

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ INSTITUTO DE RECURSOS NATURAIS PROGRAMA DE GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS

ESTUDO DA ZONA DE CONVERGÊNCIA INTERTROPICAL SOBRE O OCEANO ATLÂNTICO POR MEIO DE UM ALGORITMO BASEADO EM PRECIPITAÇÃO

MONOGRAFIA DE GRADUAÇÃO

Natan Chrysostomo de Oliveira Nogueira

Itajubá, MG, Brasil

2024

ESTUDO DA ZONA DE CONVERGÊNCIA INTERTROPICAL SOBRE O OCEANO ATLÂNTICO POR MEIO DE UM ALGORITMO BASEADO EM PRECIPITAÇÃO

por

Natan Chrysostomo de Oliveira Nogueira

Monografia apresentada à comissão examinadora Programa de Graduação em Ciências Atmosféricas da Universidade Federal Itajubá (UNIFEI, MG), como requisito parcial para obtenção do grau de **Bacharel em Ciências Atmosféricas**

Orientador: Michelle Simões Reboita Coorientador: André Luiz dos Reis

> Itajubá, MG, Brasil 2024

Universidade Federal de Itajubá Instituto de Recursos Naturais Programa de Graduação em Ciências Atmosféricas

A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova a Monografia

ESTUDO DA ZONA DE CONVERGÊNCIA INTERTROPICAL SOBRE O OCEANO ATLÂNTICO POR MEIO DE UM ALGORITMO BASEADO **EM PRECIPITAÇÃO**

elaborada por

Natan Chrysostomo de Oliveira Nogueira

Como requisito parcial para a obtenção do grau de

Bacharel em Ciências Atmosféricas

Comissão Examinadora:

Michelle Reboita

Michelle Simões Reboita, Dra. (UNIFEI) (Presidente/Orientador)

André Luiz dos Reis, Dr. (INPE) (Coorientador)

Enrique Vieira Mattes Enrique Vieira Mattos, Dr. (UNIFEI)

3 awalki

Vanessa Silveira Barreto Carvalho, Dra. (UNIFEI)

Itajubá, 24 de junho de 2024.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus pela oportunidade única de poder fazer faculdade de Ciências Atmosféricas numa universidade que nem imaginava, nunca sonhava em estar na UNIFEI ou morar no sul de Minas Gerais. Agradeço muito aos meus pais, Osvaldo e Lilyane, e familiares pelo grande apoio e suporte nessa aventura de mudar de um estado tão longe, Amazonas, e por acreditarem no meu potencial. Também sou muito grato à professora Michelle Simões Reboita por ser mais uma amiga do que orientadora e pelas oportunidades de estudos nessa grande área. Por fim, agradeço muito aos meus amigos da faculdade, Isabelly, Daniela, Jeniffer, Lucas, Matheus, Thiago e vários outros, por me acompanharem nesta caminhada não tão fácil, mas que valeu e vale a pena. Só tenho a agradecer por tudo!

Dedico a todos que se preocupam com o nosso querido planeta Terra.

RESUMO

Monografia de Graduação Programa de Graduação em Ciências Atmosféricas Universidade Federal de Itajubá, MG, Brasil

ESTUDO DA ZONA DE CONVERGÊNCIA INTERTROPICAL SOBRE O OCEANO ATLÂNTICO POR MEIO DE UM ALGORITMO BASEADO EM PRECIPITAÇÃO

AUTOR(A): NATAN CHRYSOSTOMO DE OLIVEIRA NOGUEIRA ORIENTADOR: MICHELLE SIMÕES REBOITA Local e Data da Defesa: Itajubá, 24 de junho de 2024.

A Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) é um sistema atmosférico fundamental em escala global formado pela convergência dos ventos alísios próximo ao equador e atua, principalmente, modulando o clima das regiões costeiras nos trópicos. Existem vários estudos sobre as características gerais da ZCIT usando diferentes abordagens e variáveis atmosféricas, mas poucos se dedicam na região do oceano Atlântico e investigam suas variabilidades. Nesse contexto, o principal objetivo deste estudo é descrever um algoritmo simples baseado em precipitação para identificar as características climatológicas básicas da ZCIT e da banda secundária (posição, largura e intensidade) no oceano Atlântico Tropical no período de 1997 a 2022. Além disso, são investigadas as variabilidades nas características da ZCIT associadas às anomalias de temperatura da superfície do mar (TSM) no Pacífico Tropical (El Niño e La Niña) e no Atlântico Sul Tropical. No setor oeste do oceano Atlântico, a ZCIT e sua banda dupla se estendem para latitudes mais a sul no outono austral. A banda secundária tipicamente ocorre a sul da banda principal e, entre fevereiro e abril, ambas estão mais distantes (~4,5°). Considerando a bacia do Atlântico Tropical, a média anual da posição latitudinal, largura e intensidade da ZCIT é de 4,9°N, 4,2° e 11 mm/dia, respectivamente, enquanto que para a banda secundária é de 0,4°N, 2,6° e 10,3 mm/dia, respectivamente. As anomalias de TSM no oceano Pacífico Tropical afetam mais a largura da ZCIT e as anomalias de TSM no Atlântico Sul Tropical afetam tanto sua posição quanto sua largura. Assim, com uma descrição mais detalhada da ZCIT no oceano Atlântico Tropical, pode-se fornecer informações úteis para estudos destinados a melhorar modelos climáticos globais e regionais, bem como a adaptação do algoritmo para qualquer bacia oceânica, utilizando a precipitação, uma variável globalmente observada.

Palavras-chave: Climatologia. Intensidade. Largura. Posição Latitudinal.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - Exemplificação dos dois casos de ZCIT2
FIGURA 2 - Região de estudo6
FIGURA 3 - Fluxograma dos passos do algoritmo para a identificação da ZCIT9
FIGURA 4 - Esquematização de como funciona o código internamente10
FIGURA 5 - Precipitação média do GPCP superior a 7 mm/dia (colorido), intensidade
e direção do vento a 10 m (m/s, setas pretas) e a posição da ZCIT para a pêntada de
27 a 31 de outubro de 202213
FIGURA 6 - Imagem de satélite GOES-16 do canal visível 02 (0,64 mícrons) para os
dias (a) 27, (b) 28, (c) 29, (d) 30 e (e) 31 de outubro de 2022 às 1200 UTC14
FIGURA 7 - Climatologia sazonal de 1997 a 2022 referente à posição da ZCIT (linhas
contínuas amarelas) e da ZCIT secundária (linhas tracejadas vermelhas) para cada
longitude, bem como o padrão espacial da precipitação > 7 mm/dia (colorido)15
FIGURA 8 - Climatologia sazonal de 1997 a 2022 da largura (em graus) da (a) ZCIT e
da (b) ZCIT secundária para cada longitude17
FIGURA 9 - Desvio-padrão sazonal da precipitação (mm/dia) de 1997 a 202217
FIGURA 10 - Frequência sazonal da ZCIT secundária de 1997 a 202218
FIGURA 11 - Ciclo anual da (a) posição (graus de latitude), (b) largura (graus) e (c)
intensidade (mm/dia) da ZCIT (linhas contínuas amarelas) e da ZCIT secundária
(linhas tracejadas vermelhas) de 1997 a 202220
FIGURA 12 - Posição média mensal (graus de latitude) da ZCIT (linha contínua
amarela) e da ZCIT secundária (linha tracejada vermelha) de 1997 a 202222
FIGURA 13 - Anomalia sazonal de precipitação (mm/dia) em casos de El Niño (coluna
da esquerda) e casos de La Niña (coluna da direita)23
FIGURA 14 - Posição média climatológica (graus) da ZCIT (sombreado de verde),
média dos eventos de El Niño (linha tracejada vermelha) e de La Niña (linha sólida
azul)24
FIGURA 15 - Anomalia sazonal da largura média da ZCIT em (a) eventos de El Niño
(EN) e (b) eventos de La Niña (LN) entre 1997 e 202225
FIGURA 16 - Anomalia sazonal de precipitação (mm/dia) do índice TSA positivo
(coluna da esquerda) e índice TSA negativo (coluna da direita)26
FIGURA 17 - Posição média climatológica (graus) da ZCIT (sombreado em verde),
média durante índice TSA positivo (linha vermelha tracejada) e índice TSA negativo

(linha azul sólida)	28
FIGURA 18 - Anomalia sazonal da largura média da ZCIT em (a) índice	TSA positivo
e (b) índice TSA negativo entre 1997 e 2022	28
FIGURA 19 - Características gerais da ZCIT	31
FIGURA 20 - Características gerais da ZCIT secundária	31

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

- AST Atlântico Sul Tropical
- CDS Climate Data Store
- cont Variável contador

CPTEC-INPE – Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos do Instituto

- Nacional de Pesquisas Espaciais
- DJF Meses de dezembro, janeiro e fevereiro
- ECMWF European Centre for Medium-Range Weather Forecasts
- EN El Niño
- ENOS El Niño-Oscilação Sul
- ERA5 Quinta Geração de Reanálises do ECMWF
- GOES-16 Satélite Geostacionário da parceria entre NOAA e NASA
- GPCP Global Precipitation Climatology Project
- JJA Meses de junho, julho e agosto
- Li Latitude Inicial
- Lf Latitude Final
- LN La Niña
- m Metros
- m/s Metros por segundo
- m s⁻¹ Metros por segundo
- MAM Meses de março, abril e maio
- mm Milímetros
- mm/dia Milímetros por dia
- mm.dia⁻¹ Milímetros por dia
- n Variável número da banda da ZCIT
- NETCDF Network Common Data Form
- Niño 3.4 Região da teleconexão de monitoramento do Pacífico Tropical
- NOAA National Oceanic and Atmospheric Administration
- OI SST V2 Optimum Interpolation Sea Surface Temperature Version 2
- ONI Índice Niño Oceânico
- ROL Radiação de Onda Longa
- SON Meses de setembro, outubro, novembro

- TSA Índice de monitoramento para o oceano Atlântico Sul Tropical
- TSM Temperatura da Superfície do Mar
- u Componente zonal do vento
- UTC Coordenadas Universais de Tempo
- v Componente meridional do vento
- value Variável acumulador de valores
- W m⁻² Watts por metro quadrado
- ZCIT Zona de Convergência Intertropical
- 0000 Z Horário Sinótico das 00 horas UTC
- 1200 Z Horário Sinótico das 12 horas UTC
- ° Graus
- °E Graus Leste
- °N Graus Norte
- °S Graus Sul
- °W Graus Oeste
- °/ano Graus por ano
- < Menor que
- > Maior que
- $\mathbf{x} \mathsf{Por}$
- = Igual
- \neq Diferente
- + Mais
- ~ Aproximadamente

SUMÁRIO

RESUMO	vi
LISTA DE FIGURAS	vii
LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS	ix
1. INTRODUÇÃO	. 1
2. MATERIAL E MÉTODOS	6
2.1. ÁREA DE ESTUDO	. 6
2.2. DADOS	. 6
2.2.1. Precipitação	. 6
2.2.2. Vento	. 7
2.2.3. Índices Climáticos	. 7
2.3. METODOLOGIA	. 7
2.3.1. Descrição do algoritmo para a identificação da ZCIT	. 7
2.3.2. Ideia Geral do algoritmo	. 8
2.3.3. Detalhes técnicos do algoritmo	. 9
2.3.4 Variabilidade da ZCIT	11
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	13
3.1. VALIDAÇÃO DO ALGORITMO	13
3.2. CLIMATOLOGIA SAZONAL DA ZCIT	14
3.3. CLIMATOLOGIA MENSAL DA ZCIT	19
3.4. VARIABILIDADE INTERANUAL DA ZCIT	22
3.4.1. ENOS	22
3.4.2. Indice TSA	25
4. CONCLUSÕES	30
5. REFERENCIAS	33

1. INTRODUÇÃO

A Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) é um sistema atmosférico em grande escala que se origina no ramo ascendente da célula de Hadley (Asnani, 1993). A ZCIT se manifesta perto do equador em vários campos atmosféricos como uma faixa de convergência dos ventos alísios, com mínimos na pressão atmosférica e na radiação de onda longa (ROL), com nuvens convectivas profundas e eventos frequentes de chuva intermitente (Waliser; Gautier, 1993; Waliser; Somerville, 1994; Xie; Philander, 1994; Diaz; Bradley, 2004; Xie; Carton, 2004; Krishnamurti et al., 2013; Aimola; Moura, 2016; Liu et al., 2020; Iyer; Drushka, 2021; Windmiller; Stevens, 2023). Essas características não necessariamente ocorrem simultaneamente e/ou no mesmo local (Aimola; Moura, 2016; Misra, 2023). A posição média anual da ZCIT no globo é encontrada ligeiramente ao norte do equador devido ao transporte de energia do oceano Atlântico para esse setor, fazendo com que o Hemisfério Norte seja mais quente que o Hemisfério Sul (Schneider et al., 2014). No entanto, ao longo das estações do ano, a ZCIT exibe variabilidade espacial, migrando em direção ao hemisfério em que predomina o solstício de verão (Asnani, 1993; Xie; Philander, 1994; Philander *et al.*, 1996).

A nebulosidade associada à ZCIT desempenha um papel crucial no equilíbrio energético atmosférico ao influenciar o albedo e liberar calor latente na atmosfera (Waliser; Gautier, 1993; Bony *et al.*, 2015). Além disso, contribui para o balanço hidrológico, respondendo por 32% da precipitação global (Kang *et al.*, 2018). Enquanto que a ZCIT é bem definida sobre os oceanos, sua caracterização sobre áreas continentais é mais complexa e dentre os fatores que contribuem para essa complexidade, inclui-se a natureza menos homogênea das superfícies continentais e, em alguns casos, a ZCIT faz parte de monções regionais (Misra, 2023). Portanto, considerando áreas continentais, as regiões costeiras são as mais influenciadas pela ZCIT, como é o caso da costa do Nordeste do Brasil (Tomaziello *et al.*, 2016), na qual é influenciada pela ZCIT sobre o oceano Atlântico.

Globalmente, a ZCIT tem uma largura maior no Hemisfério Norte (200–600 km) do que no Hemisfério Sul (~ 300 km) (Khrgian, 1977; OMM, 1986). Sobre o oceano Atlântico, poucos estudos abordam as características climatológicas da ZCIT. Alguns deles incluem: a ZCIT está localizada mais a norte (~ 10°N) em setembro e mais a sul (~ 4°S) entre fevereiro e maio (Hastenrath, 1991; Mendonça; Danni-oliveira, 2007; Carvalho; Oyama, 2013). Ao longo da longitude de 27,5°W, a ZCIT exibe uma largura máxima (6°) entre outubro e novembro e uma largura mínima (3°) entre janeiro e março (Carvalho; Oyama, 2013). Dados observacionais de ROL mostraram que a ZCIT é mais intensa na região central do oceano Atlântico do que perto da costa da América do Sul de julho a dezembro (Kousky, 1988).

A ZCIT, sobre os oceanos Atlântico (Uvo, 1989; Liu; Xie, 2002; Teodoro et al., 2019), Pacífico (Hubert et al., 1969; Zhang, 2001; Henke et al., 2012) e Índico (Meenu et al., 2007) experimenta episódios de bandas duplas. Em outras palavras, há uma banda secundária da ZCIT que se posiciona a sul da banda principal de nuvens. No oceano Atlântico, na climatologia de 2010 a 2017 entre dezembro e abril, esses episódios são mais frequentes durante os meses de março e abril (Teodoro et al., 2019). Liu e Xie (2002) sugerem que a banda secundária é causada pela desaceleração dos ventos superficiais à medida que se aproximam das águas frias de ressurgência perto do equador. Somado a isso, diminuições na mistura vertical e aumentos no cisalhamento vertical do vento na camada limite atmosférica podem contribuir para a desaceleração dos ventos alísios enguanto se movem de águas mais quentes para mais frias. Por outro lado, Talib et al. (2018) mencionam que os controles da localização e intensidade da ZCIT permanecem uma questão fundamental na ciência climática. Como a banda dupla está associada às chuvas intensas e convecção, sua compreensão é crucial para o entendimento das variações na distribuição de chuvas, especialmente nas proximidades de áreas continentais. Para exemplificar, a Figura 1a demonstra um caso de ZCIT e, a Figura 1b, um caso com banda dupla.

Figura 1 – Exemplificação dos dois casos de ZCIT.



Imagem de satélite do GOES-16 para o canal visível 02 (0,64 mícrons): a) caso de ZCIT no dia 22/04/2024 às 1200 Z e b) caso de banda dupla no dia 27/04/2024 às 1200 Z. Fonte: CPTEC-INPE https://satelite.cptec.inpe.br/home/index.jsp adaptado pelo autor.

A localização e intensidade da ZCIT no oceano Atlântico também podem ser influenciadas por mecanismos de interação oceano-atmosfera, como o fenômeno El Niño-Oscilação Sul (ENOS) e anomalias de temperatura da superfície do mar (TSM) no Atlântico Sul Tropical (AST). Berry e Reeder (2014) compararam a posição global da ZCIT durante os eventos El Niño (EN) e La Niña (LN). Sobre o oceano Atlântico, a ZCIT está localizada mais a sul durante os episódios de LN em comparação com os de EN. Um estudo mais regional focado no norte da região Nordeste do Brasil por Xavier *et al.* (2017) mostrou que durante a estação chuvosa na região (de fevereiro a maio), a posição média da ZCIT em anos de LN está entre 2°S e 4°S, o que se alinha com o padrão climatológico. Por outro lado, em anos de EN, a ZCIT migra para norte, se aproximando do equador. Portanto, a migração latitudinal da ZCIT impacta as chuvas na região norte da região Nordeste do Brasil de modo que anos muito chuvosos podem ser influenciados por LN e anos menos chuvosos por EN. No entanto, Liu *et al.* (2020) encontraram pouca variabilidade na ZCIT no oceano Atlântico associada às diferentes fases do ENOS.

Alguns estudos sugerem que a variabilidade da ZCIT sobre o oceano Atlântico, com seu respectivo impacto na costa do Nordeste do Brasil, está mais intimamente ligada às anomalias de TSM no setor AST do que com anomalias de TSM no oceano Pacífico. Anomalias positivas mais intensas no AST do que no Atlântico Tropical Norte implicam em uma migração para o sul da ZCIT, contribuindo para as chuvas na costa da região Nordeste do Brasil (Hastenrath; Greischar, 1993; Reboita; Santos, 2014; Reboita *et al.*, 2021). Outros estudos também enfatizam que a combinação de anomalias negativas no AST simultâneas a eventos de EN afeta a posição da ZCIT, levando a déficits de precipitação no Nordeste do Brasil. Por outro lado, anomalias positivas ocorrem quando há anomalias positivas de TSM no AST e eventos de LN ocorrendo simultaneamente (Pezzi; Cavalcanti, 2001).

Estudos que visam caracterizar as propriedades da ZCIT, como sua localização, largura e intensidade, empregam diversas abordagens e variáveis atmosféricas para a identificação do sistema. Por exemplo, Gadgil e Guruprasad (1990) utilizaram dados diários de 2,5º de ROL e albedo, aplicando limiares: ROL < 185 W m⁻² e albedo > 0,5. Os pontos da grade que satisfaziam essas condições eram retidos apenas se as condições fossem atendidas por pelo menos dois dos oito pontos de grades vizinhas. Berry e Reeder (2014) definiram a ZCIT como o local onde a magnitude do gradiente horizontal de divergência é zero, aplicando técnicas adicionais para refinar sua localização. Liu et al. (2020) definiram a posição da ZCIT com base na precipitação média zonal máxima. A máxima precipitação média zonal entre 20°S e 20°N é considerada a intensidade da ZCIT, e a latitude correspondente é a posição da ZCIT. Uma metodologia semelhante foi usada por Elsemüller e Goswami (2021), os quais quantificaram a posição média latitudinal da ZCIT com base na mínima convergência ao longo das longitudes. Samuel et al. (2023) utilizaram a temperatura de brilho como um proxy para núcleos de nuvens convectivas profundas, associandoa à posição da ZCIT. Carvalho e Oyama (2013) caracterizaram as propriedades da ZCIT através da precipitação em pêntadas (média de 5 dias) ao longo de um período de 10 anos (1999 a 2008) com um espaçamento de grade de dados de 1°, utilizando um limiar de aproximadamente 7 mm/dia para delinear a região de atividade da ZCIT sobre o oceano Atlântico central (27,5ºW).

Embora existam estudos sobre a ZCIT, a maioria deles tem uma perspectiva global, o que difere do presente estudo que se concentra em uma escala regional. Além disso, algumas metodologias para identificar a ZCIT não são muito diretas, ou seja, utilizam mais de uma variável. Como a ZCIT sobre o oceano Atlântico afeta o clima e o tempo da região Nordeste do Brasil, é importante entender suas principais características, bem como a variabilidade associada a alguns dos processos de interação oceano-atmosfera (padrões de teleconexão). Uma descrição mais detalhada da ZCIT sobre o oceano Atlântico também pode fornecer informações úteis para estudos destinados a melhorar modelos climáticos globais e regionais. Assim, o desenvolvimento de um algoritmo simples e eficiente que possa ser adaptado para qualquer bacia oceânica usando uma das variáveis mais observadas globalmente, que é a precipitação, a qual é de extrema utilidade. Portanto, os objetivos deste estudo são: (1) descrever o desenvolvimento de um algoritmo para registrar a posição, largura e intensidade da ZCIT, bem como sua banda dupla; (2) com base na aplicação do algoritmo, apresentar a climatologia das características básicas da ZCIT (posição, largura e intensidade) de 1997 a 2022 e (3) investigar variabilidades nas características da ZCIT associadas a anomalias de TSM no Pacífico Tropical (EN e LN) e no Atlântico Sul Tropical.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo compreende a região do oceano Atlântico Tropical situada entre 10°S–18°N e 49°W–10°W, conforme definido anteriormente por Carvalho e Oyama (2013, caixa azul na Figura 2). A Figura 2 também mostra duas regiões, Niño 3.4 (marcada com uma caixa vermelha) e AST (marcada com uma caixa verde), que são usadas para calcular anomalias de TSM para analisar seu impacto nas características da ZCIT.

Figura 2 - Região de estudo.



Região de estudo (caixa azul) áreas usadas para calcular o AST (caixa verde) e os índices Niño 3.4 (caixa vermelha). A climatologia da precipitação anual (mm/dia) do *Global Precipitation Climatology Project* (GPCP, Adler *et al.*, 2017) de 1997 a 2022 é mostrada em colorido (valores menores em tons de amarelo e maiores em azul). Fonte: Autor.

2.2. DADOS

2.2.1. Precipitação

Os dados de precipitação diária de 1997 a 2022 utilizados neste estudo foram obtidos do *Global Precipitation Climatology Project* (GPCP, Adler *et al.*, 2017) do *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA). Esses dados têm uma

resolução horizontal de 1° × 1° e podem ser acessados em: https://www.ncei.noaa.gov/products/climate-data-records/precipitation-gpcp-daily.

2.2.2. Vento

Os componentes horizontais do vento diário (zonal, u, e meridional, v) às 0000 Z a 10 metros acima do nível do solo foram obtidos da reanálise ERA5 (Hersbach *et al.*, 2020). O ERA5 possui uma resolução horizontal de 0,25° × 0,25°, e os dados podem ser acessados através do *Climate Data Store* (CDS): https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-singlelevels?tab=overview.

2.2.3. Índices Climáticos

Neste estudo, foram utilizados dois índices climáticos: o Índice Niño Oceânico (ONI) e o índice TSA. As diferentes fases do ENOS foram identificadas através do ONI, que é calculado com dados mensais da NOAA dentro da região Niño 3.4 (Figura disponível 1), е está em: https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php. O índice TSA, um índice de monitoramento para o oceano Atlântico Sul Tropical (Figura 1), foi calculado usando a reanálise do NOAA Optimum Interpolation (OI) SST V2 (https://psl.noaa.gov/data/gridded/data.noaa.oisst.v2.html). Este conjunto de dados possui uma resolução horizontal de 1° x 1°. O índice TSA foi obtido da seguinte forma: primeiro, é calculada a média mensal da TSM e sua anomalia na caixa 30°W-10°E, 20°S–0° (Figura 1). Devido a tendência positiva exibida por esta série temporal obtida, a tendência é removida. O resultado final é o índice TSA.

2.3. METODOLOGIA

2.3.1. Descrição do algoritmo para a identificação da ZCIT

Embora existam diferentes formas para identificar a ZCIT, o objetivo foi desenvolver uma metodologia simples que fosse fácil de aplicar e usada por outros pesquisadores interessados no assunto. Assim, o algoritmo descrito abaixo é uma

adaptação da metodologia de Carvalho e Oyama (2013), os quais identificaram a ZCIT em uma única faixa longitudinal sobre o oceano Atlântico Tropical central. O algoritmo é escrito em Python, utilizando apenas dados diários de precipitação convertidos em pêntadas e está disponível gratuitamente na plataforma GitHub: https://github.com/CATUnifei/ITCZ_code. A variável precipitação possui um dos maiores números de observações e estimativas globalmente, sendo usada em diversos estudos para identificação da ZCIT (Carvalho; Oyama, 2013; Liu *et al.*, 2020).

2.3.2. Ideia Geral do algoritmo

 O processo começa lendo os dados diários de precipitação em milímetros (mm) no formato NETCDF e transformando os dados diários em pêntadas (médias de 5 dias). Isso permite a remoção de perturbações de alta frequência relacionadas às flutuações diárias (Carvalho; Oyama, 2013).

2) O segundo passo é definir o limiar de precipitação que será aplicado em cada ponto da grade para identificar a ZCIT. Foi definido como limiar a precipitação média durante todo o período do conjunto de dados na área de estudo (Figura 2) mais um desvio-padrão (limiar = média + um desvio-padrão). Os valores obtidos foram 3 mm/dia para a média e 4 mm/dia para o desvio-padrão, resultando em um limiar de 7 mm/dia. É um limiar flexível que o usuário pode configurar como média de um período específico, sendo útil em estudos de mudanças climáticas.

3) Pontos da grade com precipitação maior que o limiar (> 7 mm/dia) são codificados com o número 1 (verdadeiro), caso contrário, com o número 0 (falso). Essas informações são armazenadas e permitirão a identificação das latitudes iniciais (*Li*) e finais (*Lf*) (detalhes técnicos são fornecidos abaixo).

4) Como os dados estão em pontos da grade, uma função é criada para ler suas informações em todas as latitudes. A varredura dos dados começa na longitude mais a oeste e em latitudes de norte a sul (Figura 4); após a varredura e identificação de *Li* e *Lf* da banda da ZCIT, o algoritmo passa para a próxima longitude. Duas listas vazias e três variáveis de controle são criadas, respectivamente, para armazenar (a) *Li* e (b) *Lf*, e (c) um contador (*cont*), (d) um acumulador de valores (*value*) e (e) o número da banda da ZCIT (*n*). Essa última informação é porque uma banda dupla da ZCIT também pode ocorrer. Para considerar que existe uma banda da ZCIT, ela deve ter uma largura mínima de 2° de latitude (2 pontos da grade) onde a precipitação está

acima do limiar, ou seja, para cada dois "1" consecutivos na coluna, o código registra uma banda da ZCIT.

Este algoritmo se destaca por identificar tanto as bandas primárias quanto as secundárias da ZCIT. Seus passos são representados no fluxograma da Figura 3. Em relação aos aspectos técnicos do código, uma breve descrição é apresentada a seguir.

2.3.3. Detalhes técnicos do algoritmo

Inicialmente, as variáveis *cont*, *value* e *n* são definidas como zero; no início do processo, 1 é adicionado a *cont*, e o booleano (0 ou 1) da matriz é adicionado ao *value*. Depois disso, existem quatro situações:

1) Se value = 1, Li é registrado, e a operação continua;

2) Se value ≠ cont e value = 1, indica que não há continuação da banda da ZCIT porque falta o requisito de ter 2 pontos da grade, então cont e value são definidos como zero para continuar a análise;

 3) Se value ≠ cont e value = 0, verifica-se que a banda da ZCIT terminou, e cont e value são definidos como zero para a próxima análise;

4) Se value \neq cont e value > 1, a latitude anterior é registrada em *Lf*, pois a análise parou uma latitude adiante, e "1" é adicionado a *n* para indicar que a primeira banda da ZCIT foi encontrada. *Cont* e value são redefinidos como zero novamente para caso a segunda banda da ZCIT possa ser encontrada na mesma longitude (coluna). A função então retorna os valores de *Li* e *Lf* para serem armazenados em duas "arrays" para o mesmo número de banda da ZCIT.

Figura 3 - Fluxograma dos passos do algoritmo para a identificação da ZCIT.



Fonte: Autor.

Na Figura 4, é mostrado como o código funciona e armazena os dados internamente para um determinado tempo, sendo as linhas, as latitudes, as colunas, as longitudes e o sentido da varredura dos dados, da latitude mais a norte até mais a sul e da longitude mais a oeste até mais a leste. Os guadrados azuis (Figura 4a) demonstram a precipitação dos pontos de grade acima do limiar e os quadrados não preenchidos (em branco) demonstram os pontos de grade abaixo do limiar, já na Figura 4b, é como o código identifica se a precipitação está acima do limiar (código 1) ou abaixo do limiar (código 0). Na coluna da longitude 40°W, por exemplo, percebese que foi encontrada a ZCIT primária (n=1) entre as latitudes de 1°N e 0°, o que está dentro do critério de ter pelo menos 2 pontos de grade consecutivos, chegando na latitude 1°S, o código percebe que não há continuação da ZCIT e registra Li e Lf da banda primária, respectivamente. Além disso, também é identificada a banda secundária (n=2) entre as latitudes de 2°S (Li) e 3°S (Lf). Após isso, o código continua fazendo o processo de varredura, porém, neste exemplo, quando este percorre na coluna da longitude 36°W, não é encontrada nenhuma banda da ZCIT, pois não há pelo menos 2 pontos de grade consecutivos, apenas 1 ponto de grade na latitude 1°S.

Figura 4 – Esquematização de como funciona o código internamente.



Figura esquematizando como o código guarda as informações: a) quadrados azuis representam a chuva acima do limiar e quadrados não preenchidos abaixo do limiar e b) número 1 representa a chuva acima do limiar e número 0 abaixo do limiar. Fonte: Autor.

Com a saída, o algoritmo fornece, para cada pêntada e longitude, a latitude inicial (*Li*) e final (*Lf*) das bandas primárias e secundárias da ZCIT, representando a sua posição. A partir dessas informações, é possível obter a largura de cada banda em graus (módulo de *Lf* menos *Li*) e sua posição média (*Li* mais *Lf* dividido por 2). A intensidade da ZCIT é calculada pela média de todos os pontos da grade entre *Li* e *Lf* para cada longitude. Com base na saída do algoritmo em pêntadas, podem ser calculadas climatologias mensais, sazonais e anuais. Neste estudo, o foco são as climatologias sazonais (posição, largura e intensidade da ZCIT).

2.3.4 Variabilidade da ZCIT

Também foram analisadas as características da ZCIT durante os episódios de EN e LN e em diferentes fases do índice TSA. Os meses com ocorrência de eventos de EN e LN foram selecionados na série temporal do ONI e separados pela estação do ano. A tabela ONI fornecida pela NOAA também inclui a classificação dos períodos de EN e LN. O próximo passo foi calcular as características médias da ZCIT durante esses períodos sazonais com ocorrências de EN e LN e compará-las com a climatologia das estações. A mesma metodologia foi aplicada para analisar as anomalias de TSM na região do AST, exceto pela classificação das fases negativa e positiva do índice TSA. Para isso, primeiro foi calculado o desvio-padrão da série temporal. Em seguida, selecionou-se apenas os meses com um índice TSA inferior (superior) a um desvio-padrão para índice negativo (positivo).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. VALIDAÇÃO DO ALGORITMO

Antes de aplicar o algoritmo em qualquer estudo, é necessário avaliar seu desempenho. A validação foi realizada comparando os resultados do algoritmo com o mapa espacial de precipitação, vetores de vento a 10 metros de altura e imagens de satélite. Um exemplo é fornecido para a pêntada de 27 a 31 de outubro de 2022 (escolhida aleatoriamente; Figuras 5 e 6). Como as imagens de satélite não são fornecidas em pêntadas, mas em vários horários ao longo do dia, cinco imagens do satélite GOES-16 no canal visível foram selecionadas, uma para cada dia da pêntada, às 1200 UTC (Figura 6).

Figura 5 - Precipitação média do GPCP superior a 7 mm/dia (colorido), intensidade e direção do vento a 10 m (m/s, setas pretas) e a posição da ZCIT para a pêntada de 27 a 31 de outubro de 2022.



As posições iniciais (*Li*) e finais (*Lf*) da ZCIT são indicadas por linhas amarelas. A posição média (°) e a largura média (°) da ZCIT são exibidas no canto inferior direito da figura. Fonte: Autor.

Na Figura 5, a banda com precipitação superior a 7 mm/dia está posicionada entre 5° a 10°N e 50° a 20°W, coincidindo com a região onde os ventos alísios

convergem (setas maiores apontando para o sul e encontrando setas menores) e com a região de máxima nebulosidade mostrada nas imagens de satélite (Figura 6). O resultado do algoritmo é representado pelas duas linhas amarelas delimitando *Li* e *Lf* da ZCIT (Figura 5). O algoritmo captura bem a localização da chuva e não mostra informações entre as longitudes 20° a 13°W, onde não há precipitação e os ventos também são fracos (Figura 5). Com *Li* e *Lf*, a largura da ZCIT pode ser estimada em aproximadamente 5° (~ 500 km), consistente com as imagens de satélite e também com outros estudos (Khrgian, 1977; Carvalho; Oyama, 2013).

Figura 6 - Imagem de satélite GOES-16 do canal visível 02 (0,64 mícrons) para os dias (a) 27, (b) 28, (c) 29, (d) 30 e (e) 31 de outubro de 2022 às 1200 UTC.



Fonte: https://satelite.cptec.inpe.br adaptado pelo autor.

3.2. CLIMATOLOGIA SAZONAL DA ZCIT

Nesta seção, a climatologia sazonal (Figuras 7 e 8) da posição (*Li*, *Lf* e posição média), largura e intensidade da banda principal da ZCIT (que será denominada apenas de ZCIT) e da banda secundária são apresentadas. As Figuras 7 e 8 também mostram a variabilidade espacial dessas características.

Em MAM, a ZCIT atinge sua posição mais a sul na maior parte do oceano Atlântico Tropical, com uma posição média de 1,4°N (Figura 7b). Nesta mesma estação, no setor ocidental do domínio, a ZCIT está localizada entre 2°N (*Li*) e 4°S (*Lf*), afetando diretamente as regiões Norte e Nordeste do Brasil. Enquanto isso, no centro do Atlântico Tropical (27,5°W), a posição média está em torno de 1°N, consistente com Carvalho e Oyama (2013). A banda secundária também ocupa sua posição mais a sul em MAM no setor ocidental do domínio (Li = 2°S, Lf = 5°S e média = 3,5°S) (Figura 7b). A largura média da ZCIT e da banda secundária é de 4,14° e 2,44° (Figuras 8a e 8b), respectivamente, sendo a ZCIT mais larga do que nas outras estações a oeste de 40°W. A intensidade da ZCIT e da banda secundária e t*L i e Lf*, Figuras 8c e 8d). Espacialmente, em MAM, a precipitação apresenta volumes mais altos a oeste de 30°W, perto das regiões Norte e Nordeste do Brasil, o que está de acordo com Kousky (1988). Além disso, essas áreas também exibem maior desviopadrão (Figura 9b).

Figura 7 - Climatologia sazonal de 1997 a 2022 referente à posição da ZCIT (linhas contínuas amarelas) e da ZCIT secundária (linhas tracejadas vermelhas) para cada longitude, bem como o padrão espacial da precipitação > 7 mm/dia (colorido).



(a) DJF, (b) MAM, (c) JJA, (d) SON. A posição média (°) da ZCIT e da banda secundária são exibidas no canto inferior direito dos painéis. Fonte: Autor.

Em JJA, a ZCIT migra para norte, posicionando-se em uma média de cerca de 7,4° (Figura 7c). É durante esta estação que ela atinge sua posição mais a norte perto do continente africano ($Li = 12^{\circ}N e Lf = 6^{\circ}N$) e no Atlântico central ($Li = 9^{\circ}N e Lf = 5^{\circ}N$), consistente com Carvalho e Oyama (2013), os quais identificaram a posição mais a norte da ZCIT em aproximadamente 8°N em agosto. A banda secundária também migra para norte (posição média de 1,4°N), mas não exibe um padrão zonal como a ZCIT (Figura 7c). A largura média da ZCIT e da banda secundária é de aproximadamente 4,4° e 2,6° (Figuras 8a e 8b), respectivamente, enquanto que a precipitação média é de 11,6 e 10,7 mm/dia (Figuras 8c e 8d). Em JJA, os maiores volumes de precipitação e desvio-padrão ocorrem no Atlântico central e oriental dentro da faixa de latitude de 4° a 8°N. Os acumulados diários chegam a 13 mm/dia (Figuras 7c e 7c) com um desvio-padrão excedendo 6 mm/dia (Figura 9c).

Em SON, a ZCIT atinge sua posição mais a norte no Atlântico ocidental ($Li = 12^{\circ}$ N e $Lf = 8^{\circ}$ N) e começa a migrar para sul no lado oriental ($Li = 10^{\circ}$ N e $Lf = 5^{\circ}$ N). Sua posição média, considerando todo o Atlântico, é de 8°N (Figura 7d). Em SON, a banda secundária também se posiciona mais a norte (5,5°N). No entanto, no setor ocidental do Atlântico, a banda secundária apresenta uma inclinação para sudoeste, afetando partes das regiões Norte e Nordeste do Brasil (Figura 7d). A largura média da ZCIT e da banda secundária é de aproximadamente 4,6° e 3,2° (Figuras 8a e 8b), respectivamente. Na longitude 27,5°W, a ZCIT tem uma largura de 5° (~500 km), que é um grau menor comparado a Carvalho e Oyama (2013). Esta diferença pode estar associada ao período de estudo e às diferentes bases de dados usadas nos trabalhos. A intensidade da ZCIT e da banda secundário a distribuição espacial da precipitação, os maiores acumulados e desvios-padrão são registrados entre 40°W e 25°W e 4° e 8°N, com valores de 11–12 mm/dia (Figura 7d) e 6 mm/dia, respectivamente (Figura 9d).

Em DJF, a ZCIT e a banda secundária começam a migrar para sul, com posições médias de 2,7°N e 1,7°S, respectivamente (Figura 7a). Durante esta estação, a banda secundária não consegue se configurar a leste de 25°W (Figura 7a). A largura média da ZCIT e da banda secundária é de 3,5° e 2,2°, respectivamente (Figuras 8a e 8b), enquanto a intensidade é de 10,6 e 10,1 mm/dia, respectivamente (Figuras 8c e 8d). Além disso, em DJF, na longitude de 27,5°W, a largura da ZCIT de 3° se alinha com o estudo de referência (Carvalho; Oyama, 2013). Espacialmente, a

precipitação oceânica é máxima entre 45° e 30°W e 0° e 7°N (Figura 7a), coincidindo com a região de maior desvio-padrão (> 6 mm/dia, Figura 9a). Ao longo da costa brasileira, a precipitação exibe os maiores volumes e desvio-padrão em MAM, seguido por DJF (Figuras 8 e 9). Esse maior desvio-padrão pode estar associado à variabilidade de sistemas transientes em larga escala que afetam a região, como distúrbios de ondas de leste, vórtices ciclônicos de níveis superiores e entre outros (Uvo, 1989; Coelho, 2002; Carvalho; Oyama, 2013; Gomes *et al.*, 2019; Ferreira *et al.*, 2019).

Figura 8 - Climatologia sazonal de 1997 a 2022 da largura (em graus) da (a) ZCIT e da (b) ZCIT secundária para cada longitude.



As linhas representam diferentes estações: DJF - linha verde, MAM - linha vermelha, JJA - linha azul e SON - linha amarela. A largura média (°) também é indicada nos painéis. Fonte: Autor.

Figura 9 – Desvio-padrão sazonal da precipitação (mm/dia) de 1997 a 2022.



(a) DJF, (b) MAM, (c) JJA, (d) SON. Fonte: Autor

A frequência sazonal da ZCIT secundária em várias longitudes é representada na Figura 10. Entre 50°W e 42°W, a banda secundária exibe uma frequência mais alta tanto em DJF quanto em MAM, enquanto a leste, em 15°W, é mais frequente entre JJA e SON. A oeste de 30°W, em média, a banda secundária ocorre com mais frequência em MAM, concordando com Teodoro *et al.* (2019), os quais se concentraram apenas em DJF e MAM. Considerando toda a bacia do Atlântico, eventos de ZCIT secundária são ligeiramente mais prevalentes em MAM (2 eventos) em comparação com outras estações.

Figura 10 - Frequência sazonal da ZCIT secundária de 1997 a 2022.



DJF - linha verde, MAM - linha vermelha, JJA - linha azul e SON - linha amarela. Fonte: Autor.

3.3. CLIMATOLOGIA MENSAL DA ZCIT

Para facilitar a comparação dos resultados com aqueles da literatura, também são apresentados os valores climatológicos mensais das características médias (posição, largura e intensidade) tanto para a ZCIT quanto para a banda secundária em toda a bacia do Atlântico Tropical (Figura 11). Além disso, a Figura 12 exibe a série temporal mensal da posição média para as duas bandas da ZCIT com o objetivo de identificar quaisquer tendências nessas séries temporais e enfatizar a distância média entre as duas bandas.

Ambas as bandas da ZCIT alcançam sua posição mais a norte no mês de setembro. A ZCIT mostra *Li* em 12°N, *Lf* em 7,2°N e uma posição média de 9,6°N, enquanto que a banda secundária tem *Li* em 8,8°N, *Lf* em 5,5°N e uma posição média de 7,2°N (Figura 11a). Calculando a diferença entre as posições médias das duas bandas, verifica-se que elas estão distantes por 2,4°. Considerando tanto *Li* quanto *Lf*, a posição mais a sul da ZCIT ocorre em março, com *Li* em cerca de 2,1°N, *Lf* em aproximadamente 1,6°S e uma posição média de aproximadamente 0,24°N. No entanto, ao olhar apenas para *Lf*, a posição mais a sul ocorre tanto em março quanto

em abril. Aplicando os mesmos critérios de *Li* e *Lf*, a ZCIT secundária tem sua posição mais a sul em fevereiro, com *Li* em aproximadamente 3,3°S, *Lf* em cerca de 5,2°S e uma posição média de 4,3°S (Figura 11a). Mas, considerando apenas *Lf*, a posição mais a sul ocorre entre fevereiro e abril. Durante esse período do ano, as duas bandas estão distantes por aproximadamente 4,54°, alinhando-se com o valor climatológico de 4° de dezembro a maio obtido por Teodoro *et al.* (2019). O ciclo anual da posição da ZCIT é consistente com o estudo de Hastenrath (1991) que mostrou a posição da ZCIT nos setores oeste e leste do oceano Atlântico Tropical usando várias variáveis atmosféricas.

A ZCIT tem uma largura maior em agosto e setembro (~4,7°) e uma largura menor em janeiro (~3,4°), enquanto que a banda secundária também exibe uma largura maior em setembro (~3,3°) e uma largura menor em fevereiro (~1,9°) (Figura 11b). Os valores obtidos para a ZCIT são consistentes com a média global para o Hemisfério Sul, que é de aproximadamente 3° (~ 300 km) (Khrgian, 1977).

Figura 11 - Ciclo anual da (a) posição (graus de latitude), (b) largura (graus) e (c) intensidade (mm/dia) da ZCIT (linhas contínuas amarelas) e da ZCIT secundária (linhas tracejadas vermelhas) de 1997 a 2022.



Os valores médios anuais são exibidos no canto superior esquerdo dos painéis. Fonte: Autor.

A intensidade da ZCIT é maior em junho (~11,8 mm/dia) e menor em março (~10,5 mm/dia), enquanto que a ZCIT secundária exibe sua maior intensidade em agosto (~11 mm/dia) e menor intensidade também em março (~9,7 mm/dia) (Figura 11c). Esses resultados estão alinhados com aqueles obtidos por Carvalho e Oyama (2013) para o Atlântico Tropical central. Segundo esses autores, a maior intensidade da ZCIT ocorre entre maio e agosto (~13 mm/dia) e a menor intensidade entre fevereiro e março (~10 mm/dia). Xie e Philander (1994) também destacaram que em julho-agosto, a precipitação na ZCIT é consideravelmente mais forte do que em março-abril, e esse fortalecimento pode estar associado à abundância de fortes

distúrbios de ondas de leste que propagam para oeste, ajudando a desencadear a convecção sobre o oceano.

A série temporal da posição média mensal da ZCIT e da banda secundária exibe uma ligeira tendência para sul, de -0,0036°/ano e -0,02°/ano, respectivamente, mas sem significância estatística (Figura 12). Liu *et al.* (2020) mostraram a série temporal anual da posição da ZCIT em várias localidades globalmente. Para o oceano Atlântico (20°N–20°S e 49°W–9°W), a Figura 3d do estudo de Liu *et al.* (2020) também indica uma tendência ligeiramente negativa entre 1998 e 2018.

Figura 12 - Posição média mensal (graus de latitude) da ZCIT (linha contínua amarela) e da ZCIT secundária (linha tracejada vermelha) de 1997 a 2022.



As tendências lineares também são representadas com linhas tracejadas. Fonte: Autor.

3.4. VARIABILIDADE INTERANUAL DA ZCIT

3.4.1. ENOS

Durante os eventos de EN, a convecção atmosférica se intensifica no Pacífico Tropical central e oriental, levando ao aquecimento da troposfera tropical e à subsidência anômala sobre o Atlântico Tropical, resultando em redução da precipitação (Xie; Carton, 2004). Por outro lado, durante LN, espera-se que haja mais precipitação sobre o Atlântico Tropical. De fato, a Figura 13 confirma o padrão descrito. Além disso, indica que o Nordeste do Brasil é mais impactado pelas fases do ENOS em MAM (Figuras 13c e 13d). Para verificar se esses padrões espaciais de anomalias de precipitação causam mudanças na posição e na largura da ZCIT, são apresentadas as Figuras 14 e 15.

Figura 13 - Anomalia sazonal de precipitação (mm/dia) em casos de El Niño (coluna da esquerda) e casos de La Niña (coluna da direita).



45°W 40°W 35°W 30°W 25°W 20°W 15°W

Fonte: Autor.

Em períodos com EN e LN, a posição média da ZCIT é pouco afetada, mostrando variações inferiores a 0,5° em comparação com o valor climatológico (Figura 14). Por outro lado, quando *Li* e *Lf* são analisados individualmente, há maiores variações, o que afeta a largura da ZCIT (Figura 15). Durante episódios de EN em DJF, Li e Lf, a oeste de 35°W, são deslocados para sul em comparação com o padrão climatológico (Figura 14a). Em MAM, Lf, a oeste de 35°W, é ligeiramente retraído para norte (Figura 14b). Em JJA e SON, Lf também é retraído para norte, mas em uma extensão maior na região central da bacia oceânica (37,5°W a 17,5°W; Figuras 14c e 14d). Em SON, uma diferença é que *Li*, entre 25°W e 17,5°W, é deslocado para norte em relação à climatologia (Figura 14d). Considerando episódios de LN em DJF, a oeste de 30°W, Li e Lf se deslocam para norte em relação à climatologia (Figura 14a). Em MAM, Lf se move para sul entre 40°W e 20°W (Figura 14b). Nas outras estações, Li e Lf apresentam menores diferenças em relação ao padrão climatológico. Com isso, os resultados apoiam parcialmente o que foi encontrado por Berry e Reeder (2014), os quais enfatizaram que durante a estação chuvosa no norte do Nordeste brasileiro, a posição média da ZCIT em episódios de LN se alinha com o padrão climatológico. No entanto, diferem daqueles em episódios de EN; durante episódios de EN, a ZCIT migra para norte, aproximando-se do equador (Berry; Reeder, 2014). Neste caso, uma mudança maior é observada em Lf em vez de em ambas as bordas da ZCIT.

Em resumo, durante eventos de EN, a ZCIT exibe *Lf* ligeiramente retraída para norte em comparação com a climatologia. Em eventos de LN, tanto *Li* quanto *Lf* tendem a ser ligeiramente mais expandidos do que a climatologia. Essas características impactam a largura da ZCIT: durante eventos de EN, a ZCIT é mais estreita, enquanto durante eventos de LN, a ZCIT é mais larga do que na climatologia (Figura 15). A contração da ZCIT em eventos de EN pode chegar a até 0,8° a oeste de 35°W, exceto em SON. Em JJA, a expansão da ZCIT pode atingir 0,6° entre 40°W e 30°W.

Figura 14 - Posição média climatológica (graus) da ZCIT (sombreado de verde), média dos eventos de El Niño (linha tracejada vermelha) e de La Niña (linha sólida azul).



A posição média (°) em todo o Atlântico Tropical é representada no canto inferior direito dos painéis. Fonte: Autor.

Figura 15 - Anomalia sazonal da largura média (em graus) da ZCIT em (a) eventos de El Niño (EN) e (b) eventos de La Niña (LN) entre 1997 e 2022.



A largura média (°) da ZCIT também está exibida nos painéis. Fonte: Autor.

3.4.2. Índice TSA

A Figura 16 mostra o padrão espacial de anomalias de precipitação associadas às diferentes fases do índice TSA. Sobre o oceano, a precipitação da ZCIT é intensificada em seu setor sul e enfraquecida em seu setor norte quando predomina um índice TSA positivo (Figuras 16a, 16c, 16e e 16g). Por outro lado, ocorrem anomalias de precipitação de sinal oposto quando predomina uma fase negativa do índice TSA (Figuras 16b, 16d, 16f e 16h). A Figura 16 também revela que uma grande parte da precipitação nos setores norte e nordeste da região Nordeste do Brasil durante MAM e JJA é influenciada por anomalias de TSM na região do AST.

Uma análise combinada das Figuras 13 e 16 corrobora com os resultados de Reboita *et al.* (2021) e Pezzi e Cavalcanti (2001). Em outras palavras, a fase negativa (positiva) do índice TSA e EN (LN) contribuem para déficits (excessos) de precipitação no Nordeste do Brasil.

Figura 16 - Anomalia sazonal de precipitação (mm/dia) do índice TSA positivo (coluna da esquerda) e índice TSA negativo (coluna da direita).



Fonte: Autor.

A Figura 17 complementa os resultados da Figura 16 ao mostrar as mudanças sazonais na posição da ZCIT de acordo com o padrão dominante de anomalias do índice TSA. Um índice TSA positivo está associado ao deslocamento para sul da ZCIT em todas as estações. No entanto, a posição média da ZCIT está mais deslocada para sul em DJF (0,97°), seguida por JJA (0,72°), em relação à climatologia (Figura 17). A resposta da ZCIT a um índice TSA negativo é um deslocamento para norte, que, em termos da posição média da ZCIT, é maior em MAM (0,88°), seguido por JJA (0,82°).

As anomalias de TSM também afetam a largura da ZCIT. No índice TSA negativo, geralmente, a ZCIT é mais estreita do que a climatologia, exceto em SON entre 40° e 30° W (Figura 18b). Por outro lado, a largura mostra uma maior variabilidade no índice TSA positivo. A ZCIT é mais larga em JJA em todas as longitudes, e a oeste de 40° W em MAM. Por outro lado, a oeste de 25° W, a ZCIT é mais estreita do que a climatologia em DJF (Figura 18a).

Figura 17 - Posição média climatológica (graus) da ZCIT (sombreado em verde), média durante índice TSA positivo (linha vermelha tracejada) e índice TSA negativo (linha azul sólida).



A posição média (°) sobre todo o Atlântico Tropical está representada no canto inferior direito dos painéis. Fonte: Autor.

Figura 18 - Anomalia sazonal da largura média (em graus) da ZCIT em (a) índice TSA positivo e (b) índice TSA negativo entre 1997 e 2022.



A largura média (°) da ZCIT também está exibida nos painéis. Fonte: Autor.

4. CONCLUSÕES

Como a ZCIT é um dos sistemas de precipitação em larga escala que influencia significativamente o clima das regiões tropicais costeiras (Tomaziello *et al.*, 2016; Jafari; Lashkari, 2020; Lashkari; Jafari, 2020), o principal objetivo deste estudo foi apresentar um algoritmo desenvolvido para localizar as bandas primárias e secundárias da ZCIT na bacia do Atlântico. O algoritmo identifica os limites iniciais (*Li*) e finais (*Lf*) das bandas, fornecendo informações para o cálculo da posição média, largura e intensidade de ambas. Esse algoritmo está disponível em uma plataforma aberta (https://github.com/CATUnifei/ITCZ_code) e pode ser facilmente ajustado para aplicações com outras variáveis e em outras bacias oceânicas. O estudo também teve como objetivo apresentar a climatologia das características básicas da ZCIT e da banda secundária (posição, largura e intensidade) de 1997 a 2022, além de investigar as variabilidades nas características da ZCIT associadas às anomalias da TSM no Pacífico tropical (EN e LN) e no AST.

Em MAM, a ZCIT alcança sua posição mais a sul na maior parte do oceano Atlântico Tropical, com uma posição média de 1,4°N. Considerando todo o oceano Atlântico Tropical, a ZCIT mostra uma largura maior (~4,7°) em agosto e setembro e uma intensidade maior (~11,8 mm/dia) em junho, um panorama geral das características da ZCIT é mostrada na Figura 19. Sobre a ZCIT secundária, localiza-se a sul da ZCIT com uma distância média que chega a aproximadamente 4,5° (considerando a posição média de ambas as bandas) entre fevereiro e abril. A oeste de 30°W, a banda secundária ocorre com mais frequência em MAM e tem uma posição média em 1°S, afetando diretamente as regiões do Norte e Nordeste do Brasil. Considerando todo o oceano Atlântico Tropical, a ZCIT secundária mostra uma largura maior (~3,3°) em setembro e uma intensidade maior (~11 mm/dia) em agosto. A Figura 20 mostra as características gerais da ZCIT secundária.

Episódios de EN e LN afetam mais a largura da ZCIT, enquanto anomalias de TSM na região do ATS afetam tanto a posição quanto a largura. Durante os episódios de EN e LN, a posição média da ZCIT é pouco afetada, mas alterações nos limites da ZCIT levam a alterações na largura. Especificamente, durante eventos de EN, a ZCIT é mais estreita, enquanto que durante eventos de LN, a ZCIT é geralmente mais larga do que na climatologia. Considerando o índice do TSA, um índice positivo está associado ao deslocamento para sul da ZCIT em todas as estações, enquanto que

um índice negativo indica um deslocamento para norte. Quanto à largura, a ZCIT geralmente é mais estreita do que na climatologia durante episódios de índice TSA negativo. Por outro lado, a largura apresenta maior variabilidade durante episódios de índice TSA positivo.

Este estudo pode servir como um guia para outros, e destaca-se que é importante investigar o impacto de outros mecanismos de teleconexão nas características da ZCIT e da banda secundária.



Figura 19 – Características gerais da ZCIT.

Fonte: Autor.

Figura 20 – Características gerais da ZCIT secundária.



Fonte: Autor.

REFERÊNCIAS

ADLER, R.F. et al. Global precipitation: Means, variations and trends during the satellite era (1979–2014). **Surveys in Geophysics**, v. 38, p. 679-699, 2017. DOI: https://doi.org/10.1007/s10712-017-9416-4.

AIMOLA, L.; MOURA, M. The influence of the Atlantic Meridional overturning circulation in the definition of the mean position of the ITCZ north of the equator. A review. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 31, p. 555-563, 2016. DOI: https://doi.org/10.1590/0102-778631231 4b20150059.

ASNANI, G.C. **Tropical meteorology.** Indian Institute of Tropical Meteorology: Pune, 1993.

BERRY, G.; REEDER, M.J. Objective identification of the intertropical convergence zone: Climatology and trends from the ERA-Interim. **Journal of Climate**, v. 27, n. 5, p. 1894-1909, 2014. DOI: https://doi.org/10.1175/JCLI-D-13-00339.1.

BONY, S. et al. Clouds, circulation and climate sensitivity. **Nature Geoscience**, v. 8, n. 4, p. 261-268, 2015. DOI: https://doi.org/10.1038/ngeo2398.

CARVALHO, M.A.V.; OYAMA, M.D. Atlantic Intertropical Convergence Zone width and intensity variability: observational aspects. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 28, p. 305-316, 2013. DOI: https://doi.org/10.1590/S0102-77862013000300007.

COELHO, M.S. **Estudo da estrutura vertical e horizontal da precipitação e da circulação atmosférica na região da ZCIT.** 2002. 158 p. (INPE-10287-TDI/906). Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 2002.

DIAZ, H.F.; BRADLEY, R.S. The Hadley circulation: present, past, and future: an introduction. In: **The Hadley circulation: present, past and future**. Dordrecht: Springer Netherlands, 2004. p. 1-5. DOI: https://doi.org/10.1007/978-1-4020- 2944-8_1.

FERREIRA, G.W.S.; REBOITA, M.S.; DA ROCHA, R.P. Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis nas Cercanias do Nordeste do Brasil: Climatologia e Análise da Vorticidade Potencial Isentrópica. **Anuário do Instituto de Geociências**, v. 42, n. 3, 2019. DOI: https://doi.org/10.11137/2019_3_568_585.

ELSEMÜLLER, L; GOSWAMI, B. Quantifying the ITCZ using wind convergence. In: **EGU General Assembly Conference Abstracts**. 2021. p. EGU21-8187. DOI: https://doi.org/10.5194/egusphere-egu21-8187.

GADGIL, S.; GURUPRASAD, A. An objective method for the identification of the intertropical convergence zone. **Journal of climate**, v. 3, n. 5, p. 558-567, 1990. DOI: https://doi.org/10.1175/1520-0442(1990) 0032.0.CO;2.

GOMES, H.B. et al. Climatology of easterly wave disturbances over the tropical South Atlantic. **Climate Dynamics**, v. 53, p. 1393-1411, 2019. DOI: https://doi.org/10.1007/s00382-019-04667-7.

HASTENRATH, S. **Climate dynamics of the tropics**. Springer Science & Business Media, 1991.

HASTENRATH, S.; GREISCHAR, L. Circulation mechanisms related to northeast Brazil rainfall anomalies. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 98, n. D3, p. 5093-5102, 1993. DOI: https://doi.org/10.1029/92JD02646.

HENKE, D. et al. Automated analysis of the temporal behavior of the double Intertropical Convergence Zone over the east Pacific. **Remote Sensing of Environment**, v. 123, p. 418-433, 2012. DOI: https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.03.022.

HERSBACH, H. et al. The ERA5 global reanalysis. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 146, n. 730, p. 1999-2049, 2020. DOI: https://doi.org/10.1002/qj.3803.

HUBERT, L.F.; KRUEGER, A.F.; WINSTON, J.S. The double intertropical convergence zone-fact or fiction?. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 26, n. 4, p. 771-773, 1969. DOI: https://doi.org/10.1175/1520-0469(1969) 0262.0.CO;2

IYER, S.; DRUSHKA, K. Turbulence within rain-formed fresh lenses during the SPURS-2 experiment. **Journal of Physical Oceanography**, v. 51, n. 5, p. 1705-1721, 2021. DOI: https://doi.org/10.1175/JPO-D-20-0303.1.

KANG, S.M.; SHIN, Y.; XIE, S. Extratropical forcing and tropical rainfall distribution: energetics framework and ocean Ekman advection. **npj Climate and Atmospheric Science**, v. 1, n. 1, p. 20172, 2018. DOI: https://doi.org/10.1038/s41612-017-0004-6.

KRISHNAMURTI, T.N.; STEFANOVA, L.; MISRA, V. **Tropical meteorology**. Secretariat of the World Meteorological Organization, 1979.

KHRGIAN, A. Physical meteorology. In: Danilina, I.P. Meteorology and climatology -Boston, MA: G.K. Hall, 1977 2 26674066 (Geophysics Series) ISBN I Summarie of Scientific Progress. Cap. 1, p. 1-18, 1977.

KOUSKY, V.E. Pentad outgoing longwave radiation climatology for the South American sector. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 3, n. 1, p. 217-231, 1988.

LIU, W.T.; XIE, X. Double intertropical convergence zones—A new look using scatterometer. **Geophysical Research Letters**, v. 29, n. 22, p. 29-1-29-4, 2002. DOI: https://doi.org/10.1029/2002GL015431.

LIU, C. et al. Observed variability of intertropical convergence zone over 1998—2018. **Environmental Research Letters**, v. 15, n. 10, p. 104011, 2020. DOI: https://doi.org/10.1088/1748-9326/aba033.

MEENU, S. et al. Characteristics of the double intertropical convergence zone over the tropical Indian Ocean. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 112, n. D11, 2007. DOI: https://doi.org/10.1029/2006JD007950.

MENDONÇA, F.; DANNI-OLIVEIRA, I. M. Climatology: basic notions and Brazil climates. **São Paulo: Oficina de Textos**, 2007.

MISRA, V. Intertropical Convergence Zone. In: **An Introduction to Large-Scale Tropical Meteorology**. Cham: Springer International Publishing, 2023. p. 91-109. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031- 12887-5_4.

OMM – Organização Mundial Meteorológica. **Monsoons**, [1986]. Disponível em: https://library.wmo.int/idurl/4/37019. Acesso em: 26 abr. 2024.

PEZZI, L.P.; CAVALCANTI, I.F.A. The relative importance of ENSO and tropical Atlantic sea surface temperature anomalies for seasonal precipitation over South America: a numerical study. **Climate Dynamics**, v. 17, n. 2, p. 205-212, 2001. DOI: https://doi.org/10.1007/s003820000104.

PHILANDER, S.G.H. et al. Why the ITCZ is mostly north of the equator. **Journal of climate**, v. 9, n. 12, p. 2958-2972, 1996. DOI: https://doi.org/10.1175/1520-0442 (1996)0092.0.CO;2.

REBOITA, M.S.; SANTOS, I.A. Influência de alguns padrões de teleconexão na precipitação no norte e nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 15, 2014. DOI: https://doi.org/10.5380/abclima. v15i0.37686.

REBOITA, M.S. et al. Impacts of teleconnection patterns on South America climate. **Annals of the New York Academy of Sciences**, v. 1504, n. 1, p. 116-153, 2021. DOI: https://doi.org/10.1111/nyas.14592.

SAMUEL, S.; MATHEW, N.; SATHIYAMOORTHY, V. Characterization of intertropical convergence zone using SAPHIR/Megha-Tropiques satellite brightness temperature data. **Climate Dynamics**, v. 60, n. 11, p. 3765-3783, 2023. DOI: https://doi.org/10.1007/s00382-022-06549-x.

SCHNEIDER, T.; BISCHOFF, T.; HAUG, G.H. Migrations and dynamics of the intertropical convergence zone. **Nature**, v. 513, n. 7516, p. 45-53, 2014. DOI: https://doi.org/10.1038/nature13636.

TALIB, J. et al. The role of the cloud radiative effect in the sensitivity of the intertropical convergence zone to convective mixing. **Journal of Climate**, v. 31, n. 17, p. 6821-6838, 2018. DOI: https://doi.org/10.1175/JCLI-D-17-0794.1.

TEODORO, T.A., REBOITA, M.S., ESCOBAR, G.C.J. Characterization of the double band of the Intertropical Convergence Zone (ITCZ) over the Atlantic Ocean. **Yearbook of the Institute of Geosciences**, v. 42, n. 2, p. 282–298, 2019. DOI: https://doi.org/10.11137/2019_2_282_298.

TOMAZIELLO, A.C.N.; CARVALHO, L.M.V.; GANDU, A.W. Intraseasonal variability of the Atlantic Intertropical Convergence Zone during austral summer and winter. **Climate Dynamics**, v. 47, p. 1717-1733, 2016.

UVO, C.R.B. A zona de convergência Intertropical (ZCIT) e sua relação com a precipitação da Região Norte do Nordeste Brasileiro. 1989. Dissertação (Programa de Pós-Graduação do INPE em Meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), 1989.

WALISER, D.E.; GAUTIER, C. A satellite-derived climatology of the ITCZ. **Journal of climate**, v. 6, n. 11, p. 2162-2174, 1993. DOI: https://doi.org/10.1175/1520-0442(1993) 0062.0.CO;2.

WALISER, D.E.; SOMERVILLE, Richard CJ. Preferred latitudes of the intertropical convergence zone. **Journal of Atmospheric Sciences**, v. 51, n. 12, p. 1619-1639, 1994. DOI: https://doi.org/10.1175/1520-0469(1994) 0512.0.CO;2.

WINDMILLER, J.M.; STEVENS, B. The inner life of the Atlantic Intertropical Convergence Zone. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 150, n. 758, p. 523-543, 2023. DOI: https://doi.org/10.1002/qj.4610.

XAVIER, T.M.B.; AMBRIZZI, T.; SILVA, M.E.S. Aplicações de modelos e técnicas na detecção de variabilidade no clima e extremos, 2017.

XIE, S.; CARTON, J. A. Tropical Atlantic variability: Patterns, mechanisms, and impacts. **Earth's Climate: The Ocean–Atmosphere Interaction, Geophys. Monogr**, v. 147, p. 121-142, 2004. DOI: https://doi.org/10.1029/147GM07.

XIE, S.; PHILANDER, S.G.H. A coupled ocean-atmosphere model of relevance to the ITCZ in the eastern Pacific. **Tellus A**, v. 46, n. 4, p. 340-350, 1994. DOI: https://doi.org/10.3402/tellusa.v46i4.15484.

ZHANG, C. Double ITCZs. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 106, n. D11, p. 11785-11792, 2001. DOI: https://doi.org/10.1029/2001JD900046.