



**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO**  
**FACULDADE DE FILOSOFIA, LETRAS E CIÊNCIAS HUMANAS**  
**DEPARTAMENTO DE GEOGRAFIA**

**Dissertação de Mestrado em Geografia Física**

**Linha 3 - Estudos teóricos e aplicados em Climatologia**

**VARIABILIDADE INTERANUAL DA ZONA DE CONVERGÊNCIA**  
**DO ATLÂNTICO SUL E SUA ASSOCIAÇÃO COM O EL NIÑO-**  
**OSCILAÇÃO SUL, ENTRE 2000 E 2021**

**Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Maria Elisa Siqueira Silva**

**Coorientador: Prof. Dr. Antonio Carlos Oscar Junior**

**Aluno: Ian Verdán da Silva**



**– APRESENTAÇÃO E APROVAÇÃO: 01/03/2023**

**– VERSÃO CORRIGIDA: 12/04/2023**

**Abril de 2023**

**São Paulo**

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Catálogo na Publicação  
Serviço de Biblioteca e Documentação  
Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas da Universidade de São Paulo

V483 Verdan, Ian da Silva  
v Variabilidade Interanual da Zona de Convergência do Atlântico Sul e sua Associação com o El Niño-Oscilação Sul entre 2000 e 2021 / Ian Verdan; orientadora Maria Elisa Siqueira Silva; coorientador Antonio Carlos Oscar Junior - São Paulo, 2023.  
120 f.

Dissertação (Mestrado)- Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas da Universidade de São Paulo. Departamento de Geografia. Área de concentração: Geografia Física.

1. CLIMATOLOGIA. 2. EL NIÑO. 3. CIRCULAÇÃO OCEÂNICA. 4. METEOROLOGIA. 5. ZCAS. I. Silva, Maria Elisa Siqueira, orient. II. Título.

**ENTREGA DO EXEMPLAR CORRIGIDO DA  
DISSERTAÇÃO/TESE**

**Termo de Ciência e Concordância do (a) orientador (a)**

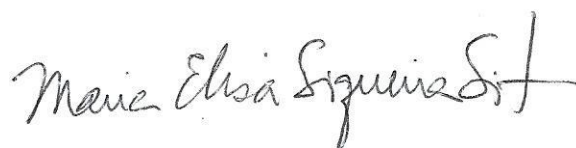
**Nome do (a) aluno (a): Ian Verdán da Silva**

**Data da defesa: 01/03/2023**

**Nome do Prof. (a) orientador (a): Maria Elisa Siqueira Silva**

Nos termos da legislação vigente, declaro **ESTAR CIENTE** do conteúdo deste **EXEMPLAR  
CORRIGIDO** elaborado em atenção às sugestões dos membros da comissão Julgadora na sessão de defesa do trabalho, manifestando-me **plenamente favorável** ao seu encaminhamento e publicação no **Portal Digital de Teses da USP**.

São Paulo, 24/07/2023



---

**(Assinatura do (a) orientador (a))**

## Agradecimentos

Meus primeiros agradecimentos vão aos meus avós Adália, Djalma, Elza e Itamar (*in memoriam*) e a minha bisavó, Iva, que sempre me apoiaram e nunca saíram do meu lado, me dando todo o apoio possível para que eu nunca desistisse dos meus sonhos.

Aos meus pais, Milene e José Ananias e à minha irmã, Maria Nathalia, por me estimularem a estudar desde pequeno e por também estarem ao lado durante essa árdua jornada, me aconselhando nos dias mais estressantes, lembro de quando faltou professor de história na minha turma na quinta série e minha mãe me incentivou a ficar lendo o livro didático durante as férias.

Aos demais familiares, que de uma forma ou outra também me apoiaram desde a graduação, quando saí da casa dos meus pais e vim pro Rio de Janeiro, até o mestrado na USP.

Agradeço à minha orientadora, Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Maria Elisa Siqueira Silva, por sempre acreditar em mim e no meu potencial, como também por me dar todo suporte necessário para realização deste e outros projetos de pesquisa desenvolvidos na USP. Desde sempre me instigando e me tirando da zona de conforto, como cientista, isso me amadureceu muito, obrigado.

Também quero agradecer ao Prof. Dr. Antonio Carlos Oscar Júnior, meu coorientador, que foi o responsável pela iniciação da minha vida científica. Sem ele como meu orientador na graduação, não teria ganhado paixão pela pesquisa e carreira acadêmica. Foi o Prof. Antonio quem me apresentou à Climatologia Geográfica e a quem sou eternamente grato.

Também agradeço o apoio da Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas (FFLCH) da USP por me aceitar e apoiar a realização desta pesquisa.

Aos membros da banca examinadora, Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Leila Limberger e o Prof. Dr. Tércio Ambrizzi, que contribuíram para o enriquecimento deste trabalho que estiveram presentes nas bancas de qualificação e apresentação final da pesquisa.

Agradeço também à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa de mestrado concedida ao Programa de Pós Graduação em Geografia Física da USP, a qual foi destinada à minha pesquisa durante um período de trinta meses;

agradeço também pelo aceite do pedido de prorrogação do término da bolsa em decorrência do quadro de isolamento imposto pela pandemia de COVID-19.

Aos professores e funcionários do Programa de Pós Graduação em Geografia Física da USP e de outros departamentos onde cursei disciplinas, em especial à Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup>. Rita Ynoue, que me ajudou durante algumas etapas da minha pesquisa.

Ao ECMWF, INPE/CPTEC, Marinha do Brasil e ao ONS pela disponibilidade de dados fundamentais para o desenvolvimento da pesquisa.

Por fim, e não menos importante, agradeço aos meus amigos, não há espaço para que todos sejam citados, mas não posso deixar de agradecer alguns em específico, como Fred, que por ter afinidades com a temática me ajudou a traçar o caminho até os objetivos, ao Joberth, a Clara e a Dryka, com quem dividia meus momentos de ansiedade, felicidade e que sempre aconselhavam durante essa jornada e aos demais amigos Emerson, Ana Cláudia, Pedro e Cris por ouvirem minhas reclamações e lamúrias, mas por sempre estarem ao meu lado, nos melhores e nos piores dias. A todos vocês meu muito obrigado, sem qualquer um de vocês eu teria desistido do mestrado.

*"Navego mais além,  
Pra nesse mapa me encontrar."  
- Náufrago, Scalene.*

## Resumo

Respondendo por quase um terço de todo o volume de chuva observado na região Sudeste do Brasil os episódios de Zona de Convergência do Atlântico Sul, ZCAS, têm impactos diretos na região mais densamente povoada e economicamente ativa do país, onde se localiza a maior parte dos reservatórios para a geração de energia hidrelétrica no Brasil, assim como alguns dos principais ecossistemas do continente, como Pantanal, Amazônia e Mata Atlântica. Neste estudo buscou-se identificar a associação entre a ocorrência de episódios de ZCAS e o fenômeno El Niño–Southern Oscillation, ENOS, nos meses de janeiro a março de 2000 a 2021. Dados de radiação de onda longa, ROL, água precipitável e vento do ERA-5 foram usados na identificação diária dos episódios de ZCAS; a ocorrência de cada uma das fases do ENOS foi definida pelo ONI. Além da contagem do número de episódios de ZCAS em cada fase do ENOS, os episódios foram classificados de acordo com sua posição meridional na América do Sul. Os resultados mostram, através do coeficiente de correlação linear de Pearson e do coeficiente de contingência, que a frequência de episódios de ZCAS é maior durante os períodos de La Niña, em comparação com as fases neutra e de El Niño, os valores obtidos foram, respectivamente, - 0,21 e - 0,42. Nos períodos de La Niña, a frequência de episódios de ZCAS nas áreas ao norte (39,0 %), central (36,6 %) e sul (24,4 %) ocorrem de forma mais homogênea do que os episódios nos períodos de El Niño e neutros, quando ocorrem preferencialmente na área central (47,4 %) e norte (46,4 %), respectivamente. A análise da circulação atmosférica permitiu verificar que a posição das anomalias positivas (negativas) de divergência do ar em 250 hPa são coincidentes com a posição das anomalias negativas (positivas) de ROL, indicando a presença de movimento ascendente no interior da ZCAS e subsidente nas áreas adjacentes. Tal padrão é observado não somente para casos individuais, mas para a média de episódios localizados nas áreas sul, central e norte, em cada uma das fases do ENOS. Anomalias negativas de altura geopotencial em níveis altos da troposfera ao sul e sudoeste da posição média dos episódios de ZCAS, separados nas regiões meridionais distintas, indica que a circulação de altos níveis da atmosfera contribui para a formação da convergência do ar de baixos níveis associados aos episódios de ZCAS. Foi observado também que os episódios de ZCAS estiveram localizados mais ao norte quando o Vórtice Ciclônico de Altos Níveis do Nordeste Brasileiro, VCAN-NE, esteve ao norte de sua posição climatológica e, mais

ao sul, quando o VCAN-NE se encontrava mais fortalecido e deslocado para o sul, na altura do litoral da Bahia.

**Palavras-chave:** ZCAS; El Niño–Southern Oscillation; Circulação Atmosférica; Vórtice Ciclônico de Altos Níveis do Nordeste Brasileiro; ERA-5.



## Abstract

Accounting for almost a third of all the rainfall observed in the Southeast region of Brazil, episodes of the South Atlantic Convergence Zone, SACZ, have direct impacts on the most densely populated and economically active region of the country, where most of reservoirs for hydroelectric power generation in Brazil are located, as well as some of the main ecosystems of the continent, such as the Pantanal, Amazon and Atlantic Forest. In this study, we sought to identify the association between the occurrence of SACZ episodes and the phenomenon El Niño–Southern Oscillation, ENSO, from January to March from 2000 to 2021. Outgoing Longwave Radiation, OLR, precipitable water and wind of ERA-5 were used in the daily identification of SACZ episodes; the occurrence of the ENSO phases was defined by the ONI. In addition to counting the number of SACZ episodes in each ENSO phase, episodes were classified according to their meridional position in South America. The results show, through the computation of Pearson's linear correlation and the contingency coefficients, that the frequency of SACZ episodes is higher during the La Niña periods, compared to the neutral and El Niño phases, the values obtained were, respectively, - 0.21 and - 0.42. In periods of La Niña, the frequency of SACZ episodes in the northern (39.0 %), central (36.6 %) and southern (24.4 %) areas occur more homogeneously than episodes in periods of La Niña. El Niño and neutral, when they occur preferentially in the central area (47.4 %) and north (46.4 %), respectively. The analysis of the atmospheric circulation allowed verifying that the position of positive (negative) anomalies of air divergence at 250 hPa are coincident with the position of negative (positive) anomalies of OLR, indicating the presence of ascending movement inside the SACZ and subsidence in the adjacent areas. Such a pattern is observed not only for individual cases but for the average of episodes located in the southern, central and northern areas, in the ENSO phases. Negative geopotential height anomalies at upper troposphere levels to the south and southwest of the mean position of the SACZ episodes, separated into the distinct meridional regions, indicate that the upper atmospheric level circulation contributes to the formation of low-level air convergence associated with the episodes of SACZ. It was also observed that the SACZ episodes are located further north when the Northeast Brazilian Upper Level Cyclonic Vortex of, ULCV-NE, is displaced to the north of its climatological position and further south, when the ULCV-NE is more strengthened and displaced to the south, on the coast of Bahia.

**Keywords:** SACZ; El Niño–Southern Oscillation; Atmospheric Circulation; Northeast Brazilian Upper Level Cyclonic Vortex; ERA-5.

## Lista de Figuras

**Figura 1:** Exemplo de um episódio de ZCAS observado pelo satélite METEOSAT para o dia 19/02/2021 às 22 horas, as linhas em vermelho destacam o corredor de nuvens que consistiu a ZCAS desse período. Fonte: CPTEC-INPE. Disponível em: <[http://satelite.cptec.inpe.br/repositoriomsg/msg/met\\_web/color/2021/02/S10117928\\_202102192200.jpg](http://satelite.cptec.inpe.br/repositoriomsg/msg/met_web/color/2021/02/S10117928_202102192200.jpg)>. 21

**Figura 2:** Rua em frente à Prefeitura de Porciúncula – RJ fica alagada após transbordo do Rio Carangola no dia 20/02/2021. Fonte: G1. Disponível em: <https://g1.globo.com/rj/norte-fluminense/noticia/2021/02/20/nivel-de-rio-sobe-apos-chuva-em-mg-e-cidades-do-noroeste-fluminense-ficam-alagadas.ghtml>. 22

**Figura 3:** Seca na represa Jaguari-Jacareí, na cidade de Bragança Paulista (SP) em 2014. Fonte: G1. Disponível em: <http://g1.globo.com/sao-paulo/noticia/2014/09/sistema-cantareira-atinge-81-menor-indice-ja-registrado-em-sp.html>. 24

**Figura 4:** As ilustrações mostram como o sistema acoplado oceano-atmosfera normalmente se comporta durante cada evento. (a) anomalia de TSM e circulação de ventos para períodos neutros; (b) perfil vertical da anomalia de TSM (termoclina) e circulação oceânica para os três períodos; (c) anomalia de TSM e circulação de ventos para períodos de El Niño, e (d) anomalia de TSM e circulação de ventos para períodos de La Niña. Fonte: adaptado do Australian Bureau of Meteorology. 29

**Figura 5:** A Circulação de Walker durante as distintas fases do ENOS. (a) períodos neutros; (b) períodos de El Niño, e (c) períodos de La Niña. Fonte: adaptado do NOAA Climate.gov. Disponível em: <<https://www.climate.gov/news-features/blogs/enso/walker-circulation-ensos-atmospheric-buddy>>. 31

**Figura 6:** Impactos do ENOS na precipitação da América do Sul, durante os períodos de El Niño e de La Niña. Fonte: Adaptado de 'La Niña and Rainfall' e 'El Niño and Rainfall' do International Research Institute for Climate and Society. 34

**Figura 7:** Quadro à esquerda: posição típica da ZCAS (verde), o sistema quase-estacionário (baixa pressão (B) e frente fria, linha azul com triângulos) e a convergência de ar em baixos níveis (setas em preto). Quadro à direita: configuração típica da circulação em altos níveis, circulação anticiclônica da Alta da Bolívia (linhas azuis) e o cavado do Nordeste (linhas laranja e amarela). Fonte: adaptado do Conceptual Models for Southern Hemisphere (2015). 35

**Figura 8:** Representação esquemática das principais características da dinâmica da ZCAS. Abaixo: vetores de vento de 850 hPa com radiação de onda longa de saída ( $W.m^{-2}$ ); Meio: velocidade de pressão de 500 hPa sombreada ( $\omega$ ,  $hPa s^{-1}$ ) e contornos de altura geopotencial ( $\phi$ ,  $J kg^{-1}$ ); Acima: linhas de corrente do vento de 200 hPa e divergência horizontal sombreada. Fonte: (NIELSEN et al., 2019). 36

**Figura 9:** Quadro à esquerda: campos compostos de alta nebulosidade ao redor da ZCAS, as áreas de alta nebulosidade entre as isolinhas de valor 1 e 3 apresentam sombreamento leve, enquanto que as regiões com isolinhas com valores maiores que 3 apresentam sombreamento mais forte. Quadro à direita: mapa do fluxo de umidade entre 1000 mb e 400 mb, as áreas sombreadas

indicam as taxas de precipitação determinadas pela convergência do fluxo de umidade, superiores a 5 mm/dia. Fonte: Kodama (1992). 38

**Figura 10:** Padrão de teleconexão onde anomalias positivas de TSM ao norte da Austrália contribuem para a propagação de ondas de Rossby sobre Pacífico Sul e para a modulação da circulação de Walker, provocando bloqueios atmosféricos, células de alta pressão atmosférica no litoral sudeste de Brasil, inibindo a formação de ZCAS e, conseqüentemente, reduzindo a precipitação sobre o sudeste brasileiro. As cores laranja e azul em níveis altos da atmosfera indicam respectivamente anomalias positivas e negativas de ROL. Fonte: Coelho et al. (2016). 41

**Figura 11:** Campos de anomalia OLR (sombreamento, unidade:  $W m^{-2}$ ),  $\psi$  ( $10^7 m^2 s^{-1}$ ) e vento de 200 hPa (vetores em  $m s^{-1}$ ), somente para os eventos de ZCAS em La Niña, e o mesmo domínio para América do Sul. Fonte: (BRAGA; AMBRIZZI; HALL, 2022). 42

**Figura 12:** Fluxograma simplificado dos procedimentos empregados para o desenvolvimento da pesquisa. 45

**Figura 13:** Mapa dos estados brasileiros inseridos no corredor das ZCAS. 47

**Figura 14:** Mapa do uso e ocupação da terra no corredor das ZCAS, para o ano de 2014. 49

**Figura 15:** Mapa das classes climáticas reconhecidas pelo IBGE, para o ano de 2014, no corredor da ZCAS. 52

**Figura 16:** Fluxograma simplificado para a identificação de eventos ZCAS. 58

**Figura 17:** Retângulos contíguos definidos para a localização dos eventos ZCAS. 58

**Figura 18:** Radiação de onda longa e circulação atmosférica (linha de corrente) em 250 hPa para os dias (a) 01, (b) 02, (c) 03, (d) 04, (e) 05 e (f) 06/01/2000. Valores de ROL inferiores a  $200 W m^{-2}$  são destacados pela isolinha azul. 65

**Figura 19:** Radiação de onda longa e circulação atmosférica (linha de corrente) em 250 hPa para os dias (a) 22, (b) 23, (c) 24 e (d) 25/02/2016. Valores de ROL inferiores a  $200 W m^{-2}$  são destacados pela isolinha azul. 66

**Figura 20:** Água precipitável e circulação atmosférica (linha de corrente) em 850 hPa para os dias (a) 01, (b) 02, (c) 03, (d) 04, (e) 05 e (f) 06/01/2000. Valores de água precipitável superiores a  $45 kg m^{-2}$  são destacados pela isolinha amarela. 68

**Figura 21:** Água precipitável e circulação atmosférica (linha de corrente) em 850 hPa para os dias (a) 22, (b) 23, (c) 24 e (d) 25/02/2016. Valores de água precipitável superiores a  $45 kg m^{-2}$  são destacados pela isolinha amarela. 69

**Figura 22:** Frequência de episódios de ZCAS e número de dias com ZCAS nos meses de janeiro a março, de 2000 a 2021, com base nos dados de ROL, água precipitável e vento da reanálise ERA-5. 70

**Figura 23:** Valores mensais do ONI entre janeiro de 2000 e dezembro de 2021, com destaque para os períodos de La Niña (em azul), El Niño (em vermelho) e neutros (em cinza). 72

- Figura 24:** Associação visual entre as ZCAS e a média para os valores de JAN-MAR do ONI. 73
- Figura 25:** Diagrama de dispersão entre ONI e a ocorrência mensal de ZCAS, para os meses de janeiro a março de 2000 a 2021. 74
- Figura 26:** Diagrama de dispersão entre ONI e número de dias com ZCAS, para os meses de janeiro a março de 2000 a 2021. 75
- Figura 27:** Anomalia de ROL ( $W m^{-2}$ ) para os episódios de ZCAS segmentados pela sua posição nos retângulos fixos. (a) episódios de ZCAS à norte, (b) ZCAS em sua posição central e (c) episódios de ZCAS situados ao sul. 76
- Figura 28:** Circulação atmosférica média em 250 hPa (linhas de corrente) e valores de ROL ( $W m^{-2}$ ) para episódios de ZCAS identificados nos meses de janeiro a março, de 2000 até 2021. 77
- Figura 29:** Circulação atmosférica média em 850 hPa (linha de corrente) e valores de água precipitável ( $kg m^{-2}$ ) para os episódios de ZCAS identificados entre janeiro e março, de 2000 a 2021. 80
- Figura 30:** Anomalias de altura geopotencial (hPa) e vento (linhas de corrente) em 250 hPa, pressão ao nível do mar e de vento (linhas de corrente) em 850 hPa e de evaporação potencial (cm/h) para os episódios de ZCAS nas três fases do ENOS. 83
- Figura 31:** Anomalia de ROL ( $W m^{-2}$ ) para os episódios de ZCAS segmentados pelas fases do ENOS e pela posição nos retângulos fixos. 84
- Figura 32:** Anomalia de divergência em 250 hPa para os episódios de ZCAS segmentados pelas fases do ENOS e pela posição nos retângulos fixos. Os círculos em verde destacam a região com valores positivos contínuos e expressivos. 85
- Figura 33:** Anomalia de altura geopotencial (hPa) e de vento em 250 hPa (linhas de corrente) para os episódios de ZCAS segmentados pelas fases do ENOS e pela posição nos retângulos fixos. 86
- Figura 34:** Anomalia de altura geopotencial (hPa), vento em 250 hPa (linhas de corrente) para a médias de todas os episódios de ZCAS (linhas de corrente em preto) segmentados pelas fases do ENOS (linhas de corrente em azul, para LN, em verde, para neutro, e em vermelho, para EN) e pela posição nos retângulos fixos. 88
- Figura 35:** Anomalia de pressão ao nível do mar (hPa) e vento (linha de corrente) em 850 hPa para os episódios de ZCAS segmentados pelas fases do ENOS e pela posição nos retângulos fixos. 90
- Figura 36:** Anomalia de divergência em 850 hPa para os episódios de ZCAS segmentados pelas fases do ENOS e pela posição nos retângulos fixos. Os círculos em verde destacam a região com valores negativos contínuos e expressivos. 91
- Figura 37:** Esquema da circulação atmosférica em cada situação analisada, onde: as setas indicam valores anômalos positivos (azul) e negativos (laranja) de evaporação potencial, o valor em porcentagem indica a frequência dos episódios de ZCAS em cada posição (com destaque para os valores maiores), a escada em verde representa a posição das ZCAS atrás da anomalia negativa de ROL, as setas circulares mostra a anomalia de circulação em 250 hPa e o fortalecimento

(enfraquecimento) do VCAN-NE e da AB é mostrado pela grafia dos mesmos com letras maiores (menores). 97

**Figura 38:** Anomalia de ROL ( $W m^{-2}$ ) para (a) o primeiro episódio de ZCAS no ano 2000, (b) segundo de 2000, (c) terceiro de 2000, (d) quarto de 2000, (e) quinto de 2000, (f) primeiro de 2001, (g) sexto de 2001, (h) sexto de 2002, todos em períodos de La Niña. Os retângulos destacados em preto foram selecionados por apresentar os maiores valores de anomalia negativa de ROL. 111

**Figura 39:** Anomalia de ROL ( $W m^{-2}$ ) para (a) o terceiro episódio de ZCAS no ano 2006, (b) quarto de 2006, (c) primeiro de 2008, (d) segundo de 2008, (e) terceiro de 2008, (f) quarto de 2008, (g) quinto de 2008, (h) sexto de 2008, todos em períodos de La Niña. Os retângulos destacados em preto foram selecionados por apresentar os maiores valores de anomalia negativa de ROL. 112

**Figura 40:** Anomalia de ROL ( $W m^{-2}$ ) para (a) o primeiro episódio de ZCAS no ano 2009, (b) segundo de 2009, (c) terceiro de 2009, (d) quarto de 2009, (e) quinto de 2009, (f) sexto de 2009, (g) primeiro de 2011, (h) segundo de 2011, todos em períodos de La Niña. Os retângulos destacados em preto foram selecionados por apresentar os maiores valores de anomalia negativa de ROL. 113

**Figura 41:** Anomalia de ROL ( $W m^{-2}$ ) para (a) o terceiro episódio de ZCAS no ano 2011, (b) quarto de 2011, (c) quinto de 2011, (d) primeiro de 2012, (e) segundo de 2012, (f) terceiro de 2012, (g) quarto de 2012, (h) quinto de 2012, todos em períodos de La Niña. Os retângulos destacados em preto foram selecionados por apresentar os maiores valores de anomalia negativa de ROL. 114

**Figura 42:** Anomalia de ROL ( $W m^{-2}$ ) para (a) o primeiro episódio de ZCAS no ano 2018, (b) segundo de 2018, (c) terceiro de 2018, (d) quarto de 2018, (e) primeiro de 2021, (f) segundo de 2021, (g) terceiro de 2021, (h) quarto de 2021, todos em períodos de La Niña. Os retângulos destacados em preto foram selecionados por apresentar os maiores valores de anomalia negativa de ROL. 115

**Figura 43:** Anomalia de ROL ( $W m^{-2}$ ) para (a) o quinto episódio de ZCAS no ano 2021, em período de La Niña. Os retângulos destacados em preto foram selecionados por apresentar os maiores valores de anomalia negativa de ROL. 116

**Figura 44:** Anomalia de ROL ( $W m^{-2}$ ) para (a) o primeiro episódio de ZCAS no ano 2003, (b) segundo de 2003, (c) terceiro de 2003, (d) primeiro de 2005, (e) segundo de 2005, (f) primeiro de 2007, (g) segundo de 2007, (h) primeiro de 2010, todos em períodos de El Niño. Os retângulos destacados em preto foram selecionados por apresentar os maiores valores de anomalia negativa de ROL. 117

**Figura 45:** Anomalia de ROL ( $W m^{-2}$ ) para (a) o segundo episódio de ZCAS no ano 2010, (b) terceiro de 2010, (c) primeiro de 2015, (d) segundo de 2015, (e) terceiro de 2015, (f) primeiro de 2016, (g) segundo de 2016, (h) terceiro de 2016, todos em períodos de El Niño. Os retângulos destacados em preto foram selecionados por apresentar os maiores valores de anomalia negativa de ROL. 118

**Figura 46:** Anomalia de ROL ( $W m^{-2}$ ) para (a) o quarto episódio de ZCAS no ano 2016, (b) primeiro de 2019, (c) segundo de 2019, todos em períodos de El Niño. Os retângulos destacados em preto foram selecionados por apresentar os maiores valores de anomalia negativa de ROL. 119

**Figura 47:** Anomalia de ROL ( $W m^{-2}$ ) para (a) o segundo episódio de ZCAS no ano 2001, (b) primeiro de 2002, (c) segundo de 2002, (d) primeiro de 2004, (e) segundo de 2004, (f) terceiro de

2004, (g) quarto de 2004, (h) quinto de 2004, todos em períodos neutros. Os retângulos destacados em preto foram selecionados por apresentar os maiores valores de anomalia negativa de ROL.

120

**Figura 48:** Anomalia de ROL ( $W m^{-2}$ ) para (a) o terceiro episódio de ZCAS no ano 2005, (b) quarto de 2005, (c) terceiro de 2007, (d) quarto de 2007, (e) quinto de 2007, (f) primeiro de 2013, (g) segundo de 2013, (h) terceiro de 2013, todos em períodos neutros. Os retângulos destacados em preto foram selecionados por apresentar os maiores valores de anomalia negativa de ROL.

121

**Figura 49:** Anomalia de ROL ( $W m^{-2}$ ) para (a) o quarto episódio de ZCAS no ano 2013, (b) quinto de 2013, (c) primeiro de 2014, (d) segundo de 2014, (e) terceiro de 2014, (f) primeiro de 2017, (g) segundo de 2017, (h) primeiro de 2020, todos em períodos neutros. Os retângulos destacados em preto foram selecionados por apresentar os maiores valores de anomalia negativa de ROL.

122

**Figura 50:** Anomalia de ROL ( $W m^{-2}$ ) para (a) o segundo episódio de ZCAS no ano 2020, (b) terceiro de 2020, (c) quarto de 2020, (d) quinto de 2020, todos em períodos neutros. Os retângulos destacados em preto foram selecionados por apresentar os maiores valores de anomalia negativa de ROL.

123

## Lista de tabelas

- Tabela 1:** Lista das variáveis obtidas da reanálise ERA-5 do ECMWF: identificação de ZCAS. 54
- Tabela 2:** Coeficiente de correlação linear de Pearson entre o número de dias com ZCAS tal como calculado pelo método proposto neste estudo, pelo Boletim Climanálise e pelas Cartas da Marinha, para o período de 2000 a 2021. 71
- Tabela 3:** Coeficiente de correlação linear de Pearson entre ONI e o número de ZCAS, nos meses de janeiro a março de 2000 a 2021. 75
- Tabela 4:** Coeficiente de correlação linear de Pearson entre ONI e o número de dias com ZCAS, nos meses de janeiro a março de 2000 a 2021. 77
- Tabela 5:** Tabela de contingência entre ENOS e o número de episódios de ZCAS para os meses de janeiro a março de 2000 a 2021. 78
- Tabela 6:** Tabela de contingência entre ENOS e o número de dias com episódios de ZCAS para os meses de janeiro a março de 2000 a 2021. 78
- Tabela 7:** Número de episódios de ZCAS nas áreas Norte, Centro e Sul, para o período de 2000 a 2021. 79
- Tabela 8:** Número de episódios de ZCAS nas áreas Norte, Centro e Sul para cada fase do ENOS. 81
- Tabela 9:** Número de dias com episódios de ZCAS nas áreas Norte, Centro e Sul, para o período de 2000 a 2021. 81
- Tabela 10:** Número de dias com episódios de ZCAS nas áreas Norte, Centro e Sul para cada fase do ENOS. 82



## Lista de siglas

AB	Alta da Bolívia
ABR	Abril
ASAS	Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul
BA	Bahia
C	Coeficiente de contingência
<i>cov</i>	Covariância
ECMWF	<i>European Centre for Medium-Range Weather Forecast</i>
d.c.	Depois de Cristo
ENOS	El Niño-Oscilação Sul
ERA-5	Quinta geração do ECMWF
GraDS	<i>Grid Analysis and Display System</i>
hPa	Hectopascal
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
IPCC	Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas
J	Joule
JFM	Janeiro, fevereiro e março
JMA	<i>Japan Meteorological Agency</i>
K	Kelvin
Km	Quilômetro
MAR	Março
MAS	Sistema Monçônico da América do Sul
m	Metro
mb	Milibar
mm	Milímetro
MSLP	<i>Mean sea level pressure</i>
NCEP-NCAR	<i>National Centers for Environmental Prediction</i>
NO	Noroeste
NOAA	<i>National Oceanic and Atmospheric Administration</i>
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico

ODP	Oscilação Decadal do Pacífico
OLR	<i>Output longwave radiation</i>
OMJ	Oscilação Madden-Julian
OMM	Organização Meteorológica Mundial
ONI	Índice Niño Oceânico
OUT	Outubro
Pa	Pascals
PIB	Produto Interno Bruto
PNMM	Pressão atmosférica ajustada ao nível do mar
PNUMA	Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente
$r$	coeficiente de correlação linear de Pearson
RJ	Rio de Janeiro
ROL	radiação de onda longa
S	desvio padrão
SE	Sudeste
SET	Setembro
$t$	Estatística padronizada teste T-Student
TSM	Temperatura da superfície do mar
VCAN-NE	Vórtice Ciclônico em Altos Níveis no Nordeste
W	Watt
XVIII	Século 18
XX	Século 20
ZCAS	Zona de Convergência do Atlântico Sul
ZCIT	Zona de Convergência Intertropical
ZCOU	Zona de Convergência de Umidade
ZCPS	Zona de Convergência do Pacífico Sul

## Lista de símbolos

$^{\circ}\text{C}$	Graus Celsius
$\%$	Porcentagem
$\Omega$	Ômega
$\Sigma$	Somatório
$\chi$	Qui
$\sqrt{\quad}$	Raiz Quadrada
$\psi$	Psi

## Sumário

<b>1 – INTRODUÇÃO</b>	20
1.1 – Objetivos	27
<b>2 – REVISÃO TEÓRICA</b>	28
2.1 – A variabilidade climática e o ENOS	28
2.2 – Zona de Convergência do Atlântico Sul - ZCAS	35
2.2.1 – Histórico de estudos	38
2.3 – A hierarquia escalar	44
<b>3 – METODOLOGIA E DADOS</b>	46
3.1 – Área de estudo	47
3.2 – Conjunto de dados	54
3.3 – Procedimentos	57
3.3.1 – Identificação de ZCAS	58
3.3.2 – Fases do ENOS	61
<b>4 – RESULTADOS</b>	65
4.1 – Associação entre ZCAS e ENOS	74
4.2 – Posicionamento Meridional dos episódios de ZCAS	82
4.3 – Circulação atmosférica de ZCAS nas fases de ENOS	83
4.4 – Circulação atmosférica de ZCAS por região	84
<b>5 – CONCLUSÃO</b>	93
<b>6 – BIBLIOGRAFIA</b>	98
<b>7 – ANEXO</b>	106
7.1 - Lista de episódios de ZCAS identificadas entre janeiro e março de 2000 até 2021	106
7.2 – Posição dos episódios de ZCAS identificadas entre janeiro e março de 2000 até 2021 e fases do ENOS	111

## 1 – INTRODUÇÃO

O sistema climático da Terra é alimentado pela radiação solar, seja ela emitida diretamente pelo Sol, em forma de radiação de onda curta, ou mesmo a emitida pela superfície terrestre em ondas longas. Assim sendo, pequenas alterações no balanço radiativo, como a retenção de calor por gases estufa, por exemplo, funcionam como forçantes para o surgimento de mudanças climáticas (IPCC, 2021). Desde a década de 1980, as evidências científicas acerca da possibilidade de haver uma mudança no clima global por efeito antrópico estão cada vez mais presentes no nosso cotidiano (CERÓN *et al.*, 2021; KOGO; KUMAR; KOECH, 2021; MARENGO, 2001; MARENGO; VALVERDE, 2007). O Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA) e a Organização Meteorológica Mundial (OMM) estabeleceram em 1988 o Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC), solidificando os esforços para avaliar o conhecimento científico sobre o tema, determinando as associações entre a variabilidade climática e as atividades humanas, buscando elaborar distintos cenários para o século XXI. Com base no IPCC (2021), há projeção de aumento da temperatura média da superfície global entre 2,0 °C e 4,5 °C, com estimativa média de 3 °C até o final do século XXI em relação ao período de 1980 a 1999, variando de acordo com as concentrações de gases de efeito estufa na atmosfera.

Em relação à mudança climática global, segundo o sexto relatório do IPCC, afirma-se que o planeta aqueceu cerca de 0,85 °C entre 1995 e 2014, quando comparado com as cinco décadas entre 1850 e 1900 (IPCC, 2021) e há uma tendência de crescimento no futuro, sendo que o cenário ‘mais otimista’ (SSP-1.9) aponta para um crescimento de cerca de 1,4 °C até 2100 enquanto o ‘mais pessimista’ indica uma possível elevação da temperatura média global superior a 4,5 °C, tendo como período de referência os anos de 1850-1900, com base nos cenários elaborados (IPCC, 2021). Tem-se verificado também o aquecimento dos oceanos, inclusive o Pacífico, em particular, nas áreas tropicais (IPCC, 2021); este aumento é uma questão preocupante devido à maior capacidade térmica dos oceanos e à sua influência na variabilidade climática global. Os resultados de Silva *et al.* (2020) mostram a tendência de aumento de fenômenos oceânicos de baixa frequência no longo prazo, de 1900 a 2014, indicando a prevalência de climas mais instáveis no decorrer do tempo. Tais constatações, sendo persistidas em períodos futuros, devem impactar mais fortemente os componentes climáticos que dependem diretamente da precipitação na

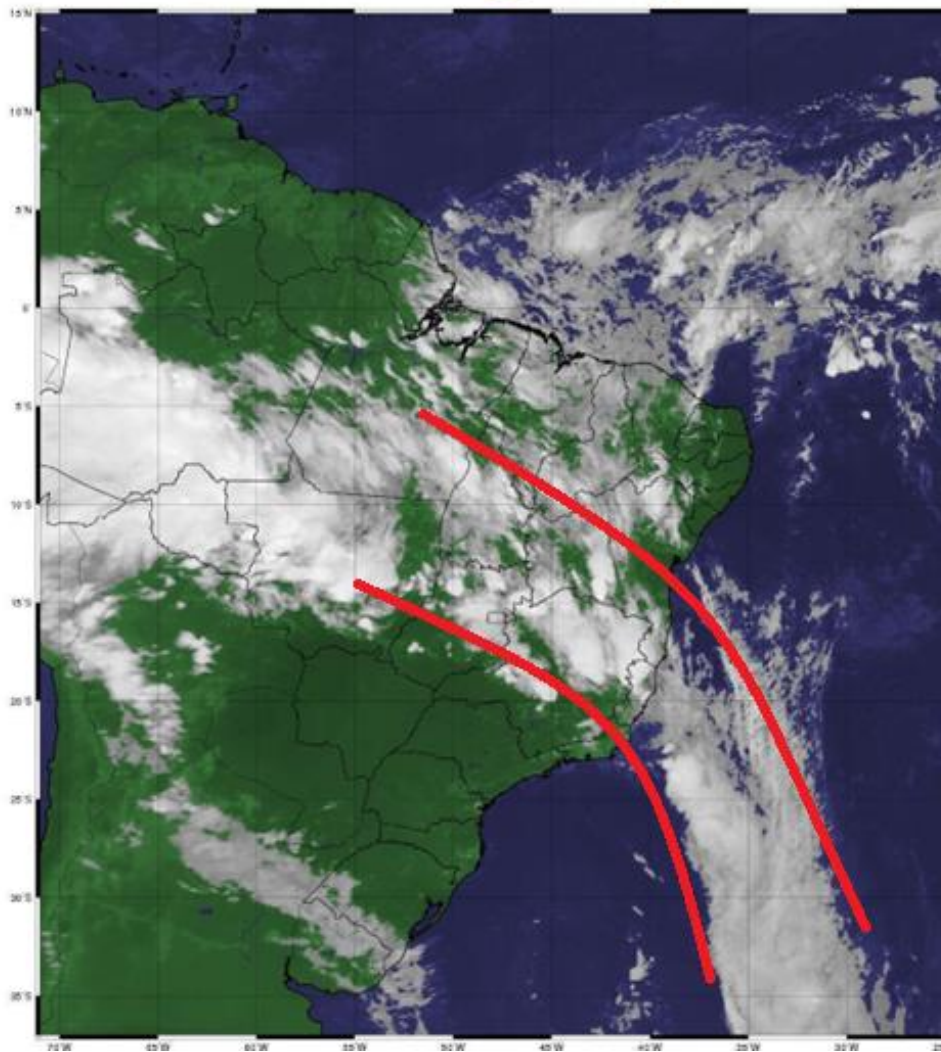
América do Sul, como os recursos hídricos e a biodiversidade, influenciando diretamente a atividade agropecuária e o abastecimento de energia hidrelétrica.

Os eventos extremos, como secas, enchentes, ondas de calor e de frio, furacões e tempestades, estão mais frequentes ou mais intensos no decorrer do tempo, produzindo enormes perdas econômicas e de vidas em várias partes do planeta (EMANUEL, 2005; MARENGO et al., 2015). No Brasil, como exemplos de eventos extremos recentes, pode-se mencionar a ocorrência do furacão Catarina, em março de 2004, a seca da Amazônia, em 2005, e as secas na região sudeste do país em 2014 e 2015 (MARENGO et al., 2015; MARENGO; VALVERDE, 2007). Acredita-se que tais eventos não estejam associados apenas à variabilidade natural do clima, mas também a mudanças no clima global (MARENGO; VALVERDE, 2007).

No que tange os Sistema Monçônico da América do Sul, no qual os episódios da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) estão contidos, reconstruções e simulações paleoclimáticas, sugerem, com alto grau de confiança, que durante os períodos mais quentes, como o Holoceno Médio ou os anos entre 900 e 1100 d.c., houve um enfraquecimento do sistema de monções em questão, sendo o oposto observado em épocas mais frias (IPCC, 2021). Dessa forma, a tendência de aumento das temperaturas médias concomitante com o aumento de fenômenos oceânicos de baixa frequência torna-se uma preocupação, em cenários futuros, para a ocorrência de ZCAS.

Os episódios de ZCAS caracterizam-se por uma banda de nebulosidade localizada na direção noroeste-sudeste, que persiste por três dias ou mais, associada à um corredor contínuo de nuvens (CARVALHO; JONES; LIEBMANN, 2002, 2004; ESCOBAR, 2019; GRIMM; ZILLI, 2009), similar a um rio de nuvens quando observado por imagens de satélite, conforme ilustrado na Figura 1. Durante os meses de verão uma enorme quantidade de água é liberada pela floresta Amazônica em forma de vapor d'água para a atmosfera, sendo ela transportada pelas correntes de ar em direção a região Sudeste do Brasil. De acordo com o INPA (Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia), uma única árvore de 10 metros de altura emite uma média de 300 litros de água por dia, transformando a água captada do solo em vapor.

METEOSAT - (10.8 microns)  
COLORIDA: 202102192200 GMT



**Figura 1:** Ilustração de episódio de ZCAS observado pelo satélite METEOSAT para o dia 19/02/2021, às 22 horas, as linhas em vermelho destacam o corredor de nuvens que consistiu na ZCAS desse período. Fonte: CPTec-INPE. Disponível em: < [http://satelite.cptec.inpe.br/repositoriomsg/msg/met\\_web/color/2021/02/S10117928\\_202102192200.jpg](http://satelite.cptec.inpe.br/repositoriomsg/msg/met_web/color/2021/02/S10117928_202102192200.jpg)>.

Segundo Kodama (1992), a ZCAS caracteriza-se pela presença de uma banda persistente de nebulosidade localizada na América do Sul na direção noroeste-sudeste, estendendo-se desde a Amazônia até o oceano Atlântico Sul, influenciando os valores de precipitação desde o sul do estado do Amazonas até o Paraná, incluindo as regiões Centro-Oeste, Sudeste e o sul do Nordeste do Brasil. Grande parte do regime de chuvas na região Sudeste do Brasil é influenciada pela atuação da ZCAS no período da estação chuvosa (outubro-março) (COELHO et al., 2016; MARENGO et al., 2015).

Evidenciando a relevância dos episódios de ZCAS para a região Sudeste do Brasil, segundo Nielsen *et al.* (2019), 26 % de toda a precipitação observada nessa região ocorre durante episódios da ZCAS, sendo este valor mais expressivo no verão, período em que o sistema se encontra ativo, correspondendo a 41 % e 56 % de todo o volume de chuva observado em janeiro e março, respectivamente. A foto da Figura 2 mostra o transbordamento do rio Carangola, que atravessa os estados de Minas Gerais e Rio de Janeiro, durante um evento de ZCAS ocorrido em fevereiro de 2021, deixando quatro bairros do município de Porciúncula (RJ) inundados durante alguns dias.



**Figura 2:** Rua em frente à Prefeitura de Porciúncula (RJ) alagada após transbordo do rio Carangola no dia 20/02/2021. Fonte: G1. Disponível em: <https://g1.globo.com/rj/norte-fluminense/noticia/2021/02/20/nivel-de-rio-sobe-apos-chuva-em-mg-e-cidades-do-noroeste-fluminense-ficam-alagadas.ghtml>.

Em um outro extremo, fenômenos de seca, como o ocorrido na região sudeste do Brasil entre 2014 e 2015 marcado pelo enfraquecimento da ZCAS mostra a vulnerabilidade da região, uma vez que a ausência de chuvas reduziu o nível dos reservatórios, levando a região a um quadro de crise hídrica (MARENGO *et al.*, 2015). Os episódios de ZCAS têm papel fundamental no regime pluviométrico na América do Sul, e, conseqüentemente, na manutenção dos reservatórios hídricos, com conseqüências para o consumo urbano, agrícola, industrial e para a geração de energia elétrica. No ano de 2014 foi observado um episódio de ZCAS pois havia um bloqueio atmosférico



desviando o transporte de umidade oriundo da região amazônica, implicando em uma redução significativa do impacto pluviométrico na região (MARENGO *et al.*, 2015).

Em 2015 a região Sudeste do Brasil sofreu o risco de racionamento de água domiciliar pois o volume de água dos reservatórios estava em níveis críticos (COSTA *et al.*, 2015). Em outubro do mesmo ano, o reservatório de Funil, no interior do estado do Rio de Janeiro, estava operando com apenas 15,4 % do seu volume útil, esse panorama de baixo volume hídrico propagava-se por todos os reservatórios que abastecem as grandes metrópoles da região Sudeste do Brasil, segundo dados do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS). Grande parte da precipitação regional concentra-se nos meses de verão, período ativo da ZCAS, porém, em janeiro de 2014, choveu apenas 39 mm na estação de São Cristóvão, Rio de Janeiro (RJ), segundo dados coletados pelo AlertaRio, frente aos 137,1 mm esperados, com base na normal climatológica do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), representando 28,5 % do total esperado para o mês. Esta conjuntura de escassez hídrica iniciou-se em 2014, período em que apenas um evento de ZCAS foi identificado nos meses de janeiro a março, prolongando-se até 2016. Em 2015-2016 foi registrado no oceano Pacífico um El-Niño intenso, segundo dados da *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA), implicando na redução da precipitação sobre a região Norte do Brasil, e, conseqüentemente, afetando o aporte de umidade transportado de lá para a região Sudeste (MARENGO *et al.*, 2015). A foto da Figura 3 ilustra o baixo nível do reservatório de Jaguari-Jacareí, em Bragança Paulista (SP), que estava com 1,65 % de seu volume total em janeiro de 2015.



**Figura 3:** Seca na represa Jaguari-Jacareí, em Bragança Paulista (SP), em 2014. Fonte: G1. Disponível em: <http://g1.globo.com/sao-paulo/noticia/2014/09/sistema-cantareira-atinge-81-menor-indice-ja-registrado-em-sp.html>.

Já em 2021 o cenário foi oposto pois na estação de São Cristóvão, Rio de Janeiro (RJ), choveu 254,2 mm no mês de dezembro, com base nos dados do AlertaRio, enquanto o esperado para todo o mês seria de 134,2 mm, baseado na normal climatológica do INMET. O incremento nos totais precipitados também aumentou em Minas Gerais e na Bahia, a exemplo de Lençóis (BA), onde, no mês de dezembro de 2021, choveu 603,2 mm, correspondendo a 454 % de todo o volume esperado para o mesmo mês e a mais da metade do volume anual médio, de acordo com dados do INMET. Segundo dados da Defesa Civil do Estado da Bahia, 24 pessoas morreram, 53,9 mil ficaram desalojadas e 629 mil foram afetadas de alguma forma pela chuva de dezembro de 2021. De acordo com as cartas sinóticas elaboradas pela Marinha do Brasil, a gênese das chuvas observadas em Lençóis (BA) foi um episódio de ZCAS que persistiu por oito dias, tendo se acoplado a um sistema de baixa pressão próximo ao litoral de Salvador (BA). O padrão sinótico pode ter se fortalecido pela atuação de uma La Niña sobre o oceano Pacífico, que normalmente aumenta os valores de precipitação nas regiões Norte e Nordeste do Brasil (KAYANO; ANDREOLI, 2021).

Em oposição, segundo Carvalho, Jones e Liebmann (2002), 35 % dos eventos extremos de precipitação na América do Sul ocorrem em associação a intensa atividade

convectiva da ZCAS em sua posição continental. Como exemplo, pode-se citar os eventos chuvosos ocorridos entre janeiro e março de 2004, deflagrados por episódios de ZCAS, culminando em movimentos de massa que resultaram em mais de 230.000 desabrigados e 161 mortes no Brasil (CERQUEIRA, 2006). Nunes et al. (2013) e Oscar Jr. (2018), entre outros, também destacaram a importância da ZCAS para ocorrência de eventos pluviométricos de alta magnitude e deflagradores de desastres em São Paulo e Rio de Janeiro. Dessa forma, os episódios de ZCAS, por serem a principal fonte de precipitação para a região sudeste, implicam em constantes variações hídricas, sendo objeto de grande interesse científico, particularmente, em face dos cenários de impactos provocados pelas mudanças climáticas e, conseqüentemente, de seus reflexos na organização e/ou desorganização espacial.

Os anos de 2014 e 2021 ilustram a importância da ZCAS para o período chuvoso do Sudeste brasileiro, repercutindo em impactos nas atividades desenvolvidas pelo ser humano, seja pela escassez ou acúmulo pluviométrico, atingindo desde a geração de energia hidrelétrica até condições vitais de habitabilidade provocadas por secas ou inundações. Segundo dados do Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT), pelo menos 4219 pessoas morreram em movimentos de massa no Brasil desde 1988 (2023). Dessa forma, o conhecimento mais aprofundado das condições atmosféricas que determinam a ocorrência dos episódios de ZCAS na América do Sul permitiria o aprimoramento do planejamento relativo à variabilidade da precipitação no decorrer da estação chuvosa, minimizando os danos provocados por eventos extremos de precipitação.

O presente trabalho está dividido em sete grandes blocos, sendo o primeiro a Introdução, a qual contém os objetivos e a justificativa; o segundo, a revisão teórica (Seção 2), contendo em si três subdivisões, a 2.1, voltada para a variabilidade climáticas dos eventos de ENOS, a 2.2, com foco nas características da ZCAS, e a 2.3, onde é abordada a hierarquia escalar; a Seção 3 consiste nos métodos empregados, englobando a área de estudo, o conjunto de dados utilizados e os procedimentos aplicados, desde a identificação dos episódios de ZCAS, o posicionamento dos mesmos e as análises estatísticas necessárias; a Seção 4 consiste na apresentação dos resultados, sendo compartimentada em quatro subgrupos: no primeiro, a associação estatística entre as ocorrências de ZCAS e as fases do ENOS é apresentada, no segundo, o posicionamento meridional dos episódios de ZCAS é mostrado, no terceiro, a circulação atmosférica associada aos episódios de ZCAS em cada fase do ENOS e, no último, a circulação

atmosférica por área de atuação e fase do ENOS. Na Seção 5, são apresentadas as conclusões alcançadas com o desenvolvimento do estudo. Por fim, a Seção 6 traz as referências bibliográficas e a Seção 7, os anexos.

### 1.1 – Objetivos

O presente estudo tem por objetivo geral associar o posicionamento e a frequência dos episódios de ZCAS com a ocorrência de eventos El Niño-Oscilação Sul (ENOS), salientando os padrões atmosféricos favoráveis ou desfavoráveis à formação, manutenção e localização dos episódios de ZCAS, durante os meses de janeiro, fevereiro e março de 2000 a 2021.

Dentre os objetivos específicos, destacam-se:

- Identificar a ocorrência de episódios de ZCAS no recorte temporal adotado;
- Associar a frequência dos episódios de ZCAS com as fases do ENOS;
- Agrupar os padrões espaciais de ocorrência de ZCAS nas fases de ENOS entre janeiro, fevereiro e março de 2000 a 2021;
- Analisar os padrões atmosféricos associados aos episódios de ZCAS nas posições norte, central e sul, durante fases distintas do ENOS.

## 2 – REVISÃO TEÓRICA

Neste tópico são apresentadas as principais referências teóricas adotadas no meio científico que embasam e justificam a relevância temática da pesquisa desenvolvida. A revisão de literatura realizada continuamente, desde o início da pesquisa, procurou identificar os principais artigos publicados em periódicos de grande relevância para a área visando construir um arcabouço teórico robusto que orientasse o presente estudo.

### 2.1 – A variabilidade climática e o ENOS

O IPCC (2021) define variabilidade climática como oscilações em torno da média do clima, incluindo a ocorrência de eventos extremos, em todas as escalas espaciais e temporais. A variabilidade climática apresenta duas componentes: a variabilidade natural e a antropogênica, de tal forma que a observação realizada do clima é produto desses dois componentes (CAVALCANTI; AMBRIZZI, 2021; NUNES; LOMBARDO, 1995). A variabilidade natural é proveniente de flutuações dos processos internos da dinâmica do sistema climático. O caráter não-linear do sistema dinâmico advém das interações energéticas de fenômenos em diferentes escalas. A variabilidade antropogênica está associada ao aumento da temperatura global do planeta Terra e é oriunda do aumento da emissão de gases de efeito estufa da superfície terrestre para a atmosfera, observado desde o período da revolução industrial (CAVALCANTI; AMBRIZZI, 2021; NUNES; LOMBARDO, 1995). O aumento recente da temperatura global acontece de forma acelerada em comparação com as taxas de aquecimento e resfriamento observadas antes da Revolução Industrial, mais concentrado nas regiões polares, afetando o ambiente e as sociedades, sendo considerado uma das mais graves ameaças ao desenvolvimento sustentável do planeta (IPCC, 2021).

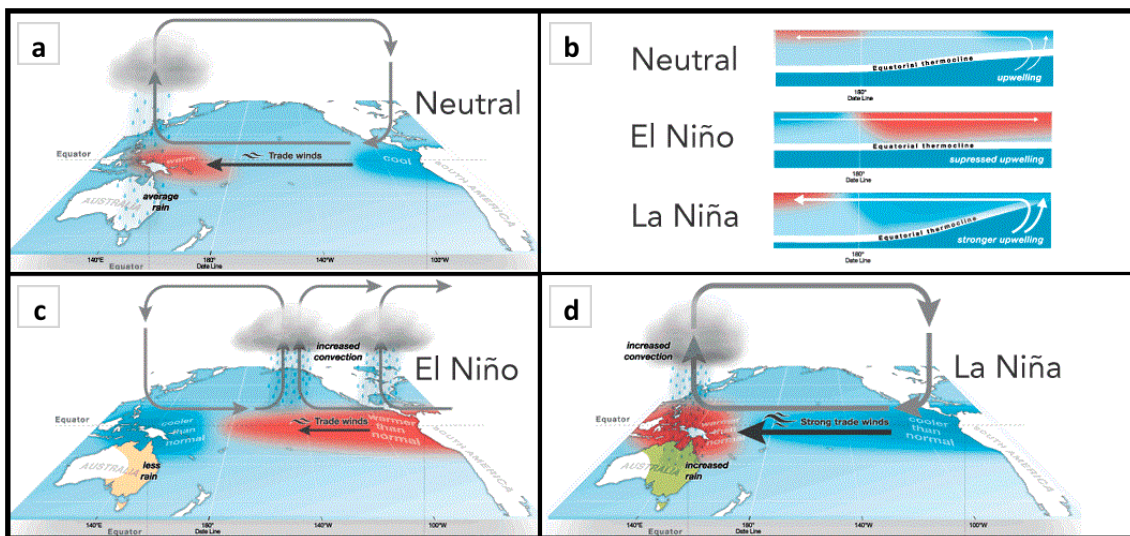
Uma vez que o sistema climático “se caracteriza por uma miríade de interações entre seus diversos componentes” (BARRY; CHORLEY, 2013, pág. 428), torna-se um trabalho árduo e recheado de incertezas definir de maneira precisa as flutuações ao redor da média habitual do clima (NUNES, 2016). Inúmeros fatores, sejam eles naturais ou não, são capazes de provocar variações climáticas, como as erupções vulcânicas, degelo de calotas polares, mudanças na temperatura da superfície do mar e na pressão atmosférica, por exemplo (BARRY; CHORLEY, 2013; IPCC, 2021). Dessa forma, é de se esperar que haja diferentes formas e padrões de associações para explicar a variabilidade climática

em determinada região, como a atuação de eventos El Niño-Oscilação Sul (ENOS), da Oscilação Decadal do Pacífico (ODP), do modo anular do hemisfério sul, o Dipolo do Oceano Índico, a Oscilação Multidecadal do Atlântico e a Oscilação Madden-Julian (OMJ), os quais podem afetar o posicionamento, a frequência e a intensidade de sistemas atmosféricos, como a incidência de frentes frias, bloqueios atmosféricos e a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) atuantes na América do Sul.

Segundo Cavalcanti e Ambrizi (2021), no início do século XX a ciência encontrou as primeiras evidências sobre os padrões de teleconexão climática (WALKER, 1928, 1925, 1924) em trabalhos que buscavam explicação para os valores de precipitação observados no hemisfério norte. Com base nos cálculos do coeficiente de correlação linear entre a precipitação na Índia e na Ilha de Java, com quinze centros de alta pressão atmosférica, Walker (1925) identificou três padrões distintos de oscilação atmosférica: a Oscilação do Atlântico Norte, a Oscilação do Pacífico Norte e a Oscilação Sul (CAVALCANTI; AMBRIZZI, 2021). Posteriormente, Walker (1928) obteve como resultado correlações positivas entre a Oscilação Sul e a precipitação monçônica na Índia e valores negativos para a precipitação em Myanmar, estando assim iniciados os estudos sobre o acoplamento entre o oceano e a atmosfera. Segundo Cavalcanti e Ambrizzi (2021), os padrões de teleconexões podem explicar grande parte da variabilidade climática ao redor do globo. Com o rolar das engrenagens ao longo do tempo, tendo em vista o pontapé inicial dado por Walker, a ciência moderna reconhece, além dos já mencionados anteriormente, outros padrões de teleconexões, como a Oscilação Antártica, proposto em 1999 por Gong e Wang (CAVALCANTI; AMBRIZZI, 2021), o Dipolo do Oceano Índico (SAJI et al., 1999) e o gradiente meridional do Atlântico tropical (ALVES et al., 2014).

O fenômeno ENOS explica grande parte da variabilidade climática interanual nos trópicos (CAI et al., 2020; POUR et al., 2020; VIEGAS et al., 2019; YANG et al., 2018), consistindo no acoplamento atmosférico-oceânico gerado pela redistribuição de calor e momento no Pacífico Equatorial (CAI et al., 2020; MCPHADEN, 2002; WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION, 2014). Tendo uma ciclicidade irregular, com periodicidade que varia entre dois e sete anos, sua fase quente, a componente oceânica do ENOS, é denominada El Niño (EN). Ela caracteriza-se pelo enfraquecimento dos ventos alísios e aquecimento da temperatura da superfície do mar (TSM) no Pacífico Equatorial centro-leste (**Figura 4c**). Os eventos El Niño geralmente duram de 9 a 15 meses

(BARRY; CHORLEY, 2013; CAVALCANTI; AMBRIZZI, 2021; LIN; QIAN, 2019; MCPHADEN, 2002; POUR et al., 2020; VIEGAS et al., 2019; YANG et al., 2018). Já o estágio frio, a La Niña (LN), está associado a ventos alísios mais fortes do que o normal e a águas oceânicas anormalmente frias no Pacífico Equatorial (**Figura 4b**). Em média, a La Niña é uma anomalia menos intensa do que o El Niño, no entanto tende a durar entre um e três anos. A transição entre as duas fases, negativa e positiva, é denominada como período neutro (**Figura 4a**) (BARRY; CHORLEY, 2013; LIN; QIAN, 2019; MCPHADEN, 2002; POUR et al., 2020; VIEGAS et al., 2019; YANG et al., 2018).



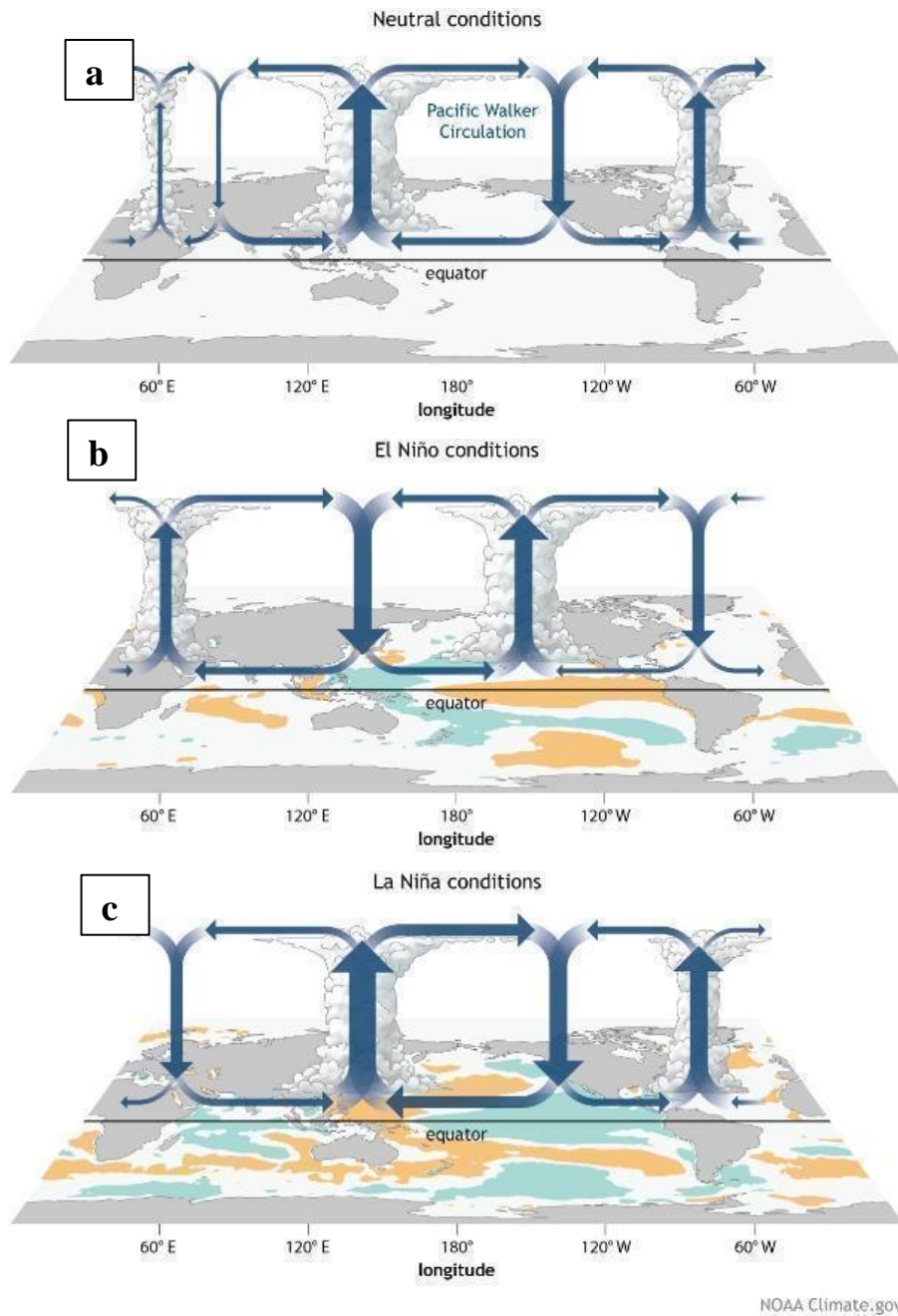
**Figura 4:** As ilustrações mostram como o sistema acoplado oceano-atmosfera normalmente se comporta durante cada evento. (a) anomalia de TSM e circulação de ventos para períodos neutros; (b) perfil vertical da anomalia de TSM (termoclina) e circulação oceânica para os três períodos; (c) anomalia de TSM e circulação de ventos para períodos de El Niño, e (d) anomalia de TSM e circulação de ventos para períodos de La Niña. Fonte: adaptado do Australian Bureau of Meteorology.

A distribuição diferencial zonal de aquecimento no Pacífico Equatorial, na superfície tropical do globo, onde os alísios são predominantes, produz a Circulação de Walker (POUR et al., 2020; VIEGAS et al., 2019; YANG et al., 2018). Sobre a região da Indonésia e norte da Austrália forma-se normalmente uma região de baixa pressão atmosférica associada às águas mais aquecidas do continente marítimo enquanto que na região do Pacífico Equatorial leste forma-se uma região de pressão atmosférica mais alta associada a águas mais frias. As águas mais frias a leste decorrem do movimento de ressurgência na costa oeste da América do Sul e do movimento médio da circulação oceânica que leva água mais fria do sul para norte no setor leste do Pacífico Sul (BARRY; CHORLEY, 2013), caracterizando a corrente oceânica de Humboldt. O aquecimento das

águas no setor oeste do Pacífico Equatorial está associado ao transporte de calor pelas correntes de leste ao longo da faixa tropical. Assim, em média, observam-se ventos de leste para oeste, os alísios, na região do Pacífico tropical.

Em períodos de ENOS, a circulação zonal habitual da célula de Walker é perturbada, alterando os padrões tropicais de convecção profunda e chuva (BARRY; CHORLEY, 2013; CUNHA, 1999; POUR et al., 2020; VIEGAS et al., 2019; YANG et al., 2018; LAU, YANG, 2015). No oceano Pacífico equatorial, a circulação de Walker apresenta movimento ascendente no Pacífico oeste (sobre a Indonésia) e subsidente sobre o Pacífico leste, ventos de leste na baixa troposfera e ventos de oeste na alta troposfera, em condições neutras (**Figura 5a**). Nos períodos de El Niño, a circulação de Walker é perturbada pelo enfraquecimento dos ventos alísios, contribuindo para o desenvolvimento de movimento ascendente no Pacífico central e condições de aumento da subsidência sobre a Austrália e norte da América do Sul (**Figura 5b**). Na fase negativa, em períodos de La Niña, os movimentos ascendentes intensificados ocorrem na Indonésia e norte da América do Sul, e, a intensificação do movimento subsidente, sobre o Pacífico centro-leste (**Figura 5c**) (LAU; YANG, 2015; RAVELO, 2006; WALKER; BLISS, 1932; POUR et al., 2020; VIEGAS et al., 2019; YANG et al., 2018). A Circulação de Walker possui variabilidade pronunciada em escalas de tempo sazonais e interanuais e é uma componente integral do sistema climático El Niño-Oscilação Sul. As flutuações da circulação de Walker podem levar a condições climáticas extremas em diferentes partes do globo (LAU; YANG, 2015; RAVELO, 2006; WALKER; BLISS, 1932; POUR et al., 2020; VIEGAS et al., 2019; YANG et al., 2018).





**Figura 5:** Esquema da Circulação de Walker durante as distintas fases do ENOS. (a) períodos neutros; (b) períodos de El Niño, e (c) períodos de La Niña. Fonte: adaptado do NOAA Climate.gov. Disponível em: <<https://www.climate.gov/news-features/blogs/enso/walker-circulation-ensos-atmospheric-buddy>>.

Na Figura 5 estão ilustrados padrões esquemáticos da modificação da circulação de Walker entre as três fases do fenômeno ENOS, o que nem sempre corresponde ao observado. Em geral, o que se observa são anomalias nos sentidos indicados, por exemplo, os alísios de leste no Pacífico Equatorial perdem a intensidade durante eventos de EN, não mostrando, em geral, inversão completa em seu sentido. Apenas El Niños intensos estão associados à inversão no sentido dos alísios (LAU; YANG, 2015; RAVELO, 2006; WALKER; BLISS, 1932). A subsidência indicada sobre o norte da

América do Sul durante eventos de El Niño não é observada propriamente, mas sim apenas o enfraquecimento da intensidade do movimento ascendente, o que corresponde à intensificação de anomalias subsidentes (BARRY; CHORLEY, 2013). Assim, esta figura, apesar de ser uma boa representação da alteração da circulação de Walker para os eventos ENOS, deve ser analisada com cautela.

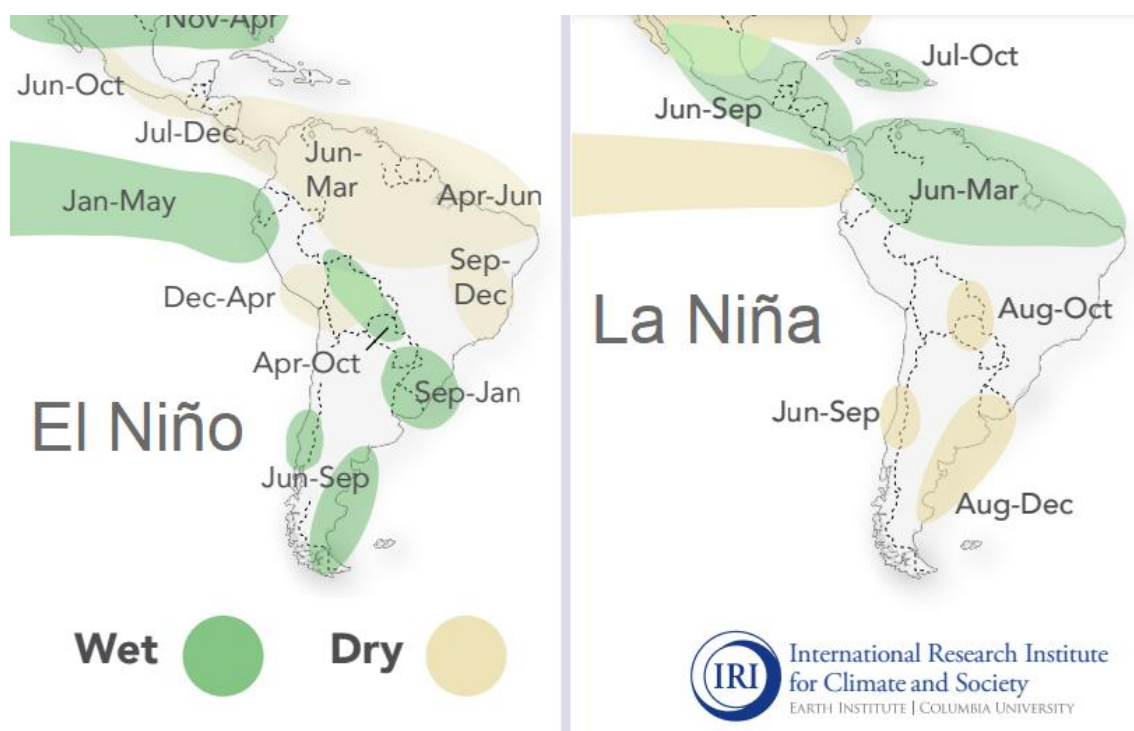
Nas últimas décadas, diversos estudos têm apontado para a existência de dois tipos de eventos de ENOS: o primeiro sendo o ENOS do Pacífico leste ou Canônico (EP, sigla em inglês) e o segundo ENOS, do Pacífico Central ou Modoki (CP, sigla em inglês) (CAI et al., 2020; MUKHERJEE et al., 2023; VIEGAS et al., 2019; YANG et al., 2018). O ENOS EP consiste em uma propagação de águas mais quentes do Pacífico Equatorial Oriental, a partir da costa da América do Sul, para oeste, provendo o aparecimento de anomalias positivas de TSM em áreas mais ocidentais do Pacífico (RASMUSSEN; CARPENTER, 1982; VIEGAS et al., 2019; YANG et al., 2018), enquanto o ENOS CP é caracterizado pela presença de anomalias de TSM positivas confinadas no Pacífico Equatorial Central (MUKHERJEE et al., 2023; VIEGAS et al., 2019). Essa diversidade resulta em padrões de convecção e respostas atmosféricas ao aquecimento do Pacífico Equatorial que produzem teleconexões climáticas distintas (CAI et al., 2020; MUKHERJEE et al., 2023; VIEGAS et al., 2019).

Recentemente, Andreoli et al. (2017) estudaram os impactos do ENOS na precipitação no continente sulamericano, considerando um terceiro tipo de eventos ENOS, além dos dois acima mencionados, chamando-no de ENOS MIX, com padrão anômalo de TSM similar ao do ENOS EP, em sua fase inicial, e, em suas fases madura e de dissipação, com padrão de TSM similar ao do ENOS central.

A Oscilação Sul é a componente atmosférica do ENOS e envolve a variação na pressão atmosférica superficial no Pacífico Sul. Diversas variáveis são observadas a fim de se compreender a intensidade dos eventos ENOS; dentre vários índices, o Índice Niño Oceânico (ONI), empregado neste estudo, é definido como a média móvel da anomalia da temperatura da superfície do mar no Pacífico central, na região do Niño 3.4, durante três meses consecutivos tendo como base um período climatológico de 30 anos, o qual é atualizado a cada cinco anos (KOUSKY; HIGGINS, 2007). Os períodos de El Niño são caracterizados por ONI positivo maior ou igual a  $+ 0,5$  °C, enquanto os eventos de La Niña são identificados por valores negativos menores ou iguais a  $- 0,5$  °C. Para ser

reconhecido como um período de El Niño ou La Niña, o valor absoluto de ONI maior do que 0,5 deve ser observado por cinco meses consecutivos; caso os valores oscilem entre + 0,5 e - 0,5, ou observados por um período menor do que cinco meses, classifica-se o período como neutro (KOUSKY; HIGGINS, 2007; LIN; QIAN, 2019).

O ENOS impacta a precipitação na América do Sul de formas distintas, nos períodos de El Niño há uma redução da precipitação sobre os setores norte e nordeste do Brasil, Colômbia, Venezuela e Guianas, reduzindo a vazão dos rios e elevando o risco de queimadas, enquanto no sudeste da América do Sul, incluindo a região sul do Brasil, Paraguai, Uruguai e o norte da Argentina ocorre o oposto, o aumento dos índices pluviométricos, sendo observadas anomalias mais intensas de precipitação distribuídas nos meses de dezembro a fevereiro (CAI et al., 2020; CAVALCANTI; AMBRIZZI, 2021; LAUREANTI; GRIMM, 2019). Em relação aos eventos de La Niña, verifica-se aumento da precipitação sobre a região equatorial da América do Sul, com anomalias mais intensas nos meses de dezembro a fevereiro e de junho a agosto, provocando o aumento das vazões de rios e inundações na planície Amazônica. Sobre o centro-sul da América do Sul, prevalecem valores menores de precipitação durante eventos de La Niña, implicando em secas; para o sudeste do Brasil, nos meses do verão austral, observam-se pequenas anomalias positivas da precipitação (**Figura 6**) (CAI et al., 2020; CAVALCANTI; AMBRIZZI, 2021; LAUREANTI; GRIMM, 2019).

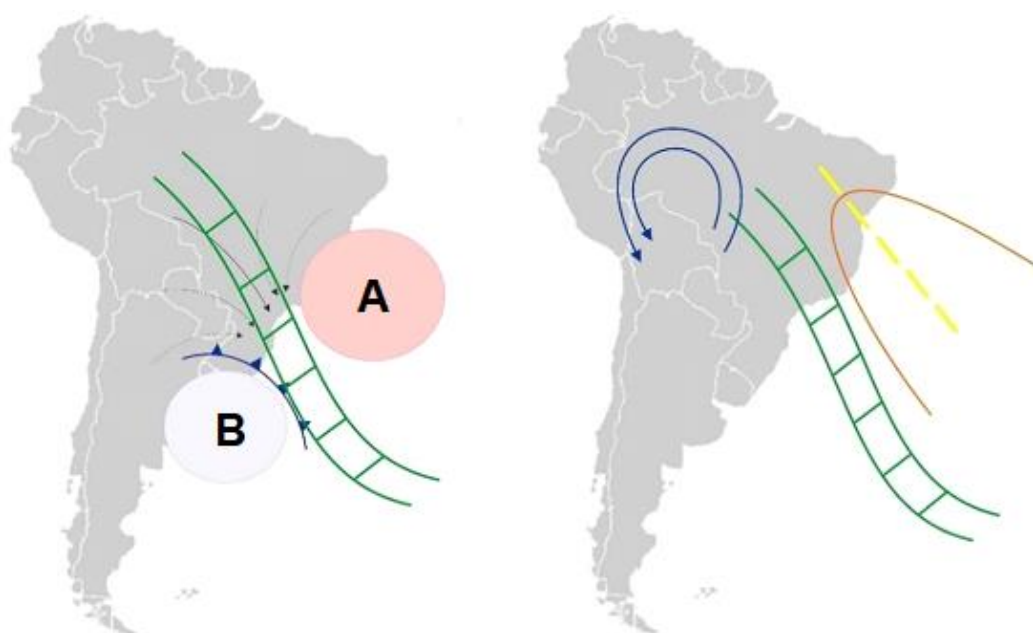


**Figura 6:** Impactos do ENOS na precipitação da América do Sul, durante os períodos de El Niño e de La Niña. Fonte: Adaptado de 'La Niña and Rainfall' e 'El Niño and Rainfall' do International Research Institute for Climate and Society.

## 2.2 – Zona de Convergência do Atlântico Sul - ZCAS

A ZCAS consiste em um sistema meteorológico que ocorre entre os meses de outubro a abril, estendendo-se desde o noroeste até o sudeste da América do Sul e o oceano Atlântico Sul adjacente. É caracterizada por uma banda de nebulosidade localizada na direção noroeste-sudeste (NO-SE), que persiste por três dias ou mais, associada à acentuada convergência do ar em baixos níveis troposféricos (CARVALHO; JONES; LIEBMANN, 2004; ESCOBAR, 2019; GRIMM; ZILLI, 2009; KODAMA, 1992; SILVA; REBOITA; ESCOBAR, 2019). Por se estender desde o centro-sul da Amazônia, no estado do Amazonas, até o oceano Atlântico, na altura do litoral sudeste brasileiro, passa pelas regiões Centro-Oeste e Sudeste do Brasil, Paraná e centro-sul da Bahia (ESCOBAR, 2019). Como consequência, este sistema impacta o regime pluviométrico de grande parte do Brasil na primavera e no verão austral, sendo responsável por persistentes períodos de precipitação intensa, assim como sua redução significativa em áreas adjacentes ao corredor de nebulosidade característico dos episódios de ZCAS (CARVALHO; JONES; LIEBMANN, 2004; LAUREANTI; GRIMM, 2019).

A circulação atmosférica típica associada a episódios de ZCAS indica a ocorrência de um padrão atmosférico particular de altos níveis, incluindo a presença da Alta da Bolívia<sup>1</sup> (AB) e do cavado no nordeste do Brasil. A Figura 7 ilustra a presença dos sistemas sinóticos em baixos e altos níveis atmosféricos com a atuação de um evento de ZCAS. O cavado<sup>2</sup> do Nordeste brasileiro pode estar fechado, sendo denominado, então, de Vórtice Ciclônico em Altos Níveis no Nordeste<sup>3</sup> (VCAN-NE) enquanto o sistema de alta pressão apresenta-se sobre a Bolívia (CAVALCANTI; SHIMIZU, 2012; ESCOBAR, 2019).



**Figura 7:** Quadro à esquerda: posição típica da ZCAS (verde), o sistema quase-estacionário (baixa pressão (B) e frente fria, linha azul com triângulos) e a convergência de ar em baixos níveis (setas em preto). Quadro à direita: configuração típica da circulação em altos níveis, circulação anticiclônica da Alta da Bolívia (linhas azuis) e o cavado do Nordeste (linhas laranja e amarela). Fonte: adaptado do Conceptual Models for Southern Hemisphere (2015).

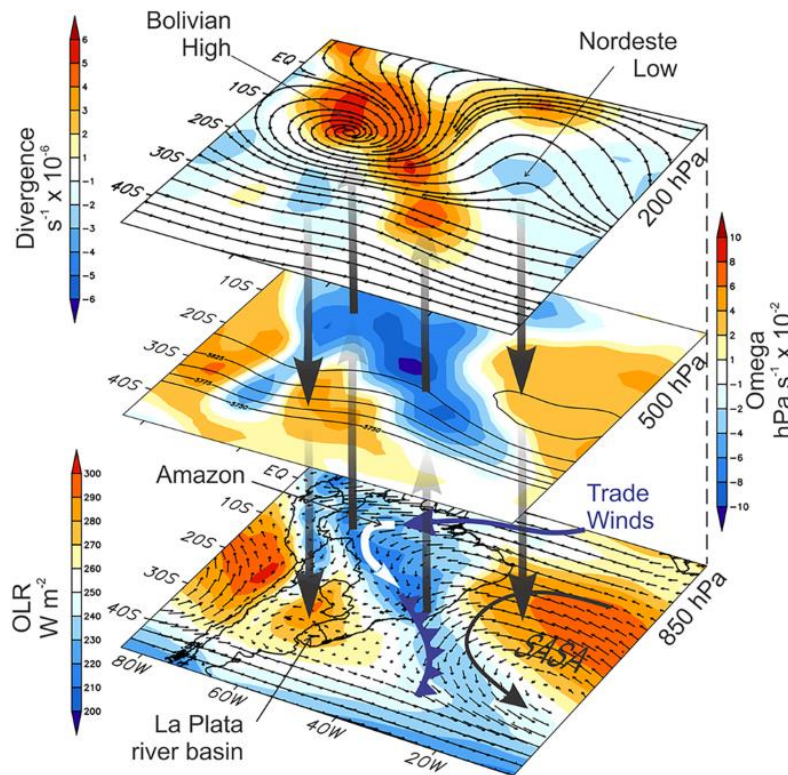
Associada à configuração sinótica dos episódios de ZCAS, por Escobar (2019), a Figura 8 mostra a configuração das camadas atmosféricas, apresentando movimentos ascendentes no centro dos episódios de ZCAS e subsidentes nas áreas adjacentes, além de valores anômalos negativos de ROL (OLR, em inglês) e convergência de ventos

<sup>1</sup> A Alta da Bolívia é um do sistema meteorológico de alta pressão atmosférica, com circulação no sentido anti-horário, identificado em altos níveis, em torno de 10 km de altitude (250 hPa) durante os verões do hemisfério sul, com centro sobre a Bolívia. Fonte: CPTEC (2021).

<sup>2</sup> O cavado de altos níveis é uma região alongada de pressão atmosférica relativamente mais baixa sem um contorno isobárico fechado. Fonte: CPTEC (2021).

<sup>3</sup> O Vórtice Ciclônico em Altos Níveis do Nordeste é uma área onde os ventos nos níveis mais altos da atmosfera giram no sentido horário, fazendo com que o ar seco desse nível desça para níveis mais baixos. Fonte: CPTEC (2021).

(vetores) na camada baixa, ou seja, em 850 hPa. Valores anômalos negativos de ômega em 500 hPa também podem ser observados, enquanto que, nos altos níveis atmosféricos, em 250 hPa, as circulações associadas à AB e ao VCAN-NE são apresentadas, além da divergência do ar na região da ZCAS (NIELSEN et al., 2019).



**Figura 8:** Representação esquemática das principais características da dinâmica da ZCAS. Abaixo: vetores de vento de 850 hPa com radiação de onda longa ( $W m^{-2}$ ); Meio: velocidade vertical em 500 hPa sombreada ( $\omega$ ,  $hPa s^{-1}$ ) e contornos de altura geopotencial ( $\phi$ ,  $J kg^{-1}$ ); Acima: linhas de corrente em 200 hPa e divergência horizontal do vento sombreada. Fonte: (NIELSEN et al., 2019).

Durante a ocorrência de um episódio de ZCAS, as condições sinóticas mais comuns em superfície são a convergência do ar e um sistema frontal estacionário, ocupando principalmente áreas do oceano Atlântico Sul, na altura da região sudeste do Brasil (CAVALCANTI; SHIMIZU, 2012; ESCOBAR, 2019). Por se caracterizar como uma zona de convecção ativa e profunda, valores expressivos de precipitação são identificados com a ocorrência de ZCAS, elevando a frequência e magnitude de eventos extremos. Com estas características em vista, os valores de ROL (ou OLR, em inglês, *output longwave radiation*) são fundamentais para a identificação desta banda de nebulosidade, uma vez que valores menores de  $200 W m^{-2}$  representam a emissão de radiação de ondas longas por corpos frios, com temperatura de aproximadamente  $0^{\circ}C$ ,

tal como topos de nuvens profundas em altas altitudes (CARVALHO; JONES; LIEBMANN, 2002, 2004; ROSA et al., 2020).

Os episódios de ZCAS apresentam uma gama variada de padrões sinóticos, sendo três os principais: o primeiro caracteriza-se pela presença do Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul (ASAS) em superfície, adquirindo função de bloqueio atmosférico; o segundo padrão está associado à atuação de uma frente fria clássica em superfície, indo desde o oceano Atlântico até o Mato Grosso do Sul, passando pelo Rio de Janeiro; por fim, o terceiro padrão refere-se à aproximação de uma baixa pressão que se desloca sobre o oceano Atlântico, favorecendo a intensificação dos ventos do quadrante norte e contribuindo para o aumento da advecção de ar quente e úmido (CAVALCANTI; SHIMIZU, 2012; ESCOBAR, 2019).

Segundo vários estudos, entre os anos de 1989 e 2017, aproximadamente 60 % dos episódios de ZCAS ocorreram entre os meses de janeiro e março (AMBRIZZI; FERRAZ, 2015; SILVA; REBOITA; ESCOBAR, 2019), meses em que a atividade convectiva local está mais ativa na região sudeste do Brasil.

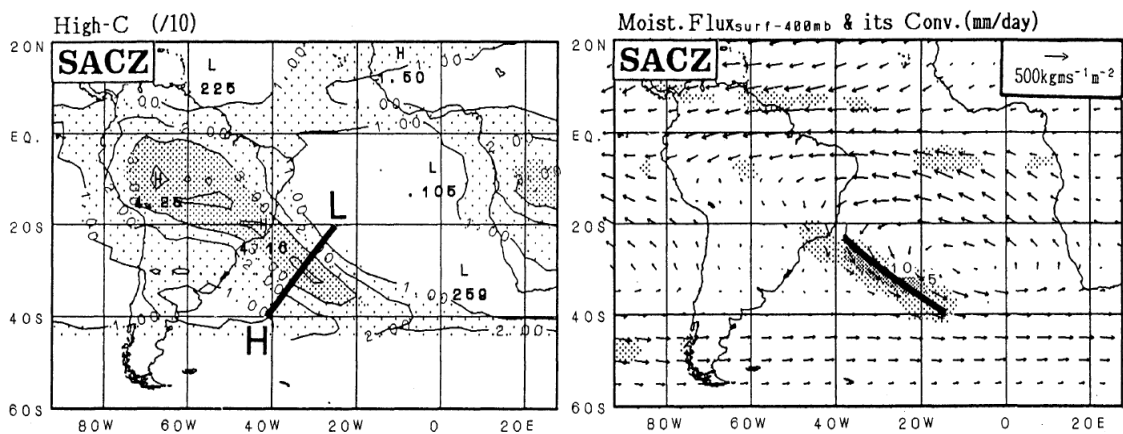
Em 2009, foi identificado um novo sistema para a previsão do tempo, conhecido como Zona de Convergência de Umidade (ZCOU) (SACRAMENTO NETO; ESCOBAR; SILVA, 2010), considerando-o similar à ZCAS, porém, sem conter todos os componentes atmosféricos necessários à sua identificação. O emprego deste novo sistema atmosférico trouxe muita divergência e ambiguidade devido à dificuldade de se diferenciar ZCAS de uma ZCOU, levando à desconsideração desta terminologia do arcabouço conceitual da meteorologia, considerando-o como parte da variabilidade sinótica dos eventos ZCAS (ESCOBAR, 2019).

### 2.2.1 – Histórico de estudos

Os primeiros trabalhos a fazerem referência a uma banda de nebulosidade com origem convectiva no sentido NO-SE sobre a América do Sul foram realizados nos anos 1970. Streten (1973) e Yasunari (1977) identificaram uma banda de nebulosidade persistente de caráter convectivo na América do Sul, atuando nos meses do verão austral. Já Krishnamurti et al. (1973) reconheceram que através desta banda estacionária de nebulosidade havia o transporte de momento, calor e umidade dos trópicos até os subtropicais. Na década de 80 os trabalhos voltaram-se para uma análise diagnóstica da

atmosfera durante a atuação do sistema, visando o conhecimento dos episódios de ZCAS por meio da caracterização física (SATYAMURTY; RAO, 1989), alguns estudos apontavam a ligação da ZCAS com a presença de vórtices ciclônicos de altos níveis e com sistemas frontais em superfície (NOBRE, 1988).

Na década de 1990, a ZCAS começou a ser descrita como uma tipologia de zona de convergência subtropical presente na América do Sul, através da comparação entre a ZCAS, a Zona de Convergência do Pacífico Sul (ZCPS) e a Zona Frontal Bala. Através desta análise verificou-se que a taxa de evaporação é maior que a de precipitação nas três zonas de convergências estudadas por Kodama, sendo a umidade sobressalente transportada da região tropical para o centro-sul, formando uma banda quase estacionária de vapor de água e precipitação em baixos níveis (**Figura 9**) (KODAMA, 1993, 1992; QUADRO, 1999). Segundo Kodama (1992), o acumulado de chuva para esses sistemas sinóticos é em torno de 100 mm para um período de dez dias. O estudo elaborado por Kodama foi confirmado por Quadro (1999) por meio de uma análise dos episódios de ZCAS durante dez anos, analisando os padrões atmosféricos que caracterizavam um episódio de ZCAS desde os baixos até os altos níveis da troposfera.



**Figura 9:** Quadro à esquerda: campos compostos de alta nebulosidade ao redor da ZCAS, as áreas de alta nebulosidade entre as isolinhas de valor 1 e 3 apresentam sombreamento leve, enquanto que as regiões com isolinhas com valores maiores que 3 apresentam sombreamento mais forte. Quadro à direita: mapa do fluxo de umidade entre 1000 mb e 400 mb, as áreas sombreadas indicam as taxas de precipitação determinadas pela convergência do fluxo de umidade, superiores a 5 mm/dia. Fonte: Kodama (1992).

Nesse período, iniciaram-se os estudos baseados em modelagem numérica, os quais buscaram identificar as possíveis influências remotas na ocorrência de ZCAS. Nos trabalhos de Grimm e Dias (1995) e Liebmann et al. (1999), é possível verificar as



conexões de episódios de ZCAS com o oceano Pacífico, associando sua fase ativa com a ZCPS e a passagem de ondas de Rossby<sup>4</sup> em latitudes médias a oeste da América do Sul.

No começo do milênio, os estudos sobre a variabilidade da ZCAS se aprofundaram, buscando a compreensão de suas variações desde a escala mensal até a interdecadal. Barreiro, Chang e Saravanan (2002), Carvalho, Jones e Liebmann (2004) e Ferreira, Sanches e Silva Dias (2004) estudaram a associação entre as fases do ENOS e a variabilidade interanual da ZCAS, no período de 1979 a 1994, 1979 a 1996 e de 1980 a 2000, respectivamente, todos empregando os dados da reanálise do *National Centers for Environmental Prediction* (NCEP-NCAR), identificando que os períodos frios (quentes) de ENOS estiveram associados à intensificação (diminuição) da atividade convectiva na região da ZCAS. Carvalho, Jones e Liebmann (2004) mostraram que os ventos de baixos níveis sobre a região norte do Brasil modularam as variações intrasazonais da ZCAS, entre 1979 e 1996, com os eventos mais intensos relacionados a regimes de ventos de oeste. Ferreira, Sanches e Silva Dias (2004) encontraram maior variabilidade temporal de ocorrência de episódios de ZCAS e a intensificação da atividade convectiva sobre o continente em anos de La Niña, para os meses de verão, no período de 1980 a 2000.

No que tange à influência da TSM na formação da ZCAS, Barreiro, Chang e Saravanan (2002) sugeriram que aproximadamente 60 % da variabilidade interanual da precipitação identificada durante episódios de ZCAS, entre 1958 e 1994, pode ser explicada pela variabilidade interna da atmosfera enquanto que a TSM, como uma forçante externa, estaria relacionada aos 40 % restantes da variabilidade total, o que foi obtido com base no cálculo do coeficiente de correlação linear entre a TSM e a precipitação, para o nível de significância de 95 %. Outros estudos indicam que a formação da ZCAS é independente da TSM do Atlântico Sul, mas que sua posição e intensidade são afetadas pelas condições oceânicas, conforme Rosa (2017), que analisou os episódios de ZCAS ocorridos nos verões de 1996 a 2015.

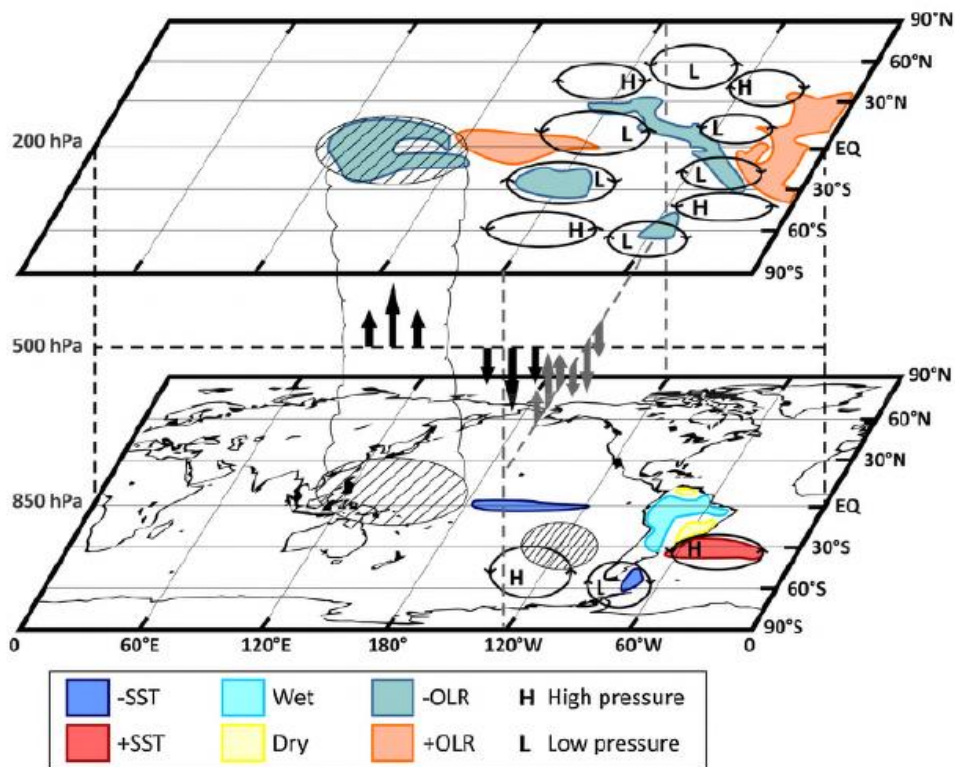
---

<sup>4</sup> As ondas de Rossby são perturbações no escoamento atmosférico em escala global, estando num contexto bem mais complexo do sistema climático, uma vez que envolvem circulações anômalas e eventos extremos (ondas de calor, frio, secas e chuvas intensas) relacionados aos processos de teleconexão. O nome Rossby decorre do meteorologista sueco Carl Gustaf-Rossby (século XX), pioneiro na descoberta dos movimentos de fluídos em larga escala.

O estudo desenvolvido por Chaves e Satyamurty (2006) sobre a ocorrência de um evento de ZCAS com forte magnitude em janeiro de 2003, mostram também a possibilidade de interação entre a ZCAS e a ZCIT, sugerindo, a partir de dados observacionais e modelagem numérica, que a ocorrência de fortes eventos de ZCAS pode desintensificar a ZCIT. Muito possivelmente esta desintensificação está associada à intensificação da ZCAS e à forte subsidência que ela provoca na região equatorial do Atlântico. Em outro estudo desenvolvido por Chaves e Nobre (2004) os autores identificam um padrão com o posicionamento da Alta Subtropical do Atlântico Sul a leste e que dada sua intensidade, favorece o aparecimento de um cavado no litoral leste da região Sudeste do Brasil, configuração sinótica que contribui para a forte convergência de umidade ao longo da região da ZCAS.

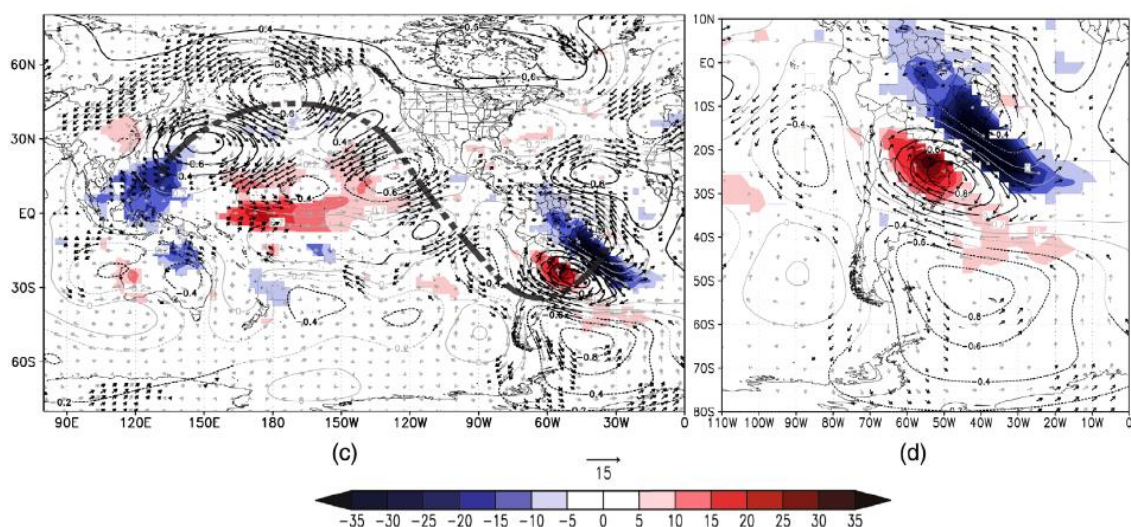
Mais recentemente os estudos científicos têm voltado seus objetivos para duas vertentes: reconhecimento da circulação atmosférica favorável ou desfavorável à ocorrência de eventos de ZCAS, como os resultados obtidos por Nielsen et al. (2019) que identificaram um padrão de associação entre a circulação atmosférica e o posicionamento dos eventos de ZCAS, entre os anos de 1995 e 2015, além de outros trabalhos recentes voltados à associação destes eventos com outras de variáveis atmosféricas e oceânicas, como a TSM e as ondas de Rossby, por exemplo. Os resultados obtidos por Coelho et al. (2016) estão resumidos na Figura 10, que evidencia a propagação de ondas de Rossby pelo Pacífico Sul, e a intensificação da célula de Walker na região equatorial. Coelho et al. (2016) mostraram uma situação desfavorável à formação de ZCAS com base nas anomalias de circulação atmosférica sobre a América do Sul e de TSM do Atlântico sudoeste durante o ano de 2014. Neste estudo, as anomalias positivas de TSM ao norte da Austrália estiveram associadas ao aumento da subsidência no sudeste do Brasil, através da intensificação da célula de Walker, e à propagação de ondas de Rossby no Pacífico Sul de forma a contribuir ambos os aspectos para a observação de anomalias positivas de pressão em baixos níveis atmosféricos, inibindo a formação de convecção profunda no sudeste do Brasil. Escobar (2019) mostrou as feições sinóticas para a pressão atmosférica presentes em baixos e altos níveis durante episódios de ZCAS específicos ocorridos entre 2012 e 2018, fundamentais para a identificação do evento. Atualmente alguns trabalhos voltam seus objetivos para o estudo dos impactos provocados por episódios de ZCAS, Escobar, de Alameira Marques e Dereczynski (2022) observaram a frequência de eventos extremos de precipitação no município do Rio de Janeiro entre os anos de 2006 e 2016 e

constatarem que 48 % dos episódios implicaram em valores concentrados de precipitação, principalmente nos primeiros dias de ZCAS.



**Figura 10:** Padrão de teleconexão onde anomalias positivas de TSM ao norte da Austrália contribuem para a propagação de ondas de Rossby sobre Pacífico Sul e para a modulação da circulação de Walker, provocando bloqueios atmosféricos, células de alta pressão atmosférica no litoral sudeste do Brasil, inibindo a formação de ZCAS e, conseqüentemente, reduzindo a precipitação sobre o sudeste brasileiro. As cores laranja e azul em níveis altos da atmosfera indicam respectivamente anomalias positivas e negativas de OLR. Fonte: Coelho et al. (2016).

A associação entre os eventos de ZCAS e as ondas de Rossby vem sendo aprofundada em alguns trabalhos recentes, como o elaborado por Braga; Ambrizzi e Hall (2022), que evidenciaram a propagação de um trem de ondas de Rossby intra hemisférica atuando durante períodos de La Niña, guiado pelo Jato Asiático, cruzando a linha do Equador e fortalecendo a atividade convectiva dos eventos de ZCAS no período. A Figura 11 ilustra este resultado identificado pelos autores Braga, Ambrizzi e Hall (2022).



**Figura 11:** Campos de anomalia ROL (sombreamento,  $W m^{-2}$ ),  $\psi$  ( $10^7 m^2 s^{-1}$ ) e vento em 200 hPa (vetores em  $m s^{-1}$ ), somente para os eventos de ZCAS em La Niña, e o mesmo domínio para América do Sul. Fonte: (BRAGA; AMBRIZZI; HALL, 2022).

Em relação ao posicionamento do corredor de ZCAS poucos trabalhos voltaram seus objetivos a esse tipo de investigação. Os resultados obtidos por Nielsen *et al.* (2019) mostram que entre os anos de 1995 e 2015 houve uma tendência de concentração dos eventos de ZCAS a norte no início da estação chuvosa, ou seja, nos meses de novembro até janeiro, associada a uma anomalia ciclônica em 850 hPa sobre o oceano Atlântico centrada em 30 °S, e a uma anomalia anticiclônica no fim da estação chuvosa, jan-mar, associada a eventos de ZCAS posicionados a sul. Sem fazer menção direta ao VCAN-NE, Nielsen *et al.* (2019) identificaram a migração dos episódios de ZCAS para baixas latitudes, bem como a mudança para regiões de mais alta latitude associada à passagem de um trem de ondas de Rossby.

Em paralelo, alguns trabalhos identificaram o sistema ZCAS como um componente do Sistema Monçônico da América do Sul (MAS), o qual se caracteriza por escassez e excesso de precipitação em suas fases inativa (meses mais secos, ABR-SET) e ativa (meses mais úmidos, OUT-MAR), sendo observada chuva dez vezes mais intensa no período ativo (GRIMM, 2019). O MAS, definido durante os meses de verão, é caracterizado pelo aumento do fluxo de calor latente e sensível, pelo aumento da evapotranspiração e da temperatura de superfície. Sua variabilidade interna é provocada pela ação conjunta entre os ventos alísios equatoriais, distúrbios tropicais de leste e influência da Baixa do Chaco que junto com a Cordilheira dos Andes canalizam o corredor de umidade para a formação da ZCAS (GRIMM, 2019; GRIMM; PAL; GIORGI, 2007; LAUREANTI; GRIMM, 2019). Dessa forma, pode-se dizer que os

primeiros trabalhos elaborados nos anos 70 tinham como objetivo a identificação da banda persistente de nebulosidade de origem convectiva, sendo o fenômeno diagnosticado na década seguinte através de estudos científicos voltados para a circulação atmosférica. Posteriormente, a partir dos anos 90, os esforços científicos procuraram melhor elucidar o papel de conexões remotas, como o papel do ENOS e das ondas de Rossby no Pacífico, para o surgimento e fortalecimento da ZCAS, por meio do emprego de modelos numéricos e estudos diagnósticos. Em períodos mais recentes, a variabilidade e as teleconexões formam o cerne de estudos sobre ZCAS.

### 2.3 – A hierarquia escalar

A ZCAS é um fenômeno que possui um nível de organização continental, estendendo-se desde a Amazônia até o litoral do sudeste brasileiro e oceano Atlântico Sul adjacente, conforme já mencionado, com uma cobertura temporal variando de três dias até semanas. Dessa forma, o fenômeno em questão é característico da escala sinótica (MONTEIRO, 1976), abrangendo uma região com milhões de quilômetros quadrados e persistindo por alguns dias consecutivos. De acordo com Menezes e Fernandes (2018), o conceito de escala no âmbito da cartografia é essencial a toda e qualquer representação espacial, presente nos mapas da Idade Moderna, surgindo junto à necessidade política de expansão territorial, mais precisamente no século XVIII com as primeiras triangulações elaboradas pelos franceses e italianos para a formulação de um modelo matemático perfeito para a representação das projeções sobre o mapa terrestre. Assim, a escala de um mapa é igual à razão entre uma medida presente na representação e outra na superfície terrestre (MENEZES; FERNANDES, 2018).

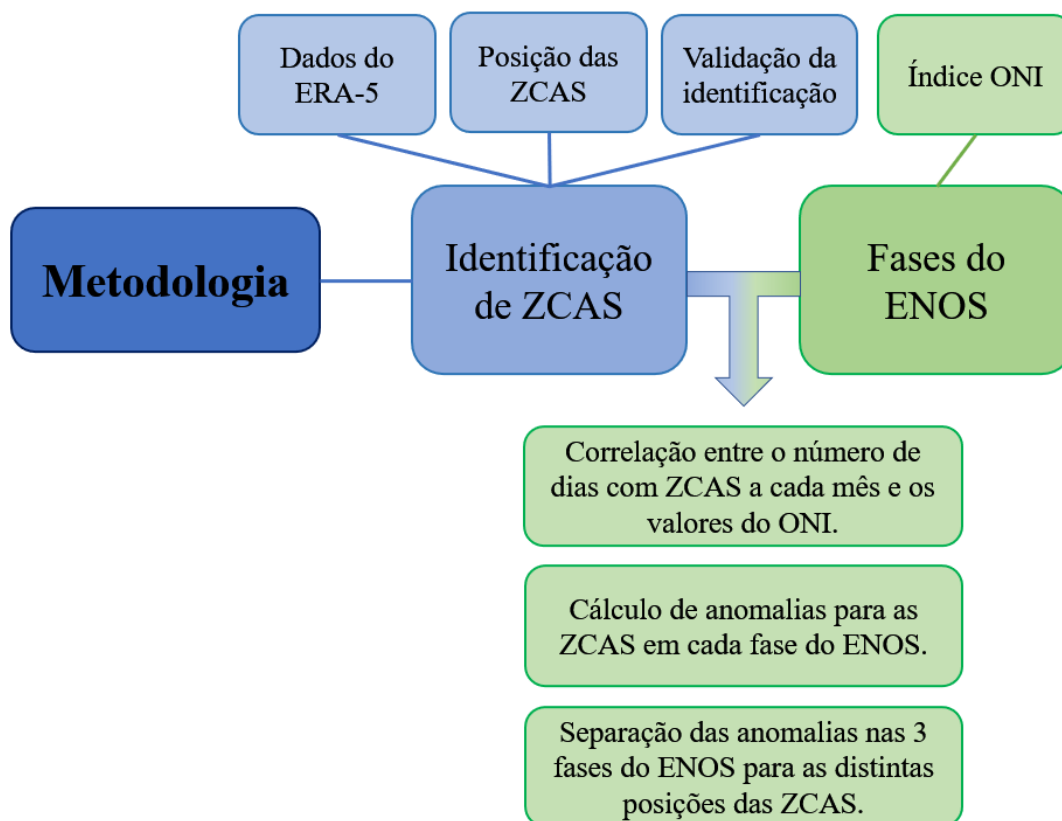
Para investigar os impactos das teleconexões com os episódios de ZCAS é necessária a redução da escala cartográfica, permitindo uma maior cobertura espacial para as respostas observadas no fenômeno de escala sinótica. A análise hierárquica (KING, 2005) sobre o fenômeno, a ZCAS, permitiria a consideração de diferentes níveis, levando em conta a existência de interações por meio de processos termodinâmicos presentes em variadas dimensões, havendo troca de energia em qualquer direção entre os níveis horizontais e verticais (OSCAR JÚNIOR, 2012), não consistindo em análises diferentes, tão pouco na soma de partes desiguais, mas sim, em olhares diferentes para o mesmo processo (KING, 2005).

Segundo Koestler (1970), o conceito de nível hierárquico nas ciências da terra deve ser distinguido da ideia rígida e autoritária atrelada ao termo hierático, definido pela rigidez litúrgica dos sacerdotes egípcios. A noção de hierarquia também não deve ser confundida com níveis taxonômicos, uma vez que a disposição das análises atmosféricas não se dá em degraus ou “bonecas russas”, onde uma parte está contida em algo maior, sendo desconexas (KOESTLER, 1970). Para elucidar a ideia, Koestler (1970) propõe a representação de hierarquia como uma árvore, onde os patamares, representados pelas raízes, troncos, galhos e folhas, que para existirem, dependem da troca de energia, água e nutrientes entre eles. Dessa forma, “a ideia de árvore é mais dinâmica, mais rica, por revelar as relações entre as partes e, sobretudo, por admitir implicitamente a noção de crescimento e evolução do sistema” (MONTEIRO, 1976). Dessa forma, olhar um fenômeno sinótico, como o caso de um evento ZCAS, em dois níveis hierárquicos distintos, um voltado para a escala continental e outro para um nível regional, enriquece a análise, propiciando a compreensão de processos globais, que alimentam e compõem um conjunto de interações atmosféricas imperceptíveis em apenas um dos níveis.

A perspectiva analítica por dois níveis hierárquicos cumpre também a função de articulação dos processos atmosféricos (sinóticos) com dos impactos (regionais), o que epistemológica e metodologicamente dialoga com o pressuposto de regulação de Monteiro (1976), no qual os fenômenos climáticos podem ser entendidos como um sistema aberto, passível a influências de fatores externos, promovendo transformações internas. Associado ao pensamento hierárquico de Koestler (1970) e King (2005), onde as distintas partes estão em constante diálogo, é possível imaginar que esta troca implica em distintos padrões de resposta e impactos que fazem convergir analiticamente a Geografia e Meteorologia.

### 3 – METODOLOGIA E DADOS

O fluxograma simplificado, exposto na Figura 12, apresenta as etapas aplicadas que orientaram o desenvolvimento da pesquisa científica. O estudo foi dividido em dois grandes blocos de procedimentos e análises para atingir o objetivo geral de associar a ocorrência de ZCAS com eventos ENOS. Cada etapa está detalhada no decorrer desta seção.



**Figura 12:** Fluxograma simplificado dos procedimentos empregados para o desenvolvimento da pesquisa.

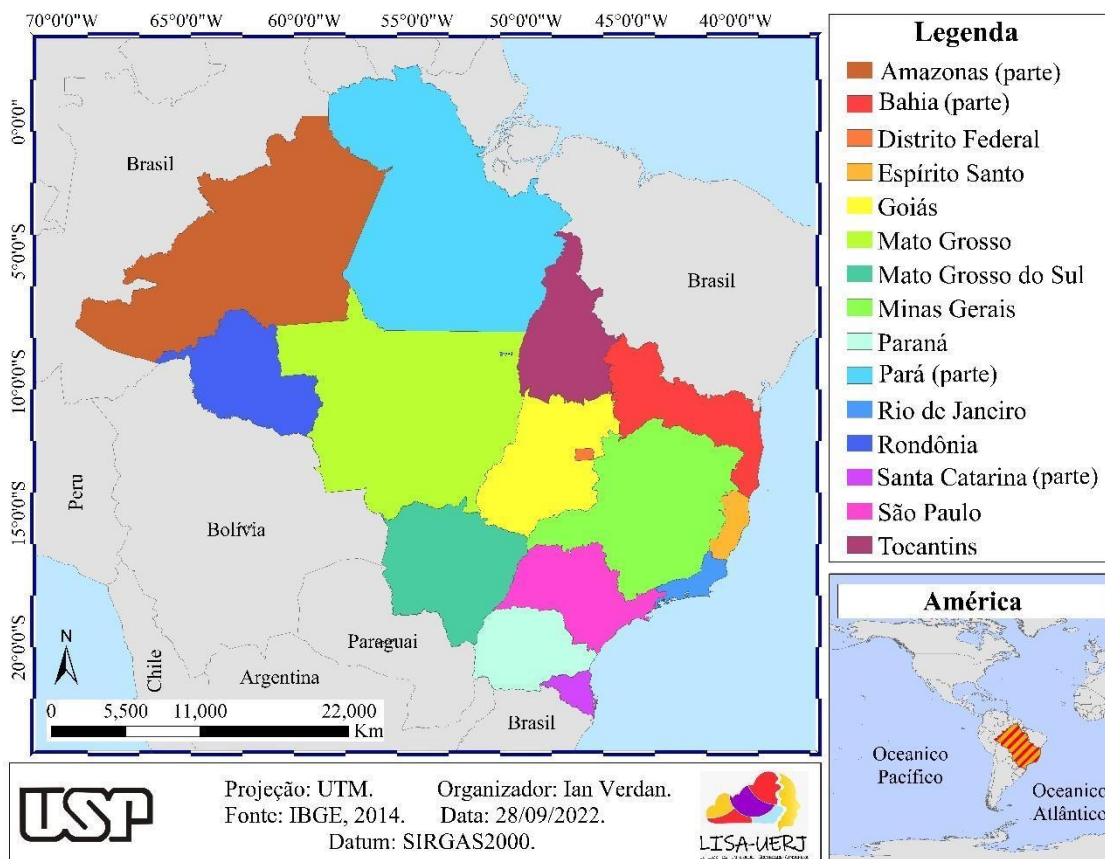
O bloco da esquerda, destacado com cor azul, diz respeito à identificação da ZCAS. Nesta etapa os fatores que influenciam a ocorrência do sistema foram analisados através dos dados da reanálise do ERA-5, permitindo a identificação de todos os episódios de ZCAS durante o período de janeiro à março, de 2000 até 2021 (seção 3.3.1), segundo os critérios propostos por Carvalho, Jones e Liebmann (2004) e Escobar (2019). O bloco da direita, mostrado em verde, indica a identificação das fases do ENOS. As etapas para a determinação de associação entre ENOS e ZCAS, indicadas em cor verde, foram construídas com base na ocorrência de eventos ZCAS durante as fases do ONI (descrito

na seção 3.3.2). Tal procedimento permitiu analisar as mudanças nas características atmosféricas durante os episódios de ZCAS de acordo com cada período de ENOS.

### 3.1 – Área de estudo

A área de estudo, aqui denominada como Corredor da ZCAS, baseada em (FAGGIANI *et al.*, 2020; NIELSEN *et al.*, 2019), abrange toda a região pela qual a ZCAS se distribui, desde a porção central da região Norte do Brasil até o norte da região Sul brasileira, com uma área total de 5.416.396 km<sup>2</sup> correspondendo a 66,8 % de todo o território do Brasil, segundo dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), incluindo a totalidade dos estados de Rondônia, Tocantins, Mato Grosso, Goiás, Mato Grosso do Sul, Minas Gerais, Espírito Santo, Rio de Janeiro, São Paulo, Paraná, Distrito Federal e parcialmente os estados do Amazonas (no qual abrange as regiões intermediárias de Parintins, Lábrea e Manaus, a última excluindo a região imediata de São Gabriel da Cachoeira), Pará (inclui as regiões intermediárias de Marabá, Redenção, Santarém e Altamira), Bahia (compreende Ilhéus-Itabuna, Vitória da Conquista, Guanambi e Barreiras) e Santa Catarina (contendo as regiões intermediárias de Blumenau, Joinville e Florianópolis), a Figura 13 mostra a localização do Corredor da ZCAS e os estados nele situados. Em relação ao continente Sul-americano a área de estudo equivale a cerca de um terço de sua extensão.





**Figura 13:** Mapa dos estados brasileiros inseridos no corredor das ZCAS.

O corredor da ZCAS, consiste em uma das regiões mais importantes para a América do Sul, com aproximadamente 121.468.013 de habitantes, segundo os dados coletados pelo censo de 2010 do IBGE. De acordo com a estimativa populacional realizada para o ano de 2021 há cerca de 137 milhões de habitantes na região, concentrando cerca de um terço de toda a população continental e 63,7 % dos habitantes do Brasil. No que tange ao Produto Interno Bruto (PIB), no ano de 2019 o IBGE contabilizou um total de 5,7 trilhões de reais, constituído em sua maior parte pelos estados de São Paulo, Rio de Janeiro, Minas Gerais e Paraná. O corredor da ZCAS aglutina mais de 77 % da soma de tudo que se produziu no Brasil no ano de 2019, e cerca de 38 % em relação à América do Sul, salientando a relevância dessa região para a economia continental.

Em relação ao uso e cobertura da terra, o Corredor da ZCAS apresenta uma diversidade de usos, com o predomínio de vegetação florestal na região amazônica, pastagem e vegetação campestre na sua porção central, enquanto na região que margeia o litoral há o predomínio de terras destinadas à agropecuária contendo remanescentes florestais. Cabendo ainda salientar a presença de áreas úmidas na região do Pantanal Sul-

mato-grossense e de uma estreita faixa com vegetação florestal espremida entre o litoral e a região de produção agropecuária (Figura 14). Em valores percentuais, a principal classe para o uso e cobertura da terra na região é a vegetação florestal, a qual cobre cerca de 39 % de todo o Corredor da ZCAS, podendo ser ilustrado com a floresta amazônica e a mata atlântica; as áreas de pastagem, sejam elas naturais ou plantadas, somam 30,6 % da área de estudo, sendo o segundo mais extenso na região, com destaque para a região Centro-Oeste que possui cerca de 75 milhões de cabeças de gado, segundo o IBGE (2021), em terceiro plano, os mosaicos envolvendo vegetação nativa e áreas agrícolas tem sua relevância, com 17 % de toda a área do Corredor da ZCAS, podendo ser destacado as plantações de café, milho e trigo em Minas Gerais. Por último e em menor escala, pode ser destacado as áreas destinadas exclusivamente a agricultura, correspondendo 7,5 % da região, esta classe não apresenta uma distribuição concentrada, havendo grandes áreas sorteadas ao longo do corredor, como as plantações de soja em Mato Grosso, São Paulo e Paraná, todas desconectas, porém com relevância para o uso e cobertura da terra no Corredor da ZCAS. Em relação às áreas artificiais, ou áreas urbanas, essa categoria cobre 31.342 km<sup>2</sup>, correspondendo a apenas 0,6 % de toda a sua extensão, porém inclui alguns dos municípios mais populosos do Brasil, como São Paulo, Rio de Janeiro, Brasília, Belo Horizonte, Manaus, Curitiba, Goiânia, Campinas, Guarulhos e São Gonçalo.

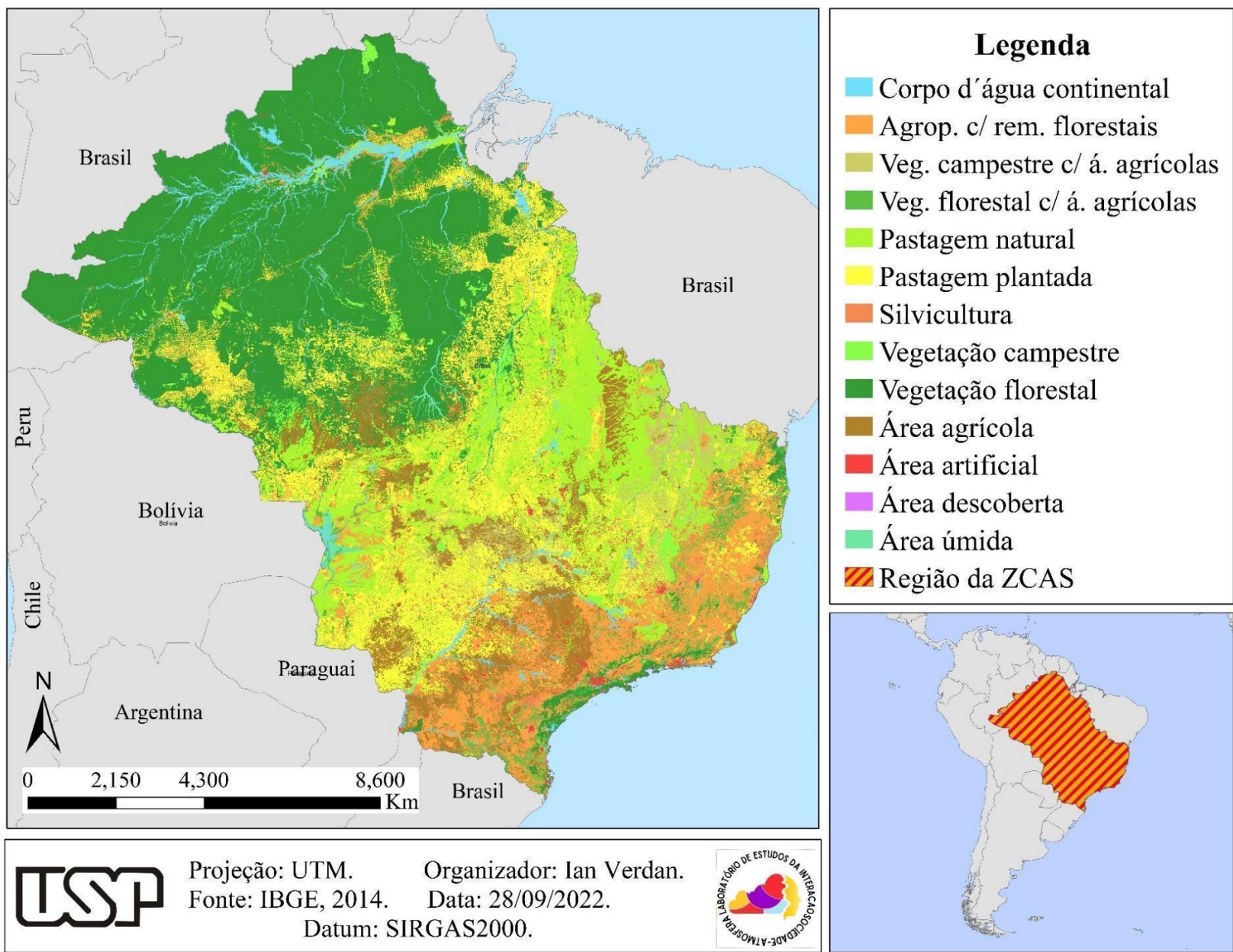


Figura 14: Mapa do uso e ocupação da terra no corredor das ZCAS, para o ano de 2014.

Marcada por um relevo compartimentado, com depressões ao norte e escarpas serranas a sudeste. Os principais domínios morfológicos do corredor da ZCAS incluem a depressão amazônica, situada ao norte do corredor; lá os valores altimétricos são, em sua maioria, inferiores a 200 metros, havendo o predomínio de floresta ombrófila densa, a qual é cortada por grandes rios, como o Tapajós, o Madeira, o Xingu e o Tocantins (IBGE, 2019). Um pouco mais ao sul, no centro do estado do Mato Grosso e Goiás há a presença de grandes planaltos, como o Planalto dos Parecis e o Planalto de Goiás-Minas, com curvas altimétricas entre 200 e 600 metros de elevação. É nessa região que se localizam grandes áreas com uso do solo destinado à agricultura, nas áreas não cultivadas predomina o cerrado (IBGE, 2019). Ao sul do Mato Grosso e leste do Mato Grosso do Sul localizam-se as Planícies e Pantanais Mato-Grossenses, configurando-se como uma vasta área plana, com menos de 200 metros de elevação, os quais ficam inundados, em sua maior parte, durante o período chuvoso (IBGE, 2019).

Entre os estados do Mato Grosso do Sul, São Paulo e Paraná está localizado o Planalto da bacia do Paraná, onde a topografia varia de 200 até 600 metros (IBGE, 2019). O Planalto do Paraná é cortado pelo rio de mesmo nome; nessa região a vegetação característica é a floresta ombrófila mista e o cerrado, os quais foram desmatados em suma maioria, cedendo lugar a grandes terras agrícolas com plantações de cana-de-açúcar e café. Nesse domínio topográfico situam-se as grandes usinas hidrelétricas do país, como a usina de Itaipu, de Ilha Solteira e Itumbiara (IBGE, 2019). Ao sul do Corredor da ZCAS está localizada a Serra do Mar com elevações que ultrapassam os 2.000 metros de altitude, estendendo-se desde o Paraná até o Espírito Santo, margeando o litoral. Nessa região a vegetação proeminente é constituída por florestas ombrófilas densas e mistas, porém, com vastas áreas desmatadas para pastagem. Por fim, uma estreita faixa de planície costeira margeia o litoral, com extensões variando de poucos quilômetros, no Rio de Janeiro e São Paulo, até 100 quilômetros de largura, no sul da Bahia (IBGE, 2019).

Levando em consideração os aspectos climáticos da área de estudo, a mesma apresenta vinte e nove tipologias climáticas, segundo definição do IBGE em 2014, podendo este total ser aglutinado em seis grandes grupos. O primeiro consiste no clima equatorial quente e úmido, contendo temperaturas médias superiores a 18°C durante os doze meses do ano e com menos de três meses de seca por ano, este manifesta-se na porção norte da área de estudo, mais precisamente na região Amazônica (Figura 15). O segundo por sua vez é o temperado, com temperaturas médias que variam entre 10°C e

15°C na tipologia mesotérmico e entre 16°C e 18°C no subquente, com um curto período de subseca, sua localização é restrita a porção sul do corredor da ZCAS, mais especificamente nos estados do Paraná e Santa Catarina. O terceiro é o clima tropical mesotérmico, situado nas regiões serranas dos estados de São Paulo, Minas Gerais, Rio de Janeiro e Espírito Santo, apresenta temperatura média entre 10°C e 15°C, enquanto nas regiões mais elevadas, a média é inferior a 10°C, em relação ao regime de umidade apresenta um curto período de estiagem. A tipologia semiárida também está presente na área de estudo, sendo está restrita a porção norte do estado de Minas Gerais e centro sul da Bahia, lá os meses secos prevalecem durante mais da metade do ano, e as temperaturas médias normalmente ficam acima dos 18°C durante a maior parte do ano. O quinto tipo climático presente no corredor é o tropical quente, indo do litoral do Rio de Janeiro até a Bahia e abrangendo a porção central da área de estudo, este apresenta temperatura média superior a 18°C durante todo o ano e em relação à umidade possui regiões sem seca ou com subseca ao longo do litoral, em Mato Grosso do Sul, norte de São Paulo e nas áreas restantes uma estação seca que dura entre quatro e cinco meses. Por fim, clima tropical subquente é a última tipologia, situado no limite da região temperada, localiza-se no centro e sul de São Paulo, no sul de Mato Grosso do Sul e no sul de Minas Gerais, em suas características, a presença de temperaturas médias entre 16°C e 18°C e um curto período seco merecem destaque.

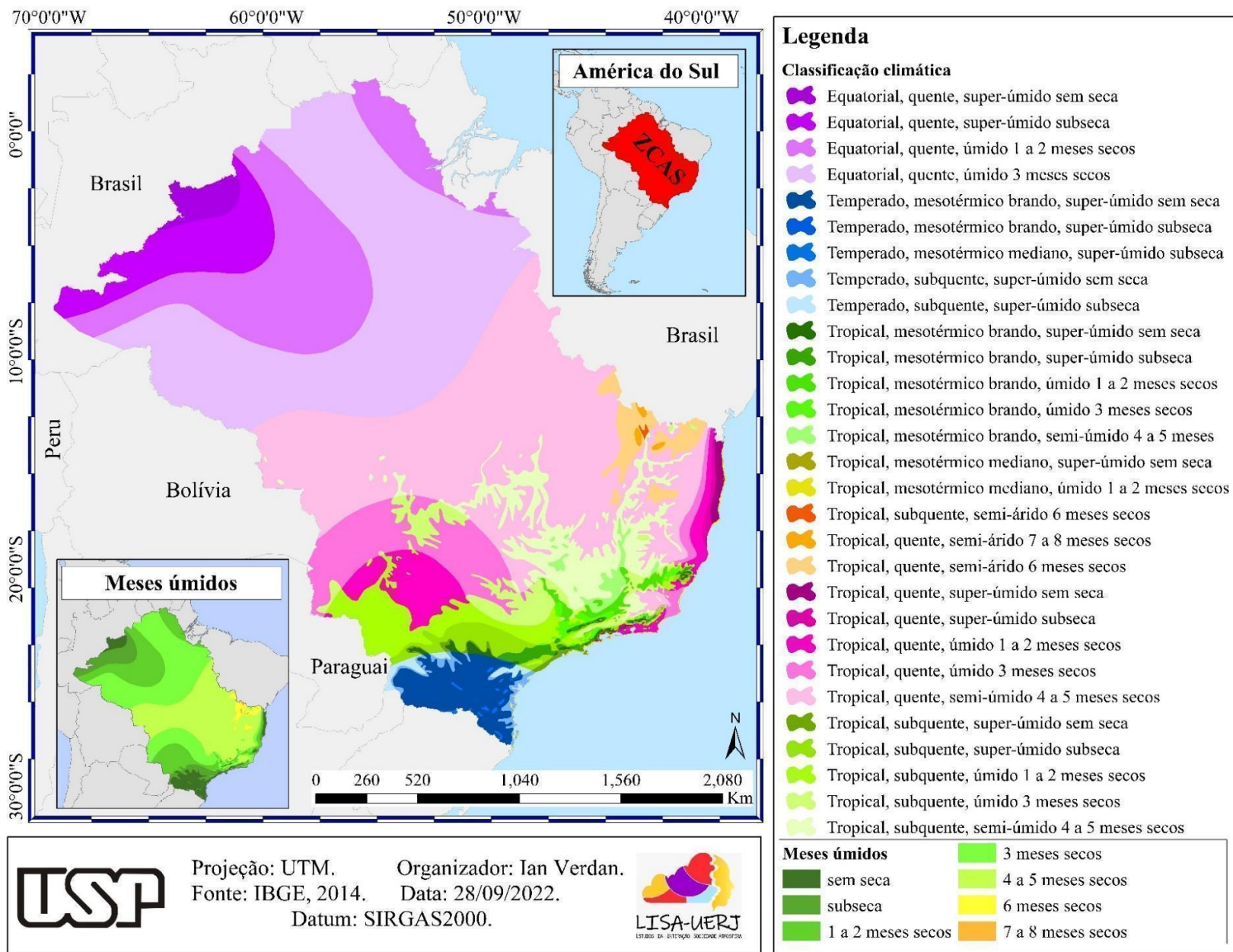


Figura 15: Mapa das classes climáticas reconhecidas pelo IBGE, para o ano de 2014, no corredor da ZCAS.

### 3.2 – Conjunto de dados

Constituídos por dados oriundos de modelagem numérica, os conjuntos de reanálises consistem na reprodução de uma gama de dados para estudos em ciências da terra. Eles são produzidos por centros de pesquisa meteorológica, como o NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*), o ECMWF (*European Centre for Medium-Range Weather Forecast*) e o JMA (*Japan Meteorological Agency*) (FASULLO, 2012; IPCC, 2021). Os centros meteorológicos recebem informações de dados observados, por estações meteorológicas, sondagens, boias e sensoriamento remoto. Estes dados são consistidos e processados com base em técnicas estatísticas e interpolados para a grade do modelo (IPCC, 2021; LIMBERGER, 2016). Os dados são usados para alimentar o modelo numérico de previsão de tempo de forma que sejam ajustados às equações que governam a atmosfera descritas no modelo, gerando as condições iniciais que devem permitir a realização das simulações futuras. As condições iniciais são geradas, ao menos, uma vez por dia, de forma a alimentar o modelo numérico. Projetos dedicados à execução de modelos numéricos para períodos de tempo passados provém conjuntos de dados de diversas variáveis, para todo o globo, para vários níveis atmosféricos e para a superfície terrestre, permitindo que análises mais precisas sobre o comportamento da atmosfera sejam feitas.

Dentre as vantagens em se trabalhar com dados de reanálise, Limberger (2016) evidencia a facilidade em tratar espacialmente os dados, a ausência de falhas nas séries temporais, a grande variedade de variáveis atmosféricas, a vasta resolução temporal, a possibilidade de comparação com distintas fontes de dados e a redução do tempo para a realização da pesquisa. Segundo o IPCC (2021), as reanálises podem ser consideradas como 'mapas sem lacunas' uma vez que fornecem dados ininterruptos, geralmente globais, regularmente distribuídos no espaço e no tempo, com consistência física entre variáveis em escalas de tempo sub-diárias e informações sobre variáveis pouco observadas, como evaporação. Dentre as desvantagens, destaca-se a baixa resolução espacial (quando comparado com dados observados), a limitação em obter o valor para uma determinada localidade uma vez que o modelo fornece dados apenas para os pontos de grade, a necessidade de se comparar dados de fontes diferentes e de processamento em *softwares*, como o GrADS (*Grid Analysis and Display System*), sendo essa uma limitação ao acesso e não em relação a sua qualidade.

A descrição das variáveis usadas nesta pesquisa está na Tabela 1, considerando-se as características de resolução espacial, temporal, fonte e referência bibliográfica pertinentes.

Todos os dados utilizados no processamento dos dados foram coletados no *site* do ECMWF, devido a suas características, como a alta resolução espacial, cerca de 31 km e 137 níveis atmosféricos e a longa janela temporal, fornecendo dados horários de 1959 até o presente, sendo atualizado em tempo real, com projeções de se estender em direção ao passado, até 1950, além do vasto leque de variáveis atmosféricas e oceânicas disponíveis (ECMWF, 2017; IPCC, 2021). Os dados de ROL, água precipitável e componentes zonal e meridional do vento foram usados na identificação dos episódios de ZCAS, tendo sido obtidos para os meses de janeiro a março (JFM), de 2000 a 2021, com periodicidades diárias para os quatro horários sinóticos (6Z, 12Z, 18Z e 00Z), conforme indicado na tabela seguinte, esse período de 22 anos foi selecionado para otimizar a identificação das ZCAS.

**Tabela 1:** Lista das variáveis obtidas da reanálise ERA-5 do ECMWF.

Variável	Dado	Resolução espacial	Janela temporal	Periodicidade
<b>Radiação de onda longa</b>	Mean top net long-wave radiation flux			
<b>Água precipitável</b>	Total column water vapour			
<b>Componente leste do vento em 850 e 250 hPa</b>	U-component of wind			
<b>Componente norte do vento em 850 e 250 hPa</b>	V-component of wind	0,25° x 0,25°	JFM de 2000 até 2021	Dados diários para os 4 horários sinóticos
<b>Altura Geopotencial</b>	Geopotential			
<b>Divergência do vento em 850 e 250 hPa</b>	Divergence			
<b>Pressão ao nível do mar</b>	Mean sea level pressure			

O dado empregado para a radiação de onda longa emergente (*Mean top net long-wave radiation flux*, traduzida como: fluxo líquido médio de radiação de ondas longas), consiste, segundo o ECMWF, em um parâmetro referente a quantidade de radiação térmica, ou seja, onda longa, emitida para o espaço pelo topo da atmosfera incluindo as nuvens, sendo observada pelos sensores dos satélites. A ROL contribui para a análise de áreas com convecção em regiões tropicais, uma vez que nuvens mais elevadas e, portanto, com maior desenvolvimento vertical,



apresentam topos mais frios, fazendo com que menos radiação chegue ao sensor do satélite (ECMWF, 2022). Essa redução nos valores de ROL caracteriza os episódios de ZCAS, que se estendem desde o Amazonas até São Paulo e o oceano Atlântico adjacente, podendo oscilar em sua posição.

A água precipitável (*Total column water vapour*, traduzida como “vapor de água total na coluna”) representa a quantidade total de vapor de água em uma coluna que se estende desde a superfície da Terra até o topo da atmosfera (ECMWF, 2022), tendo como unidade de medida valores em  $\text{kg m}^{-2}$ . Tendo as ZCAS como objeto de análise, seus valores tendem a ser mais elevados quando a mesma se encontra ativa.

Os dados das componentes horizontais (zonal e meridional) do vento em 850 hPa e 250 hPa foram usados para a elaboração dos mapas de linha de corrente. A componente zonal apresenta valor positivo para movimentos de oeste para leste e valor negativo no sentido contrário. A componente meridional do vento apresenta valor positivo para movimentos de sul para norte e valor negativo no sentido contrário. Dessa forma, para a componente zonal do vento empregou-se a variável *U-component of wind* (U-componente do vento), e para a meridional foi utilizado o *V-component of wind* (V-componente do vento). Estas duas componentes combinadas fornecem a velocidade e direção do vento horizontal. Esses campos são imprescindíveis para se identificar a convergência e divergência dos ventos em baixos e altos níveis, como as circulações características da AB e do VCAN-NE, presentes nas altas camadas atmosféricas.

A análise dos campos de altura geopotencial para níveis isobáricos definidos auxilia a análise sinótica de modo a permitir identificar com mais precisão os cavados e cristas existentes na atmosfera que eventualmente tenham contribuído para a formação de eventos ZCAS durante o período considerado. Visando a investigação acerca do enfraquecimento ou fortalecimento das feições sinóticas presentes na troposfera que condicionam o surgimento da ZCAS (Escobar, 2019), os dados de altura geopotencial foram plotados para o nível de pressão de 250 hPa.

Os campos de divergência horizontal do ar também foram analisados para o nível de 850 hPa. De forma discretizada, a divergência horizontal do vento é expressa como (LARSON; FARBER, 2015):

$$\text{Div}(\mathbf{v}) = du / dx + dv / dy$$

sendo “*u*” a componente zonal do vento e “*v*” a componente meridional do vento. Valores positivos (negativos) de  $\text{Div}(v)$  representam divergência (convergência) do ar. Campos de convergência do ar em baixos níveis atmosféricos estão associados, em geral, a maior movimento ascendente e maior formação de nebulosidade e chuva, padrão característico dos episódios de ZCAS.

A pressão atmosférica ajustada ao nível do mar (PNMM) (*Mean sea level pressure, MSLP*) permitiu verificar os padrões de circulação e transporte de calor nos baixos níveis atmosféricos. A PNMM representa a medida do peso que todo o ar exerce em uma coluna verticalmente acima de um ponto na superfície, se o ponto estivesse localizado ao nível médio do mar. A unidade de medida desta variável é fornecida em Pascals (Pa), sendo necessária a conversão para hectopascal (hPa), medida empregada em cartas sinóticas. Para essa conversão, os valores em Pa devem ser divididos por cem, para que o resultado seja em hPa.

Os Boletins mensais do Climanálise (publicados pelo CPTEC até 2014) e as cartas sinóticas elaboradas pela Marinha do Brasil foram utilizados para validação dos procedimentos empregados na identificação dos episódios de ZCAS. A comparação dos episódios de ZCAS com a informação fornecida pelo Boletim do Climanálise foram efetuadas entre 2000 e 2014, quando findou a elaboração dos boletins. A partir de então, de 2014 até 2021, os eventos ZCAS obtidos a partir dos procedimentos empregados nesta pesquisa foram comparados, com as cartas sinóticas elaboradas pela Marinha do Brasil.

A classificação das fases de eventos ENOS foi realizada com base nos valores do ONI, obtidos do site da NOAA, para o período de 2000 a 2021, apenas para os meses de janeiro, fevereiro e março, concomitante com a janela temporal dos dados de identificação de episódios de ZCAS.

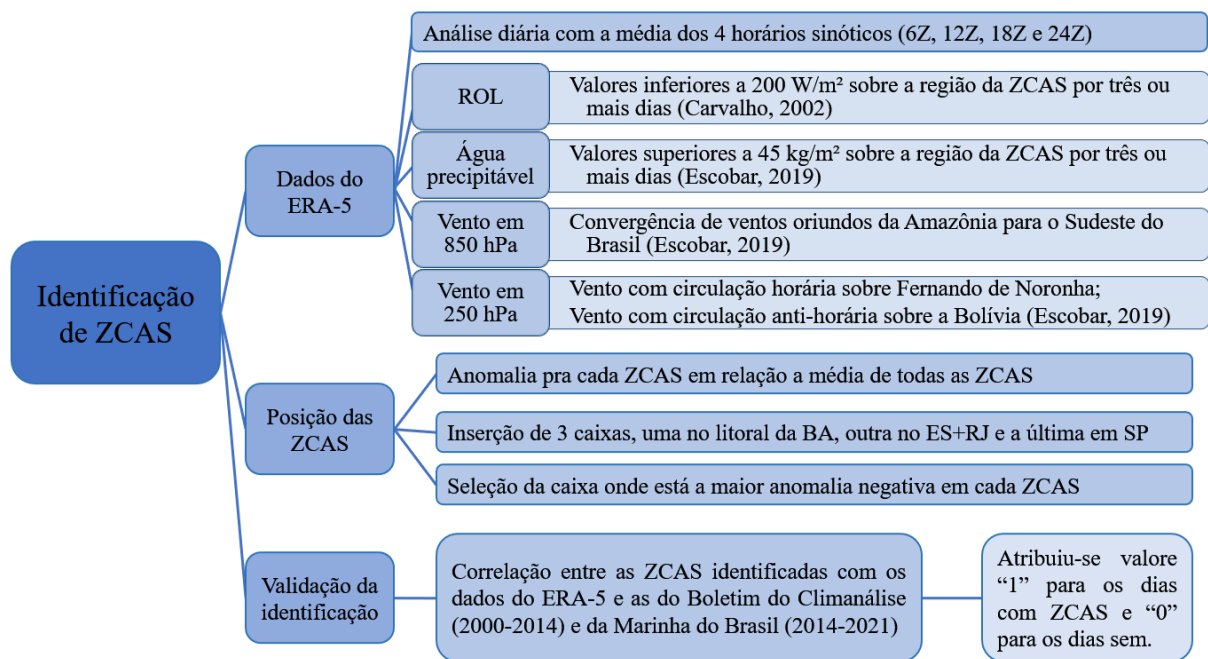
### 3.3 – Procedimentos

Os métodos empregados no desenvolvimento da pesquisa seguem a estrutura do fluxo de trabalho ilustrada na Figura 12. Os procedimentos foram divididos em dois blocos que apresentam diferentes abordagens. O primeiro abarcou as etapas de identificação de episódios de ZCAS através dos dados da reanálise do ERA-5 e o segundo combinou a ocorrência dos eventos com o ENOS.

O desenvolvimento da pesquisa contou com o emprego de algumas ferramentas digitais, que são especificadas a seguir. Na etapa de identificação de eventos ZCAS, o *software* GraDS foi utilizado para gerar os campos diários de ROL, água precipitável e ventos, permitindo o reconhecimento das feições características do fenômeno. As anomalias médias da circulação atmosférica durante episódios de ZCAS, em fases distintas do ONI também foram elaboradas no GraDS. O cálculo do coeficiente de correlação linear e do coeficiente de contingência entre ONI e a frequência de ZCAS, demais análises estatísticas e gráficos necessárias à pesquisa, foram computados com o uso do Excel. Por fim, os campos atmosféricos pertinentes a cada posicionamento das ZCAS também foram gerados com o GraDS.

### 3.3.1 – Identificação de ZCAS

Neste primeiro bloco, as análises realizadas visam identificar temporalmente os episódios de ZCAS por meio de padrões das características atmosféricas com os dados de reanálise do ERA-5 (ROL, água precipitável e circulação em 850 e 250 hPa). A identificação de eventos ZCAS foi realizada para os anos de 2000 a 2021, para os meses de janeiro, fevereiro e março, com base nos campos horários das variáveis atmosféricas, para os quatro horários sinóticos 6 Z, 12 Z, 18 Z e 24 Z, correspondendo aos horários 9 h, 15 h, 21 h e 3 h (do dia seguinte) no horário de Brasília. Conforme mostrado no fluxograma da Figura 16, a identificação de ZCAS foi segmentada em três etapas: a primeira etapa correspondeu à identificação diária (média dos quatro horários) da presença de ZCAS para os limiares de ROL, água precipitável e circulação em 850 e 250 hPa, tal como proposto pela literatura pesquisada; a segunda etapa constituiu na determinação da localização dos eventos ZCAS; e a terceira etapa esteve associada à identificação dos mesmos eventos ZCAS por procedimentos distintos propostos por outras fontes bibliográficas.



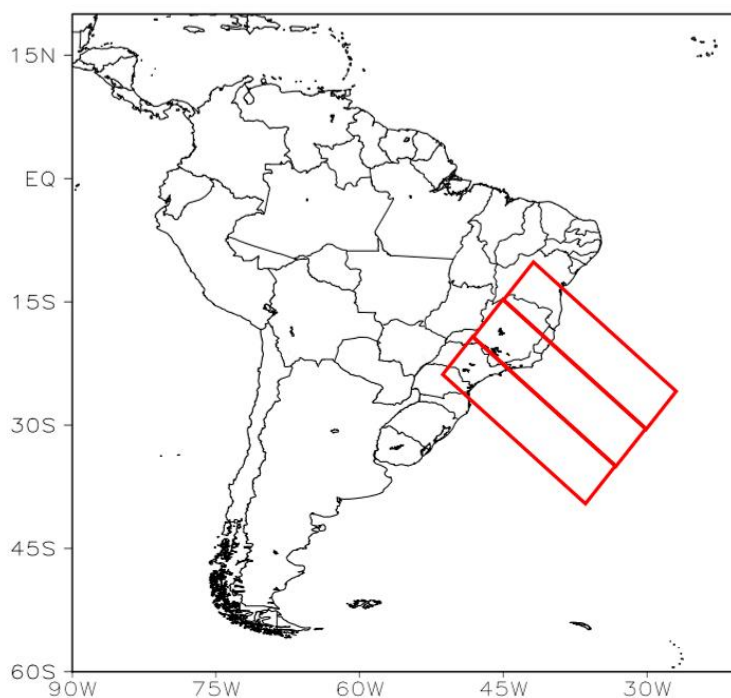
**Figura 16:** Fluxograma simplificado para a identificação de eventos ZCAS.

A primeira variável analisada para a identificação de episódios de ZCAS foi a radiação de onda longa, onde um corredor com valores inferiores a  $200 \text{ W m}^{-2}$  (convecção profunda) sobre os estados do Pará, Mato Grosso, Goiás, Minas Gerais, Rio de Janeiro, São Paulo e sobre o oceano Atlântico deve persistir por três dias ou mais, determina a ocorrência de episódios de ZCAS (CARVALHO *et al.*, 2004). Concomitantemente aos campos espaciais de radiação de onda longa, foram analisados os padrões da circulação atmosférica em 250 hPa (Escobar, 2019), visando a identificação da AB e do VCAN-NE. A AB caracteriza-se por uma região com alta pressão, visualizada por uma circulação anti-horária com centro sobre a Bolívia. O VCAN-NE caracteriza-se por uma circulação no sentido horário, localizando-se sobre o setor leste da região Nordeste do Brasil (Escobar, 2019), por vezes isolado como um sistema de baixa pressão, às vezes apenas como um cavado, o cavado do nordeste aparece em associação à intensificação da AB em altos níveis.

A identificação de episódios de ZCAS pela variável água precipitável na coluna atmosférica é indicada por valores superiores a  $45 \text{ kg m}^{-2}$ , cobrindo áreas com baixos valores de ROL, por, pelo menos, três dias consecutivos (ESCOBAR, 2019). Segundo Escobar (2019), não é necessário que o corredor com valores superiores a  $45 \text{ kg m}^{-2}$  se estenda sobre o oceano Atlântico Sul em todo o período, mas que apresente valores relevantes, mesmo que ocorram espacialmente de forma fragmentada. Juntamente ao campo de água precipitável, a circulação em 850 hPa também foi analisada, em forma de linhas de corrente, assegurando a visualização

da convergência do ar na região Sudeste do Brasil. A convergência do ar indica que mais ar está entrando em uma determinada área do que saindo. O ar convergente resulta em movimento ascendente, levando à condensação do vapor d'água por levantamento, aumentando o potencial para o desenvolvimento de tempestades (BARRY; CHORLEY, 2013). Os campos diários de água precipitável, linha de corrente em 850 hPa, ROL e linha de corrente em 250 hPa foram elaborados para todos os dias dos meses de janeiro, fevereiro e março, de 2000 a 2021.

Após a identificação de todos os episódios de ZCAS nos meses de janeiro a março do período de 2000 a 2021, seu posicionamento foi determinado. De acordo com análises prévias, os episódios de ZCAS foram localizados principalmente na área de três retângulos contíguos orientados na direção noroeste-sudeste da América do Sul, com centros em distintas posições geográficas: o primeiro, denominado de Norte, alcançando o litoral da Bahia e o litoral norte do Espírito Santo (com centro em Porto Seguro, BA); o segundo, Centro, alcançando o litoral do Rio de Janeiro e sul de Espírito Santo (com centro em Campos dos Goytacazes, RJ); e o terceiro, Sul, cobrindo o litoral de São Paulo e Paraná (com centro em Santos), conforme indicado na Figura 17 (NIELSEN et al., 2019). Os retângulos propagam-se majoritariamente sobre o oceano Atlântico Sul por ser onde se localizam as maiores anomalias de ROL, o que facilita a identificação do sistema atmosférico de interesse.



**Figura 17:** Retângulos contíguos definidos para a localização dos eventos ZCAS.

As anomalias de ROL foram calculadas para cada episódio de ZCAS em relação à média de todas as ZCAS identificadas no período de 2000 a 2021, sendo os resultados plotados juntamente aos retângulos contíguos de forma a permitir a identificação da posição das áreas com anomalias mais intensas.

Para finalizar a etapa de identificação de ZCAS buscou-se averiguar se os procedimentos metodológicos adotados apresentaram eficácia compatível com os episódios de ZCAS identificados por órgãos oficiais. Realizou-se um teste de ‘prova real’, de forma que os resultados obtidos no estudo pudessem ser comparados aos informados no Boletim Climanálise e nas Cartas da Marinha, para isso atribuiu-se valor de ‘1’ para todos os dias com a presença de ZCAS e de ‘0’ para os dias com sua ausência, para as três colunas de dados: ZCAS identificadas pela metodologia adotada com os dados diários de ERA-5; ZCAS do Boletim Climanálise e ZCAS das Cartas da Marinha do Brasil. As séries temporais binárias construídas com base nas três fontes de dados foram correlacionadas linearmente, com base no cálculo de correlação linear de Pearson, permitindo identificar o percentual de semelhança entre elas.

### 3.3.2 – Fases do ENOS

Os episódios identificados com eventos ZCAS foram segmentados de acordo com as distintas fases de ENOS, o que permitiu analisar a possível associação entre ambos. O cálculo do total de episódios de ZCAS e o total de dias com ZCAS, em cada mês considerado e em cada fase ENOS, permitiu verificar a ocorrência de ZCAS nas três fases analisadas. Adicionalmente, os cálculos de frequência de ZCAS foram fragmentados nas três posições geográficas de ocorrência das ZCAS (retângulos contíguos orientados na direção noroeste-sudeste), indicando a posição preferencial dos episódios em cada fase.

A associação entre duas variáveis climáticas é comumente estabelecida através de diagramas de dispersão, cujos valores são plotados num diagrama cartesiano de forma a indicar o tipo de associação existente entre as variáveis. O cálculo do coeficiente de correlação linear de Pearson (LARSON; FARBER, 2015) entre duas variáveis é outra maneira de se obter quantitativamente um valor para a associação entre elas. O cálculo do coeficiente de correlação linear de Pearson,  $r_{xy}$ , pode ser descrito como:

$$r_{xy} = \frac{Cov_{xy}}{S_x S_y},$$

em que  $Cov$  representa a covariância,  $S$  são os respectivos desvios padrões e  $x$  e  $y$  as variáveis. O coeficiente de correlação linear de Pearson varia entre  $-1$  e  $+1$ , havendo correlação linear positiva forte quando  $r$  está próximo de  $+1$  e correlação linear negativa forte quando  $r$  está próximo de  $-1$ . Quando  $r$  está próximo de zero, a correlação linear entre as variáveis é baixa (LARSON; FARBER, 2015). É importante salientar que quando  $r$  está próximo de zero não significa que não há associação entre as variáveis, mas apenas que não há uma associação linear.

Por sua vez, a covariância,  $Cov$ , pode ser representada através da equação (LARSON; FARBER, 2015):

$$cov_{x,y} = \frac{\sum^n (x_i - \underline{x})(y_i - \underline{y})}{n-1},$$

em que  $(x_i - \underline{x})$  e  $(y_i - \underline{y})$  consistem na dispersão de cada uma das variáveis em relação às respectivas médias e  $n$ , o número de registros.

Por fim, o último componente da correlação linear de Pearson é o desvio padrão,  $S$ :

$$S = \sqrt{\frac{\sum^n (x_i - \underline{x})^2}{n}},$$

cujos componentes já foram especificados anteriormente.

Visando uma análise de associação menos rigorosa entre ENOS e a ocorrência de ZCAS, foi adotado o cálculo do coeficiente de contingência. Para tanto, foi necessário construir a tabela de contingência entre número de eventos e dias com ZCAS em cada uma das fases de ENOS. O coeficiente de contingência é calculado para a obtenção do grau de associação entre duas variáveis, refletindo a força e a direção da dependência estatística na escala nominal binária, com apenas duas informações, ‘sim’ ou ‘não’, para a ocorrência de ZCAS em períodos específicos de ENOS. O coeficiente de contingência,  $C$ , pode ser escrito, de acordo com LARSON e FARBER (2015), como:

$$C = \sqrt{\frac{k \chi^2}{(k-1)(n+\chi^2)}},$$

em que  $\chi^2$  consiste no qui-quadrado, a relação entre o resultado observado e o esperado,  $k$  é o menor valor entre as dimensões da tabela de contingência e  $n$  o número de observações. O qui-quadrado é obtido pela somatória da diferença entre os valores observados ( $O$ ) e os esperados ( $E$ ) (LARSON; FARBER, 2015), de acordo com a seguinte equação:

$$\chi^2 = \sum \frac{(O-E)^2}{E}.$$

A significância estatística relativa ao coeficiente de correlação linear de Pearson pode ser obtida pelo emprego do teste *T-Student*, onde a estatística  $t$  é calculada, de acordo com LARSON e FARBER (2015), como:

$$t = \frac{r}{\sqrt{\frac{1-r^2}{n-2}}},$$

em que  $t$  representa a estatística padronizada,  $r$ , o valor do coeficiente de correlação linear de Pearson e  $n$ , o número de dados da amostra. O valor de  $t$  precisa ser maior que o valor do  $t^{\text{crítico}}$  para que a hipótese nula seja descartada (LARSON; FARBER, 2015), sendo  $t^{\text{crítico}}$  obtido por:

$$t^{\text{crítico}} = \frac{\bar{d} - \mu_d}{S_d \sqrt{n}},$$

em que  $\bar{d}$  consiste na média amostral das diferenças,  $\mu_d$  representa o nível de significância estatística, o  $S_d$ , o desvio padrão da variável e  $n$ , o número observações na amostra (a hipótese nula,  $H_0$ , afirma que um parâmetro da população, como a média ou a correlação, é igual a um valor hipotético, enquanto a hipótese alternativa,  $H_1$ , é considerada quando a hipótese nula não tem evidência estatística). O valor do  $t^{\text{crítico}}$  também pode ser encontrado através da tabela de *t-Student* para o grau de liberdade específico, selecionando-se o nível de significância estatística adequado.

Dessa forma, se o valor absoluto da estatística do teste  $t$  for menor do que o valor do  $t$  crítico, deve-se aceitar a hipótese nula, o que significa que não há correlação linear estatisticamente significativa entre as variáveis consideradas, enquanto que a hipótese nula é rejeitada quando o valor absoluto do  $t^{\text{crítico}}$  for menor do que o valor de  $t$ . Neste caso, considera-se o valor da correlação linear estatisticamente significativo. Cabe ainda salientar que não rejeitar a hipótese nula significa apenas que não se conseguiu, através dos dados disponíveis, demonstrar sua falsidade, o que difere completamente de provar sua veracidade (LARSON e FARBER, 2015).

Visando apurar a explicação física para os padrões de ZCAS em cada fase de ENOS, a anomalia das variáveis atmosféricas consideradas para os dias identificados com ZCAS foi calculada no GraDS. A anomalia da variável atmosférica que caracteriza cada episódio de ZCAS é calculada pela subtração da média da variável considerando-se todos os episódios de ZCAS no período todo do valor médio para cada episódio. A anomalia de uma variável é calculada a partir da equação seguinte, segundo Wilks (1990):



$$var'(t = i) = var(t = i) - varmed$$

em que  $var'(t=i)$  representa a anomalia da variável no tempo  $i$ ,  $var(t=i)$ , a variável no tempo  $i$  e  $varmed$  a média da variável calculada para a série temporal considerada.

A análise dos mapas de anomalia de cada uma das variáveis atmosféricas permite verificar se cada período de ZCAS apresenta valores maiores ou menores em relação à média climatológica. Para calcular a anomalia das variáveis atmosféricas é necessária a realização de cálculos de forma hierárquica, seguindo os procedimentos listados abaixo:

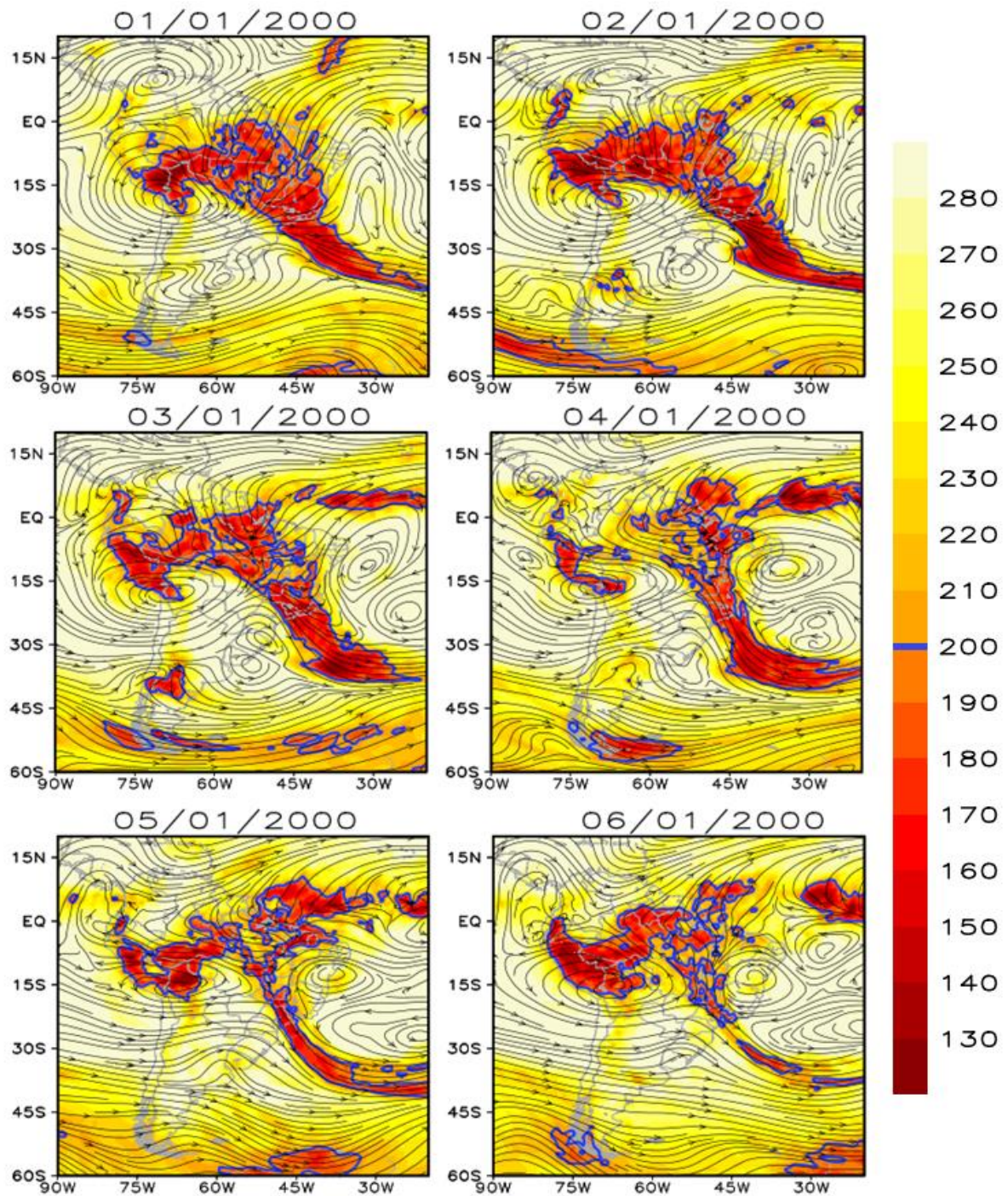
- cálculo da média para cada episódio de ZCAS, sendo definidos anteriormente os dias de duração do episódio;
- cálculo da média para a totalidade dos episódios de ZCAS registrados na série temporal adotada;
- realização da subtração entre os passos anteriores.

O cálculo das anomalias das variáveis atmosféricas para cada fase de ENOS (EN, LN e neutro) deve respeitar os respectivos recortes temporais definidos pelos valores mensais de ONI.

## 4 – RESULTADOS

A fim de ilustrar os resultados obtidos com a identificação de episódios de ZCAS em todo o período considerado, dois casos foram selecionados. O primeiro compreende os dias 01 a 06/01/2000, sendo selecionado por se apresentar no mês com os menores valores de ONI, e o segundo caso, compreendido entre os dias 22 a 24/02/2016, sendo escolhido por fevereiro de 2016 ser o segundo mês com o maior valor de ONI. As análises diárias para identificação de todos os episódios de ZCAS no decorrer do período selecionado, JAN/2000 a MAR/2021 (compreendendo 1986 dias) estão disponíveis no drive <[https://drive.google.com/drive/folders/16fGN-ebkayoVi3rLe4wypdcCnb4yFCDI?usp=share\\_link](https://drive.google.com/drive/folders/16fGN-ebkayoVi3rLe4wypdcCnb4yFCDI?usp=share_link)>.

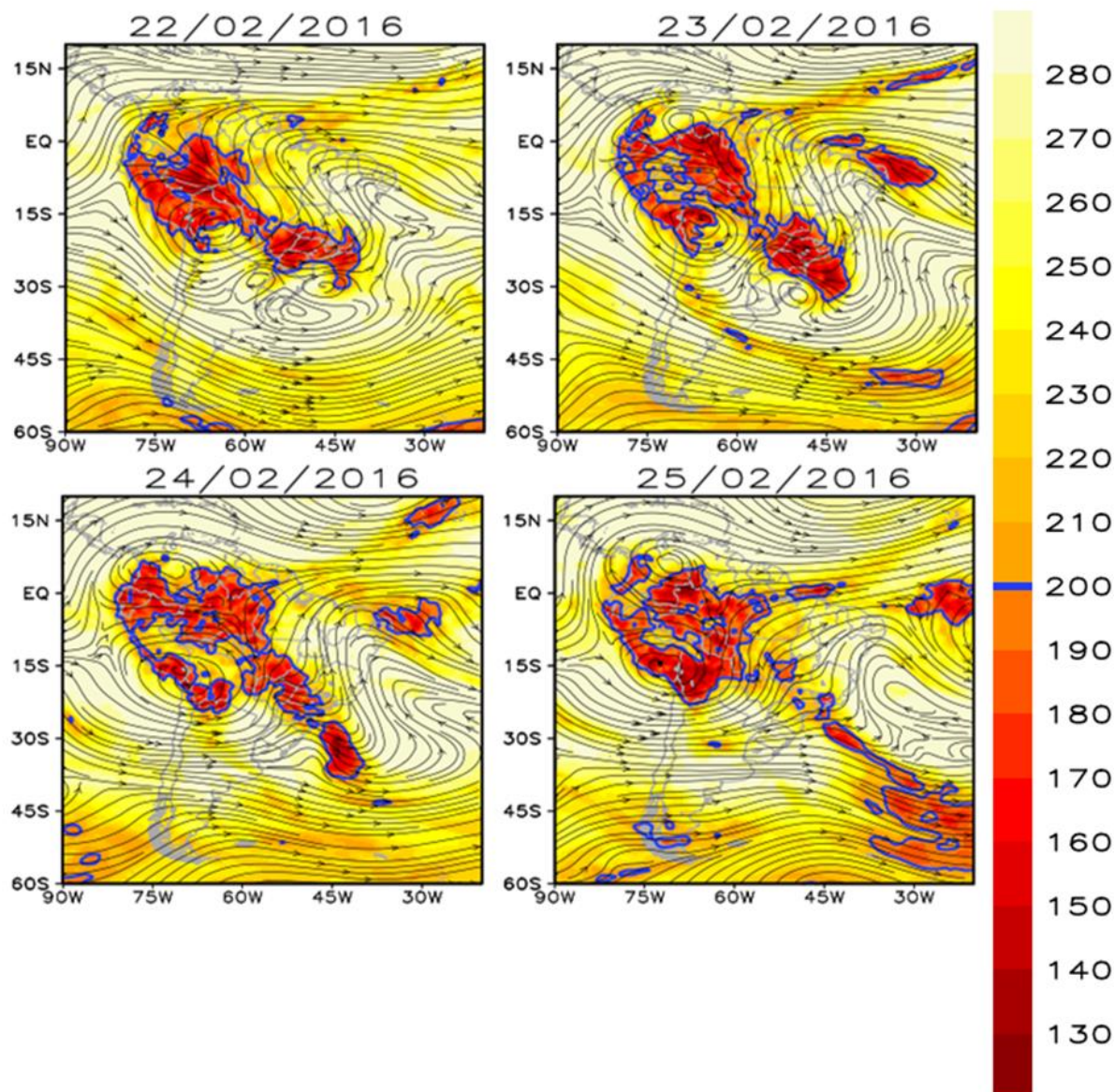
O episódio de ZCAS observado nos dias 01/01/2000 a 06/01/2000 (ano de LN) encontra-se ilustrado na Figura 18. As áreas com valores de ROL inferiores a  $200 \text{ W m}^{-2}$  foram persistentes por seis dias consecutivos, entre 01 e 02/01/2000, o VCAN-NE, com centro em  $30^\circ \text{ O}$  e  $15^\circ \text{ S}$ , alonga-se meridionalmente pela costa do NE brasileiro, abrangendo uma vasta área do oceano Atlântico Sul tropical, desde o trópico de Capricórnio ( $23^\circ \text{ S}$ ) até latitudes mais baixas, em direção ao equador. A partir do dia 03/01/2000, o sistema se intensifica, apresentando forma circular, centrado próximo ao litoral do Recôncavo Baiano, Bahia, no dia 05/01/2000. A AB encontra-se centrada sobre o norte do Chile, migrando alguns graus para leste, em direção à Bolívia, nos dias 05 e 06 de janeiro de 2000. O corredor com valores de ROL inferiores a  $200 \text{ W m}^{-2}$  é mais intenso e mais abrangente nos primeiros dias, particularmente no dia 04/01/2000, com valores inferiores a  $140 \text{ W m}^{-2}$  sendo observados em algumas porções do oceano Atlântico. Nos dias 05 e 06/01/2000, o episódio de ZCAS se enfraquece, sendo observados valores inferiores a  $200 \text{ W m}^{-2}$  em áreas oceânicas e continentais menos abrangentes.



**Figura 18:** Radiação de onda longa e circulação atmosférica (linha de corrente) em 250 hPa para os dias (a) 01, (b) 02, (c) 03, (d) 04, (e) 05 e (f) 06/01/2000. Valores de ROL inferiores a  $200 \text{ W m}^{-2}$  são destacados pela isolinha azul.

No episódio de ZCAS formado entre 22 e 25 de fevereiro de 2016 (ano de EN) há um cavado em altos níveis na altura do litoral leste da região Nordeste do Brasil (Figura 19), sendo essa a feição referente ao VCAN-NE. Entre 22 e 24 de fevereiro, o eixo do cavado encontra-se inclinado na direção noroeste-sudeste, desde o oceano Atlântico Sul tropical, próximo à costa leste do nordeste brasileiro, até o Maranhão. A AB encontra-se centrada sobre a Bolívia nos dois primeiros dias, 22 e 23, deslocando-se cerca de 3 graus para oeste nos últimos dias, 24 e

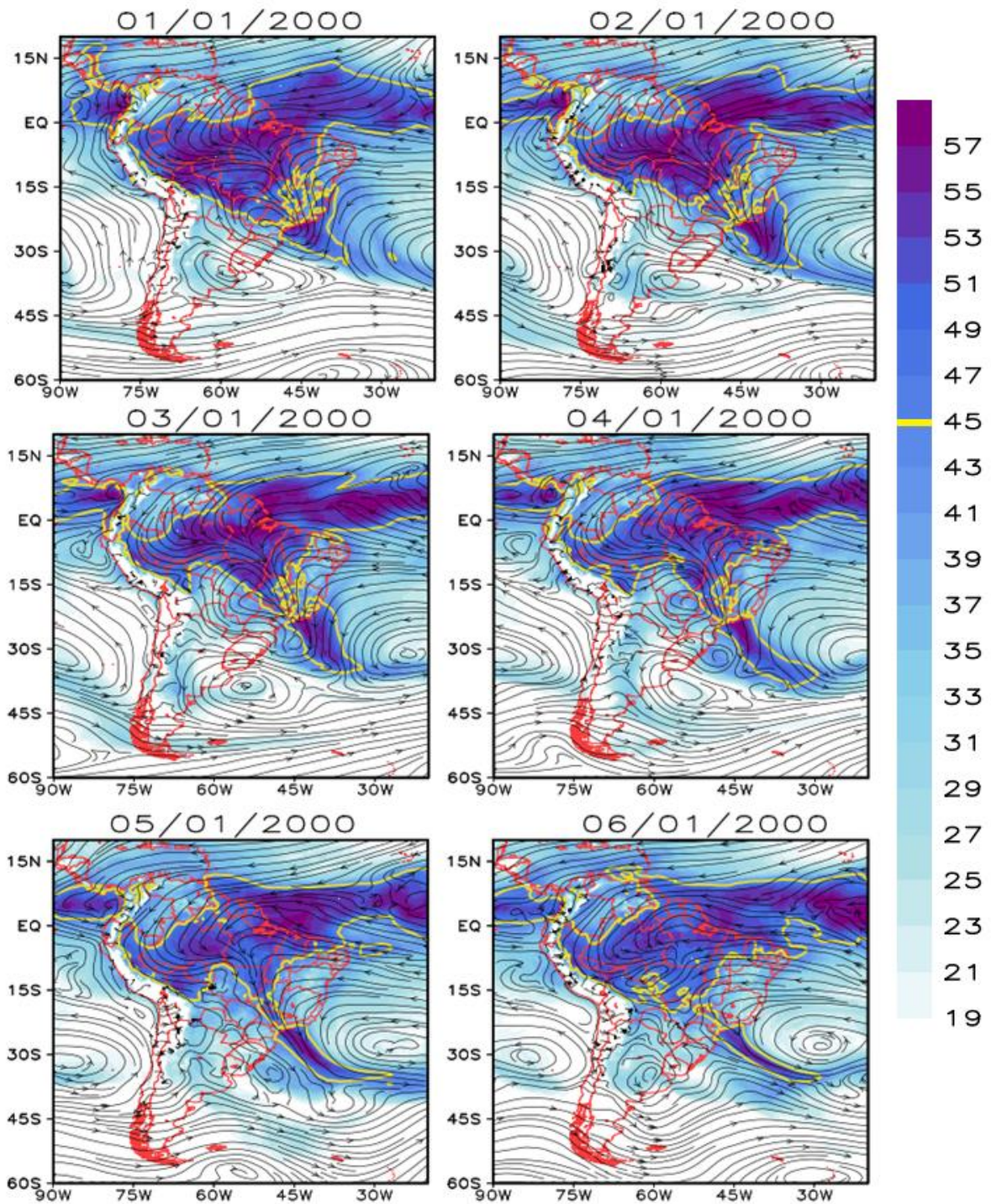
25, em direção ao oceano Pacífico. O corredor com valores de ROL inferiores a  $200 \text{ W m}^{-2}$  é mais fraco quando comparado ao episódio de ZCAS de janeiro de 2000, ilustrado na Figura 18, porém, ainda apresenta nos três primeiros dias (22-24) formação contínua com valores baixos de ROL que se fragmenta no dia 25/02/2016.



**Figura 19:** Radiação de onda longa e circulação atmosférica (linha de corrente) em 250 hPa para os dias (a) 22, (b) 23, (c) 24 e (d) 25/02/2016. Valores de ROL inferiores a  $200 \text{ W m}^{-2}$  são destacados pela isolinha azul.

A identificação de episódios de ZCAS com base nos campos de água precipitável e circulação atmosférica em baixos níveis nos dias 01 a 06/01/2000 está ilustrada na Figura 20. Do dia primeiro até o dia quatro de janeiro, o campo de linhas de corrente em baixos níveis (850 hPa) evidencia a convergência do ar na região da ZCAS, com ventos alísios oriundos da região equatorial, e da área com circulação ciclônica centrada sobre o estado de São Paulo. A

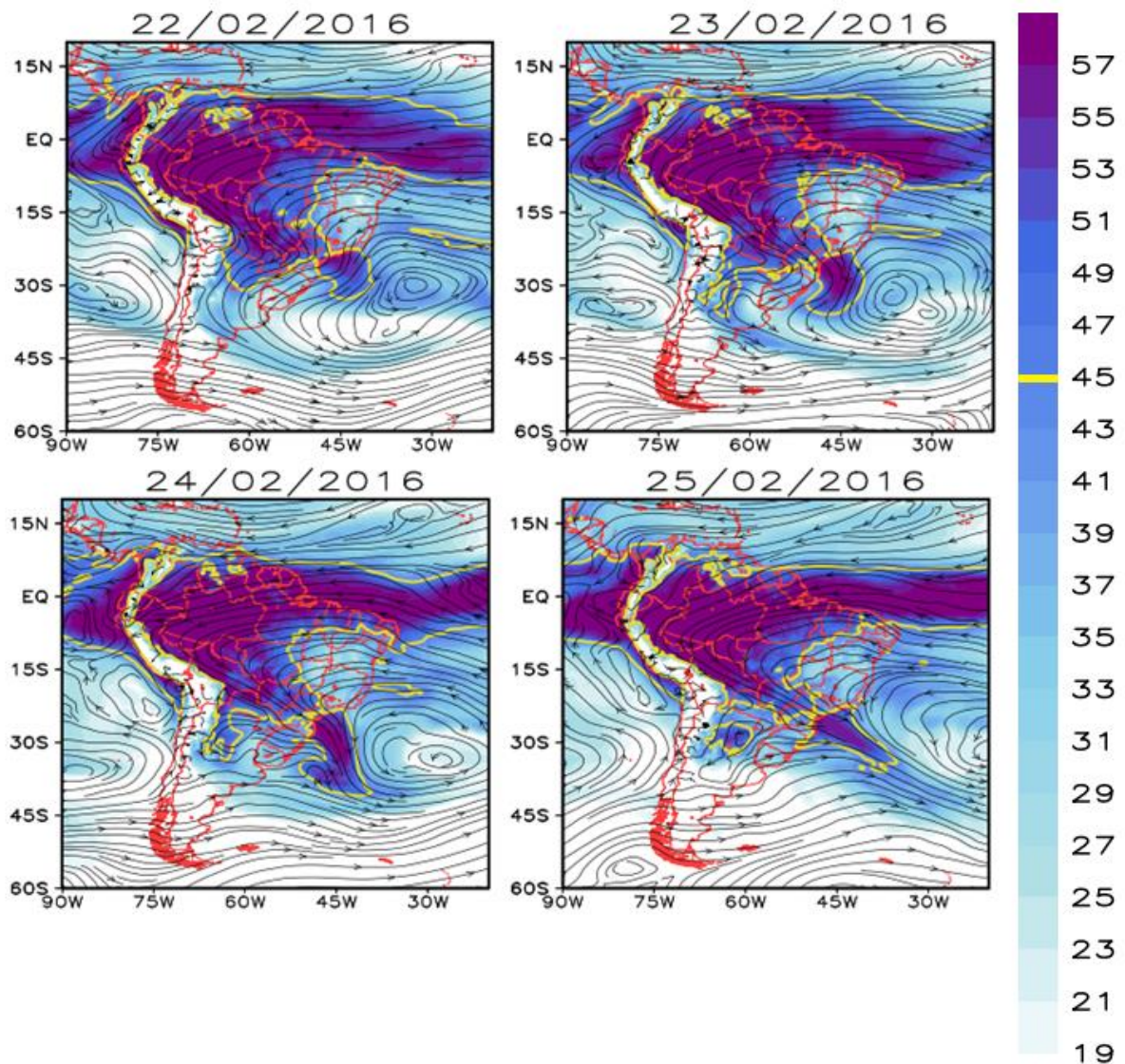
convergência do ar em baixos níveis ocorre de forma mais intensa sobre os estados do Pará, Tocantins, Goiás, Mato Grosso e Minas Gerais, estendendo-se até o Rio de Janeiro. Nos dias 05 e 06 de janeiro, o padrão de convergência de baixos níveis perde força. Os valores de água precipitável formam um corredor, como um apêndice da ZCIT, no sentido noroeste-sudeste, desde o Pará até o oceano Atlântico Sul, na altura do Rio de Janeiro, atingindo valores superiores a  $57 \text{ kg m}^{-2}$ , no dia 02/01, sobre o oceano. Nos dias 05 e 06 de janeiro, em resposta ao enfraquecimento da convergência do ar, os valores de água precipitável diminuem, cobrindo áreas menores com valores menos expressivos.



**Figura 20:** Água precipitável e circulação atmosférica (linha de corrente) em 850 hPa para os dias (a) 01, (b) 02, (c) 03, (d) 04, (e) 05 e (f) 06/01/2000. Valores de água precipitável superiores a  $45 \text{ kg m}^{-2}$  são destacados pela isolinha amarela.

No segundo caso de ZCAS, do dia 22 até o dia 25/02/2016 (Figura 21), a convergência de ventos em baixos níveis está mais deslocada para o sudoeste, sobre a Bolívia, e se intensifica durante o segundo dia, atingindo o litoral do estado de São Paulo no dia 25/02/2016, quando este padrão se enfraquece. A intensificação e enfraquecimento da convergência do ar é

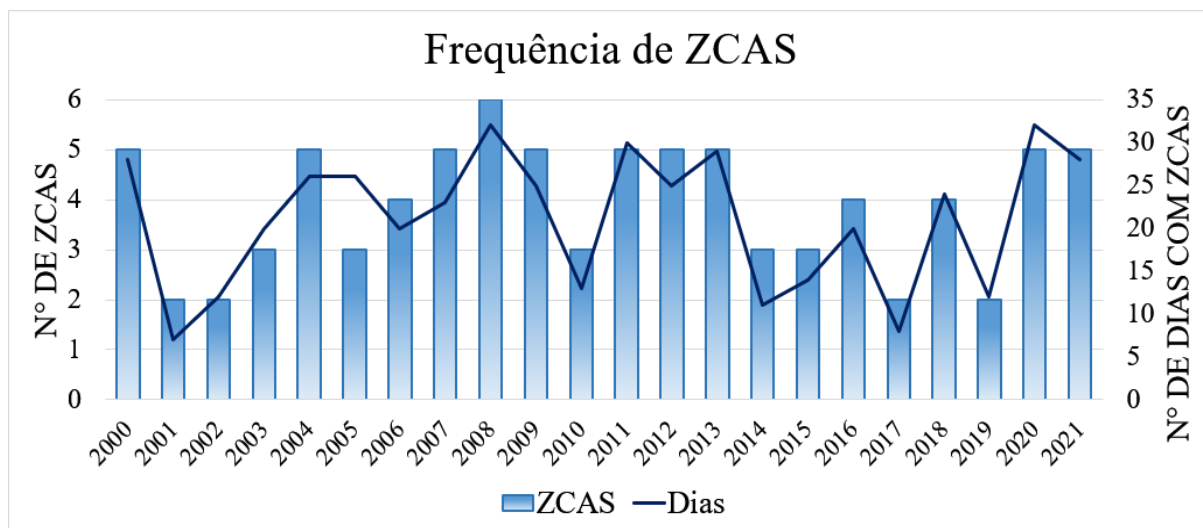
proporcional aos valores de água precipitável, o que é ilustrado por várias áreas oceânicas com mais de  $57 \text{ kg m}^{-2}$  de água precipitável entre os dias 23 e 25.



**Figura 21:** Água precipitável e circulação atmosférica (linha de corrente) em 850 hPa para os dias (a) 22, (b) 23, (c) 24 e (d) 25/02/2016. Valores de água precipitável superiores a  $45 \text{ kg m}^{-2}$  são destacados pela isolinha amarela.

A caracterização de episódios de ZCAS baseada nos critérios considerados por Escobar (2019) e Carvalho *et al.* (2004) permitiu a identificação de 88 episódios ocorridos em 465 dias distribuídos nos meses de verão do hemisfério sul, entre janeiro e março, de 2000 a 2021 (Figura 22). O ano com mais ocorrência de ZCAS foi 2008, com seis episódios (ano de LN), e os com menos episódios foram 2001, 2002, 2017 e 2019 (os três primeiros neutros e o último de El Niño), sendo observados apenas dois episódios de ZCAS em cada um dos anos. Nos meses de janeiro foram identificados 40 episódios de ZCAS, resultando em uma média de 1,8 casos no decorrer dos 31 dias do mês, sendo este o mês mais ativo dentre os considerados. O segundo

mês com maior atividade foi fevereiro, totalizando 29 eventos e uma média de 1,3 ZCAS. Por fim, no mês de março, foram observados 19 episódios de ZCAS, o que corresponde a 0,9 episódios, em média. Todos os episódios de ZCAS identificadas estão disponíveis no drive, através do link [https://drive.google.com/drive/folders/16fGN-ebkayoVi3rLe4wypdcCnb4yFCDI?usp=share\\_link](https://drive.google.com/drive/folders/16fGN-ebkayoVi3rLe4wypdcCnb4yFCDI?usp=share_link).



**Figura 22:** Frequência de episódios de ZCAS e número de dias com ZCAS nos meses de janeiro a março, de 2000 a 2021, com base nos dados de ROL, água precipitável e vento da reanálise ERA-5.

Em 2008 e 2020 foram observados 32 dias com episódios de ZCAS; em 2011, 30 dias com episódios de ZCAS. 2001, 2017 e 2014 são os anos com as mais baixas frequências de dias com ZCAS, com sete, oito e onze dias, respectivamente (Figura 22). Em relação à compartimentação por mês, janeiro foi o mês mais ativo, com um total de 206 dias com ZCAS (30,2 % dos dias do mês) e média no período igual a 9,4 dias. O segundo mês com maior número de dias com ZCAS foi fevereiro, que apresentou um total de 165 dias (26,5 % dos dias do mês) com episódios de ZCAS e 7,5 dias, em média. O mês de março apresentou a menor quantidade de dias com ZCAS, 94 (13,8 % dos dias do mês) e uma média de 4,3 dias no mês.

O número de dias com ZCAS calculado neste estudo (seção 3.3.1) foi comparado ao número de dias com ZCAS indicados pelo Boletim Climanálise, publicado entre 1996 e 2014, e pelas Cartas Sinóticas da Marinha do Brasil, por meio do cálculo do coeficiente de correlação linear entre as três fontes de dados. O resultado obtido pela correlação linear entre as informações obtidas no presente estudo e as definidas pelo Boletim Climanálise, é igual a 0,728, indicando forte correlação. A correlação linear com o número de dias com ZCAS identificados pelas cartas sinóticas da Marinha do Brasil apresenta valor igual a 0,704. A validação dos valores de correlação linear, considerando o nível de significância de 95 %, indica a rejeição da



hipótese nula, garantindo a segurança da afirmação acerca da correlação significativa entre as variáveis correlacionadas, uma vez que o *t crítico* é igual a 1,96, em ambos os casos, e o *t* amostral estimado para o Boletim Climanálise é igual a 39,05 e, para as informações contidas nas Cartas da Marinha, igual a 24,89. A consideração em conjunto da identificação dos episódios de ZCAS fornecida tanto pelo Boletim Climanálise como pelas Cartas da Marinha apresenta correlação linear igual a 0,721, apresentando, para 95 % de significância, *t* amostral maior que o *t crítico*, conforme indicado na Tabela 2.

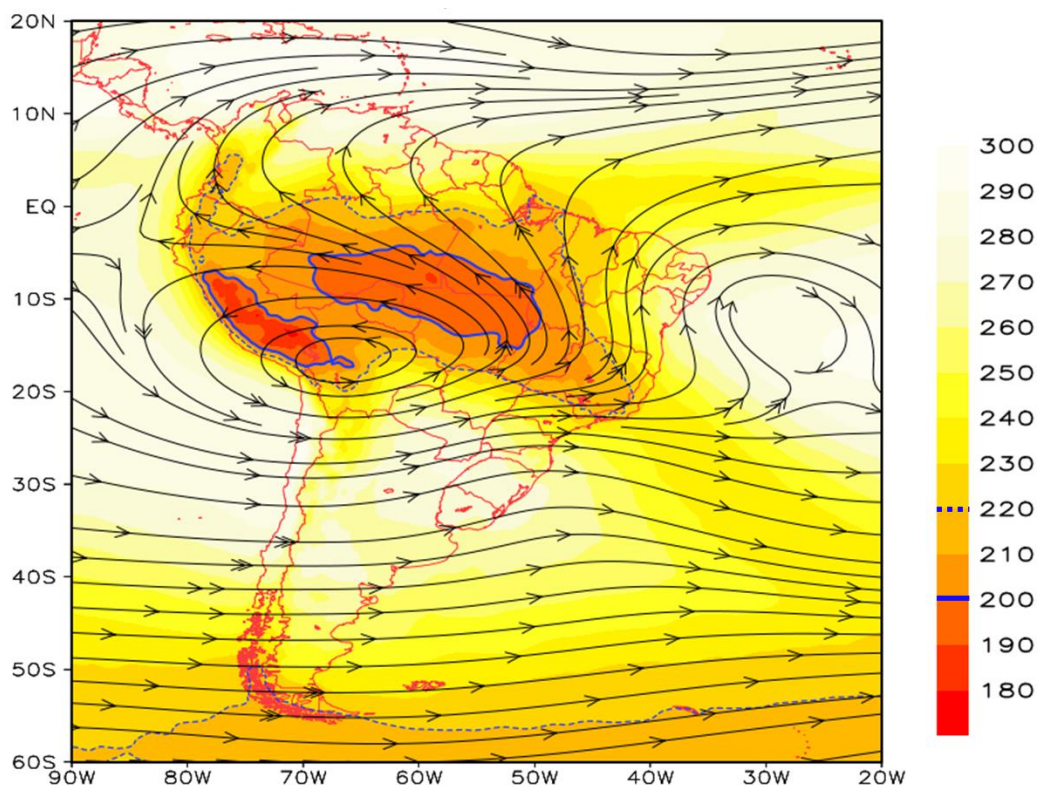
**Tabela 2:** Coeficiente de correlação linear de Pearson entre o número de dias com ZCAS tal como calculado pelo método proposto neste estudo, como indicado pelo Boletim Climanálise e pelas Cartas da Marinha, para o período de 2000 a 2021.

	<b>Boletim Climanálise</b>	<b>Cartas Sinóticas da Marinha</b>	<b>Total</b>
<i>r</i>	0,728	0,704	0,721
<i>t</i>	39,05	24,89	46,34
<b><i>t crítico</i></b>	1,96 (p < 0,05)	1,96 (p < 0,05)	1,96 (p < 0,05)
<i>n</i>	1354	632	1986

Os resultados apontam para a validação dos episódios de ZCAS identificados através dos dados de ROL, água precipitável e vento, variáveis obtidas do ERA-5, tal como realizado neste estudo, uma vez que não diferem muito do número de dias com ZCAS fornecidos pelo Boletim Climanálise e pelas Cartas Sinóticas da Marinha do Brasil, para o período de 2000 a 2021, durante os meses de janeiro, fevereiro e março.

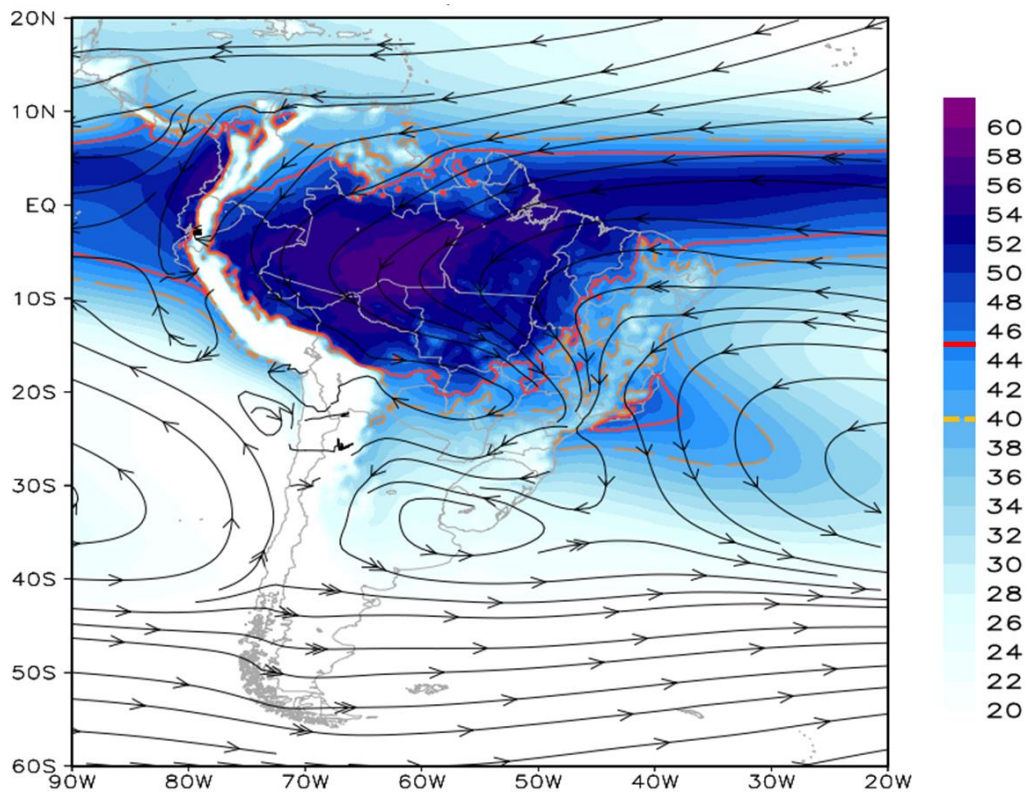
Assim como definido por Escobar (2019), a circulação atmosférica de altos níveis característica dos episódios de ZCAS conta com a presença da AB, com centro sobre a Bolívia, caracterizada por uma circulação atmosférica com sentido anti-horário, e do VCAN-NE, centrado sobre o oceano Atlântico Sul tropical, a cerca de cinco graus a leste da faixa litorânea da região Nordeste do Brasil, marcado por uma circulação atmosférica com sentido horário, tal como ilustrada na Figura 23. O mapa com valores médios de ROL para episódios de ZCAS identificados no período de 2000 a 2021, nos meses de janeiro a março, apresenta valores inferiores a  $220 \text{ W m}^{-2}$  na região centro-norte da América do Sul, associando-se a forte

convecção. Cobrindo o sul dos estados do Amazonas e Pará e o centro-norte de Rondônia e o norte de Mato Grosso, aparece uma área de maior convecção, com valores de ROL inferiores a  $200 \text{ W m}^{-2}$  (Fig. 23). Por se tratar de uma média, os valores inferiores a  $200 \text{ W m}^{-2}$  necessários para a identificação dos episódios de ZCAS estão suavizados, por isso optou-se pela inserção de uma linha pontilhada destacando os valores inferiores a  $220 \text{ W m}^{-2}$ .



**Figura 23:** Circulação atmosférica média em 250 hPa (linhas de corrente) e valores de ROL ( $\text{W m}^{-2}$ ) para episódios de ZCAS identificados nos meses de janeiro a março, de 2000 até 2021.

A circulação atmosférica de baixos níveis (850 hPa) apresenta forte convergência do ar sobre os estados de Mato Grosso, Goiás, Minas Gerais e São Paulo (Figura 24). A forte convergência contribui para a ascensão do ar e para a condensação do vapor d'água, dando origem aos valores significativos de água precipitável, superiores a  $40 \text{ kg m}^{-2}$ , durante episódios de ZCAS. Assim, a circulação atmosférica média, característica dos episódios de ZCAS identificados ao longo da série temporal de 2000 a 2021, aponta para a localização da AB e do VCAN-NE centrados em suas posições climatológicas, de acordo com Escobar (2019), enquanto que os valores baixos de ROL coincidem com a região de convergência do ar em baixos níveis e com os valores mais expressivos de água precipitável.

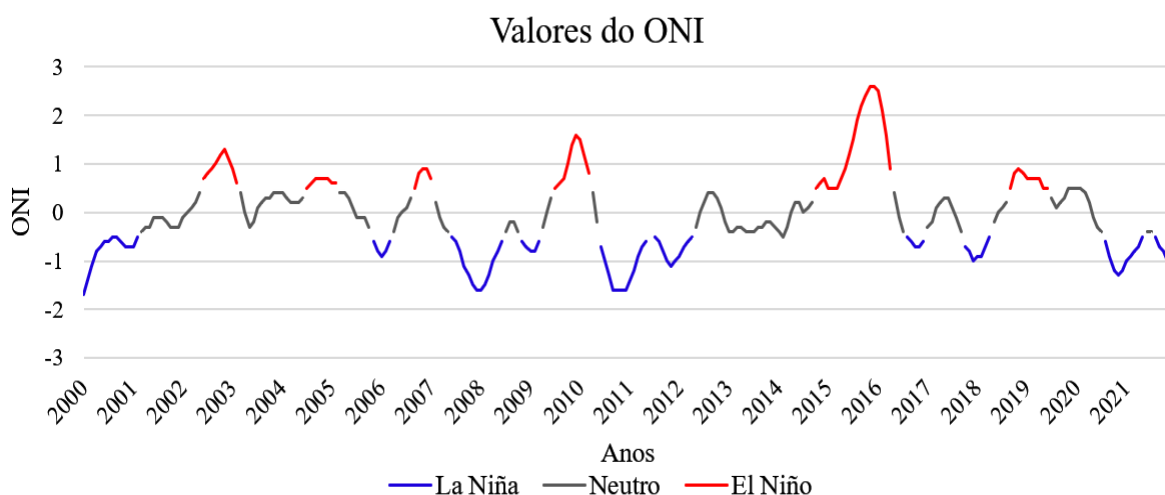


**Figura 24:** Circulação atmosférica média em 850 hPa (linha de corrente) e valores de água precipitável ( $\text{kg m}^{-2}$ ) para os episódios de ZCAS identificados entre janeiro e março, de 2000 a 2021.

#### 4.1 – Associação entre ZCAS e ENOS

Ao longo dos 264 meses da série temporal, 86 destes (32,6 %) referem-se a períodos de La Niña, totalizando dez períodos específicos, tendo o mais extenso deles ocorrido entre janeiro de 2000 e fevereiro de 2001. Por outro lado, o período de La Niña mais intenso ocorreu entre junho de 2010 e maio de 2011, apresentando valores mensais de ONI inferiores a  $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$ , tendo quatro meses apresentado valores iguais a  $-1,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ , conforme mostrado na Figura 25. Quinze períodos contínuos, totalizando 118 meses (44,7 %), apresentaram valores absolutos relativamente baixos de ONI, sendo classificados como períodos neutros. O recorte mais extenso de meses com baixos valores absolutos de ONI (períodos neutros), com 29 meses seguidos, ocorreu entre maio de 2012 e setembro de 2014, enquanto que o período mais curto classificado como neutro ocorreu após o período de La Niña mais extenso, em junho de 2011. No período total considerado, de 2000 a 2021, menos meses foram classificados como períodos de El Niño, totalizando 60 meses (22,7 %) no decorrer de seis períodos específicos. O período mais intenso de El Niño, de outubro de 2014 até abril de 2016, destacado na Figura 25, apresentou valores absolutos de ONI superiores a  $+2\text{ }^{\circ}\text{C}$  durante seis meses. Os dois meses com valores mais intensos de ONI, iguais a  $+2,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ , foram novembro e dezembro de 2015. Este

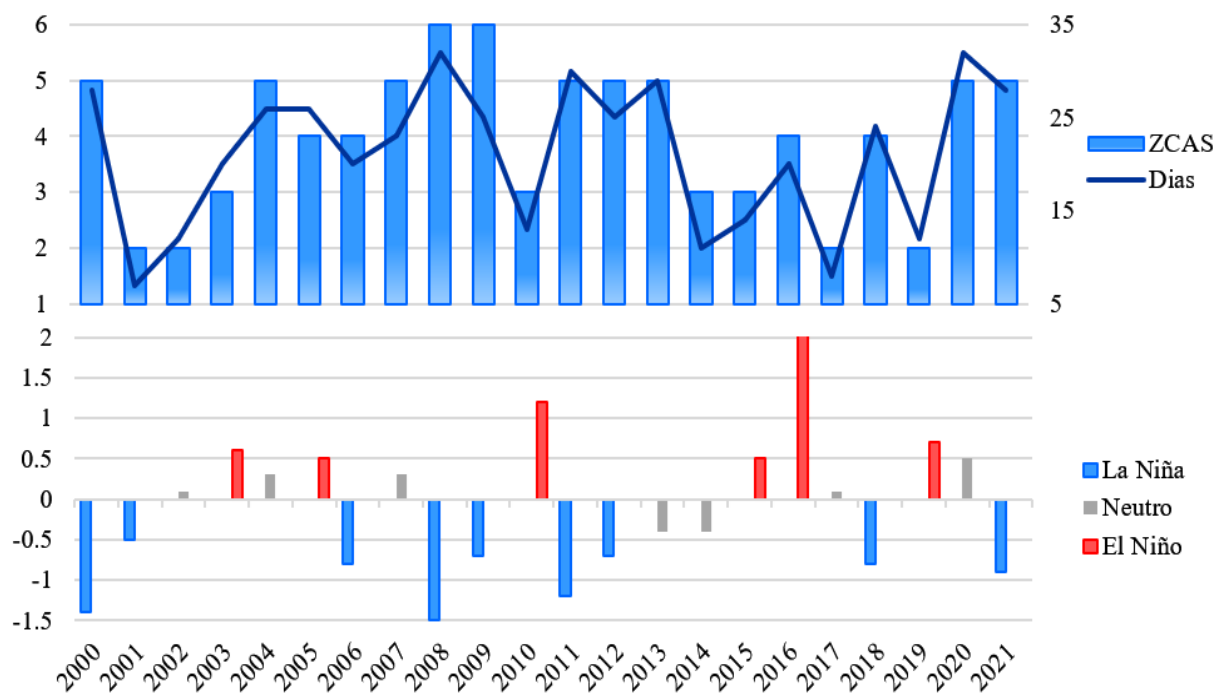
período de EN foi o mais longo registrado na série temporal analisada, persistindo durante dezenove meses consecutivos.



**Figura 25:** Valores mensais do ONI entre janeiro de 2000 e dezembro de 2021, com destaque para os períodos de La Niña (em azul), El Niño (em vermelho) e neutros (em cinza).

Ao compartimentar os episódios de ZCAS nas fases de ENOS, nota-se que, ao longo de todo o período (2000-2021), que 41 (46,6 %) episódios ocorreram em períodos de La Niña, 19 (21,6 %) episódios, em períodos de El Niño, e 28 (31,8 %) episódios, em períodos de neutralidade do ENOS. Para o número de dias com eventos ZCAS, o que está associado à intensidade e persistência do sistema, 215 dias (26,5 % dos dias dos meses caracterizados como La Niña) ocorreram em períodos de La Niña, 110 dias (19,3 % de todos os dias entre janeiro e março em EN) em períodos de EN e 140 dias (23,3 %) em períodos neutros para o ENOS.

A identificação de episódios ZCAS nas fases de ENOS mostra uma tendência de concentração durante períodos de La Niña, com uma redução significativa em períodos de El Niño e neutros. Conforme mostrado na Figura 26, os anos com menor ocorrência de ZCAS correspondem a períodos de El Niño ou neutros, tais como 2002, 2010 e 2017, enquanto que os episódios são mais frequentes durante períodos de La Niña, exemplificado pelos anos de 2000, 2008 e 2021. A averiguação de associação estatística entre a ocorrência de ZCAS e eventos ENOS foi feita com base em duas técnicas: o coeficiente de correlação linear de Pearson e o coeficiente de contingência.



**Figura 26:** Valores anuais da frequência e número de dias com ZCAS (quadro superior) e ONI (quadro inferior), para os meses de janeiro a março de 2000 a 2021.

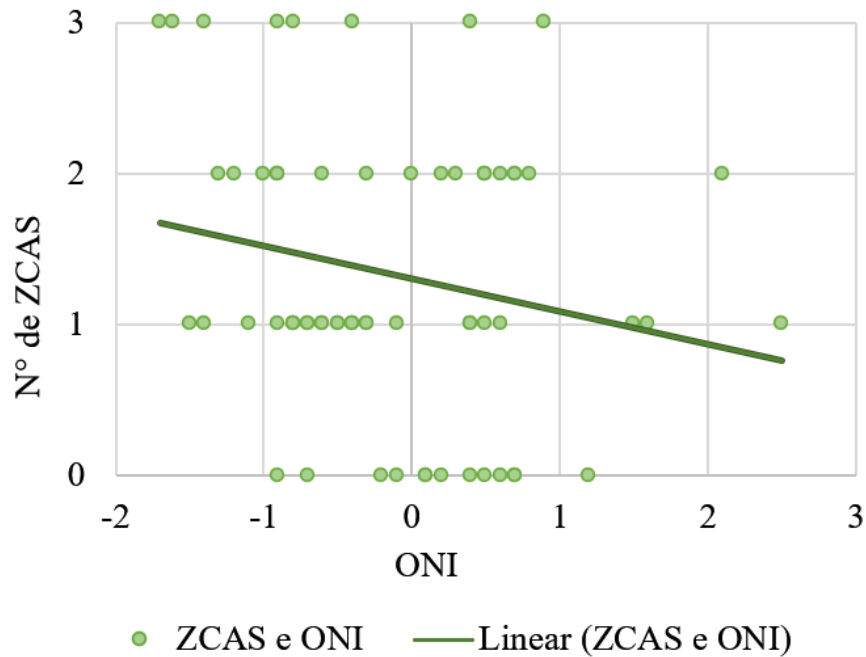
O cálculo do coeficiente de correlação linear de Pearson entre o ONI e a frequência mensal de ZCAS indica associação negativa, com coeficiente de correlação igual a - 0,205, indicando maior ocorrência de episódios de ZCAS em períodos de La Niña. O coeficiente de correlação linear é significativo apenas para  $p < 0,10$  (Tabela 3).

**Tabela 3:** Coeficiente de correlação linear de Pearson entre ONI e o número de ZCAS, nos meses de janeiro a março de 2000 a 2021.

<i>r</i>	- 0,205
<i>r</i> <sup>2</sup>	0,042
<i>t</i>	1,676
<i>t crítico</i>	1,657 ( $p < 0,10$ )
<i>n</i>	66

Apesar do valor da correlação linear ser baixo, tendo em vista a complexidade da variabilidade climática, com significância para  $p < 0,10$ , é seguro afirmar que há um padrão de associação entre a ocorrência de ZCAS e o fenômeno ENOS. O ajuste linear entre as duas variáveis mostra essa configuração (Figura 27), sendo evidente a maior presença de ZCAS durante períodos de La Niña e a menor presença do sistema durante períodos de El Niño. Para

o valor negativo de ONI igual a - 1,5, estima-se hipoteticamente, através da aplicação de regressão linear, a ocorrência média mensal de 1,63 ZCAS entre janeiro e março, sendo este o cenário que resulta em mais episódios de ZCAS. Quando o ONI está em estágio de neutralidade, com valor igual a 0, estima-se a ocorrência média mensal de 1,31 ZCAS; por fim, para o valor positivo de ONI igual a + 1,5, estima-se a ocorrência média mensal de 0,98 ZCAS em cada um dos três meses estudados.



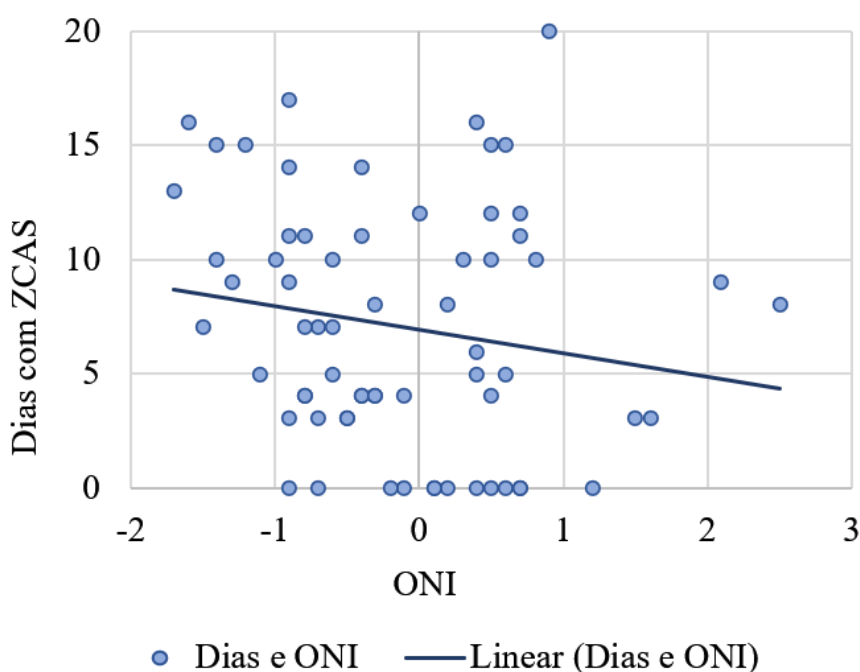
**Figura 27:** Diagrama de dispersão entre ONI e a ocorrência mensal de ZCAS, para os meses de janeiro a março de 2000 a 2021.

No que tange à análise do número de dias com ocorrência de ZCAS em cada mês, considerando o período de estudo, o valor do coeficiente de correlação linear de Pearson também aponta para uma associação negativa, igual a - 0,170, indicando uma associação mais fraca quando comparada ao número de episódios mensais. Para o número de dias com ZCAS, o coeficiente de correlação linear é significativo apenas para  $p < 0,18$  (82 %).

**Tabela 4:** Coeficiente de correlação linear de Pearson entre ONI e o número de dias com ZCAS, nos meses de janeiro a março de 2000 a 2021.

<i>r</i>	- 0,170
<i>r</i> <sup>2</sup>	0,029
<i>t</i>	1,377
<i>t crítico</i>	1,348 (p < 0,18)
<i>n</i>	66

Para as fases de ONI negativo, com valor igual a - 1,5, estima-se, com o emprego da regressão linear, a ocorrência média mensal de 8,45 dias com ZCAS, em cada mês. Quando o ONI apresenta valores absolutos baixos, de neutralidade, estima-se a ocorrência de 6,92 dias com ZCAS. Por fim, para períodos de EN, com ONI igual a + 1,5, estima-se a ocorrência média mensal de 5,38 dias com episódios de ZCAS em cada um dos meses estudados, conforme mostra o ajuste linear da Figura 28.



**Figura 28:** Diagrama de dispersão entre ONI e número de dias com ZCAS, para os meses de janeiro a março de 2000 a 2021.

Com base nos baixos valores de correlação linear entre ONI e a ZCAS e a noção de que o coeficiente de correlação linear exige uma associação linear entre as variáveis comparadas, o que nem sempre é observado em climatologia, optou-se por calcular o coeficiente de

contingência entre as variáveis consideradas. O teste de contingência mostra o grau de dependência entre as variáveis, que permite determinar se a ocorrência de uma pode estar associada à ocorrência da outra. A tabela de contingência seguinte (Tabela 5) mostra a ocorrência de ZCAS em cada uma das fases de ENOS, considerando o período de estudo, evidenciando a concentração de episódios nos períodos de La Niña, o que é constatado pela maior presença de ZCAS durante períodos com ONI inferior a - 0,5 e à menor ocorrência de ZCAS em períodos com valores de ONI superiores a + 0,5. O coeficiente de contingência, considerando-se as três fases de ENOS (EN, LN e neutro), para o período de 2000 a 2021, é igual a - 0,46, indicando associação moderada entre ENOS e a frequência de episódios de ZCAS.

**Tabela 5:** Tabela de contingência entre ENOS e o número de episódios de ZCAS para os meses de janeiro a março de 2000 a 2021.

ONI	El Niño	La Niña	Neutro	Total
Nº de ZCAS	24	42	22	<b>88</b>
Nº de meses sem ZCAS	5	2	6	<b>13</b>
<b>Total</b>	<b>29</b>	<b>44</b>	<b>28</b>	<b>202</b>

No que tange ao número de dias com ZCAS, o valor do coeficiente de contingência é igual a - 0,42, indicando associação moderada entre as variáveis, por meio de uma estatística não linear. A seguir é apresentada a tabela de contingência para a relação entre os dias com ZCAS e as fases do ONI (Tabela 6).

**Tabela 6:** Tabela de contingência entre ENOS e o número de dias com episódios de ZCAS para os meses de janeiro a março de 2000 a 2021.

ONI	El Niño	La Niña	Neutro	Total
<b>Sim (ZCAS)</b>	137	218	110	<b>465</b>
<b>Não (ZCAS)</b>	5	2	6	<b>13</b>
<b>Total</b>	<b>142</b>	<b>220</b>	<b>116</b>	<b>956</b>



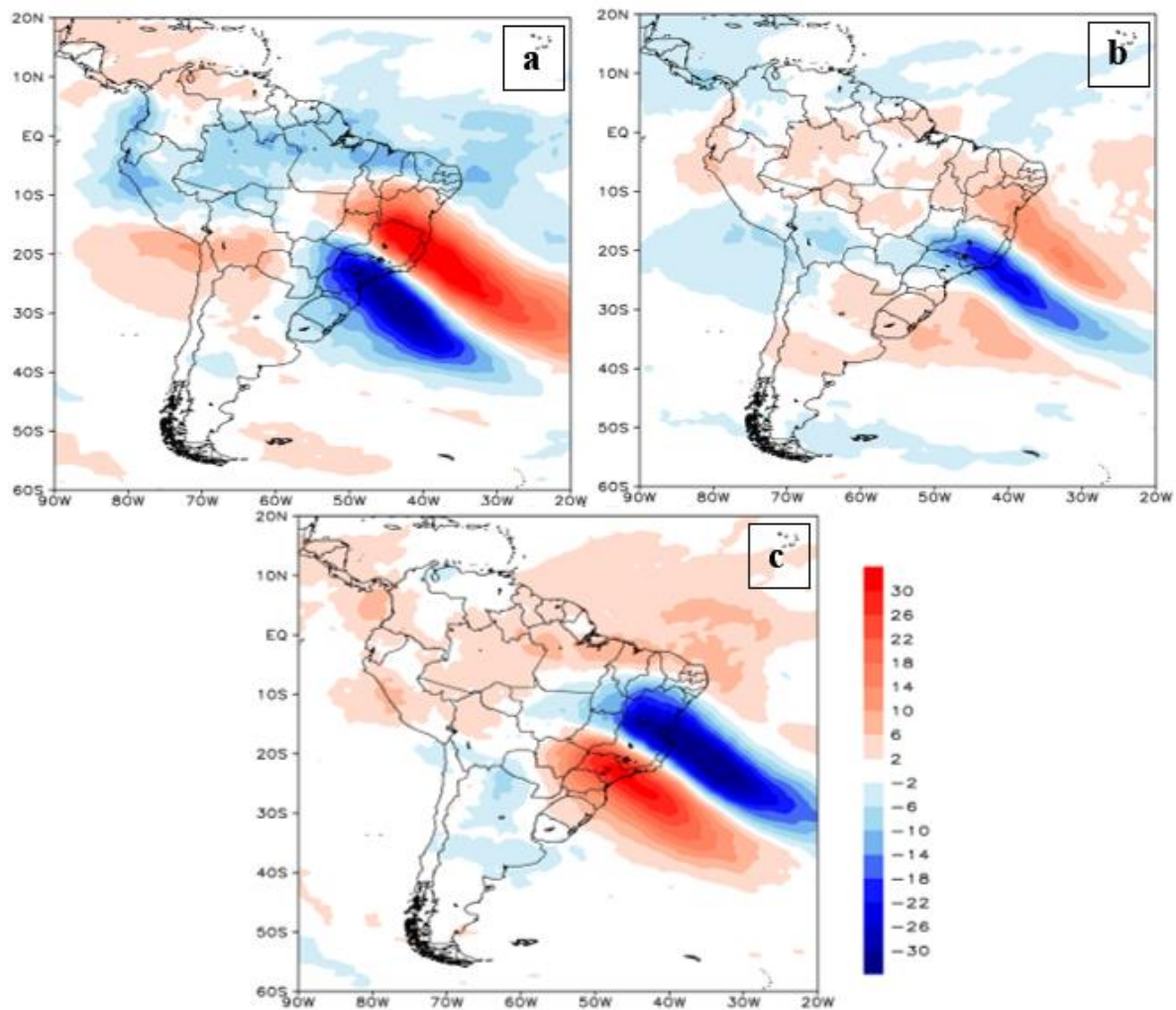
#### 4.2 – Posicionamento Meridional dos episódios de ZCAS

Adicionalmente ao cômputo do número mensal de episódios de ZCAS para toda a série temporal considerada, incluindo o número de dias com o sistema, o posicionamento meridional dos episódios de ZCAS em cada fase de ENOS foi verificado. A localização dos episódios de ZCAS foi determinada com base no valor médio da anomalia de radiação de onda longa nas áreas retangulares fixas, definidas na seção 3.3.1. De acordo com a Tabela 7, a maior concentração de episódios de ZCAS foi registrada na região norte e a menor concentração na área sul, com 36,4 % e 29,5 % das ocorrências, respectivamente. Entretanto, a ocorrência de episódios de ZCAS nas três áreas, Norte, Centro e Sul, é similar, sugerindo distribuição homogênea.

**Tabela 7:** Número de episódios de ZCAS nas áreas Norte, Centro e Sul, para o período de 2000 a 2021.

<b>Região</b>	<b>Nº de ZCAS</b>	<b>Porcentagem (%)</b>
Norte	32	36,4
Centro	30	34,1
Sul	26	29,5
<b>Total</b>	<b>88</b>	<b>100</b>

Os valores médios de ROL para os episódios de ZCAS situados em cada retângulo fixo mostra que as ocorrências na posição sul possuem anomalias negativa sobre São Paulo, sul de Minas Gerais e norte do Paraná, com valores positivos a norte, sobre Bahia e o norte de Minas Gerais, como o ‘padrão de gangorra’ apontado por (CARVALHO *et al.*, 2004) mostrado na Figura 29a. Durante os períodos em que as ZCAS estão fixadas sobre o Rio de Janeiro e sul de Minas Gerais, os valores negativos anômalos de ROL prevalecem nessa região, marcando sua posição central (Figura 29b), enquanto o ‘padrão de gangorra’ se apresenta bifurcado, com valores positivos sobre a Bahia e o Rio Grande do Sul, abrangendo o oceano adjacente a ambos. Por fim, em sua posição mais a norte, a anomalia negativa de ROL restringe-se ao sul da Bahia, norte de Minas Gerais e Espírito Santo, com sua gangorra movimentada para o sul (Figura 29c).



**Figura 29:** Anomalia de ROL ( $W m^{-2}$ ) para os episódios de ZCAS segmentados pela sua posição nos retângulos fixos. (a) episódios de ZCAS ao sul, (b) ZCAS em sua posição central e (c) episódios de ZCAS situados à norte.

Em relação às fases ENOS, a posição meridional das ZCAS parece apresentar distribuição meridional não similar. Nos períodos de La Niña, 36,6 % dos episódios de ZCAS foram registrados na área Norte, 36,6 %, na área central, e 26,8 %, na área sul; em nenhuma das posições a concentração de episódios foi superior a 40 %. Nos períodos de El Niño, a maioria dos episódios de ZCAS foram registrados na região Central, com mais de 47 % dos casos (Tabela 8); em cada uma das áreas Norte e Sul foram observados 26,3 % dos episódios de ZCAS nos períodos de EN. Nos períodos de neutralidade para o ENOS, os episódios de ZCAS localizaram-se preferencialmente na área Norte, com 42,9 % dos episódios; 35,7 % e 21,4 % dos episódios foram observados nas áreas Sul e Central, respectivamente. Assim, conclui-se que nos períodos de La Niña há uma distribuição homogênea, nos períodos Neutro os episódios de ZCAS se estabelecem preferencialmente na área Norte e nos períodos de El Niño, na área Central, sugerindo uma distribuição meridional não homogênea nas distintas fases de ENOS.

**Tabela 8:** Número de episódios de ZCAS nas áreas Norte, Centro e Sul para cada fase do ENOS.

Região	La Niña		El Niño		Neutro	
	ZCAS	%	ZCAS	%	ZCAS	%
Norte	15	36,6	5	26,3	12	42,9
Centro	15	36,6	9	47,4	6	21,4
Sul	11	26,8	5	26,3	10	35,7

O padrão de distribuição dos dias com ocorrências de ZCAS é semelhante ao observado pela frequência de episódios de ZCAS, a Tabela 9 mostra que há uma maior concentração de na região norte com 38,9 % enquanto a menor ocorre na área sul, com 28,4 %.

**Tabela 9:** Número de dias com episódios de ZCAS nas áreas Norte, Centro e Sul, para o período de 2000 a 2021.

Região	Nº de dias com ZCAS	Porcentagem (%)
Norte	181	38,9
Centro	152	32,7
Sul	132	28,4
<b>Total</b>	<b>465</b>	<b>100</b>

Considerando a frequência em dias com episódios de ZCAS em relação às fases ENOS e a posição meridional das ocorrências há uma distribuição meridional desigual. Nos períodos de La Niña, 40 % dos dias com ocorrências de ZCAS foram registrados na área Norte, 32,6 %, na área central, e 27,4 %, na área sul. Nos períodos de El Niño, a maior parte dos dias com episódios de ZCAS foram registrados na região Central, com mais de 45 % dos casos (Tabela 10). Nos períodos de neutralidade para o ENOS, os dias verificados com episódios de ZCAS localizaram-se preferencialmente na área Norte, com 42,6 % dos episódios. Assim, conclui-se que a distribuição dos dias com ocorrências de ZCAS acompanha o mesmo padrão observado na Tabela 8, onde as ocorrências de ZCAS são segregadas.

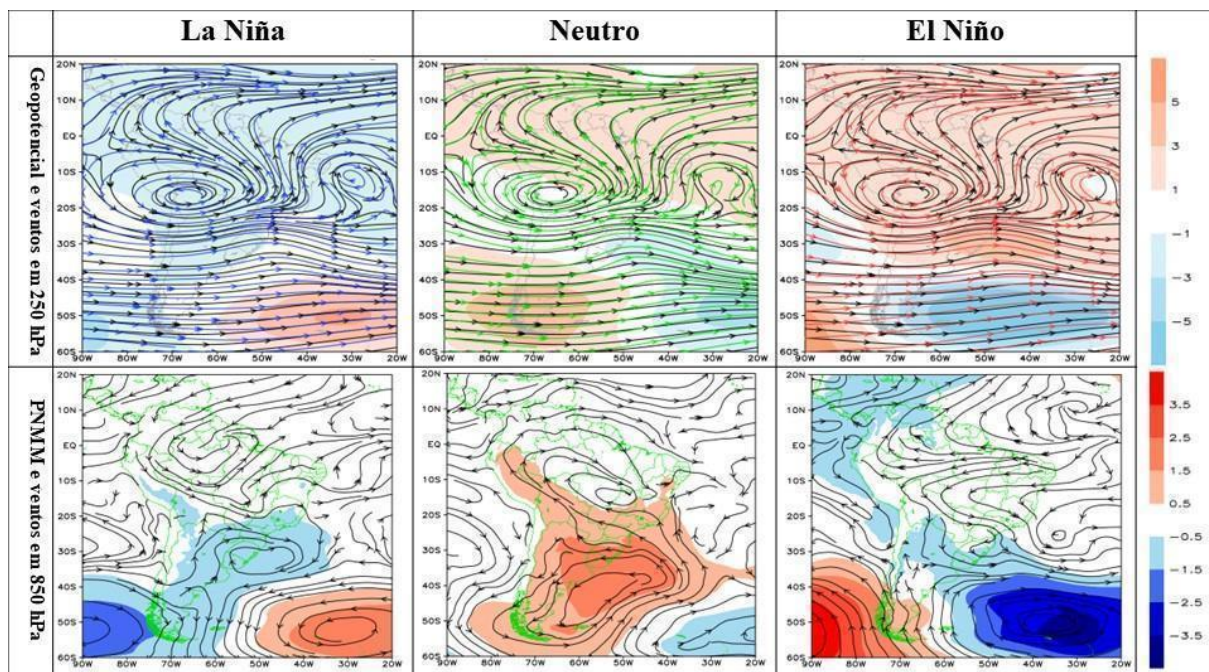
**Tabela 10:** Número de dias com episódios de ZCAS nas áreas Norte, Centro e Sul para cada fase do ENOS.

Região	La Niña		El Niño		Neutro	
	Dias com ZCAS	%	Dias com ZCAS	%	Dias com ZCAS	%
Norte	86	40,0	32	31,4	63	42,6
Centro	70	32,6	46	45,1	36	24,3
Sul	59	27,4	24	23,5	49	33,1

Os mapas de anomalia de ROL para os episódios de ZCAS em cada fase de ENOS nas áreas Norte, Central e Sul serão analisados na seção 4.4.

#### 4.3 – Circulação atmosférica de ZCAS nas fases de ENOS

Ao analisar as anomalias dos campos atmosféricos médios para os dias com episódios de ZCAS em cada uma das fases de ENOS, considerando o período de estudo, observa-se que durante os períodos de La Niña prevalece sobre toda a América do Sul uma anomalia negativa de altura geopotencial, oscilando entre - 1,5 e - 2,5 hPa, fortalecendo o VCAN-NE, enquanto nas outras fases do ENOS há valores positivos sobre o continente, resultando no enfraquecimento do sistema de baixa pressão em altos níveis atmosféricos (Figura 30). A circulação em 850 hPa, fundamental para analisar a mudança da convergência do ar durante episódios de ZCAS indica anomalias de noroeste sobre a Bolívia associada a anomalia ciclônica sobre o sul do Brasil durante os períodos de LN. Durante períodos neutros, verifica-se uma grande região sobre o sul da AS com anomalias anticiclônicas, anomalias de sudeste sobre a Bolívia e anomalia ciclônica sobre o centro-norte da AS. Durante os períodos de El Niño, os ventos voltam a se intensificar de noroeste para sudeste na região central da AS. Em baixos níveis, entre LN e EN, observa-se a alternância do sinal da anomalia de PNMM em latitudes médias, em torno de 50 °S, com valores negativos a oeste e positivos a leste nos períodos de LN e o contrário nos períodos de EN.



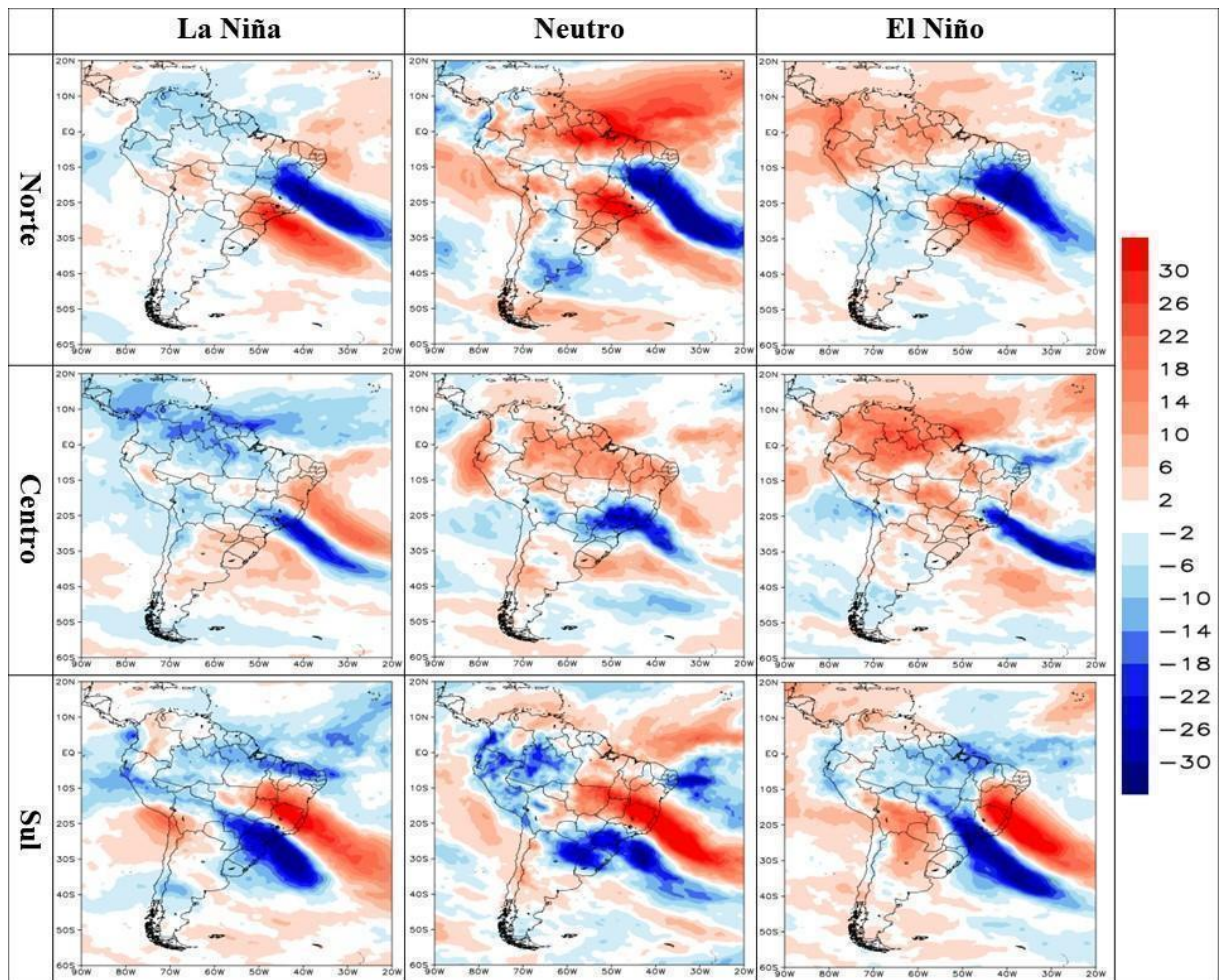
**Figura 30:** Linha de corrente em 250 hPa, anomalias de altura geopotencial (hPa), nos quadros superiores, e anomalia de pressão ao nível do mar e da circulação em 850 hPa nos quadros inferiores.

Com a análise dos campos atmosféricos divididos pelas fases do ENOS, nota-se que os episódios de ZCAS ocorridos durante a fase negativa do ENOS podem ocorrer de forma mais frequentes devido ao fortalecimento do VCAN-NE, enquanto nas outras duas fases de ENOS, ocorre o enfraquecimento do VCAN-NE, o que está associado à menor frequência de episódios de ZCAS.

#### 4.4 – Circulação atmosférica de ZCAS por região

Nesta seção são analisados os mapas com a ocorrência de ZCAS nas áreas Norte, Centro e Sul, nas três fases do ENOS. A Figura 31 mostra os campos atmosféricos médios de anomalia de ROL nas três fases do ENOS, La Niña, El Niño e neutro, para os episódios ocorridos nas três posições meridionais distintas. A ocorrência de anomalias negativas de ROL indica a posição média dos episódios de ZCAS. A ocorrência de episódios ao Norte está associada a anomalias negativas de ROL sobre o estado da BA, estendendo-se sobre o oceano Atlântico adjacente, com valores mais intensos durante os períodos neutros e mais suaves durante o período de La Niña, em oposição, sobre o estado de SP e Atlântico adjacente, observam-se

valores positivos da anomalia de ROL, o que está associado a menor formação de nebulosidade e, portanto, a mais movimento subsidente.

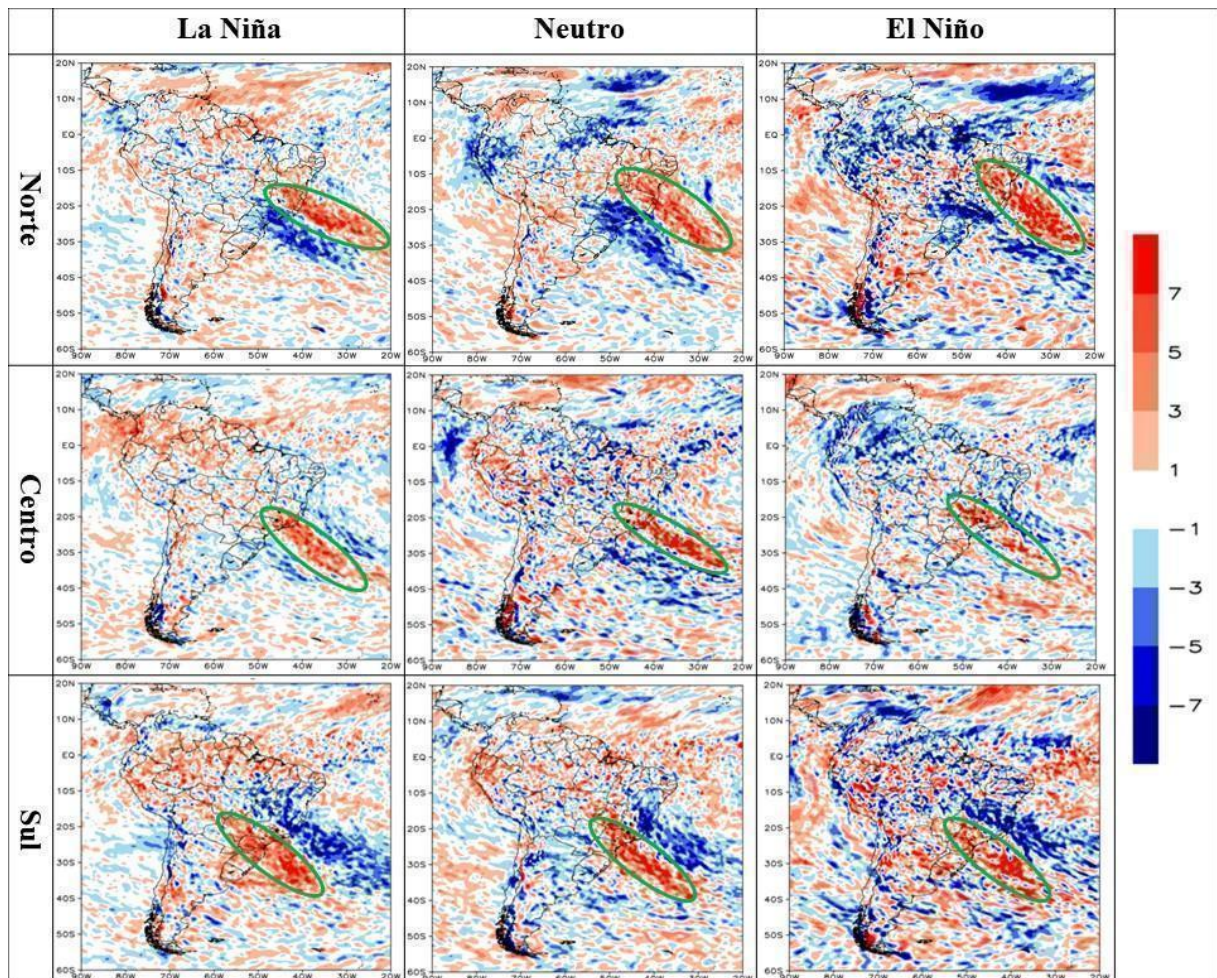


**Figura 31:** Anomalia de ROL ( $W m^{-2}$ ) para os episódios de ZCAS segmentados pelas fases do ENOS e pela posição nos retângulos fixos. Os números no canto superior de cada campo atmosférico dizem respeito ao número total de dias contido em cada cálculo de anomalia.

Em relação à região central, nas três fases do ENOS, a anomalia negativa de ROL aparece sobre o estado do RJ, estendendo-se também para o oceano Atlântico. Durante os períodos de El Niño e La Niña os valores anômalos negativos de ROL se enfraquecem na porção continental e se intensificam sobre o oceano. Nos episódios de ZCAS posicionadas ao sul, os valores anômalos negativos de ROL ficam restritos aos estados de São Paulo e Paraná durante o período de El Niño, alcançando o Rio Grande do Sul nas demais fases, assim como ao oceano adjacente. Os valores mais intensos de anomalia positiva de ROL posicionam-se a norte dos episódios de ZCAS. Em geral, os episódios de ZCAS posicionados ao norte e ao sul apresentam

valores mais intensos das anomalias de ROL, nas três fases do ENOS, em comparação com os episódios localizados na região central.

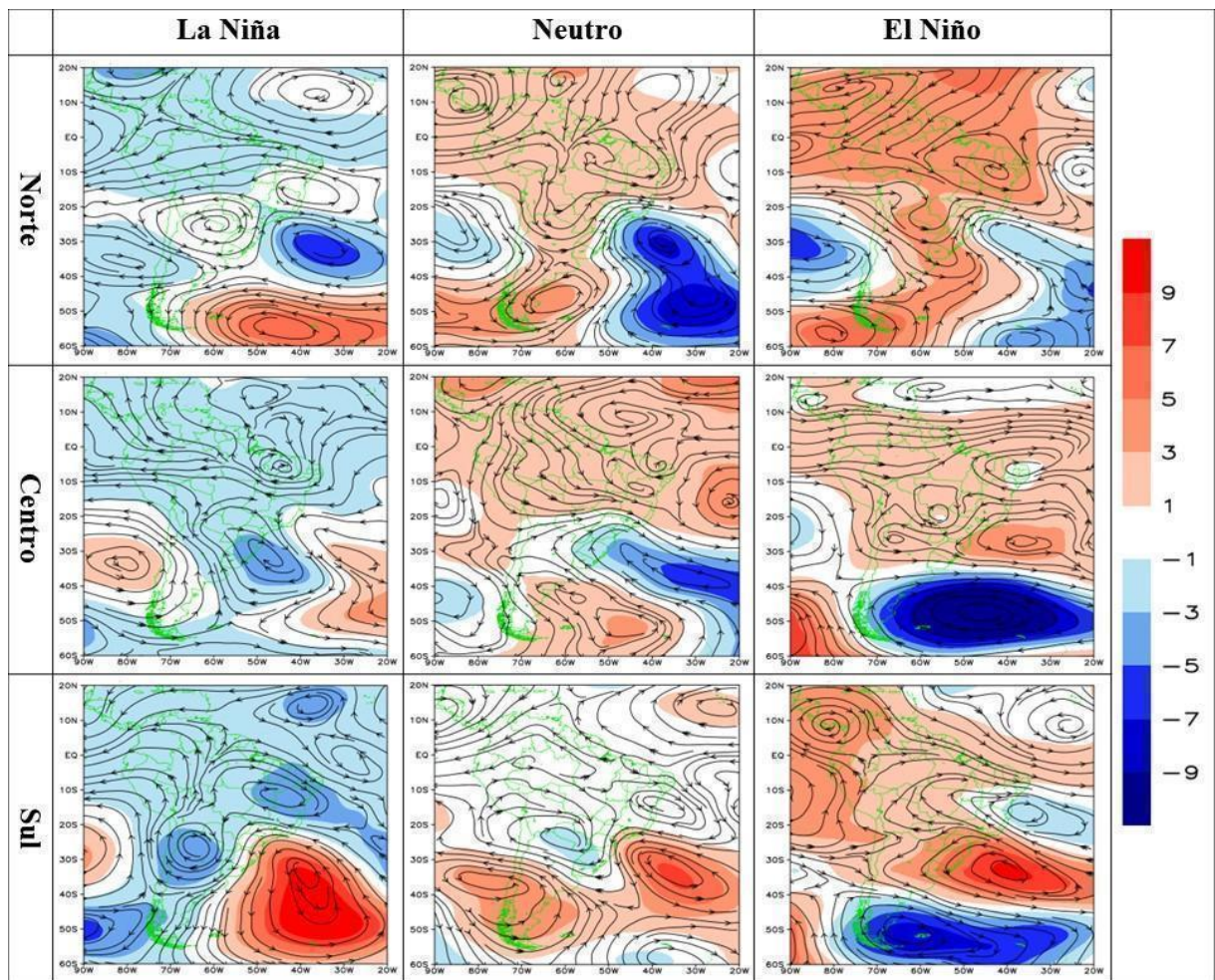
A divergência do vento em 250 hPa apresenta valores positivos na região de anomalia negativa de ROL, e valores negativos nas áreas adjacentes. Os valores positivos (negativos) de divergência em altos níveis estão associados a movimento ascendentes (descendentes) na média troposfera, propiciando (inibindo) a formação de convecção profunda.



**Figura 32:** Anomalia de divergência ( $\times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ ) em 250 hPa para os episódios de ZCAS segmentados pelas fases do ENOS e pela posição nos retângulos fixos. Os círculos em verde destacam a região com valores positivos contínuos e expressivos.

Nos períodos de La Niña e neutro, para as posições da ZCAS ao norte, centro e sul, observam-se anomalias negativas de altura geopotencial em 250 hPa (Fig. 33) em posições ao sul-sudoeste das áreas com anomalias negativas de ROL (Fig. 31). Por exemplo, nos períodos de La Niña, as anomalias negativas mais intensas de ROL, para a média dos episódios ocorridos ao norte, centro e sul, localizam-se sobre os estados da Bahia, Minas Gerais e São Paulo (Fig. 31), respectivamente, enquanto que as anomalias negativas mais intensas de altura geopotencial localizam-se sobre São Paulo, região Sul do Brasil e norte da Argentina (Fig. 33). Nos períodos

de El Niño, para os episódios de ZCAS localizados ao norte, centro e sul, observam-se também anomalias negativas de altura geopotencial em 250 hPa ao sudoeste das anomalias negativas mais intensas de ROL. Nos períodos neutros, os episódios de ZCAS localizados aos norte, identificados pelas anomalias de ROL (Fig. 31), estão associados a anomalias negativas de altura geopotencial em 250 hPa que atingem o litoral de São Paulo (Fig. 33), enquanto que para os episódios situados ao sul, o Paraguai, o norte da Argentina e o Rio Grande do Sul apresentam os valores negativos de altura geopotencial em 250 hPa, dando suporte ao escoamento de baixos níveis atmosféricos.

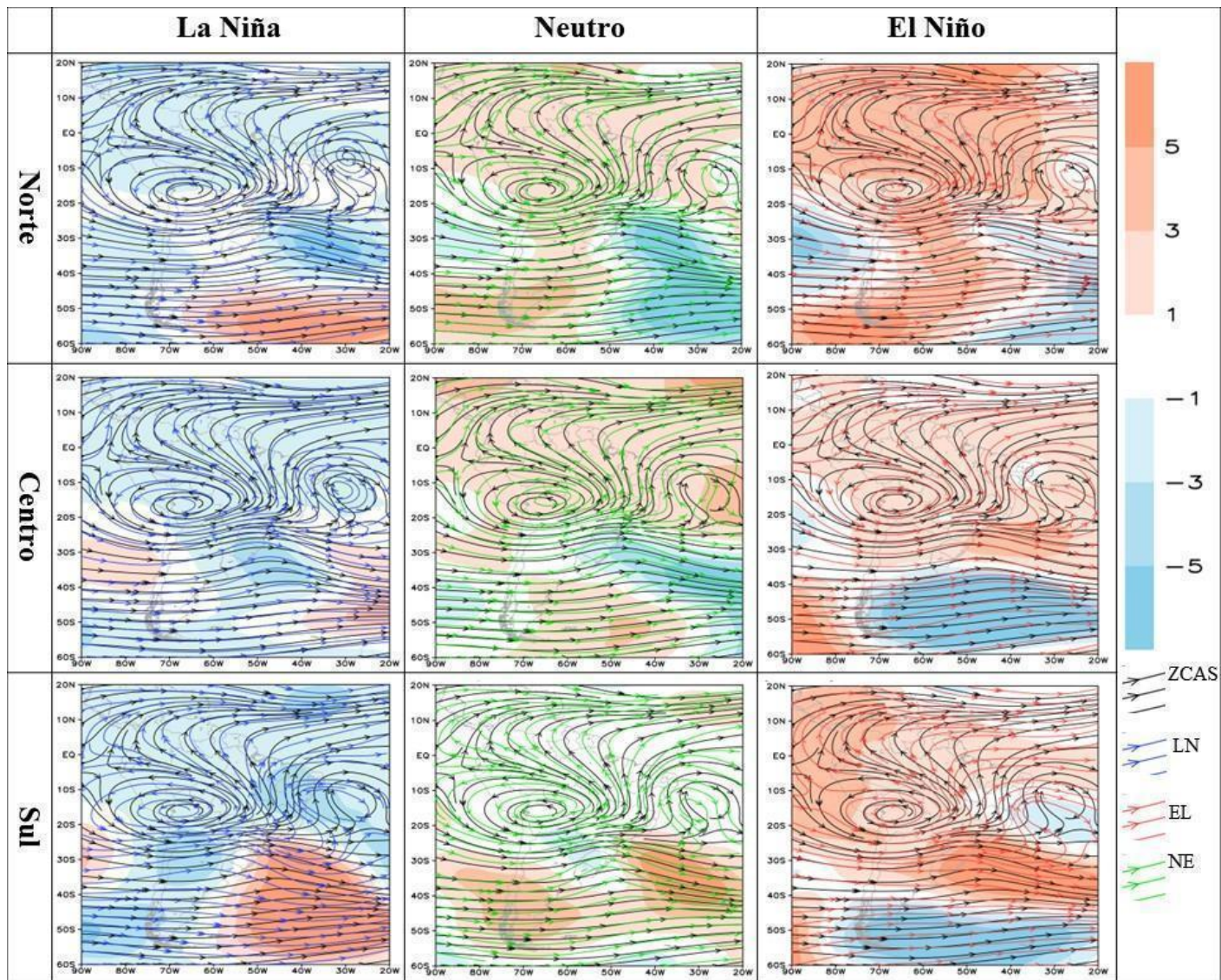


**Figura 33:** Anomalia de altura geopotencial (hPa) e de vento em 250 hPa (linhas de corrente) para os episódios de ZCAS segmentados pelas fases do ENOS e pela posição nos retângulos fixos.

Durante as fases de La Niña, o VCAN-NE encontra-se fortalecido nas três posições de ZCAS (norte, centro e sul), enquanto a AB fica enfraquecida, o que é indicado pelos valores de altura geopotencial. Para períodos de El Niño, o VCAN-NE se enfraquece para episódios de ZCAS ao norte e centro e se intensifica para episódios ao sul, já a AB encontra-se fortalecida em todas os casos de ZCAS. Nos períodos neutros, o VCAN-NE fica mais fraco para posições

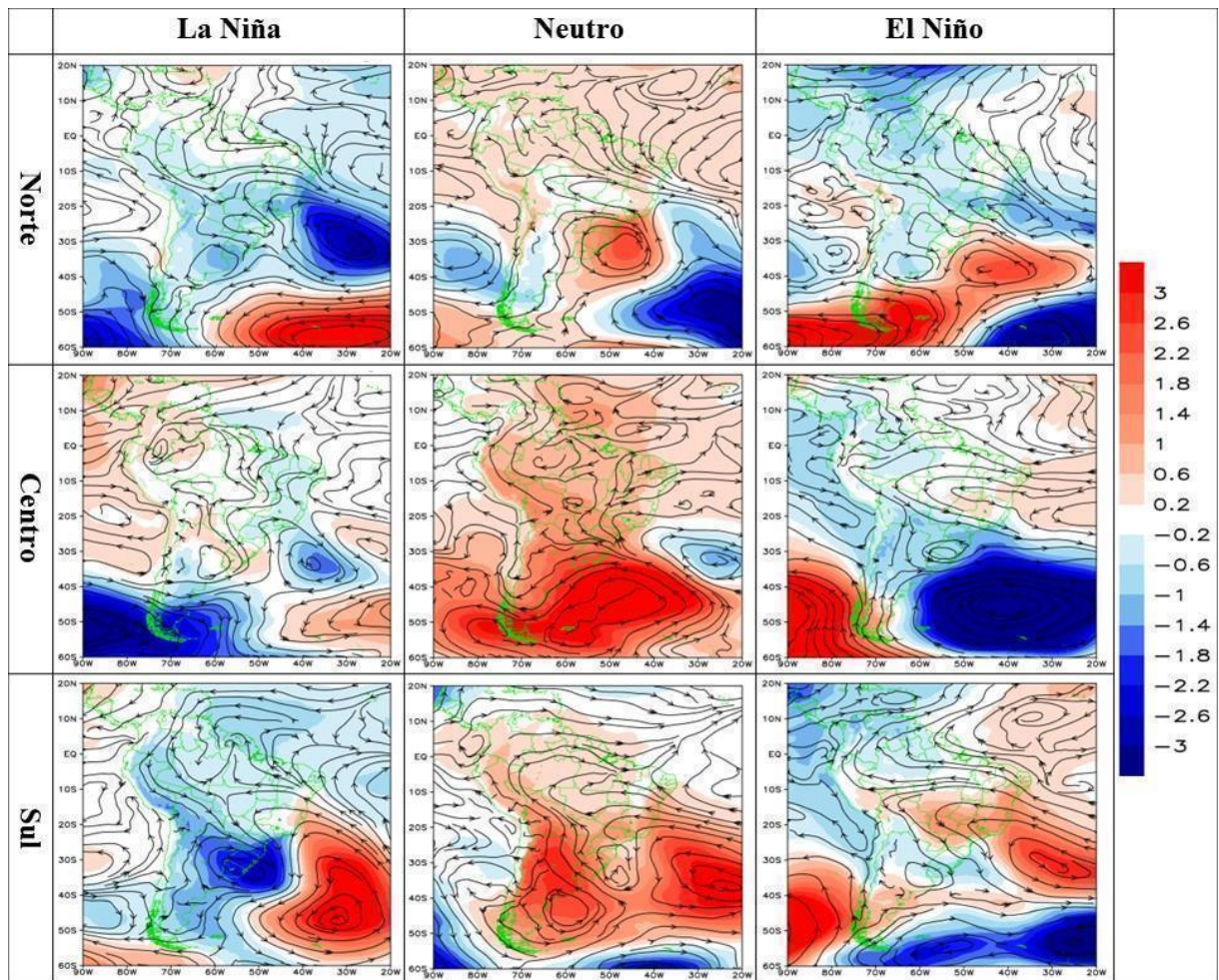


da ZCAS ao norte e ao centro, ficando próximo da média para episódios de ZCAS ao sul. Enquanto a AB não apresenta variações expressivas dentre as fases de ENOS e os períodos em que a ZCAS se encontra ao norte, ao centro e ao sul, o VCAN-NE mostra maior alteração. Migra para norte (nordeste) durante períodos de La Niña (El Niño e neutro) quando os episódios de ZCAS formam-se ao norte. Quando os episódios de ZCAS localizam-se na posição central, o VCAN move-se para oeste, em direção ao litoral de Pernambuco, em todas as fases do ENOS. Por fim, para os episódios de ZCAS posicionados ao sul, o VCAN-NE situa-se sobre o litoral da Bahia, em todas as fases do ENOS. Sintetizando, quando os episódios de ZCAS estão posicionados ao norte, o VCAN-NE move-se em direção a linha do Equador em todas as fases de ENOS, com destaque para uma movimentação maior durante a La Niña; nos períodos com episódios de ZCAS ao centro, o VCAN-NE permanece em sua posição climatológica, com centro próximo ao litoral de Pernambuco, nas três fases do ENOS; em períodos com os episódios de ZCAS deslocados para o sul, o VCAN-NE apresenta valores mais intensos com centro posicionado sobre a Bahia, ao sul de sua posição climatológica, independente da fase do ENOS, tal como verificado por Nielsen et al. (2019).



**Figura 34:** Anomalia de altura geopotencial (hPa) e vento em 250 hPa para a médias de todos os episódios de ZCAS (linhas de corrente em preto) segmentados pelas fases de ENOS (linhas de corrente em azul, para LN; em verde, para neutro; e em vermelho, para EN) e pela posição meridional dos episódios.

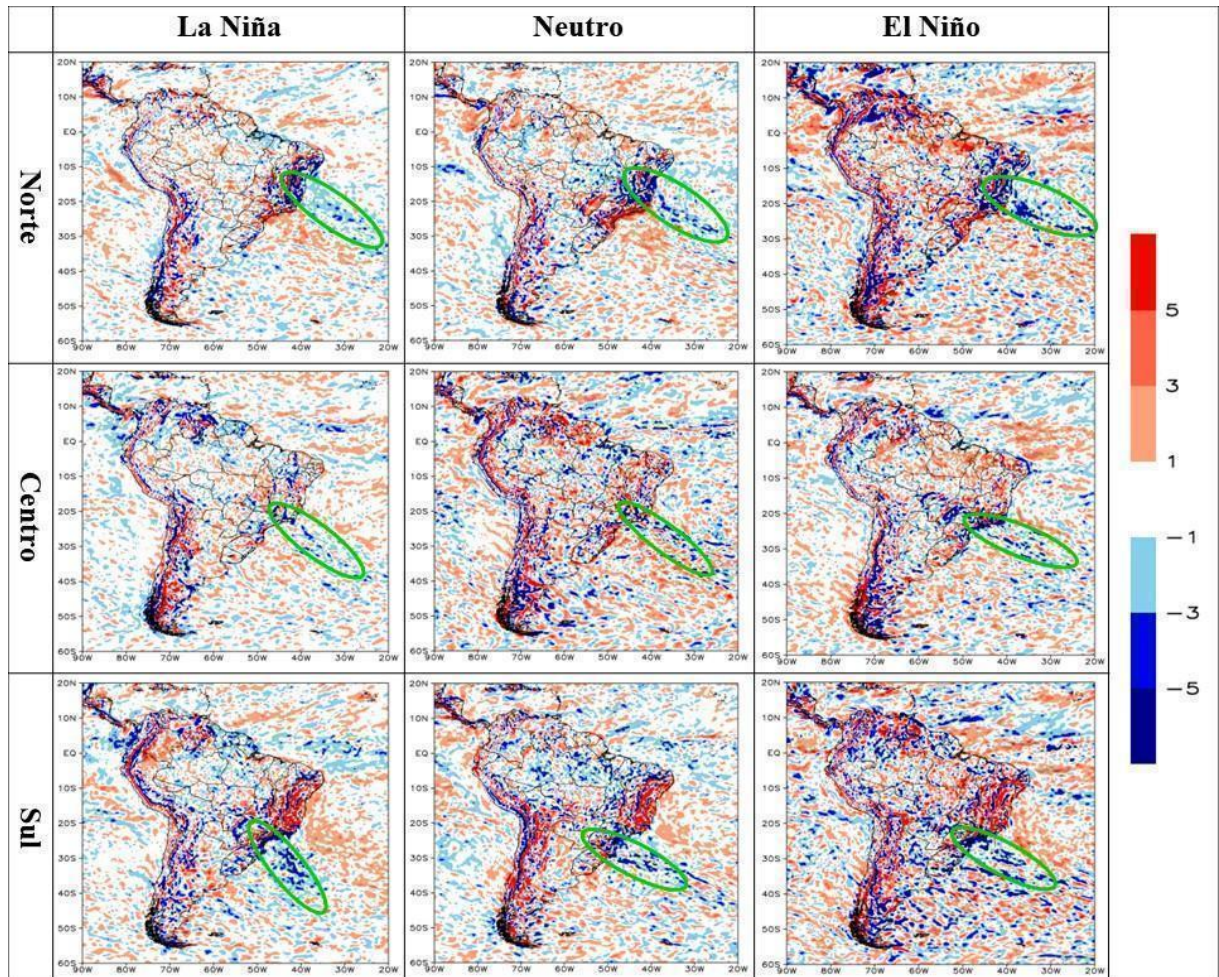
Assim como os campos de anomalia de altura geopotencial em 250 hPa (Fig. 33, 34), os campos de anomalia de pressão ao nível do mar e o escoamento atmosféricos em baixos níveis (Fig. 35) também contribuem para explicar as anomalias de ROL associadas aos episódios de ZCAS nas fases distintas de ENOS. Nos períodos de La Niña, anomalias mais intensas e negativas de PNMM e anomalias ciclônicas da circulação em 850 hPa atingem o litoral da Bahia, Minas Gerais e Rio de Janeiro e a região sul do Brasil, contribuindo para a formação de episódios de ZCAS nas áreas norte, central e sul (coluna esquerda da Fig. 35). Os episódios de ZCAS, ao norte e ao centro, registrados durante os períodos neutros de ENOS, apresentam anomalias negativas de PNMM e anomalias ciclônicas de circulação sobre o Atlântico Sul que atingem o litoral da Bahia, Rio de Janeiro e Minas Gerais (coluna central da Fig. 35), respectivamente. Os episódios de ZCAS localizados ao sul, durante períodos neutros de ENOS, estiveram associados a anomalias ciclônicas formadas entre duas regiões anômalas de pressões relativamente mais altas centradas no Atlântico Sul, atingindo toda a Argentina, e outra mais a leste, no centro do Atlântico Sul, centrada em (25 °O; 35 °S). Nos períodos de EN (coluna à direita, Fig. 34), os episódios de ZCAS estiveram associados a anomalias negativas médias de PNMM e anomalias ciclônicas da circulação nas três posições meridionais consideradas (norte, centro e sul).



**Figura 35:** Anomalia de pressão ao nível do mar (hPa) e vento (linha de corrente) em 850 hPa para os episódios de ZCAS segmentados pelas fases do ENOS e pela posição nos retângulos fixos.

Em relação aos valores anômalos de divergência do ar em 850 hPa, Figura 36, os círculos verdes destacam a região com valores negativos mais expressivos, ou seja, representando as regiões com convergência do ar. Nos eventos situados a norte, esta configuração restringe-se ao estado da Bahia, com valores menos intensos na La Niña; nas ZCAS posicionadas ao centro, os valores de convergência localizam-se na altura do litoral do RJ. Por fim, nos eventos localizados ao sul, os valores anômalos de convergência do ar em 850 hPa mostram valores mais intensos no litoral dos estados de SP e PR. As regiões de convergência do ar em baixos níveis correspondem aproximadamente às mesmas regiões com valores mais intensos de divergência em altos níveis atmosféricos (Figura 32), indicando a formação de uma célula de circulação vertical, onde o ar converge no interior dos episódios de ZCAS em baixos níveis, ascende por boa parte da troposfera e diverge em 250 hPa, voltando a convergir em altos níveis e a entrar em subsidência até níveis mais baixos, nas adjacências, caracterizando as células de circulação vertical discutidas por Nielsen *et al.* (2019). Quando as ZCAS estão posicionadas ao norte verifica-se apenas uma célula vertical, com ramo ascendente

sobre a Bahia e outro ramo subsidente ao sul; quando o corredor de valores baixos de ROL está localizado na área central, observam-se duas células verticais, com ramos subsidentes ao norte e ao sul, por fim, quando os episódios de ZCAS estão localizados ao sul, sobre os estados de São Paulo e Paraná, o ramo subsidente localiza-se ao norte, na altura do norte de Minas Gerais e Bahia.



**Figura 36:** Anomalia de divergência ( $\times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ ) em 850 hPa para os episódios de ZCAS segmentados pelas fases do ENOS e pela posição nos retângulos fixos. Os círculos em verde destacam a região com valores negativos contínuos e expressivos.

## 5 – CONCLUSÃO

Respondendo por quase um terço de todo o volume de chuva observado na região Sudeste do Brasil (NIELSEN et al., 2019) e por mais da metade do volume de chuva do mês de março, com 51 % de toda precipitação mensal, os episódios de ZCAS têm impactos diretos no regime de chuvas da região mais densamente povoada e economicamente ativa; onde também se localiza a maior parte dos reservatórios para a geração de energia hidrelétrica do Brasil e da América do Sul. Dessa forma, aprofundar o conhecimento sobre a variabilidade climática das ZCAS é fundamental, tanto para as atividades econômicas, industriais e agrícolas, para o abastecimento populacional de água e energia, como para a manutenção de ecossistemas, como o Pantanal, a Amazônia e a Mata Atlântica. Entender os padrões responsáveis pelo posicionamento dos episódios de ZCAS é de extrema relevância: os episódios posicionados ao norte favorecem o regime de chuva no semiárido mineiro e baiano, assim como na bacia do rio São Francisco, enquanto que as ocorrências situadas ao centro e sul eleva o nível dos reservatórios de água da bacia do rio Paraná, fundamental para a geração de energia, porém, também possuem potencial para deflagrar desastres naturais, como movimentos de massa e inundações.

O estudo da variabilidade climática interanual da ZCAS permitiu verificar a alta complexidade do sistema climático, evidenciando a dificuldade em se definir padrões de associação entre diversos elementos do clima. Ao mesmo tempo, sabe-se que o acoplamento entre atmosfera e oceano gerado pela redistribuição de calor no Pacífico Equatorial está associado à formação do ENOS (BARRY; CHORLEY, 2013; COSTA; BLANCO, 2018; MCPHADEN, 2002), o qual impacta globalmente a precipitação, especificamente na América do Sul, elevando os totais pluviométricos sobre as regiões Norte e Nordeste do Brasil durante sua fase negativa, e no Sudeste da América do Sul, durante a fase positiva (CAI et al., 2020; CAVALCANTI; AMBRIZZI, 2021; LAUREANTI; GRIMM, 2019). No Sudeste do Brasil, região de atuação da ZCAS, os valores de precipitação tendem a pequenas anomalias positivas e negativas, respectivamente, durante as fases de La Niña e El Niño (CAI et al., 2020; CAVALCANTI; AMBRIZZI, 2021; LAUREANTI; GRIMM, 2019).

Neste estudo buscou-se identificar a associação entre a ocorrência de episódios de ZCAS com o fenômeno ENOS, nos meses de janeiro a março de 2000 a 2021. Dados de radiação de onda longa, água precipitável e vento da quinta reanálise do ECMWF, ERA-5, foram usados na identificação diária dos episódios de ZCAS. As fases do ENOS foram

determinadas a partir dos dados do ONI, disponibilizados pela NOAA. Além da contagem do número de episódios de ZCAS em cada fases do ENOS, eles foram classificados de acordo com sua posição meridional na América do Sul, sendo associados a padrões atmosféricos de divergência do ar em 250 hPa e convergência em 850 hPa, pressão ao nível médio do mar, altura geopotencial e ventos em baixos e altos níveis. Sendo esse o primeiro trabalho a associar o posicionamento dos episódios de ZCAS com as fases do ENOS, abarcando desde a quantidade de episódios até os padrões atmosféricos característicos.

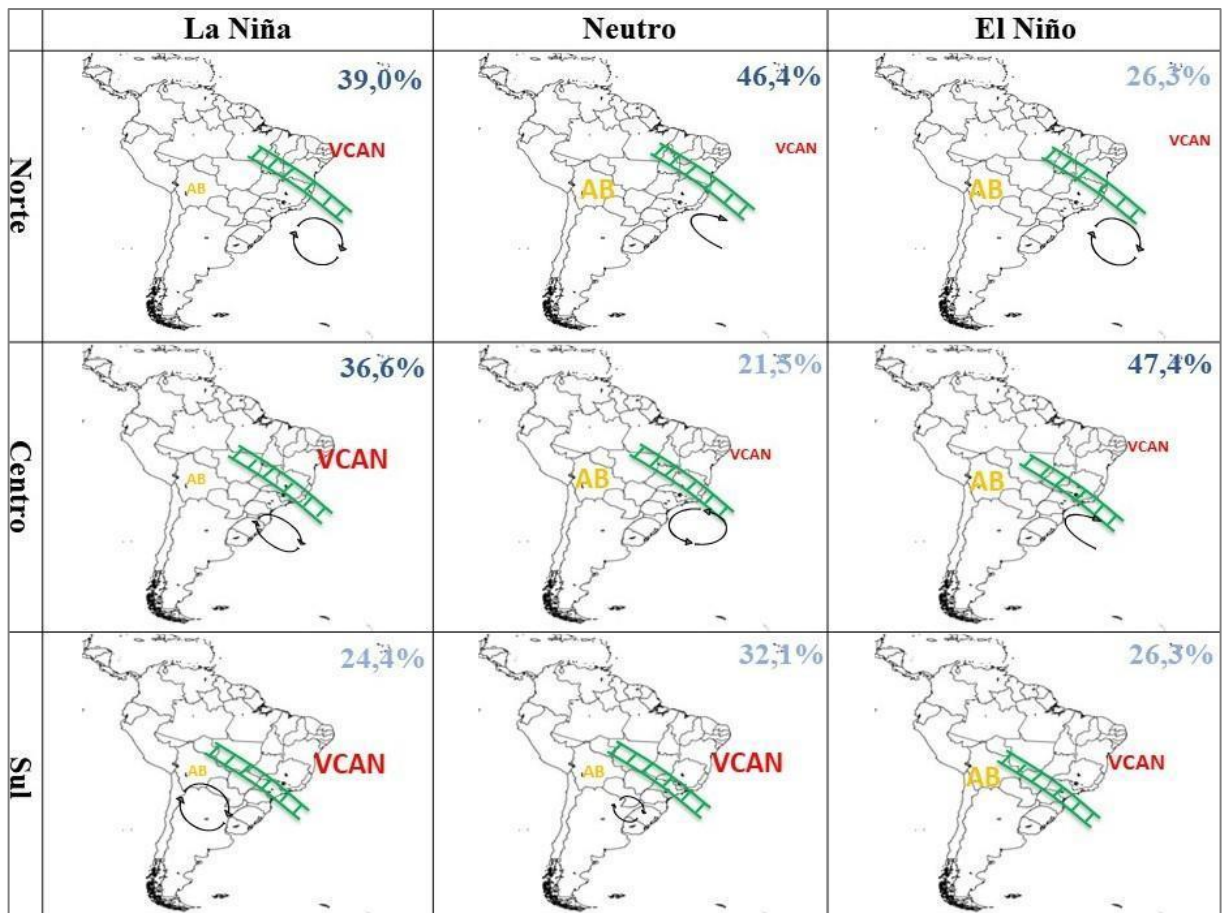
Os resultados do presente estudo mostram que os episódios de ZCAS ocorreram mais frequentemente durante os eventos de La Niña, equivalendo a 46,6 % do total dos episódios registrados entre 2000 e 2021, nos meses de janeiro a março. Nas fases Neutra e de El Niño, foram registrados 31,8 % e 21,6 % de episódios de ZCAS, respectivamente. Tais resultados estão em consonância com os obtidos por Carvalho, Jones e Liebmann (2004) e Ferreira, Sanches e Silva Dias (2004), que verificaram maior frequência de ZCAS sobre o continente durante a fase negativa do ENOS, no período de 1979 a 1996 e de 1980 a 2000, respectivamente, como também por Cai *et al.* (2020), que verificaram anomalias positivas da precipitação sobre o sudeste brasileiro nos períodos de La Niña, de 1948 a 2016, sem considerar os episódios de ZCAS. A maior ocorrência de ZCAS em períodos de La Niña é confirmada pelas estatísticas empregadas, tanto o coeficiente de correlação linear de Pearson como o coeficiente de contingência, cujos valores obtidos foram, respectivamente, - 0,205 e - 0,42, indicando baixa e média associação entre a ocorrência de ENOS e ZCAS. A análise da localização meridional dos episódios de ZCAS em relação às três fases distintas de ENOS mostra que há certa homogeneidade espacial do número de episódios nas áreas norte, centro e sul durante os meses com La Niña (norte: 39 %; centro: 36,6 %; sul: 24,4 %). Por outro lado, os meses classificados como El Niño e Neutro apresentam mais episódios na área central (47,4 %) e norte (46,4 %), respectivamente. Todos os episódios de ZCAS identificadas estão disponíveis no drive, através do link [https://drive.google.com/drive/folders/16fGN-ebkayoVi3rLe4wypdcCnb4yFCDI?usp=share link](https://drive.google.com/drive/folders/16fGN-ebkayoVi3rLe4wypdcCnb4yFCDI?usp=share_link).

A análise da circulação atmosférica permitiu verificar que a posição das anomalias positivas (negativas) de divergência do ar em 250 hPa são coincidentes com a posição das anomalias negativas (positivas) de ROL, caracterizando individualmente os episódios de ZCAS, assim como observado por Nielsen *et al.* (2018), indicando a presença de movimento ascendente do ar no interior da ZCAS, área de maior convergência em baixos níveis, e, subsidente em sua periferia. Tal aspecto é perceptível não só na análise dos episódios

individuais de ZCAS, mas também para a média dos episódios registrados nas áreas norte, central e sul em cada fase do ENOS. Os campos anômalos de PNMM e da circulação atmosférica em baixos níveis permitem identificar anomalias negativas de pressão e anomalias ciclônicas na região de localização dos valores baixos de ROL para a média dos episódios registrados nas áreas norte, central e sul. Os campos anômalos de altura geopotencial e circulação atmosférica em altos níveis contribuíram para a compreensão dos padrões atmosféricos observados durante os episódios de ZCAS: anomalias negativas de altura geopotencial e anomalias ciclônicas foram observadas ao sul e sudoeste da posição média dos episódios de ZCAS, separados nas regiões meridionais distintas (norte, central e sul), indicando que os níveis altos da atmosfera estão associados à formação da convergência do ar de baixos níveis que caracterizam os episódios de ZCAS. Tais resultados estão de acordo com as anomalias de vorticidade relativa encontradas por Ferreira, Sanches e Silva Dias (2004), na análise dos padrões atmosféricos associados a episódios de ZCAS no período de 1980 a 2000.

Com o intuito de sintetizar os resultados obtidos nesta pesquisa científica, apresenta-se, na Figura 37, uma proposta de esquema da circulação atmosférica média em cada situação analisada, considerando-se as posições meridionais dos episódios de ZCAS e as fases de ENOS. Durante os períodos de La Niña verifica-se o fortalecimento do VCAN-NE e o enfraquecimento da AB. Nas fases neutra e de El Niño, tais aspectos apresentam anomalias contrárias, com o enfraquecimento do VCAN-NE e o fortalecimento da AB. Estes resultados contribuem para justificar a maior presença de episódios de ZCAS no decorrer dos períodos de La Niña. Em relação à posição das ZCAS, os episódios na região norte (Bahia e norte do Espírito Santo) apresentam VCAN-NE deslocado para norte e uma anomalia de baixa pressão na altura do Rio de Janeiro e São Paulo. Quando os episódios de ZCAS estão localizados ao centro, a anomalia ciclônica de altos níveis move-se para o sul, na altura de Santa Catarina, permitindo que o corredor de umidade alcance o Rio de Janeiro. Exceção ocorre durante os episódios de ZCAS localizados na área central, em períodos de El Niño, quando se observa anomalia anticiclônica em 250 hPa ao sul da ZCAS, próximo ao litoral de São Paulo. O padrão atmosférico associado aos episódios de ZCAS que se formam na área sul aponta para o fortalecimento do VCAN-NE e seu posicionamento ao sul da posição climatológica, além de alterações da circulação anômala em 250 hPa, a qual migra para o norte da Argentina na La Niña, desaparece durante os períodos neutros e enfraquece no El Niño. Essa configuração pode empurrar os episódios de ZCAS para o sul.





**Figura 37:** Esquema da circulação atmosférica em cada situação analisada, onde: o valor em porcentagem indica a frequência dos episódios de ZCAS em cada posição (com destaque para os valores maiores), a escada em verde representa a posição média dos episódios de ZCAS atrás da anomalia negativa de ROL, as setas circulares mostram a anomalia de circulação em 250 hPa e o fortalecimento (enfraquecimento) do VCAN-NE e da AB é mostrado pela grafia dos mesmos com letras maiores (menores).

O estudo apresenta algumas limitações, principalmente envolvendo o fato de o recorte temporal não abranger todos os meses com ocorrência de ZCAS, mas apenas os meses de janeiro a março, justificado por esse período conter o maior número de episódios, segundo Quadro (1999). Uma análise mais criteriosa sobre os padrões atmosféricos associados às posições dos episódios de ZCAS e às fases do ENOS, incluindo o cálculo de significância estatística para os campos médios e a análise dos campos referentes a cada episódio de ZCAS é outro aspecto a ser abordado em trabalhos futuros. Outro aspecto não abordado neste estudo, mas que merece aprofundamento em trabalhos futuros, é a análise dos impactos sociais e ambientais associados a episódios de ZCAS, tais como inundações e secas.

Analisando um breve histórico dos desastres naturais provocados por eventos extremos de precipitação no Brasil, verifica-se que há uma relação com o padrão de posicionamento identificado para os eventos de ZCAS. No ano de 2011 a região serrana do Rio de Janeiro foi

afetada por inúmeros movimentos de massa provocados por eventos extremos de precipitação, vitimando 918 pessoas (EXAME, 2022), sendo esse período caracterizado por uma La Niña. Em contrapartida, em janeiro de 2020, durante uma fase neutra do ENOS, o Espírito Santo e o centro de Minas Gerais foram atingidos por fortes chuvas, resultando na morte de 62 pessoas e mais de 80 mil desabrigados e desalojados (G1, 2020). Mais recentemente, em fevereiro de 2023, o litoral norte de São Paulo foi afetado por um evento semelhante, porém em uma fase de La Niña, enchentes e deslizamentos tiraram a vida de 65 pessoas (Correio Braziliense, 2023). Assim como o evento de seca ocorrido entre os anos de 2014 e 2015 na região Sudeste do Brasil, durante um período de El Niño. Dessa forma, os desastres naturais deflagrados por extremos de precipitação seguem o padrão observado pelo presente estudo, com redução (aumento) de eventos extremos de precipitação durante os períodos de El Niño (La Niña), com homogeneidade em seu posicionamento durante a fase de La Niña e concentração na região norte e centro durante o período neutro e de El Niño, respectivamente. Ao passo que este breve retrospecto ajuda na validação dos resultados obtidos nessa dissertação, eles demonstram também a premência da continuidade e aprofundamento de estudos desta natureza, com vistas a um melhor planejamento dos órgãos de gestão dos riscos e desastres.

Resumindo, foi possível observar que os episódios de ZCAS estiveram mais frequentes durante os períodos de La Niña e que se formaram em posições meridionais distintas, movendo-se para norte, atingindo o litoral da Bahia, com o deslocamento do VCAN-NE para norte e a presença de anomalias ciclônicas ao sul da ZCAS, e, para o sul, atingindo o litoral de São Paulo, quando o VCAN-NE encontrava-se ao sul de sua posição climatológica, atingindo o litoral da Bahia e com anomalia ciclônica mais fraca ao sul da ZCAS. Tais resultados evidenciam a relevância da intensidade e localização do VCAN-NE e das anomalias negativas de altura geopotencial em altos níveis para o posicionamento dos episódios de ZCAS, tal como observado por Nielsen et al. (2018), sem, no entanto, terem discutido os padrões associados às fases de ENOS. Durante os períodos de La Niña foi observado o fortalecimento do VCAN-NE, associando-se à maior frequência de episódios de ZCAS, enquanto que nas outras fases do ENOS, El Niño e neutro, o enfraquecimento do VCAN-NE esteve associado à menor frequência dos episódios de ZCAS.

## 6 – BIBLIOGRAFIA

ANDREOLI, R. V. et al. The influence of different El Niño types on the South American rainfall. **International Journal of Climatology**, v. 37, n. 3, p. 1374–1390, mar. 2017.

ALVES, J. M. B. et al. Modelos acoplados do IPCC-AR4 e o gradiente meridional de temperatura da superfície do mar no Atlântico Tropical: relações com a precipitação no norte do nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 29, n. 4, p. 568–578, dez. 2014.

AMBRIZZI, T.; FERRAZ, S. E. T. An objective criterion for determining the South Atlantic Convergence Zone. **Frontiers in Environmental Science**, v. 3, 23 abr. 2015.

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, n. 7, p. 745–763, abr. 2002.

BARRY, R. G.; CHORLEY, R. J. **Atmosfera, Tempo e Clima**. 9. ed. Porto Alegre: Editora Bookman, 2013.

BRAGA, H. A.; AMBRIZZI, T.; HALL, N. M. J. Relationship between interhemispheric Rossby wave propagation and South Atlantic convergence zone during La Niña years. **International Journal of Climatology**, jul. 2022.

CAI, W. et al. Climate impacts of the El Niño–Southern Oscillation on South America. **Nature Reviews Earth & Environment**, v. 1, p. 215–231, 2020.

CARVALHO, L. M. V.; JONES, C.; LIEBMANN, B. Extreme Precipitation Events in Southeastern South America and Large-Scale Convective Patterns in the South Atlantic Convergence Zone. **Journal of Climate**, v. 15, n. 17, p. 2377–2394, set. 2002.

CARVALHO, L. M. V.; JONES, C.; LIEBMANN, B. The South Atlantic Convergence Zone: Intensity, Form, Persistence, and Relationships with Intraseasonal to Interannual Activity and Extreme Rainfall. **Journal of Climate**, v. 17, n. 1, p. 88–108, 2004.

CAVALCANTI, I. F. A.; AMBRIZZI, T. Teleconexões e suas influências no Brasil. In: **Clima das regiões brasileiras e variabilidade climática**. 1. ed. São Paulo: Oficina de Texto, 2021. p. 145–161.

CAVALCANTI, I. F. A.; SHIMIZU, M. H. Climate Fields over South America and Variability of SACZ and PSA in HadGEM2-ES. **American Journal of Climate Change**, v. 01, n. 03, p.

132–144, 2012.

CERÓN, W. L. et al. Recent intensification of extreme precipitation events in the La Plata Basin in Southern South America (1981–2018). **Atmospheric Research**, v. 249, p. 105299, 1 fev. 2021.

CERQUEIRA, F. V. **Avaliação do modelo Eta durante episódios de ZCAS**. [s.l.] Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2006.

CHAVES, R. R.; NOBRE, P. Interactions between sea surface temperature over the South Atlantic Ocean and the South Atlantic Convergence Zone. **Geophysical Research Letters**, v. 31, n. 3, p. L03204, 2004.

CHAVES, R. R.; SATYAMURTY, P. Estudo das condições regionais associadas a um evento de forte ZCAS em janeiro de 2003. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 21, n. 1, p. 234–140, set. 2006.

COELHO, C. A. S. et al. The 2014 southeast Brazil austral summer drought: regional scale mechanisms and teleconnections. **Climate Dynamics**, v. v. 46, n. issue 11, p. 3737–3752, 2016.

COSTA, L. F. DA et al. Crise hídrica na Bacia do Rio Paraíba do Sul: enfrentando a pior estiagem dos últimos 85 anos. In: **Revista Ineana**. 3. ed. Rio de Janeiro: Revista Ineana, 2015. p. 26–47.

CUNHA, G. R. Oscilação do Sul e perspectivas climáticas aplicadas no manejo de culturas no sul do Brasil. **EMBRAPA**, 1999.

ECMWF. **ERA5: Fifth generation of ECMWF atmospheric reanalyses of the global climate**. Disponível em: <<https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/home>>. Acesso em: 1 set. 2022.

EMANUEL, K. Increasing destructiveness of tropical cyclones over the past 30 years. **Nature**, v. 436, n. 7051, p. 686–688, 31 ago. 2005.

ESCOBAR, G. C. J. Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS): Critério de Detecção para Uso em Centros Operacionais de Previsão de Tempo. **Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE**, p. 19, 2019.

ESCOBAR, G. C. J.; DE ALMEIDA MARQUES, A. C.; DEREZYNSKI, C. P. Synoptic patterns of South Atlantic Convergence Zone episodes associated with heavy rainfall events in

- the city of Rio de Janeiro, Brazil. **Atmosfera**, v. 35, n. 2, p. 287–305, 1 abr. 2022.
- FAGGIANI, A. P. DA S. et al. Special Edition Estudo das componentes do balanço hidrológico durante episódios de ZCAS Study of the components of the hydrological balance during episode of SACZ. **Ciência e Natura**, v. 42, 2020.
- FERREIRA, N. J.; SANCHES, M. B.; SILVA DIAS, M. A. F. DA. Composição da Zona de Convergência do Atlântico Sul em períodos de El Niño e La Niña. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. v. 19, p. 89–98, 2004.
- GRIMM, A. M. South American Monsoon and its Extremes. In: **Tropical Extremes**. [s.l.] Elsevier, 2019. p. 51–93.
- GRIMM, A. M.; DIAS, P. L. S. Analysis of Tropical–Extratropical Interactions with Influence Functions of a Barotropic Model. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. v. 52, p. 3538–3555, 1995.
- GRIMM, A. M.; PAL, J. S.; GIORGI, F. Connection between Spring Conditions and Peak Summer Monsoon Rainfall in South America: Role of Soil Moisture, Surface Temperature, and Topography in Eastern Brazil. **Journal of Climate**, v. 20, n. 24, p. 5929–5945, 15 dez. 2007.
- GRIMM, A. M.; ZILLI, M. T. Interannual Variability and Seasonal Evolution of Summer Monsoon Rainfall in South America. **Journal of Climate**, v. 22, n. 9, p. 2257–2275, 1 maio 2009.
- IBGE. **Províncias estruturais, compartimentos de relevo, tipos de solos, regiões fitoecológicas e outras áreas**. IBGE ed. Rio de Janeiro: IBGE, 2019.
- IPCC. **Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Cambridge e New York: [s.n.].
- KAYANO, M. T.; ANDREOLI, R. V. Clima da Região Nordeste. In: **Clima das regiões brasileiras e variabilidade climática**. 1. ed. São Paulo: Oficina de Texto, 2021. p. 25–42.
- KING, A. W. Hierarchy theory and the landscape ... level? or, Words do matter. In: **Issues and Perspectives in Landscape Ecology**. [s.l.] Cambridge University Press, 2005. p. 29–35.
- KODAMA, Y.-M. Large-Scale Common Features of Sub-Tropical Convergence Zones (the Baiu Frontal Zone, the SPCZ, and the SACZ) Part II: Conditions of the Circulations for

Generating the STCZs. **Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II**, v. 71, n. 5, p. 581–610, 1993.

KODAMA, Y. Large-Scale Common Features of Subtropical Precipitation Zones (the Baiu Frontal Zone, the SPCZ, and the SACZ) Part I: Characteristics of Subtropical Frontal Zones. **Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II**, v. 70, n. 4, p. 813–836, 1992.

KOESTLER, A. Beyond Atomism and Holism—the Concept of the Holon. **Perspectives in Biology and Medicine**, v. 13, n. 2, p. 131–154, 1970.

KOGO, B. K.; KUMAR, L.; KOECH, R. Climate change and variability in Kenya: a review of impacts on agriculture and food security. **Environment, Development and Sustainability**, v. 23, n. 1, p. 23–43, 8 jan. 2021.

KOUSKY, V. E.; HIGGINS, R. W. An Alert Classification System for Monitoring and Assessing the ENSO Cycle. **Weather and Forecasting**, v. 22, n. 2, p. 353–371, 1 abr. 2007.

KRISHNAMURTI, T. N. et al. Tropical East–West Circulations During the Northern Winter. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. v. 30, p. 780–787, 1973.

LARSON, R.; FARBER, B. **Estatística Aplicada**. 6. ed. São Paulo: Pearson, 2015.

LAU, K.-M.; YANG, S. TROPICAL METEOROLOGY & CLIMATE | Walker Circulation. In: **Encyclopedia of Atmospheric Sciences**. [s.l.] Elsevier, 2015. p. 177–181.

LAUREANTI, N.; GRIMM, A. Diferença na distribuição de chuva sobre a América do Sul em fases opostas do El Niño-Oscilação Sul na primavera. **XXIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, 2019.

LIEBMANN, B. et al. Submonthly convective variability over South America and the South Atlantic Convergence Zone. **Journal of Climate**, v. v. 12, p. 1877–1891, 1999.

LIMBERGER, L. Estudos de Teleconexões Atmosféricas e Possibilidades de Avanços na Climatologia Geográfica: Conceitos, Fontes de Dados e Técnicas. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 19, 17 out. 2016.

LIN, J.; QIAN, T. A New Picture of the Global Impacts of El Niño-Southern Oscillation. **Scientific Reports**, v. 9, n. 1, p. 17543, 26 dez. 2019.

MARENGO, J. A. Mudanças climáticas globais e regionais: Avaliação do clima atual do Brasil e projeções de cenários climáticos do futuro. **Revista Brasileira de Meteorologia**, 2001.

- MARENGO, J. A. et al. A seca e a crise hídrica de 2014-2015 em São Paulo. **Revista USP**, n. 106, p. 31, 2 set. 2015.
- MARENGO, J. A.; VALVERDE, M. C. Caracterização do clima no Século XX e Cenário de Mudanças de clima para o Brasil no Século XXI usando os modelos do IPCC-AR4. **Revista Multiciência**, v. 8, 2007.
- MCPHADEN, M. J. El Niño and La Niña: Causes and Global Consequences. **Encyclopedia of Global Environmental Change**, v. 1, 2002.
- MENEZES, P. L.; FERNANDES, M. C. **Roteiro de cartografia**. 1. ed. São Paulo: Oficina de Texto, 2018.
- MONTEIRO, C. A. DE F. **Teoria e clima urbano**. São Paulo: [s.n.].
- MUKHERJEE, S. et al. El-Niño Southern Oscillation and its effects. In: **Visualization Techniques for Climate Change with Machine Learning and Artificial Intelligence**. [s.l.] Elsevier, 2023. p. 207–228.
- NIELSEN, D. M. et al. Dynamics-based regression models for the South Atlantic Convergence Zone. **Climate Dynamics**, v. 52, n. 9–10, p. 5527–5553, 9 maio 2019.
- NOBRE, C. A. Ainda sobre a Zona de Convergência do Atlântico Sul: a importância do Oceano Atlântico. **Climanálise**, v. v. 3, n. n. 4, p. 30–35, 1988.
- NUNES, L. H. et al. Intense precipitation pattern by means of concentration index (ci) - examples of two Brazilian sites. **Anais do 7º European Conference on Severe Storms**, v. 7, 2013.
- NUNES, L. H. A percepção do espaço e o espaço da percepção: O ritmo, o habitual, a incerteza e o extremo no entendimento das situações atmosféricas do cotidiano e do não cotidiano. **Revista do Departamento de Geografia**, 2016.
- NUNES, L. H.; LOMBARDO, M. A. A questão da variabilidade climática. Uma reflexão crítica. **Revista do Instituto Geológico**, v. 16, n. 1–2, 1995.
- OSCAR JR, A. C. **Governança territorial em nível metropolitano e risco da mudança climática no Rio de Janeiro**. [s.l.] Universidade Estadual de Campinas, 2018.
- OSCAR JÚNIOR, A. C. S. Noções teóricas complementares à questão climática atual: discutindo hierarquia, escala e variabilidade. **Geografias (UFMG)**, v. 8, p. 108–121, 2012.

- POUR, S. H. et al. Low impact development techniques to mitigate the impacts of climate-change-induced urban floods: Current trends, issues and challenges. **Sustainable Cities and Society**, v. 62, p. 102373, 2020.
- QUADRO, M. F. L. DE. Estudo de episódios de zonas de convergência do Atlântico Sul (ZCAS) sobre a América do Sul. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 17, n. 2–3, p. 210–210, nov. 1999.
- RASMUSSON, E. M.; CARPENTER, T. H. Variations in Tropical Sea Surface Temperature and Surface Wind Fields Associated with the Southern Oscillation/El Niño. **Monthly Weather Review**, v. 110, p. 354–384, 1982.
- RAVELO, A. C. Walker Circulation and Global Warming: Lessons from the Geologic Past. **Oceanography**, v. 19, n. 4, p. 114–122, 1 dez. 2006.
- ROSA, E. B. et al. Automated Detection Algorithm for SACZ, Oceanic SACZ, and Their Climatological Features. **Frontiers in Environmental Science**, v. 8, 25 fev. 2020.
- SACRAMENTO NETO, O. B. DO; ESCOBAR, G. C. J.; SILVA, P. E. D. DA. Método objetivo para identificar episódios de Zonas de Convergência de Umidade (ZCOU) no ambiente operacional do Centro de Previsão de Tempo e Estados Climáticos. **Centro-de Previsão de tempo e Estudos Climáticos – CPTEC/INPE**, 2010.
- SAJI, N. H. et al. A dipole mode in the Tropical Indian Ocean. **Nature**, v. 401, 1999.
- SATYAMURTY, P.; RAO, V. B. **Zona de Convergência do Atlântico Sul Climanalise**. São José dos Campos: [s.n.].
- SILVA, J. P. R.; REBOITA, M. S.; ESCOBAR, G. C. J. Caracterização da Zona de Convergência do Atlântico Sul em Campos Atmosféricos Recentes. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 25, n. 2237–8642, 9 set. 2019.
- SILVA, M. E. S. et al. South America Climate During the 1970–2001 Pacific Decadal Oscillation Phases Based on Different Reanalysis Datasets. **Frontiers in Earth Science**, v. 7, p. 19, 2020.
- STRETEN, N. A. Some Characteristics of Satellite-Observed Bands Of Persistent Cloudiness Over the Southern Hemisphere. **Monthly Weather Review**, v. 101, n. issue 6, p. pp: 486-495, 1973.



VIEGAS, J. et al. Caracterização dos diferentes tipos de El Niño e seus impactos na América do Sul a partir de dados observados e modelados. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 34, p. 43–67, 2019.

WALKER, G. World weather. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 54, n. 226, p. 79–87, abr. 1928.

WALKER, G. T. Correlation in seasonal variations of weather—a further study of world weather 1. **Monthly Weather Review**, v. 53, n. 6, p. 252–254, jun. 1925.

WALKER, S. G. Correlation in seasonal variations of weather. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 50, n. 211, p. 244–244, jul. 1924.

WALKER, S. G.; BLISS, E. W. World Weather V. **Memoirs of the Royal Meteorological Society**, v. 4, 1932.

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION. **El Niño/ Southern Oscillation**. Geneva: World Meteorological Organization, 2014.

YANG, S. et al. El Niño–Southern Oscillation and its impact in the changing climate. **National Science Review**, v. 5, n. 6, p. 840–857, 1 nov. 2018.

YASUNARI, T. Stationary Waves in the Southern Hemisphere Mid-Latitude Zone Revealed from Average Brightness Charts. **Journal of Meteorological Society of Japan**, v. v. 55, p. 274–285, 1977.

### **Sites consultados**

Correio Braziliense, Corpo de último desaparecido na Vila Sahy, em São Sebastião, é encontrado. Disponível em: < <https://www.correiobraziliense.com.br/brasil/2023/02/5076358-corpo-de-ultimo-desaparecido-na-tragedia-de-sao-sebastiao-e-encontrado.html>>. Acesso em: 03/04/2023.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/>>. Acesso em: 15/03/2022

G1, Sobe para 52 o número de mortes por causa das chuvas dos últimos dias em Minas Gerais, diz Defesa Civil. Disponível em: < <https://g1.globo.com/mg/minas-gerais/noticia/2020/01/28/sobe-para-52-o-numero-de-mortes-por-cao-da-chuvas-dos-ultimos-dias-em-minas-gerais-diz-defesa-civil.ghtml>>. Acesso em: 03/04/2023.

G1, Sobe para 10 o nº de mortos por causa das chuvas no ES após corpo de desaparecida ser encontrado. Disponível em: < <https://g1.globo.com/es/espírito-santo/noticia/2020/01/30/sobe-para-10-o-no-de-mortos-por-causa-das-chuvas-no-es-apos-corpo-de-desaparecida-ser-encontrado.ghtml>>. Acesso em: 03/04/2023.

MARINHA do Brasil. Disponível em: <<https://www.marinha.mil.br/chm/dados-do-smm-cartas-sinoticas/cartas-sinoticas>>. Acesso em: 08/08/2022

Exame, Em 2011, chuvas na região serrana do Rio deixaram 918 mortos. Disponível em: <<https://exame.com/brasil/em-2011-chuvas-na-regiao-serrana-do-rio-deixaram-918-mortos/>>. Acesso em: 03/04/2023.

## 7 – ANEXO

### 7.1 - Lista de episódios de ZCAS identificadas entre janeiro e março de 2000 até 2021

<b>Início</b>	<b>Fim</b>	<b>Código</b>	<b>Duração em dias</b>	<b>Posição</b>	<b>ENOS</b>
01/01/2000	06/01/2000	ZCAS 1-00	6	S	La Niña
20/01/2000	23/01/2000	ZCAS 2-00	4	N	La Niña
26/01/2000	28/01/2000	ZCAS 3-00	3	N	La Niña
06/02/2000	15/02/2000	ZCAS 4-00	10	S	La Niña
12/03/2000	16/03/2000	ZCAS 5-00	5	N	La Niña
02/02/2001	04/02/2001	ZCAS 1-01	3	N	La Niña
09/03/2001	12/03/2001	ZCAS 2-01	4	C	Neutro
02/02/2002	05/02/2002	ZCAS 1-02	4	N	Neutro
17/02/2002	24/02/2002	ZCAS 2-02	8	C	Neutro
03/01/2003	08/02/2003	ZCAS 1-03	6	C	El Niño
13/01/2003	19/01/2003	ZCAS 2-03	7	N	El Niño
25/01/2003	31/01/2003	ZCAS 3-03	7	S	El Niño
02/01/2004	05/01/2004	ZCAS 1-04	4	N	Neutro
10/01/2004	18/01/2004	ZCAS 2-04	9	N	Neutro
26/01/2004	28/01/2004	ZCAS 3-04	3	S	Neutro
06/02/2004	11/02/2004	ZCAS 4-04	6	N	Neutro
21/02/2004	24/02/2004	ZCAS 5-04	4	S	Neutro
17/01/2005	21/01/2005	ZCAS 1-05	5	C	El Niño

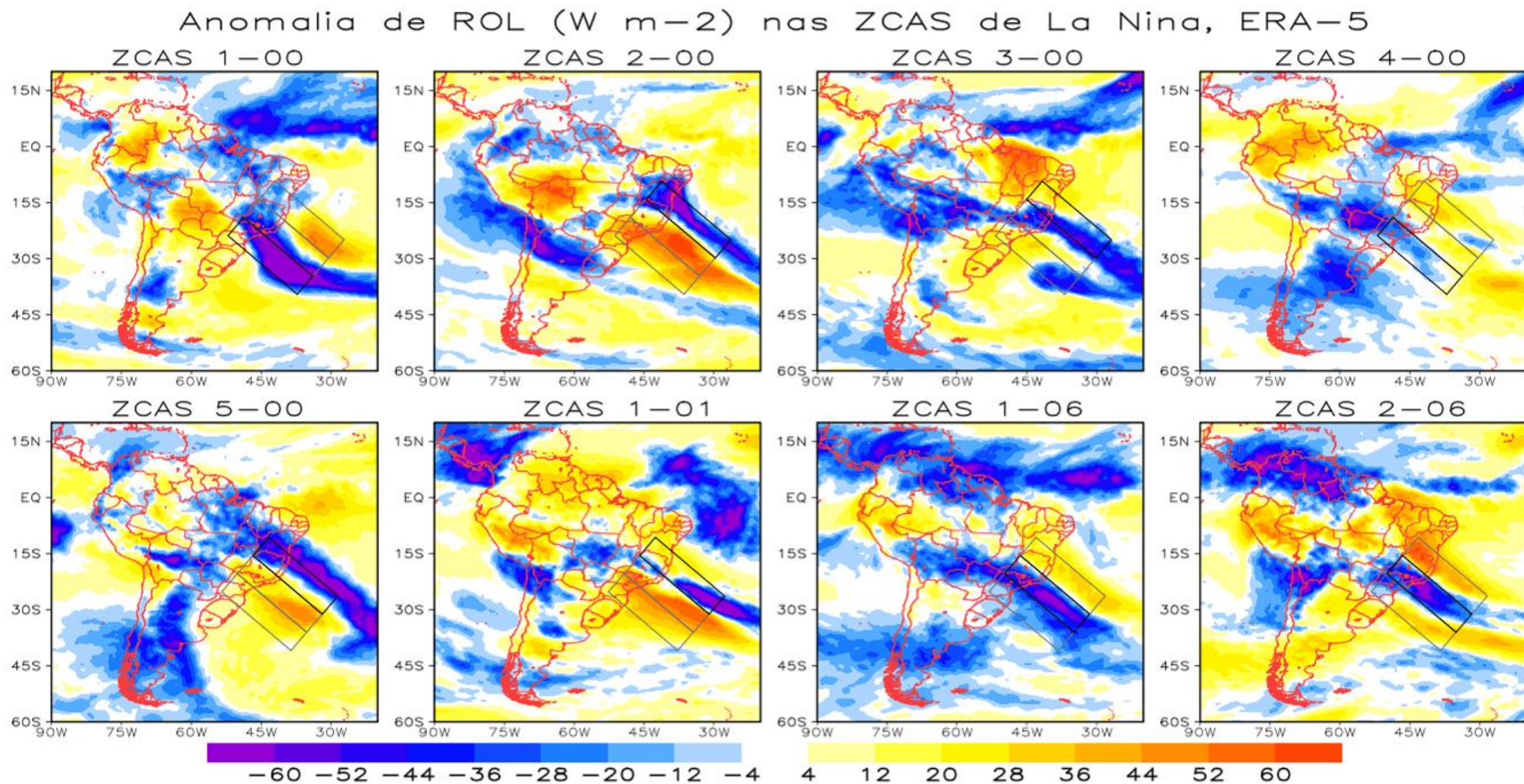
13/02/2005	21/03/2005	ZCAS 2-05	7	N	El Niño
28/02/2005	07/03/2005	ZCAS 3-05	8	N	Neutro
14/03/2005	19/03/2005	ZCAS 4-05	6	S	Neutro
01/01/2006	06/01/2006	ZCAS 1-06	6	C	La Niña
28/01/2006	30/01/2006	ZCAS 2-06	3	C	La Niña
10/02/2006	13/02/2006	ZCAS 3-06	4	C	La Niña
07/03/2006	13/03/2006	ZCAS 4-06	7	N	La Niña
01/01/2007	07/01/2007	ZCAS 1-07	7	C	El Niño
13/01/2007	16/01/2007	ZCAS 2-07	4	C	El Niño
03/02/2007	05/02/2007	ZCAS 3-07	3	N	Neutro
11/02/2007	15/02/2007	ZCAS 4-07	5	N	Neutro
17/03/2007	20/02/2007	ZCAS 5-07	4	S	Neutro
05/01/2008	09/01/2008	ZCAS 1-08	5	C	La Niña
20/01/2008	23/01/2008	ZCAS 2-08	4	C	La Niña
30/01/2008	05/02/2008	ZCAS 3-08	7	N	La Niña
22/02/2008	28/02/2008	ZCAS 4-08	7	N	La Niña
02/03/2008	04/03/2008	ZCAS 5-08	3	N	La Niña
12/03/2008	17/03/2008	ZCAS 6-08	6	C	La Niña
04/01/2009	07/01/2009	ZCAS 1-09	3	C	La Niña
18/01/2009	22/01/2009	ZCAS 2-09	5	C	La Niña
29/01/2009	31/01/2009	ZCAS 3-09	3	S	La Niña
12/02/2009	16/02/2009	ZCAS 4-09	4	C	La Niña

11/03/2009	15/03/2009	ZCAS 5-09	5	S	La Niña
23/03/2009	27/03/2009	ZCAS 6-09	5	N	La Niña
21/01/2010	23/01/2010	ZCAS 1-10	3	S	El Niño
01/03/2010	04/03/2010	ZCAS 2-10	4	N	El Niño
07/03/2010	12/03/2010	ZCAS 3-10	6	N	El Niño
02/01/2011	06/01/2011	ZCAS 1-11	5	S	La Niña
11/01/2011	15/01/2011	ZCAS 2-11	5	C	La Niña
17/01/2011	21/01/2011	ZCAS 3-11	5	S	La Niña
09/02/2011	13/08/2011	ZCAS 4-11	5	S	La Niña
28/02/2011	09/03/2011	ZCAS 5-11	10	N	La Niña
01/01/2012	05/01/2012	ZCAS 1-12	5	C	La Niña
14/01/2012	20/01/2012	ZCAS 2-12	7	S	La Niña
26/01/2012	30/01/2012	ZCAS 3-12	5	C	La Niña
11/02/2012	13/02/2012	ZCAS 4-12	3	S	La Niña
16/03/2012	20/03/2012	ZCAS 5-12	5	N	La Niña
09/01/2013	14/01/2013	ZCAS 1-13	6	S	Neutro
19/01/2013	22/01/2013	ZCAS 2-13	4	N	Neutro
26/01/2013	30/01/2013	ZCAS 3-13	4	N	Neutro
03/02/2013	13/02/2013	ZCAS 4-13	11	S	Neutro
26/03/2013	29/03/2013	ZCAS 5-13	4	C	Neutro
17/01/2014	21/01/2014	ZCAS 1-14	4	N	Neutro
14/02/2014	16/02/2014	ZCAS 2-14	3	S	Neutro

21/03/2014	24/03/2014	ZCAS 3-14	4	S	Neutro
06/02/2015	09/02/2015	ZCAS 1-15	4	C	El Niño
14/02/2015	19/02/2015	ZCAS 2-15	6	S	El Niño
10/03/2015	13/03/2015	ZCAS 3-15	4	C	El Niño
15/01/2016	22/01/2016	ZCAS 1-16	8	N	El Niño
21/02/2016	25/02/2016	ZCAS 2-16	5	S	El Niño
28/02/2016	02/03/2016	ZCAS 3-16	4	C	El Niño
10/03/2016	13/06/2016	ZCAS 4-16	3	S	El Niño
17/01/2017	20/01/2017	ZCAS 1-17	4	S	Neutro
25/01/2017	28/01/2017	ZCAS 2-17	4	S	Neutro
04/01/2018	08/01/2018	ZCAS 1-18	5	C	La Niña
30/01/2018	07/02/2018	ZCAS 2-18	9	N	La Niña
22/02/2018	24/02/2018	ZCAS 3-18	3	C	La Niña
08/03/2018	14/03/2018	ZCAS 4-18	7	N	La Niña
16/02/2019	21/02/2019	ZCAS 1-19	6	C	El Niño
26/02/2019	03/03/2019	ZCAS 2-19	6	C	El Niño
02/01/2020	06/01/2020	ZCAS 1-20	5	C	Neutro
22/01/2020	28/01/2020	ZCAS 2-20	7	N	Neutro
10/02/2020	13/02/2020	ZCAS 3-20	4	C	Neutro
27/02/2020	08/03/2020	ZCAS 4-20	11	C	Neutro
22/03/2020	25/03/2020	ZCAS 5-20	5	N	Neutro
18/01/2021	23/01/2021	ZCAS 1-21	6	S	La Niña

27/01/2021	30/01/2021	ZCAS 2-21	4	S	La Niña
06/02/2021	08/02/2021	ZCAS 3-21	3	N	La Niña
14/02/2021	21/02/2021	ZCAS 4-21	8	N	La Niña
05/03/2021	11/03/2021	ZCAS 5-21	7	C	La Niña

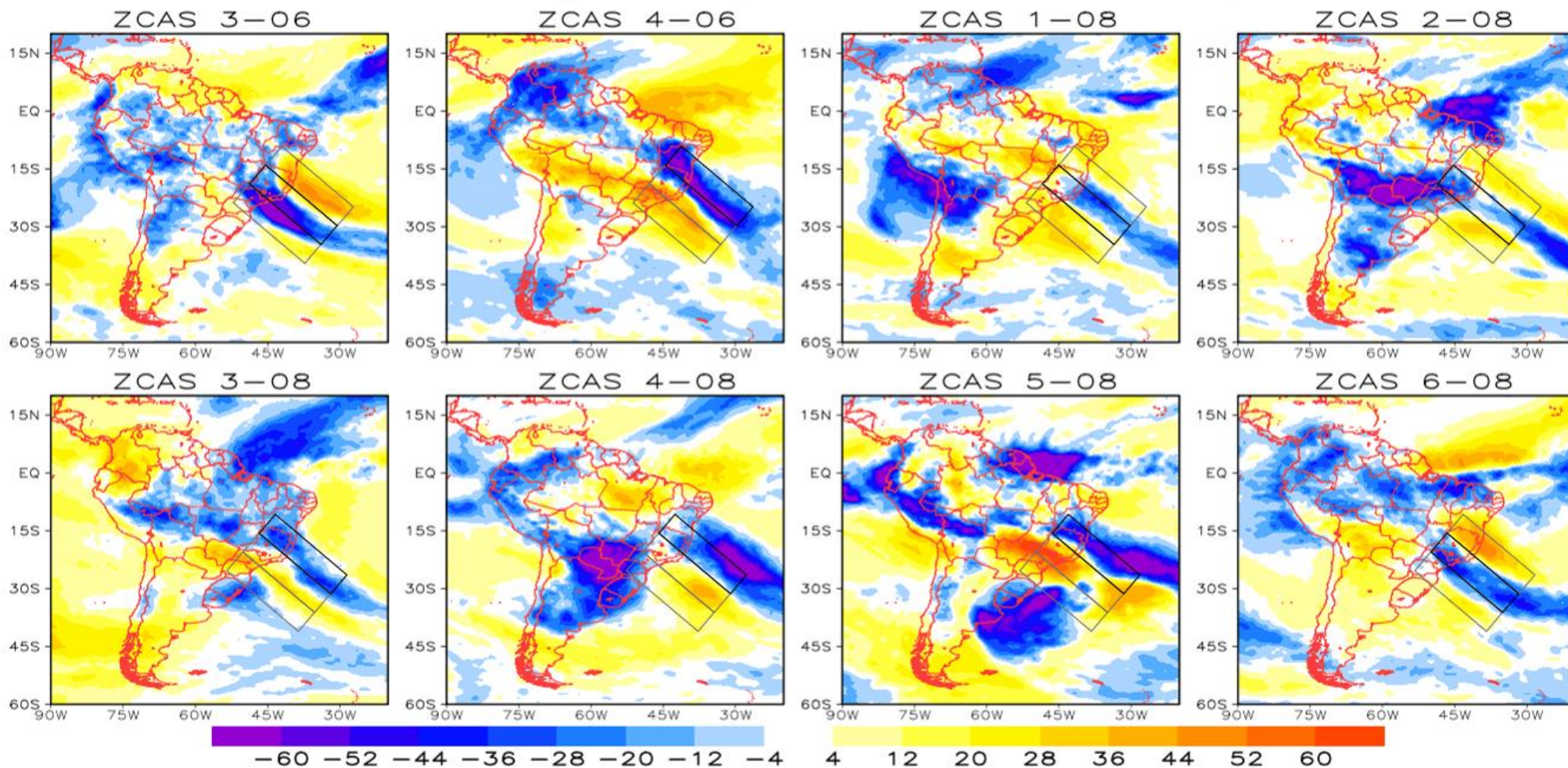
7.2 – Posição dos episódios de ZCAS identificadas entre janeiro e março de 2000 até 2021 e fases do ENOS



**Figura 38:** Anomalia de ROL ( $W m^{-2}$ ) para (a) o primeiro episódio de ZCAS no ano 2000, (b) segundo de 2000, (c) terceiro de 2000, (d) quarto de 2000, (e) quinto de 2000, (f) primeiro de 2001, (g) sexto de 2001, (h) sexto de 2002, todos em períodos de La Niña. Os retângulos destacados em preto foram selecionados por apresentar os maiores valores de anomalia negativa de ROL.

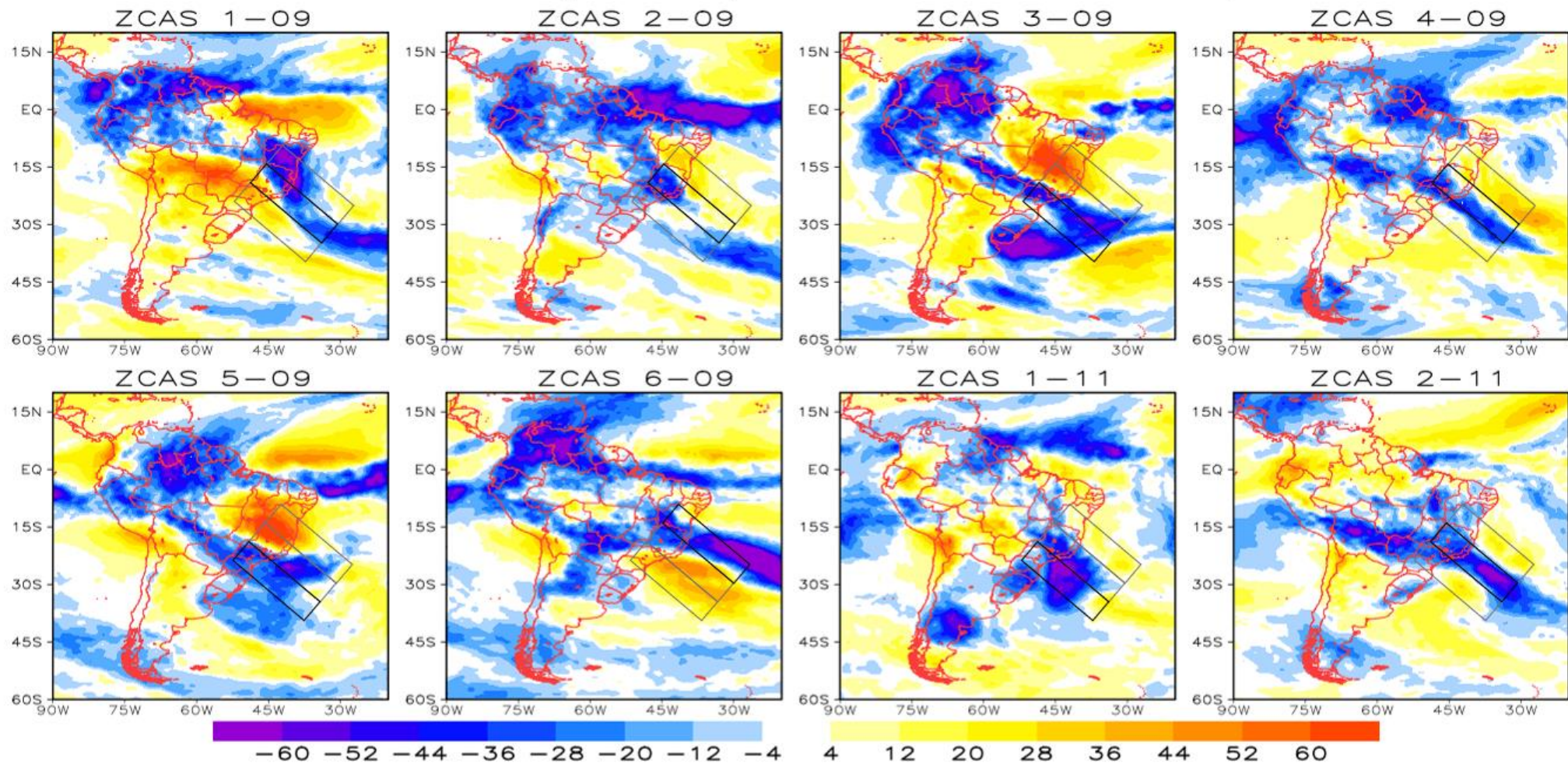


Anomalia de ROL ( $W m^{-2}$ ) nas ZCAS de La Niña, ERA-5



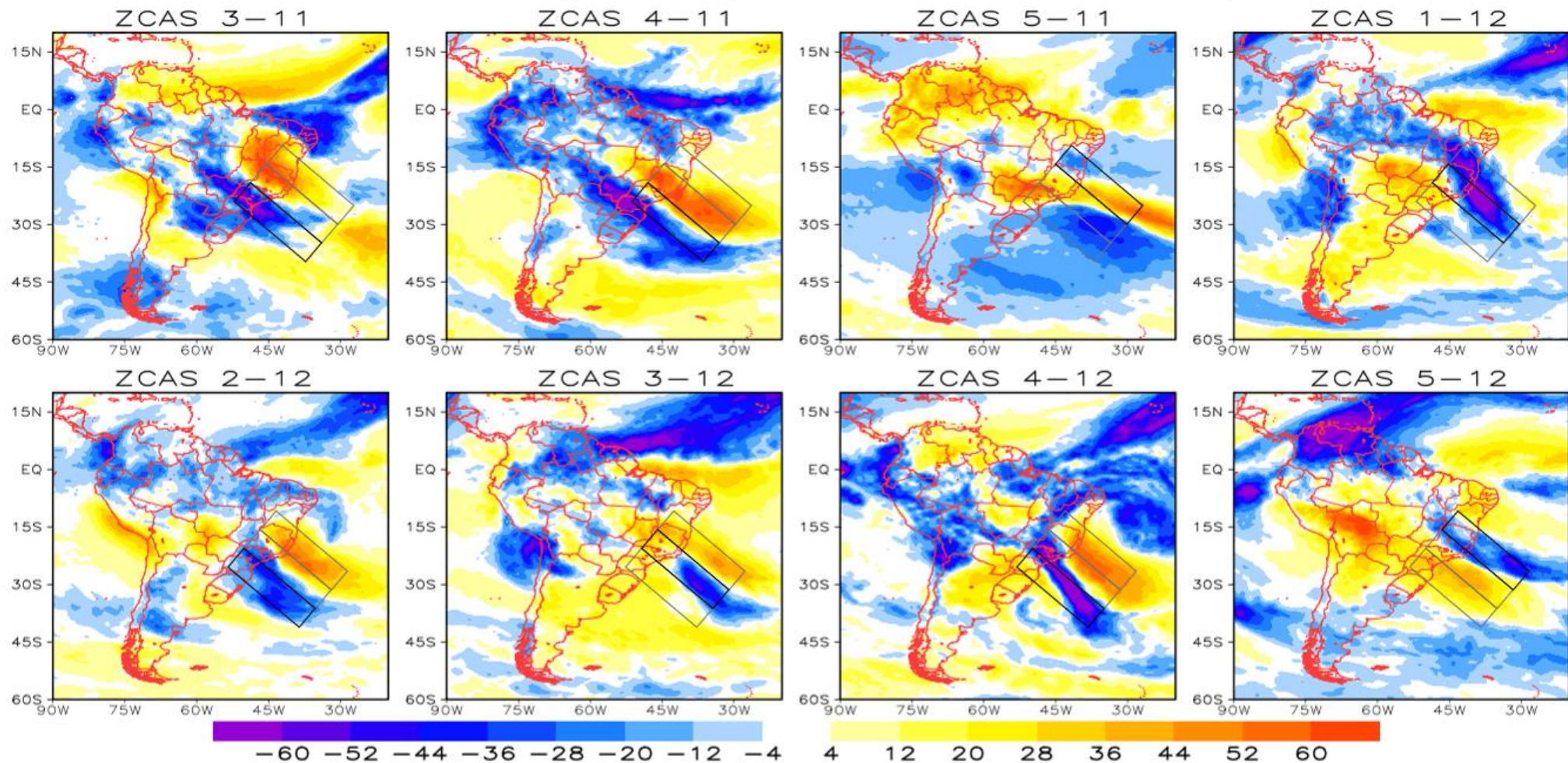
**Figura 39:** Anomalia de ROL ( $W m^{-2}$ ) para (a) o terceiro episódio de ZCAS no ano 2006, (b) quarto de 2006, (c) primeiro de 2008, (d) segundo de 2008, (e) terceiro de 2008, (f) quarto de 2008, (g) quinto de 2008, (h) sexto de 2008, todos em períodos de La Niña. Os retângulos destacados em preto foram selecionados por apresentar os maiores valores de anomalia negativa de ROL.

## Anomalia de ROL ( $W m^{-2}$ ) nas ZCAS de La Nina, ERA-5



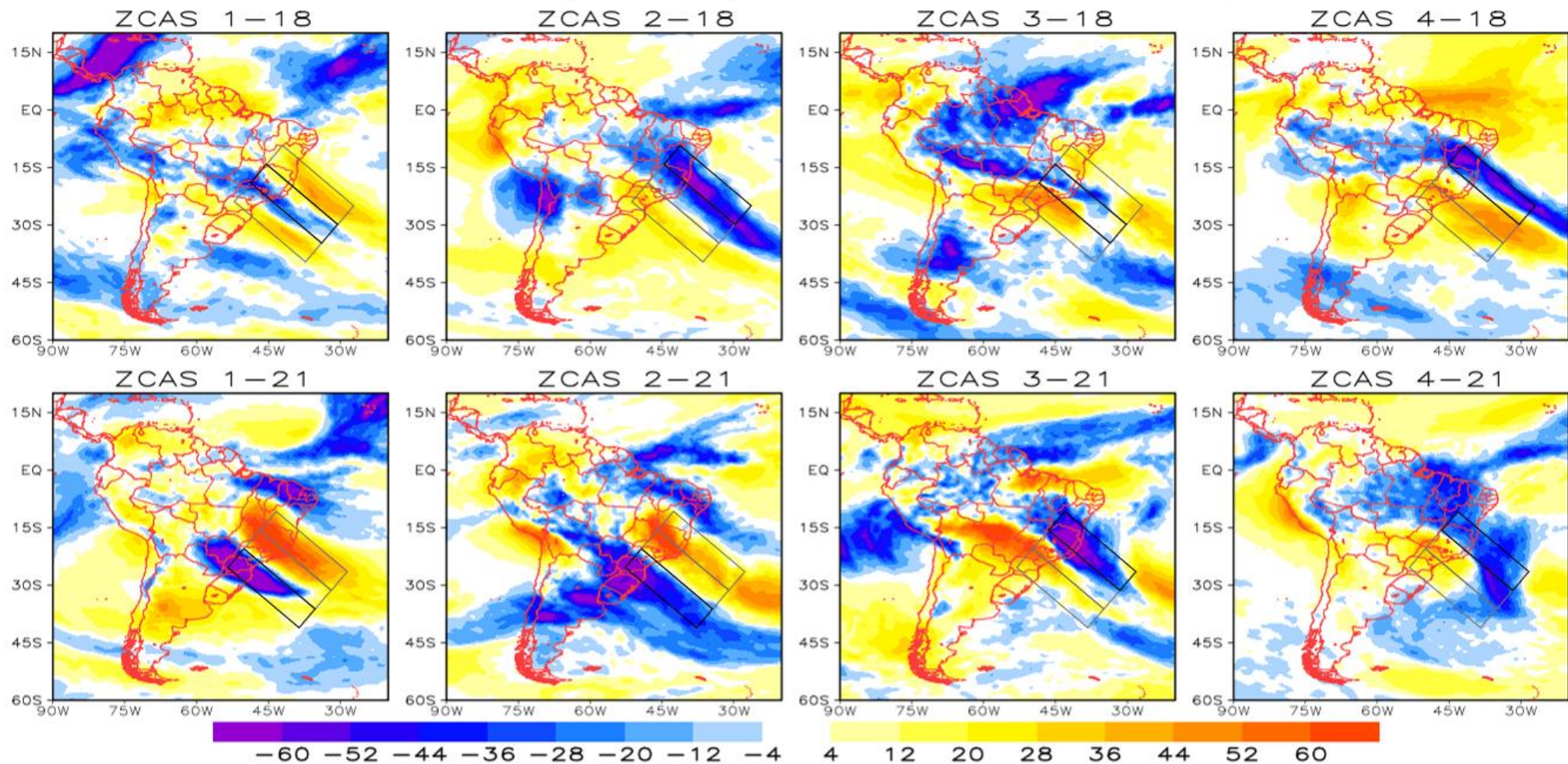
**Figura 40:** Anomalia de ROL ( $W m^{-2}$ ) para (a) o primeiro episódio de ZCAS no ano 2009, (b) segundo de 2009, (c) terceiro de 2009, (d) quarto de 2009, (e) quinto de 2009, (f) sexto de 2009, (g) primeiro de 2011, (h) segundo de 2011, todos em períodos de La Niña. Os retângulos destacados em preto foram selecionados por apresentar os maiores valores de anomalia negativa de ROL.

## Anomalia de ROL ( $W m^{-2}$ ) nas ZCAS de La Nina, ERA-5



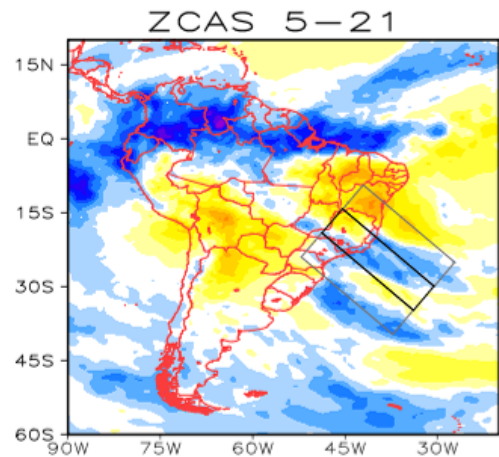
**Figura 41:** Anomalia de ROL ( $W m^{-2}$ ) para (a) o terceiro episódio de ZCAS no ano 2011, (b) quarto de 2011, (c) quinto de 2011, (d) primeiro de 2012, (e) segundo de 2012, (f) terceiro de 2012, (g) quarto de 2012, (h) quinto de 2012, todos em períodos de La Niña. Os retângulos destacados em preto foram selecionados por apresentar os maiores valores de anomalia negativa de ROL.

## Anomalia de ROL ( $W m^{-2}$ ) nas ZCAS de La Niña, ERA-5



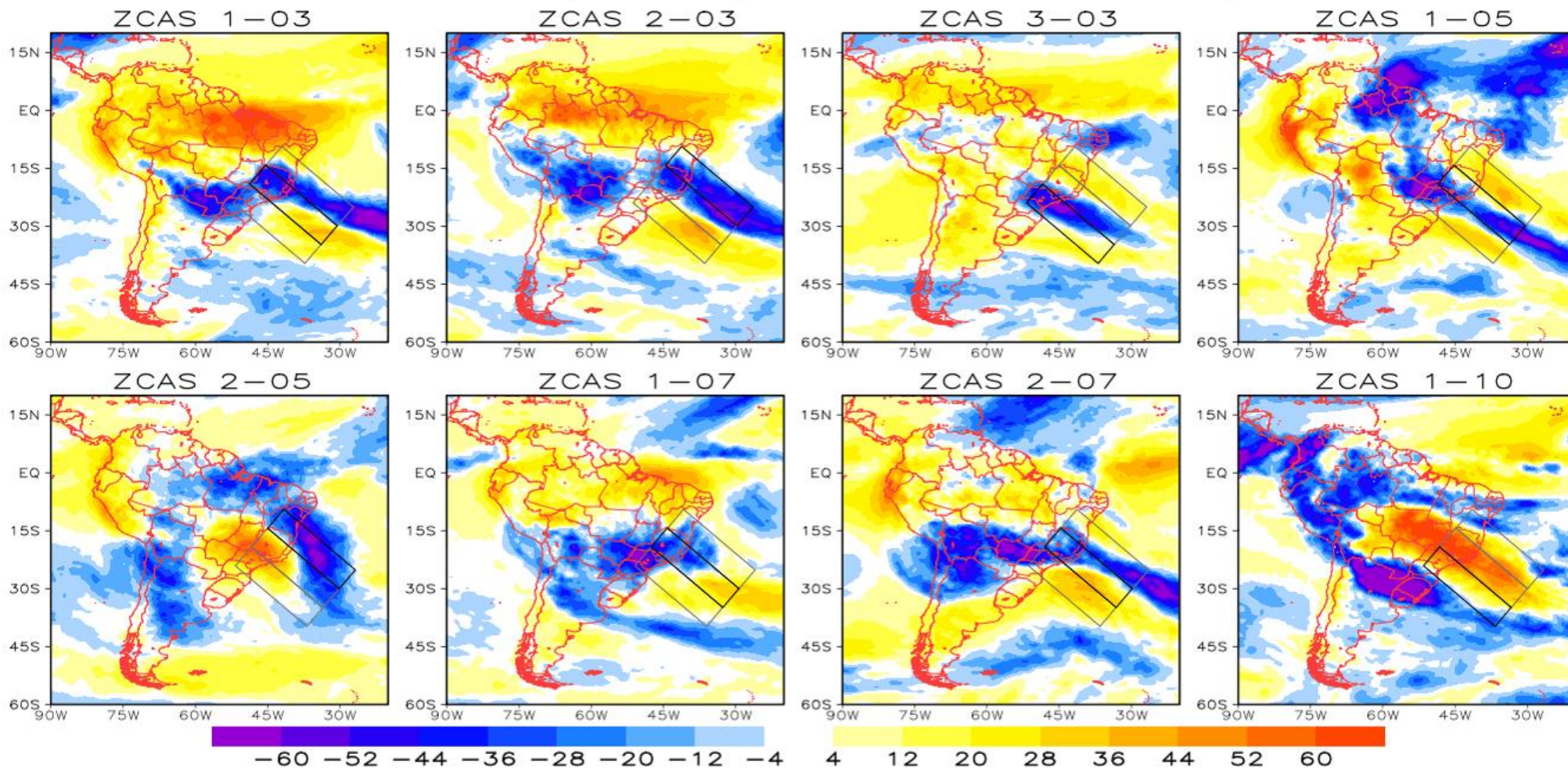
**Figura 42:** Anomalia de ROL ( $W m^{-2}$ ) para (a) o primeiro episódio de ZCAS no ano 2018, (b) segundo de 2018, (c) terceiro de 2018, (d) quarto de 2018, (e) primeiro de 2021, (f) segundo de 2021, (g) terceiro de 2021, (h) quarto de 2021, todos em períodos de La Niña. Os retângulos destacados em preto foram selecionados por apresentar os maiores valores de anomalia negativa de ROL.

# Anomalia de ROL ( $\text{W m}^{-2}$ ) nas ZCAS de La Niña, ERA-5



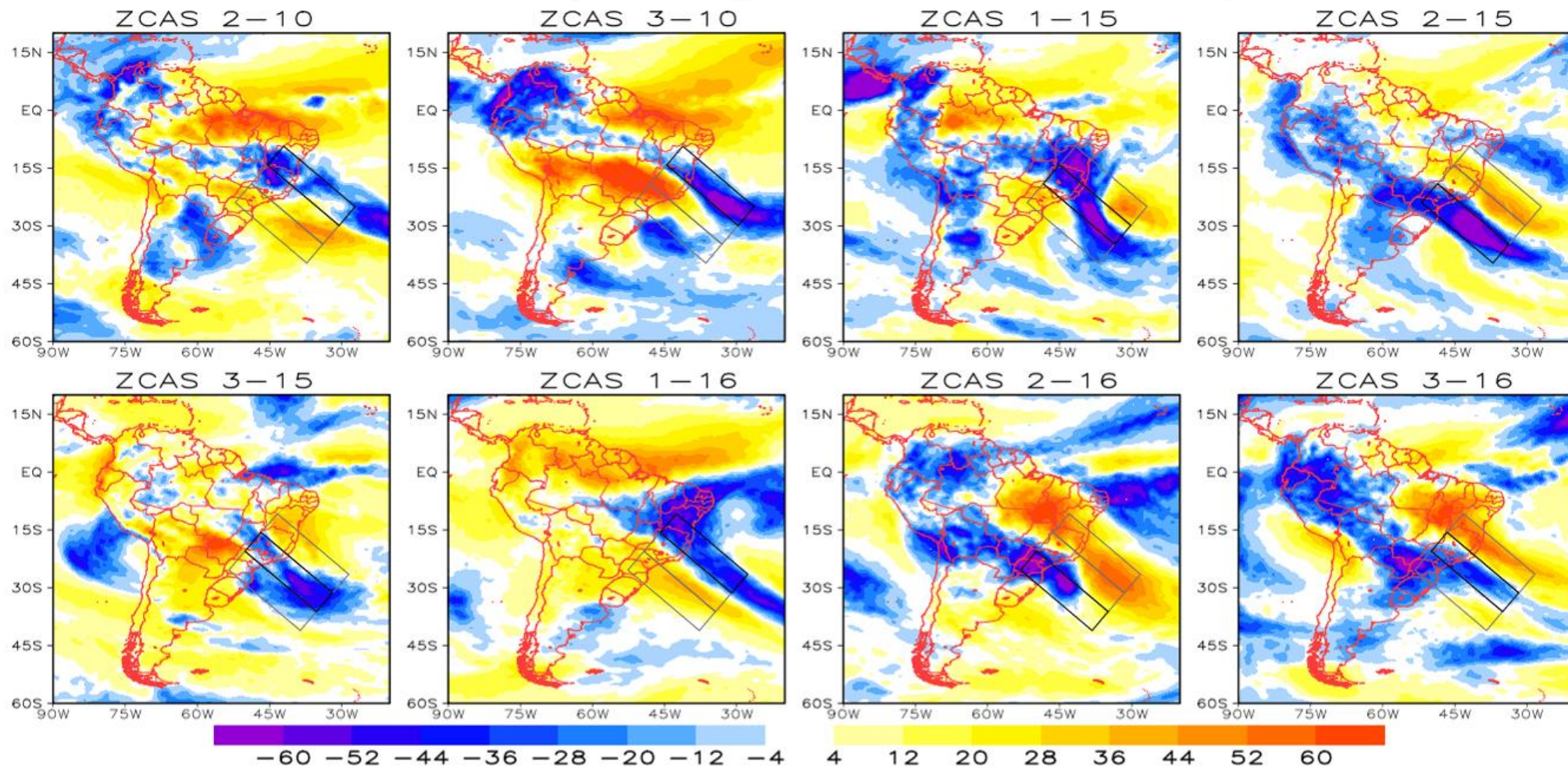
**Figura 43:** Anomalia de ROL ( $\text{W m}^{-2}$ ) para (a) o quinto episódio de ZCAS no ano 2021, em período de La Niña. Os retângulos destacados em preto foram selecionados por apresentar os maiores valores de anomalia negativa de ROL.

## Anomalia de ROL ( $W m^{-2}$ ) nas ZCAS de El Niño, ERA-5



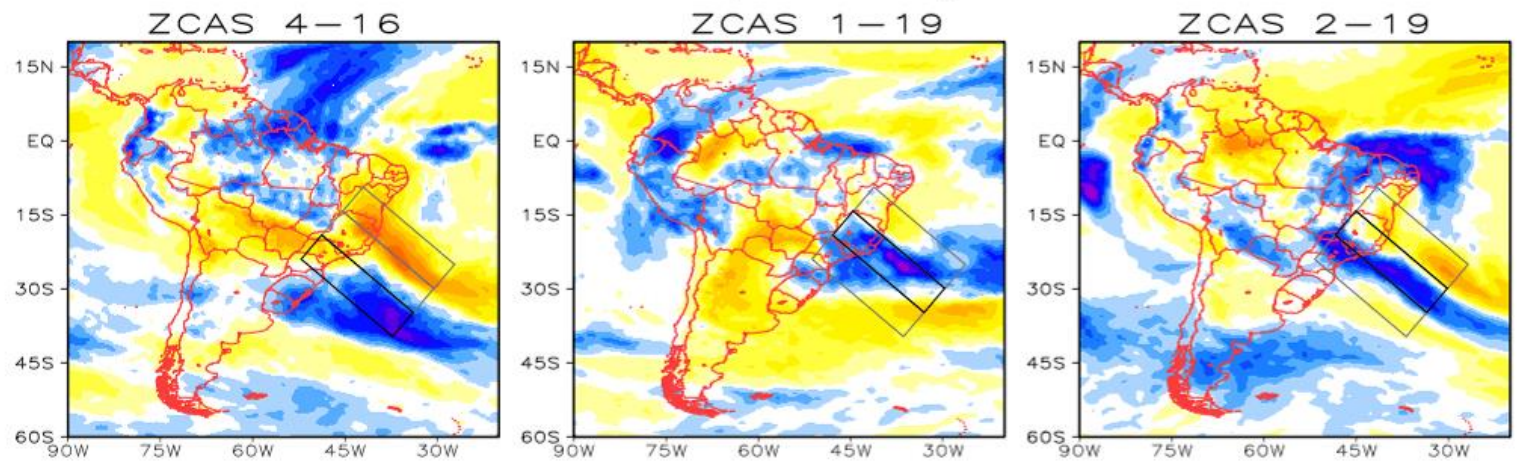
**Figura 44:** Anomalia de ROL ( $W m^{-2}$ ) para (a) o primeiro episódio de ZCAS no ano 2003, (b) segundo de 2003, (c) terceiro de 2003, (d) primeiro de 2005, (e) segundo de 2005, (f) primeiro de 2007, (g) segundo de 2007, (h) primeiro de 2010, todos em períodos de El Niño. Os retângulos destacados em preto foram selecionados por apresentar os maiores valores de anomalia negativa de ROL.

## Anomalia de ROL ( $W m^{-2}$ ) nas ZCAS de El Niño, ERA-5



**Figura 45:** Anomalia de ROL ( $W m^{-2}$ ) para (a) o segundo episódio de ZCAS no ano 2010, (b) terceiro de 2010, (c) primeiro de 2015, (d) segundo de 2015, (e) terceiro de 2015, (f) primeiro de 2016, (g) segundo de 2016, (h) terceiro de 2016, todos em períodos de El Niño. Os retângulos destacados em preto foram selecionados por apresentar os maiores valores de anomalia negativa de ROL.

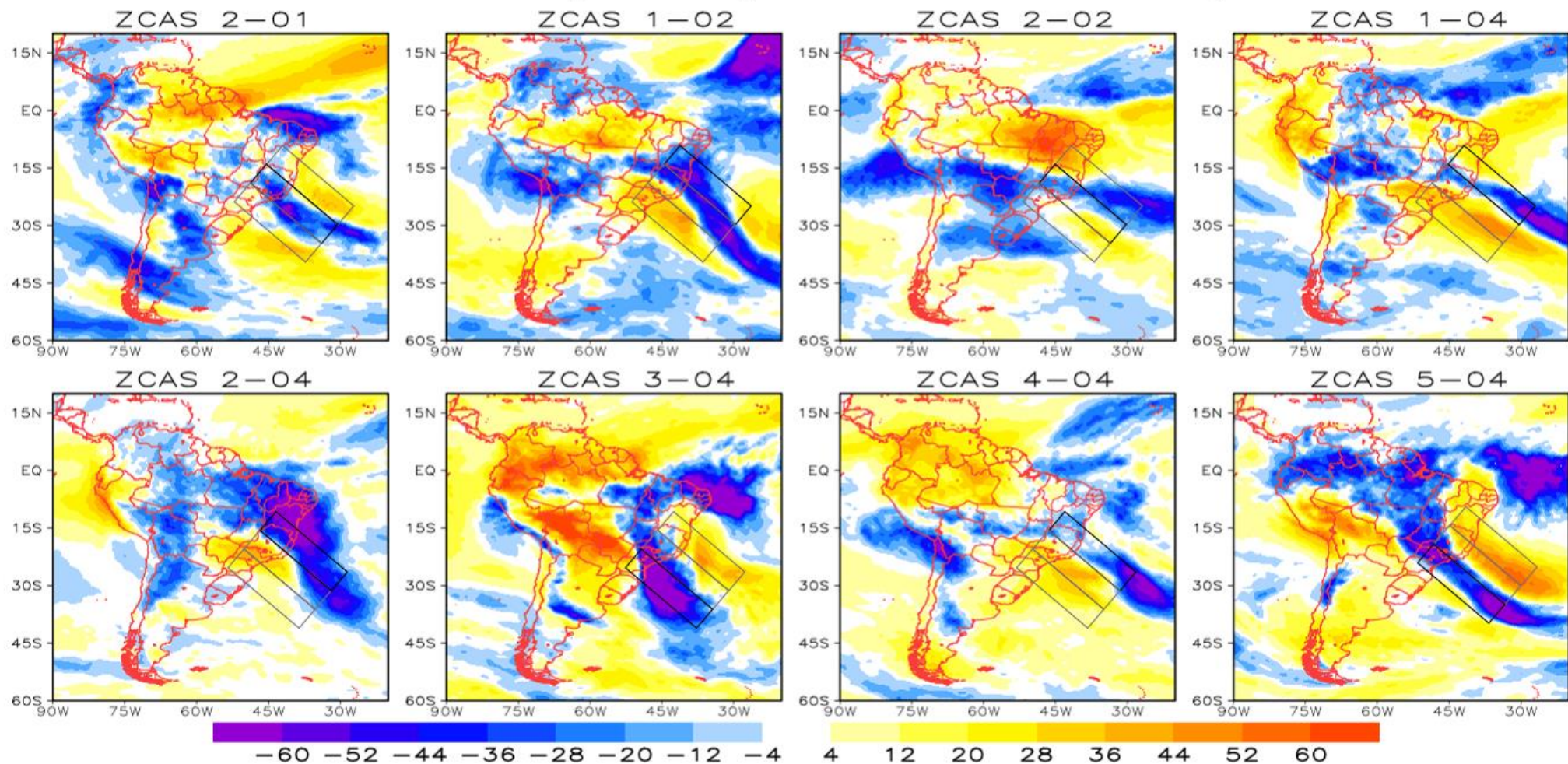
# Anomalia de ROL ( $\text{W m}^{-2}$ ) nas ZCAS de El Niño, ERA-5



**Figura 46:** Anomalia de ROL ( $\text{W m}^{-2}$ ) para (a) o quarto episódio de ZCAS no ano 2016, (b) primeiro de 2019, (c) segundo de 2019, todos em períodos de El Niño. Os retângulos destacados em preto foram selecionados por apresentar os maiores valores de anomalia negativa de ROL.

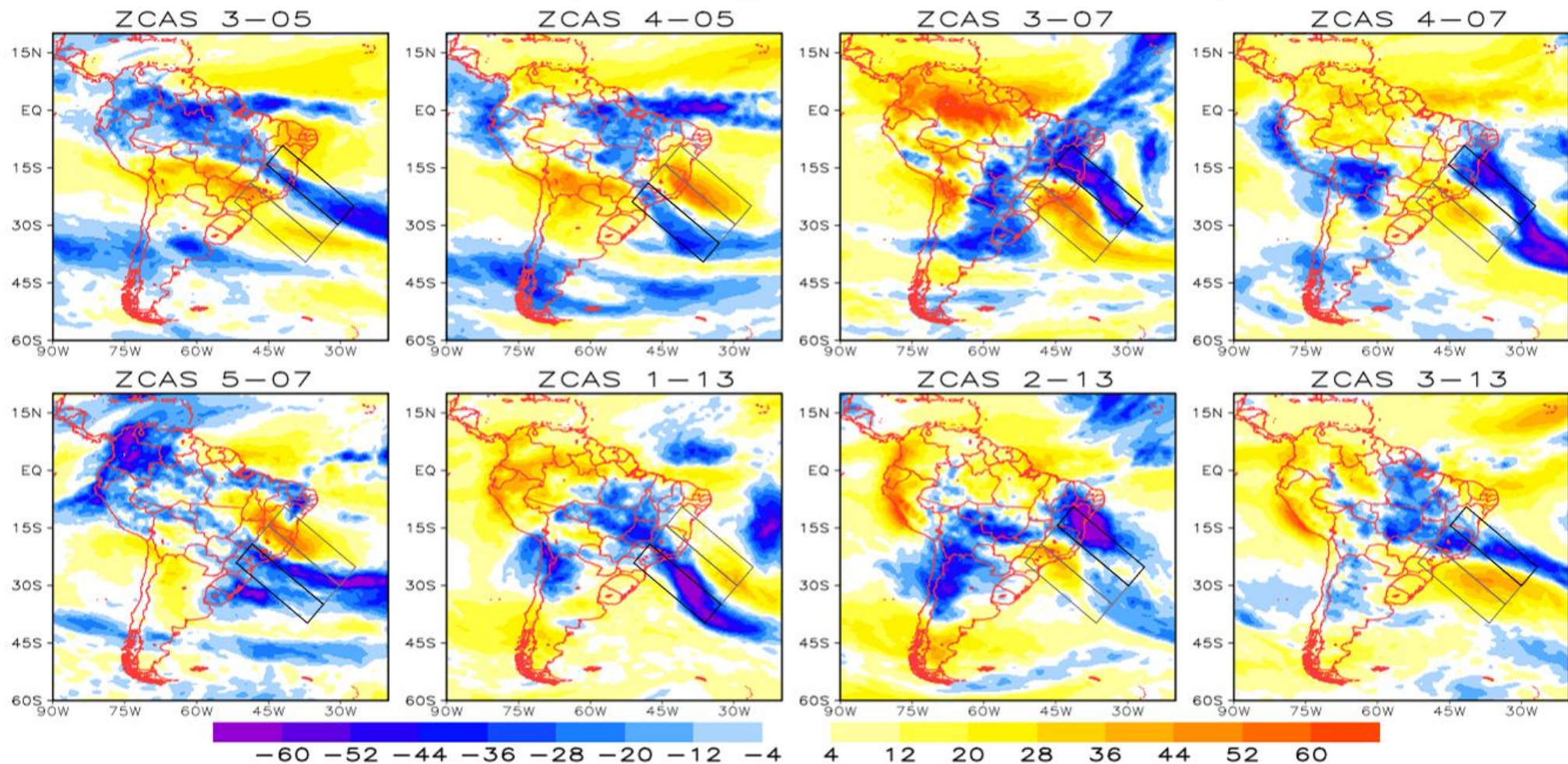


Anomalia de ROL ( $W m^{-2}$ ) nas ZCAS de Neutro, ERA-5



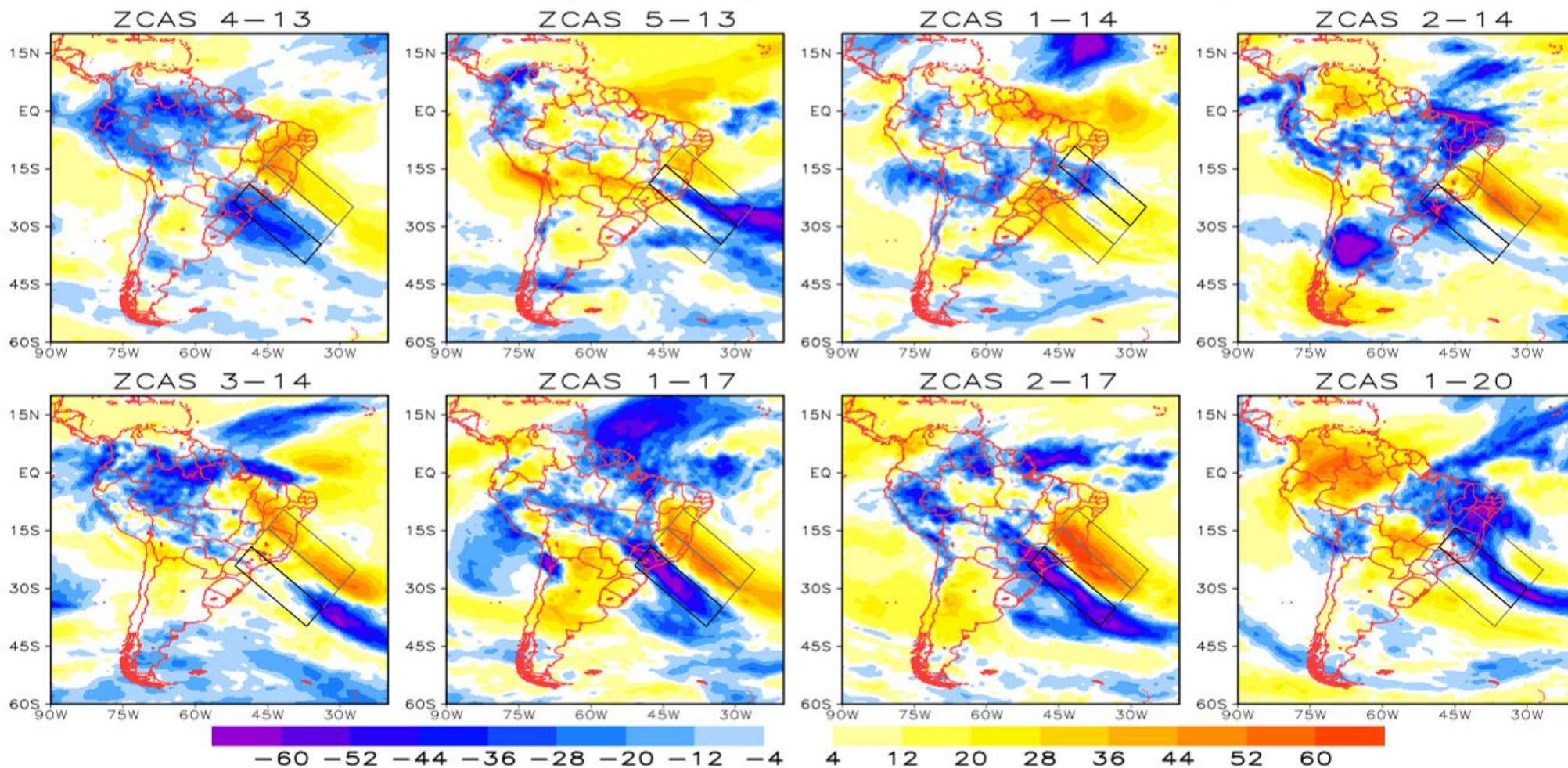
**Figura 47:** Anomalia de ROL ( $W m^{-2}$ ) para (a) o segundo episódio de ZCAS no ano 2001, (b) primeiro de 2002, (c) segundo de 2002, (d) primeiro de 2004, (e) segundo de 2004, (f) terceiro de 2004, (g) quarto de 2004, (h) quinto de 2004, todos em períodos neutros. Os retângulos destacados em preto foram selecionados por apresentar os maiores valores de anomalia negativa de ROL.

Anomalia de ROL ( $W m^{-2}$ ) nas ZCAS de Neutro, ERA-5



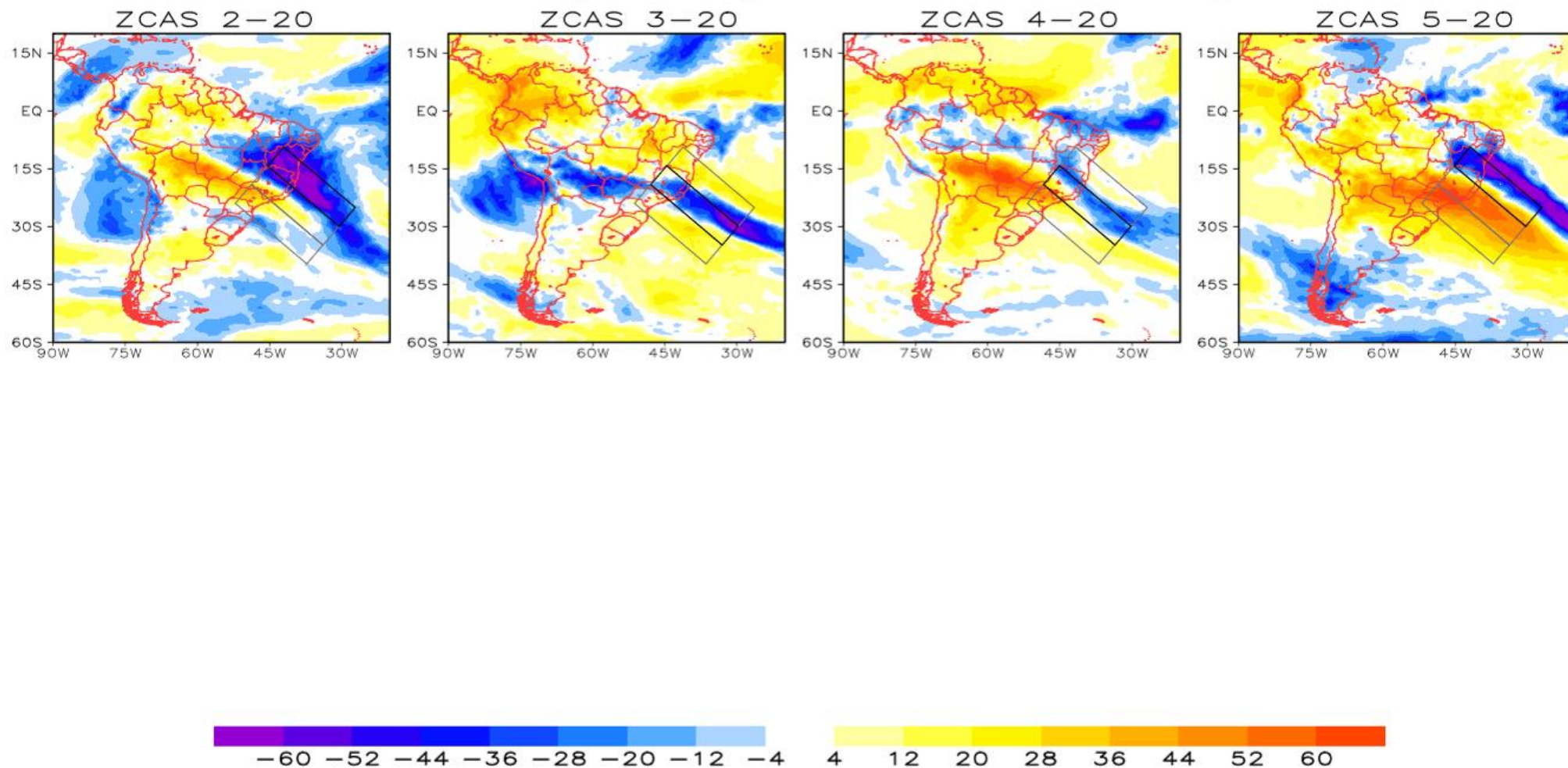
**Figura 48:** Anomalia de ROL ( $W m^{-2}$ ) para (a) o terceiro episódio de ZCAS no ano 2005, (b) quarto de 2005, (c) terceiro de 2007, (d) quarto de 2007, (e) quinto de 2007, (f) primeiro de 2013, (g) segundo de 2013, (h) terceiro de 2013, todos em períodos neutros. Os retângulos destacados em preto foram selecionados por apresentar os maiores valores de anomalia negativa de ROL.

## Anomalia de ROL ( $W m^{-2}$ ) nas ZCAS de Neutro, ERA-5



**Figura 49:** Anomalia de ROL ( $W m^{-2}$ ) para (a) o quarto episódio de ZCAS no ano 2013, (b) quinto de 2013, (c) primeiro de 2014, (d) segundo de 2014, (e) terceiro de 2014, (f) primeiro de 2017, (g) segundo de 2017, (h) primeiro de 2020, todos em períodos neutros. Os retângulos destacados em preto foram selecionados por apresentar os maiores valores de anomalia negativa de ROL.

### Anomalia de ROL ( $W m^{-2}$ ) nas ZCAS de Neutro, ERA-5



**Figura 50:** Anomalia de ROL ( $W m^{-2}$ ) para (a) o segundo episódio de ZCAS no ano 2020, (b) terceiro de 2020, (c) quarto de 2020, (d) quinto de 2020, todos em períodos neutros. Os retângulos destacados em preto foram selecionados por apresentar os maiores valores de anomalia negativa de ROL.