



MARINHA DO BRASIL  
DIRETORIA DE HIDROGRAFIA E NAVEGAÇÃO  
CENTRO DE INSTRUÇÃO E ADESTRAMENTO ALMIRANTE RADLER DE AQUINO  
CURSO DE APERFEIÇOAMENTO EM HIDROGRAFIA PARA OFICIAIS

INFLUÊNCIA REMOTA DA TSM DO ATLÂNTICO SUDOESTE NO POSICIONAMENTO DA  
ZONA DE CONVERGÊNCIA DO ATLÂNTICO SUL (ZCAS)

2º Ten. VINICIUS BATISTA da Silva

Niterói-RJ, Brasil

Outubro, 2023

Vinicius Batista da Silva

INFLUÊNCIA REMOTA DA TSM DO ATLÂNTICO SUDOESTE NO POSICIONAMENTO DA  
ZONA DE CONVERGÊNCIA DO ATLÂNTICO SUL (ZCAS)

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao corpo docente e técnico do Centro de Instrução e Adestramento Almirante Radler de Aquino da Marinha do Brasil (CIAARA/MB), como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Oficial Hidrógrafo.

Orientadora: Prof. Dra. Fabíola Valéria Barreto  
Teixeira

Niterói - RJ

Outubro, 2023

Silva, Vinicius Batista da.

Influência remota da TSM do Atlântico Sudoeste no posicionamento da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) / Vinicius Batista da Silva. – Rio de Janeiro: MB/CIAARA, 2023.

xii, 64 f.: il. color.; 29,7 cm.

Orientador: Fabíola Valéria Barreto Teixeira.

Monografia – MB/CIAARA Curso de Aperfeiçoamento em Hidrografia para Oficiais, 2023.

Referências Bibliográficas: p. 60-64.

1. ZCAS. 2. TSM. 3. Atlântico Sudoeste. I. Teixeira, Fabíola Valéria Barreto II. Centro de Instrução e Adestramento Almirante Radler de Aquino, CIAARA, Curso de Aperfeiçoamento em Hidrografia para Oficiais. III. Influência remota da TSM do Atlântico Sudoeste no posicionamento da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS).

INFLUÊNCIA REMOTA DA TSM DO ATLÂNTICO SUDOESTE NO POSICIONAMENTO DA  
ZONA DE CONVERGÊNCIA DO ATLÂNTICO SUL (ZCAS)

Vinicius Batista da Silva

MONOGRAFIA SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE E TÉCNICO DO CENTRO DE  
INSTRUÇÃO E ADESTRAMENTO ALMIRANTE RADLER DE AQUINO DA  
MARINHA DO BRASIL (CIAARA/MB) COMO PARTE DOS REQUISITOS  
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE OFICIAL HIDRÓGRAFO.

Examinada por:

---

Prof. Fabíola Valéria Barreto Teixeira, D.Sc.

---

CF Daniel PEIXOTO de Carvalho, M.Sc.

---

CC MARCUS VINICIUS Mendes, M.Sc.

NITERÓI, RJ - BRASIL

OUTUBRO DE 2023

## Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus, por me guiar em todos os momentos da minha vida, por me dar sempre a possibilidade de ser uma pessoa melhor e por me usar como instrumento de suas obras. A Ele, agradeço por todas as minhas conquistas e vitórias, sobretudo por cuidar de mim e das pessoas que eu tanto amo.

À Virgem Maria por interceder pelos meus pedidos e encaminhá-los para Jesus.

À minha mãe, por ser a minha companheira de toda a vida. Aquela que enfrentou todas as dificuldades possíveis e impossíveis para que eu pudesse chegar até aqui.

À minha família, por todo apoio e pelo entendimento ante os inúmeros momentos em que fui ausente não só neste ano, mas nos últimos dez também.

Aos meus amigos, que sempre me apoiaram e incentivaram a chegar até aqui. Agradeço por tantas alegrias e aprendizados coletados em toda essa caminhada.

Ao Comandante Eduardo Almeida por, em 2015, me apresentar a Hidrografia ainda no Colégio Naval e por, cordialmente, ter colaborado com a minha formação profissional e de caráter.

Agradeço especialmente à Professora Doutora Fabíola, por toda orientação, paciência e direcionamentos que tornaram possível a execução deste trabalho. Muito obrigado por toda parceria e por tantos ensinamentos.

Aos mestres e a toda administração do CIAARA pelo apoio e ensinamentos fundamentais para a carreira do Oficial Hidrógrafo.

Agradeço ao SMM e, em especial, ao 1T Romão por disponibilizar resultados e figuras que foram importantes para a caracterização dos eventos de ZCAS.

Por fim, agradeço a todos que direta ou indiretamente me motivaram a seguir a distinta carreira da Hidrografia. Conversas, jantares, jogos de futebol, terapias, brincadeiras... tudo foi fundamental para que eu conseguisse concluir este difícil desafio. Não foram poucas as situações em que levei um puxão de orelha, uma palavra de motivação, orações e até mesmo reconciliações que foram fatores *sine qua non* para conseguir sustentar este árduo ano e este distinto curso.

## RESUMO

Neste estudo é investigada a complexa interação entre a Temperatura da Superfície do Mar (TSM) do oceano Atlântico Sudoeste na região da Confluência Brasil-Malvinas e a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS). Essa interação desempenha um papel importante na dinâmica da precipitação da América do Sul, uma vez que a ZCAS exerce relevante influência no regime de precipitação do Brasil. Trinta anos de dados da quinta geração de reanálises do ECMWF (ERA5) de parâmetros atmosféricos e da TSM foram usados para construção de uma média climatológica, bem como para análise de três eventos selecionados de ocorrência de ZCAS. Séries temporais da TSM foram construídas e os padrões observados nos períodos dos eventos de ZCAS selecionados foram analisados em busca de indicadores de alguma relação entre a TSM no Atlântico Sudoeste e a posição/intensidade da ZCAS. As análises indicaram que a configuração das anomalias de TSM do sul do Atlântico Sul está relacionada a variações da circulação geral na América do Sul. Os eventos analisados foram divididos em dois padrões: o primeiro onde a água da superfície do oceano tem temperatura acima do normal em todo o entorno da região da CBM e o segundo padrão apresentando um significativo gradiente horizontal de TSM na região da CBM. No primeiro padrão a ZCAS apresentou a configuração típica, posicionando-se sobre o litoral do Sudeste do Brasil. No segundo padrão a posição da ZCAS ficou ao norte da configuração típica, estabelecendo-se com o ramo oceânico entre o litoral do Nordeste do Brasil e o norte da região Sudeste.

Palavras-chave: ZCAS, TSM, Confluência Brasil-Malvinas, Oceano Atlântico Sudoeste.

## ABSTRACT

In this study, the complex interaction between the Sea Surface Temperature (SST) of the Southwest Atlantic Ocean in the region of the Brazil-Malvinas (Falkland) Confluence (BMC) and the South Atlantic Convergence Zone (SACZ) was investigated. This interaction plays an important role in the dynamics of precipitation in South America, as SACZ exerts a relevant influence on the precipitation regime in Brazil. Thirty years of data from the fifth generation of the ECMWF reanalysis (ERA5) of atmospheric parameters and SST were used to construct a climatological average and analyze three selected SACZ occurrence events. SST time series were constructed, and the patterns observed in the periods of the selected SACZ events were analyzed to identify indicators of any relationship between the SST in the Southwest Atlantic and the position/intensity of the SACZ. The analyses indicated that the configuration of the SST anomalies south of the South Atlantic is related to variations in general circulation in South America. The analyzed events were divided into two patterns: the first where the ocean surface water has a temperature above normal throughout the BMC region, and the second pattern presents a significant horizontal SST gradient in the BMC region. In the first pattern, the SACZ presented a typical configuration, positioning itself on the coast of Southeast Brazil. In the second pattern, the position of the SACZ was north of the typical configuration, establishing itself with an oceanic branch between the coast of Northeast Brazil and the north of the Southeast region.

Keywords: SACZ, SST, Brazil-Malvinas (Falkland) Confluence, Southwest Atlantic Ocean.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Representação esquemática da Circulação Termohalina Global.....	3
Figura 2 – Diagrama esquemático da circulação oceânica no Oceano Atlântico Sudoeste.....	4
Figura 3 – Configuração das linhas de corrente em 200 hPa sendo (A) a média de janeiro de 2005 e (B) a média para o período de 17 janeiro a 21 de janeiro de 2005. Em (A), os pontos coloridos indicam a posição climatológica da AB (ponto preto) e a posição média em janeiro de 2005 (ponto vermelho). Em (B), o hachurado colorido representa a divergência.....	6
Figura 4 – Representação esquemática dos diversos sistemas atmosféricos na baixa e alta troposfera atuantes na América do Sul. Dentre eles, a ZCAS e o JBN (jato de baixos níveis) na baixa troposfera; e a Alta da Bolívia, VCAN do Nordeste e corrente de jato na alta troposfera .....	7
Figura 5 – Ocorrência de ZCAS em dezembro de 2021. (A) Carta sinótica de superfície do CPTEC e (B) alagamento em Itabuna-BA devido a ZCAS .....	7
Figura 6 – Compilação de dados de ZCAS de 2010 a 2023 .....	9
Figura 7 – Média climatológica de pressão e vento a 10 metros para os meses de (A) dezembro, (B) janeiro, (C) fevereiro e (D) março (continua).....	11
Figura 8 – Média climatológica das linhas de corrente e intensidade do vento (nós) em 200 hPa para os meses de (A) dezembro, (B) janeiro, (C) fevereiro e (D) março. A posição da AB e CNE/VCAN estão indicados nas figuras.....	13
Figura 9 – Média climatológica de fluxo de umidade para os meses de (A) dezembro, (B) janeiro, (C) fevereiro e (D) março.....	14
Figura 10 – Média climatológica de altura geopotencial (m) e movimento vertical (Pa/s) negativo (ascendente) para os meses de (A) dezembro, (B) janeiro, (C) fevereiro e (D) março.....	15
Figura 11 – Média climatológica de precipitação total (mm/dia) para os meses de (A) dezembro, (B) janeiro, (C) fevereiro e (D) março (continua).....	16
Figura 12 – Média climatológica de TSM (°C) para os meses de (A) dezembro, (B) janeiro, (C) fevereiro e (D) março.....	18
Figura 13 – Série Temporal da anomalia da média de TSM entre 1991 e 2020.....	19
Figura 14 – Série Temporal da TSM média para os meses de (A) dezembro, (B) janeiro, (C) fevereiro e (D) março entre 1991 e 2020. A linha verde representa o valor médio, a vermelha a média máxima e a amarela a média mínima (continua) .....	20
Figura 15 – Valores médios entre os dias 17 e 22 de janeiro de 2005: (A) Linhas de corrente e intensidade do vento em nós (cores) em 200 hPa, sinalizados a AB e o VCAN; (B) Linhas de corrente e umidade específica em g/kg (hachurado colorido) no nível de 850 hPa; e (C) Altura geopotencial (m) e velocidade vertical ômega (hPa/s) em 500 hPa.....	23
Figura 16 – Carta Sinótica de Superfície e imagem de satélite Goes-12 correspondente às 0000Z (A) e (B) do dia 16; (C) e (D) do dia 17; (E) e (F) do dia 18. O retângulo vermelho destaca as bandas de nebulosidade associadas à ZCAS (continua) .....	24
Figura 17 – Taxa de precipitação (mm/4h) para o período entre 17 e 22 de janeiro .....	26
Figura 18 – Valores médios entre os dias 08 e 16 de dezembro de 2017: (A) Linhas de corrente e intensidade do vento em nós (cores) em 200 hPa, sinalizados a AB e o VCAN; (B) Linhas de corrente e umidade específica em g/kg (hachurado colorido) no nível de 850 hPa; e (C) Altura geopotencial (m) e velocidade vertical ômega (hPa/s) em 500 hPa.....	27
Figura 19 – Carta Sinótica de Superfície e imagem de satélite Goes-13 correspondente às 0000Z (A) e (B) do dia 07; (C) e (D) do dia 08. O retângulo vermelho destaca as bandas de nebulosidade associadas à ZCAS (continua) .....	28

Figura 20 – Carta Sinótica de Superfície no dia 09 de dezembro de 2017 (A) às 0000Z e (B) às 1200Z; Linhas de corrente e umidade específica em g/kg (hachurado colorido) no nível de 850 hPa (C) às 0000Z e (D) às 1200Z.....	30
Figura 21 – Taxa de precipitação (mm/4h) para o período entre 08 e 16 de dezembro .....	31
Figura 22 – Valores médios entre os dias 28 de fevereiro e 09 de março de 2020: (A) Linhas de corrente e intensidade do vento em nós (cores) em 200 hPa, sinalizados a AB e o VCAN; (B) Linhas de corrente e umidade específica em g/kg (hachurado colorido) no nível de 850 hPa; e (C) Altura geopotencial (m) e velocidade vertical ômega (hPa/s) em 500 hPa (continua) .....	32
Figura 23 – Carta Sinótica de Superfície e imagem de satélite Goes-16 correspondente às 1200Z (A) e (B) do dia 27; (C) e (D) do dia 28 de fevereiro. O retângulo vermelho destaca as bandas de nebulosidade associadas à ZCAS.....	34
Figura 24 – Taxa de precipitação (mm/4h) para o período entre 28 de fevereiro e 09 de março .....	35
Figura 25 – Anomalias da TSM em °C (trinta anos) para o dia (A) 10; (B) Anomalias da TSM em °C no dia 10 para a região entre as latitudes 35°S-45°S e as longitudes 50°W-65°W, nas proximidades da CBM; Anomalias da TSM em °C para os dias (C) 14 e (D) 17 de janeiro de 2005 .....	36
Figura 26 – Anomalias da TSM em °C (trinta anos) para os dias (A) 18; (B) 19; (C) 22 de janeiro de 2005; (D) Anomalias da TSM em °C no dia 22 para a região entre as latitudes 35°S-45°S e as longitudes 50°W-65°W, nas proximidades da CBM.....	37
Figura 27 – Anomalias da TSM em °C (trinta anos) para o dia (A) 1° de dezembro; (B) Anomalias da TSM em °C no dia 1° para a região entre as latitudes 35°S-45°S e as longitudes 50°W-65°W, nas proximidades da CBM; Anomalias da TSM em °C para os dias (C) 04 e (D) 08 de dezembro de 2017 (continua) .....	38
Figura 28 – Anomalias da TSM (trinta anos) para os dias (A) 11 e (B) 16 de dezembro de 2017; (C) Anomalias da TSM em °C no dia 16 de dezembro para a região entre as latitudes 35°S-45°S e as longitudes 50°W-65°W, nas proximidades da CBM.....	40
Figura 29 – Anomalias da TSM em °C (trinta anos) para o dia (A) 21 de fevereiro; (B) Anomalias da TSM em °C no dia 21 de fevereiro para a região entre as latitudes 35°-45°S e as longitudes 50°-65°W, nas proximidades da CBM; Anomalias da TSM em °C para os dias (C) 25 e (D) 28 de fevereiro de 2020.....	41
Figura 30 – Anomalias da TSM (trinta anos) para os dias (A) 05 e (B) 09 de março; (C) Anomalias da TSM em °C no dia 09 para a região entre as latitudes 35°S-45°S e as longitudes 50°W-65°W, nas proximidades da CBM .....	42
Figura 31 – Anomalia de PNMM em hPa durante o mês de janeiro de 2005 .....	44
Figura 32 – Anomalias das componentes (A) zonal e (B) meridional do vento a 10 metros (nós) durante o mês de janeiro de 2005.....	45
Figura 33 – Anomalia de taxa de precipitação (mm/dia) durante o mês de janeiro de 2005.....	46
Figura 34 – Anomalia de PNMM em hPa durante o mês de dezembro de 2017.....	47
Figura 35 – Anomalias das componentes (A) zonal e (B) meridional do vento a 10 metros (nós) o mês de dezembro de 2017 .....	48
Figura 36 – Anomalia de taxa de precipitação (mm/dia) durante o mês de dezembro de 2017 .....	49
Figura 37 – Anomalia de PNMM em hPa durante os meses de (A) fevereiro e (B) março de 2020.....	50
Figura 38 – Anomalias das componentes meridionais (A) e (B); e zonais (C) e (D) do vento a 10 metros (nós) durante os meses de fevereiro e março de 2020, respectivamente .....	51
Figura 39 – Anomalia de taxa de precipitação (mm/dia) durante os meses de (A) fevereiro e (B) março de 2020.....	52

Figura 40 – Corte vertical meridional em 48°W entre as latitudes 60°S e 15°N da velocidade vertical (Pa/s) no dia 18 de janeiro de 2005.....	53
Figura 41 – Corte vertical meridional em 48°W entre as latitudes 60°S e 15°N da velocidade vertical ômega (Pa/s) nos dias (A) 10 de dezembro de 2017 e (B) 28 de fevereiro de 2020 (continua) .....	55

## Lista de abreviaturas e siglas

AB	Alta da Bolívia
ASAS	Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul
CB	Corrente do Brasil
CBM	Confluência Brasil-Malvinas
CHM	Centro de Hidrografia da Marinha
CLAM	Camada Limite Atmosférica Marinha
CM	Corrente das Malvinas
CNE	Cavado do Nordeste
CPTEC	Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos
DSAS	Dipolo Subtropical do Atlântico Sul
ECMWF	<i>European Centre for Medium-Range Weather Forecasts</i>
GrADS	<i>Grid Analysis and Display System</i>
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
JBN	Jato de Baixos Níveis
JST	Jato Subtropical
NEB	Nordeste do Brasil
PNMM	Pressão ao Nível Médio do Mar
SAD	Southern Atlantic Dipole
SASDI	South Atlantic Subtropical Dipole Index
SAODI	South Atlantic Ocean Dipole Index
SMM	Serviço Meteorológico Marinho
TS	Tempestade Subtropical
TSM	Temperatura da Superfície do Mar
VCAN	Vórtice Ciclônico de Altos Níveis
ZCAS	Zona de Convergência do Atlântico Sul

## Sumário

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>3</b>
2.1 INTERAÇÃO OCEANO-ATMOSFERA NA CONFLUÊNCIA BRASIL-MALVINAS.....	3
2.2 ZONA DE CONVERGÊNCIA DO ATLÂNTICO SUL .....	5
<b>3. DADOS E METODOLOGIA</b> .....	<b>10</b>
<b>4. ASPECTOS CLIMATOLÓGICOS DE PRIMAVERA-VERÃO DA AMÉRICA DO SUL</b> 10	
4.1 PRESSÃO AO NÍVEL MÉDIO DO MAR (PNMM) E VENTO A 10 METROS .....	11
4.2 LINHAS DE CORRENTE EM 200 hPa .....	12
4.3 FLUXO DE UMIDADE E LINHAS DE CORRENTE DE VENTO EM 850 hPa.....	13
4.4 ALTURA GEOPOTENCIAL E MOVIMENTO VERTICAL EM 500 hPa.....	15
4.5 PRECIPITAÇÃO TOTAL.....	16
4.6 TEMPERATURA DA SUPERFÍCIE DO MAR.....	17
<b>5. DESCRIÇÃO DOS EVENTOS DE ZCAS</b> .....	<b>22</b>
5.1 PERÍODO ENTRE 17 E 22 DE JANEIRO DE 2005.....	22
5.2 PERÍODO ENTRE 08 E 16 DE DEZEMBRO DE 2017 .....	26
5.3 PERÍODO ENTRE 28 DE FEVEREIRO E 09 DE MARÇO DE 2020 .....	32
<b>6. TEMPERATURA DA SUPERFÍCIE DO MAR</b> .....	<b>35</b>
6.1 PERÍODO ENTRE 17 E 22 DE JANEIRO DE 2005.....	35
6.2 PERÍODO ENTRE 08 E 16 DE DEZEMBRO DE 2017 .....	38
6.3 PERÍODO ENTRE 28 DE FEVEREIRO E 09 DE MARÇO DE 2020 .....	40
<b>7. RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	<b>43</b>
7.1 CARACTERÍSTICAS DOS PARÂMETROS ATMOSFÉRICOS.....	43
7.1.1 Período entre 17 e 22 de janeiro de 2005.....	43
7.1.2 Período entre 08 e 16 de dezembro de 2017 .....	46
7.1.3 Período entre 28 de fevereiro e 09 de março de 2020.....	49
7.2 ASSOCIAÇÃO DA TSM COM A CIRCULAÇÃO ATMOSFÉRICA.....	52
7.2.1 Primeiro padrão: anomalias positivas de TSM na região da CBM.....	53
7.2.1 Segundo padrão: intenso gradiente de TSM na região da CBM.....	54
<b>8. CONCLUSÃO</b> .....	<b>57</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>60</b>

## 1. Introdução

O oceano Atlântico Sudoeste compreende a área que se estende por toda a costa sudeste da América do Sul, na região entre 10°S-50°S e 30°W-60°W (GRAMCIANINOV, 2012). Do ponto de vista meteorológico, trata-se de uma região bastante energética, uma vez que é nela que são formados muitos sistemas frontais e ciclones que atuam nas áreas costeiras desse continente (REBOITA et al., 2010).

Para compreender a formação daqueles eventos sinóticos, é fundamental entender a forte interação entre oceano e atmosfera na região da Confluência Brasil-Malvinas (CBM). Esta região do Oceano Atlântico Sul está localizada aproximadamente entre as coordenadas 38°S e 42°S e 50°W e 55°W, onde fluindo para norte a Corrente das Malvinas (que é fria e rica em nutrientes) encontra a oposta Corrente do Brasil (que é quente e salina). Assim, forma-se uma intensa zona de convergência e de interações de massas de água com características diferentes (CATALDI et al., 2010). Os intensos gradientes de temperatura da superfície do mar na região da CBM e sua interação com massas de ar frio, que se deslocam do polo Sul para latitudes mais baixas, são fatores que favorecem a formação ou intensificação de sistemas frontais e ciclones. Estes eventos sinóticos afetam as condições meteorológicas nas regiões costeiras da Argentina, do Uruguai e do Brasil (REBOITA et al., 2010).

No Brasil, um fenômeno meteorológico muito estudado é a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS). A ZCAS é uma prolongada área de convergência de ventos e de umidade (KODAMA, 1992, 1993; QUADRO, 1994; CARVALHO et al., 2002, 2004), que atua desde a região Amazônica, passando sobre o Sudeste do Brasil e se estendendo até o Atlântico, durante a primavera e verão, causando chuvas fortes e prolongadas. A ocorrência da ZCAS favorece a combinação da dinâmica da mesoescala e da escala sinótica, ocasionando períodos chuvosos prolongados, episódios de chuva extrema, inundações e deslizamentos de terra (REBOITA et al., 2017).

De acordo com Pezzi et al. (2022), outro fator importante que pode ser destacado na região do Atlântico Sudoeste é a influência da Temperatura da Superfície do Mar (TSM) em fenômenos meteorológicos, associando-se à ocorrência tanto de chuvas extremas quanto de prolongadas estiagens, trazendo impactos significativos para a economia e sociedade. A TSM pode afetar a circulação atmosférica através de fluxos de calor e umidade, influenciando diversos fenômenos meteorológicos, o que torna importante o monitoramento e a previsão desta variável.

A TSM do Atlântico Sudoeste afeta a atmosfera de várias maneiras. Quando está acima da média, torna-se uma importante fonte de calor e umidade para a atmosfera adjacente, através dos fluxos de calor sensível e latente. Pezzi et al. (2009), com estudos baseados em coletas oceanográficas e meteorológicas, concluíram que a TSM pode modular os eventos na camada limite atmosférica marinha (CLAM) na Região do Atlântico Sudoeste. Cabe ressaltar que as anomalias da TSM não

configuram uma característica *sine qua non* para a ocorrência de ZCAS, mas estudos indicam que ela pode afetar o regime de precipitação, influenciando o posicionamento e a intensidade da chuva da ZCAS (TEIXEIRA, 2000; CATALDI et al., 2010).

Diferentemente do padrão climatológico da posição da ZCAS sobre a região Sudeste do Brasil, prolongadas chuvas sobre a Bahia com alagamentos de cidades inteiras chamaram a atenção para um posicionamento mais a norte desse sistema e a suas consequências para a região. Buscando contribuir com os estudos que avaliam a ocorrência de eventos de ZCAS, o presente estudo tem como principal objetivo analisar a influência remota da TSM do Atlântico Sudoeste no posicionamento da ZCAS.

Desta forma, este trabalho busca contribuir com os diversos estudos acerca da Zona de Convergência do Atlântico Sul, investigando possíveis relações entre a ocorrência de anomalias da TSM na região da Confluência Brasil-Malvinas e o posicionamento/intensidade da ZCAS. Para tal, são definidos os seguintes objetivos específicos:

- Descrever as características da atmosfera em baixos, médios e altos níveis para a classificação de um evento de ZCAS;
- Analisar a variabilidade de séries temporais da TSM na CBM nos meses que antecedem um evento de ZCAS;
- Analisar anomalias de precipitação da América do Sul associadas ao posicionamento da ZCAS; e
- Verificar uma possível relação entre a TSM do Atlântico Sudoeste na região da CBM com a posição da ZCAS.

O presente trabalho foi dividido em oito seções. A primeira seção introduz o estudo proposto. A segunda seção contempla uma revisão bibliográfica acerca da ZCAS, buscando sintetizar informações e avaliar a base de conhecimento apresentada pela literatura técnica sobre o assunto. Desta forma, será apresentada uma visão geral sobre ZCAS e interação oceano-atmosfera na CBM, de modo a identificar lacunas ou áreas de debate na literatura que permitam embasar uma possível influência remota da TSM no Atlântico Sudoeste no posicionamento da ZCAS. Na seção 3 são apresentados os dados e a metodologia. A seção seguinte é a quarta, onde são discutidos os aspectos da climatologia dos meses estudados.

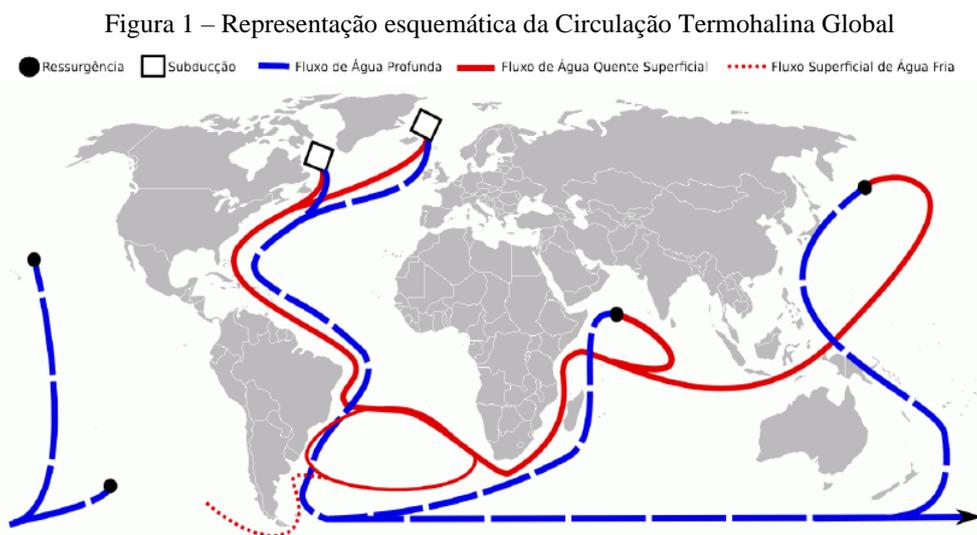
A seção posterior apresentará a descrição dos três eventos analisados. Para tal, foram gerados produtos com o emprego dos dados de reanálise ERA5 através de rotinas desenvolvidas pelo autor, cujo propósito foi identificar os episódios de ZCAS, descrever sua configuração e desconfiguração. Na seção 6, serão apresentadas as análises para a TSM na região da CBM durante o período dos eventos estudados.

Na sétima seção, são apresentadas as análises e comparações entre as características dos eventos com o fulcro em buscar identificar padrões que correlacionem as anomalias da TSM no Atlântico Sudoeste com o posicionamento e intensidade da ZCAS, de forma remota. O trabalho é finalizado com a conclusão, onde são expostos os resultados das análises e as depreensões das comparações.

## 2. Revisão Bibliográfica

### 2.1 Interação Oceano-Atmosfera na Confluência Brasil-Malvinas

Mais de 70% da superfície da Terra é coberta por água, sendo que mares e oceanos correspondem a 97% desse percentual. Assim, é correto afirmar que há uma forte relação entre oceano e atmosfera, uma vez que esse se apresenta como uma importante reserva de calor devido a sua alta capacidade térmica. Na Figura 1, observa-se uma representação da Circulação Termohalina Global, uma grande rede de movimentação de massas d'água em diferentes profundidades, que é responsável pela distribuição global de calor para todas as bacias oceânicas (GORDON, 1986).



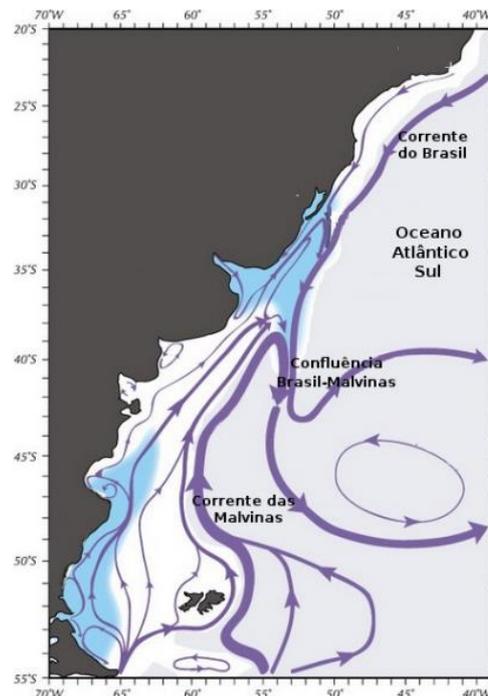
Fonte: Gramscianinov (2012), adaptado de Gordon (1986).

A atmosfera é modificada na interação com o oceano, uma vez que os gradientes horizontais de TSM podem influenciar os deslocamentos verticais do ar na baixa troposfera com convecção maior sobre as áreas com maior TSM. Segundo Xue et al. (2000), essa interação entre o oceano e a atmosfera pode influenciar processos atmosféricos de mesoescala e de escala sinótica, estando associados a frontogêneses, intensificação de sistemas frontais, geração de nuvens e zonas de precipitação. Porém, mesmo quando perturbações atmosféricas não estão atuando, o gradiente térmico horizontal na superfície do mar modula a profundidade e a estabilidade na CLAM. Assim, o estudo da TSM torna-se fundamental para a compreensão de fenômenos meteorológicos de diversas escalas, já que a

interação oceano-atmosfera é responsável por processos importantes para a previsão do tempo e do clima (PEZZI et al., 2016).

No Atlântico Sudoeste ocorre a Confluência Brasil-Malvinas, caracterizada por contrastes de temperatura e de salinidade do encontro entre as correntes do Brasil e Malvinas, conforme representado na Figura 2. A Corrente do Brasil (CB) é uma corrente oceânica tropical que flui ao longo da costa leste do Brasil, transportando águas quentes e salinas em direção à Argentina. Já a Corrente das Malvinas (CM) flui do estreito de Drake na direção norte, transportando águas subantárticas, mais frias e mais densas (PETERSON; STRAMMA, 1991).

Figura 2 – Diagrama esquemático da circulação oceânica no Oceano Atlântico Sudoeste



Fonte: Moura (2017), adaptado de Strub et al. (2015).

Nas proximidades do paralelo 38°S, a CB se encontra com a CM e separa-se da costa em direção a leste, gerando uma dinâmica dominada por vórtices e meandros de mesoescala que tornam a região como uma das mais energéticas dos oceanos (CHELTON et al., 1990). Os contrastes térmico e salino entre massas d'água com características bem distintas na CBM geram gradientes importantes na atmosfera, o que provoca uma resposta na formação de frentes e de ciclones.

Além da variação de TSM, outro fator importante a se considerar é o Southern Atlantic Dipole (SAD) ou Dipolo Subtropical do Atlântico Sul (DSAS), que é o principal modo de variabilidade acoplada entre o oceano e a atmosfera no oceano Atlântico Sul (BOMBARDI et al., 2014 e QUADRO et al., 2016). Ele é caracterizado como um modo de variabilidade climática, ou seja, atua como a oscilação de determinadas propriedades com certa periodicidade interanual e amplitude variável, sendo caracterizado por anomalias no campo de pressão ao nível médio do mar (PNMM) na região do Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul (ASAS) e por um gradiente nordeste/sudoeste na

distribuição espacial das anomalias de TSM. Na literatura, existem dois índices associados ao SAD. O South Atlantic Subtropical Dipole Index (SASDI), que é o definido por Morioka et al. (2011) e South Atlantic Ocean Dipole Index (SAODI), que é definido por Nmanchi et al. (2011).

Considerando a variação da série de dados de TSM do Atlântico Sul, Leyba et al. (2019) estudaram os fluxos de calor neste oceano entre 1982 e 2015 e, entre outros resultados, identificaram uma tendência de aumento da TSM no sudoeste do Atlântico Sul. Eles atribuíram esse aumento da TSM à intensificação e migração para oeste do ASAS. Souza e Teixeira (2023), usando 60 anos de dados da reanálise ERA5, também identificaram uma tendência de aumento da TSM do Atlântico Sul. Além disso, esse crescimento apresenta tendências distintas antes e depois do ano 2000, com coeficiente angular maior a partir do ano 2000.

## **2.2 Zona de Convergência do Atlântico Sul**

A ZCAS pode ser definida como uma banda de nebulosidade duradoura orientada no sentido noroeste-sudeste, configurando uma grande e prolongada zona de convergência de fluxos de umidade sobre o Brasil. Essa configuração se estende desde a Amazônia até o oceano Atlântico Sudoeste e está associada a fortes precipitações principalmente nas regiões Centro-Oeste e Sudeste do Brasil (ESCOBAR, 2019).

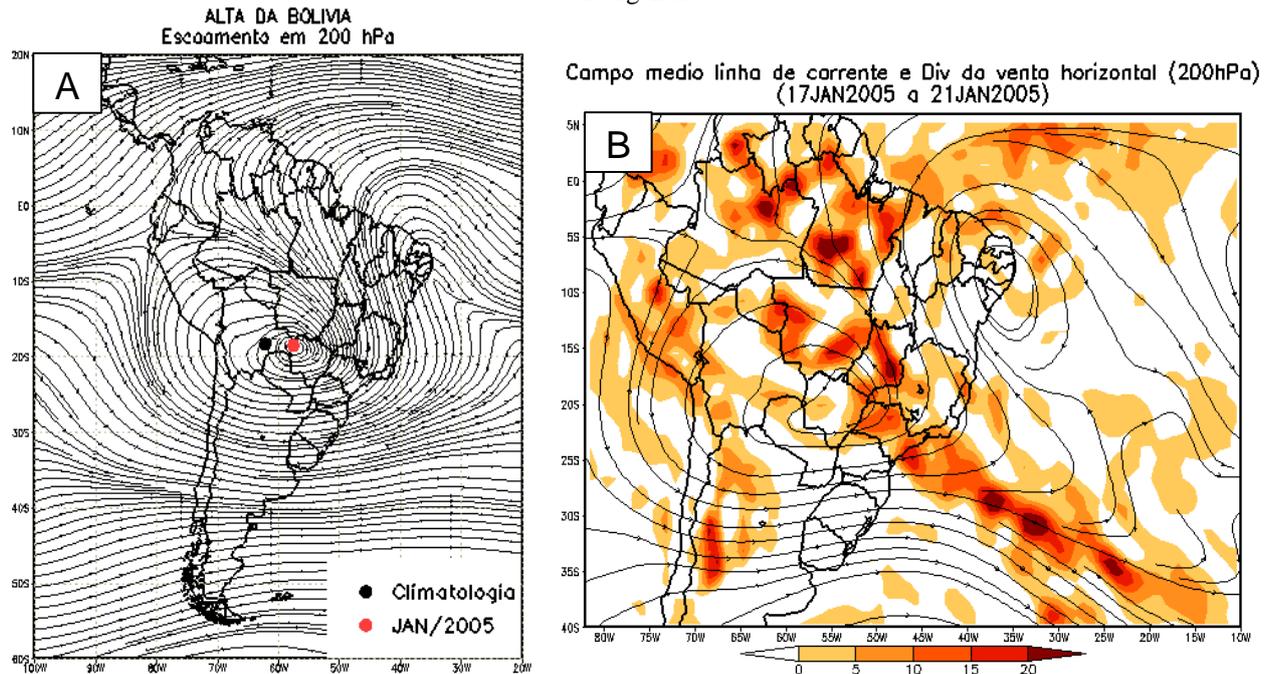
Kodama (1992-1993) estudou as características comuns dos eventos de larga escala das zonas subtropicais de convergência, citando a ZCAS e buscando definir condições necessárias para sua ocorrência. Já Quadro (1994) definiu parâmetros meteorológicos que caracterizam um evento ZCAS, evidenciando correlações com a ocorrência do fenômeno meteorológico El Niño.

Diversos outros estudos agregaram conhecimento e atualmente sabe-se que a ZCAS está relacionada com a interação da circulação de vários sistemas em diferentes níveis da atmosfera. Pode-se destacar: banda de nebulosidade com direção NW/SE, nem sempre bem definida, a partir da região Amazônica e estendendo-se até o Atlântico Sudoeste (QUADRO, 1994); Alta da Bolívia (AB) sobre o continente e Vórtice Ciclônico em Altos Níveis sobre o litoral do Nordeste (VCAN-NEB) bem definidos (REBOITA et al., 2010); zona de convergência em baixos níveis (KODAMA, 1992) persistente por ao menos três dias, e um sistema frontal que inicia a convergência de umidade em baixos níveis, possuindo caráter quase estacionário ao longo da costa (ESCOBAR, 2019).

De acordo com Escobar (2019), para a identificação de um evento ZCAS, a AB e o VCAN-NEB se apresentam bem definidos em altos níveis, associados a um significativo gradiente de temperatura potencial equivalente em 850 hPa. Um fluxo de umidade em 850 hPa aparece bem determinado com direção noroeste/sudeste, partindo da região amazônica, passando pelo Centro-Oeste e Sudeste e terminando no oceano Atlântico.

Na média troposfera, o campo de velocidade vertical ômega ascendente (negativo) aparece praticamente em fase com o fluxo convergente em 850 hPa. Como consequência das características mencionadas, em baixos níveis, configura-se uma zona de convergência de umidade que deve persistir por ao menos três dias. Na Figura 3, é possível observar a influência da configuração da AB e do VCAN-NEB em altos níveis durante a ocorrência de ZCAS em janeiro de 2005.

Figura 3 – Configuração das linhas de corrente em 200 hPa sendo (A) a média de janeiro de 2005 e (B) a média para o período de 17 janeiro a 21 de janeiro de 2005. Em (A), os pontos coloridos indicam a posição climatológica da AB (ponto preto) e a posição média em janeiro de 2005 (ponto vermelho). Em (B), o hachurado colorido representa a divergência

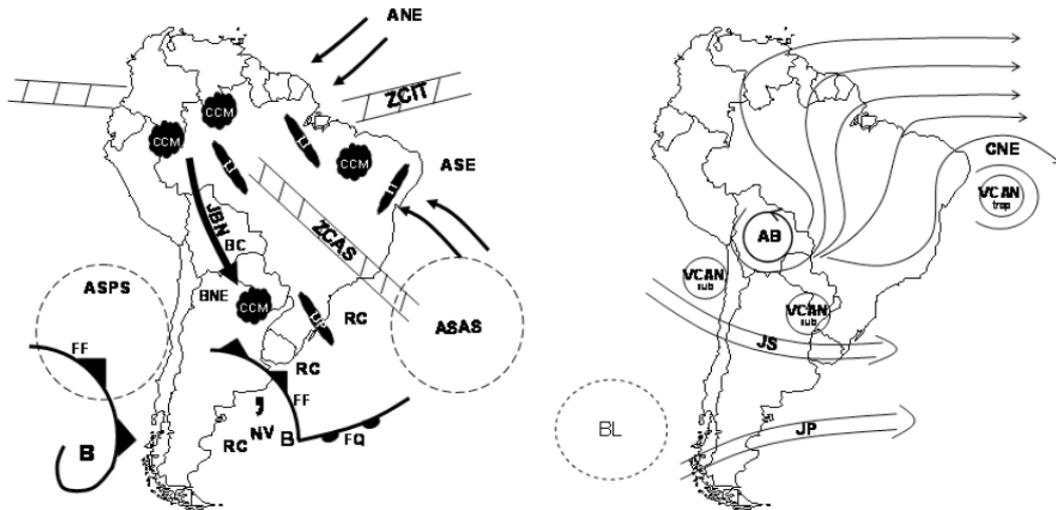


Fonte: Boletim de Climanálise do CPTEC/INPE.

Assim, a ZCAS não é um evento associado a sistemas apenas da baixa troposfera, uma vez que sistemas meteorológicos em altitude contribuem para a sua formação. Quando se estabelece aquele padrão de circulação na baixa, média e alta troposfera, vários elementos autoalimentam a convergência de massa e umidade que configura a ZCAS (ESCOBAR, 2019).

Na Figura 4 é mostrada uma representação de sistemas atmosféricos da baixa e alta troposfera da América do Sul, onde sistemas associados a formação da ZCAS estão presentes. Esse fenômeno ocorre normalmente entre a primavera e o verão, possui uma posição típica que configura uma grande faixa de instabilidade que começa na Amazônia e segundo Quadro (1994), normalmente se estaciona sobre a Região Sudeste, sul da Bahia, norte do Paraná e Brasil Central. A ocorrência de altos volumes de precipitação associados a ZCAS tem se destacado e sendo objeto de estudos entre pesquisadores e serviços de monitoramento meteorológico, uma vez que eventos de chuva extrema no verão na região Sudeste do Brasil estão diretamente relacionados a atividade de ZCAS, sendo esta a região mais comumente afetada pelo fenômeno (CARVALHO et al., 2002).

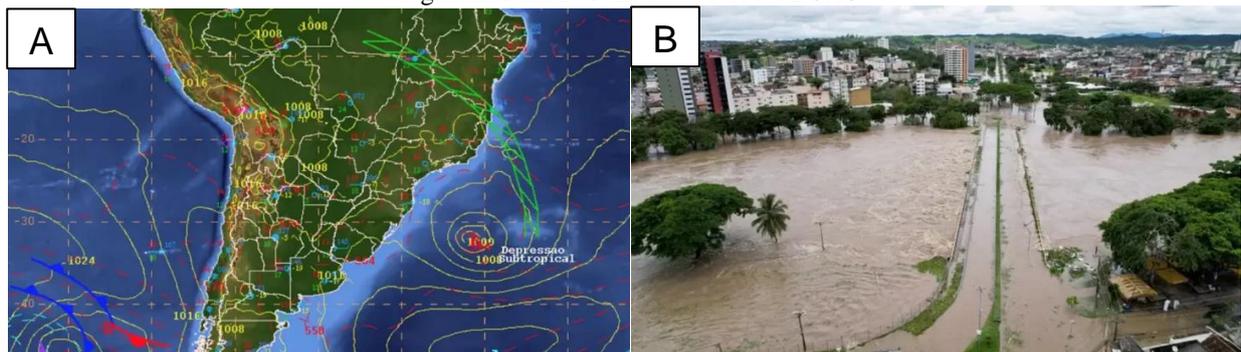
Figura 4 – Representação esquemática dos diversos sistemas atmosféricos na baixa e alta troposfera atuantes na América do Sul. Dentre eles, a ZCAS e o JBN (jato de baixos níveis) na baixa troposfera; e a Alta da Bolívia, VCAN do Nordeste e corrente de jato na alta troposfera



Fonte: Reboita (2010), adaptada de Satyamurty et al. (1998).

Mais recentemente, algumas ocorrências de eventos de ZCAS no norte da região Sudeste e sul do Nordeste do Brasil despertaram curiosidade sobre os possíveis fatores que poderiam estar associados a este posicionamento. Na Figura 5A, há uma representação da carta sinótica de superfície do CPTEC (Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos) onde um evento de ZCAS está posicionado sobre o sul da Bahia, em dezembro de 2021, e na Figura 5B, uma imagem do alagamento associado que ocorreu na cidade de Itabuna na Bahia.

Figura 5 – Ocorrência de ZCAS em dezembro de 2021. (A) Carta sinótica de superfície do CPTEC e (B) alagamento em Itabuna-BA devido a ZCAS



Fonte: (A) INPE e (B) Reuters.

Barreiro et al. (2002) sugeriram que aproximadamente 60% da variabilidade da precipitação associada da ZCAS é explicada pela variabilidade interna da atmosfera, enquanto a TSM estaria relacionada à variabilidade remanescente. Outro resultado importante deste trabalho é que eles detectaram dois importantes modos diferentes de configuração da ZCAS. O primeiro tem como forçante a anomalia de TSM do Atlântico Sul (escala interanual-decadal) e o segundo associado à anomalia de TSM do Pacífico. No modo do Atlântico, foi identificada estrutura semelhante a um

dípolo na precipitação próxima à costa da América do Sul, acompanhada por uma circulação anômala dos ventos de superfície no sentido horário. O do Pacífico manifesta-se principalmente na circulação de nível superior, consistindo em um deslocamento da ZCAS para nordeste associado com anomalias de precipitação durante eventos El Niño. Venegas et al. (1997) indicam que o Dipolo Subtropical do Atlântico Sul (DSAS) apresenta correlação com a ZCAS.

Os resultados de Bombardi et al. (2014) indicam que em fases neutras do El Niño, o SAD desempenha um papel importante na modulação da ciclogênese e nas características (intensidade e posição) da ZCAS. Anomalias positivas de TSM sobre o Atlântico Sul extratropical estão relacionados ao aumento da ciclogênese perto do Sudeste do Brasil, bem como a migração de ciclones extratropicais mais ao norte. Como consequência, estes sistemas organizam a convecção e aumentam a precipitação no leste da América do Sul.

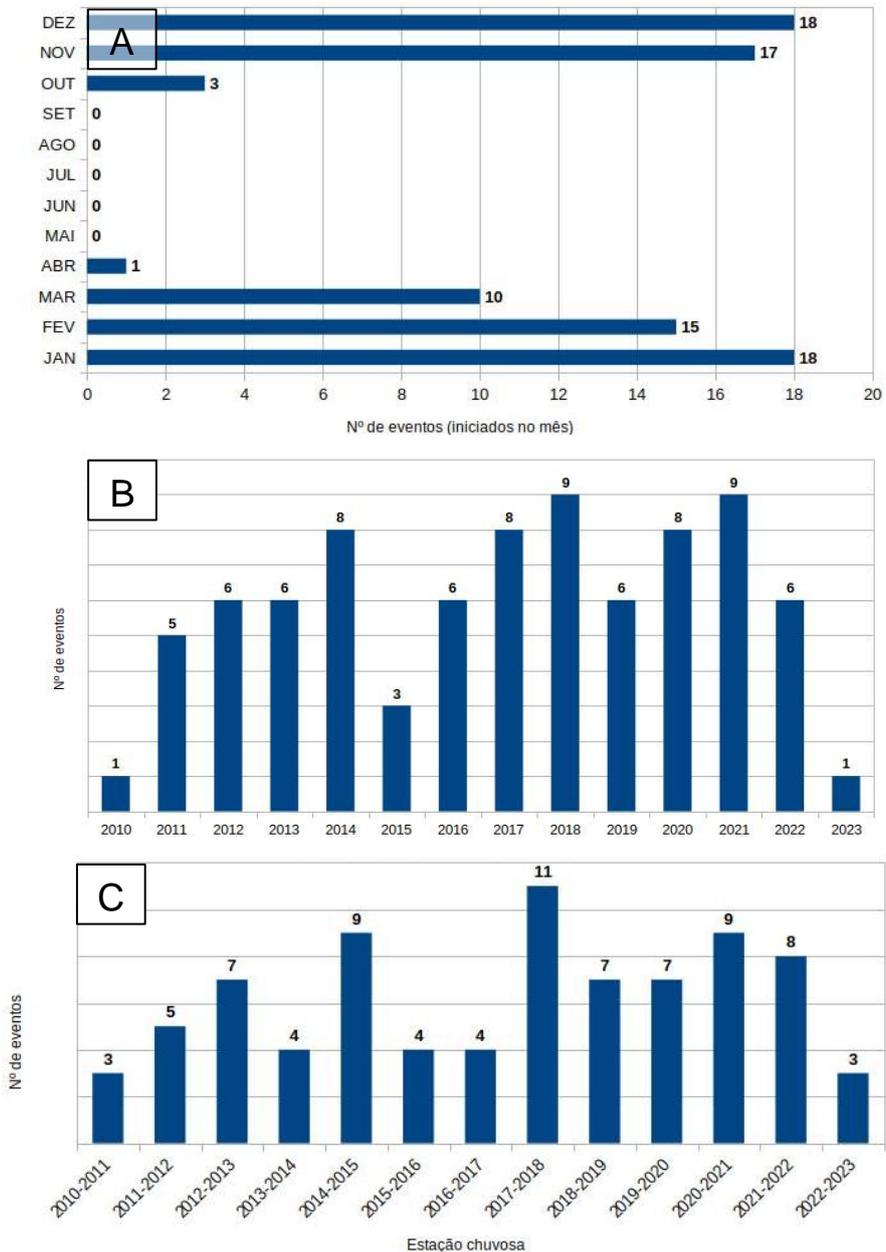
Barcelos e Quadro (2019) analisaram eventos extremos de precipitação na região de ocorrência da ZCAS nos meses de novembro a março de 1987 a 2016. Eles identificaram 184 episódios de ZCAS totalizando 1118 dias. Ou seja, uma média de 38,38 dias/ano de ZCAS. Entretanto, eles também observaram que existem padrões distintos antes e depois de 2004. Entre 1987 e 2003, a média é de 35,06 dias/ano de ZCAS e de 2004 a 2016 a média aumenta para 43,08 dias/ano. Quadro et al. (2016), identificou o aumento de dias de ZCAS por ano a partir de 2016, mas não encontrou evidências que expliquem esse aumento.

Anomalias de TSM na região da CBM intensificam sistemas transientes de baixa pressão naquela região, causando alterações na CLAM e criando condições favoráveis para a configuração de ZCAS na região Sudeste do Brasil. Uma maior convergência e aumento do movimento vertical ascendente na região da CBM causa uma anomalia de ar descendente no continente sobre a região Sul do Brasil, favorecendo a estiagem no local. Por sua vez, esse padrão causa também uma anomalia de movimento ascendente na região Sudeste, onde nota-se o aparecimento de um cavado sobre o Estado do Rio de Janeiro. Essa perturbação observada na região Sudeste, devido aos maiores valores da TSM na CBM, sugere que diferentes condições de TSM na Confluência possam, remotamente, também modificar a posição de configuração da ZCAS (CATALDI et al, 2010).

De acordo com Kodama (1992), Quadros (1994), Nogués-Peagle e Mo (1997) e Carvalho et al. (2004), a ZCAS configura-se climatologicamente no período entre a primavera e o verão, sendo preponderante para seu regime de precipitação. Um levantamento interno do Serviço Meteorológico Marinho (SMM) contabilizou os eventos de ZCAS de 2010 até janeiro de 2023. Nota-se que, no período levantado, os meses com maior ocorrência de episódios de ZCAS são dezembro e janeiro, com dezoito ocorrências cada um, seguidos de novembro e fevereiro com dezessete e quinze eventos, respectivamente. O mês de março apresenta um número bem inferior aos anteriores, com dez casos contabilizados (Figura 6A).

Observando a ocorrência anual de eventos (Figura 6B), percebe-se que os anos de 2018 e 2021 foram aqueles que apresentaram o maior número, com nove episódios. Com base no acompanhamento do SMM, a média anual é de aproximadamente seis eventos por ano. Desconsiderando o ano de 2023 que ainda está em curso, são oito anos com total de eventos igual ou inferior à média e cinco anos com número de eventos superior à média. Os anos 2017 e 2020, que representam dois dos três casos estudados neste trabalho, tiveram oito eventos, dois acima da média. O terceiro caso estudado aqui é o ano de 2005, que não faz parte do levantamento do SMM, mas que totalizou nove eventos de acordo com dados do CPTEC/INPE. Destaca-se, ainda, que o período chuvoso (de outubro a março) de 2017-2018 foi o mais ativo em termos de ocorrências de ZCAS, com onze episódios contabilizados (Figura 6C).

Figura 6 – Compilação de dados de ZCAS de 2010 a 2023



Fonte: Relatório interno do SMM/CHM. Imagens cedidas pelo SMM.

### 3. Dados e Metodologia

Os dados utilizados neste trabalho são da base de dados ERA5 (C3S, 2017 e HERSBACH et al.; 2020), quinta geração de reanálises atmosféricas do *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF). Foram extraídos dados diários, com intervalos de seis horas, de 1991 a 2020 para construção das médias climatológicas, bem como para os períodos selecionados de ocorrência de ZCAS. Foram utilizados dados dos campos horizontais de vento, altura geopotencial, movimento vertical e umidade específica em diferentes níveis de pressão (1000 hPa, 850 hPa, 500 hPa e 200 hPa), e dados de superfície como pressão ao nível do mar, precipitação, vento a 10 metros e TSM para caracterização de eventos de ZCAS e da circulação atmosférica associada.

O processamento dos dados, a elaboração de séries temporais e criação de gráficos para análise foram realizados no *Grid Analysis and Display System* (GrADS), software gratuito que permite a visualização e manipulação de dados em grade, bem como a realização de análises estatísticas e de cálculo de tendências.

Foram selecionados três eventos de ZCAS para análise, todos ocorridos nas últimas duas décadas, sendo eles em janeiro de 2005, dezembro de 2017 e março de 2020. Neste mesmo período, observou-se um aumento da TSM média na costa sudoeste da América do Sul, conforme será apresentado na Figura 13 na seção 4.6 deste trabalho. Além disso, utilizou-se os critérios constantes na literatura para caracterizar os eventos de ZCAS selecionados, usando os dados do ECMWF, cartas sinóticas, imagens de satélite e informações dos bancos de dados do Centro de Hidrografia da Marinha (CHM), do CPTEC e do INMET (Instituto Nacional de Meteorologia). Com os dados de TSM, foram calculadas médias e anomalias para a construção de séries temporais e campos horizontais. Os campos atmosféricos e as séries da TSM foram analisados em busca de padrões que sugerissem alguma relação entre a TSM no Atlântico Sudoeste e a posição e/ou intensidade da ZCAS.

### 4. Aspectos climatológicos de primavera-verão da América do Sul

Para examinar as configurações sinóticas associadas à ocorrência de eventos ZCAS, torna-se importante analisar a climatologia da América do Sul e do Atlântico Sudoeste. Para tal, foram explorados os seguintes parâmetros das reanálises ERA5: pressão ao nível médio do mar (PNMM), altura geopotencial e movimento vertical em 500 hPa, precipitação total, vento a 10 metros, umidade específica e linha de corrente em 850 hPa, linhas de corrente e intensidade do vento em 200 hPa e TSM do Atlântico Sudoeste. O período de trinta anos considerado para a climatologia foi de 1991 a 2020. Posteriormente, essa climatologia foi usada na análise das características atmosféricas durante os três eventos de ZCAS do estudo.

#### 4.1 Pressão ao nível médio do mar (PNMM) e vento a 10 metros

A climatologia de PNMM na América do Sul e oceano Atlântico adjacente é amplamente influenciada pelo Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul (ASAS), que modula as condições atmosféricas das regiões costeiras, afetando padrões sazonais da distribuição de ventos e a formação e deslocamento de sistemas meteorológicos. Nas Figuras 7A e 7B, observa-se a climatologia para os meses de dezembro e janeiro, onde há a presença marcante do ASAS, com centro em aproximadamente em 30°S e 005°W. A variação típica da PNMM na costa da América do Sul banhada pelo Oceano Atlântico Sudoeste fica entre 1012 hPa e 1016 hPa. O vento a 10 metros característico no setor Oeste do ASAS corresponde à distribuição de pressão, sendo nordeste ao sul do paralelo de 15°S, passando para o quadrante oeste após o paralelo de 40° S.

Nos meses de fevereiro e março, identifica-se uma redução da área com PNMM superior a 1020 hPa no centro do ASAS em comparação com dezembro e janeiro, como pode ser identificado nas Figuras 7C e 7D. De uma forma geral, entre os meses de dezembro e março, a pressão na costa leste do Brasil torna-se gradativamente mais elevada devido ao deslocamento do ASAS em direção ao continente sul-americano neste período. Outro aspecto observado é que a faixa com pressões inferiores a 1004 hPa (hachurado em tons de azul) recua para o sul nos meses de fevereiro e março.

Em relação ao vento a 10 metros, nota-se uma predominância de ventos SE no norte e nordeste do Atlântico Sul, padrão identificado em todos os meses analisados. Já na costa das regiões Sul e Sudeste, o vento característico mantém-se do quadrante NE. Importante destacar que o que difere o vento em fevereiro e março dos dois meses anteriores é o fato de que ele tem sua intensidade reduzida, o que está associado ao avanço da borda do ASAS sobre a região costeira.

Figura 7 – Média climatológica de pressão e vento a 10 metros para os meses de (A) dezembro, (B) janeiro, (C) fevereiro e (D) março (continua)

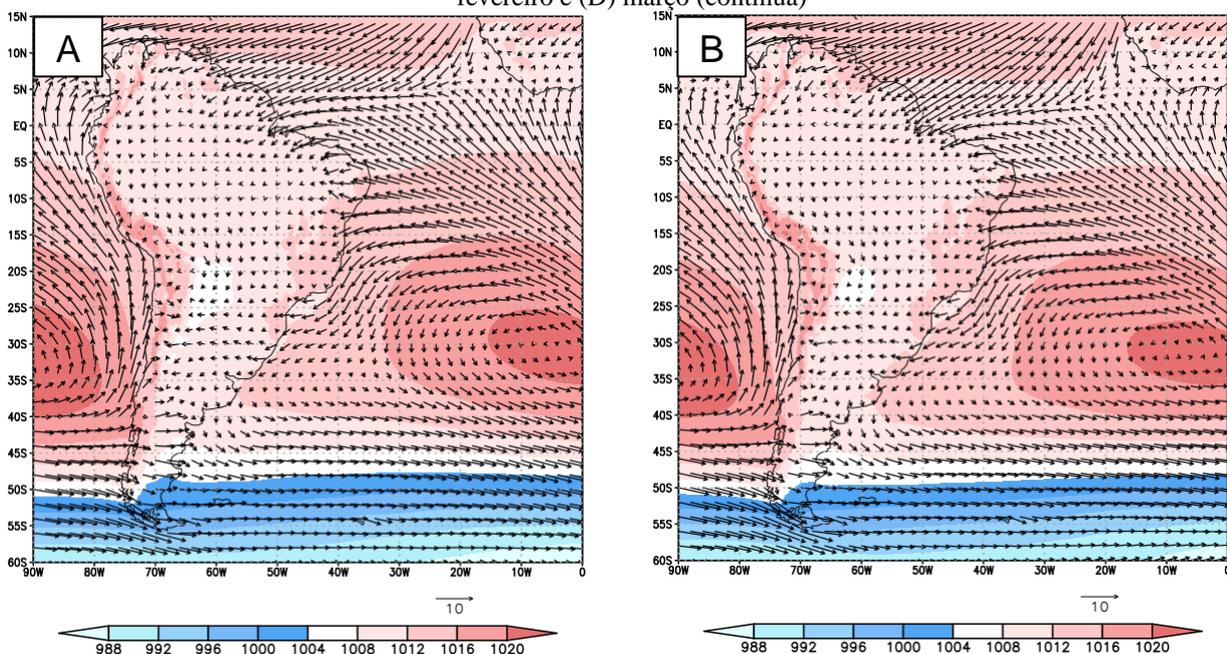
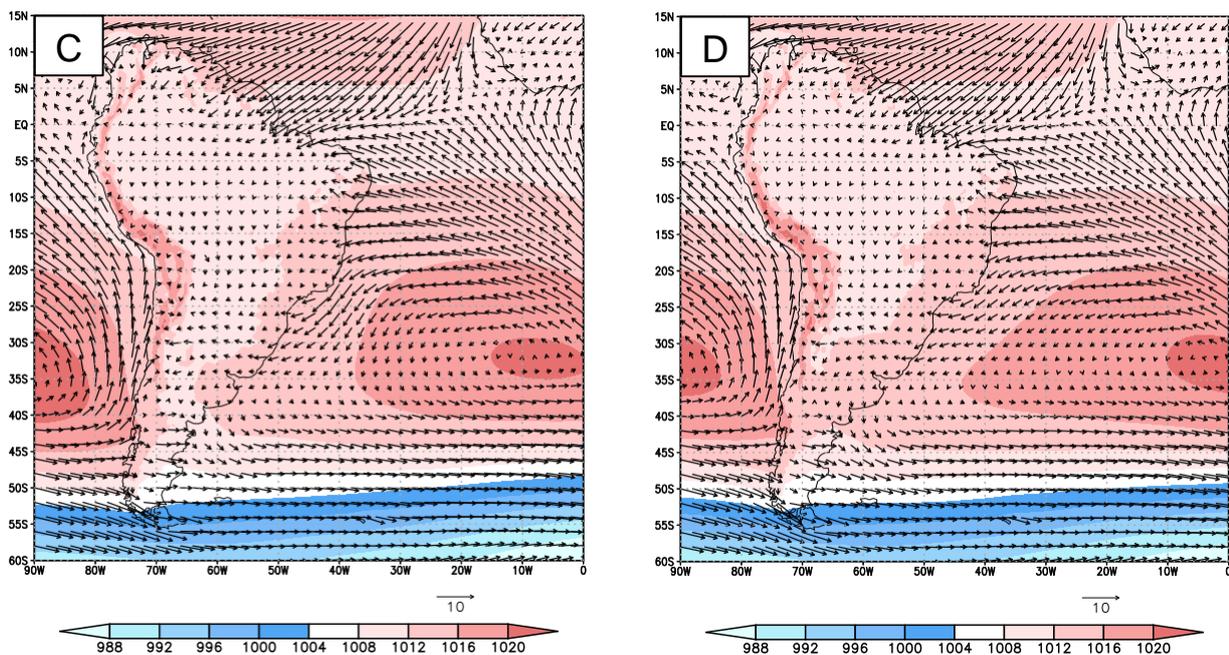


Figura 7 – Média climatológica de pressão e vento a 10 metros para os meses de (A) dezembro, (B) janeiro, (C) fevereiro e (D) março (conclusão)



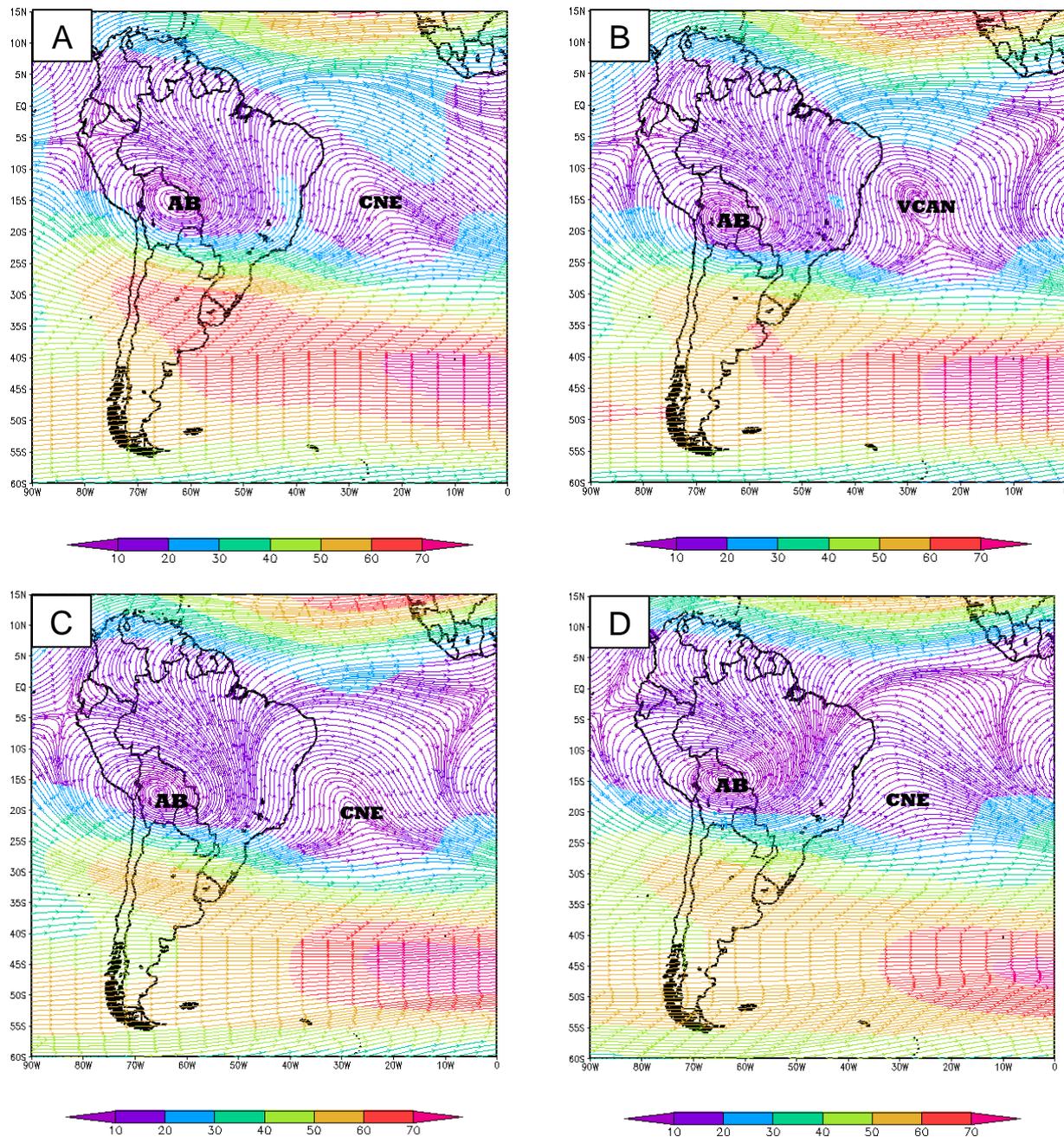
Fonte: elaboração própria a partir de dados do ECMWF.

#### 4.2 Linhas de corrente e intensidade do vento em 200 hPa

No verão da América do Sul, a circulação de altitude é caracterizada pela presença da Alta da Bolívia (AB) e pelo Cavado do Nordeste (CNE). Para avaliar a posição climatológica destes sistemas, as cartas de linhas de corrente e intensidade do vento em 200 hPa entre os meses de dezembro e março são mostradas na Figura 8.

Entre os meses de dezembro e março, a AB se posiciona tipicamente sobre a Bolívia. No mês de dezembro (Figura 8A), a AB está em sua posição típica e o Cavado do Nordeste (CNE) está a leste do Brasil. A associação entre a AB e o CNE é condição importante para a ocorrência de ZCAS, pois proporciona condições para divergência de massa em altitude, promovendo movimento vertical ascendente. No mês de janeiro, a AB intensifica, favorecendo a evolução do CNE para um Vórtice Ciclônico de Altos Níveis (Figura 8B). Nos meses subsequentes, estes sistemas perdem intensidade (Figuras 8C e 8D), reduzindo a divergência em altitude.

Figura 8 – Média climatológica das linhas de corrente e intensidade do vento (nós) em 200 hPa para os meses de (A) dezembro, (B) janeiro, (C) fevereiro e (D) março. A posição da AB e CNE/VCAN estão indicados nas figuras



Fonte: elaboração própria a partir de dados do ECMWF.

#### 4.3 Umidade específica e linhas de corrente de vento em 850 hPa

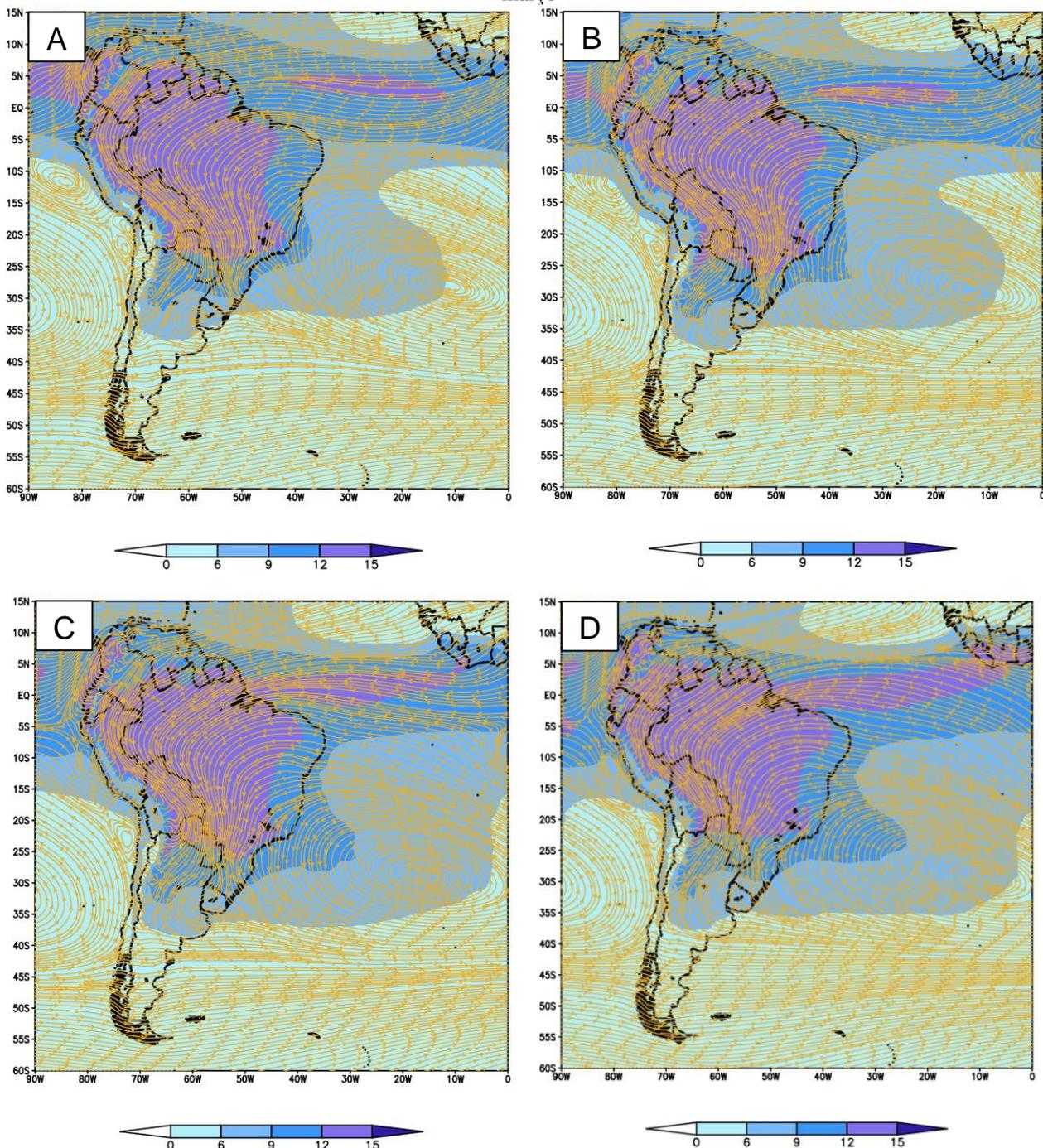
Analisando a média climatológica da umidade específica em conjunto com as linhas de corrente em 850hPa entre dezembro e março, é possível identificar a presença do escoamento de ar do norte para o centro-sul da América do Sul, que é compatível com a configuração do Jato de Baixos Níveis (JBN). O fluxo meridional de vento é canalizado desde a região Norte do Brasil até as regiões Sul e Sudeste do País.

Em dezembro (Figura 9A), o escoamento de ar segue pela Bolívia e Paraguai, estendendo-se para o Brasil central, transportando consigo calor e umidade da bacia amazônica para o centro-sul

brasileiro. Essa configuração favorece a formação de nuvens associadas aos elevados totais de precipitação com orientação NW-SE, característicos da primavera-verão da América do Sul (MARENGO et al., 2004; REBOITA et al., 2010 e BRIZOLLA et al., 2018).

Ainda com o auxílio da Figura 9B, nota-se que em janeiro há um afunilamento do escoamento meridional em direção ao sul do Brasil. Em fevereiro e março (Figuras 9C e 9D), o escoamento meridional desloca-se para oeste, posicionando-se principalmente sobre a Bolívia e o Paraguai. Além disso, os maiores valores de umidade específica avançam para leste sobre o oceano.

Figura 9 – Média climatológica de fluxo de umidade para os meses de (A) dezembro, (B) janeiro, (C) fevereiro e (D) março



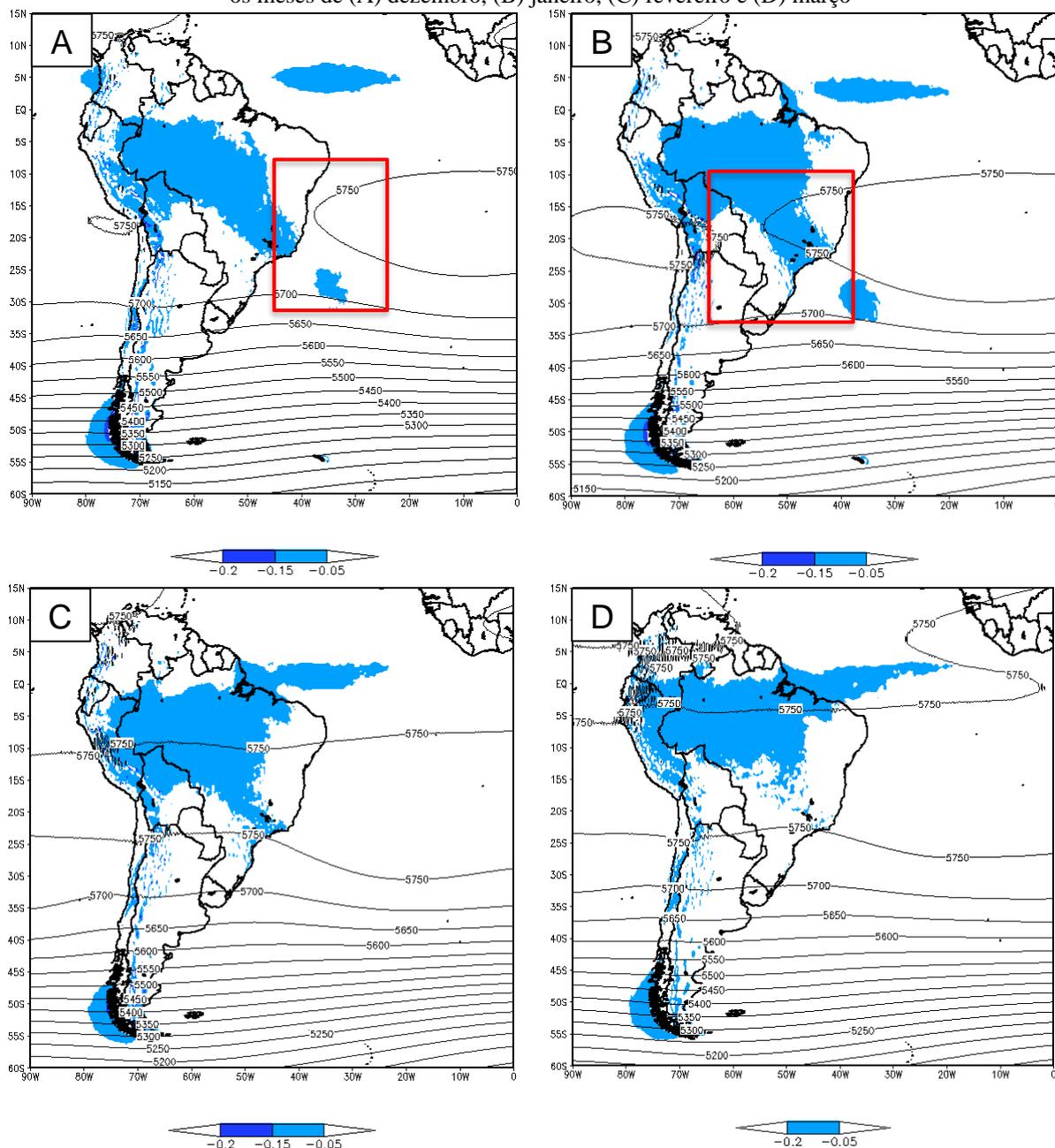
Fonte: elaboração própria a partir de dados do ECMWF.

#### 4.4 Altura geopotencial e movimento vertical em 500 hPa

Os valores de altura geopotencial e de movimento vertical ascendente (negativo) em 500 hPa estão representados na Figura 10. Analisando a figura, é possível notar que em dezembro e janeiro há a configuração de um cavado na média troposfera nas áreas destacadas no retângulo vermelho. O movimento ascendente representado pelos valores negativos hachurados em azul, nos meses de dezembro e janeiro, apresentam um nítido alinhamento com sentido NW-SE.

No mês de fevereiro, este alinhamento começa a se desconfigurar no centro-sul do Brasil, conforme nota-se na Figura 10C. As mudanças da altura geopotencial e movimento vertical ocorrem em paralelo à descaracterização do cavado na média troposfera, o que se associa com uma distribuição mais zonal do movimento vertical ascendente, sobretudo nas regiões Norte e Nordeste.

Figura 10 – Média climatológica de altura geopotencial (m) e movimento vertical (Pa/s) negativo (ascendente) para os meses de (A) dezembro, (B) janeiro, (C) fevereiro e (D) março



Fonte: elaboração própria a partir de dados do ECMWF.

## 4.5 Precipitação Total

Os valores climatológicos da precipitação total da América do Sul para os meses de dezembro a março estão representados na Figura 11. Na figura, é possível notar um alinhamento NW-SE dos valores máximos de precipitação em dezembro e janeiro, iniciando na região Norte do Brasil, passando pela Centro-Oeste e estendendo-se pelo Sudeste e Oceano Atlântico. Nestas regiões, percebe-se altos valores de precipitação acumulada em trinta dias, superando os 240 mm no continente e 180 mm no oceano. A orientação NW-SE do máximo de precipitação desde a região amazônica até o Atlântico mostra a influência da ZCAS para o regime de chuva de verão da América do Sul (REBOITA et al., 2010; REBOITA et al., 2012).

Na região Sudeste e sobre o Oceano Atlântico, os máximos de precipitação ocorrem em dezembro e janeiro, reduzindo o volume de chuva em fevereiro e março. Na região Sul, os menores acumulados ocorrem em março. Entre janeiro e março, observa-se que a precipitação no centro-norte do Brasil primeiro se estende para leste e depois recua para norte. Sobre o oceano, a faixa com acumulados superiores a 120 mm é mais larga em fevereiro e março quando comparada aos dois meses precedentes.

Figura 11 – Média climatológica de precipitação total (mm/dia) para os meses de (A) dezembro, (B) janeiro, (C) fevereiro e (D) março (continua)

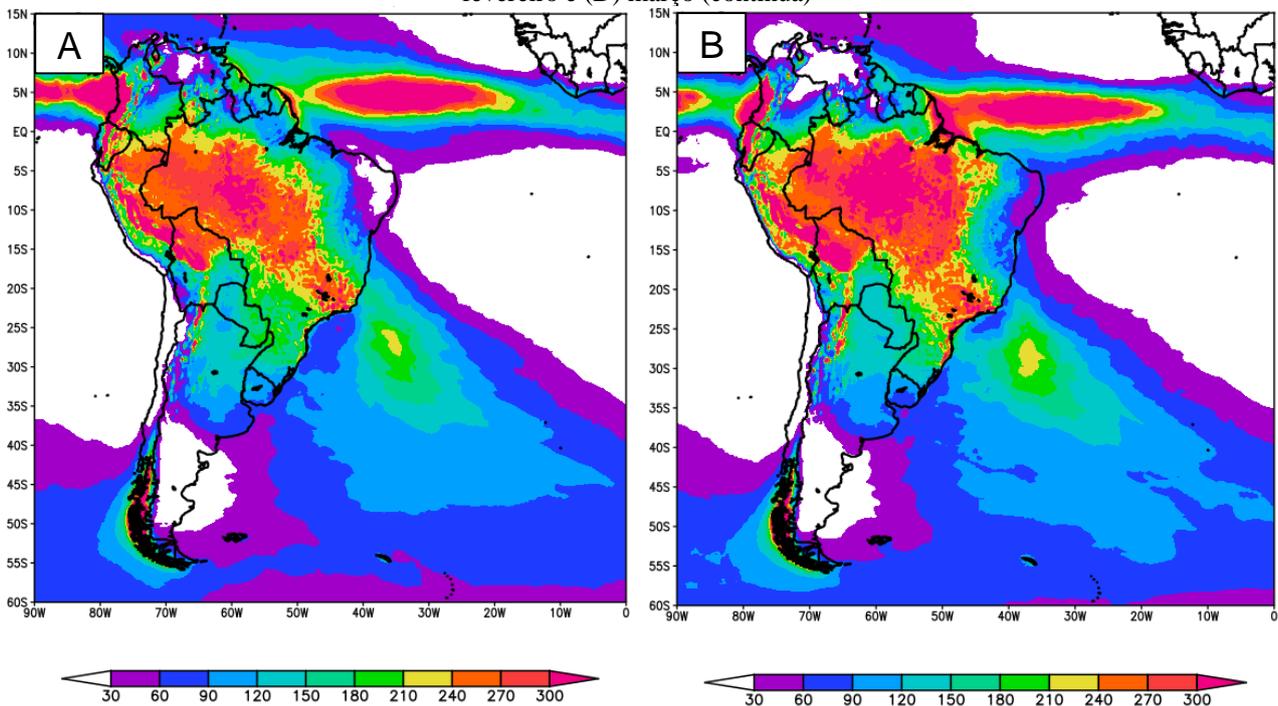
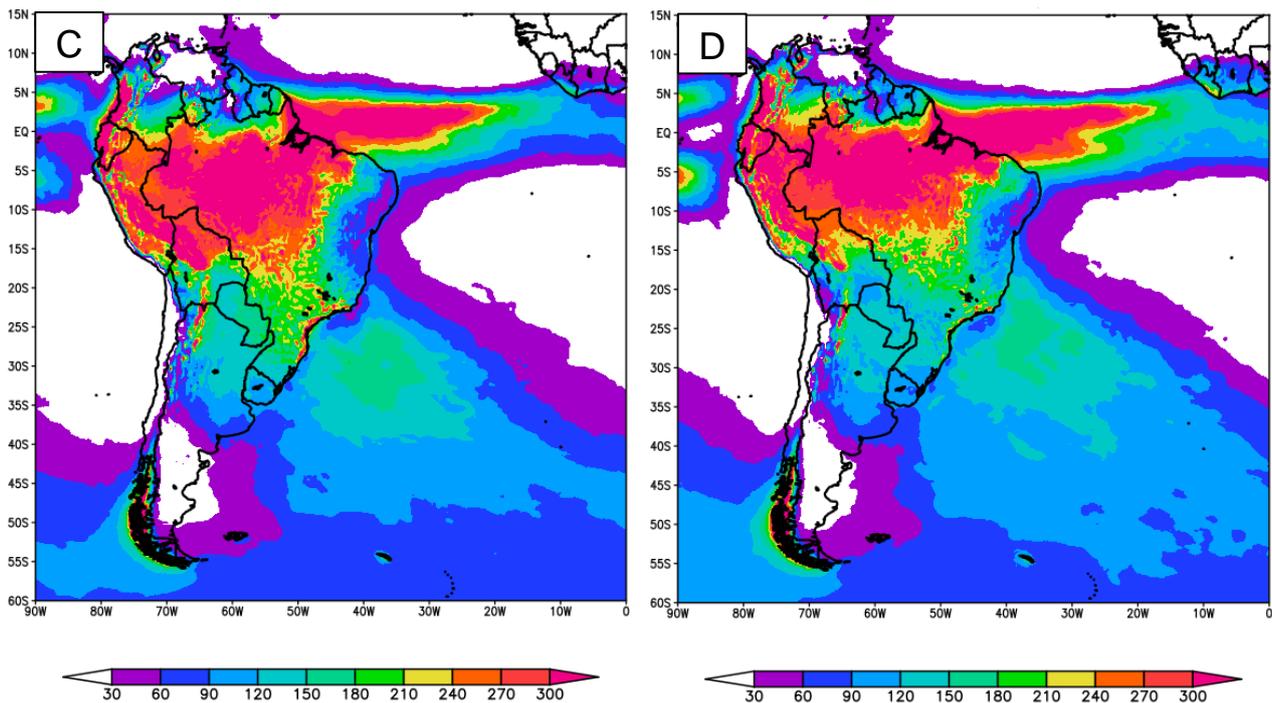


Figura 11 – Média climatológica de precipitação total (mm/dia) para os meses de (A) dezembro, (B) janeiro, (C) fevereiro e (D) março (conclusão)



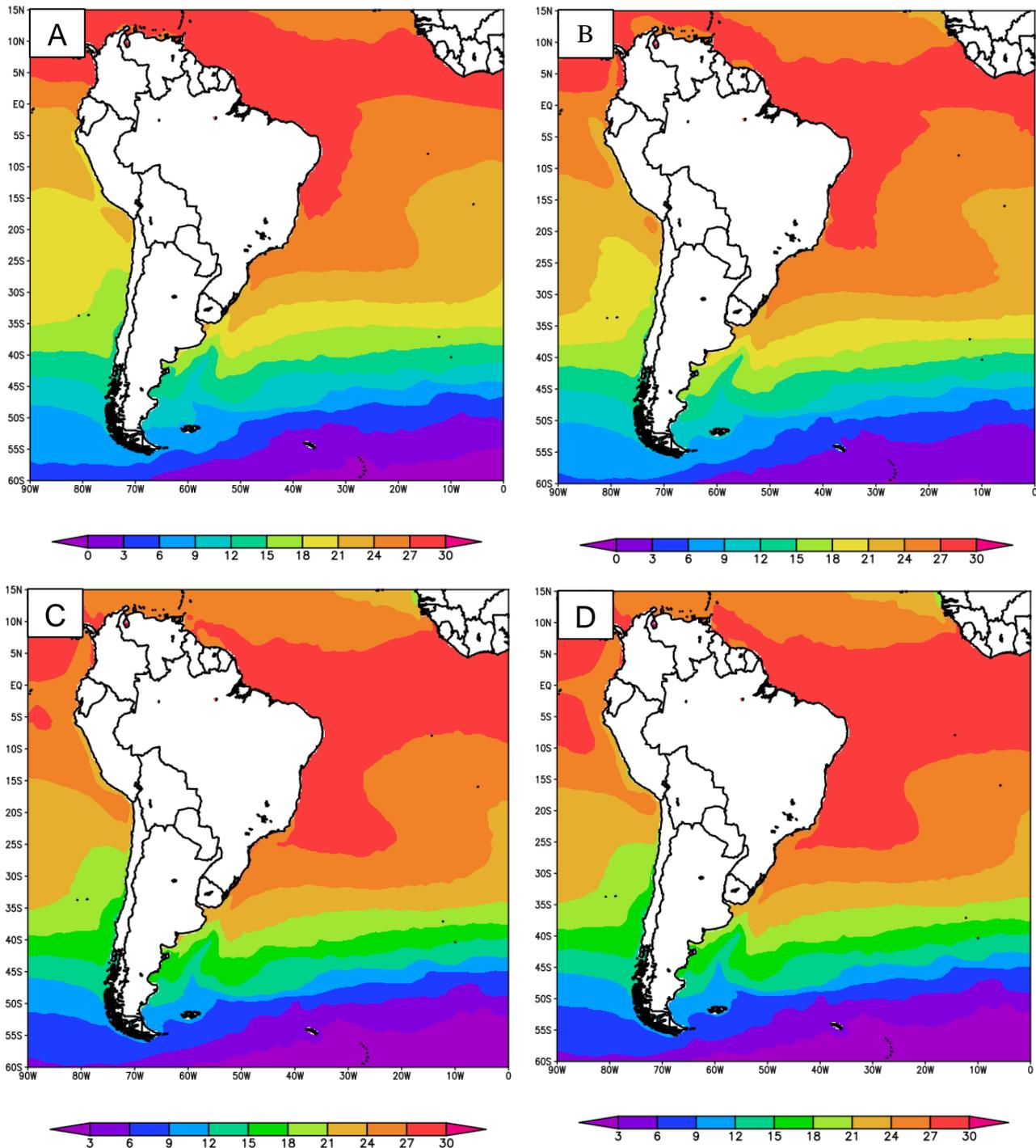
Fonte: elaboração própria a partir de dados do ECMWF.

#### 4.6 Temperatura da Superfície do Mar

Quanto a Temperatura da Superfície do Mar, sabe-se que as águas do Atlântico Sudoeste são influenciadas por diversos fatores atmosféricos e oceânicos, e varia ao longo do ano devido a esses fatores (PEZZI et al., 2016). A TSM é maior próximo ao Equador e fica mais fria conforme a latitude aumenta. Observando a Figura 12, entretanto, nota-se que águas mais quentes escoam de norte para sul desde o litoral norte-nordeste do Brasil até a região Sul do País. Esse aspecto do escoamento está associado à influência da Corrente do Brasil (CB), que transporta águas quentes e salinas, e configura uma importante característica da costa brasileira.

Traçando um panorama de dezembro até março, observa-se que com o passar dos meses, as águas da CB alcançam latitudes mais altas no fim do verão. Entre as latitudes de 35°S-45°S, há um contraste de temperatura entre as águas da CB e da CM, que flui de sul para norte ao longo da costa da América do Sul, dando origem à chamada Confluência Brasil-Malvinas.

Figura 12 – Média climatológica de TSM (°C) para os meses de (A) dezembro, (B) janeiro, (C) fevereiro e (D) março



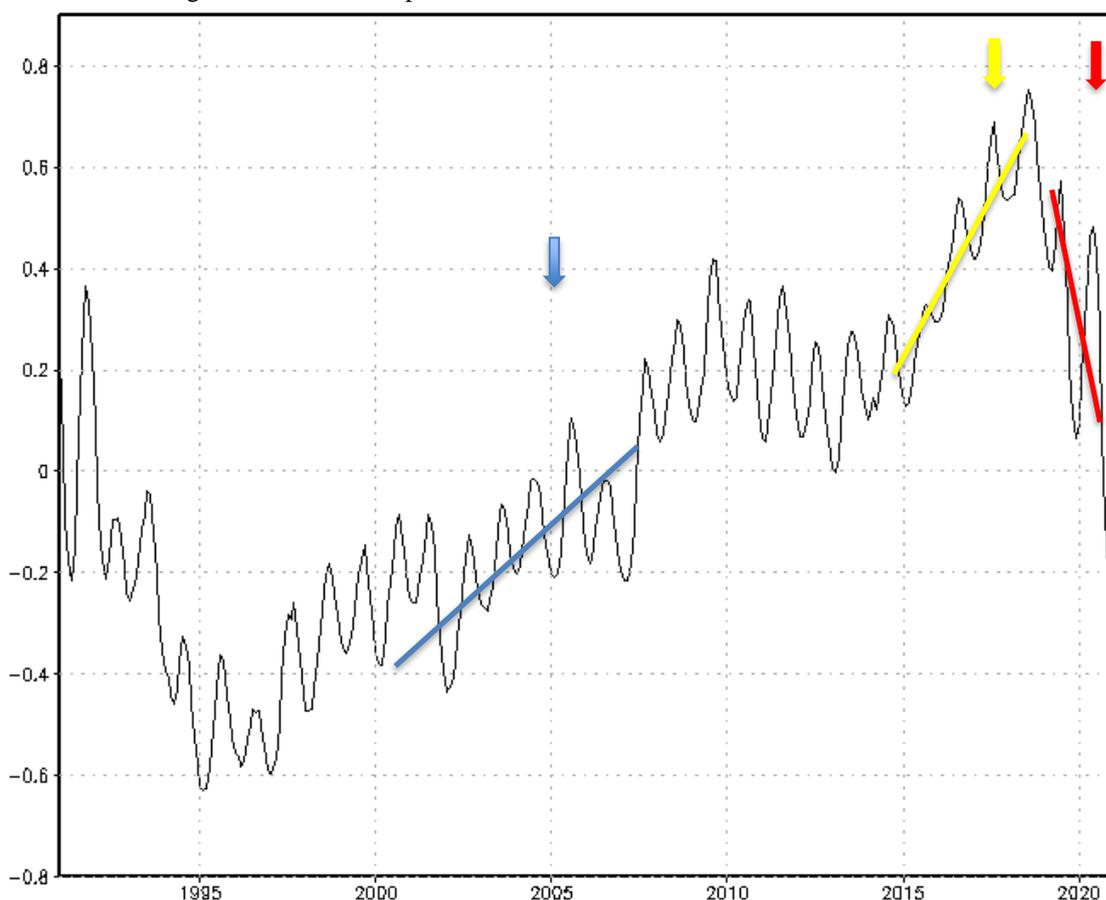
Fonte: elaboração própria a partir de dados do ECMWF.

Para avaliar melhor as variações de TSM no Atlântico Sudoeste, além da média de trinta anos desta variável para os meses de dezembro a janeiro, foi elaborada uma série temporal com valores médios de trinta anos da TSM na área da CBM. A área usada para o cálculo da média da TSM foi a região entre as latitudes 35°S-45°S e longitudes 50°W-60°W. Após o cálculo da TSM média de trinta anos na área da CBM, foi obtida a média móvel de 36 meses e sua anomalia, com a intenção de identificar as tendências interanuais desta variável. A série temporal da média móvel de 36 meses da anomalia da TSM está representada na Figura 13.

Com base na figura, nota-se uma tendência de ascensão nos valores de anomalia de TSM do Atlântico Sudoeste entre 1995 e 2019. Nota-se que em 2005 a anomalia de TSM é negativa por quase todo o tempo, indicando valores abaixo da média de trinta anos. Entretanto, de 1995 até 2006, é visível a tendência de crescimento das anomalias, conforme representada pela linha azul. A ocorrência de ZCAS em 2017 encontra-se num contexto de elevação da TSM, conforme representado em amarelo, com temperaturas acima da média de trinta anos. O ano de 2020 (apontado pela seta vermelha) possui anomalias positivas, indicando que a TSM possui valores acima da média de trinta anos, entretanto num período cuja série temporal apresenta tendência de queda da TSM. Esta tendência de aumento de TSM do Atlântico Sudoeste a partir do final da década de 90 coincide com o período identificado por Barcelos e Quadro (2019) de aumento de dias/ano com ZCAS que ocorre a partir dos anos 2000.

De fato, para estabelecer uma relação direta entre aumento de dias de ZCAS e crescimento da anomalia de TSM do Atlântico Sudoeste seria necessário evidências mais robustas. Porém, o fato de estudos como Venegas et al. (1997) e Bombardi et al. (2014) estabelecerem relação entre a TSM do Atlântico Sudoeste e ZCAS é um bom indício de que os fenômenos (aquecimento CBM e dias de ZCAS) possam estar interligados.

Figura 13 – Série Temporal da anomalia da média de TSM entre 1991 e 2020



Fonte: elaboração própria a partir de dados do ECMWF.

Buscando caracterizar um pouco mais a média de TSM dos meses de dezembro a março, foram plotadas separadamente as sequências de trinta anos destes meses, conforme a Figura 14. As maiores amplitudes térmicas ao longo dos trinta anos são observadas nos meses de janeiro e fevereiro. Já a maior TSM média é do mês de fevereiro. Também é possível notar que a partir de 2009, os meses de dezembro, janeiro e fevereiro tem poucos ou nenhum valor de TSM média mensal abaixo da média de trinta anos.

Em dezembro (Figura 14A), o valor mínimo da média de TSM, indicado pela linha amarela na figura, ocorreu no ano de 2004 com  $+14,7^{\circ}\text{C}$ . O valor máximo, representado pela linha vermelha, foi de  $+17,5^{\circ}\text{C}$ , sendo alcançado no ano de 2009. A média para o mês de dezembro em 30 anos, representada pela linha verde, é de  $+16,2^{\circ}\text{C}$ . No mês de janeiro (Figura 14B), o valor mínimo da média de TSM na região da CBM ocorreu no ano de 2006 com  $+16,6^{\circ}\text{C}$ , enquanto o valor máximo foi de  $+19,5^{\circ}\text{C}$ , sendo alcançado nos anos de 2011 e 2012. A média para o mês de janeiro em 30 anos é de  $+18,2^{\circ}\text{C}$ .

Para os meses de fevereiro (Figura 14C), o valor mínimo da média de TSM ocorreu no ano de 1996, quando foi atingido a temperatura de  $+17^{\circ}\text{C}$ . O valor máximo da média foi de  $+20,2^{\circ}\text{C}$ , em 2012, e a média para o referido mês é de  $+18,8^{\circ}\text{C}$ , tornando fevereiro o mês com as águas mais quentes na região da CBM entre 1991 e 2020. Já o mês de março (Figura 14D) possui como valor mínimo da média de TSM  $+16,9^{\circ}\text{C}$ , no ano de 1995. A maior média de TSM ocorreu no ano de 2009, quando a temperatura de  $+19,5^{\circ}\text{C}$  foi alcançada. A média para os meses de março numa escala de 30 anos é de  $18,4^{\circ}\text{C}$ . Observando-se o mês de janeiro de 2005, nota-se que o janeiro anterior teve TSM mais fria. Já no mês de dezembro, percebe-se que o dezembro de 2016 foi mais quente do que em 2017. O mesmo padrão é observado em 2020, quando fevereiro de 2019 teve TSM mais quente do que no referido ano.

Figura 14 – Série Temporal da TSM média para os meses de (A) dezembro, (B) janeiro, (C) fevereiro e (D) março entre 1991 e 2020. A linha verde representa o valor médio, a vermelha a média máxima e a amarela a média mínima (continua)

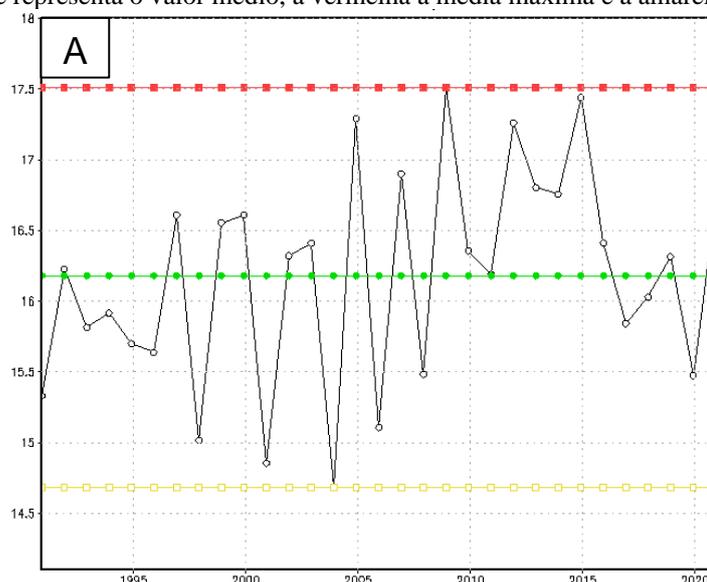
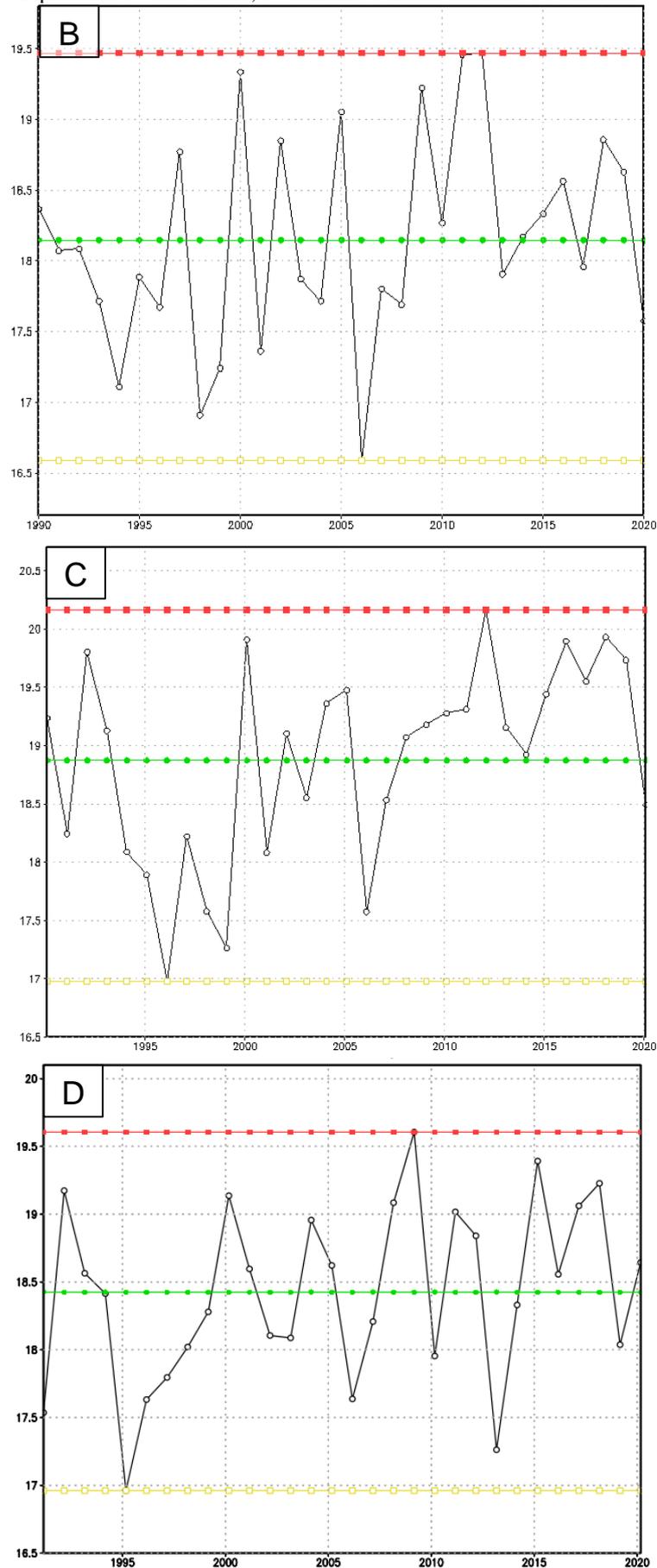


Figura 14 - Série Temporal da TSM média para os meses de (A) dezembro, (B) janeiro, (C) fevereiro e (D) março entre 1991 e 2020. A linha verde representa o valor médio, a vermelha a média máxima e a amarela a média mínima (conclusão)



Fonte: elaboração própria a partir de dados do ECMWF.

## 5. Descrição dos eventos de ZCAS

A definição dos eventos estudados levou em consideração a série temporal da média da TSM no Atlântico Sudoeste que, conforme Leyba et al. (2019), apresenta tendência de crescimento a partir do final do século XX. Entretanto, devido à falta de tempo para avaliar todos os anos das últimas duas décadas, foram selecionados três anos para este estudo.

O primeiro ano selecionado foi 2005, que está no início da série temporal com tendência de crescimento da TSM, de acordo com a Figura 13 na seção anterior. Os outros dois anos são 2017, onde observa-se o valor máximo da série de média móvel de TSM, e 2020, onde a tendência desta variável parece se inverter/estabilizar.

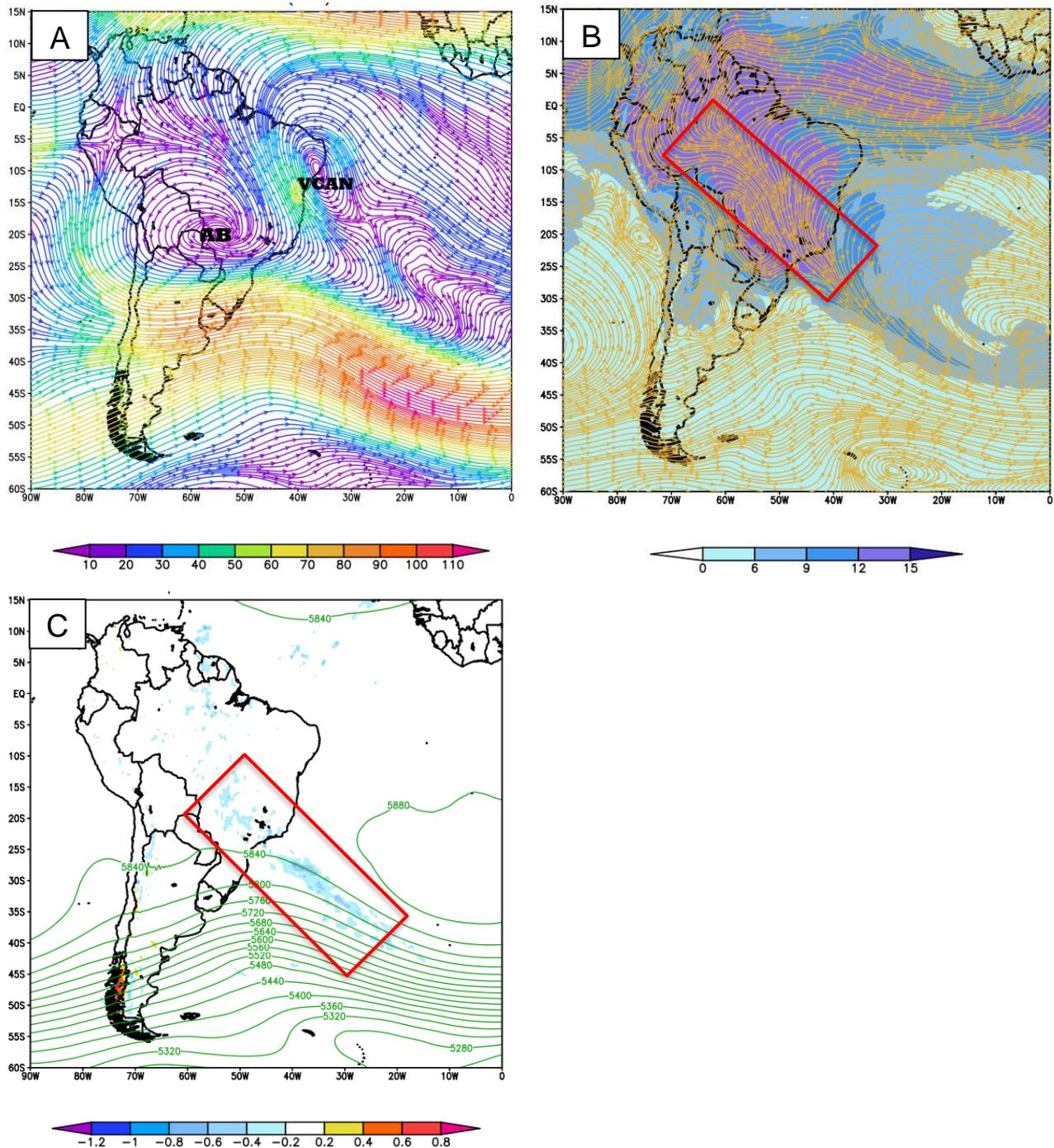
### 5.1 Período entre 17 e 22 de janeiro de 2005

O primeiro episódio de ZCAS analisado ocorreu entre os dias 17 e 22 de janeiro de 2005 e esteve associado com a atuação de uma frente fria sobre o oceano na região Sudeste do Brasil. Na Figura 15A, foi representada a média de linhas de corrente em 200 hPa para os cinco dias do evento de ZCAS. Observou-se a AB bem configurada sobre o Mato Grosso do Sul e o VCAN sobre região Nordeste do País. A divergência em altitude provocada pela AB e VCAN favoreceu o alinhamento do escoamento de noroeste para sudeste e a convergência de umidade, ambos em 850 hPa, caracterizando o Jato de Baixos Níveis (JBN) que ajudou a manter a convecção úmida sobre o Centro-Oeste, Sudeste e Norte do Brasil.

O retângulo vermelho na Figura 15B está destacando a região da convergência de umidade em baixos níveis associada ao evento de ZCAS (o hachurado colorido na figura indica a umidade específica em g/kg). Na figura, identifica-se a orientação NW-SE do escoamento a partir da região Norte do Brasil até o norte de Goiás, e depois com orientação N-S de Goiás até o sudoeste do Atlântico, atravessando grande parte da região Sudeste. Desta forma, é possível identificar a convergência de massa e umidade na região da ZCAS em sua posição climatológica sobre a região Sudeste do Brasil (CARVALHO et al., 2002) no início do evento.

Na Figura 15C, observa-se na área destacada um cavado continental sobre a região Sul do Brasil no campo de altura geopotencial com movimento vertical ascendente (negativo) em 500 hPa durante os dias do evento. Analisando a figura, nota-se que as linhas de fluxo com orientação NW-SE estão praticamente em fase com o movimento vertical em 500 hPa. A associação de fenômenos meteorológicos em todos os níveis, como o cavado na média troposfera, a divergência em altitude e a intensificação da convergência de massa e umidade em baixos níveis desde a Amazônia até o oceano deram suporte ao evento de ZCAS.

Figura 15 – Valores médios entre os dias 17 e 22 de janeiro de 2005: (A) Linhas de corrente e intensidade do vento em nós (cores) em 200 hPa, sinalizados a AB e o VCAN; (B) Linhas de corrente e umidade específica em g/kg (hachurado colorido) no nível de 850 hPa; e (C) Altura geopotencial (m) e velocidade vertical ômega (hPa/s) em 500 hPa



Fonte: elaboração própria a partir de dados do ECMWF.

Analisando as cartas sinóticas do CHM e as imagens do canal infravermelho do satélite GOES-12, foi sinalizada nas figuras, com retângulos vermelhos, a frente fria que organizou a convergência de umidade neste episódio de ZCAS. No dia 16 de janeiro de 2005, havia uma frente fria às 0000Z próxima a costa da região Sudeste, se deslocando para o Oceano na latitude de 28°S (Figuras 16A e 16B). No dia 17 de janeiro, às 0000Z, é possível notar que o sistema frontal continuou avançando a leste do litoral do Sudeste, na latitude de 23°S (Figura 16C). Doze horas depois, a frente

se manteve sobre a mesma posição e no dia 18, às 0000Z, tornou-se uma frente estacionária (Figura 16E).

A partir das Figuras 16D e 16F, observa-se que esse caráter estacionário da frente fria sobre a região Sudeste entre os dias 17 e 18 intensificou a convergência de umidade nas baixas camadas e organizou o JBN no sentido NW-SE, associando-se às demais características meteorológicas e configurando um episódio de ZCAS. A banda de nebulosidade associada a este episódio é persistente sobre o continente, prolongando-se para o Oceano Atlântico na altura do litoral do Estado de São Paulo. As cartas sinóticas do CHM em 2005 não indicam a representação da ZCAS porque antes de 2010 os critérios para essa identificação variaram. Este fato foi constatado a partir da comparação das cartas do CHM com boletins Climanálise e cartas sinóticas do CPTEC para eventos de ZCAS antes de 2010.

A ZCAS começou a se desconfigurar no dia 21 de janeiro, quando uma nova frente fria se deslocou para nordeste sobre o oceano e passou pela região Sudeste. Com isso, a banda de nebulosidade começou a perder organização no centro-norte do Brasil e o fluxo de umidade ao longo da ZCAS mudou a orientação de NW-SE para um escoamento meridional desde a Amazônia até o norte do Paraguai.

Figura 16 – Carta Sinótica de Superfície e imagem de satélite Goes-12 correspondente às 0000Z (A) e (B) do dia 16; (C) e (D) do dia 17; (E) e (F) do dia 18. O retângulo vermelho destaca as bandas de nebulosidade associadas à ZCAS (continua)

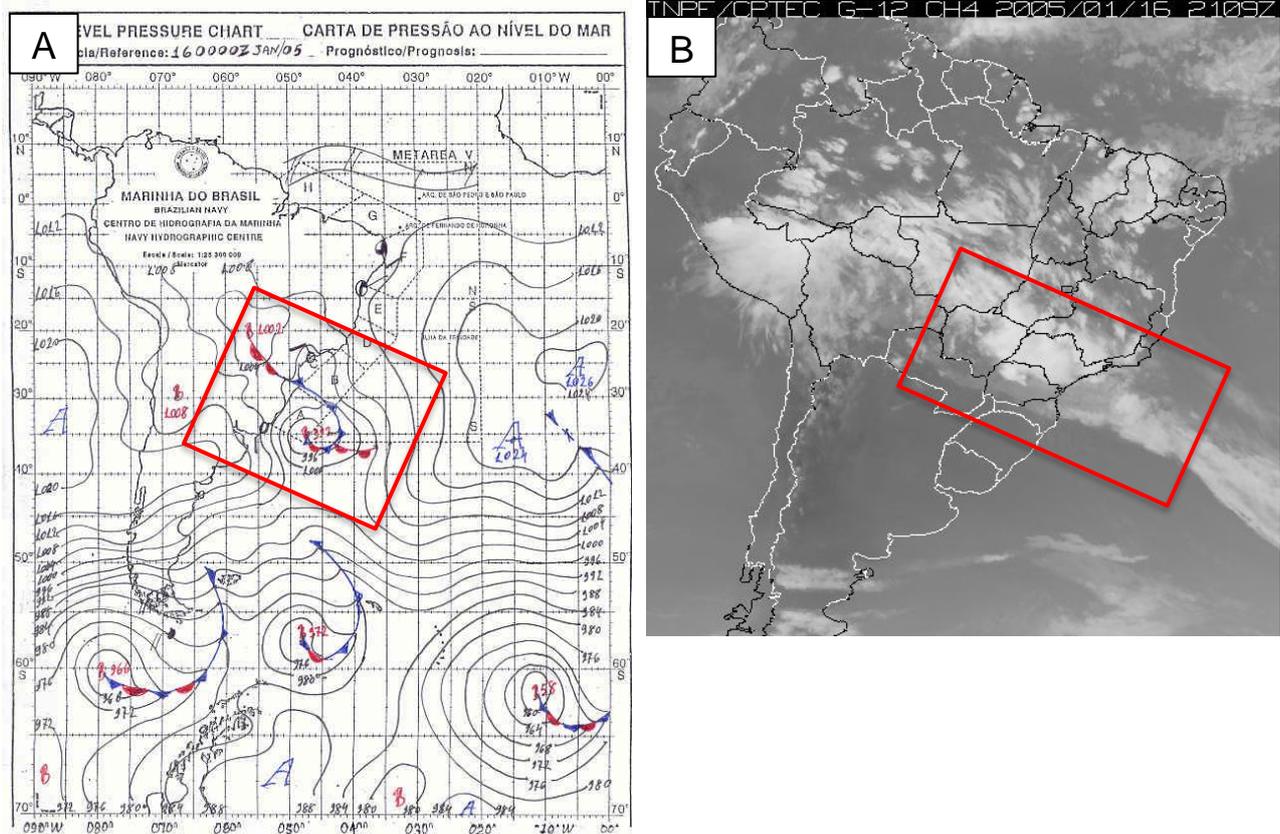
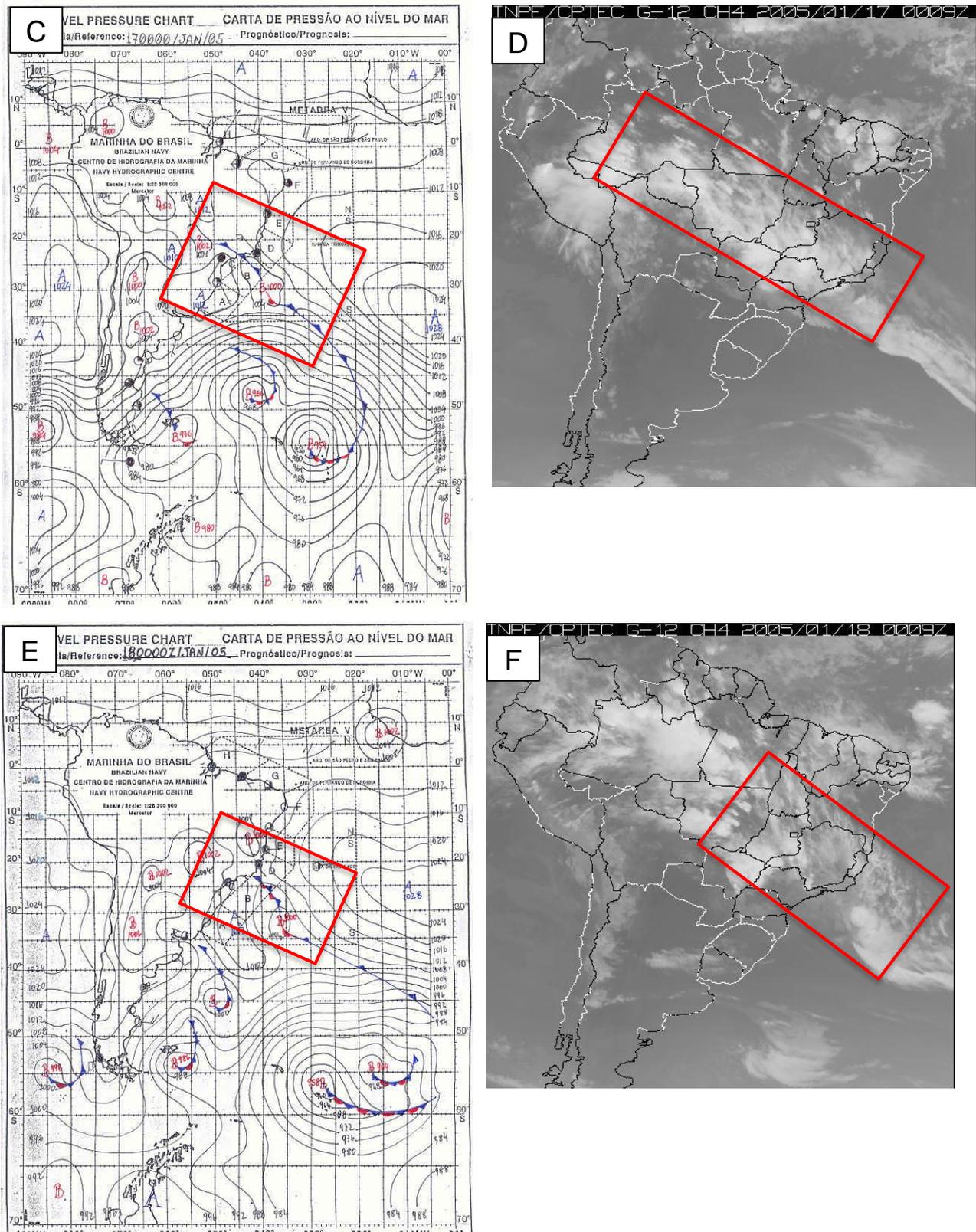


Figura 16 – Carta Sinótica de Superfície e imagem de satélite Goes-12 correspondente às 0000Z (A) e (B) do dia 16; (C) e (D) do dia 17; (E) e (F) do dia 18. O retângulo vermelho destaca as bandas de nebulosidade associadas à ZCAS (conclusão)

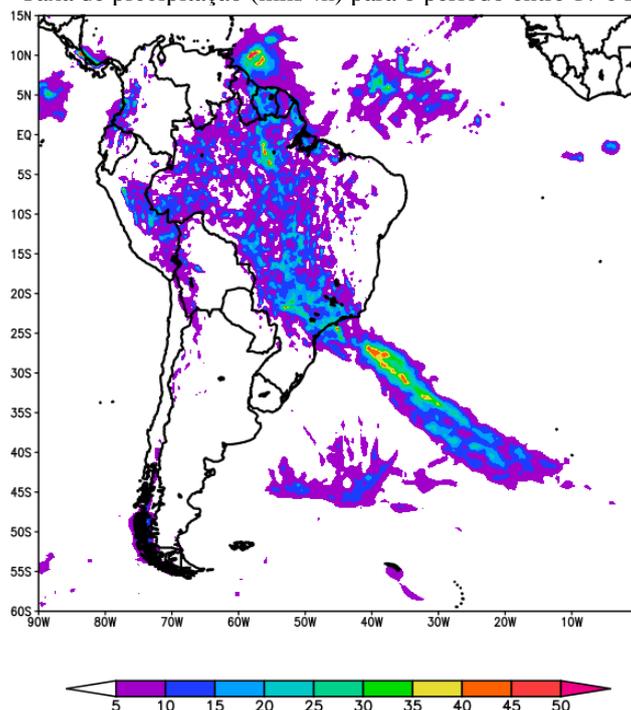


Fonte: CHM e CPTEC/INPE.

O evento de janeiro de 2005 teve duração de cinco dias e, segundo o Boletim Climanálise do CPTEC, os acumulados de precipitação (dados observados nas estações meteorológicas do INMET) excederam os 125 mm no Estado de São Paulo, no noroeste do Paraná e no sudeste de Minas Gerais.

A Figura 17 representa a taxa de precipitação em mm/4h entre os dias 17 e 22 de janeiro obtido a partir dos dados de reanálise ERA5. Na figura, observa-se que a precipitação se estendeu desde a região Norte, passando pelas regiões Centro-Oeste e Sudeste, e alcançando o Oceano Atlântico, onde ocorreram os maiores acumulados de chuvas do período. Entretanto, comparando os dados da reanálise com a precipitação observada nas estações do INMET (figura não mostrada), notou-se que a precipitação da reanálise ERA5 foi subestimada nas extremidades das porções continentais atingidas pela ZCAS.

Figura 17 – Taxa de precipitação (mm/4h) para o período entre 17 e 22 de janeiro



Fonte: elaboração própria a partir de dados do ECMWF.

## 5.2 Período entre 08 e 16 de dezembro de 2017

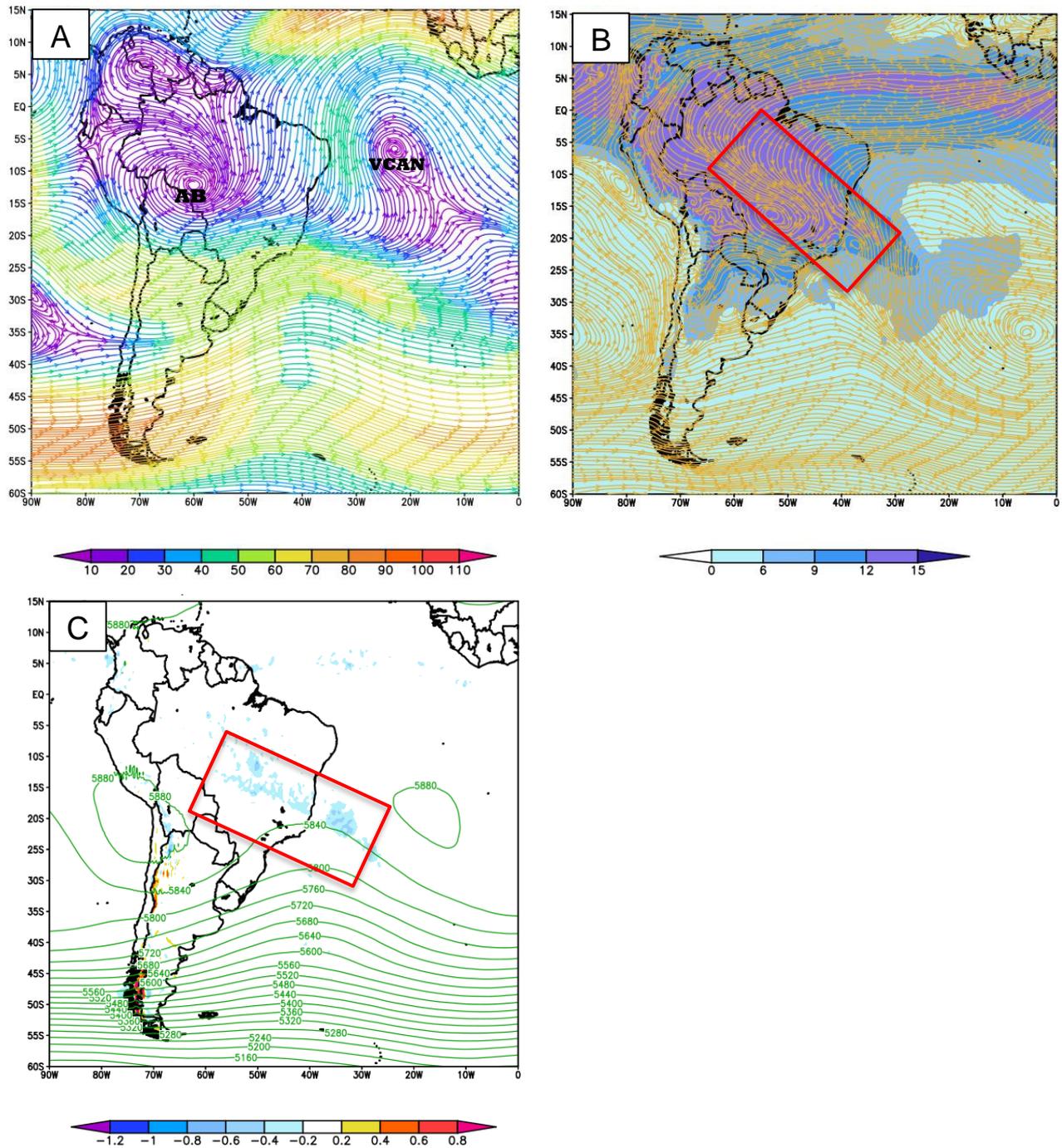
O segundo episódio de ZCAS analisado ocorreu entre os dias 08 e 16 de dezembro de 2017 e esteve associado com a atuação de um cavado sobre o oceano ao norte da região Sudeste do Brasil, que deu suporte dinâmico à convergência de massa em baixos níveis. É possível observar na média de linhas de corrente em 200 hPa para os dias deste evento de ZCAS a AB configurada mais a norte, sobre o Estado do Mato Grosso e o VCAN presente a leste da região Nordeste do País (Figura 18A).

A divergência em altitude provocada pela atuação da AB no oeste do Mato Grosso e do VCAN na costa leste do Nordeste favoreceram o alinhamento NW-SE em baixos níveis, intensificando o escoamento característico do JBN e aumentando a convergência em baixos níveis. Na Figura 18B, além das linhas de corrente na baixa troposfera, pode-se identificar altos valores de umidade específica desde a região Amazônica até o litoral da Região Sudeste do Brasil.

Durante os dias do evento de ZCAS, observou-se um cavado sobre a região continental e oceânica, na vizinhança do Estado do Espírito Santo no campo de altura geopotencial em 500 hPa. Já

o campo de velocidade vertical ômega em 500 hPa (Figura 18C) indica ascendência de massa em duas porções: a primeira praticamente em fase com o fluxo convergente, com alinhamento NW-SE desde o Centro-Oeste até o litoral sul da Bahia e a segunda mais a leste, acompanhando o alinhamento e localizando-se sobre o Oceano Atlântico. A associação entre o cavado e a ascensão de massa em 500 hPa mais a norte indica que a confluência de massa e umidade associada à ZCAS se posicionou também mais a norte em relação à localização climatológica sobre a região Sudeste neste evento.

Figura 18 – Valores médios entre os dias 08 e 16 de dezembro de 2017: (A) Linhas de corrente e intensidade do vento em nós (cores) em 200 hPa, sinalizados a AB e o VCAN; (B) Linhas de corrente e umidade específica em g/kg (hachurado colorido) no nível de 850 hPa; e (C) Altura geopotencial (m) e velocidade vertical ômega (hPa/s) em 500 hPa



Fonte: elaboração própria a partir de dados do ECMWF.

Analisando as cartas sinóticas do CHM e imagens do satélite GOES-13 deste episódio de ZCAS, percebe-se no dia 07 de dezembro, às 0000Z (Figuras 19A e 19B), nebulosidade a leste dos estados do Espírito Santo e Bahia, associados a um cavado que está sobre o oceano e a um centro de baixa pressão sobre o continente.

A convergência de massa se manteve alinhada à frente estacionária, como observado no dia 08, às 0000Z (Figura 19C). Este foi um fator importante para a intensificação da convergência de umidade ao norte do Espírito Santo. Associado às demais características meteorológicas já citadas, a ZCAS se configurou com uma banda de nebulosidade presente sobre as regiões Centro-Oeste, Sudeste e Nordeste do País, destacada na área do retângulo vermelho (Figura 19D).

Figura 19 – Carta Sinótica de Superfície e imagem de satélite Goes-13 correspondente às 0000Z (A) e (B) do dia 07; (C) e (D) do dia 08. O retângulo vermelho destaca as bandas de nebulosidade associadas à ZCAS (continua)

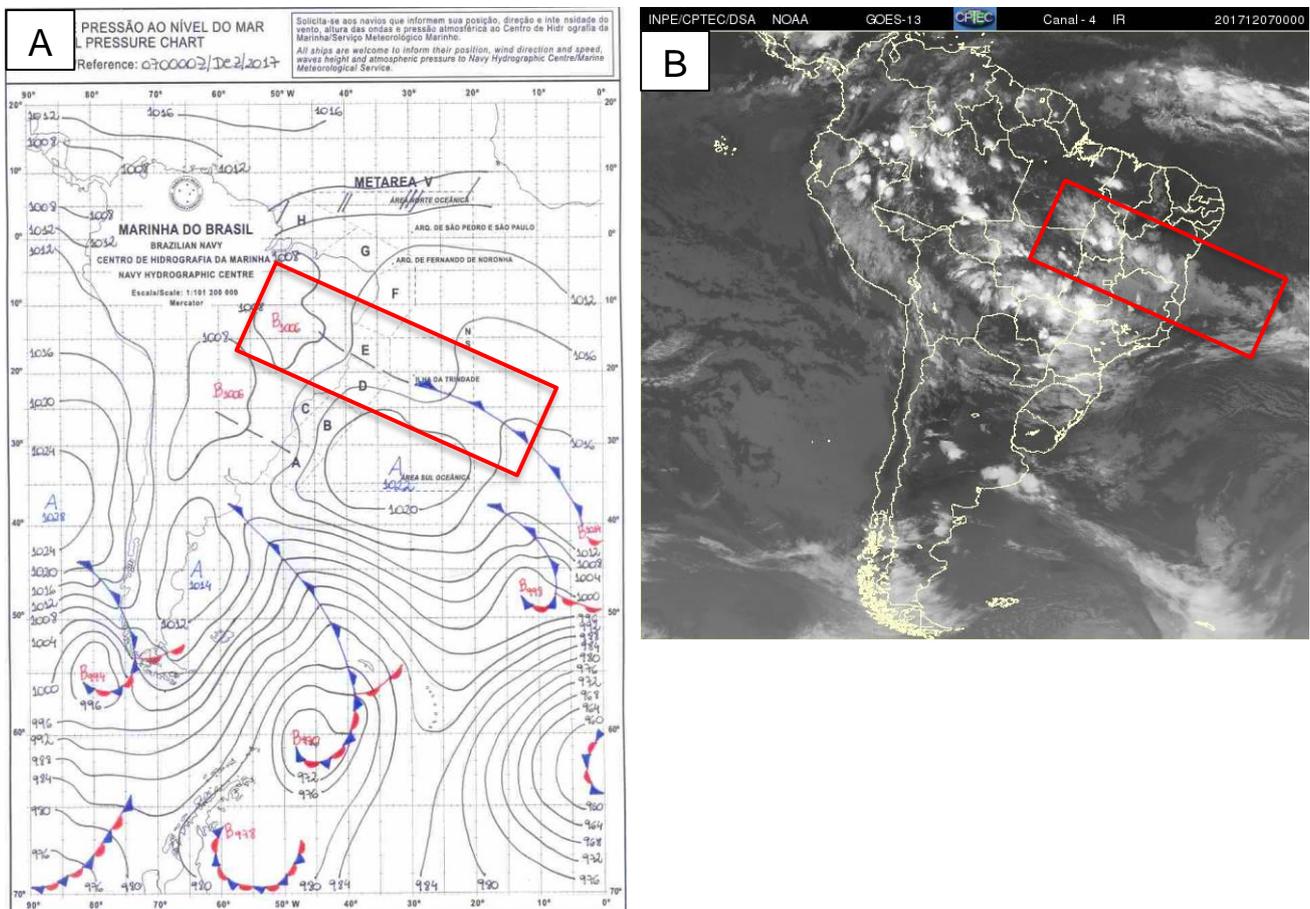
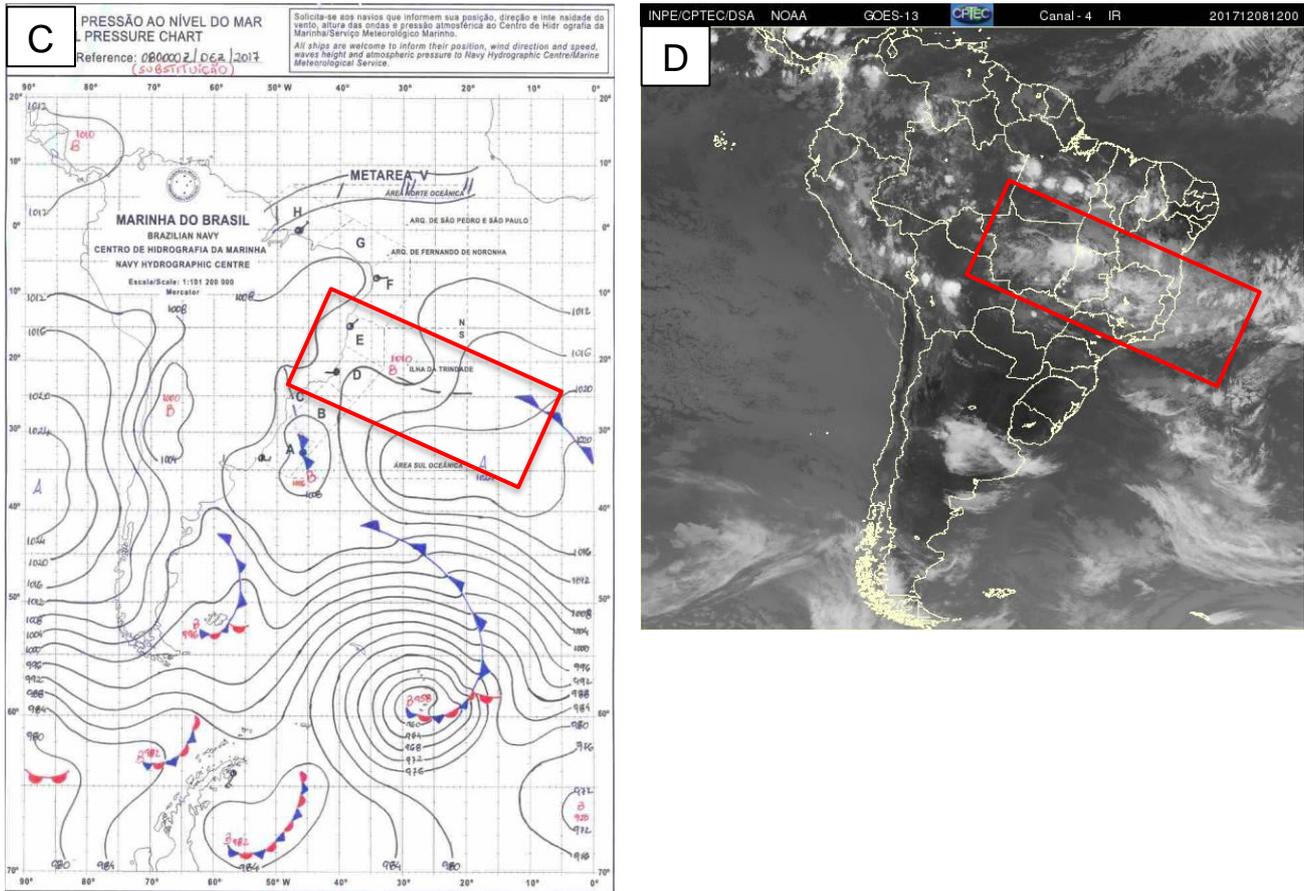


Figura 19 – Carta Sinótica de Superfície e imagem de satélite Goes-13 correspondente às 0000Z (A) e (B) do dia 07; (C) e (D) do dia 08. O retângulo vermelho destaca as bandas de nebulosidade associadas à ZCAS (conclusão)

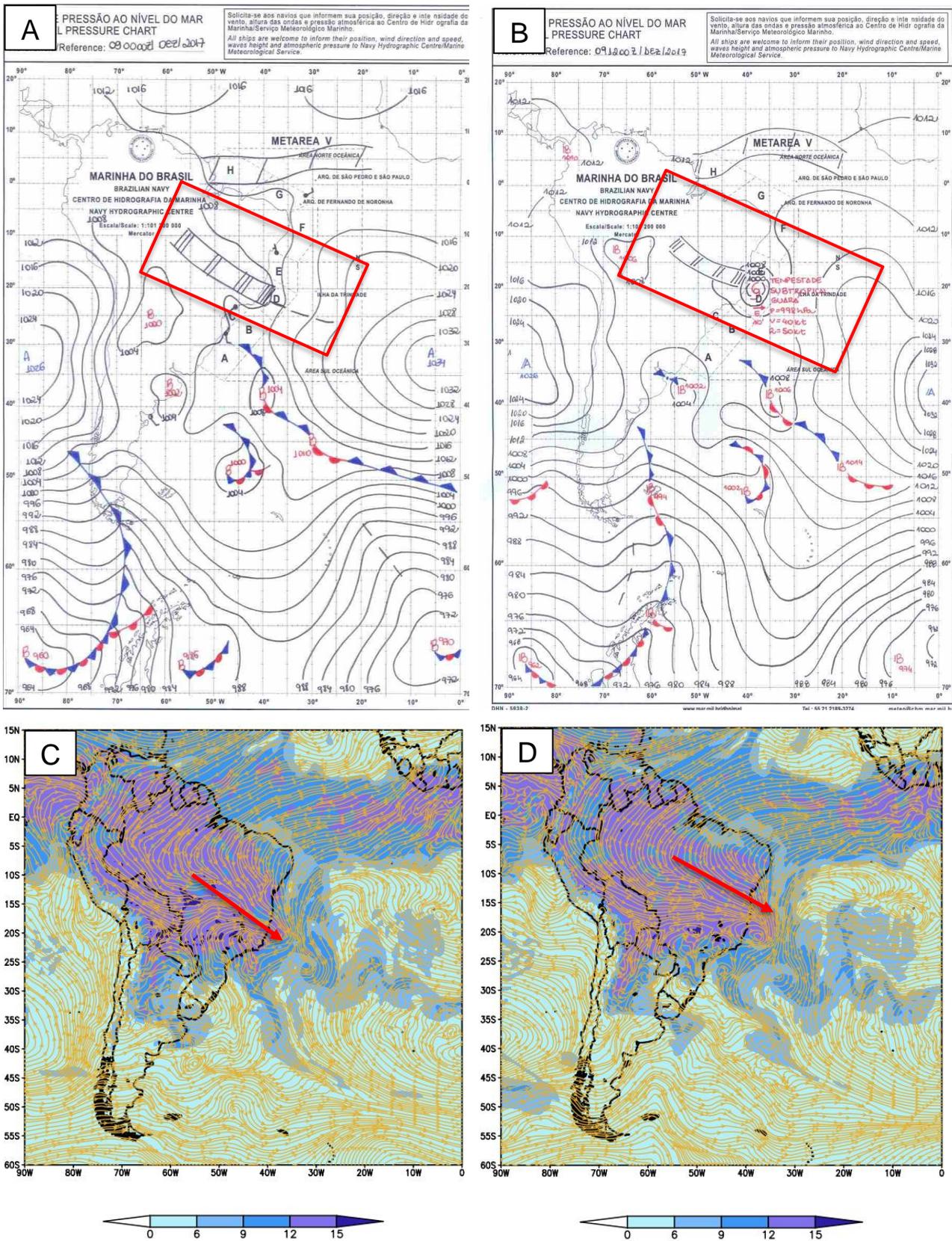


Fonte: CHM e CPTEC/INPE.

As áreas de instabilidades associadas a ZCAS alinhadas a um cavado atmosférico (Figura 20A) deram início a uma ciclogênese subtropical na manhã do dia 09 (Figura 20B). De acordo com o Relatório Pós-Evento do Serviço Meteorológico Marinho (SMM), do CHM, o ciclone foi classificado como Tempestade Subtropical (TS) devido aos ventos com intensidade superiores a 33 nós e nomeado como “Guará”, conforme preconizado na publicação NORMAM-701/DHN. Na Figura 20C, é possível notar o escoamento em superfície afetado pela TS Guará e na Figura 20D, o deslocamento da TS para sudeste e o posicionamento mais ao norte do fluxo de umidade associado à ZCAS, assentando-se no sul da Bahia.

Esse episódio de ZCAS começou a se desconfigurar no dia 16 de dezembro, quando uma frente fria que estava se deslocando a leste da região Sudeste, sobre o oceano, desorganizou a banda de nebulosidade e direcionou o fluxo de umidade sobre o continente para o norte do Paraguai (figura não mostrada). Desta forma, no dia 17 de janeiro de 2017 não é possível mais observar a ZCAS.

Figura 20 – Carta Sinótica de Superfície no dia 09 de dezembro de 2017 (A) às 0000Z e (B) às 1200Z; Linhas de corrente e umidade específica em g/kg (hachurado colorido) no nível de 850 hPa (C) às 0000Z e (D) às 1200Z

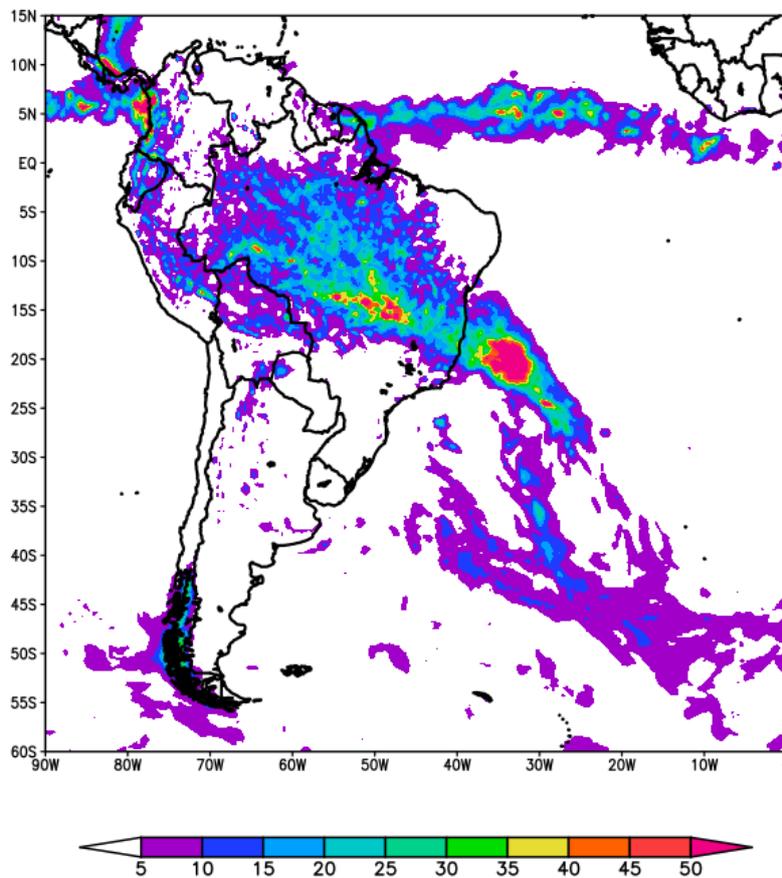


Fonte: CHM e elaboração própria a partir de dados do ECMWF.

O evento analisado teve duração de nove dias e segundo dados das estações do INMET, os totais acumulados de chuva excederam os 120 mm na cidade de Linhares-ES e 142,8 mm na cidade

de Itapaci-GO, sendo observados os maiores índices de precipitação no norte das regiões Centro-Oeste e Sudeste. Utilizando os dados de reanálise ERA5, a Figura 21 representa a taxa de precipitação em mm/4h entre os dias 08 e 16 de dezembro, que descreve a orientação da ZCAS. É possível observar precipitações desde a região Norte, passando pela Centro-Oeste e norte da região Sudeste, atipicamente alcançando o Estado da Bahia. Sobre o Oceano Atlântico e região Centro-Oeste, encontraram-se os maiores índices de acumulados de chuvas neste período de acordo com os dados do ERA5. Os dados da reanálise representaram bem as chuvas em todas as regiões atingidas pela ZCAS, inclusive os máximos observados pelo INMET.

Figura 21 – Taxa de precipitação (mm/4h) para o período entre 08 e 16 de dezembro



Fonte: elaboração própria a partir de dados do ECMWF.

Cabe ressaltar que os meses de novembro e dezembro de 2017 tiveram cinco episódios de ZCAS. Eles ocorreram entre os dias 11 e 15 de novembro, 19 e 20 de novembro, 1º e 03 de dezembro, 08 a 16 de dezembro e do dia 30 de dezembro ao início de 2018. A sucessão de episódios de ZCAS originados pela grande irregularidade do tempo geraram um extenso período chuvoso na primavera/verão 2017/2018.

### 5.3 Período entre 28 de fevereiro e 09 de março de 2020

O terceiro e último episódio de ZCAS analisado ocorreu entre os dias 28 de fevereiro e 09 de março de 2020 e esteve associado com a atuação de uma frente fria sobre o oceano na região Sudeste do Brasil. Na Figura 22A, que representa as características médias dos dias de ZCAS deste episódio, observa-se em 200 hPa a AB bem configurada mais a norte em relação à climatologia, sobre a região amazônica e o VCAN configurado a leste da região Nordeste.

Na Figura 22B, nota-se que a divergência em altitude causada pela AB e pelo VCAN induz um alinhamento do escoamento em 850 hPa da região Norte do Brasil até o Sudeste, numa orientação N-S na região Norte e NW-SE sobre o Centro-Oeste e N-S até o Sudeste (em destaque no retângulo vermelho na Figura 22B). A combinação da divergência em altitude com o escoamento da baixa troposfera favoreceu a convergência em baixos níveis, dando suporte de umidade para o estabelecimento da ZCAS sobre o norte da região Sudeste do Brasil.

Observa-se, na Figura 22C, um cavado continental sobre a Região Sudeste do Brasil no campo de altura geopotencial em 500 hPa, sobre o centro-sul do Brasil. Na mesma figura, está representado o movimento vertical na média troposfera, onde ocorre ascensão (valores negativos) ao longo do eixo do cavado em 500 hPa em fase com o escoamento de 850 hPa.

Figura 22 – Valores médios entre os dias 28 de fevereiro e 09 de março de 2020: (A) Linhas de corrente e intensidade do vento em nós (cores) em 200 hPa, sinalizados a AB e o VCAN; (B) Linhas de corrente e umidade específica em g/kg (hachurado colorido) no nível de 850 hPa; e (C) Altura geopotencial (m) e velocidade vertical ômega (hPa/s) em 500 hPa (continua)

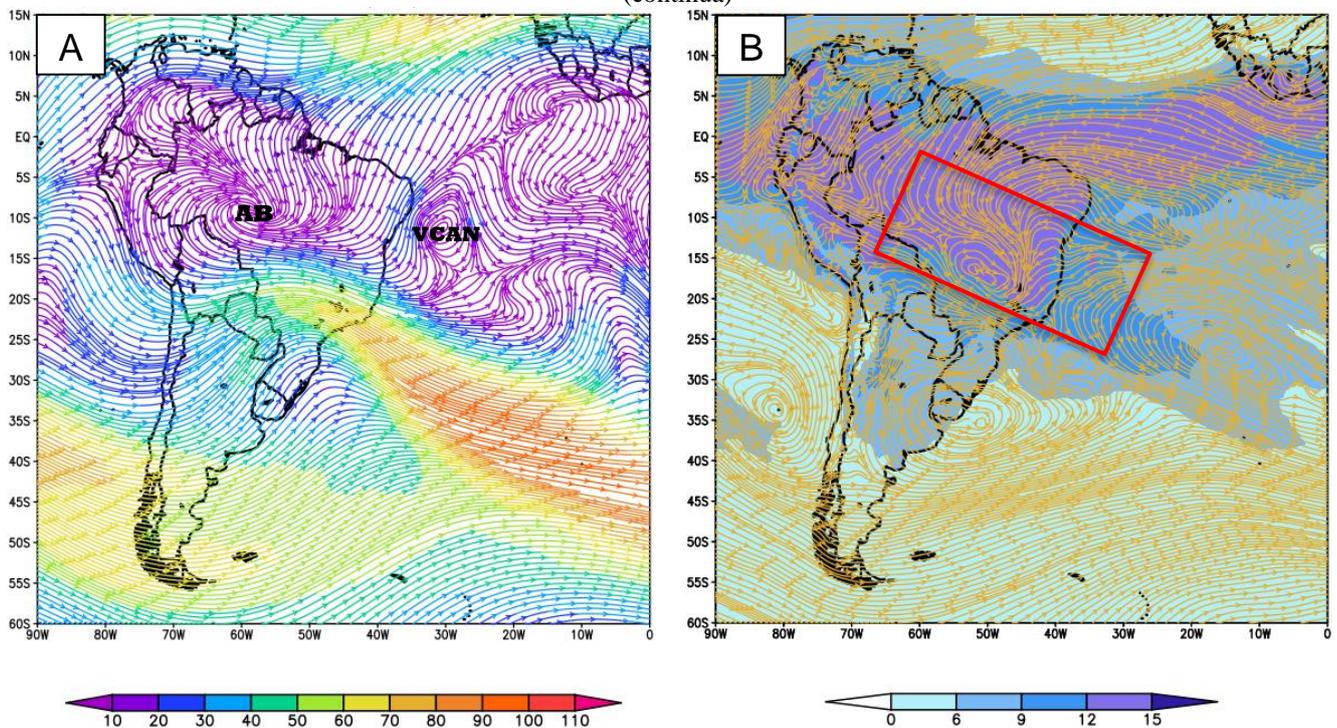
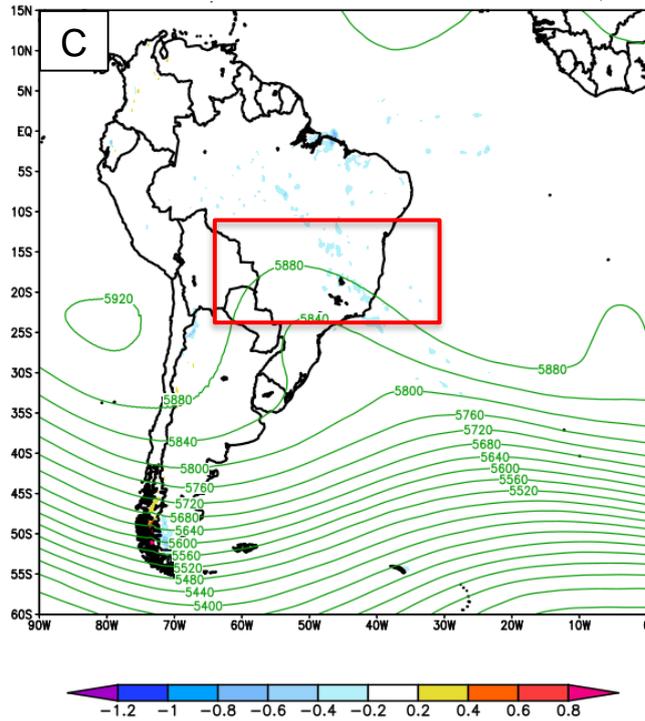


Figura 22 – Valores médios entre os dias 28 de fevereiro e 09 de março de 2020: (A) Linhas de corrente e intensidade do vento em nós (cores) em 200 hPa, sinalizados a AB e o VCAN; (B) Linhas de corrente e umidade específica em g/kg (hachurado colorido) no nível de 850 hPa; e (C) Altura geopotencial (m) e velocidade vertical ômega (hPa/s) em 500 hPa (conclusão)



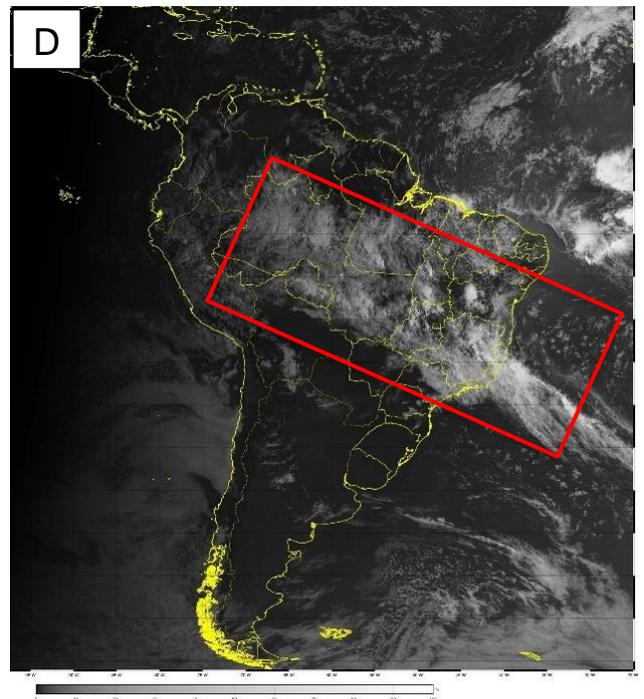
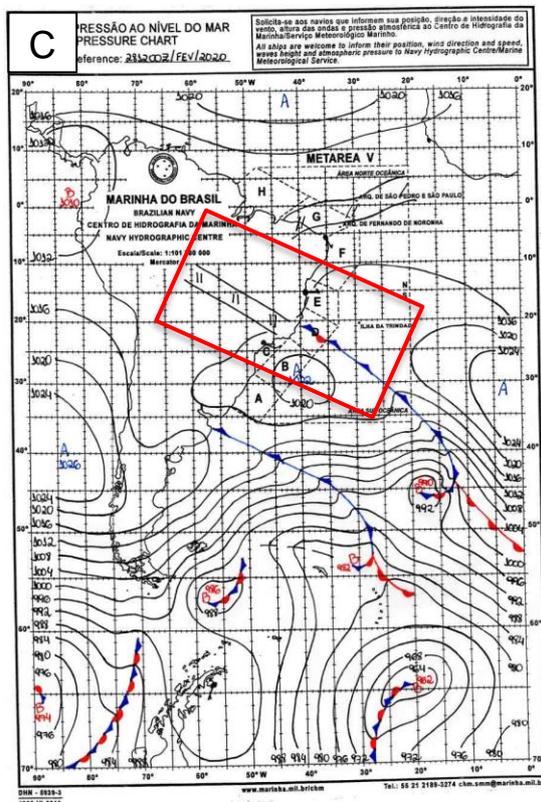
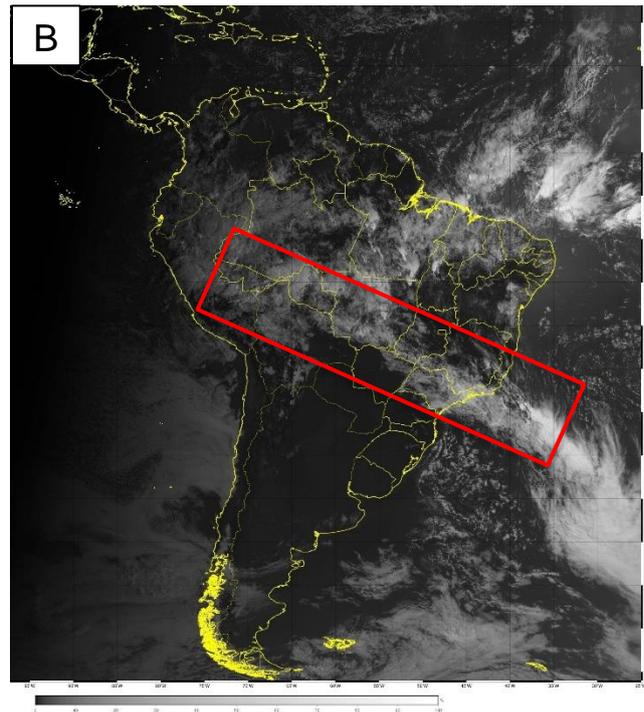
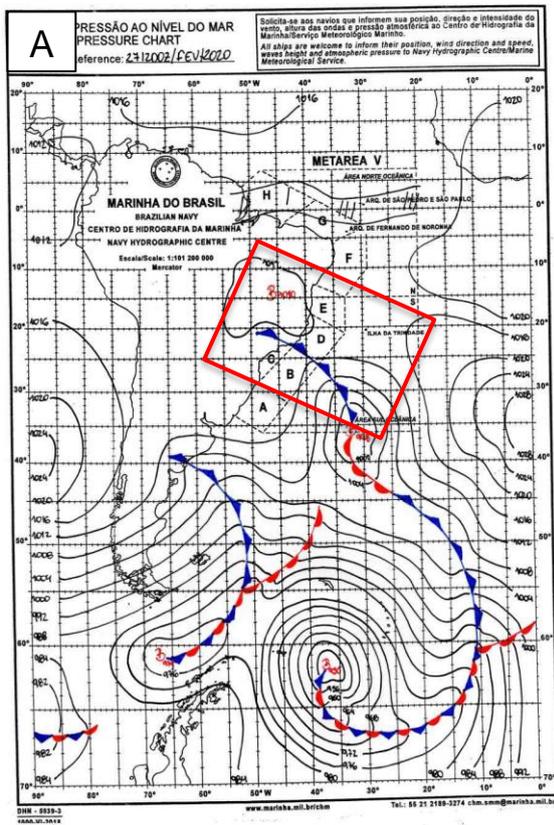
Fonte: elaboração própria a partir de dados do ECMWF.

Analisando as cartas sinóticas do CHM e imagens do satélite GOES-16, no dia 27 de fevereiro, às 1200Z, uma frente fria estava se deslocando para nordeste pela costa do Espírito Santo e sul da Bahia, organizando a convergência de massa e a nebulosidade desde o oeste da região Amazônica até o oceano, conforme as Figuras 23A e 23B). No dia 28 de fevereiro, às 1200Z, a frente ficou estacionária, mantendo a convergência de umidade que auxiliou a manutenção da ZCAS (Figuras 23C e 23D).

No dia 03 de março, a ZCAS estava posicionada sobre o litoral da região Sudeste às 0000Z. Doze horas depois, um cavado associado a um centro de baixa posicionado na latitude 25°S reposicionou a zona de convergência mais a norte, atingindo o Oceano Atlântico sobre o litoral da Bahia (figura não apresentada). Uma nova frente fria com deslocamento na direção nordeste alcançou o cavado associado a ZCAS, intensificando a convergência de umidade e posicionando a zona de convergência mais a norte, atingindo o litoral da região Nordeste no dia 07 de março.

O deslocamento da frente fria para leste, afastando-se do continente, desorganizou as condições favoráveis para manutenção da ZCAS. Desta forma, a ZCAS se descaracterizou no dia 09 de março.

Figura 23 – Carta Sinótica de Superfície e imagem de satélite Goes-16 correspondente às 1200Z (A) e (B) do dia 27; (C) e (D) do dia 28 de fevereiro. O retângulo vermelho destaca as bandas de nebulosidade associadas à ZCAS.

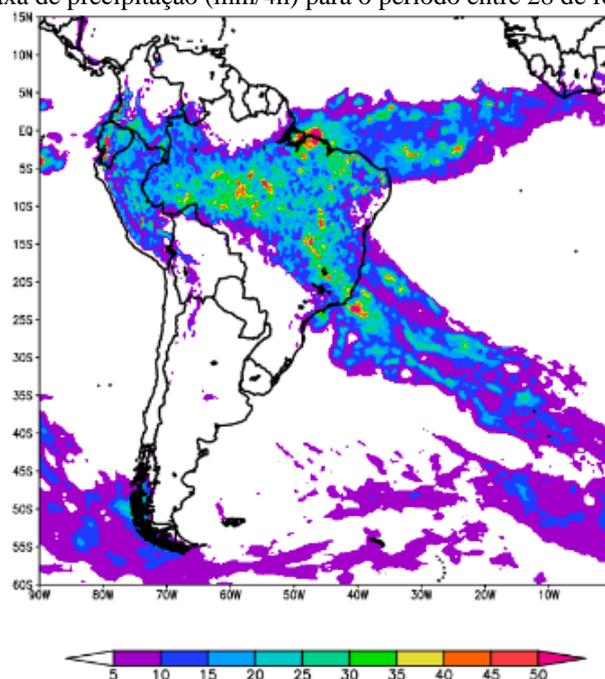


Fonte: elaboração própria a partir de dados do ECMWF.

O evento analisado teve duração de dez dias e segundo as estações do INMET, os totais de precipitação excederam os 157 mm na cidade de Vitória-ES e 187 mm na cidade de Manhuaçu-MG.

Utilizando os dados de reanálise ERA5, a Figura 24 representa a taxa de precipitação em mm/4h para o período entre os dias 28 de fevereiro e 09 de março. Observa-se que o campo de precipitação se estendeu desde a região Norte, passando pela Centro-Oeste e norte da Região Sudeste, alcançando o estado da Bahia. Os núcleos de maior intensidade de precipitação estão distribuídos desde a região Norte, passando pelo Centro-Oeste e Sudeste, chegando no Oceano Atlântico. Os dados da reanálise apresentaram boa concordância com as regiões onde os maiores valores de precipitação foram registrados. Contudo, houve uma superestimativa destes máximos. Vale reiterar que os dados da reanálise ERA5 representam a taxa de precipitação em mm/4h, o que pode implicar em valores de precipitação acumulada em 24 horas bem superiores a 200 mm.

Figura 24 – Taxa de precipitação (mm/4h) para o período entre 28 de fevereiro e 09 de março



Fonte: elaboração própria a partir de dados do ECMWF.

## 6. Temperatura da Superfície do Mar

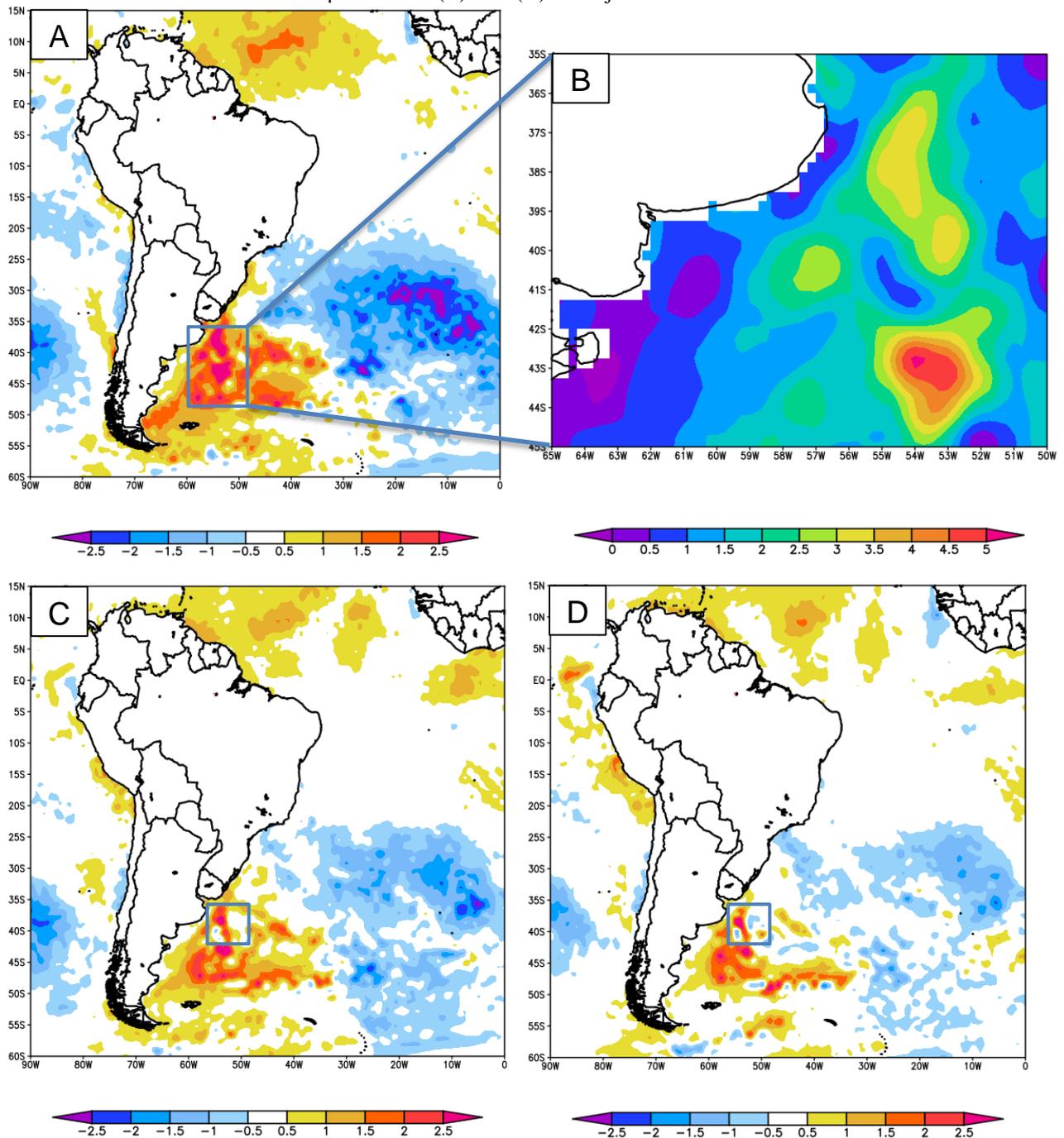
Como forma de analisar o comportamento da TSM no Atlântico Sul, em especial o Atlântico Sudoeste, foram apresentadas as anomalias de TSM para os dias que antecederam os eventos selecionados, assim como para os dias de atuação da ZCAS. Para isso, foram usados dados das reanálises ERA5 do ECMWF e foram comparadas a TSM diária com a média mensal de TSM para trinta anos (1991-2020). Nos três eventos, as considerações têm início sete dias antes do estabelecimento de cada episódio de ZCAS, como forma de buscar possíveis padrões da TSM nas condições ambientais na costa do Atlântico Sudoeste.

### 6.1 Período entre 17 e 22 de janeiro de 2005

Analisando a Figura 25A, observa-se que no dia 10 de janeiro de 2005, uma semana antes do episódio de ZCAS, há uma extensa área do Atlântico Sudoeste com uma anomalia positiva da TSM

em relação à média de 30 anos (área destacada no retângulo azul representa a região nas proximidades da CBM). Neste mesmo dia, por exemplo, é possível notar anomalias positivas de até  $+5^{\circ}\text{C}$  em relação à média na região da CBM (a Figura 25B representa uma ampliação da figura anterior nas proximidades da CBM). Esse aquecimento das águas na região da CBM se manteve nos dias que antecederam o episódio, como se observa no dia 14 (Figura 25C) e no dia 17 (Figura 25D), dia da configuração da ZCAS. Ou seja, o primeiro evento de ZCAS analisado está inserido num contexto de altas anomalias positivas de TSM na região da CBM nos dias que antecederam o início do episódio.

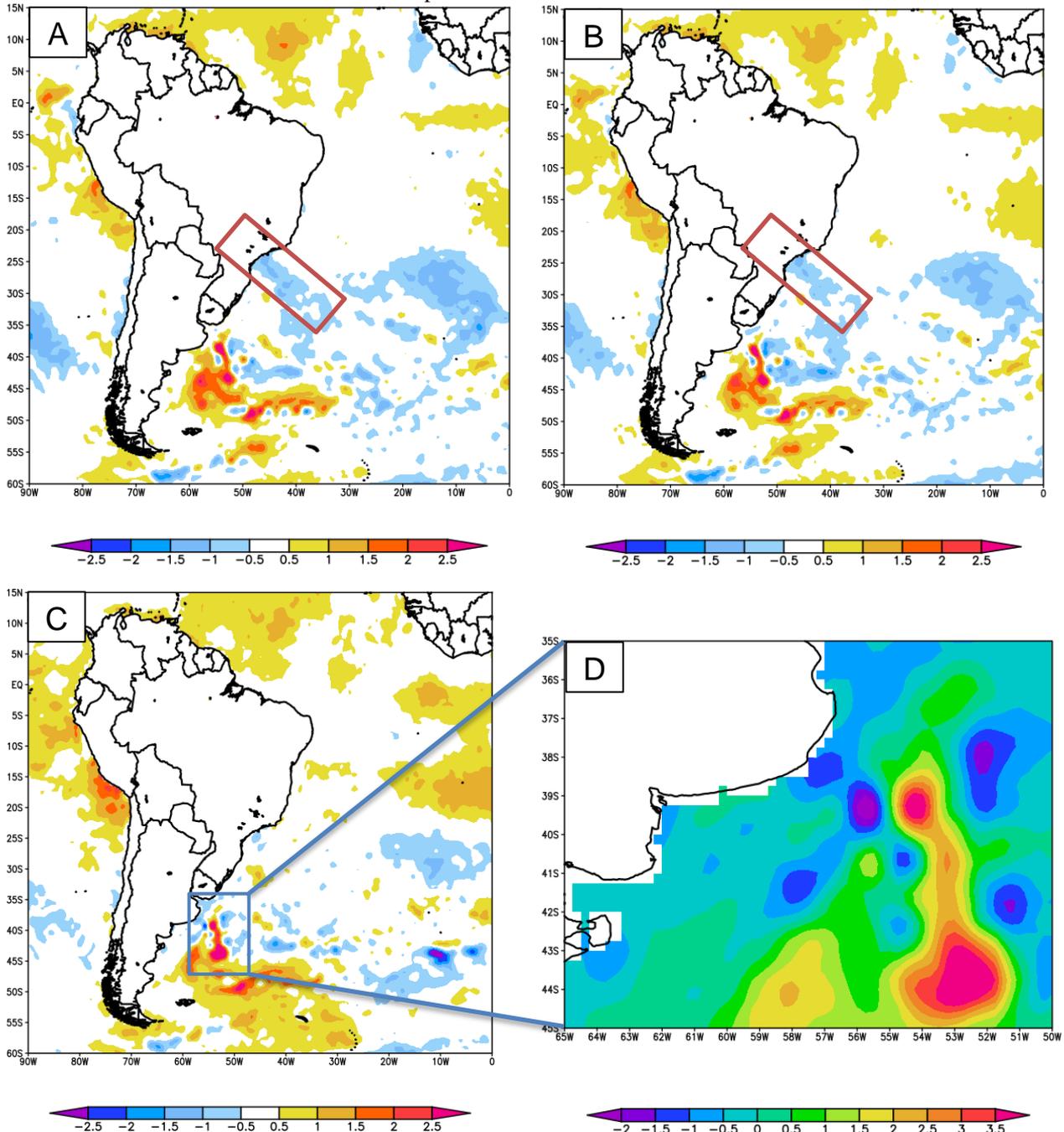
Figura 25 – Anomalias da TSM em  $^{\circ}\text{C}$  (trinta anos) para o dia (A) 10; (B) Anomalias da TSM em  $^{\circ}\text{C}$  no dia 10 para a região entre as latitudes  $35^{\circ}\text{S}$ - $45^{\circ}\text{S}$  e as longitudes  $50^{\circ}\text{W}$ - $65^{\circ}\text{W}$ , nas proximidades da CBM; Anomalias da TSM em  $^{\circ}\text{C}$  para os dias (C) 14 e (D) 17 de janeiro de 2005



Fonte: elaboração própria a partir de dados do ECMWF.

Fazendo uma análise da evolução da TSM neste período, nota-se que há uma redução da TSM junto à costa da região Sudeste do Brasil. Este resfriamento ocorre devido à nebulosidade da ZCAS, que reduz a incidência de radiação solar e colabora para a redução da temperatura da superfície.

Figura 26 – Anomalias da TSM em °C (trinta anos) para os dias (A) 18; (B) 19; (C) 22 de janeiro de 2005; (D) Anomalias da TSM em °C no dia 22 para a região entre as latitudes 35°S-45°S e as longitudes 50°W-65°W, nas proximidades da CBM



Fonte: elaboração própria a partir de dados do ECMWF.

Nas Figuras 26A e 26B, estão destacadas em vermelho as regiões próximas à costa cuja TSM diminuiu durante o episódio de ZCAS. No último dia de ZCAS (Figuras 26C e 26D), ainda é possível notar anomalias positivas na região da CBM em relação à média de trinta anos, o que favorece a

convecção sobre o oceano e a reduz sobre o continente. Em complemento, o aquecimento ao sul do Atlântico Sudoeste e o resfriamento na região do ASAS pode reduzir o gradiente de temperatura entre as regiões subtropical e extratropical interferindo no posicionamento e intensidade da corrente de jato em altitude, modificando os padrões de convergência e divergência.

## 6.2 Período entre 08 e 16 de dezembro de 2017

Iniciando a análise das condições de TSM pela Figura 27A, no dia 1º de dezembro de 2017, uma semana antes do episódio de ZCAS, nota-se nas proximidades da região da CBM um intenso gradiente de anomalia da TSM em relação à média de trinta anos (área destacada no retângulo azul). Observando mais atentamente a região da CBM, nota-se anomalias positivas de até  $+2^{\circ}\text{C}$  e anomalias negativas de até  $-4^{\circ}\text{C}$  em relação à média na região da CBM (Figura 27B). Na costa da Argentina e do Uruguai, observa-se águas mais frias do que a média também no dia 1º de dezembro. Esse resfriamento das águas nas costas argentina e uruguaia vai diminuindo com o passar dos dias, contudo o gradiente de anomalias na região da CBM permanece ao longo dos dias que antecedem o episódio de ZCAS, como se observa no dia 04 (Figura 27C) e no dia 08 (Figura 27D), dia da configuração da ZCAS. Ou seja, o segundo evento analisado está inserido num contexto de forte gradiente de anomalia de TSM na região da CBM nos dias que precederam o início da ZCAS.

Figura 27 – Anomalias da TSM em  $^{\circ}\text{C}$  (trinta anos) para o dia (A) 1º de dezembro; (B) Anomalias da TSM em  $^{\circ}\text{C}$  no dia 1º para a região entre as latitudes  $35^{\circ}\text{S}$ - $45^{\circ}\text{S}$  e as longitudes  $50^{\circ}\text{W}$ - $65^{\circ}\text{W}$ , nas proximidades da CBM; Anomalias da TSM em  $^{\circ}\text{C}$  para os dias (C) 04 e (D) 08 de dezembro de 2017 (continua)

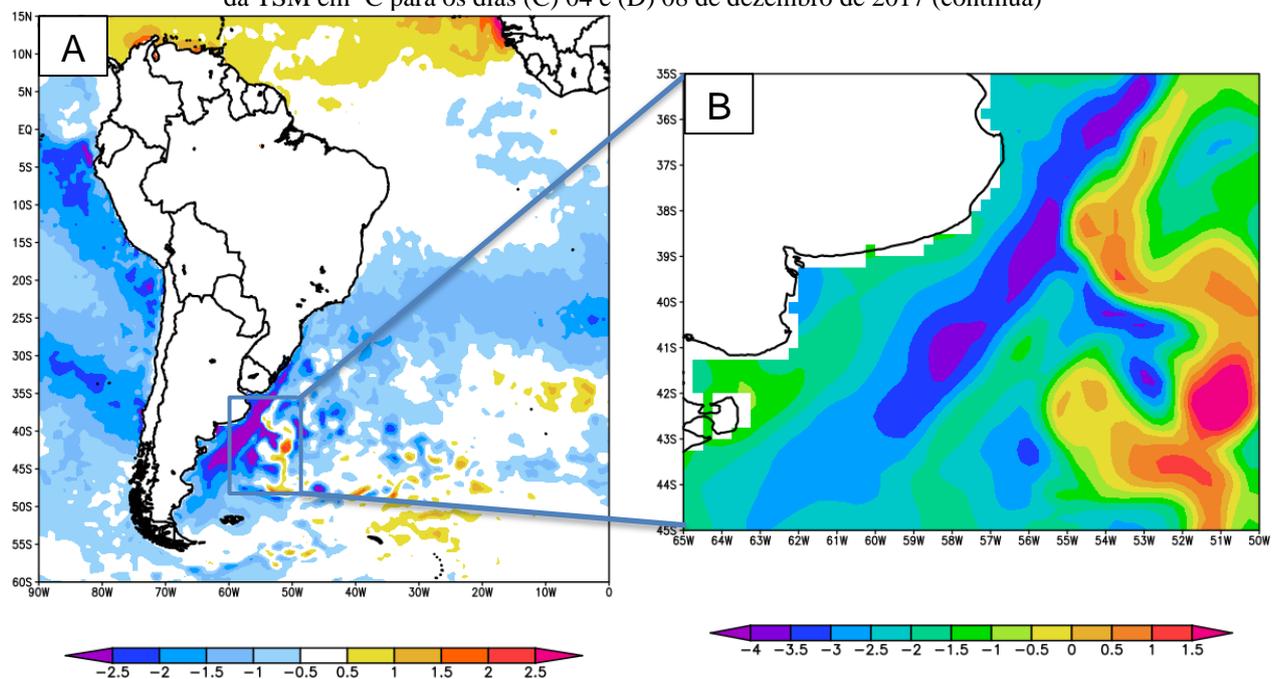
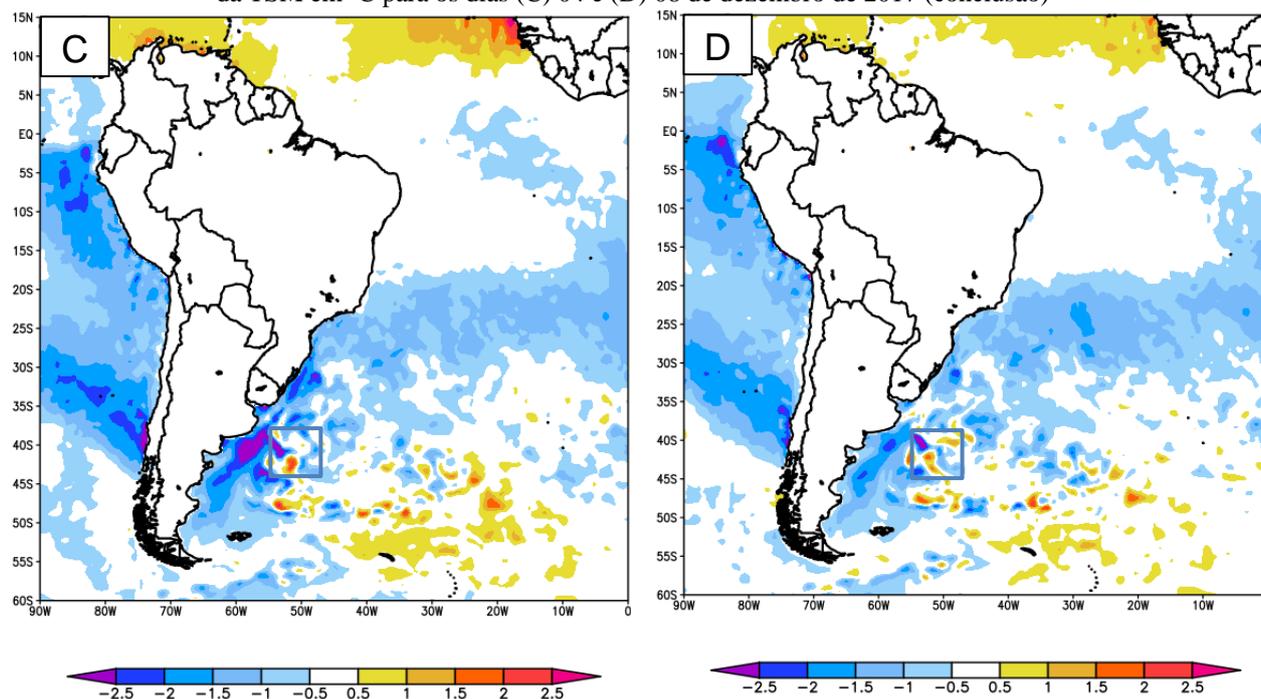


Figura 27 – Anomalias da TSM em °C (trinta anos) para o dia (A) 1° de dezembro; (B) Anomalias da TSM em °C no dia 1° para a região entre as latitudes 35°S-45°S e as longitudes 50°W-65°W, nas proximidades da CBM; Anomalias da TSM em °C para os dias (C) 04 e (D) 08 de dezembro de 2017 (conclusão)

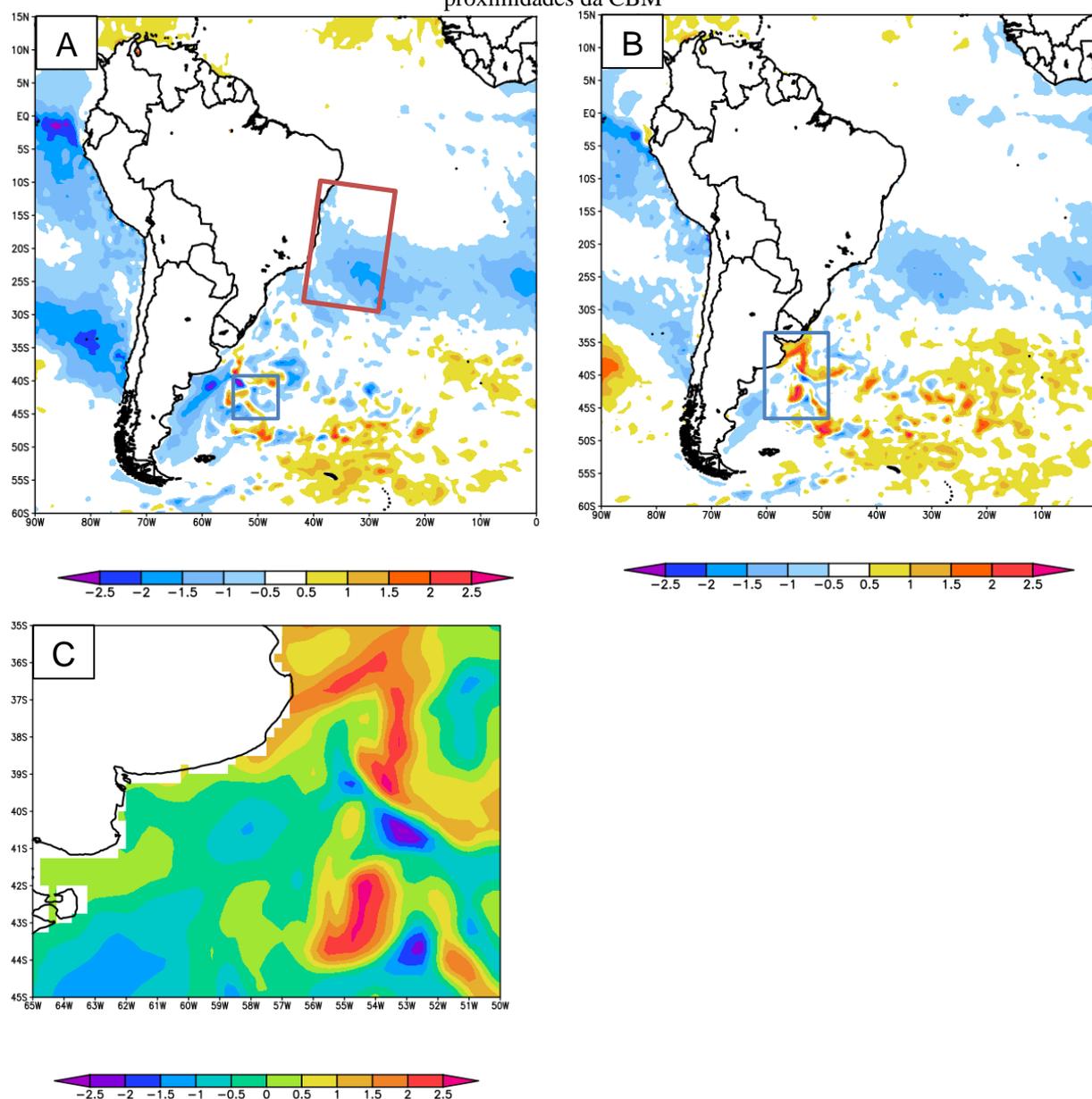


Fonte: elaboração própria a partir de dados do ECMWF.

Nos dias que antecedem a formação deste episódio de ZCAS e logo no início do evento, é possível notar águas mais frias do que a média em toda porção central do Atlântico Sul. Este resfriamento anômalo das águas pode estar relacionado à sequência de configurações de ZCAS e com a sua nebulosidade associada que ocorreram no período chuvoso de 2017. Conforme apresentado na Figura 6C (da seção 2.2), a estação chuvosa de 2017-2018 teve onze ocorrências de ZCAS, sendo essa a estação mais ativa no período entre 2010 e 2023. No dia 11 de dezembro (Figura 28A), percebe-se na área destacada em vermelho que o resfriamento anômalo das águas se estende até a costa do Nordeste devido à formação da ZCAS mais ao norte que a posição climatológica neste episódio. Ainda no dia 11, observa-se que o gradiente da anomalia de TSM ainda é considerável na região da CBM.

No último dia de atuação da ZCAS (Figuras 28B e 28C), ainda existem anomalias positivas e negativas na região da CBM, porém ocorre aumento do máximo de anomalia positiva e do mínimo de anomalia negativa. O máximo de anomalia positiva foi de +3°C e negativa de -3°C. A atenuação da anomalia negativa de TSM está relacionada com o efeito da subsidência de ar na retaguarda da ZCAS. Este ar descendente aquece e pode favorecer o aquecimento superficial da água devido a diminuição da cobertura de nuvens. Além disso, o movimento descendente de ar inibe a nebulosidade na região, o que ajuda a explicar o aumento da TSM. Possivelmente por isso, no último dia de atuação da ZCAS, há o aumento de áreas do Atlântico Sudeste com anomalias positivas. Além disso, ainda no dia 16 de dezembro, nota-se um região de anomalia positiva na foz do Rio da Prata.

Figura 28 – Anomalias da TSM (trinta anos) para os dias (A) 11 e (B) 16 de dezembro de 2017; (C) Anomalias da TSM em °C no dia 16 de dezembro para a região entre as latitudes 35°S-45°S e as longitudes 50°W-65°W, nas proximidades da CBM

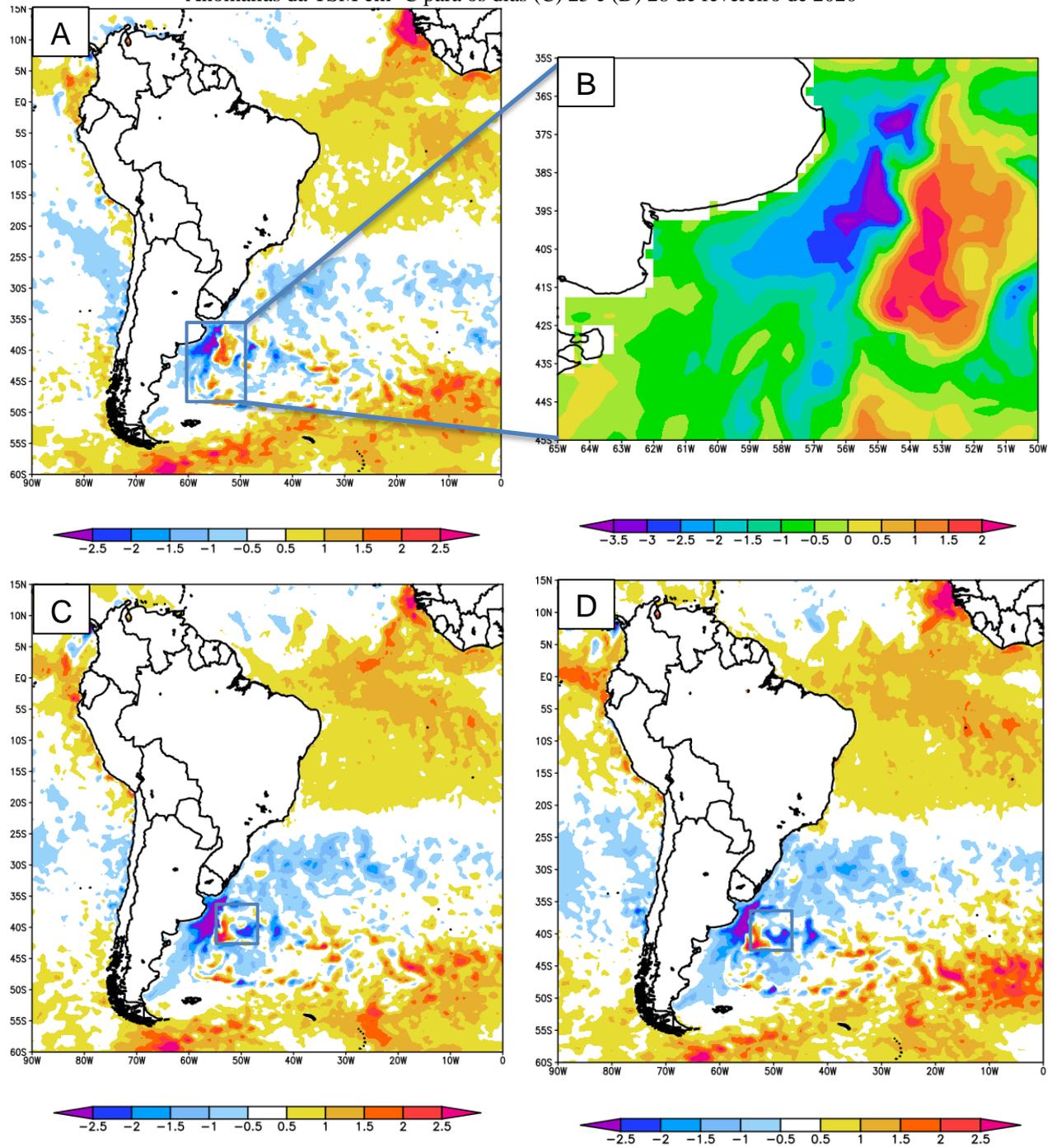


Fonte: elaboração própria a partir de dados do ECMWF.

### 6.3 Período entre 28 de fevereiro e 09 de março de 2020

Analisando a Figura 29A, referente ao dia 21 de fevereiro de 2020, uma semana antes do início do terceiro episódio de ZCAS analisado, nota-se que a anomalia da TSM na região da CBM apresenta um intenso gradiente de TSM (área destacada no retângulo azul representa as proximidades da CBM). Os valores máximos de anomalia positiva e negativa foram de +2,5°C e -4°C, respectivamente (Figura 29B). Este gradiente significativo da anomalia de TSM na região da CBM se manteve nos dias que antecederam o episódio de ZCAS, como se observa no dia 25 (Figura 29C) e no dia 28 (Figura 29D), quando teve início a ZCAS. Assim, é possível afirmar que o terceiro evento analisado está inserido num contexto semelhante ao segundo no que diz respeito à disposição espacial das anomalias na região da CBM, nos dias que antecederam o início do episódio.

Figura 29 – Anomalias da TSM em °C (trinta anos) para o dia (A) 21 de fevereiro; (B) Anomalias da TSM em °C no dia 21 de fevereiro para a região entre as latitudes 35°-45°S e as longitudes 50°-65°W, nas proximidades da CBM; Anomalias da TSM em °C para os dias (C) 25 e (D) 28 de fevereiro de 2020



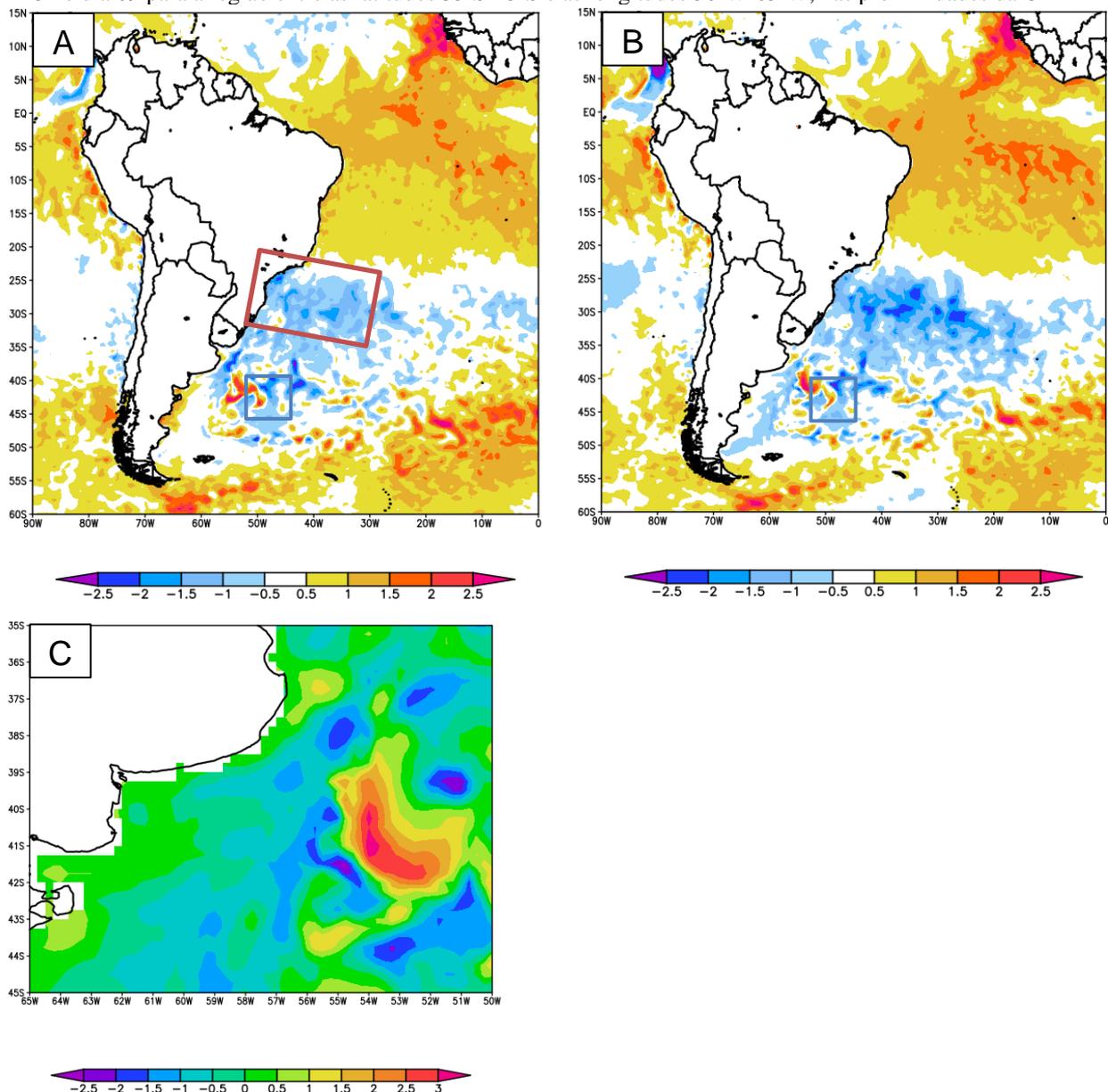
Fonte: elaboração própria a partir de dados do ECMWF.

Nos dias que antecederam o evento e nos dias iniciais da ZCAS, é possível notar águas mais frias do que o normal em toda porção central e mais quentes do que a média na porção norte do Atlântico Sul. O resfriamento anômalo das águas na porção central se intensifica com o passar dos dias durante a ocorrência da ZCAS, possivelmente em virtude da nebulosidade associada ao evento. No dia 05 de março (Figura 30A), na área destacada no retângulo vermelho, nota-se o resfriamento anômalo das águas na costa da região Sudeste do Brasil. Neste mesmo dia, ainda é possível observar

o gradiente de TSM na região da CBM, contudo há um enfraquecimento da anomalia negativa na costa da Argentina.

No último dia de ZCAS (Figuras 30B e 30C), nota-se que o gradiente de TSM é mantido, porém o máximo de anomalia positiva e o mínimo de anomalia negativa aumentam. As anomalias positivas de TSM foram de  $+3,5^{\circ}\text{C}$  e as negativas de  $-3^{\circ}\text{C}$ . Um aspecto observado neste ano são as anomalias positivas no norte do Atlântico e negativas no Atlântico subtropical. Essa configuração favorece um aumento do aquecimento da atmosfera tropical e resfriamento da atmosfera subtropical, que pode influenciar a posição e intensidade da corrente de jato subtropical (JST). Variações do JST podem influenciar a posição da ZCAS (CAVALVANTI e SHIMIZU, 2012; COLLAZO et al., 2023 e FIALHO et al., 2023).

Figura 30 – Anomalias da TSM (trinta anos) para os dias (A) 05 e (B) 09 de março; (C) Anomalias da TSM em  $^{\circ}\text{C}$  no dia 09 para a região entre as latitudes  $35^{\circ}\text{S}$ - $45^{\circ}\text{S}$  e as longitudes  $50^{\circ}\text{W}$ - $65^{\circ}\text{W}$ , nas proximidades da CBM



Fonte: elaboração própria a partir de dados do ECMWF.

Observando as anomalias de TSM de 2005, 2017 e 2020, percebe-se variações de padrões em cada um dos eventos estudados. Em 2020, nota-se anomalias positivas no Atlântico Tropical e em torno do valor climatológico na faixa subtropical (25°S e 30°S). Em 2017 o padrão é diferente, com anomalias negativas no Atlântico Tropical e anomalias positivas ocorrendo em latitudes extratropicais (a sul de 30°S) e principalmente no Atlântico Sudeste. Já em 2005, as anomalias na região tropical são principalmente positivas, mas inferiores a 1°C. As anomalias frias encontram-se na faixa subtropical. Contudo, de uma forma geral, as anomalias são bastante positivas no Atlântico Sudoeste na costa da América do Sul em 2005.

## **7. Resultados e Discussões**

### **7.1 Características dos parâmetros atmosféricos**

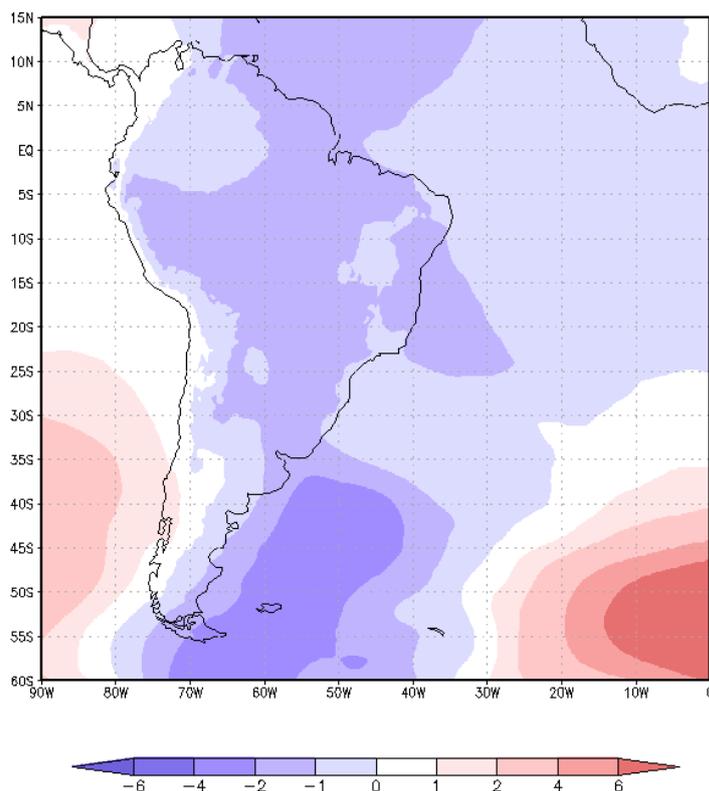
Nesta seção são analisados individualmente os eventos de ZCAS objetos deste estudo, buscando destacar e discutir os principais aspectos identificados. Para tal, as investigações tiveram como foco verificar condições atmosféricas a partir das anomalias das seguintes variáveis: componentes zonal e meridional do vento, PNMM e precipitação total. Todas as anomalias foram calculadas em relação a climatologia de trinta anos (1991-2020) das reanálises ERA5. Em seguida, foi avaliada a associação entre TSM e circulação atmosférica.

#### **7.1.1 Período entre 17 e 22 de janeiro de 2005**

Analisando a Figura 31, é possível notar que durante o episódio de ZCAS de janeiro de 2005 há uma anomalia negativa de PNMM em todo o Atlântico Sudoeste e sobre o continente Sul-americano. Na região da CBM, a anomalia da PNMM apresenta o valor máximo negativo em relação à média de trinta anos. Esse comportamento está provavelmente relacionado com as anomalias positivas de TSM ao longo do mês de janeiro, inclusive nos dias que antecederam e ao longo do período de atuação da ZCAS.

Quando a temperatura da superfície do mar é maior que a do ar em determinada região, o oceano transfere calor para a atmosfera que está em contato na interface ar-mar. Isso acontece através da transferência de calor sensível e latente (evaporação da água) do oceano para a atmosfera. Como resultado, há um aquecimento do ar e redução da densidade da parcela, que por convecção tende a iniciar um movimento vertical ascendente. Esse movimento ascendente do ar favorece a formação uma região de baixa pressão atmosférica na superfície. Assim, as anomalias positivas de temperatura da superfície do mar em janeiro de 2005 podem ter contribuído na geração de anomalias negativas de pressão atmosférica na região da Confluência.

Figura 31 – Anomalia de PNMM em hPa durante o mês de janeiro de 2005



Fonte: elaboração própria a partir de dados do ECMWF.

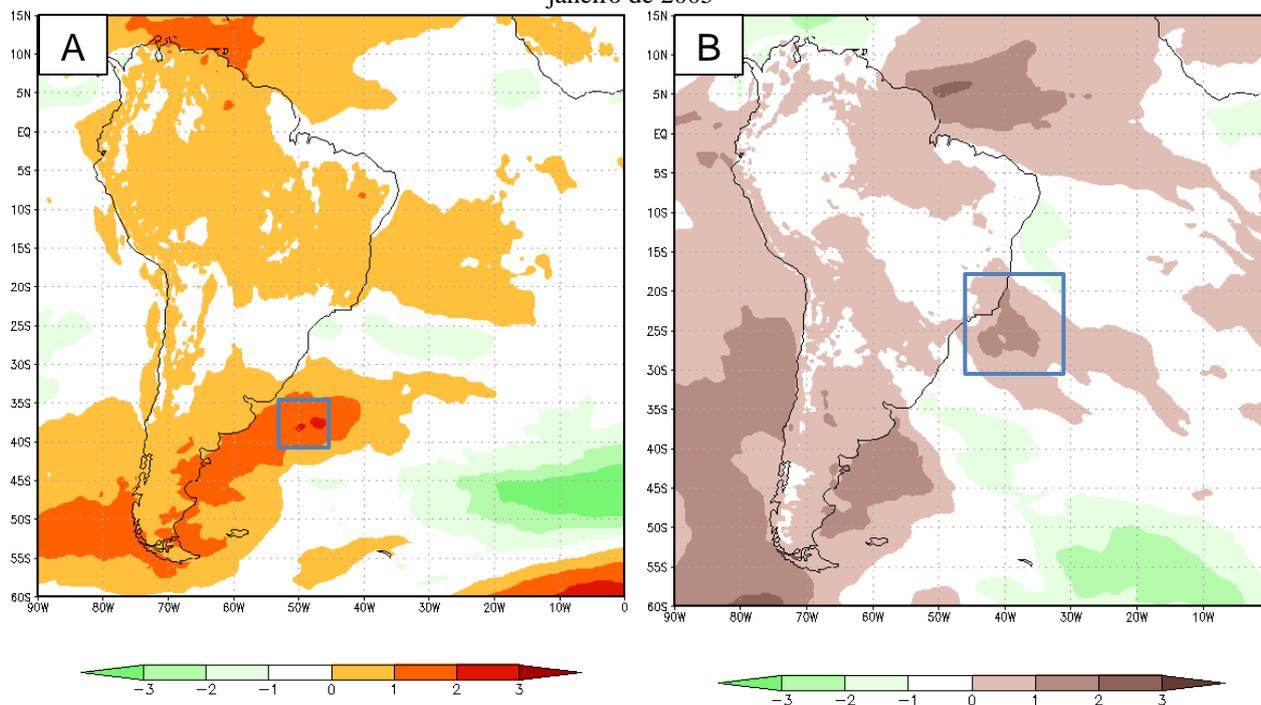
Essa anomalia negativa de pressão indica que durante todo o mês, a pressão atmosférica na região da CBM esteve menor do que a climatologia. Essa condição possibilitou a geração de um gradiente de pressão naquela região. As anomalias da pressão atmosférica resultaram em mudanças no campo de vento a 10 m. A Figura 32 apresenta as anomalias em relação à média de trinta anos das componentes zonal e meridional do vento a 10 m. A região junto à costa da Argentina é a região do Atlântico Sul que apresenta as maiores intensificações das componentes do vento a 10 m.

Ainda observando as anomalias das componentes do vento a 10 m, no Atlântico Sudeste, elas são negativas tanto para a componente zonal quanto para a meridional. Como ao sul de 35°S, de acordo com a climatologia, o vento é predominantemente de oeste/sudoeste, esta configuração de anomalias sugere que o vento assumiu sentidos opostos sobre o oceano, ou seja, haveria uma circulação ciclônica desde a costa da América do Sul até a região centro-sul do Atlântico Sul ao longo de janeiro de 2005. Esta hipótese vai ao encontro da ideia de que o aquecimento do Atlântico Sudoeste gera convecção sobre o oceano.

Seguindo observando as características da Figura 32B, outro aspecto interessante é a anomalia positiva da componente meridional do vento junto à costa da região Sudeste do Brasil. A feição desta anomalia coincide com a posição do escoamento típico de baixos níveis em episódios de ZCAS. Ou seja, ela indica um possível aumento da intensidade do escoamento que favoreceu a formação da ZCAS em janeiro de 2005.

De acordo com a descrição desse evento de ZCAS, apresentada na seção 5.1, há um fluxo de ar com orientação NW-SE desde o continente até o oceano nas latitudes onde a anomalia da componente meridional foi verificada. Além disso, observa-se que os máximos da umidade específica na Figura 15B, seguem a configuração da anomalia da componente meridional.

Figura 32 – Anomalias das componentes (A) zonal e (B) meridional do vento a 10 metros (nós) durante o mês de janeiro de 2005

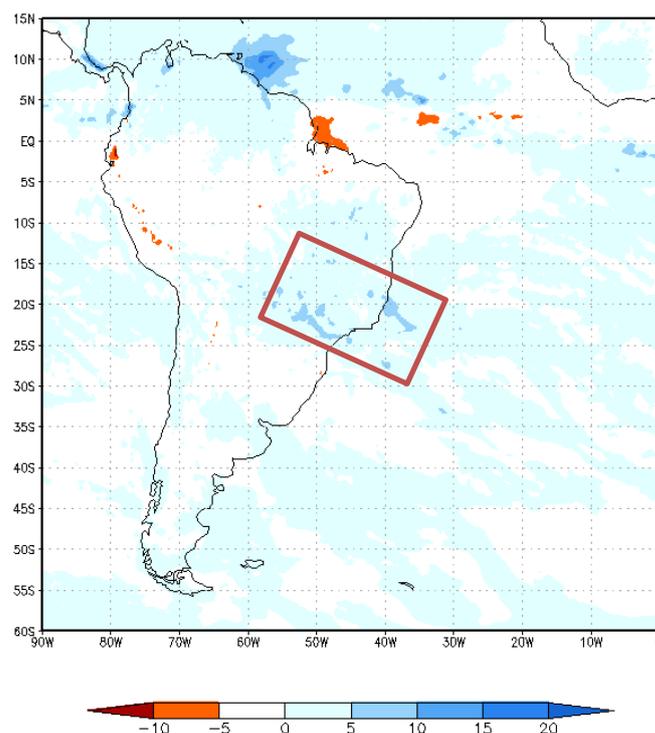


Fonte: elaboração própria a partir de dados do ECMWF.

No que diz respeito à anomalia de taxa de precipitação (Figura 33), os maiores valores positivos relacionados ao evento de ZCAS encontram-se sobre a região Sudeste, principalmente em São Paulo e no litoral do Espírito Santo. As anomalias positivas de precipitação no continente e oceano apresentam disposição espacial similar à da anomalia da componente meridional, onde o máximo sobre o continente está um pouco mais ao sul que o máximo no oceano.

Mais uma característica interessante das anomalias de precipitação é a região com anomalia negativa sobre o sul do Brasil e sobre o Uruguai. Uma possibilidade é que a convecção sobre a costa da Argentina cause movimento descendente na região sul do Brasil e no Uruguai, reduzindo a precipitação nestas áreas e influenciando no posicionamento deste evento de ZCAS.

Figura 33 – Anomalia de taxa de precipitação (mm/dia) durante o mês de janeiro de 2005



Fonte: elaboração própria a partir de dados do ECMWF.

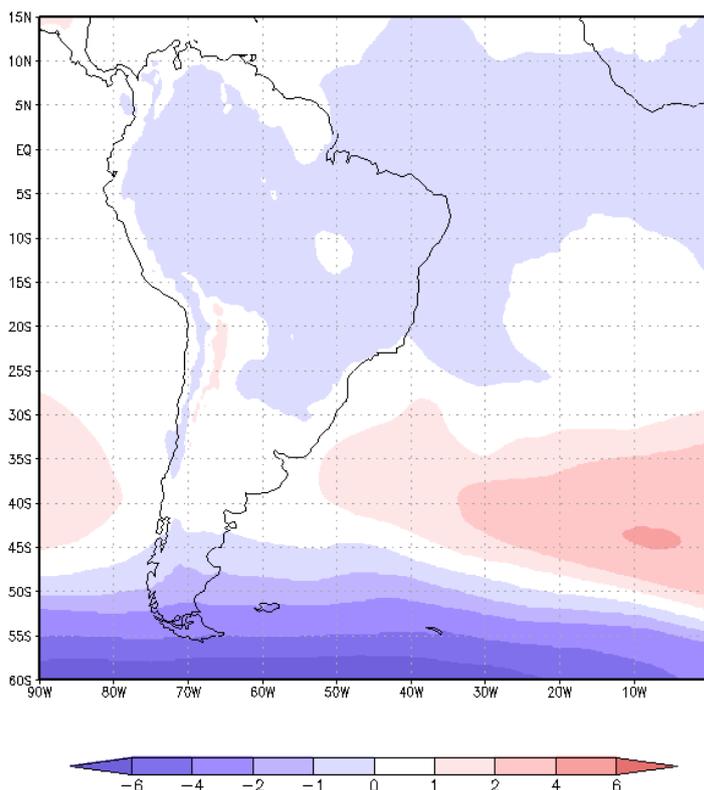
### 7.1.2 Período entre 08 e 16 de dezembro de 2017

No mês de dezembro de 2017, quando ocorreu o segundo episódio de ZCAS, nota-se uma intensa anomalia positiva de PNMM no Atlântico Sudeste que sugere um posicionamento mais ao sul da localização climatológica do ASAS. Também se percebe um alongamento das anomalias positivas em direção a costa da América do Sul, nas proximidades do Uruguai e Rio Grande do Sul (Figura 34).

Nos primeiros dias de dezembro, antes da formação da ZCAS, a região do Atlântico Sudeste apresenta anomalias de TSM muito próximas da climatologia de trinta anos, conforme foi observado na seção 6.2. Após estabelecida a ZCAS, em 8 de dezembro, as anomalias positivas de TSM aparecem mais distribuídas por todo o sul do oceano Atlântico Sul.

Durante o período de atuação da ZCAS, as anomalias positivas da TSM se intensificaram por todo o sul do Atlântico Sul, mas principalmente na borda sudeste. Procurando relacionar as anomalias de pressão e TSM, a formação da ZCAS favoreceu o movimento descendente ao sul da sua posição, intensificando o ASAS e acarretando o aumento da TSM ao sul de 30°S.

Figura 34 – Anomalia de PNMM em hPa durante o mês de dezembro de 2017



Fonte: elaboração própria a partir de dados do ECMWF.

Associado a esse gradiente de pressão durante o evento, identifica-se como reflexo um aumento, nas bordas norte e sul do ASAS, da componente zonal do vento a 10 metros, conforme observado na Figura 35A. Nota-se que esse aumento de intensidade apresenta um sutil deslocamento para norte na região da CBM (quadrado destacado em azul na figura). É possível ainda notar uma anomalia positiva da componente meridional do vento a leste do Espírito Santo, estendendo-se ao longo do litoral até a região Nordeste (Figura 35B).

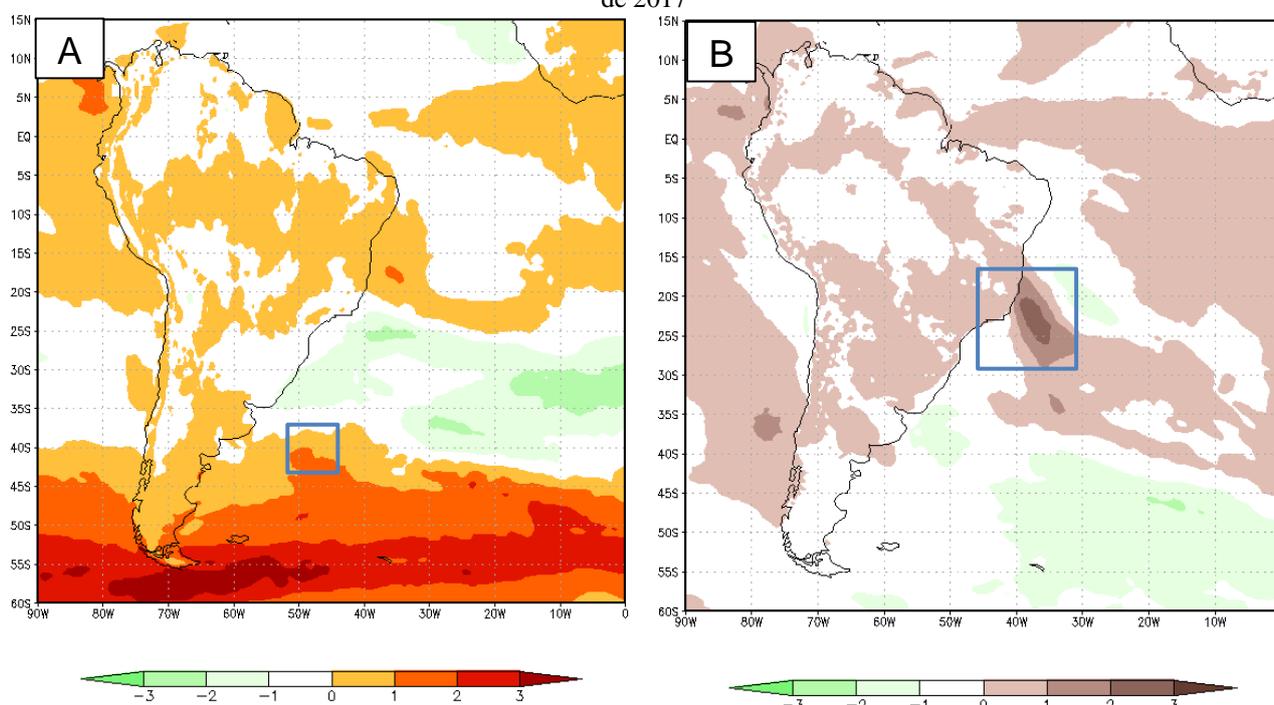
A intensificação da componente meridional tem a orientação característica do escoamento associado ao JBN na presença da ZCAS. Além disso, a posição desta feição ficou entre o norte da região Sudeste do Brasil e o sul da região Nordeste. Esta posição das anomalias positivas da componente meridional coincide com o eixo das linhas de corrente em 850 hPa e com os máximos da umidade específica mostrado na seção 5.2. A orientação da anomalia da componente meridional também evidencia a influência que a presença de um ciclone na borda oceânica da ZCAS causa no escoamento, isto é, intensificando o transporte de umidade do continente para o oceano.

A componente zonal do vento também apresenta uma área com anomalias positivas ao norte do ASAS e que configura sentido de fluxo de NW para SE. Mais uma vez, é possível associar a orientação do eixo do escoamento de ar e o aspecto dos máximos da umidade específica, com a intensificação das componentes meridional e zonal do vento a 10m. O aumento da intensidade do vento está relacionado com a posição do JBN no evento de 2017. Ou seja, as anomalias positivas das

componentes zonal e meridional do vento a 10 m aparecem justamente no litoral das regiões afetadas pelas tempestades associadas à ZCAS.

Comparando as linhas de corrente em 200 hPa na seção 5.2 com a climatologia de trinta anos desta variável, percebe-se que em 2017 a AB e o VCAN do NE estão posicionados sensivelmente ao norte da posição normal, assim como o eixo do jato subtropical (região de maior intensidade do vento na latitude de 25°S). As anomalias de TSM do sul do Atlântico Sul possivelmente influenciaram o gradiente meridional de temperatura entre o Equador e a região extratropical, modificando a posição dos padrões de circulação em altitude (AB, VCAN e JST) e favorecendo o posicionamento da ZCAS também mais ao norte da posição típica.

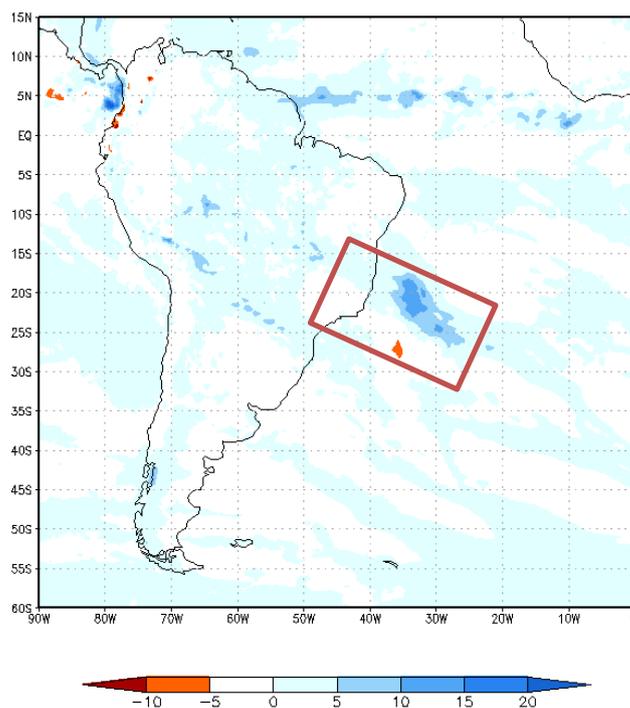
Figura 35 – Anomalias das componentes (A) zonal e (B) meridional do vento a 10 metros (nós) o mês de dezembro de 2017



Fonte: elaboração própria a partir de dados do ECMWF.

No que diz respeito à taxa de precipitação (Figura 36), as principais anomalias encontram-se sobre o leste do Espírito Santo e da Bahia. Essa configuração ajuda a entender a contribuição significativa do deslocamento para norte dos padrões atmosféricos da baixa e alta troposfera relacionados à ZCAS para a precipitação que ocorreu durante o episódio de dezembro de 2017. Além disso, a intensificação das componentes do vento a 10 m teve grande importância no transporte de umidade do continente para o oceano, que sustentou o ciclone subtropical Guará, formado na extremidade do ramo oceânico da ZCAS.

Figura 36 – Anomalia de taxa de precipitação (mm/dia) durante o mês de dezembro de 2017



Fonte: elaboração própria a partir de dados do ECMWF.

### 7.1.3 Período entre 28 de fevereiro e 09 de março de 2020

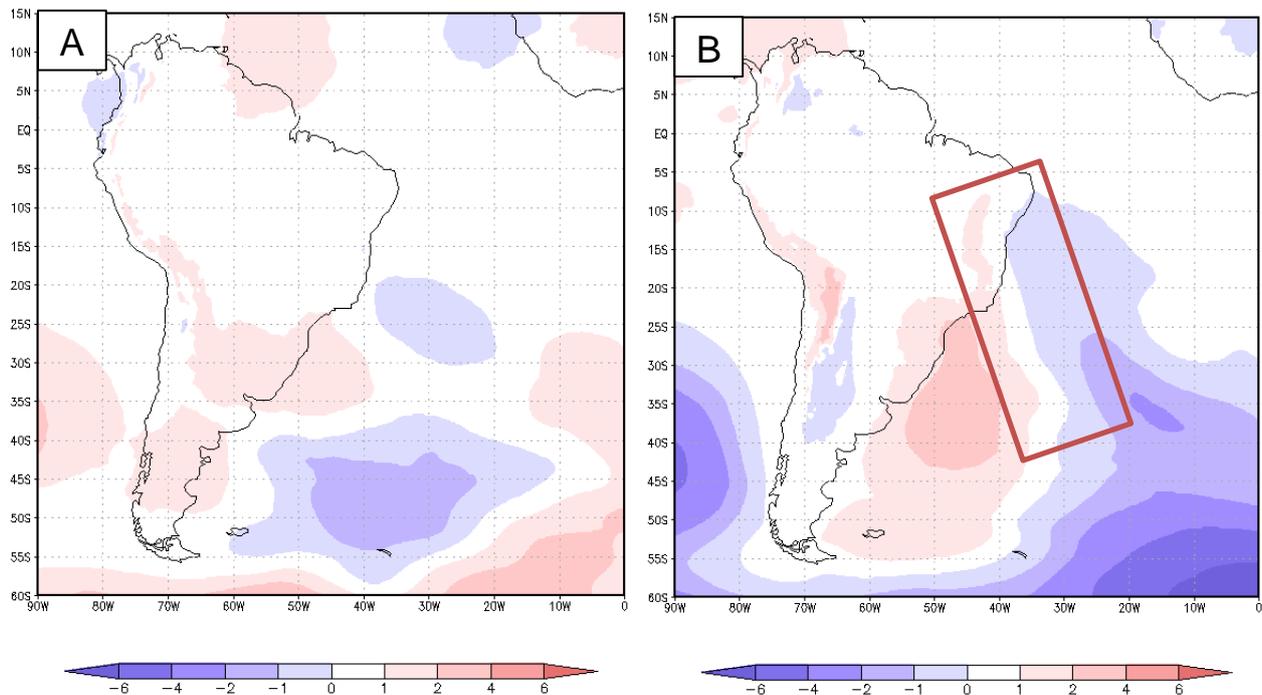
O terceiro e último episódio analisado teve início no final de fevereiro de 2020, se estendendo até o dia 09 de março. Analisando as anomalias de PNMM dos meses de fevereiro e março de 2020, percebe-se que no mês de fevereiro (Figura 37A) começa a tomar forma uma anomalia positiva ao longo da costa sul da América do Sul. No mês de março (Figura 37B), a anomalia positiva já está bem definida sobre a banda oeste do Atlântico Sul, ao longo da costa da América do Sul desde a região Sudeste até o sul da Argentina. Ainda em março, fica bastante evidente a anomalia negativa de PNMM desde a costa nordeste do Brasil até o sudeste do oceano Atlântico. No mês de fevereiro, a anomalia negativa da PNMM se estende desde a região da CBM até o centro-sul do Atlântico.

Como a maior parte do ciclo de vida da ZCAS ocorreu no mês de março, a discussão será focada neste mês. Conforme já discutido na seção 5.3, o episódio de ZCAS posicionou-se entre as latitude de 15°S e 20°S. Relacionando esse posicionamento e as anomalias de PNMM, percebe-se que a região com anomalia negativa da pressão atmosférica corresponde com a posição do evento e ZCAS. Ou seja, essa ocorrência de ZCAS deixou uma assinatura no campo de pressão atmosférica, descrevendo um alinhamento NW-SE mais a norte da região Sudeste do Brasil (região destacada pelo retângulo vermelho na Figura 37B).

Devido à convecção ao longo de um episódio de ZCAS que gera movimento vertical ascendente, espera-se que haja movimento vertical descendente na retaguarda da zona de convergência. Logo, assim como no episódio de 2017, esse movimento descendente favoreceu a formação de anomalias positivas da PNMM ao longo da costa da América do Sul. O aumento da

pressão reduz a formação de nuvens e favorece o aumento da TSM junto à costa. De acordo com os valores da anomalia de TSM na seção 6.3, nota-se que as anomalias frias junto a foz do rio da Prata perdem intensidade. Sugere-se que isto ocorre por causa do aumento da pressão sobre o Atlântico Sudoeste, que reduz a nebulosidade e o vento, favorecendo o aumento da temperatura da superfície do mar.

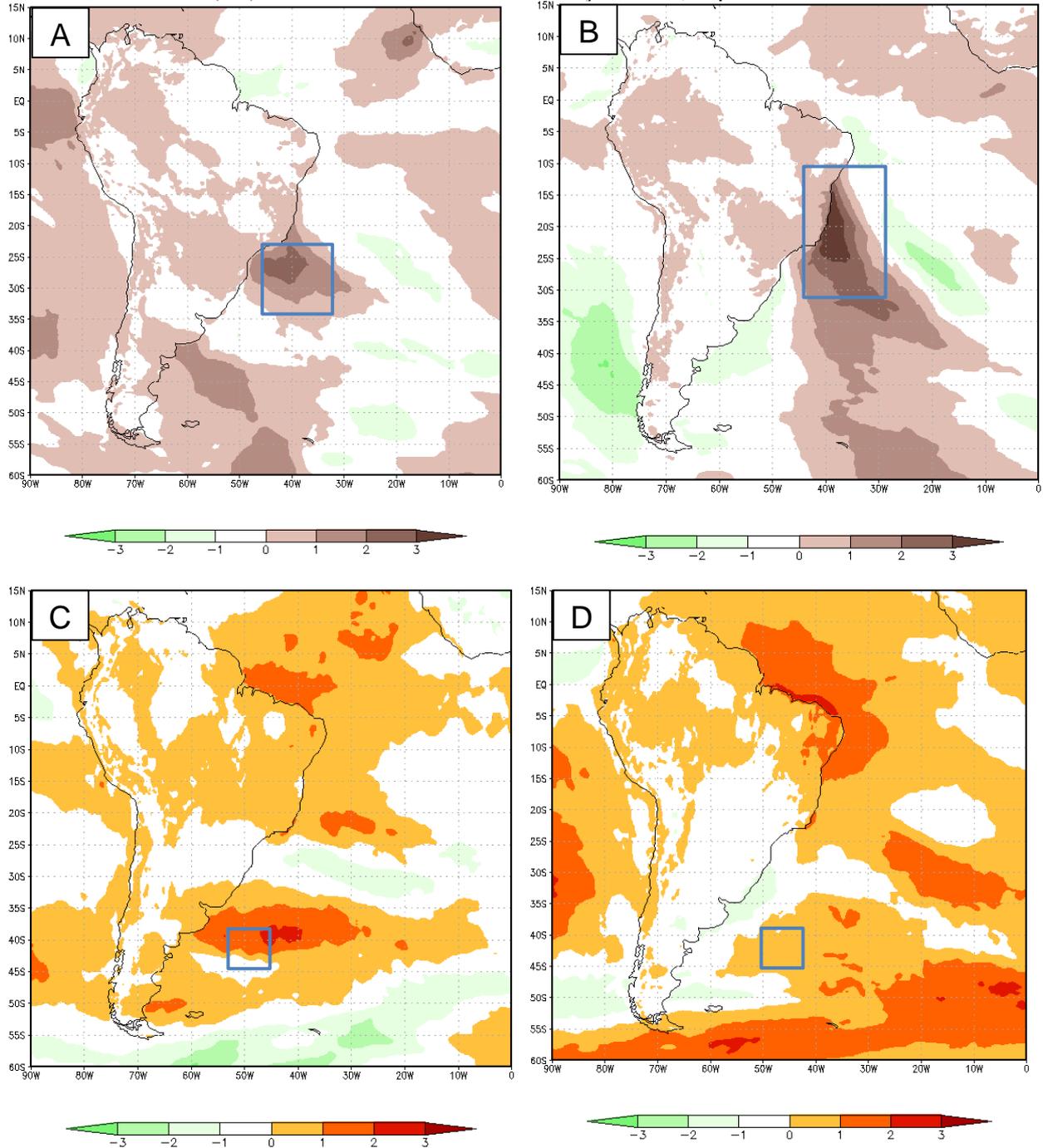
Figura 37 – Anomalia de PNMM em hPa durante os meses de (A) fevereiro e (B) março de 2020



Fonte: elaboração própria a partir de dados do ECMWF.

Conforme já foi abordado anteriormente, nos dias iniciais da ZCAS, houve um posicionamento ancorado sobre a região Sudeste. Com o passar dos dias, este posicionamento foi alterado para uma região mais a norte, sobre o Nordeste. Esse comportamento também pode ser identificado observando as componentes meridionais do vento em fevereiro (Figura 38A) e em março (Figura 38B). No mês de fevereiro, as anomalias positivas da componente meridional do vento a 10 metros encontram-se nas vizinhanças do litoral da região Sudeste, enquanto em março as anomalias estão sobre o litoral do Espírito Santo e da Bahia. A componente zonal, nos dias iniciais da ZCAS (Figura 38C), apresentou intensidades mais altas do que o normal na região da CBM. Em março (Figura 38D), as intensidades foram maiores do que a média, mas com anomalias menores do que no mês de fevereiro no Atlântico Sudoeste. As maiores intensidades da componente zonal do vento ao sul do Atlântico Sul e no mês de março podem ser observadas na borda leste do oceano. Já as anomalias negativas dessa componente do vento (vento mais fraco) estão concentradas ao longo da costa sul da América do Sul, associadas ao aumento da PNMM.

Figura 38 – Anomalias das componentes meridionais (A) e (B); e zonais (C) e (D) do vento a 10 metros (nós) durante os meses de fevereiro e março de 2020, respectivamente

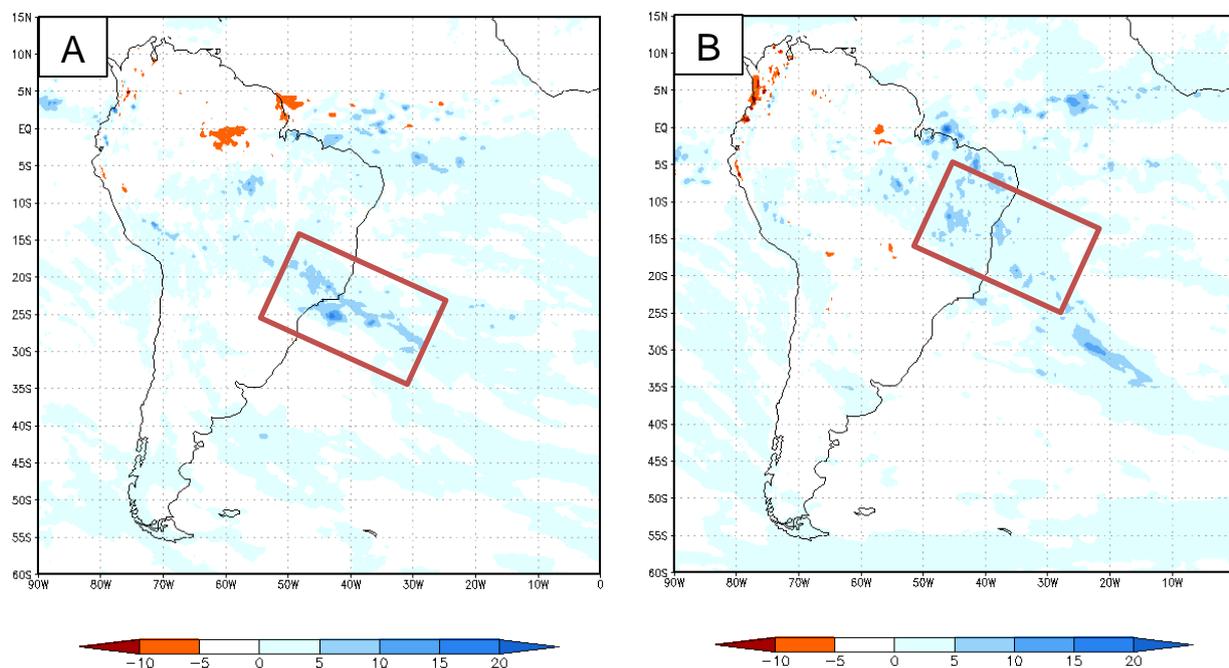


Fonte: elaboração própria a partir de dados do ECMWF.

No que diz respeito à taxa de precipitação (Figura 39A), as principais anomalias em fevereiro encontram-se sobre a região Sudeste (destacado pelo retângulo vermelho na figura). Já em março, as anomalias mais significativas encontravam-se sobre a região Nordeste (destacado pelo retângulo vermelho na Figura 39B). Outro aspecto interessante neste caso de ZCAS é que em março são observadas as maiores anomalias positivas de precipitação sobre o continente. Dois pontos podem estar contribuindo para o aumento da precipitação continental: a TSM e a componente zonal do vento. Os meses de fevereiro e março de 2020 apresentaram anomalias positivas da temperatura da

superfície do mar na região tropical do Atlântico Sul. Estes meses também apresentaram os maiores valores positivos de anomalias da componente zonal do vento na região dos alísios. Isto é, o aquecimento do oceano favoreceu a evaporação e os ventos de leste mais intensos transportaram essa umidade do oceano para o continente no norte do Brasil e, em seguida, a umidade foi direcionada para sudeste pela intensificação da componente meridional do vento.

Figura 39 – Anomalia de taxa de precipitação (mm/dia) durante os meses de (A) fevereiro e (B) março de 2020



Fonte: elaboração própria a partir de dados do ECMWF.

## 7.2 Associação da TSM com a circulação atmosférica

Para melhor compreender a influência remota da TSM na região do oceano Atlântico Sudoeste, foram realizadas comparações entre os três eventos analisados para evidenciar suas semelhanças e divergências, como forma de identificar padrões que possam atender ao objetivo deste trabalho.

Após a análise sinótica de vários campos médios climatológicos de trinta anos e suas respectivas anomalias para os três eventos selecionados, e de algumas características individuais identificadas dos casos estudados, os eventos analisados foram divididos em dois padrões: o primeiro (como em janeiro de 2005) onde a água da superfície do oceano tem temperatura acima do normal em todo o entorno da região da CBM, enquanto o segundo padrão apresenta um relevante gradiente horizontal de TSM na região da CBM (eventos de dezembro de 2017 e de fevereiro/março de 2020).

O parâmetro analisado foi a anomalia de ômega, que representa a velocidade vertical em coordenadas isobáricas, dada por  $\omega = -dP/dt$  e, aqui, é expressa em Pa/s. Valores negativos de ômega representam movimento vertical ascendente e positivos indicam subsidência de ar. Anomalias no campo ômega de movimento vertical indicam alteração do padrão de circulação vertical do ar em relação à média de trinta anos. A partir da análise deste parâmetro, procurou-se identificar o real

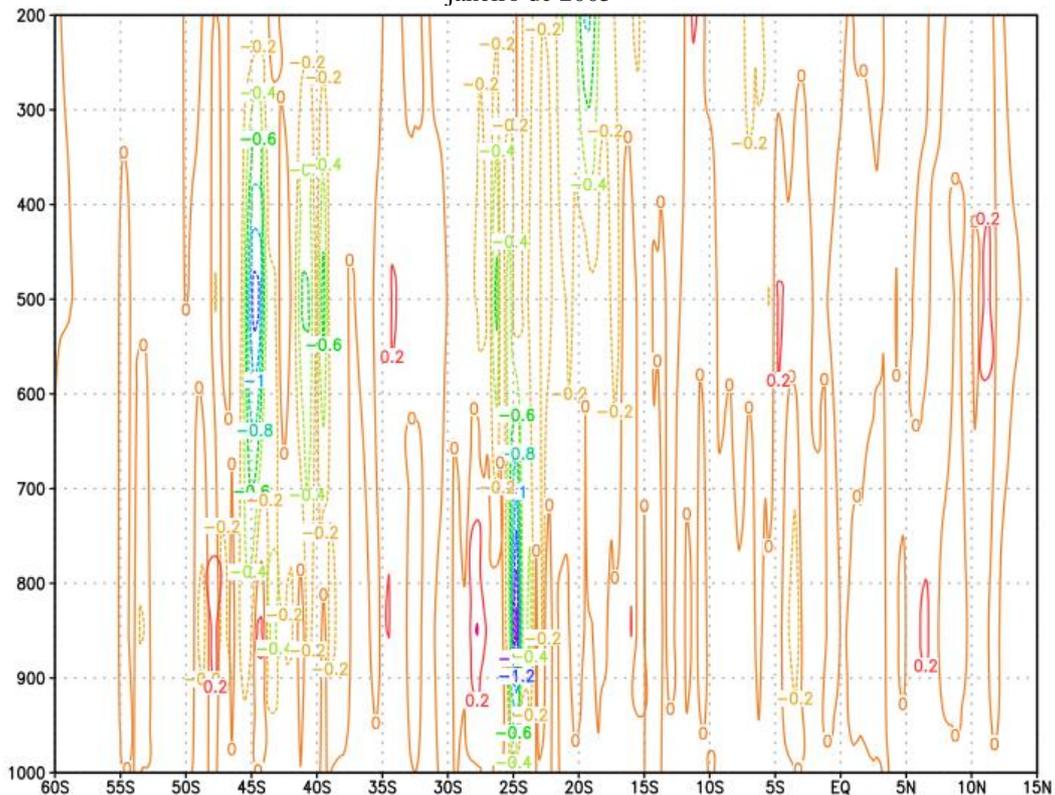
impacto dos episódios de ZCAS nas células meridionais de circulação. O meridiano 48°W foi usado como referência, pois nas altas latitudes contempla as proximidades da CBM tanto no caso da anomalia positiva de TSM quanto nos casos de gradiente da anomalia. Sobre o continente, em latitudes mais baixas, é possível avaliar o posicionamento do ramo continental da ZCAS.

### 7.2.1 Primeiro padrão: anomalias positivas de TSM na região da CBM

No primeiro evento estudado, foi utilizado para análise o dia 20 de janeiro de 2005, por ser um momento em que a ZCAS estava bastante ativa. Neste dia, águas mais quentes do que o normal na região da CBM favoreceram anomalias negativas do movimento vertical de -1 Pa/s em torno da latitude 45°S, como pode ser observado na Figura 40. Como consequência, gerou-se outra anomalia de ar descendente na região Sul do Brasil e norte do Paraguai (35°S), ocasionando pequenas anomalias negativas de taxa de precipitação nesta região, conforme já mostrado na Figura 33 apresentada na seção 7.1.1. Isso permitiu o surgimento de anomalias de movimento ascendente sobre a região Sudeste (25°S), que associada a uma frente fria favoreceu a formação de ZCAS sobre esta região.

Assim, houve uma combinação de fatores que criaram condições favoráveis para a formação da ZCAS. Após a configuração do episódio, o movimento descendente de ar na região Sul do Brasil foi resultado de uma combinação de subsidência na dianteira da região da CBM (consequência do movimento ascendente em 45°S causado pelas águas mais quentes) e do ar descendente na retaguarda da ZCAS.

Figura 40 – Corte vertical meridional em 48°W entre as latitudes 60°S e 15°N da velocidade vertical (Pa/s) no dia 18 de janeiro de 2005



Fonte: elaboração própria a partir de dados do ECMWF.

Neste evento, a AB estava próxima de sua posição climatológica para o mês de janeiro e o VCAN posicionado mais a norte e a oeste da sua posição típica, o que associado com o cavado no campo de altura geopotencial em 500 hPa, ancorou a ZCAS sobre o Sudeste do Brasil. Assim, o primeiro padrão identificado sugere que águas mais quentes na região da CBM criam condições favoráveis para a configuração de ZCAS sobre a região Sudeste do Brasil, no período entre a Primavera e o Verão.

A partir da Figura 15A (seção 5.1), observa-se outro aspecto interessante: o JST é menos intenso junto a costa da América do Sul e mais intenso ao sul do Atlântico. O JST está associado ao gradiente de temperatura entre Equador e latitudes médias. Em janeiro de 2005, a configuração das anomalias de TSM com a água mais quente no Atlântico Sudoeste (Figura 25, da seção 6.1) reduziu o gradiente meridional de temperatura da atmosfera entre Equador e os subtropicais, já que aqueceu a atmosfera subtropical por transferência de calor latente e sensível. Assim, as anomalias positivas de TSM no Atlântico Sudoeste podem ter reduzido o gradiente meridional de temperatura da atmosfera sobre o continente sul-americano. Como a posição do jato está associada a divergência em altitude que dá suporte a ZCAS, com o JST mais ao sul em relação a sua posição climatológica (Figura 8B, seção 4.2), a ZCAS posicionou-se no litoral da região Sudeste do Brasil.

### **7.2.1 Segundo padrão: intenso gradiente de TSM na região da CBM**

Para a análise do segundo padrão identificado, foram utilizados os dias 10 de dezembro de 2017 e 1º de março de 2020. Ambos os dias foram escolhidos por estarem no início do episódio de ZCAS e por serem dias em que havia intensa convecção associada à ZCAS. Nos eventos de 2017 e 2020, o segundo padrão identificado estava associado a um intenso gradiente de TSM na região da CBM. Nas Figuras 41A e 41B são observadas anomalias de movimento ascendente de ar com valor máximo  $-0,4$  Pa/s na região da CBM ( $45^{\circ}\text{S}$ ) e, em ambos os casos, anomalias ascendentes sobre o Sudeste ( $20^{\circ}\text{S}$ ) e sobre o Nordeste ( $15^{\circ}\text{S}$ - $10^{\circ}\text{S}$ ). As anomalias negativas do movimento vertical possuem valores menores se comparados ao observado no episódio de janeiro de 2005 (Figura 40), uma vez que as anomalias positivas da TSM são mais discretas.

Com o estabelecimento da ZCAS em latitudes em torno de  $15^{\circ}\text{S}$ - $20^{\circ}\text{S}$ , o movimento ascendente dessa região gerou um movimento descendente na retaguarda do sistema, o que promoveu o aumento da pressão em latitudes subtropicais do Atlântico (Figuras 34 e 37B, das seções 7.1.2 e 7.1.3, respectivamente) e favoreceu o aumento da TSM nestas latitudes (Figuras 28B e 30B, das seções 6.2 e 6.3, respectivamente).

Tanto no evento de dezembro de 2017 como no evento de fevereiro/março de 2020 (que possuem padrão semelhante de TSM na região da CBM), a AB e o VCAN estão em posições mais a norte da sua posição climatológica (o que pode ser percebido em comparação das Figuras 18A e 22A,

do capítulo 5, com as Figuras 8A e 8C, da seção 4.2). Em dezembro de 2017 e março de 2020, diferentemente de janeiro de 2005, encontrou-se anomalias positivas de pressão na região da CBM (Figuras 34 e 37B das seções 7.1.2 e 7.1.3, respectivamente). Como consequência de tais características, a ZCAS sob condições de águas com forte gradiente de TSM na CBM teve seu posicionamento ancorado mais a norte.

A partir das Figuras 18A e 22A, das seções 5.2 e 5.3, notou-se que o JST estava mais ao norte se comparado com a climatologia de trinta anos (Figura 8A referente ao mês de dezembro e Figura 8C referente ao mês de fevereiro, ambas da seção 4.2). O posicionamento mais ao norte foi associado ao maior gradiente meridional de temperatura da atmosfera entre a região equatorial e subtropical/extratropical antes e no início da formação da ZCAS. A posição do jato está associada a divergência em altitude que dá suporte à convergência em superfície e ao movimento vertical ascendente, condições necessárias à configuração de um episódio de ZCAS.

Nos casos de 2017 e 2020 é notável que a AB, o VCAN e o JST estão ao norte da posição climatológica. Assim, o cavado e movimento vertical em 500 hPa posicionou-se no continente em latitudes mais baixas e a convergência em baixos níveis também. Ou seja, a ZCAS se formou ao norte da posição típica. E depois de estabelecida mais ao norte, favoreceu o aquecimento do oceano na região subtropical.

Figura 41 – Corte vertical meridional em 48°W entre as latitudes 60°S e 15°N da velocidade vertical ômega (Pa/s) nos dias (A) 10 de dezembro de 2017 e (B) 28 de fevereiro de 2020 (continua)

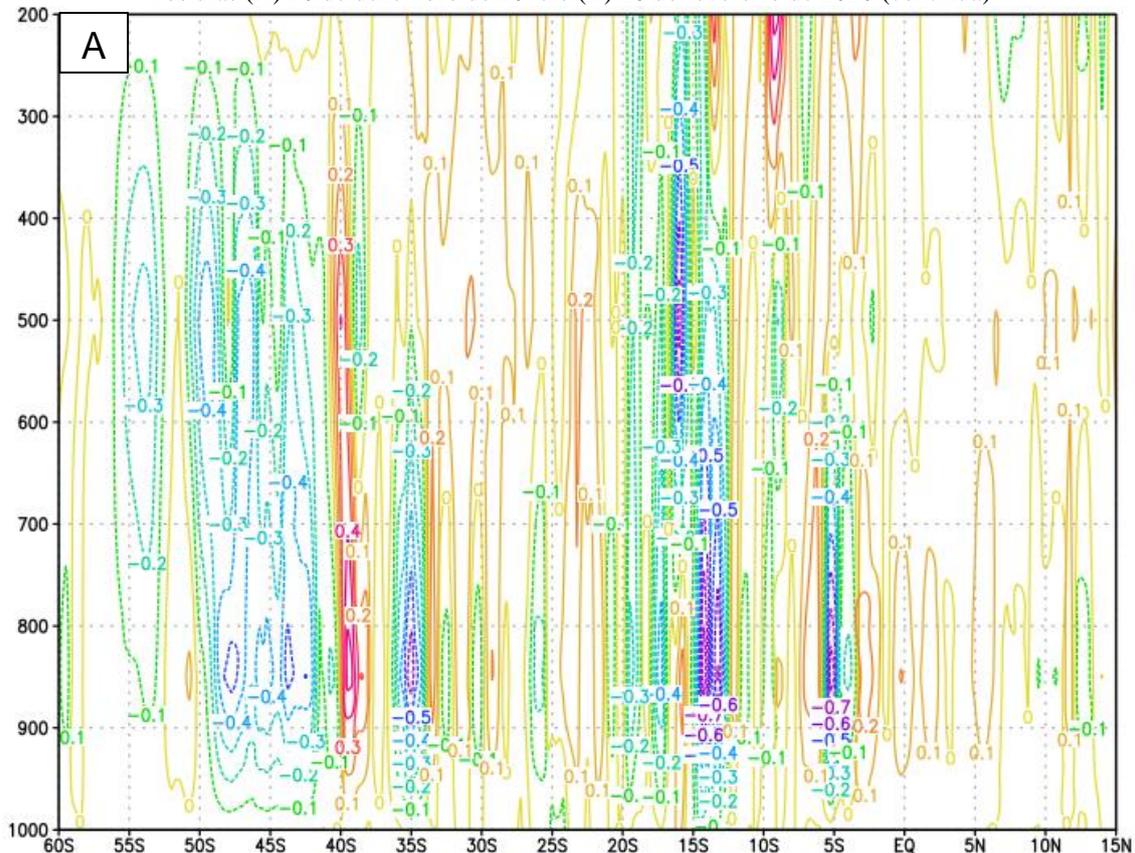
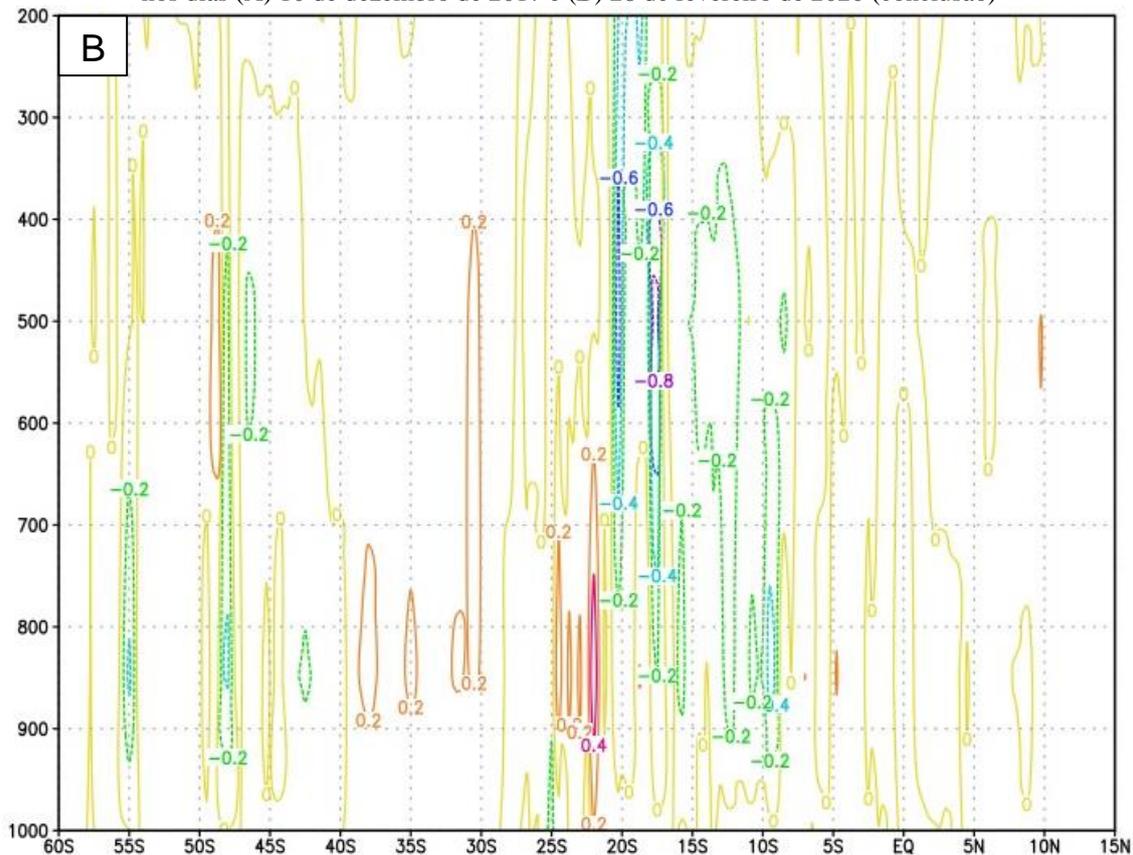


Figura 41 – Corte vertical meridional em 48°W entre as latitudes 60°S e 15°N da velocidade vertical ômega (Pa/s) nos dias (A) 10 de dezembro de 2017 e (B) 28 de fevereiro de 2020 (conclusão)



Fonte: elaboração própria a partir de dados do ECMWF.

Ou seja, a configuração da TSM no Atlântico Sudoeste também interfere na circulação geral através da variação do gradiente meridional de temperatura da atmosfera entre região equatorial e subtropical/extratropical. Este gradiente tem efeito sobre a posição e intensidade do JST, que influencia as regiões de divergência e convergência em altos níveis.

Destaca-se ainda que no episódio de ZCAS de 2020, houve aquecimento do Atlântico Tropical percebido pela presença de anomalias positivas de TSM na região. Isso acabou por influenciar o transporte de umidade para o continente, o que aumentou a precipitação continental.

Conforme discutido, a configuração da TSM na região da CBM tem potencial de alterar a circulação meridional induzindo ou inibindo os movimentos verticais de ar e de modificar o posicionamento da ZCAS. Anomalias positivas de TSM na região da CBM favoreceram a ZCAS a se posicionar sobre a região Sudeste, enquanto nos casos em que havia um gradiente de TSM na região da CBM, o posicionamento da ZCAS ficou mais ao norte. Além disso, após estabelecida a ZCAS, formaram-se regiões de movimento descendente de ar na retaguarda da ZCAS, que se associa ao movimento subsidente na dianteira da região da CBM que acaba por interferir na posição e manutenção da ZCAS.

## 8. Conclusão

A complexa interação entre a Temperatura da Superfície do Mar (TSM) do oceano Atlântico Sudoeste na região da Confluência Brasil-Malvinas e a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) desempenha um papel importante na dinâmica da precipitação, ventos, ondas e de eventos extremos da América do Sul e é tema de diversos estudos. Apesar do assunto ZCAS ser altamente difundido na literatura técnica nacional, a teleconexão entre esse tipo de evento e as anomalias de TSM na região da CBM ainda possui lacunas importantes.

A TSM na região da CBM, com seus gradientes de temperatura, exerce uma influência significativa na atmosfera, afetando a circulação e contribuindo para a formação de sistemas de baixa pressão. Isso, por sua vez, desempenha um papel relevante na configuração da ZCAS, um fenômeno meteorológico associado a eventos de precipitação intensa e prolongada, normalmente com implicação direta nas condições meteorológicas do Sudeste do Brasil. Além disso, a TSM do Atlântico Sudoeste também afeta fenômenos atmosféricos de diversas escalas, com potencial de influenciar a variabilidade da ZCAS, assim como o Dipolo Subtropical do Atlântico Sul (DSAS) e eventos El Niño/La Niña. Neste ínterim, o presente trabalho buscou contribuir com os conhecimentos acerca da ZCAS, investigando sobretudo as possíveis relações entre a ocorrência de anomalias da TSM no Atlântico Sudoeste e o posicionamento/intensidade da ZCAS.

A realização deste estudo iniciou com a identificação dos padrões climatológicos na circulação geral e o total de precipitação para os meses de dezembro, janeiro, fevereiro e março, a partir de trinta anos de dados (1991-2020) da quinta geração de reanálise do ECMWF (ERA5). Também foi realizada a análise detalhada de três eventos de ZCAS ocorridos em janeiro de 2005, dezembro de 2017 e fevereiro/março de 2020, a partir de diversas fontes de dados, como CHM, INMET, CPTEC e as reanálises ERA5.

O mesmo período de trinta anos foi usado para avaliação da TSM média na costa sudoeste da América do Sul. Séries temporais da TSM foram construídas e os padrões observados nos períodos dos eventos de ZCAS selecionados foram analisados em busca de indicadores de alguma relação entre a TSM no Atlântico Sudoeste e a posição/intensidade da ZCAS.

A série temporal de trinta anos da TSM na região da CBM indicou uma tendência de aumento a partir da década de 90. Mais recentemente, essa tendência parece ter se estabilizado. Contudo, avaliando de forma geral, há uma variação da TSM média na área para a região da CBM de aproximadamente  $0,5^{\circ}$  C entre 2000 e 2017 (máximo do aquecimento). O estudo de Barcellos e Quadro (2019) revelou um aumento do número de dias com ZCAS a partir dos anos 2000. Esse período coincide com o período do aquecimento do Atlântico Sudoeste. Entretanto, para estabelecer uma relação direta entre esses eventos são necessários estudos mais completos, pois existem muitos

modos de variabilidade do Atlântico e muitos aspectos da climatologia da América do Sul relacionados aos eventos de ZCAS.

Nos três eventos analisados, observou-se anomalias positivas de precipitação principalmente no ramo oceânico da ZCAS. A distribuição da umidade específica sobre a América do Sul nos meses estudados apresentou máximos que coincidem com os máximos de precipitação. O escoamento de ar que transportou umidade do norte do continente para o centro-sul teve orientação similar à faixa de precipitação. Ou seja, as características observadas na climatologia de trinta anos da umidade específica e do escoamento de baixos níveis são semelhantes aos padrões dos anos de eventos de ZCAS analisados, indicando a importância da convergência de umidade da ZCAS para o regime de precipitação dos meses estudados. Além disso, notou-se que o aquecimento do Atlântico Tropical observado no evento de 2020 favoreceu o aumento da precipitação continental.

A relação TSM do Atlântico e ZCAS é complexa, conforme citado anteriormente. As análises, entretanto, destacaram alguns pontos importantes. A configuração das anomalias de TSM do sul do Atlântico Sul está relacionada às variações da circulação geral na América do Sul. As anomalias de PNMM e as anomalias das componentes do vento sugerem que há uma influência remota da TSM nas variações de posicionamento do ASAS. Também foram observadas variações de posicionamento dos sistemas da alta, média e baixa troposfera nos casos estudados.

No primeiro evento, ocorrido em janeiro de 2005, observou-se um aquecimento significativo das águas nas proximidades da região da CBM. Esse aquecimento contribuiu para as condições propícias ao desenvolvimento da ZCAS, apresentando a configuração típica da circulação atmosférica com a Zona de Convergência alinhada desde a região Amazônica e posicionando-se sobre o litoral do Sudeste do Brasil. Durante o evento, a TSM próximo à costa do Sudeste reduziu devido à nebulosidade associada à ZCAS, mas as anomalias positivas na região da CBM se mantiveram.

No segundo e terceiro episódios, ocorridos em dezembro de 2017 e fevereiro/março de 2020, observou-se um gradiente de anomalias da TSM na região da CBM. Essa configuração alterou o padrão típico de circulação atmosférica, deslocando a AB, o VCAN e o JST para norte de suas posições climatológicas. Por conseguinte, a ZCAS ancorou-se a norte da posição climatológica, estendendo-se desde a região Norte do Brasil para o oceano, onde ela se posicionou desde o litoral da região Nordeste até o litoral norte da região Sudeste. Nos casos de 2017 e 2020, após o estabelecimento da ZCAS, as condições atmosféricas favoreceram o aumento da TSM no sul do Atlântico, com destaque para a borda sudeste do oceano, onde fica posicionado o ASAS, mas também na costa da América do Sul, na foz do rio da Prata.

Além disso, o estudo destacou a influência do gradiente meridional de temperatura da atmosfera entre a região equatorial e subtropical/extratropical na posição e intensidade do JST. Esse gradiente é afetado pela configuração de TSM no Atlântico Sudoeste, o que, por sua vez, impacta as

áreas de divergência e convergência em altos níveis da atmosfera, que desempenham um papel importante na formação e no deslocamento da ZCAS.

Portanto, os resultados deste estudo apontaram a relevância da TSM no Atlântico Sudoeste como um fator importante para compreender a dinâmica da formação, posicionamento e intensidade dos eventos de ZCAS. Este estudo sugere que há uma complexa interconexão entre os sistemas oceânicos e atmosféricos, enfatizando a importância de uma abordagem interdisciplinar na compreensão dos fenômenos meteorológicos que afetam nossa sociedade. Prosseguir com pesquisas adicionais nesta área é fundamental para melhorar os esforços de previsão e planejamento, à medida que surgem novos desafios, como as mudanças climáticas por exemplo.

Assim, como sugestões para trabalhos futuros, são apontados os seguintes aspectos:

- Analisar a influência remota da TSM no Atlântico Sudoeste ampliando o número de episódios de ZCAS, a fim de melhorar as caracterizações dos padrões de interconexão;
- Avaliar a influência da TSM no Atlântico Sudoeste no posicionamento do JST; e
- Revisar a associação entre ZCAS e ciclones agregados ao ramo oceânico da zona de convergência.

**REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

BARCELLOS, D. R.; QUADRO, M. F. L. **Classificação de eventos extremos de precipitação quanto sua intensidade, persistência e abrangência na região das ZCAS.** Metodologias e Aprendizado, v.2, p.76–81, 2019.

BARREIRO, M.; CHANG, P.; SARAVANAN, R. **Variability of the South Atlantic Convergence Zone Simulated by an Atmospheric General Circulation Model.** Journal of Climate, v. 15, p. 745-763, 2002.

BOMBARDI, R.; CARVALHO, L.; JONES, C.; REBOITA, M. **Precipitation over eastern South America and the South Atlantic Sea surface temperature during neutral ENSO periods.** Climate Dynamics, v. 42, p. 1553-1568, 2014.

BRIZOLLA, M.C.; CARDOSO, C.S.; FRANKE, A.E. **A influência dos Jatos de Baixos Níveis da América do Sul no regime pluviométrico do verão no oeste de Santa Catarina.** Anais do XIII Simpósio Brasileiro de Climatologia Geográfica, Juiz de Fora, MG, p. 614-626, 2018.

CARVALHO, L.M.V.; JONES, C.; LIEBMANN, B. **Extreme Precipitation Events in Southeaster South America and Large-Scale Convective Patterns in the South Atlantic Convergence Zone.** Journal of Climate, v. 15, p. 2377-2394, 2002.

CARVALHO, L.M.V.; JONES, C.; LIEBMANN, B. **The South Atlantic Convergence Zone: Intensity, Form, Persistence, and Relationships with Intraseasonal and Interannual Activity and Extreme Rainfall.** Journal of Climate, v. 17, p. 88-108, 2004.

CATALDI, M.; CAMARGO, R.; KAYANO, M. T. **Estudo da influência das anomalias da TSM do Atlântico Sul Extratropical na região da Confluência Brasil Malvinas no regime hidrometeorológico de verão do Sul e Sudeste do Brasil.** Revista Brasileira de Meteorologia, v. 25, n. 4, p. 513-524, 2010.

CAVALCANTI, I.; SHIMIZU, M. **Climate fields over South America and variability of SACZ and PSA in HadGEM-ES.** American Journal of Climate Change, v.01, p. 132-144, 2012.

CENTRO DE HIDROGRAFIA DA MARINHA (CHM). **Carta Sinótica.** Niterói, RJ, 2023.

CENTRO DE PREVISÃO DE TEMPO E ESTUDOS CLIMÁTICOS (CPTEC) - INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). **Carta Sinótica.** São José dos Campos, São Paulo, 2021.

CHELTON, D. B.; SCHLAX, M.G.; WITTER, D.L.; RICHMANN, J.G. **Geosat altimeter observations of the surface circulation of the Southern Ocean.** Journal of Geophysical Research: Oceans, v. 95, n. C10, p. 17877-17903, 1990.

COLLAZO, S.; GARCÍA-HERRERA, R.; BARRIOPEDRO, D. **Summer upper-level jets modulate the response of South American climate to ENSO**. *Climate Dynamics*, 2023. Disponível em: < <https://doi.org/10.1007/s00382-023-06955-9>>. Acesso em 05 out 2023.

Copernicus Climate *Change Service (C3S)*. **ERA5: Fifth generation of ECMWF atmospheric reanalyses of the global climate**. Copernicus Climate Change Service Climate Data Store (CDS). 2017. Disponível em: < <https://cds.climate.copernicus.eu/#!/home>>. Acesso em 14 mar 2023.

DOTY, B.E.; KINTER, J.L. **Geophysical Data Analysis and Visualization using GrADS**. *Visualization Techniques in Space and Atmospheric Sciences*, eds. E.P. Szuszczewicz and J.H. Bredekamp. NASA, Washington, D.C., p. 209-219, 1995.

ESCOBAR, G. J. C. **Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS): Critério de detecção para uso em centros operacionais de previsão de tempo**. Nota Técnica - INPE, 2019.

FIALHO, W.; CARVALHO, L.; GAN, M.; VEIGA, S. **Mechanisms controlling persistent South Atlantic Convergence Zone events on intraseasonal timescales**. *Theoretical and Applied Climatology*, v. 152, p. 75-96, 2023.

GORDON, A. L.; GREENGROVE, C. L. **Geostrophic circulation of the Brazil-Falkland confluence Deep Sea Research Part A**. *Oceanographic Research Papers*, v. 33, n. 5, p. 573-585, 1986.

GRAMCIANINOV, C. B. **Variabilidade da Corrente do Brasil na região da Confluência Brasil-Malvinas através de simulações numéricas**. Dissertação (Mestrado em Oceanografia) – Universidade de São Paulo, 2012.

HERSBACH, H.; BELL, B.; BERRIDFORD, P.; HIRAHARA, S.; HORÁNYI, A. et al. **The ERA5 global reanalysis**. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, v. 146, n. 730, p. 1999-2000, 2020.

KODAMA, Y. **Large-scale common features of Sub-tropical Precipitation Zones (the Baiu Frontal Zone, the SPCZ, and the SACZ). Part I: characteristics of Subtropical Frontal Zones**. *Journal of Meteorological Society of Japan*, v. 70, n. 4, p. 813-835, 1992.

KODAMA, Y. **Large-scale common features of Sub-tropical Convergence Zones (The Baiu Frontal Zone, The SPCZ, and the SACZ). Part II: conditions of the circulation for generating the STCZs**. *Journal of Meteorological Society of Japan*, v. 71, n. 5, p. 581-610, 1993.

LEYBA, I.; SOLMAN, S.; SARACENO, M. **Trends in sea surface temperature and air–sea heat fluxes over the South Atlantic Ocean.** *Climate Dynamics*, v. 53, p. 4141-4153, 2019.

MARENGO, J. A.; SOARES, W. R.; SAULO, C.; NICOLINI, M. **Climatology of the Low-Level Jet East of the Andes as Derived from the NCEP-NCAR Reanalyses: Characteristics and Temporal Variability.** *Journal of Climate*, v. 17, p. 2261-2280, 2004.

MARINHA DO BRASIL. **Normas da Autoridade Marítima para Atividades de Meteorologia Marítima - NORMAM-701.** Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN). Niterói, RJ, 2023.

MOURA, R. **Mecanismos de estabilidade da Camada Limite Atmosférica Marinha na região da Confluência Brasil-Malvinas.** Tese (Doutorado em Meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2017.

MORIOKA, Y.; TOZUKA, T.; YAMAGATA, T. **On the growth and decay of the subtropical dipole mode in the South Atlantic.** *Journal of Climate*, v. 24, p. 5538-5554, 2011.

NMAMCHI, H.; LI, J.; ANYADIKE, R. **Does a dipole mode really exist in the South Atlantic Ocean?** *Journal of Geophysical Research*, v. 116, 2011.

NOGUÉS-PAEGLE, J.; MO, K., C. **Alternating Wet and Dry Conditions over South America During Summer.** *Monthly Weather Review*, v. 125, p. 279-291, 1997.

PETERSON, R.G.; STRAMMA, L. **Upperlevel circulation in the South Atlantic Ocean.** *Progress in Oceanography*, v. 26, p. 173, 1991.

PEZZI, L. P.; SOUZA, R. B. de; ACEVEDO, O.; WAINER, I.; MATA, M. M.; GARCIA, C. A. E.; CAMARGO, R. de. **Multiyear measurements of the oceanic and atmospheric boundary layers at the Brazil-Malvinas confluence region,** *Journal of Geophysical Research.*, v. 114, 2009.

PEZZI, L. P.; SOUZA, R. B. D.; QUADRO, M. F. **A review on the oceanatmosphere interaction processes in regions of strong sea surface temperature gradients of the South Atlantic Ocean based on observational data.** *Revista Brasileira De Meteorologia*, v.102, p. 428-453, 2016.

PEZZI, L.P.; Quadro, M.F.L.; Lorenzzetti, J.A. et al. **The effect of Oceanic South Atlantic Convergence Zone episodes on regional SST anomalies: the roles of heat fluxes and upper-ocean dynamics.** *Climate Dynamics*, v. 59, p. 2041–2065, 2022.

QUADRO, M.F.L. **Estudo de Episódios de Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) sobre a América do Sul.** Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1994.

QUADRO, M. F. L.; PEZZI, L. P.; ROSA, E. B. **O climanálise e o monitoramento da ZCAS nos últimos 30 anos.** Revista Climanalise, edição comemorativa 30 anos, 2016.

REBOITA, M.S.; GAN, M.A.; ROCHA, R.P.; AMBRIZZI, T. **Regimes de Precipitação na América do Sul: Uma Revisão Bibliográfica.** Revista Brasileira de Meteorologia, v. 25, n. 2, p. 185-204, 2010.

REBOITA, M.; KRUSCHE, N.; AMBRIZZI, T.; ROCHA, R. **Entendendo o tempo e o clima na América do Sul.** Terrae Didatica, v. 8, p. 34-50, 2012.

REBOITA, M.S.; MARIETTO, D.M.G.; SOUZA, A.; BARBOSA, M. **Caracterização atmosférica quando da ocorrência de eventos extremos de chuva na região sul de Minas Gerais.** Revista Brasileira de Climatologia, [S.l.], v. 21, ago. 2017.

SATYAMURTY, P.; NOBRE, C.A.; SILVA DIAS, P.L. **South America. In: Meteorology of the Southern Hemisphere.** American Meteorological Society, Meteorological Monographs, v. 27, n. 49, p. 119-139, 1998.

SOUZA, P.H.A.O.; TEIXEIRA, F.V.B. **Análise da tendência de temperatura da superfície do mar e fluxos de calor no Atlântico Sudoeste entre os anos de 1959 e 2020.** Anais Hidrográficos, t. 80, 2023.

STRUB, P.T.; JAMES, C.; COMBES, V.; MATANO, R.P.; PIOLA, A.R.; PALMA, E. D.; SARACENO, M.; GUERRERO, R.A.; FENCO, H.; RUIZ-ETCHEVERRY, L.A. **Altimeter-derived seasonal circulation on the southwest Atlantic shelf: 27°–43° S.** Journal of Geophysical Research: Oceans, v. 120, n. 5, p. 3391-3418, 2015.

TEIXEIRA, F.V.B. **Estudo da Zona de Convergência do Atlântico Sul com Simulações Estendidas do Modelo Regional Atmosférico RAMS.** Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE. Rio de Janeiro. 2000.

VENEGAS, S. A.; MYSAK, L. A.; STRAUB, D. N. **Atmosphere-Ocean coupled variability in the South Atlantic.** Journal of Climate, v. 10, p. 2904-2920, 1997.

XUE, H.; PAN, Z.; BANE, J.M. **A 2D coupled atmosphereocean model Study of air-sea interactions during a cold air advection over the Gulf Stream.** Monthly Weather Review, v. 128, p. 966-973, 2000.