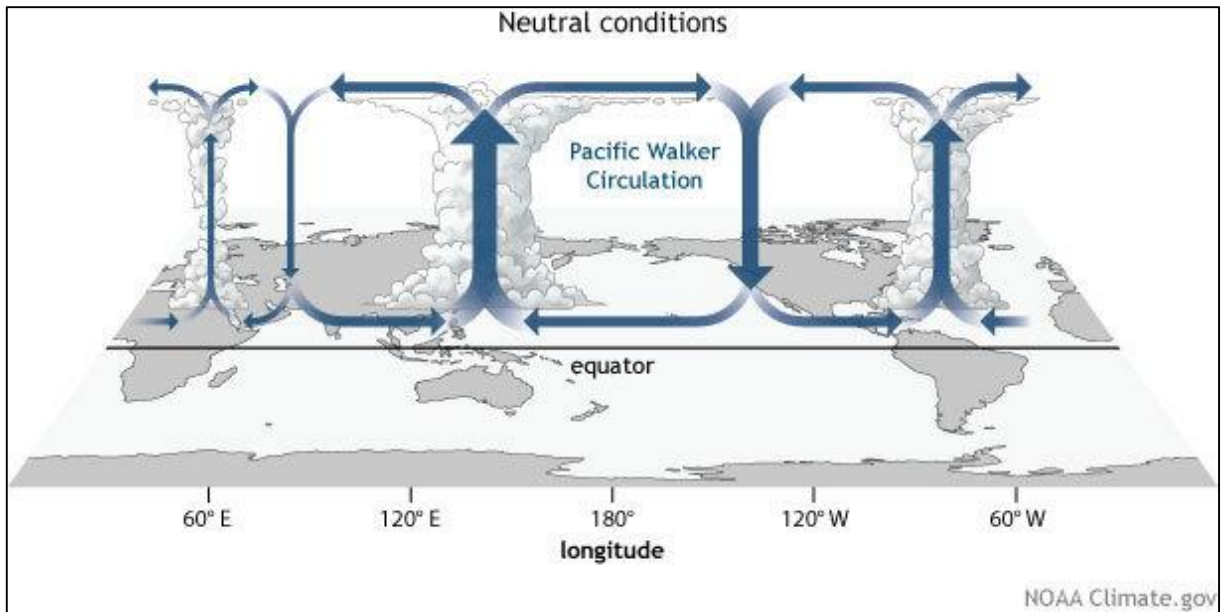
1.3 El Niño-Oscilação Sul

A dinâmica entre a atmosfera e as águas tropicais exerce impacto na variabilidade de um sistema acoplado de destaque no clima terrestre, conhecido como *El Niño* Oscilação Sul (ENOS) (MARSHALL e PLUMB, 2009). O Oceano Pacífico Tropical médio é caracterizado por uma água superficial (TSM) mais quente (fria) no Oeste (Leste). Essa condição desencadeia a movimentação do ar do Leste mais frio, onde a pressão é maior, para o Oeste mais quente, onde a pressão é menor, estabelecendo a Célula de Circulação de Walker (Figura 5) (MARSHALL e PLUMB, 2009; SARACHICK e CANE, 2010).

Conhecendo o padrão normal no Pacífico, torna-se possível identificar a ocorrência de um ciclo irregular de aquecimento e resfriamento do Pacífico Leste e seus efeitos atmosféricos e oceânicos associados. Durante as fases de aquecimento (resfriamento), conhecidas como anos de *El Niño* (*La Niña*), como a que ocorreu nos anos de 2015-2016 (2017-2018)² observa-se uma diminuição anômala (restauração) na intensidade dos ventos, resultando no aumento (diminuição) da TSM no Leste. A TSM dos casos de *El Niño* (Figura 6), por sua vez, provoca a expansão da zona de precipitação do Oeste até o centro da bacia, ocasionando um enfraquecimento (reforço) na célula de Walker. Nos eventos *La Niña*, observa-se a retenção da zona de precipitação no Oeste (SARACHIK e CANE, 2010).

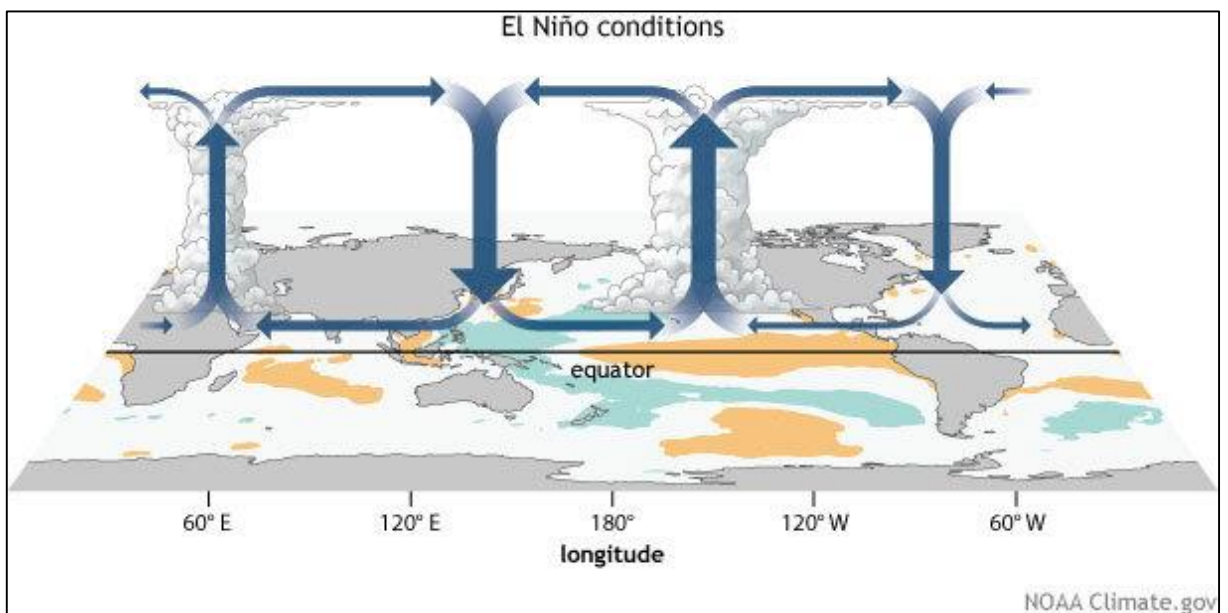
²Últimas ocorrências do El Niño e La Niña. CONDIÇÕES Atuais do ENOS: Caracterização do EL Niño. EL Niño e La Niña – CPTEC/INPE, 2023. Disponível em: <http://enos.cptec.inpe.br/>. Acesso em: 07 nov. 2023.

Figura 5 – Célula de Circulação de Walker. Condição Neutra.



Fonte: NOAA (2014). Representação da Célula de Circulação de Walker sob a condição neutra. Neutral conditions: condição neutra. Pacific Walker Circulation: Célula de Circulação de Walker. Equator: Equador. E: Leste. W: Oeste.

Figura 6 – Célula de Circulação de Walker. Condição *El Niño*.



Fonte: NOAA (2014). Representação da Célula de Circulação de Walker sob as condições de El Niño. Equator: Equador. E: Leste. W: Oeste.

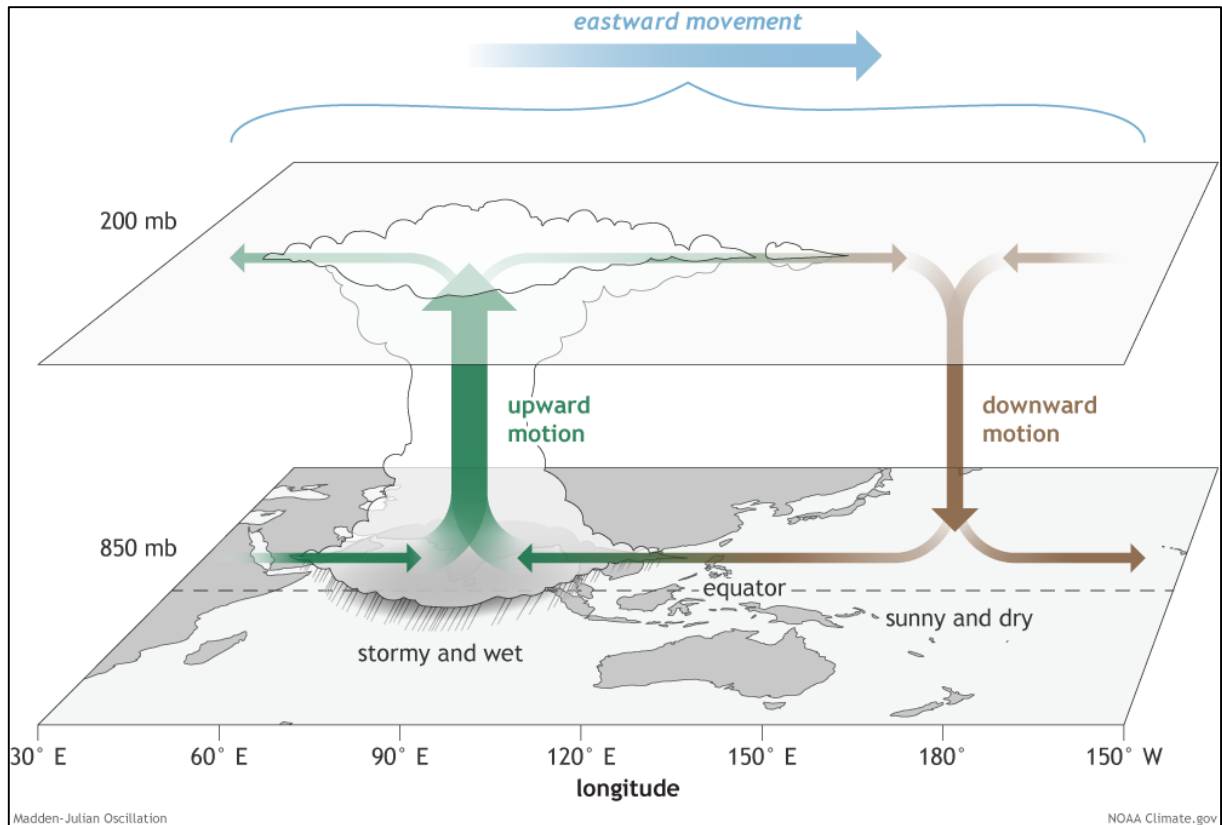
Os períodos de setembro-fevereiro compreendidos nos anos de *El Niño* contribuem para anomalias negativas de precipitação no NEB (CAI et al., 2020). Já os efeitos da precipitação forçada pelo ENOS na sociedade, na economia e no ambiente ao sul dos continentes banhados pelo Pacífico, assim como nas áreas adjacentes, manifestam-se na agricultura, na pesca, na saúde pública, na ocorrência de incêndios e nas calamidades ambientais extremas (CAI et al, 2020).

1.4 Oscilação de Madden e Julian

Um mecanismo adicional que pode exercer influência na pluviometria do Norte do NEB é conhecido como Oscilação Madden-Julian (OMJ) (Madden e Julian, 1971, 1972, Chang 1995, Valadão 2015). Descrito por Madden e Julian (1971), OMJ refere-se à propagação, nos trópicos, de duas fases meteorológicas: uma com chuvas intensificadas e outra com precipitação reprimida. O fenômeno é notavelmente observado nos oceanos Índico e Pacífico e, diferente do ENOS, que é estático, se propaga para leste com um período entre 30 e 60 dias.

As fases do OMJ consistem em duas porções com características contrastantes de nuvens e precipitação. Enquanto existente, a OMJ sempre se desloca para leste, e ao passar por determinado ponto, divide a superfície da região equatorial em duas partes distintas, incorporando cada uma delas em um de seus lados. A composição dos dois setores da OMJ segue um mecanismo similar ao de uma célula de circulação (figura 7). A convergência de ventos na superfície do Oceano Índico Oeste desencadeia forte convecção, resultando na elevação das massas de ar, que subsequentemente formam nuvens carregadas de umidade e aumentam a precipitação. Quando atingem alta troposfera, as massas de ar migram para uma nova região, onde são forçadas a declinar com a convergência de outras massas em alto nível atmosférico, suprimindo a ocorrência de chuvas (WOOLNOUGH, 1990).

Figura 7 – Estrutura da OMJ.

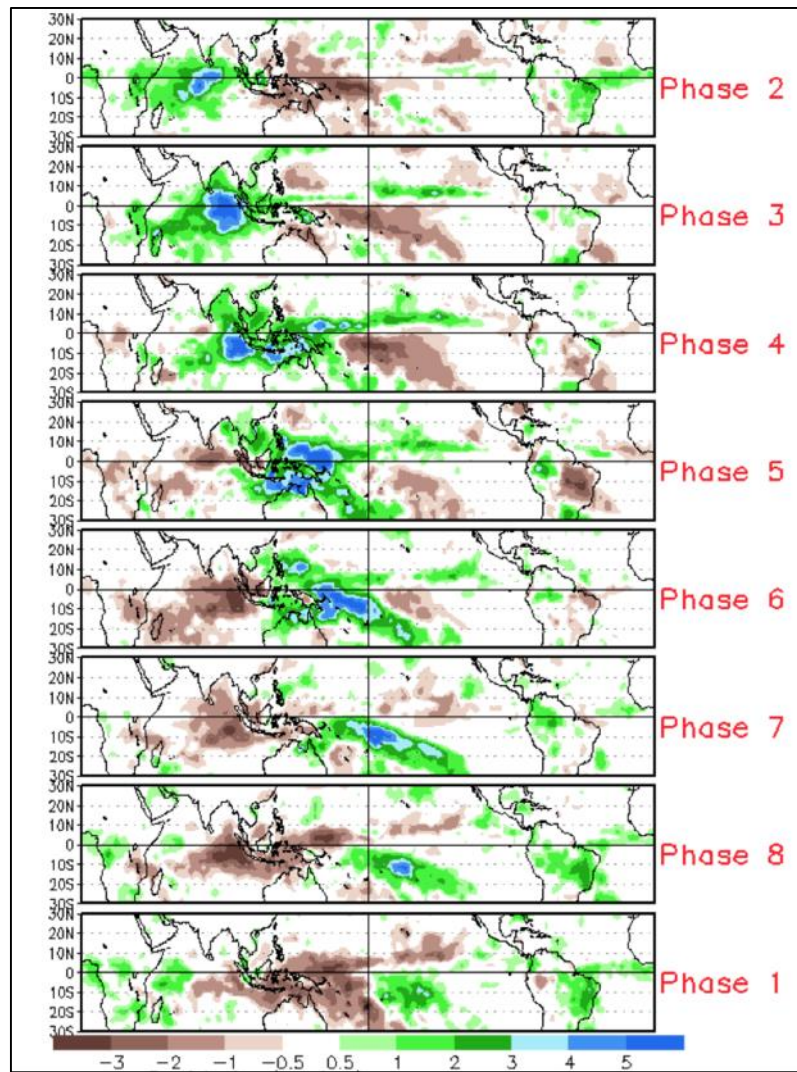


Fonte: NOAA (2014). Representação da estrutura longitudinal da Oscilação Madden-Julian. Eastward movement: movimento para leste. Upward motion: movimento ascendente. Downward motion: movimento descendente. Equator: Equador. Stormy: chuvoso. Wet: úmido. Sunny: ensolarado. Dry: seco. E: Leste. W: Oeste.

A trajetória da OMJ pelos trópicos pode ser notada por segmentos distintos chamados de Fases (Figura 8). Nas fases 2 e 3, observa-se a formação de uma área de chuvas tropicais intensas sobre o Oceano Índico Ocidental. Nos níveis subsequentes, a precipitação intensa desloca-se gradualmente em direção ao leste, sendo seguida pela fase de supressão, alcançando o Sul da Índia e as águas adjacentes. Ao chegar na fase 4, a anomalia de precipitação já atingiu a Indonésia e segue avançando em direção ao Pacífico (fases 5, 6 e 7). No pacífico Central (fase 8), os precipícios de OMJ eventualmente perdem sua intensidade, antes ou enquanto outro ciclo do fenômeno se inicia sobre o Oeste do Índico novamente (ZHANG, 2013). Os impactos da OMJ assemelham-se aos do ENOS, porém, devido à sua natureza efêmera em comparação às anomalias de TSM do pacífico, tais consequências manifestam-se apenas em escala semanal. Como pode ser visto na figura 8, a manifestação da estrutura positiva da OMJ no NEB pode ser vista nas fases 1, 2 e 3 podendo se estender até a fase 4, e retornando

na fase 8. Enquanto as fases 5, 6 e 7 demonstram a parte negativa do fenômeno que de acordo com Kayano e Kousky (1999) influencia significativamente a convecção sobre a região, como confirmado por Teixeira (2008) ao elucidar que a OMJ tem impactos notáveis nas anomalias de convecção e precipitação local antes e durante as fases que envolvem o NEB e a Amazônia. Vale ressaltar, que a parte seca da OMJ também influencia o clima na região.

Figura 8 – Fases da OMJ.



Fonte: NOAA (2014). Representação do movimento para leste da Oscilação Madden-Julian. As cores azul e verde indicam chuvas acima da média. A cor marrom, chuvas abaixo da média.

2 OBJETIVOS

2.1 Geral

O propósito deste estudo consiste em evidenciar a correlação existente entre as anomalias de TSM do Atlântico Tropical e as anomalias de precipitação nos meses fevereiro a maio no Ceará, buscando compreender a natureza e a intensidade dessa relação em uma escala sub sazonal.

2.2 Específicos

- Investigar:
 - A climatologia semanal de precipitação do Ceará e de TSM dos setores Norte e Sul do Oceano Atlântico Tropical.
 - A correlação semanal do gradiente inter-hemisférico do Atlântico (Dipolo) com a anomalia de precipitação do Ceará durante a estação chuvosa.
 - A relação do Dipolo com a anomalia de precipitação para alguns dos eventos mais chuvosos e menos chuvoso.

3 METODOLOGIA

3.1 Área de Estudo

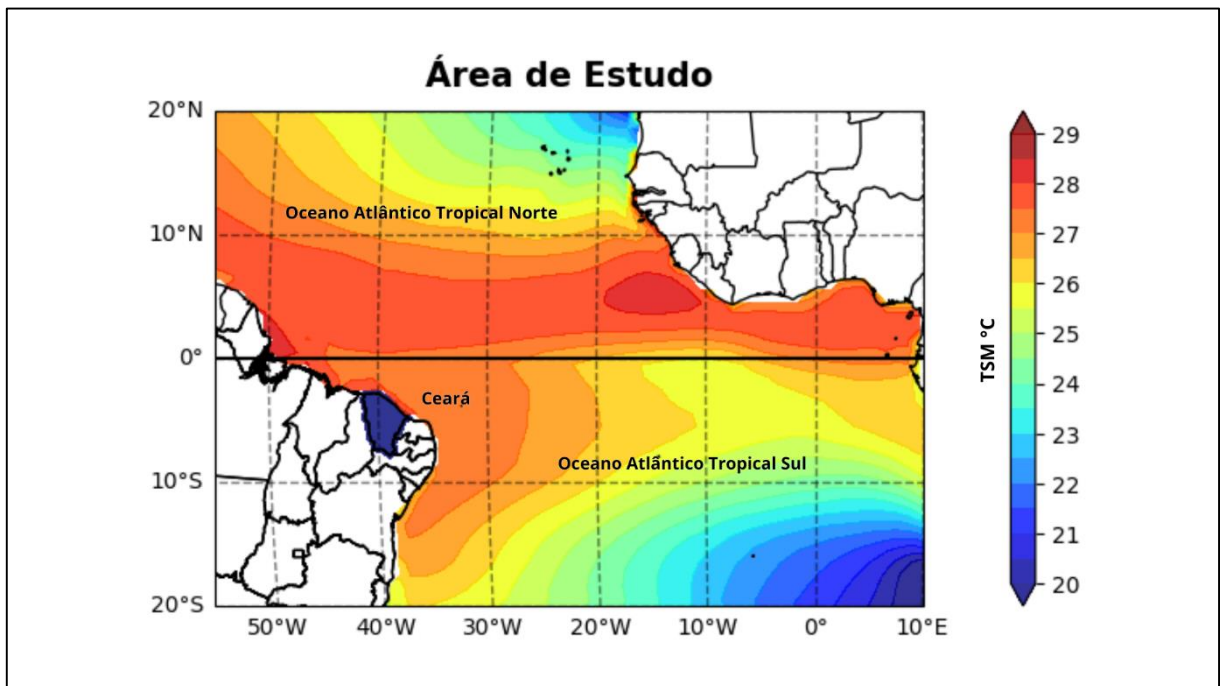
A área de estudo é composta por duas regiões (Figura 9). A primeira, representada pelos dados de precipitação corresponde ao estado do Ceará, situado no Nordeste do Brasil, entre as latitudes 2°S e 8°N e longitudes 42°W e 36°W, podendo ser dividido nas regiões Norte e Sul, com um total de 8.794.957 habitantes (IBGE 2022) e uma urbanização que ocupa 1.594,42 m² dos totais 148.894,447 m² (IBGE 2019). Os dados de TSM são do oceano adjacente à área de precipitação estudada, o Oceano Atlântico Tropical, aqui dividido entre Norte, entre as latitudes 20°N e 0°, e as longitudes 50° W e 15° W, e Sul, entre as latitudes 0° e 20° S, e as longitudes 40°W e 5°W. Essas regiões são constantemente correlacionadas devido à região de conexão entre o NEB e o Oceano Atlântico que banha 8 das nove capitais da região, influenciando a vida dos 32% dos 22.106.800 habitantes que vivem na zona costeira (GONÇALVES et al., 2023) (Figura 10).

Figura 9 – Mapa de Localização da Área de Estudo.



Fonte: elaborado pelo autor. Representação da Área de Estudo. Elaborado com dados georeferenciados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE).

Figura 10 – Mapa Representativo da Área de Estudo.



Fonte: elaborado pelo autor. Representação da Temperatura da Superfície do Mar da área de estudo.

3.2 Dados Utilizados

Foram empregados dados diários de precipitação sobre o estado do Ceará, adquiridos a partir da rede pluviométrica da Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCEME). Esses dados são fornecidos em uma grade regular com uma resolução espacial de $0,15^\circ$ em longitude e $0,15^\circ$ latitude e cobrem o período de 01 de janeiro de 1973 até o presente. O período escolhido para análise compreende trinta e nove anos, 1982 – 2020. Para nosso estudo, os dados diários foram transformados em média semanal.

As médias semanais de TSM da *National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) Optimum Interpolation (OI) SST V2*, foram obtidos no website oficial³. Esses dados são disponíveis da primeira semana de setembro de 1981 até o presente com uma resolução espacial de 1° em latitude e 1° em longitude. O período selecionado para nossa análise vai de 1982 a 2020.

³ Fonte de dados de TSM: <https://psl.noaa.gov/data/gridded/data.noaa.oisst.v2.html>

Dados diários de Radiação de Onda Longa (ROL) da National Oceanic and Atmospheric Administration disponíveis no website oficial⁴, do período 01 de junho de 1974 até o presente. Os valores correspondem a toda a superfície do planeta com uma resolução espacial de 2,5° de em latitude e em longitude. O período selecionado para observação também corresponde à 1982 - 2020. A região de interesse ajustou-se entre as latitudes 8°S e 2°S longitudes entre 45°W e 35°W, para expressar a região do Ceará.

3.3 Métodos

Essas diferentes variáveis foram selecionadas para avaliar a interação entre o oceano e a atmosfera na formação das chuvas no território cearense. Uma média semanal foi criada para os dados de precipitação, facilitando a comparação com os dados de TSM. Em seguida, foi elaborada a climatologia semanal de precipitação para o período de 1928 – 2010. As anomalias de precipitação foram calculadas mediante a remoção da climatologia semanal das médias semanais do período de 1982 - 2010.

O tratamento dos dados de TSM se deu da seguinte forma. A partir dos dados brutos, realizou-se uma seleção para o intervalo de 1982 - 2020. Os valores de temperatura foram categorizados com base nas dimensões latitude e longitude, sendo agrupados como Norte (Sul) aqueles com latitudes entre 0° e 20°N (20°S e 0°) e longitudes entre 50°W e 15°W (40°W e 5°W). Os dados do Norte foram agrupados por semana para elaboração de uma climatologia. O mesmo procedimento foi adotado para os dados do Sul. As anomalias semanais de TSM do ATN (ATS) foram calculadas subtraindo a climatologia semanal da categoria Norte (Sul), obtida no passo anterior, das médias semanais do período de 1982 – 2010.

Assim como realizado com os dados de precipitação, os valores de ROL foram submetidos a uma média semanal. E, então, foi calculada a climatologia semanal para o período 1982 - 2010.

3.3.1 Dipolo do Atlântico

Para este trabalho, a região considerada como Atlântico tropical Norte (ATN) foi de 0°N a 20°N e de 50°W a 15°W. A região de Atlântico tropical Sul (ATS) foi definida de 20°S

⁴ Fonte de dados de ROL: https://downloads.psl.noaa.gov/Datasets/interp_OLR/

a 0°N e de 40°W a 5°W. A diferença entre as anomalias semanais de TSM do ATN e ATS representa o Dipolo do Atlântico (SERVAIN, 1991).

3.3.2 Correlação Semanal entre TSM e Precipitação.

Para a análise de correlação entre os dados semanais foi usado o método de Pearson (1903) como indicado na equação 1:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X}) \cdot (Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (1)$$

Onde:

- X e Y são as variáveis, Anomalia de Precipitação e Dipolo do Atlântico.
- \bar{X} e \bar{Y} são as médias de X e Y , respectivamente.
- n é o número de observações.
- r é a correlação de Pearson.

Foram avaliadas as correlações entre diferentes semanas de anomalia de precipitação e de dipolo. Para a análise de correlação entre as anomalias de TSM (Dipolo) da semana 1 e as anomalias de precipitação da semana 1, foram selecionadas todas as anomalias de TSM da primeira (1ª) semana do ano no período 1982 - 2020. Da mesma forma, foram selecionadas todas as anomalias de precipitação da 1ª semana do mesmo período (1982 - 2020). Assim, foram construídas duas séries X e Y de 38 valores (39 anos) que foram correlacionadas. Para a correlação entre as anomalias de TSM da semana 1 e as anomalias de precipitação da semana 2, a correlação foi executada entre os 39 valores da primeira 1ª semana de TSM com os 39 valores da segunda (2ª) semana de precipitação.

Quando a semana de TSM considerada é anterior à semana de precipitação, falamos de semana à frente ou *lead*. Por exemplo, se estamos tratando das anomalias de TSM a quinta (5ª) semana e das anomalias de precipitação da oitava (8ª) semana, teremos um *lead* de 3 (8-5) semanas. Vale ressaltar que para este trabalho, a TSM é sempre considerada, ou na mesma semana que a precipitação ou semanas anteriores à semana de precipitação.

A significância estatística das correlações foi avaliada usando o teste t de Student⁵.

Os resultados foram representados por:

1. Um diagrama de contorno mostrando as correlações entre o dipolo e a anomalia precipitação para diferentes intervalos de tempo à frente, chamados de *lead*.
2. Gráficos de linhas mostrando as anomalias de precipitação e os valores do Dipolo do Atlântico Tropical de duas semanas, uma correspondente à anomalia de precipitação e outra correspondente à anomalia de TSM, específicas ao longo dos anos.
3. Mapas de correlação espacial entre os padrões de anomalia de TSM e a precipitação no território cearense. Os pontos nos quais o nível de significância da correlação é inferior a 0,05 foram identificados.

3.3.3 Mapas de compostos

A seleção dos anos para os compostos foi realizada mediante o estabelecimento de um critério delimitador com base nos valores de anomalia. Foram priorizados os anos com valores de anomalia de chuva acima de +3 (compostos positivos) ou anomalia de chuva abaixo de -3 (compostos negativos).

Após a escolha, procedeu-se à produção dos compostos de anomalias de precipitação e de TSM, para os casos escolhidos.

Os mapas de composição foram elaborados considerando uma média das anomalias de precipitação das semanas em questão ao longo dos anos selecionados.

A composição das anomalias de TSM foi conduzida a partir da média das anomalias de TSM do Oceano Atlântico Tropical da semana 11 nos mesmos anos considerados nas composições de precipitação.

Os cálculos e as plotagens foram feitos utilizando as bibliotecas *netCDF4*, *numpy*, *matplotlib*, *xarray*, *basemap*, *scipy.stats* e *cartopy*, do Python 3.10.12.

⁵ Teste estatístico para determinar se as diferenças observadas entre as médias de duas amostras são resultado de variações reais nos dados ou se são simplesmente devido à aleatoriedade das amostras GROSSET (1908).

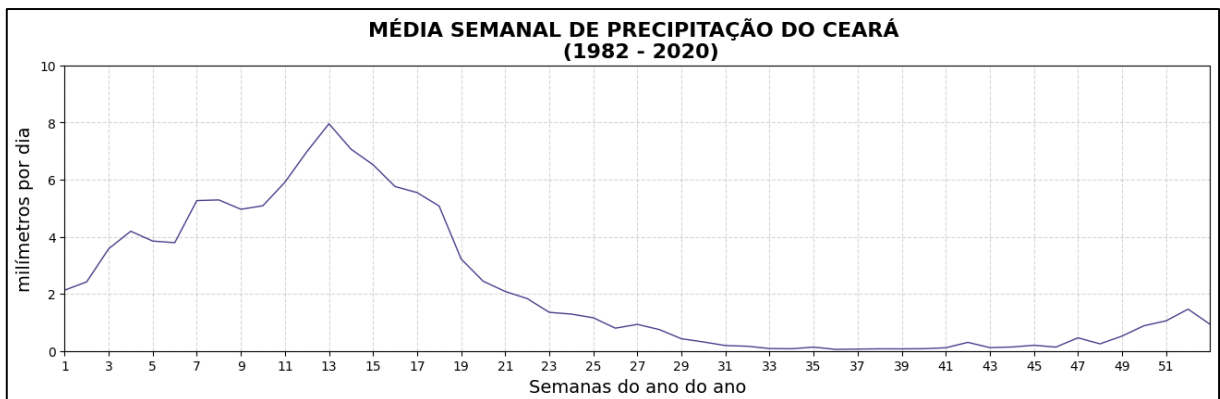
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Variabilidade de Precipitação do Ceará

4.1.1 Climatologia de Precipitação

Conforme esperado, a climatologia de precipitação (Figura 11) revelou que o período entre as semanas 1 e 20 (janeiro a maio) de todos os anos apresenta uma precipitação média superior (4,85 mm) àquela observada entre as semanas 21 e 52 (0,55 mm; junho a dezembro). No intervalo entre as semanas 1 e 13, observa-se um aumento quase uniforme nas médias semanais de precipitação e, então, uma queda ao final desse período, atingindo níveis próximos de zero em algumas semanas compreendidas entre junho e dezembro. As semanas 12, 13 e 14 constituem um pico de precipitação entre os dias 21 de março e 4 de abril (6,99 mm, 7,95 mm e 7,06 mm, respectivamente). Considerando que a localização da ZCIT é o principal sistema meteorológico influente na geração de precipitações no norte do Nordeste, esses achados corroboram os resultados descritos por Melo et al. (2000).

Figura 11 – Média Semanal de Precipitação do Ceará (mm/dia).



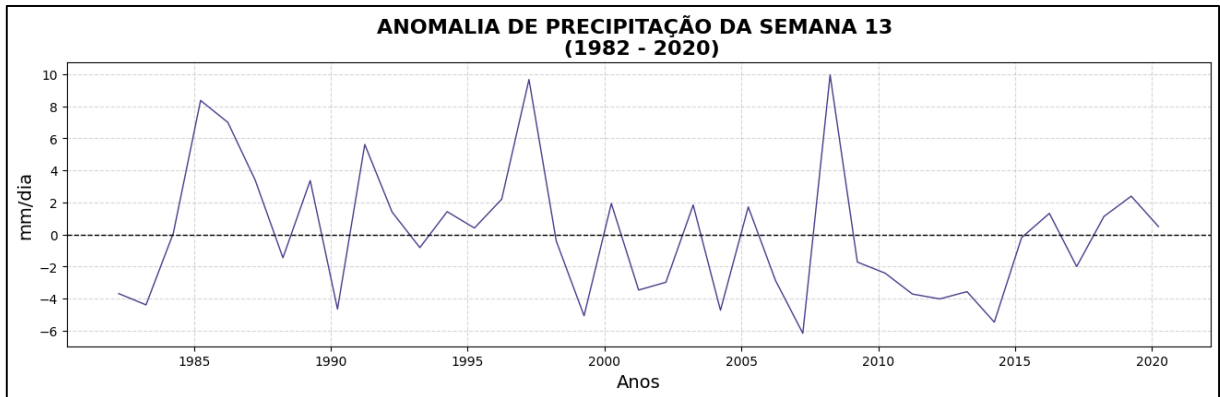
Fonte: elaborado pelo autor. Climatologia semanal de precipitação do Ceará, construída a partir de dados obtidos da FUNCEME, para o período 1982 – 2020.

4.1.2 Anomalia de Precipitação

A figura 12 representa a anomalia de precipitação da semana com a maior média de precipitação (semana 13) ao longo dos anos. Nele, é perceptível a variação na quantidade de chuva em relação à média histórica da mesma semana. Essa análise permite identificar padrões climáticos incomuns, tais como eventos extremos em 1985, 1997 e 2008 e um período seco

compreendido no intervalo 2009 - 2014. Esse período, por sua vez, ilustra a seca de 2012 – 2015 relatada no trabalho de Marengo et al. (2016).

Figura 12 – Anomalia de Precipitação da Semana 13 ao longo dos anos (mm/dia).



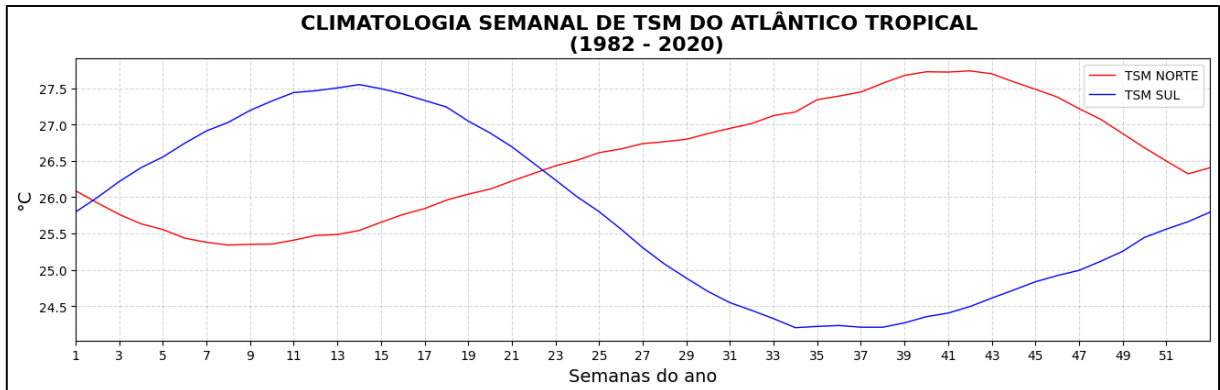
Fonte: elaborado pelo autor. Anomalia de precipitação da semana 13 de todos os anos, construída a partir de dados obtidos da FUNCEME, para o período 1982 – 2020.

4.2 Variabilidade de TSM do Atlântico Tropical

4.2.1 Climatologia

A comparação entre as climatologias de TSM do ATN e ATS (Figura 13) evidencia a influência da posição do Sol ao longo do ano. Logo, entre as semanas 12 e 24, quando é inverno (verão) no HS (HN), observa-se uma diminuição (aumento) significativa nas médias semanais de TSM do ATS (ATN), resultando em uma curva com a concavidade para cima (baixo). Em termos médios, observa-se uma maior intensidade nos valores de TSM do ATS, principalmente entre as semanas 11 e 15 (27,49 °C média das semanas 11-15). Durante esse intervalo, a TSM do ATN também se acentua, porém, as águas ainda estão frias em comparação com a porção acima da linha do equador (25,51 °C, média das semanas 11-15). Essa diferença pode influenciar a posição da ZCIT, principalmente expandindo o seu deslocamento para o Sul, exercendo um impacto notável na precipitação dessas semanas, como visto anteriormente na análise da climatologia semanal de precipitação.

Figura 13 – Climatologia Semanal de TSM (°C) do Atlântico Tropical Norte (ATN: 20°N – 0°; 50°W – 15°W) e do Atlântico Tropical Sul (ATS: 0° - 20°S; 40°W – 5°W).

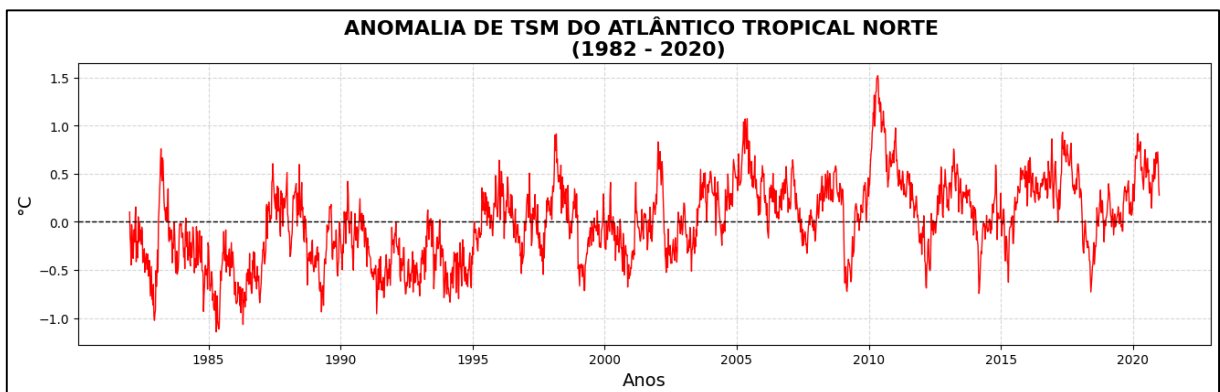


Fonte: elaborado pelo autor. Climatologia semanal de TSM do atlântico Norte e Sul, construída a partir de dados obtidos da NOAA, para o período 1982 – 2020.

4.2.2 Anomalias

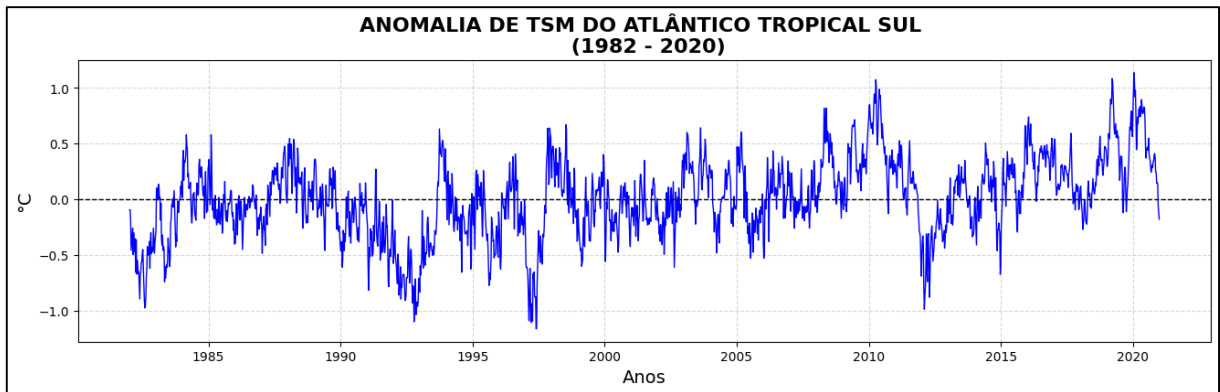
Tanto a anomalia de TSM do ATN quanto a do ATS (Figuras 14 e 15) mostraram uma tendência de crescimento, expondo o aquecimento da superfície do mar no Atlântico tropical entre os anos de 1982 e 2020, da mesma maneira que observado por Nóbrega e Santiago (2014) para o período 1950 – 2009.

Figura 14 – Anomalia de TSM do ATN.



Fonte: elaborado pelo autor. Anomalia semanal de TSM do Atlântico Tropical Norte, construída a partir de dados da NOAA.

Figura 15 – Anomalia de TSM do ATS.

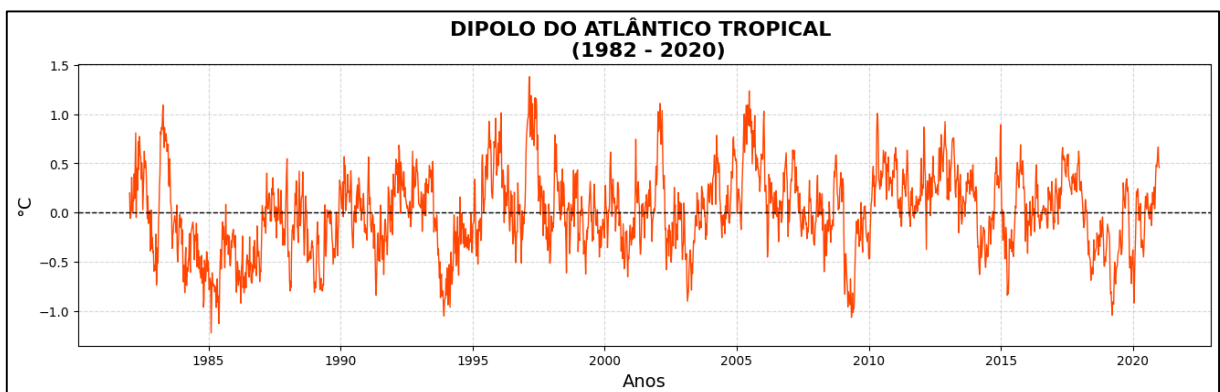


Fonte: elaborado pelo autor. Anomalia semanal de TSM do Atlântico Tropical Sul, construída a partir de dados da NOAA.

4.2.3 Dipolo

Apesar das tendências de aumento de temperatura registradas nas partes norte e sul do Atlântico tropical, o dipolo (Figura 16) não revela tendência a longo prazo. Isso sugere que os aumentos de temperatura observados nesses dois setores se cancelam na formação dipolo (diferença entre ATN e ATS). O gráfico indica também a persistência, por alguns anos, das fases positivas e negativas do dipolo ao longo do período estudado.

Figura 16 – Dipolo (Gradiente Inter-hemisférico) do AT.

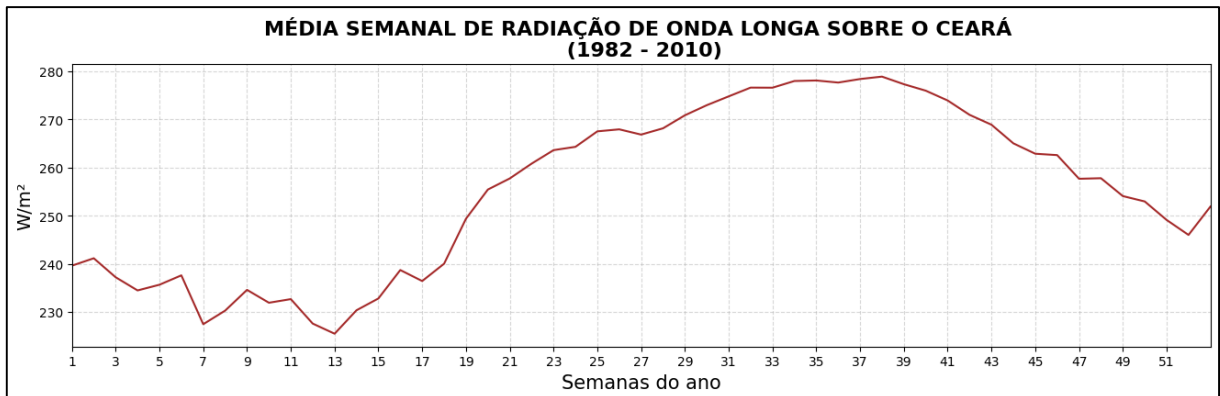


Fonte: elaborado pelo autor. Valores do gradiente inter-hemisférico de TSM do Atlântico Tropical ao longo dos anos, construído a partir de dados obtidos da NOAA, para o período 1982 – 2020.

4.2 Radiação de Onda Longa

A análise da climatologia de ROL revela um padrão de flutuação sazonal e os meses respectivos à estação chuvosa possuem os menores valores (Figura 17). A semana 13 (maior média de precipitação) possui o menor valor dentre toda a estação (225,47 W/m²). Esses valores estão possivelmente associados à significativa umidade atmosférica e nebulosidade, sugerida pelo aumento considerável das chuvas no mesmo período mostrado no gráfico 1.

Figura 17 – Climatologia Semanal de ROL.



Fonte: elaborado pelo autor. Climatologia semanal de Radiação de Onda Longa sobre o Ceará, elaborada a partir de dados obtidos pela NOAA, para o período 1982 – 2020.

4.3 Influência da TSM na precipitação semanal

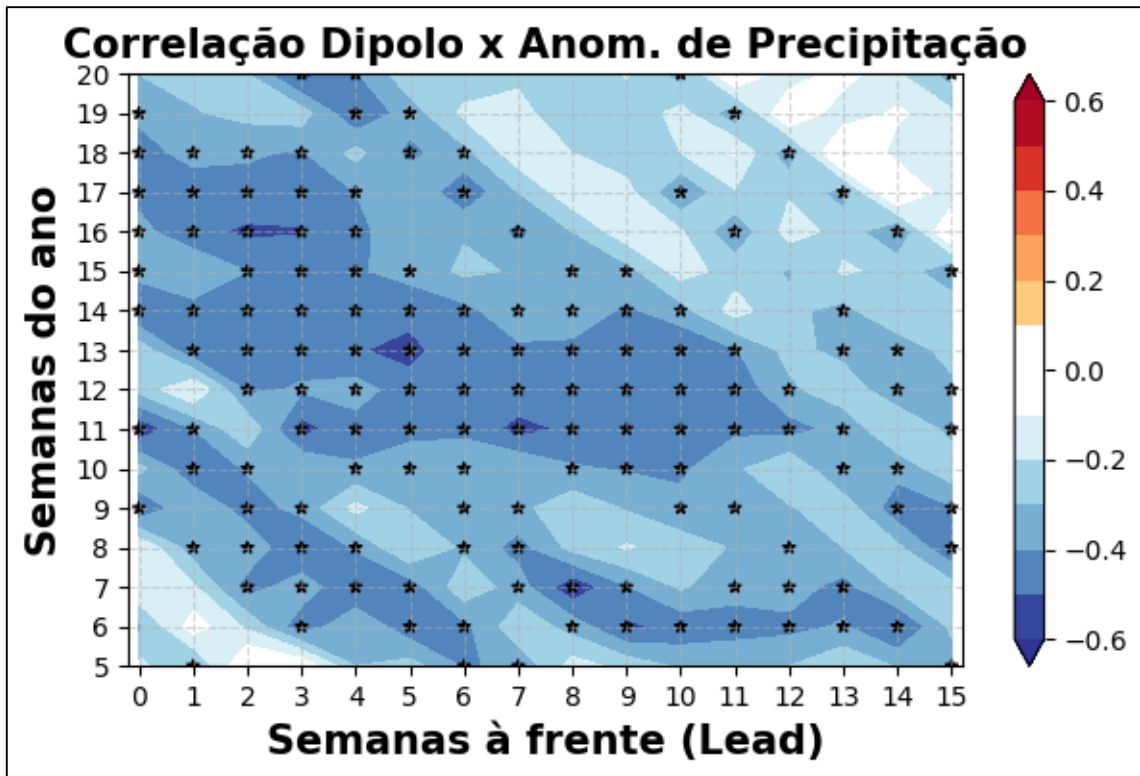
A análise de correlação Dipolo \times Anomalia de Precipitação (Figura 18) da estação chuvosa sugere que a relação entre o Dipolo do Atlântico e a anomalia de precipitação do Ceará tem significância estatística em várias semanas ao longo do ano, variando em diferentes semanas à frente (lead). Observa-se que a primeira correlação significativa já é apresentada na 5^a semana do ano, que está significativamente correlacionada à precipitação da semana seguinte (semana 6). E a partir dessa região no gráfico pode-se ver:

1. Uma forte tendência de correlações negativas estatisticamente significativas entre a TSM do AT e a precipitação que persiste à medida que a semana do ano avança e o lead diminui nos seguintes períodos.
 - a. Semanas 6 - 12 de TSM com as semanas 9, 11 e 12 de precipitação.
 - b. Semanas 6 - 20 de TSM com as semanas 14 - 20 de precipitação.
2. Que as anomalias de precipitação da semana 13, que em média é a semana mais chuvosa do ano, não tem correlação significativa com o dipolo de nenhuma semana da estação chuvosa. O mesmo é observado nas semanas 7 e 8.

3. O dipolo da 11^a semana tem a influência mais persistente dentre todas as outras semanas, influenciando quase que ininterruptamente a anomalia de precipitação de até 15 semanas a frente, impactando nos valores de 14 semanas ao todo.
4. Que os cruzamentos com os maiores valores de correlação (para menos) são:
 - a. Semana 6 de TSM com a semana 15 de precipitação (lead 9).
 - b. Semana 7 de TSM com a semana 15 de precipitação (lead 8).
 - c. Semana 11 de TSM com a mesma semana de precipitação (lead 0).
 - d. Semana 11 de TSM com a semana 14 de precipitação (lead 3).
 - e. Semana 11 de TSM com a semana 18 de precipitação (lead 7).
 - f. Semana 13 de TSM com a semana 18 de precipitação (lead 5).
 - g. Semana 16 de TSM com a semana 18 de precipitação (lead 2).
 - h. Semana 16 de TSM com a semana 19 de precipitação (lead 3).
5. Que três dos maiores valores de correlação estão associados com a 18^a semana de precipitação.

Esse padrão pode indicar que o período contido entre as semanas 14 e 19 de anomalia de precipitação é influenciado de forma mais pronunciada pela dinâmica da anomalia de TSM do AT. Tornando este intervalo de tempo um potencial para o entendimento da influência do Atlântico Tropical sobre as chuvas no Ceará em escala semanal.

Figura 18 – Correlação entre o Dipolo do Atlântico e a Anomalia de Precipitação do Ceará.



Fonte: elaborado pelo autor. Correlação do gradiente inter-hemisférico de TSM do Atlântico Tropical com a anomalia de precipitação do Ceará ao longo das semanas 5 – 20 dos anos 1982 – 2020. Cada ponto indica uma correlação com significância estatística, com um nível de significância de 95%.

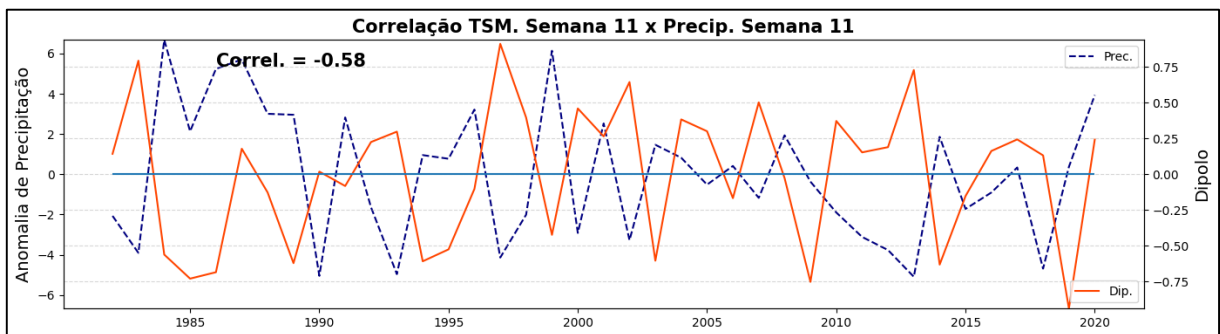
As figuras 19 e 20 mostram relação entre o dipolo da 11ª semana (semana com maior persistência) e as semanas 11 (lead 0) e 18 (lead 7) de anomalia de precipitação (maiores coeficientes de correlação), respectivamente. Com base nessas informações podemos constatar que:

1. Os dipolos negativos coincidem com as anomalias positivas de precipitação na mesma semana, nos anos 1984, 1985, 1986, 1989, 1991, 1996, 1999, 2003 e 2014.
2. Os dipolos positivos coincidem com as anomalias negativas de precipitação na mesma semana, nos anos 1982, 1983, 1992, 1993, 1997, 1998, 200, 2002, 2005, 2007, 2010, 2011, 2012, 2013, 2016, 2017 e 2018.
3. Os dipolos negativos coincidem com as anomalias positivas de precipitação de 7 semanas à frente, nos anos 1985, 1989, 1997 e 2009.

4. Os dipolos positivos coincidem com as anomalias negativas de precipitação de 7 semanas à frente, nos anos 1981, 1982, 1992, 1993, 1997, 2000, 2001, 2002, 2004, 2005, 2006, 2007, 2010, 2012 e 20013.

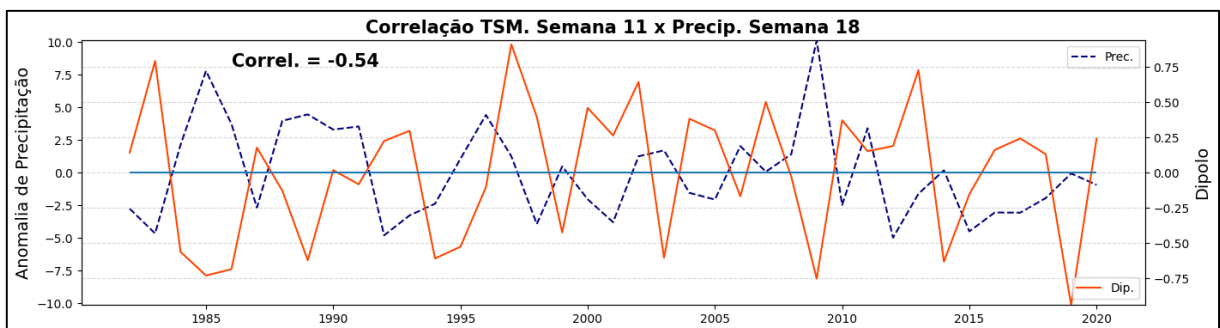
Ao analisarmos essas tendências, sugerimos que a atuação do Dipolo teve uma influência maior na construção de períodos de seca no Ceará, por meio de seus valores positivos, (ATN mais quente) do que nas anomalias positivas de precipitação.

Figura 19 – Evolução Temporal da Correlação entre o Dipolo do AT da Semana 11 e a Precipitação do Ceará da Semana 11.



Fonte: elaborado pelo autor. Série histórica da correlação do gradiente inter-hemisférico de TSM do Atlântico Tropical da semana 11 com a anomalia de precipitação do Ceará da semana 11. Elaborada a partir de dados da FUNCEME e da NOAA.

Figura 20 – Evolução Temporal da Correlação entre o Dipolo do AT da Semana 11 e a Precipitação do Ceará da Semana 18.

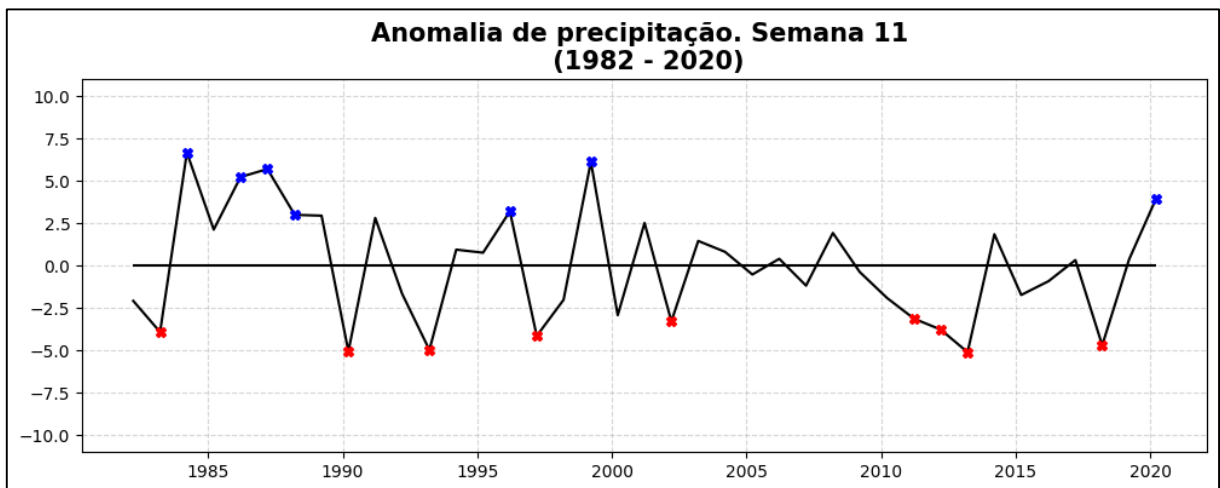


Fonte: elaborado pelo autor. Série histórica da correlação do gradiente inter-hemisférico de TSM do Atlântico Tropical da semana 11 com a anomalia de precipitação do Ceará da semana 18. Elaborada a partir de dados da FUNCEME e da NOAA.

A partir do limiar estabelecido na elaboração dos mapas compostos. Os anos destacados foram (Figuras 21 e 22):

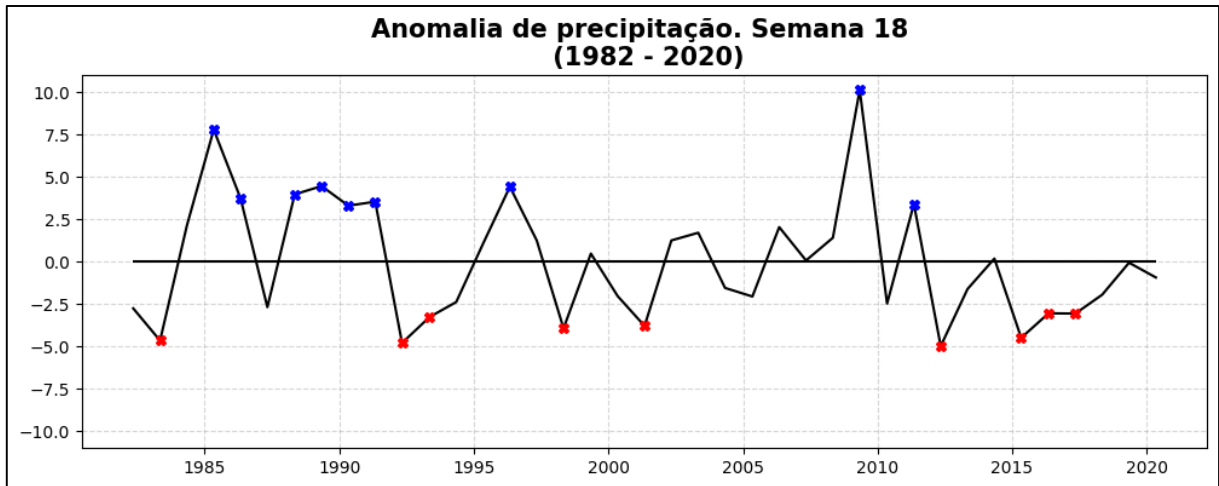
- Na semana 11:
 - Com anomalias de precipitação maiores que 3: 1984, 1986, 1987, 1988, 1996, 1999 e 2020.
 - Com anomalias de precipitação menores que -3: 1983, 1990, 1993, 1997, 2002, 2011, 2012, 2013 e 2018
- Na semana 18:
 - Com anomalias de precipitação maiores que 3: 1985, 1986, 1988, 1989, 1990, 1991, 1996, 2001 e 2011.
 - Com anomalias de precipitação menores que -3: 1983, 1992, 1993, 1998, 2001, 2012, 2015, 2016 e 2017.

Figura 21 – Série Temporal Destacando os Anos com Anomalia de Precipitação, Acima e Abaixo do Limiar Estabelecido, na semana 11.



Fonte: elaborado pelo autor. Série Histórica das anomalias de precipitação do Ceará na semana 11. Os anos com valores acima de 3 estão marcados de azul e com valores abaixo de 3, de vermelho. Elaborada a partir de dados da FUNCEME.

Figura 22 – Série Temporal Destacando os Anos com Anomalia de Precipitação, Acima e Abaixo do Limiar estabelecido, na semana 18.



Fonte: elaborado pelo autor. Série Histórica das anomalias de precipitação do Ceará na semana 18. Os anos com valores acima de 3 estão marcados de azul e com valores abaixo de 3, de vermelho. Elaborada a partir de dados obtidos da FUNCEME.

A figura 23 apresenta os mapas de compostos dos anos com anomalias positivas e negativas de precipitação, de acordo com a seleção previamente realizada, e os compostos das anomalias de TSM na semana 11 dos mesmos anos. Enquanto a figura 24, ilustra os compostos de anomalias de precipitação e de TSM da semana 18.

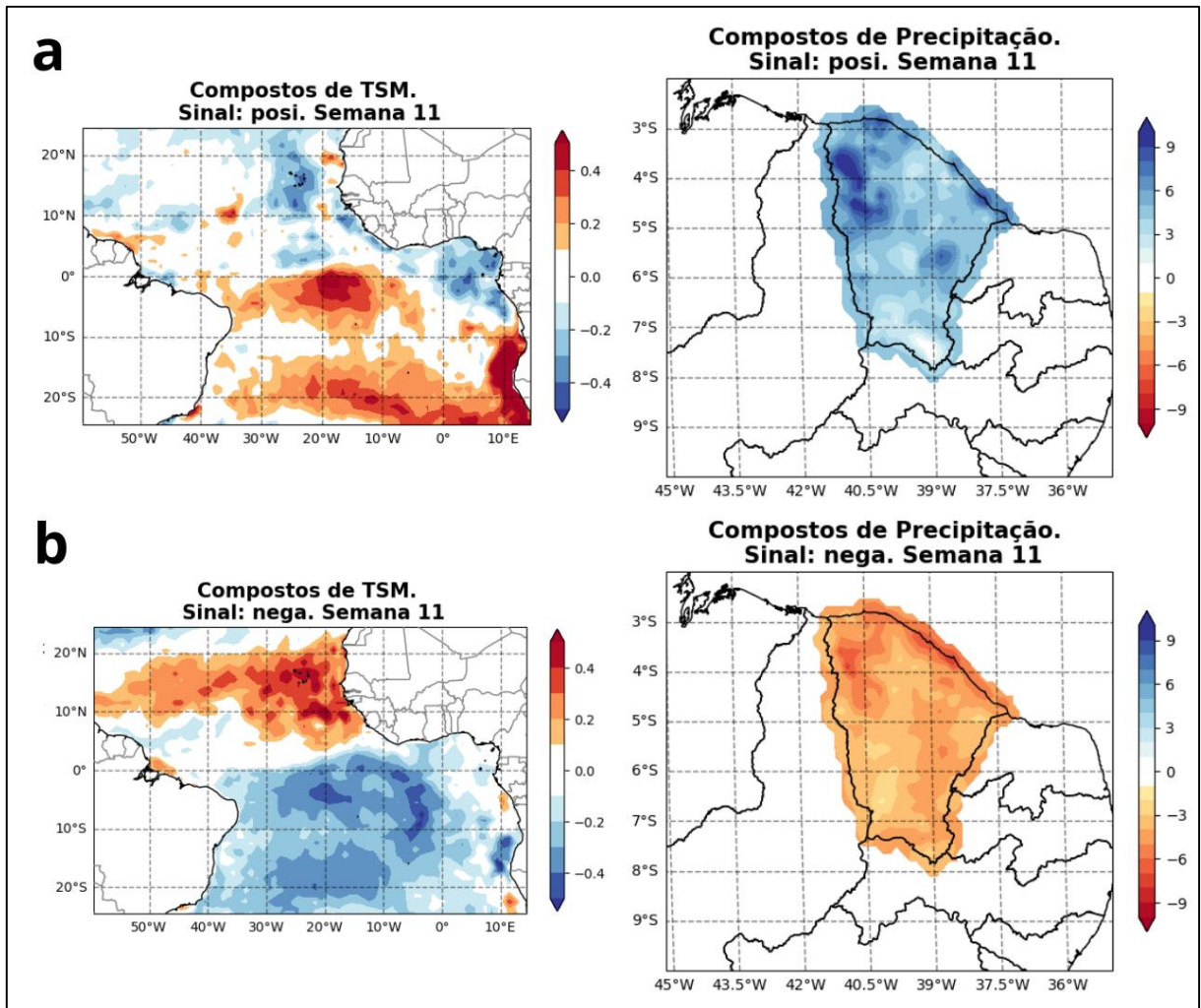
As composições da figura 23 revelam águas superficiais mais quentes no Atlântico Sul observadas na mesma semana de anomalias positivas de precipitação, ao mesmo passo que a figura 24 evidencia uma diferença positiva entre a TSM do Atlântico Norte e Atlântico Sul observada na mesma semana em que anomalias negativas de precipitação ocorreram no Ceará.

Os mapas revelam uma associação evidente entre a disposição do gradiente inter-hemisférico do Atlântico e as anomalias de precipitação no Ceará. Essa relação sugere que:

- Diferenças de temperatura entre as duas regiões do Atlântico similares à mostrada na figura 23-a e 24-a ocorrem na mesma semana de eventos de precipitação anômalos no Ceará, com valores de anomalias acima de 3, e em até 7 semanas depois.
- Diferenças de temperatura entre as duas regiões do Atlântico similares à mostrada na figura 23-b e 24-b ocorrem na mesma semana de eventos de precipitação anômalos com valores abaixo de -3, e em até 7 semanas depois.
- Dos quatro casos mostrados, as anomalias de TSM do Atlântico Norte funcionaram como fator dominante na configuração dos Dipolos. Fica sugerido que o desvio da TSM

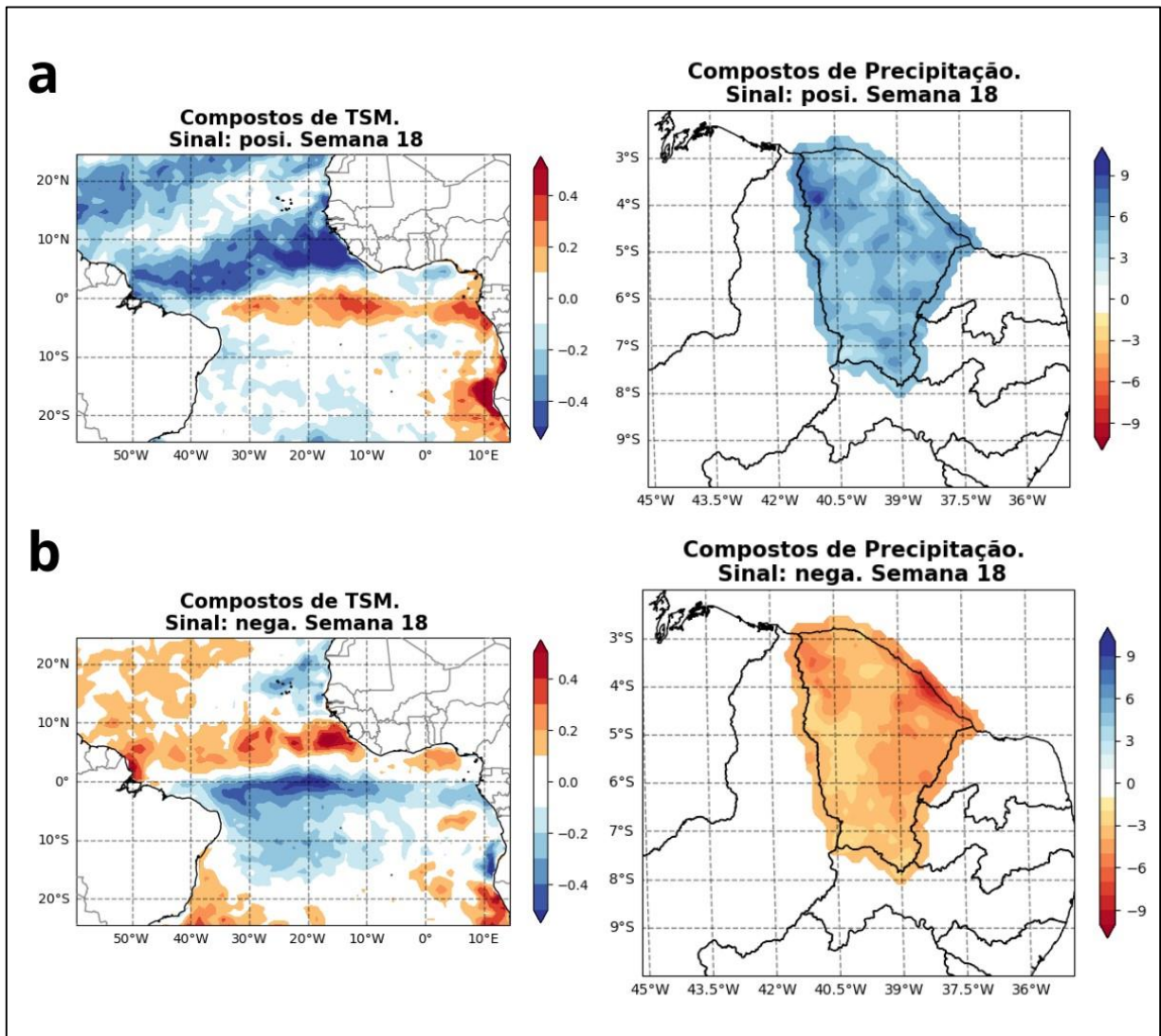
do ATN tem influência mais pronunciada na formação do sinal do Dipolo e, portanto, no sinal das anomalias de precipitação do Ceará.

Figura 23 – Comparação dos mapas compostos de anomalia de TSM na semana 11 e de Precipitação na semana 11.



Fonte: elaborado pelo autor. Compostos das anomalias de TSM e de precipitação dos anos selecionados como chuvosos e secos, a partir da anomalia de precipitação do Ceará na semana 11. Elaborados a partir de dados da FUNCEME e da NOAA.

Figura 24 – Comparação dos mapas compostos de anomalia de TSM na semana 18 e de Precipitação na semana 18.



Fonte: elaborado pelo autor. Compostos das anomalias de TSM e de precipitação dos anos selecionados como chuvosos e secos, a partir da anomalia de precipitação do Ceará na semana 18. Elaborados a partir de dados da FUNCEME e da NOAA.

5 CONCLUSÕES

A climatologia semanal de precipitação do período 1982 - 2020, analisada no contexto deste trabalho, refletiu o padrão previamente estabelecido pelas tendências de pesquisas na área. Este reflexo indicou que as semanas com maiores médias de chuva no período em questão estão enquadradas na estação chuvosa cearense. O cenário exposto reforça a viabilidade de correlacionar as chuvas do estado com a posição da ZCIT, mantendo, no entanto, o foco desta pesquisa na confirmação da associação direta entre a precipitação e a TSM.

Em relação às condições de TSM, a análise climatológica durante o período em estudo revelou um comportamento similar ao observado em climatologias mensais: uma disparidade entre as temperaturas médias para o Norte e para o Sul do Equador. Durante quase todo o outono boreal, mesmo período da estação chuvosa, as temperaturas do ATS superaram as do ATN.

As anomalias de temperatura (valor observado - climatologia) tanto do ATN, como do ATS registraram um aumento nos 39 anos estudados. No entanto, mesmo com essa tendência, o Dipolo se mostrou eficaz para a análise de correlação aqui proposta.

A análise de correlação ratificou a existência da conexão entre a TSM e a Precipitação no Ceará por meio de uma interação negativa entre o Dipolo do Atlântico e a Anomalia de Precipitação. Nos anos chuvosos (secos), por exemplo, as assinaturas de TSM do ATN e ATS evidenciaram claramente um gradiente inter-hemisférico negativo (positivo) próximo aos dias de anomalias positivas (negativas) de precipitação no estado.

A partir da análise dos compostos, fica sugerida uma possível influência das condições térmicas do Atlântico Tropical nas variações das precipitações no estado do Ceará. A presença de temperaturas mais elevadas nas águas superficiais abaixo do equador pode desempenhar um papel significativo na configuração dos padrões climáticos e, consequentemente, nas anomalias de precipitação observadas na região estudada.

Em resumo, uma análise sub sazonal (semanal) revelou ser eficaz para correlacionar a TSM e a Precipitação ao indicar que as chuvas das semanas 5 - 20 (FMA) dos anos de 1982 a 2020 foram fortemente moduladas pelas variações semanais da temperatura do mar.

A correspondência entre esses dois fatores flutuantes é observada em quase toda a estação chuvosa cearense. Entretanto, a correlação entre a TSM e a Precipitação na semana mais chuvosa do ano (13) não demonstrou significância estatística. Embora esse estudo não tenha priorizado a exploração desse caso, fica aberta a oportunidade para investigações futuras.

Neste sentido, estudos que avaliam as contribuições da Oscilação Madden Julian, que é um dos principais fatores que modulam as chuvas em escala semanal, é fundamental para o melhor entendimento dessa variabilidade.

REFERÊNCIAS

- AYOADE, J. O. Introdução à Climatologia para os Trópicos. 4. ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1996.
- BOMVENTI, T. N. et al. Relação entre a radiação de onda longa, precipitação e temperatura da superfície do mar no Oceano Atlântico Tropical. *Revista Brasileira de Geofísica*, v. 24, n. 4, p. 513-524, 2006.
- BRASIL. Ministério da Integração Nacional. Conselho Deliberativo da Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste. Resolução N° 115, de 23 de novembro de 2017. Aprova a Proposição n° 113/2017, que acrescenta municípios à relação aprovada pela Resolução CONDEL n° 107, de 27 de julho de 2017. Disponível em: <http://www.in.gov.br/autenticidade.html>. Acesso em: 21 nov. 2023.
- CAI, W.; MCPHADEN, M. J.; GRIMM, A. M. et al. Climate impacts of the El Niño–Southern Oscillation on South America. *Nature Reviews Earth & Environment*, v. 1, p. 215-231, abril, 2020. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s43017-020-0040-3#citeas>. Acesso em: 07 nov. 2023.
- CAVALCANTI, Iracema Fonseca de Albuquerque et al. *Tempo e Clima no Brasil*. São Paulo: Oficina de Textos, 2009.
- CHANG, P.; JI, L.; LI, H. A decadal climate variation in the tropical Atlantic Ocean from thermodynamic air-sea interactions. *Nature*, v. 385, p. 516–518, 1997.
- CHANG, P.; SARAVANAN, R.; JI, L.; HEGERL, G. C. The Effect of Local Sea Surface Temperatures on Atmospheric Circulation over the Tropical Atlantic Sector. *J. Climate*, v. 13, p. 2195–2216, 2000.
- FERREIRA, A. G.; MELLO, N. G. S. Principais sistemas atmosféricos atuantes sobre a região Nordeste do Brasil e a influência dos oceanos Pacífico e Atlântico no clima da região. *Revista Brasileira de Climatologia*, v. 1, n. 1, dezembro de 2005.
- FERREIRA, P. S. et al. Variabilidade Espaço-Temporal das Tendências de Precipitação na Mesorregião Sul Cearense e sua Relação com as Anomalias de TSM. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 33, n. 1, p. 141-152, 2018.
- FUNCEME. Perguntas Frequentes. Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos, 2013. Disponível em: <http://www.funceme.br/?p=843>. Acesso em: 03 nov. 2023.
- FUNCEME. Sistemas Atmosféricos Atuantes Sobre o Nordeste. Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos, 2014. Disponível em: <http://www.funceme.br/?p=967>. Acesso em: 15 jul. 2023.
- GARRISON, Tom. *Fundamento de Oceanografia: Tradução da 7ª edição norte-americana*. São Paulo: Cengage Learning, 2021.

- GONÇALVES, Rodrigo da Rocha; MAGALHÃES, João Paulo Rêgo; OLIVEIRA, Cassius Rocha de. ESTRUTURA ECONÔMICA DA REGIÃO COSTEIRA NORDESTINA: UMA ABORDAGEM DO TIPO INSUMO-PRODUTO. *Revista Econômica do Nordeste*, [S. l.], v. 54, n. 4, p. 153–172, 2023. DOI: 10.61673/ren.2023.1432. Disponível em: <https://www.bnb.gov.br/revista/ren/article/view/1432>. Acesso em: 4 dez. 2023.
- GOVERNO DO ESTADO DO CEARÁ. Ceará em Números. Governo do Estado do Ceará, 2010. Disponível em: <https://www.ceara.gov.br/2010/03/13/ceara-em-numeros/>. Acesso em: 15 jul. 2023.
- GROSSET, W. S. (1908). The Probable Error of a Mean. *Biometrika*, 6(1), 1–25. <https://doi.org/10.1093/biomet/6.1.1>. Acesso em: 4 dez. 2023.
- HOUNSOU-GBO, G. A. et al. Tropical Atlantic Contributions to Strong Rainfall Variability Along the Northeast Brazilian Coast. *Advances in Meteorology*, Hindawi Publishing Corporation, v. 2015, p. 13, 2015.
- IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Cidades e Estados: Ceará. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/ce.html>. Acesso em: 01 dez. 2023.
- KAYANO, M. T.; KOUSKY, V. E. Intraseasonal (30–60 day) variability in the global tropics: principal modes and their evolution. *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*, v. 51, n. 3, p. 373–386, 1999. DOI: <https://doi.org/10.3402/tellusa.v51i3.13459>. Acesso em: 04 dez. 2023.
- Madden, R. A., & Julian, P. R. (1971). Detection of a 40–50 day oscillation in the zonal wind in the tropical Pacific. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 28(5), 702-708.
- 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.
- MARENGO, Jose; CUNHA, Ana Paula; ALVES, Lincoln. A seca de 2012-15 no semiárido do Nordeste do Brasil no contexto histórico. *Climanálise*, v. 04, p. 49-54, 22 nov. 2016.
- MARSHALL, J; PLUMB, R. A. *Atmosphere, Ocean, and Climate Dynamics: an introductory text*. California: Elsevier Academic Press, 2008.
- MELO, A. B. C. et al. Estudo Climatológico da Posição da ZCIT no Atlântico Equatorial e sua Influência sobre o Nordeste do Brasil. In: XI Congresso Brasileiro de Meteorologia. 2000. p. 1142-1145.
- MOURA, A. D.; SHUKLA, J. On the Dynamics of Droughts in Northeast Brazil: Observations, Theory and Numerical Experiments with a General Circulation Model. *Journal of the Atmospheric Sciences*, v. 38, n. 12, p. 2653–2675, dezembro de 1981.
- NOBRE, P.; SHUKLA, J. Variations of Sea Surface Temperature, Wind Stress, and Rainfall over the Tropical Atlantic and South America. *Journal of the Atmospheric Sciences*, v. 9, n. 10, p. 2464–2479, 01 out. 1996.

NÓBREGA, R. S.; SANTIAGO, G. A. C. F. Tendência de temperatura na superfície do mar nos oceanos Atlântico e Pacífico e variabilidade de precipitação em Pernambuco. *Mercator (Fortaleza)* [Internet]. 2014 Jan;13(1):107–18. Disponível em: <https://doi.org/10.4215/RM2014.1301.0008>. Acesso em: 04 dez. 2023.

PEARSON, K. Notes on regression and inheritance in the case of two parents. *Biometrika*, v. 2, n. 4, p. 257-276, 1903.

PINHEIRO, E.; VASCONCELOS JÚNIOR, F. C.; MARTINS, E. S. P. R.; PASSOS, D. F.; PEREIRA, J. M. R. Relação entre duração dos eventos de El Niño com as condições do Atlântico Tropical e a precipitação no Ceará. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 33, n. 3, p. 497-508, 2018. Disponível em: <http://www.rbmet.org.br>. Acesso em: 4 dez. 2023.

SARACHIK, E. ES; CANE, M. A. *The El Niño-Southern Oscillation Phenomenon*. Nova Iorque: Cambridge University Press, 2010.

SERVAIN, J. Simple Climatic Indices for the Tropical Atlantic Ocean and Some Applications. *Journal of Geophysical Research*, v. 96, n. C8, p. 15137-15146, 1991.

SCHNEIDER, T.; BISCHOFF, T.; HAUG, G. Migrations and dynamics of the intertropical convergence zone. *Nature*, v. 513, p. 45–53, 2014. DOI: 10.1038/nature13636.

STUDENT. The Probable Error of a Mean. *Biometrika*, Volume 6, Issue 1, p. 1–25, march, 1908. Disponível em: <https://doi.org/10.1093/biomet/6.1.1>. Acesso em: 05 dez. 2023.

TEIXEIRA, Gleyciano Mendes. Estudo de caso da oscilação MADDEN - JULIAN e sua influência variabilidade climática intrasazonal Amazônia e Nordeste Brasileiro. 2008. 42 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Meteorologia) – Faculdade de Meteorologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 2008. Disponível em: <http://bdm.ufpa.br/jspui/handle/prefix/1753>. Acesso em: 04 dez. 2023.

VALADÃO, C. E. A., Lucio, P. S., Chaves, R. R., & Carvalho, L. M. V. (2015). MJO Modulation of Station Rainfall in the Semiarid Seridó, Northeast Brazil. *Atmospheric and Climate Sciences*, 5, 408-417.

WOOLNOUGH, S. J. The Madden-Julian Oscillation. In: ROBERTSON, A. W.; VITART, F. E. (Eds.). *Sub-seasonal to Seasonal Prediction: The Gap Between Weather and Climate Forecasting*. Elsevier, 5th Floor, Cambridge, MA, United States, 50 Hampshire Street, 02139, 1000 AE Amsterdam, Netherlands, PO Box 211, 1990.

ZHANG, C. Madden–Julian Oscillation: Bridging Weather and Climate. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, v. 94, n. 12, p. 1849–1870, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-12-00026.1>. Acesso em: 21 nov. 2023.

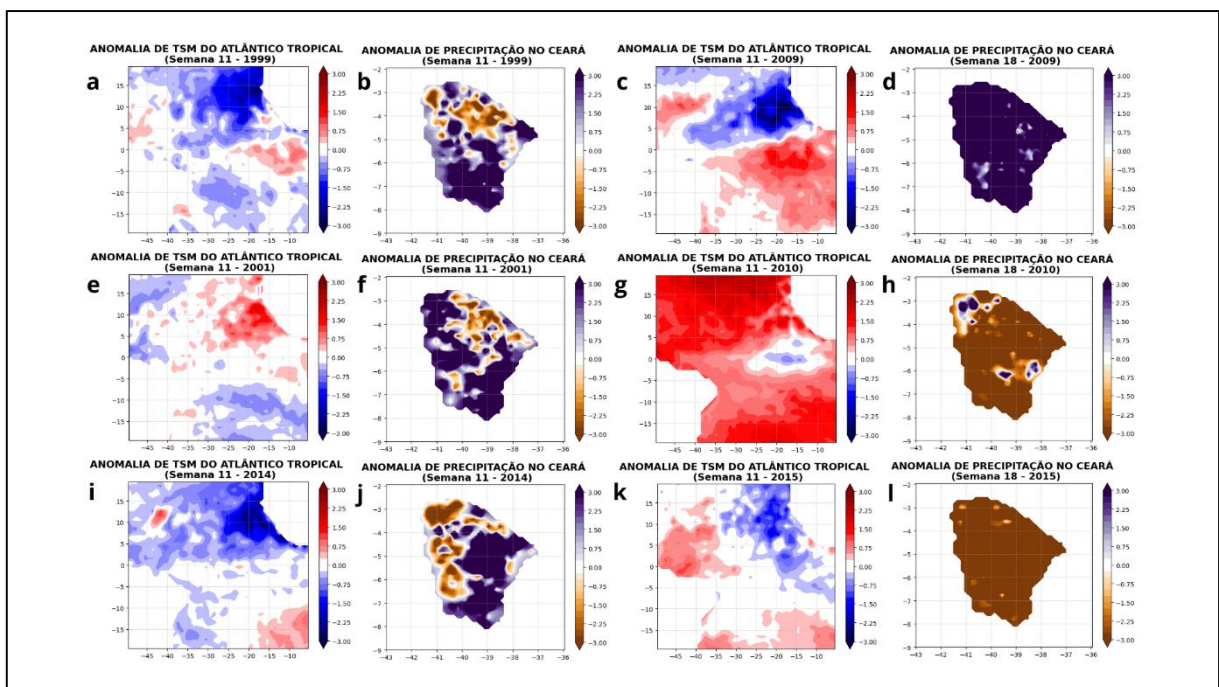
APÊNDICE A – MAPAS COMPARATIVOS

A Figura 25 compara a anomalia de precipitação no Ceará durante a semana 11 nos anos de 1999, 2001, 2009, 2010, 2014 e 2015 com a TSM no AT durante as semanas 11 nos anos de 1999, 2001 e 2014, e nas semanas 18 nos anos de 2009, 2010 e 2015. Este estudo revela três cenários distintos para cada correlação (11 x 11; 11 x 18).

As Figuras 25-a, 25-b, 25-i e 25-j ilustram situações em que o dipolo negativo durante a semana 11 resultou em anomalias positivas de precipitação na mesma semana (1999 e 2014). Já as Figuras 25-c e 25-d mostram um caso em que o dipolo negativo influenciou em anomalias positivas de precipitação sete semanas adiante (2009). As Figuras 25-g e 25-h mostram um cenário oposto ao das Figuras 25-c e 25-d (2010).

As Figuras 25-e e 25-f representa um caso em que, apesar do dipolo positivo, foram observadas anomalias positivas de precipitação na mesma semana (2011). Por fim, as Figuras 25-k e 25-l ilustram uma situação em que um dipolo negativo durante a semana 11 não teve influência nas chuvas durante a semana 18.

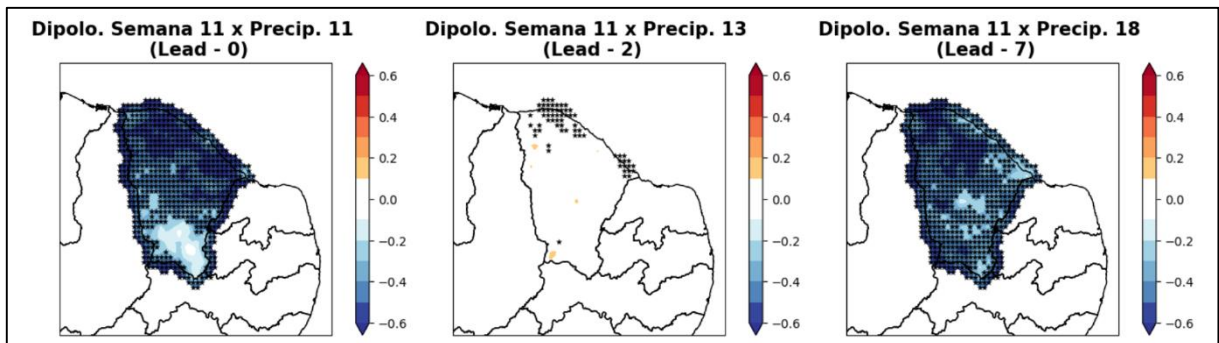
Figura 25 — Comparação espacial entre a anomalia de precipitação do Ceará e a anomalia de TSM do AT de algumas semanas.



Fonte: elaborado pelo autor. Anomalias espaciais de TSM do Atlântico Norte ao lado de anomalias espaciais de precipitação do Ceará. Elaboradas a partir de dados da FUNCEME e da NOAA, para semanas escolhidas somente com o intuito de comparação.

A figura 26 faz uma comparação temporal da correlação espacial entre o Dipolo do Atlântico da semana 11 com as semanas 11, 13 e 18 de precipitação respectivamente. Geograficamente, observa-se uma falta significativa de correlação com a semana 13, em conformidade com as expectativas após a análise do gráfico 13. Além disso, nota-se que as anomalias de precipitação do Norte do estado reagiram mais rapidamente, na maioria dos casos, em relação ao Dipolo da semana 11. Isso é evidenciado pela baixa presença de correlação no setor Sul quando o lead é 0, ao contrário do preenchimento quase que por completo do território quando o lead é 7.

Figura 26 — Comparação espacial da correlação espacial do Dipolo do Atlântico com três semanas de precipitação.



Fonte: elaborado pelo autor. Comparação de três casos de correlação entre o gradiente inter-hemisférico de TSM do Atlântico Tropical e as anomalias de precipitação do Ceará. Cada ponto indica uma correlação com significância estatística.