



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

**Mecanismos físicos associados à escassez  
pluviométrica no sudeste do Brasil no inverno de  
2022**

---

**MONOGRAFIA DE GRADUAÇÃO**

**Pedro Lucas Lopes da Silveira Silva**

**Itajubá, MG, Brasil**

**2023**

# **Mecanismos físicos associados à escassez pluviométrica no sudeste do Brasil no inverno de 2022**

---

por

**Pedro Lucas Lopes da Silveira Silva**

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

**Orientadora: Michelle Simões Reboita**

**Itajubá, MG, Brasil  
2023**

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

A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova a  
Monografia

**Mecanismos físicos associados à escassez pluviométrica  
no sudeste do Brasil no inverno de 2022**

elaborada por

**Pedro Lucas Lopes da Silveira Silva**

Como requisito parcial para a obtenção do grau de  
**Bacharel em Ciências Atmosféricas**

**Comissão Examinadora:**

*Michelle S. Reboita*

---

**Michelle Simões Reboita, Dra (UNIFEI)**  
(Orientadora)

Documento assinado digitalmente



VANESSA SILVEIRA BARRETO CARVALHO

Data: 10/11/2023 09:21:57-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

**Vanessa Silveira Barreto Carvalho, Dra. (UNIFEI)**

Documento assinado digitalmente



ANDRE LUIZ DOS REIS

Data: 09/11/2023 22:50:32-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

**André Luiz dos Reis, Msc (UNIFEI)**

Itajubá, 03 de novembro de 2023 .



## **AGRADECIMENTOS**

Aos meus pais, Ivânia e Benedito, meus sinceros agradecimentos. Vocês desempenharam um papel significativo no meu crescimento, e devem ser recompensados com minha eterna gratidão.

As minhas irmãs e a todos da minha família que sempre me forneceram o apoio para continuar nessa minha trajetória.

Agradeço a todos meus amigos da graduação, em especial aos meus companheiros Thales, Rafael e Guilherme, que sempre estiveram presentes tentando me ajudar da melhor forma possível. As minhas amigas de ensino médio Ana Beatriz e Maria Eduarda, obrigado pela amizade incondicional e pelo apoio demonstrado ao longo de todo o período em que me dediquei a graduação e a este trabalho.

Agradeço a todos os meus professores e colegas que participaram dessa minha trajetória de graduação. A minha orientadora Dra. Michelle, que sempre esteve disponível para me ajudar no que fosse necessário nesse período de graduação.

Também agradeço a todos que ajudaram diretamente ou indiretamente para o desenvolvimento e conclusão do meu trabalho.

"Aos meus pais e familiares, cujo amor, apoio incondicional e fé em mim foram a força motriz por trás deste trabalho. Este TCC é dedicado a vocês."

"A aprendizagem é a única coisa que a mente nunca se cansa, nunca tem medo e nunca se arrepende." - Leonardo da Vinci

## **RESUMO**

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

### **Mecanismos físicos associados à escassez pluviométrica no sudeste do Brasil no inverno de 2022**

AUTOR(A): PEDRO LUCAS LOPES DA SILVEIRA SILVA  
ORIENTADOR: MICHELLE SIMÕES REBOITA  
Local e Data da Defesa: Itajubá, 03 de novembro de 2023.

No inverno do ano de 2022 ocorreram anomalias negativas de precipitação na região sudeste do Brasil com variabilidade espacial, concentradas em São Paulo nos meses de junho e julho e em Minas Gerais em agosto. Esse estudo tem como objetivo descrever os padrões de grande escala da atmosfera que contribuíram para o déficit de precipitação, bem como avaliar a performance da previsão sazonal, para o referido período do ano, de três modelos climáticos. A base de dados para o desenvolvimento do trabalho foi a reanálise ERA5. Há uma grande variabilidade nas características da atmosfera em cada mês do inverno de 2022. Por exemplo, em junho de 2022 o Anticiclone do Atlântico Sul (ASAS) estava mais fraco do que a climatologia e mesmo assim isso não ocorreu aumento de chuva. Outro fato importante foi que o inverno de 2022 ocorreu durante um período de La Nina que, embora não tenha sinal claro no sudeste, quando combinada a outros padrões de teleconexão pode favorecer a chuva. Isso também não se verificou. Em geral, as anomalias secas obtidas foram mais associadas com um trem de ondas que teve origem em diferentes setores do Pacífico e contribui com anomalias anticiclônicas em partes do sudeste do país. Em resumo, a avaliação indicou que o modelo SEAS5 exibe um desempenho superior até dois meses antes da estação do ano escolhida para validação. Entretanto, um mês antes, o SPSP-SVM mostra uma eficácia melhor. Para confirmar a consistência desses resultados, são necessárias validações em outras estações do ano.

Palavras-chave: Inverno. déficit hídrico. teleconexões. bloqueios atmosféricos.

## LISTA DE FIGURAS

- FIGURA 1 - Representação da área de estudo: no lado esquerdo se encontra o território brasileiro com seus estados, e do lado direito, a área de estudo (sudeste).....15
- FIGURA 2 - Precipitação do GPCP (mm/dia) para os meses de junho, julho, agosto e para os três meses juntos (figuras 2a-d). Temperatura da superfície do mar (°C) para os meses de junho, julho, agosto e para os três meses juntos (figuras 2e-h).Radiação de onda longa emergente ( $W/m^2$ ) para os meses de junho, julho, agosto e para os três meses juntos (figuras 2i-l).....24
- FIGURA 3 - Anomalia de altura geopotencial (Metros) para os níveis de 1000, 500 e 250 hPa, para os meses de junho, julho, agosto e JJA.....25
- FIGURA 4 - Função de corrente (figura 4a-d) para os meses de junho, julho, agosto e para os três meses juntos. Anomalia de altura geopotencial (figuras 4e-h) (Metros) para o nível de 250 hPa, para os meses de junho, julho, agosto e JJA.....27
- FIGURA 5 - Anomalias dos jatos em altos níveis comparadas com a climatologia para os meses de junho, julho, agosto e para os três meses juntos.....28
- FIGURA 6 - Diagrama de Hovmoller (longitude-tempo) para o cálculo do GHGN centrado em 50°S e GHGN centrado em 35° para o mês de junho.....29
- FIGURA 7 - Diagrama de Hovmoller (longitude-tempo) para o cálculo do GHGS centrado em 50°S e GHGS centrado em 35° para o mês de junho.....30
- FIGURA 8 - Bloqueios atmosféricos no mês de junho.....30
- FIGURA 9 - Diagrama de Hovmoller (longitude-tempo) para o cálculo do GHGN centrado em 50°S e GHGN centrado em 35° para o mês de julho.....31

FIGURA 10 - Diagrama de Hovmoller (longitude-tempo) para o cálculo do GHGS centrado em 50°S e GHGS centrado em 35° para o mês de julho.....	32
FIGURA 11 - Bloqueios atmosféricos no mês de julho.....	32
FIGURA 12 - Diagrama de Hovmoller (longitude-tempo) para o cálculo do GHGN centrado em 50°S e GHGN centrado em 35° para o mês de agosto.....	33
FIGURA 13 - Diagrama de Hovmoller (longitude-tempo) para o cálculo do GHGS centrado em 50°S e GHGS centrado em 35° para o mês de agosto.....	34
FIGURA 14 - Bloqueios atmosféricos no mês de agosto.....	34
FIGURA 15 - Variação das fases da oscilação de Madden-Julian para os meses de abril, maio e junho .....	38
FIGURA 16 - Variação das fases da oscilação de Madden-Julian para os meses de julho, agosto e setembro .....	38
FIGURA 17 - Previsão sazonal para precipitação referentes a rodada iniciada em 2022-03-01 para os modelos SPSP-SVM (figuras 14a, 14b e 14c), SEAS5 (figuras 14d, 14e e 14f), CFSV2 (figuras 14g, 14h e 14i) e CPC (figuras 14j, 14k e 14l).....	40
FIGURA 18 - Previsão sazonal para precipitação referentes a rodada iniciada em 2022-04-01 para os modelos SPSP-SVM (figuras 15a, 15b e 15c), SEAS5 (figuras 15d, 15e e 15f), CFSV2 (figuras 15g, 15h e 15i) e CPC (figuras 15j, 15k e 15l).....	41
FIGURA 19 - Previsão sazonal para precipitação referentes a rodada iniciada em 2022-05-01 para os modelos SPSP-SVM (figuras 16a, 16b e 16c), SEAS5 (figuras 16d, 16e e 16f), CFSV2 (figuras 16g, 16h e 16i) e CPC (figuras 16j, 16k e 16l).....	42

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - Índices de teleconexões e impactos no sudeste do Brasil.....	19
TABELA 2 - Valores dos índices de teleconexão para os meses de maio, junho, julho e agosto.....	37
TABELA 3 - Quantidade de dias em que a OMJ permaneceu em cada uma de suas fases nos meses de maio, junho, julho e agosto.....	39

## LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

AS - América do Sul

ASAS - Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul

CFSv2 - Climate Forecast System Version 2

ENOS - El Niño-Oscilação Sul

TSM - Temperatura da superfície do mar

EN - El Niño

LN - La Niña

ECMWF - European Centre for Medium-Range Weather Forecasts

HGT - Altura geopotencial

ROL - Radiação de onda longa

CPC - Climate Prediction Center

GPCP - Global Precipitation Climatology Project

ONI - Índice Niño Oceânico

TSA - Índice Tropical do Atlântico Sul

TNA - Índice Tropical do Atlântico Norte

SASDI - Índice Dipolo Subtropical do Atlântico Sul

SAODI - Índice Dipolo do Oceano Atlântico Sul

AAO - Oscilação Antártica

IASAS - Índice do Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul

IOD - Dipolo do Oceano Índico

OMJ - Oscilação de Madden-Julian

GFS - Global Forecast System

SPSP-SVM - Support Vector Machines

SEAS5 - Seasonal Forecast System Version 5

ZCAS - Zona de Convergência do Atlântico Sul

ZCIT - Zona de convergência intertropical

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b>	<b>12</b>
<b>2. MATERIAL E MÉTODOS</b>	<b>15</b>
2.1. Descrição da área de estudo	15
2.2 Dados	15
2.3 Circulação atmosférica	16
2.4 Identificação de bloqueios atmosféricos	17
2.5 Análise dos índices de teleconexão	18
2.6 Análise das previsões climáticas	20
2.6.1 Modelo do SPSP-SVM	20
2.6.2 Modelo do SEAS5	20
2.6.3 Modelo do CFSv2	21
2.6.4 Caracterização da performance dos modelos	21
<b>3. RESULTADOS E DISCUSSÃO</b>	<b>22</b>
<b>3.1 Anomalias da circulação atmosférica</b>	<b>22</b>
<b>3.2 Bloqueios atmosféricos</b>	<b>28</b>
<b>3.3 Índices de teleconexão</b>	<b>35</b>
<b>3.4 Validação de previsões sazonais</b>	<b>39</b>
<b>4. CONCLUSÃO</b>	<b>43</b>
<b>5. REFERÊNCIAS</b>	<b>44</b>

## 1. INTRODUÇÃO

A precipitação é uma das principais variáveis atmosféricas que têm a capacidade de interferir diretamente nas atividades humanas como a agricultura, pecuária, geração de energia, turismo etc. (SILVA *et al.*, 2019). Outro setor impactado é na qualidade do ar (DEL PINO, KRUGER, FERREIRA., 1996).

A distribuição da precipitação na América do Sul (AS) não é homogênea temporalmente e espacialmente, fato associado à sua grande extensão latitudinal e atuação de diversos sistemas meteorológicos (REBOITA *et al.*, 2012; FERREIRA e REBOITA, 2022). Na região sudeste do Brasil, a precipitação é máxima no verão e mínima no inverno (REBOITA *et al.*, 2012). Este padrão está associado às diferenças na circulação atmosférica entre esses dois períodos do ano, que caracterizam o clima como de monção (GAN *et al.*, 2009; TEODORO *et al.*, 2021; FERREIRA e REBOITA., 2022). De acordo com Ferreira e Reboita (2022), entre os principais sistemas que contribuem para a precipitação nessa região estão: a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), que consiste em uma banda persistente de nebulosidade e de precipitação, se estendendo do sul da Amazônia, passando pelo sudeste e chegando ao oceano Atlântico Sul e sendo típica do período de verão; os jatos de baixos níveis a leste dos Andes; o escoamento do setor oeste do Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul (ASAS), atuação de sistemas frontais, que se propagam das altas para as baixas latitudes, e de sistemas ciclônicos na costa sudeste.

Durante o inverno, a característica dominante no setor leste do Brasil é a influência do ASAS, que é um sistema de alta pressão semipermanente, caracterizado por movimentos subsidentes de ar, que inibem a formação de nuvens, e que dificulta a formação de sistemas de baixa pressão, resultando em condições estáveis nas áreas de influência (SANTOS; CARVALHO; REBOITA., 2016; DA FRANCA; HE *et al.*, 2017); portanto, o ASAS propicia dias de céu claro e ventos fracos. A região sudeste do Brasil, no inverno (junho, julho e agosto), além de receber menos precipitação, também apresenta as menores temperaturas em relação ao verão (dezembro, janeiro e fevereiro). Muitas vezes podem ocorrer ondas de frio associadas às incursões de massas de ar frio advindas das cercanias da Antártica e região sul da América do Sul do continente (CARPENEDO 2009; REBOITA; ESCOBAR; LOPES 2015).

Embora o inverno seja a estação do ano com menor volume de precipitação na região sudeste, essa ainda pode apresentar variabilidade, isto é, maiores ou menores volumes em comparação com a média climatológica. No caso de menor volume, isso é um fato preocupante, pois como no inverno a estação já é seca e se a precipitação ainda for mais reduzida, vários segmentos, como agricultura podem ser negativamente impactados. Um exemplo foi o que ocorreu no inverno de 2022 que, de acordo com o INMET, a região sudeste sofreu com 35% de chuvas abaixo da média.

Uma vez que os volumes de chuva são reduzidos nos sudeste do Brasil no inverno, não há muitos estudos que se preocupam com a variabilidade climática dessa estação do ano. A maioria dos estudos é para o período de verão, como por exemplo, Coelho *et al.* (2015) que discutiram a seca ocorrida durante o verão (dezembro, janeiro e fevereiro) de 2014, indicando a combinação de fatores como uma fonte de calor anômala sobre o norte e nordeste da Austrália que causou perturbações na atmosfera com movimentos subsidentes de ar sobre o sudeste do Brasil, fenômeno que intensificou o ASAS sobre a região. Como o ASAS estava anormalmente sobre o continente, a alta pressão inibiu os movimentos ascendentes na atmosfera sobre a região sudeste do Brasil, desencadeando diversos processos como a não formação de nuvens e favorecendo o aquecimento das águas oceânicas. Como as águas se mantiveram mais aquecidas e a alta mais intensificada, ocorreu um desfavorecimento para passagem de frentes frias sobre a região.

Muitos episódios de variabilidade climática em diferentes partes do globo estão ligados aos diferentes padrões de teleconexão como, por exemplo, ao fenômeno do *El Niño*-Oscilação Sul (ENOS), que está associado com anomalias de temperatura da superfície do mar (TSM) nos setores central e leste do oceano Pacífico Tropical, que perturba a circulação global (ANDREOLI *et al.*, 2017, REBOITA *et al.*, 2021). O ENOS tem duas fases: a quente conhecida como El Niño (EN) e a fria conhecida como La Niña (LN). Enquanto o EN causa excesso de precipitação na região sul do Brasil e déficit em partes da Amazônia e nordeste do país, condições opostas são observadas durante os episódios de LN (REBOITA *et al.*, 2019, 2021). Já, na região sudeste, esses eventos não possuem sinal claro, isto é, se conduzem a excesso ou déficit de precipitação associados com uma dada fase (MINUZZI *et al.*, 2006). Não apenas o ENOS afeta o clima na América do Sul e

sudeste do Brasil, mas outros padrões de teleconexão como o modo anular sul, dipolo do oceano Índico etc. (REBOITA et al., 2021).

Os mecanismos de teleconexão também podem conduzir a formação de bloqueios atmosféricos que, conseqüentemente, causam variabilidade no clima (MARQUES e RAO, 1996).

A formação dos bloqueios pode estar associada com a quebra nas ondas de Rossby (RODRIGUES e WOOLLINS, 2017). Os bloqueios atmosféricos se configuram em 500 hPa, em torno de 60° de latitude, em ambos os hemisférios, e associado a eles há uma bifurcação no escoamento zonal, já que a região com a alta de bloqueio impede o escoamento normal para leste (MENDES *et al.*, 2019). Assim, a região sob o bloqueio, em geral, sofrerá déficit de precipitação, enquanto a passagem dos jatos em altos níveis nas cercanias da alta podem causar condições propícias ao excesso de precipitação (NASCIMENTO e AMBRIZZI, 2002; MENDES, DA SILVA ARAGÃO e DE FATIMA CORREIA, 2019). Além disso, os bloqueios podem causar ondas de calor e secas no verão (RODRIGUES e WOOLLINS, 2017).

O estudo de GOZZO *et al.* (2021) mostra um padrão de bloqueio no Pacífico Sul que desfavorece o avanço de perturbações em médios e altos níveis em direção à América do Sul, afetando o sudeste do Brasil, bem como o transporte de umidade das regiões tropicais em direção a região de São Paulo levando a um déficit de precipitação. A ocorrência de bloqueios no Pacífico Sul também afeta a passagem de sistemas em baixos níveis que poderiam perturbar as condições de tempo para a região sudeste do Brasil.

Diante de toda a discussão prévia, o objetivo deste estudo é descrever os padrões de grande escala que podem ter contribuído para o déficit de precipitação observado no inverno de 2022 na região sudeste do Brasil e analisar a qualidade da previsão sazonal dessa estação realizada por três modelos climáticos.

## 2. MATERIAL E MÉTODOS

### 2.1. Descrição da área de estudo

A área de estudo compreende a região sudeste do Brasil (estados de Minas Gerais, Rio de Janeiro, São Paulo e Espírito Santo), que cobre cerca de 924.620 km<sup>2</sup>. A região concentra 89.632.912 habitantes, que corresponde a aproximadamente 42,01% da população total do país (IBGE, 2021). O sudeste é a região mais populosa e rica do país e a que possui a única megalópole do Brasil, São Paulo (EMBRAPA, 2021).

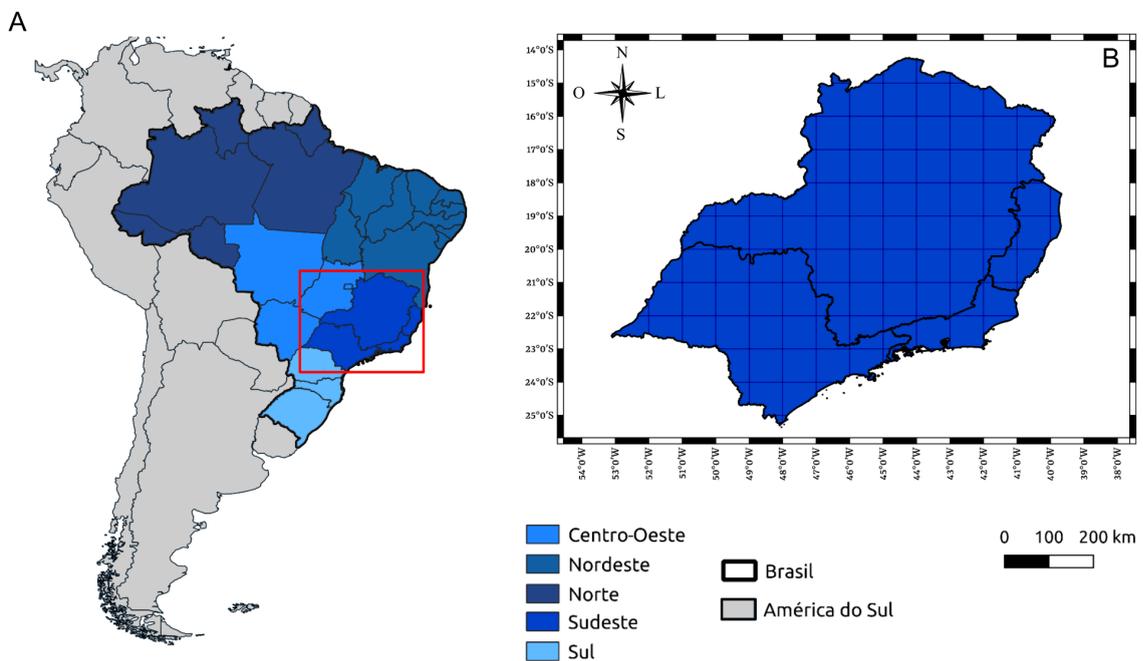


Figura 01 - Representação da área de estudo: no lado esquerdo se encontra o território brasileiro com seus estados, e do lado direito, a área de estudo (sudeste).

### 2.2 Dados

A base de dados utilizada é a reanálise ERA5 (HERSBACH *et al.*, 2020), disponibilizado pelo *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF). As variáveis usadas foram obtidas com frequência mensal e resolução horizontal de 0,25° x 0,25°, em níveis de pressão são (1000, 500 e 250 hPa): geopotencial, que foi convertido para altura geopotencial (hgt, em metros) dividindo o dado por 9,8 e componentes zonal e meridional do vento. Para o nível de superfície, as variáveis são: precipitação, temperatura da superfície do mar (TSM) e radiação de onda longa (*surface net thermal radiation*, ROL). A ROL é fornecida em

J/m<sup>2</sup>; nesse estudo a ROL foi convertida para W/m<sup>2</sup> dividindo o dado mensal por 86400.

Dois conjuntos de dados de precipitação são usados: o *Climate Prediction Center* (CPC) (XIE et al., 2007; CHEN et al., 2008) e o *Global Precipitation Climatology Project* (GPCP) (ADLER et al., 2003). O dado do GPCP (mm/dia) possui resolução horizontal de 2,5° x 2,5°. O conjunto de dados do CPC possui resolução horizontal de 0,5° x 0,5°; para obter-se a chuva em mm/dia, o dado do CPC foi multiplicado por 10. Os dados do GPCP foram obtidos para os meses de junho, julho e agosto entre 1980 à 2022 e o CPC foi obtido para o período de jan-1993 a dez-2016. O uso de duas bases de dados diferente é devido ao GPCP ser um modelo global com uma resolução maior que combina várias fontes de dados para produzir estimativas abrangentes de precipitação em todo o mundo, enquanto o CPC possui uma grade menor e, por isso é utilizado para fazer uma análise mais apurada sobre a AS, com um foco na região sudeste do Brasil.

Também são utilizados índices de teleconexão provenientes do sítio <https://meteorologia.unifei.edu.br/teleconexoes/>. Esses índices servem para descrever, de forma sintetizada, os padrões de grande escala da atmosfera e oceano que impactam o clima de regiões remotas (DE SOUZA e REBOITA, 2021). Nesse estudo são utilizados os índices: índice Niño Oceânico (ONI), Índice Tropical do Atlântico Sul (TSA), índice Tropical do Atlântico Norte (TNA), Índice Dipolo Subtropical do Atlântico Sul (SASDI), índice Dipolo do Oceano Atlântico Sul (SAODI), Oscilação Antártica (AAO), índice Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul (IASAS) e Dipolo do Oceano Índico (IOD). Todos os índices foram utilizados em escala mensal. Vide seção 2.5 para mais detalhes sobre os índices.

### **2.3 Circulação atmosférica**

O uso de dados da ERA5 tem como objetivo auxiliar na descrição dos mecanismos físicos associados com a escassez de precipitação, em escala global e sinótica, para o inverno de 2022 na região sudeste do Brasil. Os padrões da circulação atmosférica serão identificados através de composições e anomalias (média do inverno de 2022 menos a média climatológica do período de 1980 à 2022). As variáveis analisadas são:

(a) Altura geopotencial (metros) nos níveis de 1000, 500 e 250 hPa para identificar padrões de ondas na atmosfera.

(b) Função de corrente ( $10^6 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ ) é uma variável que apresenta vantagens em relação a altura geopotencial. Como a altura geopotencial não permite analisar o padrão de ondas em latitudes tropicais, devido ao gradientes muito fracos de temperatura do ar, é utilizada a função de corrente, que é definida como uma integral da componente zonal da velocidade do fluido ao longo de uma linha de corrente (MOREIRAS, PONT, ARANEO., 2018).

(c) Temperatura da superfície do mar ( $^{\circ}\text{C}$ ) que desempenha um papel crucial nos processos meteorológicos e climáticos, influenciando na formação de nuvens, evaporação da água, transferência de calor e umidade para a atmosfera e também na formação de sistemas climáticos, como os ciclones tropicais.

(d) As componentes zonais e meridionais do vento (m/s) são utilizadas para descrever os movimentos de ar na atmosfera, elas também são utilizadas para definir os jatos e o cisalhamento vertical do vento. A componente meridional refere-se ao movimento do ar no sentido norte-sul, enquanto a zonal refere-se ao movimento orientado no sentido leste-oeste. Essas componentes são de crucial importância para entender a circulação atmosférica e para em que direção os sistemas atmosféricos irão se deslocar.

(e) A radiação de onda longa (ROL em  $\text{W}/\text{m}^2$ ) desempenha um papel importante nos processos de aquecimento e resfriamento da superfície. A ROL varia entre 20 e  $-20 \text{ W}/\text{m}^2$ . Maiores valores de ROL indicam situação de pouca umidade na atmosfera, já que a radiação de onda longa está indo da superfície para fora da atmosfera. Já baixos valores indicam a presença de umidade e nebulosidade, pois a radiação fica retida.

## 2.4 Identificação de bloqueios atmosféricos

Para a identificação de regiões com características de bloqueio atmosférico no Hemisfério Sul, no período junho, julho e agosto de 2022, é calculado o índice de bloqueio definido por Tibaldi *et al.*, (1994) e adaptado por Lejenas e Oakland (1983). Esse índice avalia os gradientes horizontais de altura geopotencial entre bandas de latitude, isto é uma mais ao norte (GHGN, equação 1.0) e outra mais ao sul (GHGS, equação 1.1) . Portanto, o índice consiste no cálculo do GHGN e GHGS.

$$GHGN = \frac{Z(\phi_0) - Z(\phi_N)}{\phi_0 - \phi_N} \quad (1.0)$$

$$GHGS = \frac{Z(\phi_s) - Z(\phi_0)}{\phi_s - \phi_0} \quad (1.1)$$

em que:  $\phi_s = 65^\circ S + \Delta$ ,  $\phi_0 = 50^\circ S + \Delta$ ,  $\phi_N = 35^\circ S + \Delta$  e  $\Delta = 0^\circ$ .

Nas equações 1.0 e 1.1, o Z representa a altura geopotencial em 500 hPa e o  $\phi$  representa a banda de latitude.

Uma determinada longitude é definida com ocorrência de bloqueio em um dado instante no tempo se as seguintes condições forem satisfeitas:

$$GHGN > 0 \quad (1.2)$$

$$GHGS < \frac{-10 \text{ m}}{\text{Grau de latitude}} \quad (1.3)$$

Os dois índices foram calculados em duas faixas de latitude distintas, uma situada a  $50^\circ$  de latitude sul e a outra a  $35^\circ$  de latitude sul, e ao longo da banda de longitude que varia de  $10^\circ$  a  $180^\circ$  oeste. Os resultados obtidos foram posteriormente representados por meio de diagramas de Hovmoller, que ilustram as variações dos índices ao longo do tempo em relação à latitude. A persistência dos índices por pelo menos 3 dias são considerados situações de bloqueio atmosférico (Oliveira et al., 2014).

## 2.5 Análise dos índices de teleconexão

Os índices de teleconexão são utilizados para identificar e monitorar padrões de variabilidade climática em larga escala ao redor do mundo. A maioria dos índices são baseados na relação entre as anomalias de temperatura da superfície do mar (TSM) em diferentes regiões oceânicas e os padrões atmosféricos associados a essas variações. Eles são úteis para prever e compreender eventos climáticos extremos, como El Niño e La Niña, que têm impacto em várias partes do mundo. Na Tabela 1 são apresentados os índices usados no presente estudo e como eles afetam o sudeste do Brasil, de acordo com a literatura.

Tabela 1 - Índices de teleconexões e impactos no sudeste do Brasil baseado em *Reboita et al* (2021).

Nome	Definição	Fase - e impacto no SE	Fase + e impacto no SE
Índice Niño Oceânico (ONI)	O índice ONI é o principal indicador para o monitoramento de El Niño e La Niña.	Não possui um sinal claro sobre a região.	Não possui um sinal claro sobre a região.
Índice Tropical do Atlântico Sul (TSA)	O índice TSA é um indicador da TSM no oceano Atlântico Tropical Sul.	Apresenta condições mais úmidas.	subsidência de ar sobre a região. Apresenta condições mais secas.
Índice Tropical do Atlântico Norte (TNA)	O índice TNA é um indicador da temperatura da superfície do mar no oceano Atlântico Tropical Norte.	Apresenta condições mais úmidas.	Apresenta condições mais secas.
Índice Dipolo Subtropical do Atlântico Sul (SASDI)	O SASDI é obtido através do cálculo das médias espaciais das anomalias de temperatura da superfície do mar para o setor nordeste do Atlântico Sul, 0°–20°O e 15°S–25°S.	Há um aumento da precipitação sobre a região.	Há uma diminuição da precipitação sobre a região.
<i>Índice Dipolo do Oceano Atlântico Sul</i> (SAODI)	O SAODI é obtido no setor nordeste do Atlântico Sul, 10°E–20°W, 0°–15°S, e para o setor subtropical, 10°–40°W, 25°S–40°S.	Há um aumento da precipitação sobre a região.	Há uma diminuição da precipitação sobre a região.
Oscilação Antártica (AAO)	A AAO é caracterizada por perturbações de altura geopotencial zonalmente simétricas com sinais opostos entre a Antártica e as latitudes a cerca de 45°S.	Anomalias negativas de precipitação	Fraco sinal de anomalias positivas de precipitação e ajuda a modular a ZCAS.
<i>Índice Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul</i> (IASAS)	O IASAS é obtido computando-se a diferença das anomalias mensais de pressão atmosférica ao nível médio do mar entre a	A região sudeste apresenta um período chuvoso.	A região sudeste apresenta um período seco, já que os baixos níveis a leste dos Andes se dirigem para sul.

	região sudeste (25°S-15°S;50°W-40°W) e sul (37.5°S-27.5°S;60°W-50°W) do Brasil.		
Dipolo do Oceano Índico (IOD)	O IOD é definido por anomalias de TSM de sinais opostos entre a região oeste (50°E-70°E e 10°S-10°N) e leste do oceano Índico (90°E-110°E e 10°S-0°N).	Não há uma consistência de valores sobre a região.	Não há uma consistência de valores sobre a região.

## 2.6 Análise das previsões climáticas

Por fim, foi analisada a qualidade das previsões climáticas do inverno de 2022 obtidas dos modelos *Global Forecast System* (GFS), ECMWF e com o modelo estatístico da Marangon Consultoria e Engenharia (MC&E); todos os dados foram obtidos diretamente da MC&E através de comunicação pessoal.

### 2.6.1 Modelo do SPSP - SVM

O modelo estatístico da MC&E foi desenvolvido baseado na metodologia de *Support Vector Machines* (SPSP - SVM), que se trata de um algoritmo de aprendizagem de máquina inicialmente desenvolvido com um foco na resolução de desafios envolvendo a classificação de dados. O modelo foi implementado para a previsão sazonal da precipitação e suas rodadas inicializadas em março, abril e maio de 2022 são analisadas aqui. Os outputs do modelo são mensais e possuem uma resolução horizontal de 0,5°.

### 2.6.2 Modelo do SEAS5

O *Seasonal Forecast System Version 5* (SEAS5) (JOHNSON *et al.*, 2019) pertencente ao *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF) é um modelo dinâmico e acoplado que tem como objetivo prever as mudanças de longo tempo na atmosfera e no oceano em escala global. A cada execução desse modelo, ele gera previsões sazonais de padrões de precipitação, com uma resolução espacial horizontal de 37 km. Esses resultados são disponibilizados de forma gratuita, mas com resolução de 1° e um horizonte de previsão de 215 dias, o

que equivale a cerca de 7 meses. No início de cada mês, no dia 01, o modelo é executado, produzindo um conjunto de 25 membros. Dentro desse conjunto, um deles é designado como grupo controle, enquanto os demais são configurados como perturbações, que resultam da combinação de variações nas condições iniciais da atmosfera e na temperatura da superfície do mar. As previsões do ECMWF utilizadas correspondem ao ensemble de todos os membros disponibilizado no primeiro dia do mês.

### **2.6.3 Modelo do CFSv2**

O modelo *Climate Forecast System Version 2* (CFSv2) utiliza o modelo de superfície de Noah (SAHA *et al.*, 2014). O CFSv2 é um modelo dinâmico e acoplado, simulando a interconexão entre os oceanos, solo e a atmosfera terrestre. As simulações de controle são realizadas quatro vezes ao dia, e abrangem um período de 9 meses. A previsão do CFSv2 corresponde ao ensemble realizado com os membros referentes aos dias 01, 05, 10, 15, 20 e 25 de cada mês de inicialização. O CFSv2 é um modelo integrado diariamente em uma grade de 0,9° x 0,9° de latitude e longitude

### **2.6.4 Caracterização da performance dos modelos**

Com base nos estudos de Silva *et al.* (2011), Carvalho *et al.* (2012), Almeida *et al.* (2018) e Torres *et al.* (2020), o CPC tem demonstrado resultados robustos quando seus valores são comparados com medidas de precipitação *in situ*. Portanto, o CPC é utilizado no presente estudo para validar as previsões sazonais. Como as climatologias dos modelos foram calculadas entre 1993 a 2016, o mesmo foi feito para o CPC.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1 Anomalias da Circulação Atmosférica

Na figura 2 são apresentadas as anomalias de precipitação, TSM e ROL para os meses de junho, julho e agosto de 2022 bem como para a média trimestral. Nos três meses ocorreram anomalias negativas de precipitação no sudeste do Brasil, com valores mais intensos no mês de julho (figura 2b). Nos meses de junho e julho as anomalias negativas ficaram concentradas no Estado de São Paulo (figura 2a,b), enquanto em agosto, no Estado de Minas Gerais (figura 2c). Como o sudeste do Brasil ficou seco durante o inverno, a ROL apresentou anomalia positiva, indicando que a energia do sistema terrestre estava sendo liberada para fora da atmosfera (figura 2i-l).

As anomalias negativas de precipitação na região sudeste do Brasil também se estendem pelo oceano Atlântico. Porém, a ROL não mostra sinal anômalo nessa região no Atlântico. Por outro lado, predominam anomalias negativas de TSM na mesma região em que ocorrem as anomalias negativas de precipitação. Isso é um fato interessante, pois quando há ausência de nebulosidade, a TSM, em geral, mostra anomalias positivas devido à energia solar atingir diretamente o oceano. Já ao sul das anomalias negativas de TSM predominam anomalias positivas dessa variável (figura 2e-h). Nos meses de julho e agosto, as anomalias positivas de TSM podem ter relação com a posição anômala do ASAS para sul de sua climatologia (figura 2f, g). A presença do anticiclone favorece condições de céu limpo, permitindo que a radiação solar aqueça a superfície oceânica. Já em junho, o ASAS estava enfraquecido, como mostram as anomalias de altura geopotencial em 1000 hPa (figura 3a). A presença anômala do ASAS e as TSMs mais quentes podem contribuir para um cenário menos propício à passagem de sistemas frontais sobre a região sudeste do Brasil, já que as massas frias podem perder intensidade ao passar sobre o oceano aquecido. De fato, no mês de julho de 2023, apenas um sistema frontal conseguiu influenciar o sul de Minas Gerais (<https://meteorologia.unifei.edu.br/pag/boletim/index.php?month=202208>). Já em junho e agosto foram 3 sistemas. De acordo com os estudos de Chrysostomo, Machado e Reboita (2023), no período de inverno, no sul de Minas Gerais o número médio de frentes frias durante os anos de 2009 a 2021 foi de 7 sistemas chegando

sobre a região, ou seja, o ano de 2022 apresentou um número abaixo da climatologia.

Na figura 3 são mostradas as anomalias de altura geopotencial para cada mês e em três níveis atmosféricos (1000, 500 e 200 hPa). Tais anomalias são um indicativo da presença de ondas na atmosfera. Anomalias positivas estão frequentemente associadas a regiões com circulações anticiclônicas (alta pressão), enquanto valores negativos desta variável estão associados com movimentos ciclônicos (baixa pressão). O padrão espacial das anomalias de altura geopotencial se repetem nos três níveis verticais quando cada mês é analisado de forma individual, o que indica um padrão de onda barotrópico. Em junho (figuras 3a, e, i), há um núcleo de anomalias negativas no sudeste da Austrália que se curva em direção a latitudes mais altas e se torna intenso sobre a Península Antártica e tende a se conectar com as anomalias negativas no oceano Atlântico. Esse padrão de onda parece favorecer o enfraquecimento do ASAS. Em julho e agosto há anomalias positivas no sudeste da Austrália, que se estendem pelo Pacífico, mostram um núcleo sobre a Península Antártica e tendem a mostrar sinal no oceano Atlântico. Portanto, há um padrão mais distinto no mês de junho em relação aos demais meses. No mês de junho, anomalias positivas de altura geopotencial são evidentes sobre o sudeste do Brasil no nível de 250 hPa, enquanto que em julho são bem mais intensas e também ocorrem em 500 hPa. Em agosto e na média trimestral, o sinal anômalo positivo fica confinado em 250 hPa.

Anomalias positivas de altura geopotencial em médios e altos níveis podem (a) ser indicativas da presença de convergência de massa e subsidência e (b) ser a resposta a movimentos ascendentes que causam perturbação no topo da coluna atmosférica. No caso do sudeste do Brasil e no local do ASAS, o efeito (a) pode estar ocorrendo, já que essas áreas não mostram anomalias positivas de precipitação. Pode até não ocorrer um sinal intenso de anomalia positiva de altura geopotencial em baixos níveis da atmosfera sobre o sudeste do Brasil, mas a presença desse em médios e altos níveis pode ser um fator inibidor da formação de nuvens e precipitação.

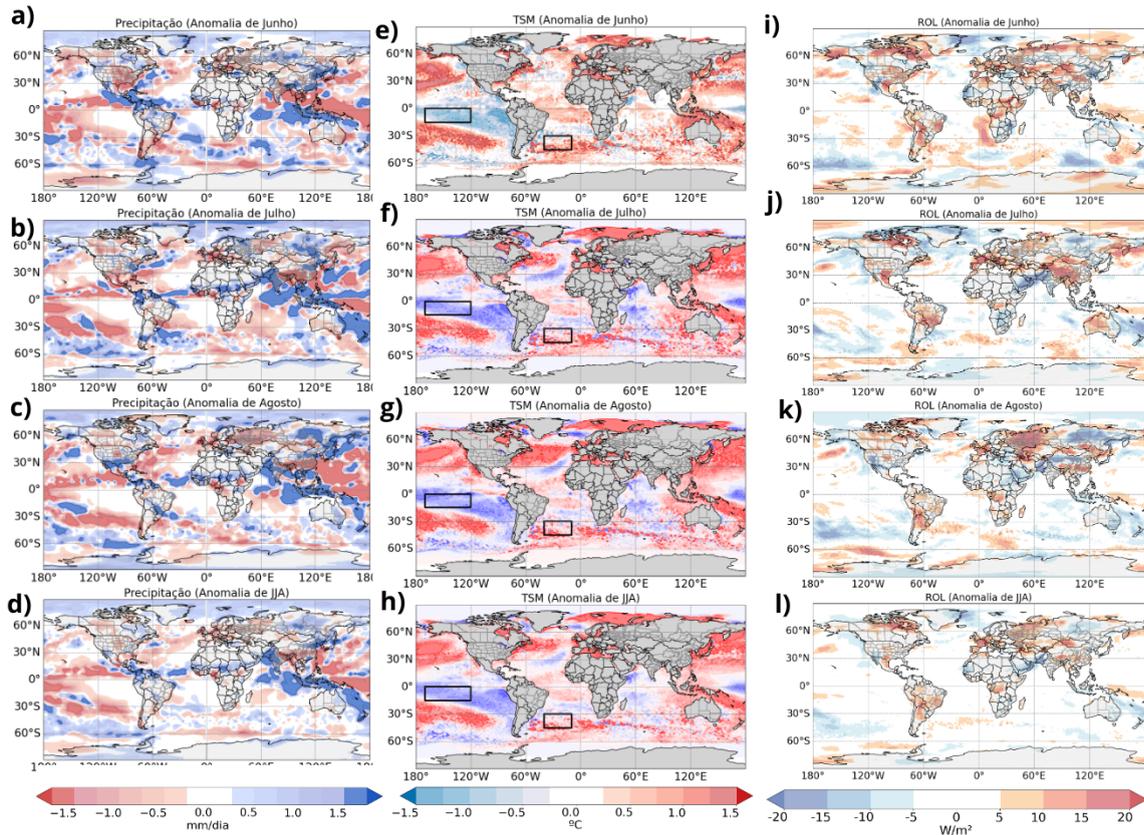


Figura 02 - Precipitação do GPCP (mm/dia) para os meses de junho, julho, agosto e para os três meses juntos (figuras 2a-d). Temperatura da superfície do mar ( $^{\circ}C$ ) para os meses de junho, julho, agosto e para os três meses juntos (figuras 2e-h). As áreas em preto indicam as áreas de atuação do índice ONI e TSA..Radiação de onda longa emergente ( $W/m^2$ ) para os meses de junho, julho, agosto e para os três meses juntos (figuras 2i-l).

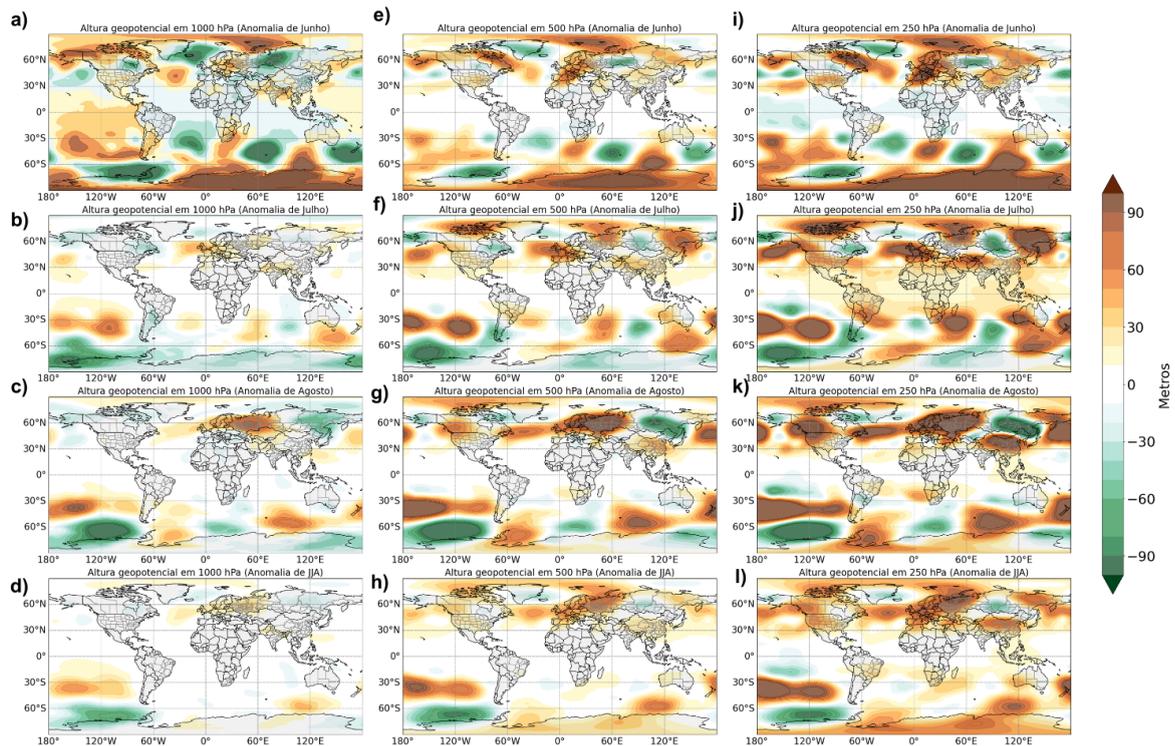


Figura 03 - Anomalia de altura geopotencial (Metros) para os níveis de 1000, 500 e 250 hPa, para os meses de junho, julho, agosto e JJA.

Analisa o campo da função de corrente, que, neste estudo, foi calculada no nível de 250 hPa. Valores positivos da função de corrente indicam movimentos ciclônicos (anomalias de baixa pressão, B) enquanto negativos anticiclônicos (anomalias de alta pressão, A). Além disso, essa variável reforça os resultados da figura 3 (altura geopotencial).

Em junho, o núcleo de alta pressão no centro do Pacífico parece ter conexão com as anomalias positivas de precipitação e negativas de ROL. Daí, há uma propagação de onda (ver raio de onda traçado na figura) que favorece o enfraquecimento do ASAS no Atlântico, já que domina um centro de anomalia ciclônica no Atlântico. Por outro lado, esse enfraquecimento não contribui para ocorrência de chuvas no sudeste do Brasil. Em julho também há um raio de propagação de onda do Pacífico leste para a América do Sul. A cerca de 120°W e ao sul de 30°S, há precipitação e anomalias negativas de ROL. Isso indica que movimentos ascendentes devem estar ocorrendo na atmosfera e forçando os níveis mais altos. Essa perturbação pode disparar um trem de ondas. Nesse episódio, o

trem de ondas foi propício ao núcleo de anomalias positivas de altura geopotencial em médios e altos níveis.

Por fim, em agosto, o padrão de onda tem a alta localizada no centro do Pacífico como no mês de junho, mas o trem de ondas é diferente, a baixa localiza-se a oeste da Península Antártica. Há sinal fraco de alta na região sudeste no campo de função de corrente. De uma forma resumida, a informação é que quando há atividade convectiva nos trópicos e subtropicais (regiões com precipitação e anomalias negativas de ROL), há movimentos ascendentes na atmosfera que causam perturbação em altos níveis (alta pressão) e, isso, responde na forma de ondas. As anomalias descritas no oceano Pacífico, em geral, parecem contribuir para o trem de ondas que acabam enfraquecendo o ASAS em junho e fortalecendo nos outros dois meses. Além disso, em todos os meses a circulação, que é barotrópica (figura 3) indica a presença de um núcleo de anomalia ciclônica no sul/sudeste da AS. Isso é outro fato que pode ajudar as condições mais secas no sudeste, já que o JBN quando configurado tenderá para o sudeste da América do Sul (sul do Brasil, norte da Argentina e Uruguai). De fato, a análise das anomalias do fluxo de umidade integrado na coluna não mostraram escoamento indo para o sudeste (figuras não mostradas).

Aí surge a pergunta, que fatores podem causar essas anomalias no oceano Pacífico que contribuem para gerar os trens de ondas e afetar o clima na América do Sul? Em geral, esses fatores correspondem aos modos de variabilidade interna do sistema climático, que até hoje ainda não há explicação para sua ocorrência. Um dos mais conhecidos é o El Niño e La Niña.

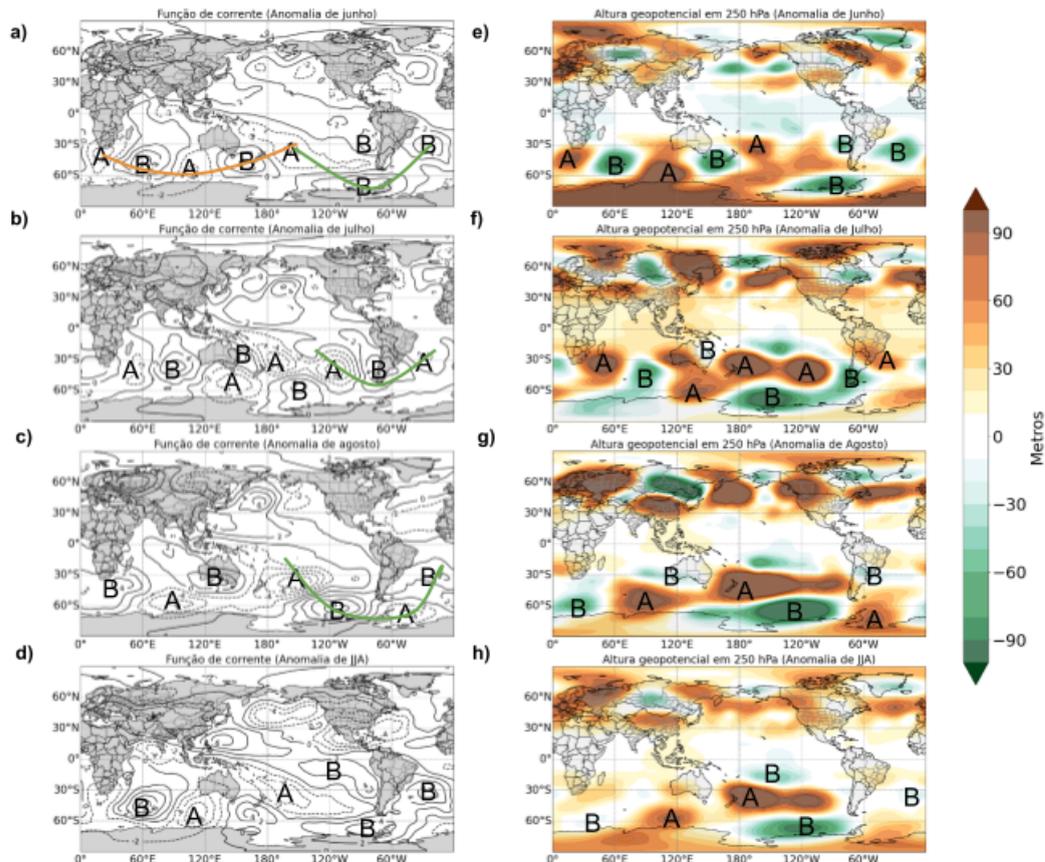


Figura 04 - Função de corrente (figura 4a-d) para os meses de junho, julho, agosto e para os três meses juntos. Anomalia de altura geopotencial (figuras 4e-h) (Metros) para o nível de 250 hPa, para os meses de junho, julho, agosto e JJA. As letras A e B representam os sistemas de altas e baixas pressões, respectivamente.

Como já mencionado, mesmo tendo uma anomalia negativa de altura geopotencial na região do ASAS em junho, a precipitação não foi favorecida no sudeste. Portanto, outros mecanismos deveriam estar atuando ao mesmo tempo para inibir a chuva. Assim, a análise seguinte foca nos jatos em altos níveis.

Na Figura 5 são mostrados os ventos com intensidade superior a 30 m/s em 250 hPa que caracterizam os jatos em altos níveis e sobreposto a esse campo estão as anomalias da intensidade do vento em cada mês do inverno de 2022. Em todos os meses, o jato esteve mais intenso do que a climatologia sobre a região sul do Brasil. Jatos intensos sobre o sul do país indicam que os sistemas frontais tiveram dificuldade de se deslocar para latitudes mais baixas. Na figura 2a-d nota-se que o sul do Brasil teve predomínio de anomalias positivas de precipitação. Em parte, pela contribuição dos jatos em altos níveis (frentes não se deslocam e também ajudam na formação de sistemas convectivos de mesoescala).

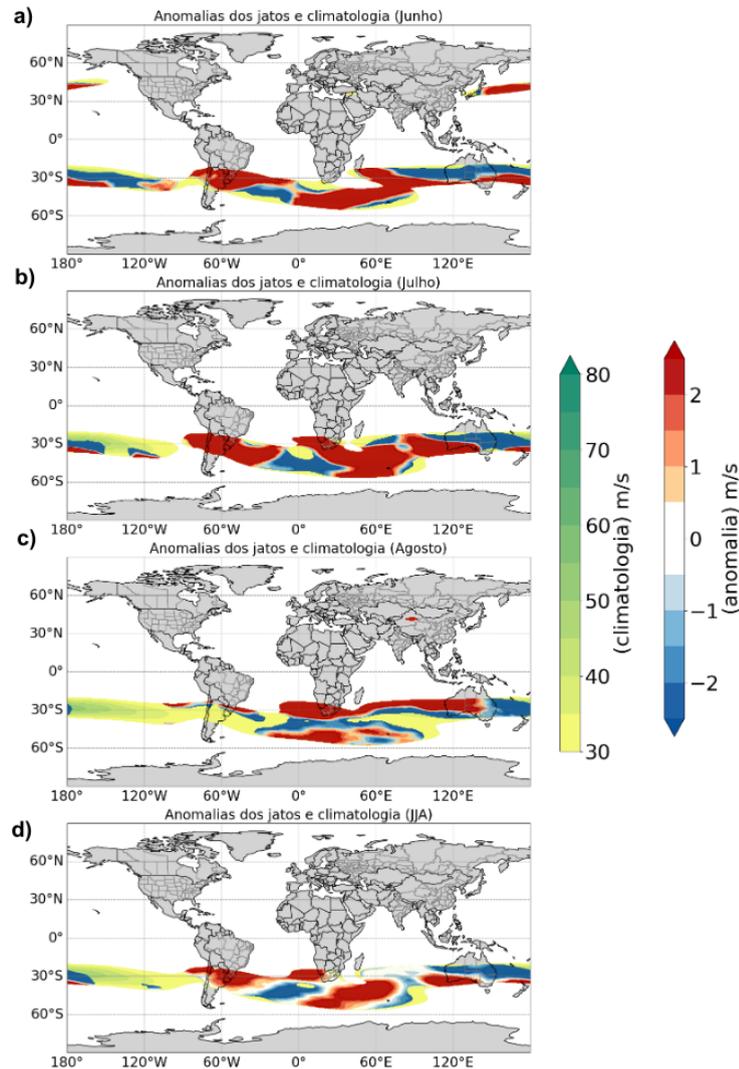


Figura 05 - Anomalias dos jatos em altos níveis comparadas com a climatologia para os meses de junho, julho, agosto e para os três meses juntos.

### 3.2 Bloqueios atmosféricos

As figuras 6 a 11 mostram o diagrama de Hovmoller (longitude-tempo) obtido com as equações GHGS e GHGN do índice de Tibaldi *et al* (1994). Para serem considerados como altas de bloqueio foram levados em conta aqueles sistemas que persistiram sobre a região por 3 dias ou mais e, que em uma situação de bloqueio, os índices GHGS e GHGN foram menores do que -10 e maiores do que 0, respectivamente.

Para o GHGS e GHGN centrados na latitude de 50° sul no mês de junho, pelos critérios de Tibaldi (1994), são identificados dois sistemas de bloqueio, um

localizado em torno da longitude de 80°W sob o sul da AS e outro em 40°W atuando na região sul do Brasil com duração de 6 e 3 dias, respectivamente. Para os índices centrados na latitude de 35° sul não foram identificados sistemas de bloqueio.

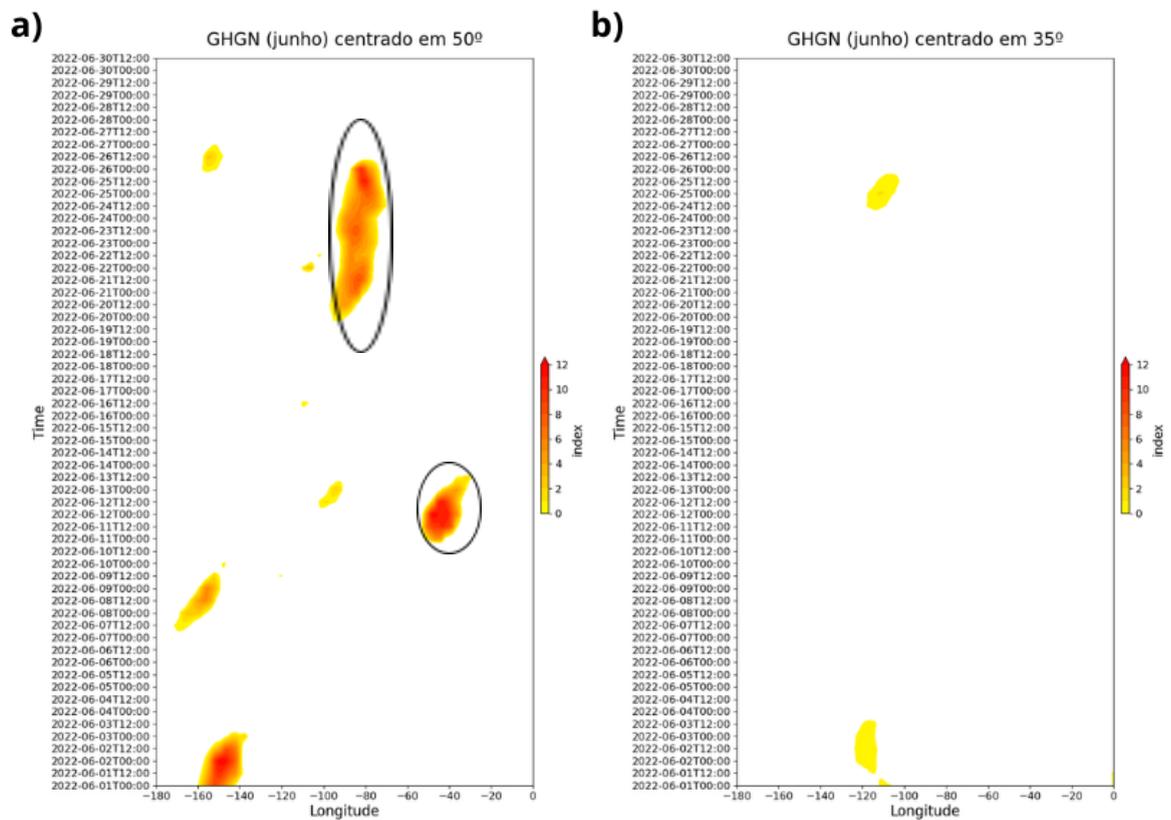


Figura 06 - Diagrama de Hovmoller (longitude-tempo) para o cálculo do GHGN centrado em 50°S e GHGN centrado em 35° para o mês de junho.

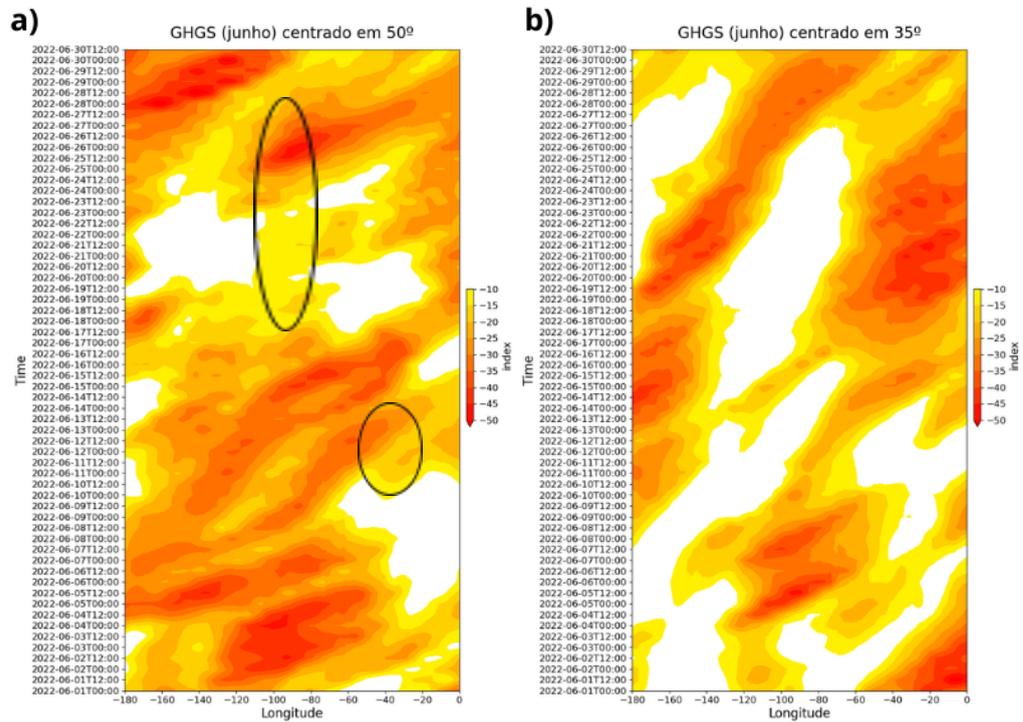


Figura 07 - Diagrama de Hovmoller (longitude-tempo) para o cálculo do GHGS centrado em 50°S e GHGS centrado em 35° para o mês de junho.

### Bloqueios atmosféricos (Junho/2022)

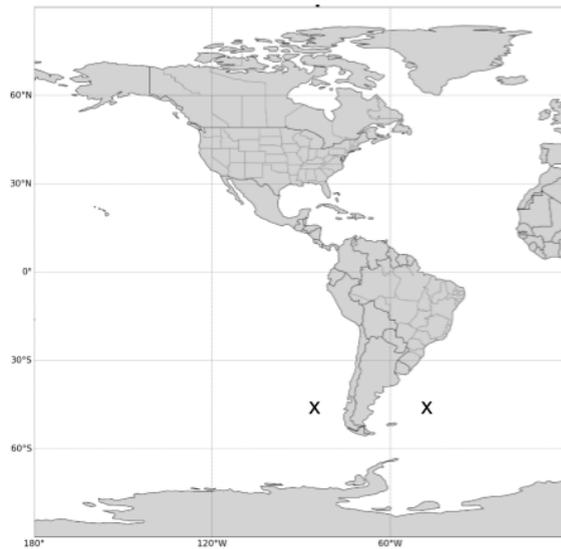


Figura 08 - Bloqueios atmosféricos atuantes sobre o mês de junho.

No mês de julho, na banda de latitude de 50° sul, ocorre uma situação de bloqueio atmosférico que se estende por cerca de 80°W de longitude e persistindo ao longo de quatro dias consecutivos. Para o GHGN e GHGS centrados na latitude

de 35° sul há a atuação de um sistema de bloqueio atuando sobre a longitude de aproximadamente 110°W com duração de quatro dias.

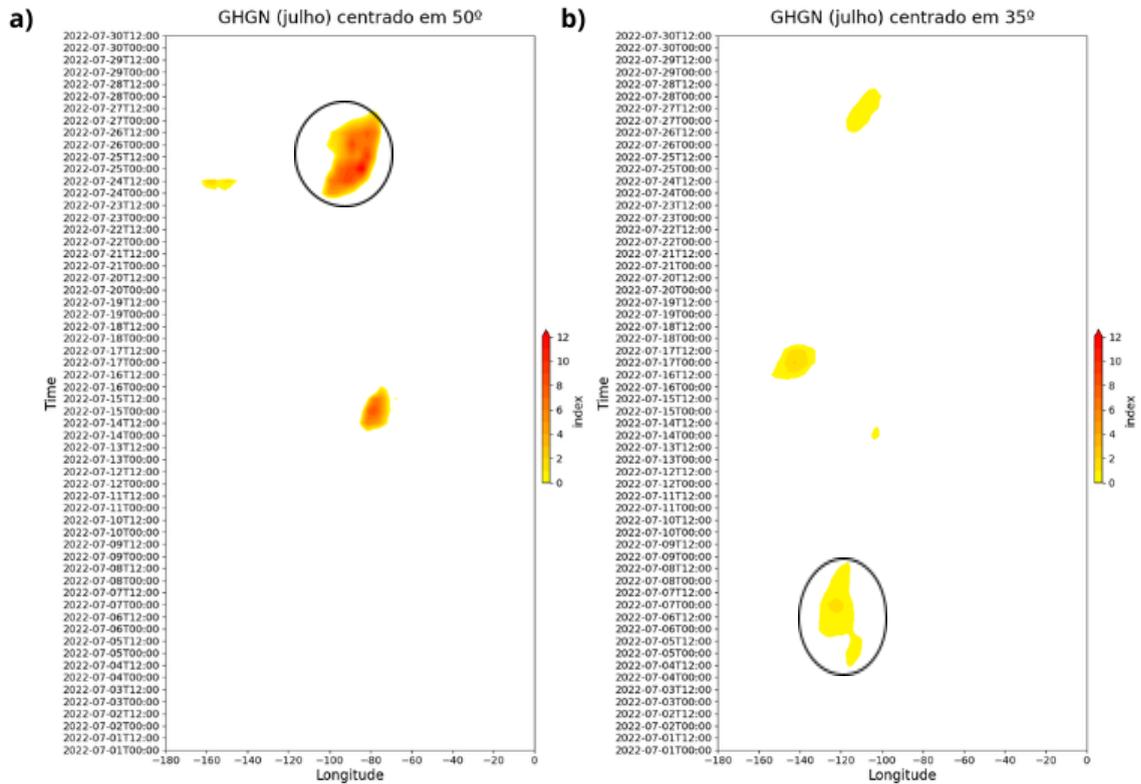


Figura 09 - Diagrama de Hovmoller (longitude-tempo) para o cálculo do GHGN centrado em 50°S e GHGN centrado em 35° para o mês de julho.

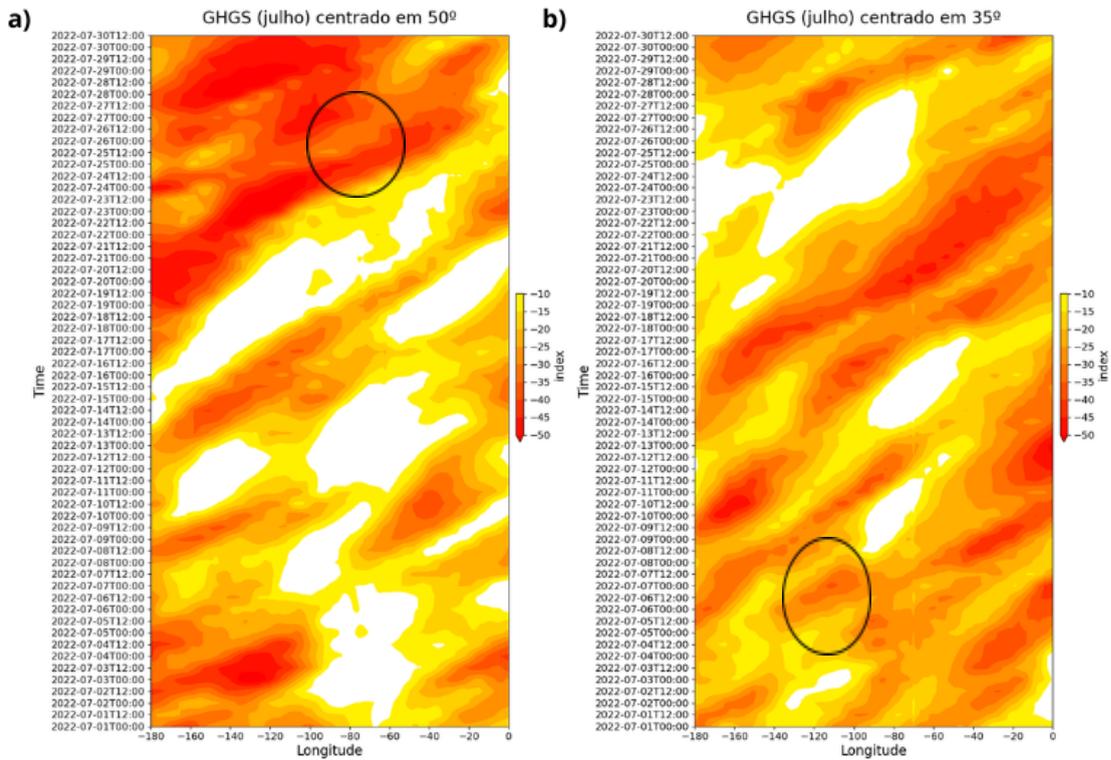


Figura 10 - Diagrama de Hovmoller (longitude-tempo) para o cálculo do GHGS centrado em 50°S e GHGS centrado em 35° para o mês de julho.

### Bloqueios atmosféricos (Julho/2022)

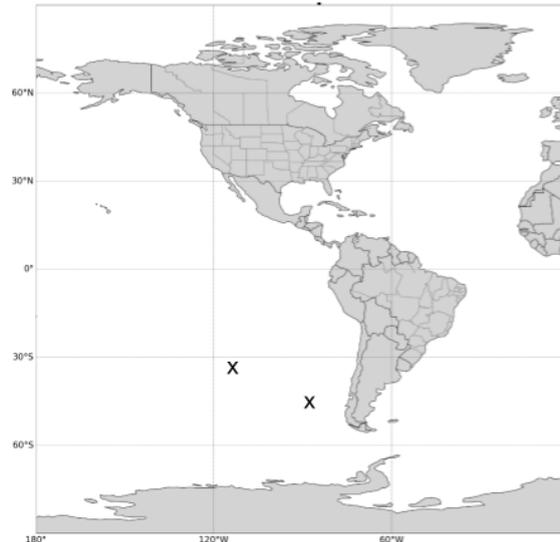


Figura 11 - Bloqueios atmosféricos atuantes sobre o mês de julho.

Para o mês de agosto no GHGN e GHGS centrados na latitude de 50° sul, temos a atuação de um sistema de bloqueio, centrado na longitude de 140°W com uma duração de aproximadamente três dias. Para os índices centrados na latitude de 35° sul foram encontrados três sistemas de altas pressões que seriam

considerados como bloqueios, centrados nas longitudes de 170°W com duração de quatro dias, 120°W com uma média de persistência de quatro dias. Por fim, temos o último bloqueio atuando sobre o oceano Atlântico, em uma longitude de, aproximadamente, 20°W.

Os diagramas de Hovmoller, para os meses de junho e agosto, indicaram um sistema de bloqueio atuando sob o sul do Brasil e o outro na região do oceano Pacífico. Quando este padrão se estabelece ao sul do país pode ocorrer uma certa dificuldade para o deslocamento dos sistemas frontais chegarem até a região sudeste e, como consequência há uma bifurcação do escoamento zonal, dificultando a ocorrência de chuva sobre esta porção.

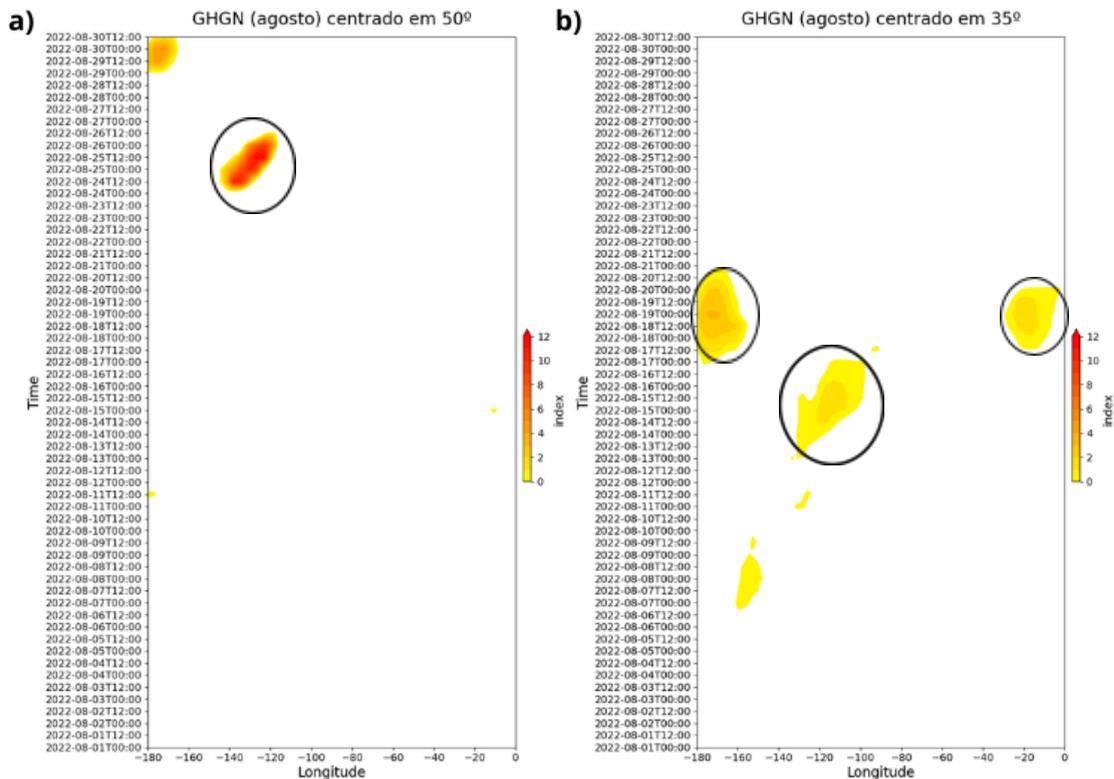


Figura 12 - Diagrama de Hovmoller (longitude-tempo) para o cálculo do GHGN centrado em 50°S e GHGN centrado em 35° para o mês de agosto.

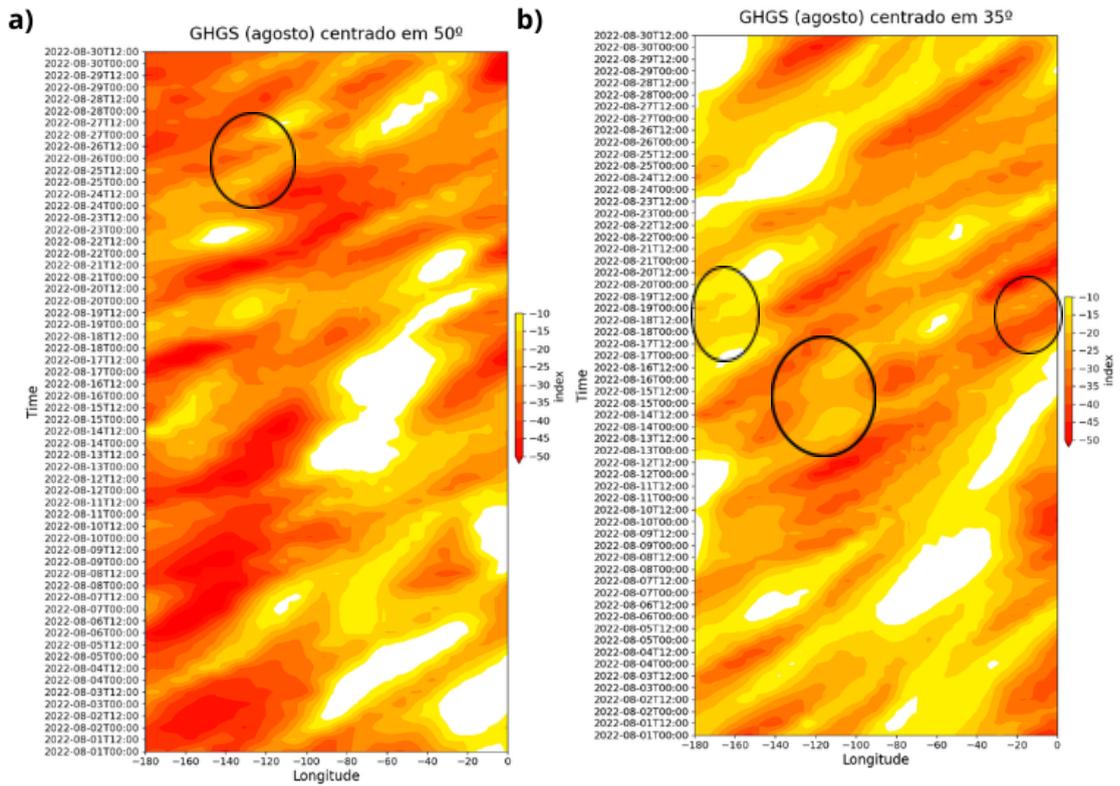


Figura 13 - Diagrama de Hovmoller (longitude-tempo) para o cálculo do GHGS centrado em 50°S e GHGS centrado em 35° para o mês de agosto.

### Bloqueios atmosféricos (Agosto/2022)

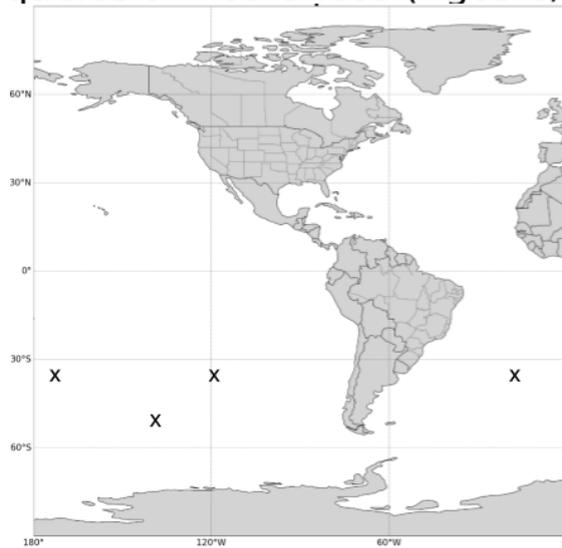


Figura 14 - Bloqueios atmosféricos atuantes sobre o mês de agosto.

### 3.3 Índices de teleconexão

Os índices de teleconexão são ferramentas importantes na meteorologia, pois ajudam a compreender e monitorar padrões climáticos globais. Nesta seção serão analisados os índices: ONI, TSA, TNA, SASDI, SAODI, AAO, IASAS e IOD nos três meses de inverno. Na tabela 2 também é incluído o mês de maio para fornecer uma ideia de evolução temporal do outono ao inverno.

Durante os meses de maio, junho, julho e agosto, os registros do Índice ONI com valores mais negativos do que -0,5 indicavam ocorrência de La Niña (LN). A LN é um fenômeno de acoplamento entre oceano e atmosfera que perturba a circulação zonal de Walker e com isso afeta a convecção tropical, que acaba causando distúrbios na circulação atmosférica global e, conseqüentemente, no clima (TRENBERTH, 1997; MCPHADEN, 2002). Na Figura 1 e-h as anomalias negativas de TSM no Pacífico tropical são indicativos de LN. Episódios de LN causam escassez de chuva no sudeste da América do Sul. Entretanto, na figura 2a-d foram observados alternâncias de áreas anômalas secas e úmidas. Tal sinal diferente do padrão climatológico de LN pode ter ocorrido pela posição do trem de ondas, mostrando uma anomalia ciclônica próximo ao sudeste da América do Sul.

O TNA e TSA apresentaram valores positivos, mas maiores no TSA, sugerindo que a ZCIT estivesse deslocada para sul de sua posição climatológica. Valores positivos de TSA são um indicativo de que a temperatura da superfície do mar está anormalmente quente sobre o oceano Atlântico Sul tropical. De acordo com GIANNINI, SARAVANAN, CHANG (2004), condições de LN quando combinadas a TSA positiva somam-se reforçando as anomalias positivas de precipitação na região nordeste do Brasil, concordando com a figura 2a-d. Esse padrão pode contribuir para ocorrência de subsidência na região sudeste do Brasil, intensificado o sinal da anomalia negativa de altura geopotencial mostrado na figura 3a-l, o que desfavorece a chuva na região sudeste. Com relação ao SASDI, para os meses de maio, junho, julho e agosto o índice apresentou valores negativos, ou seja, há anomalias negativas de TSM entre 10°E–20°W, 0°–15°S e positivas (SWP: 10°–40°W, 25°S –40°S). Essa informação é fácil de ser visualizada na figura 2 e-h e é outra forma de mencionar que o ASAS pode estar deslocado para sul.

De acordo com a literatura, a fase positiva da AAO (que aqui foi registrada em maio, julho e agosto, maio também foi incluído para dar uma ideia de sequência

temporal) está associada com (a) enfraquecimento do jato subtropical (figura 5a-d), mas sem mudança da sua posição latitudinal (CARVALHO *et al.*, 2005), (b) fortalecimento e deslocamento em direção ao polo do vórtice circumpolar e ventos zonais (ventos de oeste) ao redor da Antártica, o que é uma consequência da intensificação do gradiente horizontal de pressão entre médias e altas latitudes (MARSHALL, 2003; CARVALHO *et al.*, 2005) e (c) maior frequência de ciclones próximo à Antártica e no oceano Atlântico Sul subtropical e menor frequência próximo ao sul da Argentina (45°S) (REBOITA *et al.*, 2015). Vasconcellos *et al.* (2019) indicam que há uma grande variabilidade mensal dos sinais das anomalias de precipitação sobre o sudeste da América do Sul em diferentes fases do AAO. Em geral, todos os padrões descritos são opostos durante a sua fase negativa (junho). Autores como Carvalho *et al.*, (2005) discutem a relação entre a AAO e o ENOS. De acordo com esses autores, a fase positiva da AAO é dominante durante os períodos de LN. As climatologias de DE SOUZA e REBOITA (2021) mostraram que durante o período de inverno, independente da fase da AAO, não há um sinal forte nas anomalias de precipitação. Dos três meses em análise, sendo de LN, dois tiveram fase positiva da AAO, o que seria favorável a formação de ciclones na costa sudeste do Brasil contribuindo para canalizar a umidade do interior do continente e do oceano para tal região. Também causa interrogação o registro da fase negativa da AAO no mês de junho e ao invés de um favorecimento do ASAS ocorreu enfraquecimento. Talvez a explicação para esses padrões diferentes do esperado estão associados com o padrão de onda mostrado na função de corrente (figura 4a-d).

Para o IASAS, durante os meses de maio, junho e agosto o índice apresentou valores negativos, ou seja, a pressão atmosférica sobre a região sudeste do Brasil está menor do que a no sul do país. Já o mês de julho o índice está positivo, indicando que a pressão está maior na região sudeste. Esse sinal é similar ao mostrado nas anomalias de altura geopotencial.

Para os mesmos meses, o índice IOD apresentou valores negativos, em que a TSM no Oceano Índico Ocidental torna-se mais fria do que a parte oriental do oceano, concordando com a figura 2 e-h. Na literatura é mostrado preferência de IOD negativo quando há a ocorrência de eventos de LN. A climatologia de DE SOUZA e REBOITA (2021) não mostra uma consistência no sinal do IOD e a LN

sobre o sudeste entre todas as estações do ano. Além disso, JJA é o período com um sinal mais fraco.

Tabela 02 - Valores dos índices de teleconexão para os meses de maio, junho, julho e agosto.

	<b>ONI</b>	<b>TSA</b>	<b>TNA</b>	<b>SASDI</b>	<b>SAODI</b>	<b>AAO</b>	<b>IASAS</b>	<b>IOD</b>
<b>Maio</b>	-0,85	0,36	0,34	-0,3871	-0,0227	0,0965	-1,0488	-0,122
<b>Junho</b>	-0,81	0,61	0,48	-0,3747	0,4286	-0,8713	-2,0048	-0,335
<b>Julho</b>	-0,91	0,34	0,32	-0,4113	0,2466	0,4467	3,1227	-0,195
<b>Agosto</b>	-1,01	0,38	0,47	-0,1559	0,2022	0,7313	-1,5049	-0,246

Padrões de teleconexão como a OMJ influenciam diretamente ou indiretamente na precipitação da região sudeste do Brasil influenciando ou não a convecção (MO e N-PAEGLE, 2001). A OMJ oscilou durante os meses de maio, junho, julho e agosto. Durante o mês de maio a OMJ oscilou entre as fases 2, 5, 6, 7 e 8, para junho às fases 1, 2, 3, 7 e 8. Já com relação ao mês de julho, tivemos as fases 1, 2, 3, 4, 5 dominando e, para agosto 2, 3 e 5. Nas fases 1, 2 e 8, há condições propícias à convecção no nordeste do Brasil (DE SOUZA e REBOITA., 2021). Como em todos os meses pelo menos uma das fases que levam a convecção no NEB persistiu, esse padrão leva a subsidência de ar sobre a região sudeste do Brasil.

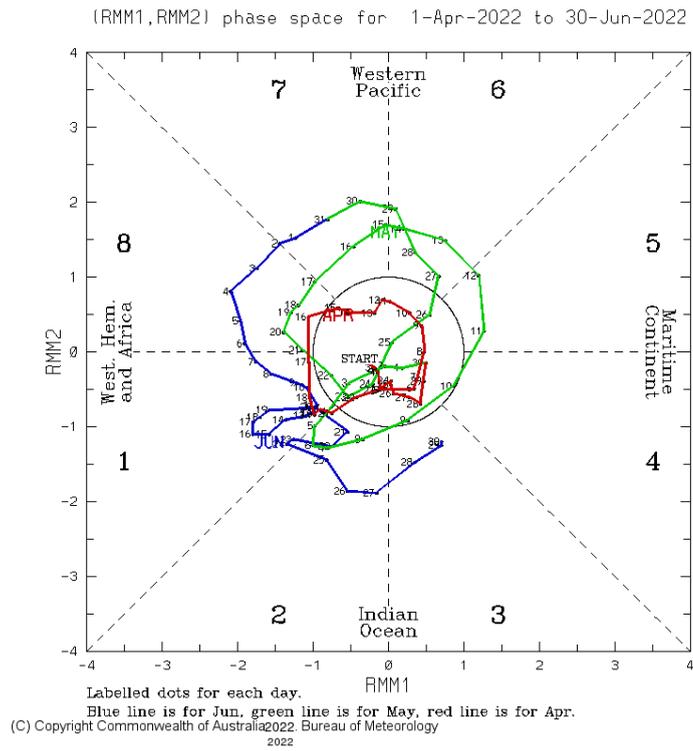


Figura 15 - Variação das fases da oscilação de Madden-Julian para os meses de abril, maio e junho (Fonte: BOM).

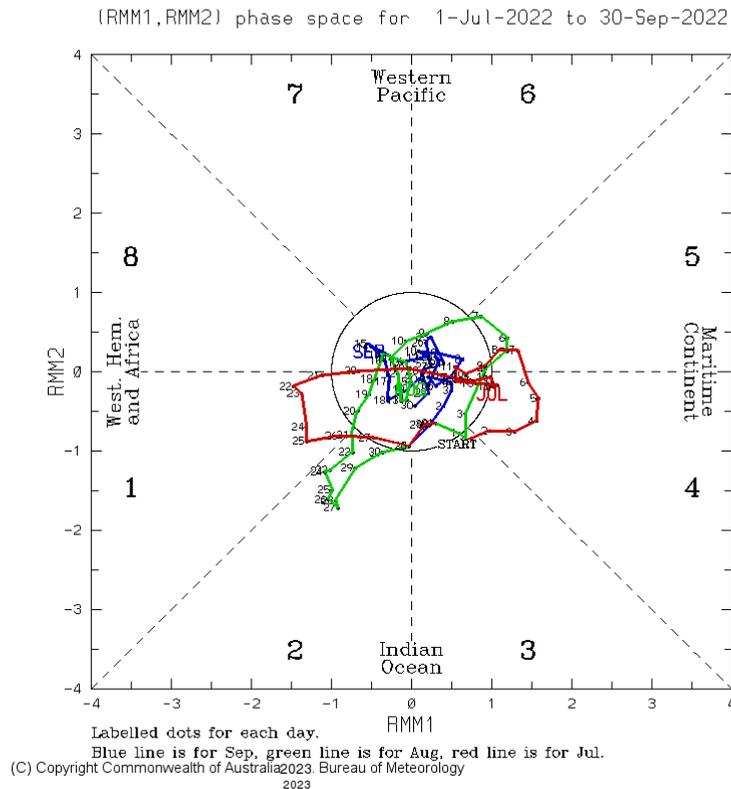


Figura 16 - Variação das fases da oscilação de Madden-Julian para os meses de julho, agosto e setembro (Fonte: BOM).

Tabela 03 - Quantidade de dias em que a OMJ permaneceu em cada uma de suas fases nos meses de maio, junho, julho e agosto.

	<b>Fases</b>							
	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>
<b>Maio (nº de dias)</b>	0	4	0	0	2	2	3	6
<b>Junho (nº de dias)</b>	14	6	3	0	0	0	2	5
<b>Julho (nº de dias)</b>	7	1	1	5	3	0	0	0
<b>Agosto (nº de dias)</b>	0	9	1	0	3	0	0	0

### 3.4 Validação de previsões sazonais

Como já discutido, na região sudeste ocorreu anomalias negativas de precipitação no inverno de 2022 (Figura 2a-d), mas com variabilidade mês-a-mês. Junho apresentou 7mm, julho 5mm, agosto 1.7mm, valores obtidos pela estação meteorológica de Itajubá. Aqui é analisada a performance dos modelos em prever as condições da precipitação durante o inverno de 2022.

Na Figura 14 é mostrada a rodada iniciada em 2022-03-01 obtida pela MC&E, SEAS5 e CFSv2. O modelo MC&E praticamente não previa anomalias para os meses de inverno na região sudeste, enquanto o SEAS5 e CFSv2 previam condições secas no centro-sul da região sudeste no mês de junho. Já em julho o modelo SEAS5 manteve anomalias negativas no sul da região sudeste e o CFSv2 em toda a região. Comparando-se mensalmente as anomalias previstas com as observadas, o modelo que teve melhor performance foi o SEAS5.

## Rodada iniciada em 2022-03-01

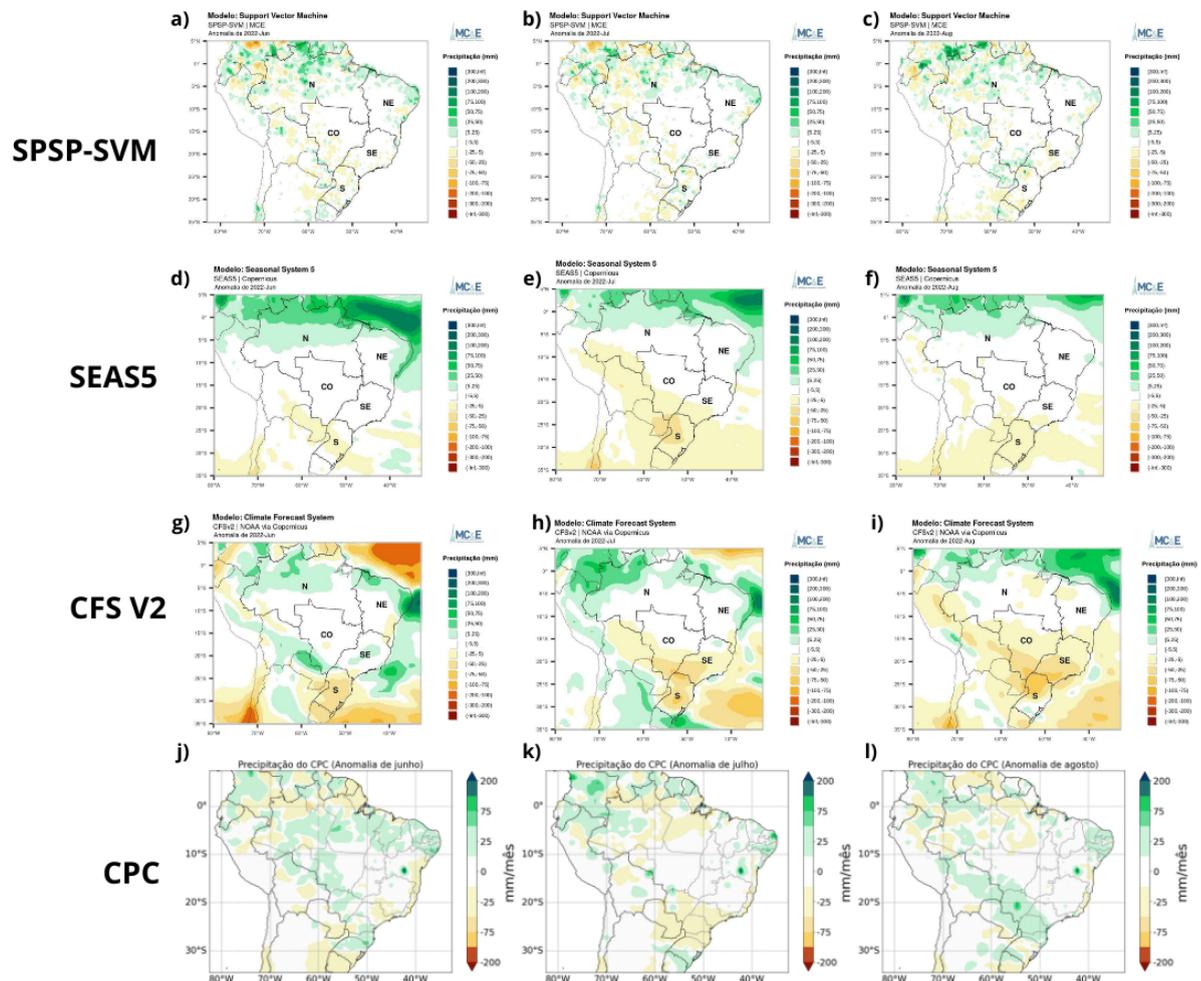


Figura 17 - Previsão sazonal para precipitação referentes a rodada iniciada em 2022-03-01 para os modelos MC&E (figuras 14a, 14b e 14c), SEAS5 (figuras 14d, 14e e 14f), CFSV2 (figuras 14g, 14h e 14i) e CPC (figuras 14j, 14k e 14l).

Na rodada iniciada em 2022-04-01, o SPSP-SVM, mostrava alternância entre anomalias positivas e negativas na região ao longo dos meses; a previsão do SEAS5 para junho apontava predominância de anomalias positivas, enquanto julho mostrou valores negativos no sul. O modelo CFSV2 previu anomalias negativas no sul e centro da região em junho e uma marcante deficiência de precipitação em julho. Embora com viés, o modelo com melhor performance foi o SEAS5.

## Rodada iniciada em 2022-04-01

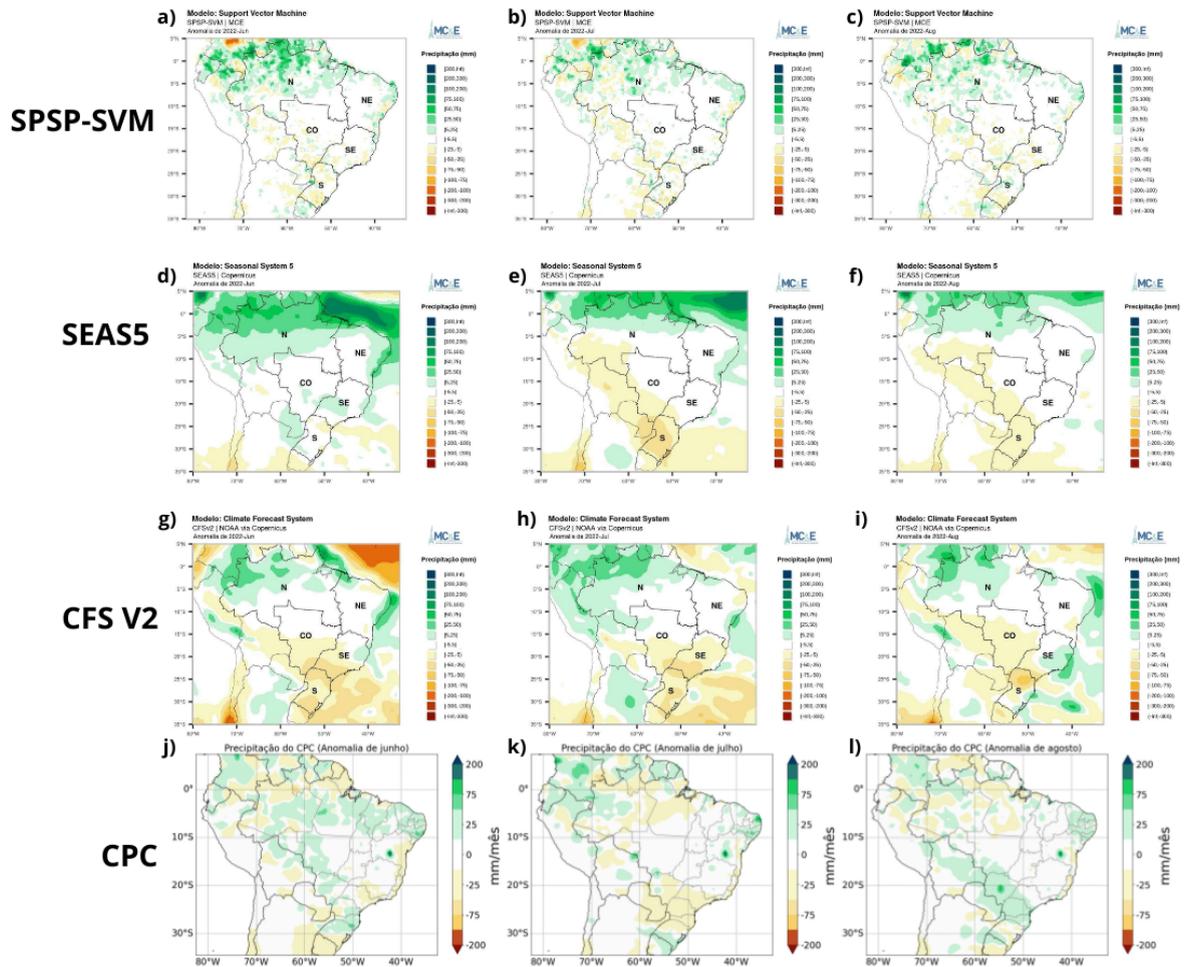


Figura 18 - Previsão sazonal para precipitação referentes a rodada iniciada em 2022-04-01 para os modelos MC&E (figuras 15a, 15b e 15c), SEAS5 (figuras 15d, 15e e 15f), CFSV2 (figuras 15g, 15h e 15i) e CPC (figuras 15j, 15k e 15l).

Na rodada iniciada em 2022-05-01, um mês antes da estação do inverno, o modelo SPSP-SVM mostra um bom desempenho em junho, mas coloca condições secas em agosto ao invés de julho. Nessa rodada, o SPSP-SVM é o melhor modelo, pois o SEAS-5 apresenta anomalias positivas em junho na região sudeste e o CFSv2 prevê anomalias secas muito mais intensas do que o observado.

A análise mostrou que até dois meses antes da estação do ano de interesse para validação, o SEAS5 tem melhor performance, mas na rodada iniciada um mês antes, o SPSP-SVM tem melhor desempenho. Para garantir a consistência desse resultado, outras estações do ano precisam ser validadas.

## Rodada iniciada em 2022-05-01

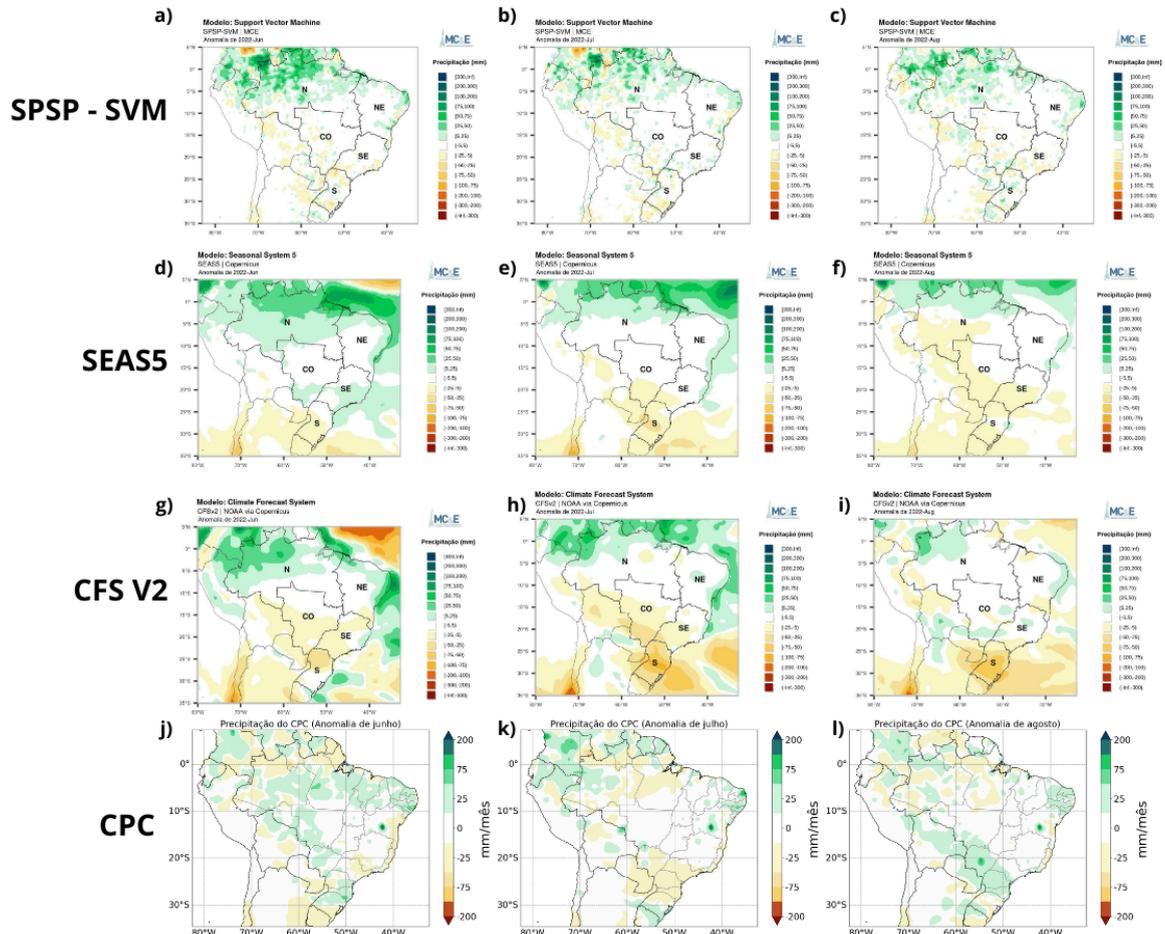


Figura 19 - Previsão sazonal para precipitação referentes a rodada iniciada em 2022-05-01 para os modelos MC&E (figuras 16a, 16b e 16c), SEAS5 (figuras 16d, 16e e 16f), CFSV2 (figuras 16g, 16h e 16i) e CPC (figuras 16j, 16k e 16l).

## 4. CONCLUSÃO

Uma análise geral dos resultados indica que não foi uma alteração no ASAS que levou ao déficit de precipitação no inverno. Por exemplo, o ASAS em junho estava mais fraco do que a climatologia, o que poderia ser favorável à chuva. Com relação à análise de padrões de circulação pelos índices de teleconexão tem-se que a presença de La Niña, com TSA e AAO positivas podem se combinar. Eventos de La Niña e TSA positiva levam a um déficit de chuva na região sudeste do país em JJA. Tal déficit pode ser uma resposta à subsidência promovida pela condição chuvosa no nordeste, afetando o sudeste do Brasil. Esta subsidência também pode ser intensificada pelas fases da OMJ (fases 1, 2 e 8), que desencadeiam condições chuvosas sob o NEB.

Outro fator que desencadeou este déficit hídrico foi associado com um trem de ondas que teve origem em diferentes setores do Pacífico e contribuiu com anomalias anticiclônicas em partes do sudeste do país.

Durante os meses de inverno, houve um fortalecimento e, também, um ligeiro deslocamento dos jatos em altos níveis para sul de sua posição climatológica, não atuando sobre o sudeste. Esse deslocamento dos jatos impede a passagem usual das frentes frias e sistemas frontais que trazem chuvas e mudanças de temperatura. Como resultado, as áreas afetadas pela influência desse padrão tendem a experimentar condições climáticas mais estáveis e secas.

Com relação à validação dos modelos climáticos, o SEAS5 exibe um desempenho superior até dois meses antes da estação do ano escolhida para validação. Contudo, na rodada iniciada um mês antes, o SPSP-SVM demonstrou um desempenho superior. Para garantir a consistência desse resultado, é crucial realizar validações em outras estações do ano.

## 5. REFERÊNCIAS

- AMBRIZZI, Tércio et al. The state of the art and fundamental aspects of regional climate modeling in South America. **Annals of the new york academy of sciences**, v. 1436, n. 1, p. 98-120, 2019.
- ANDRADE, Kelen Martins. Climatologia e comportamento dos sistemas frontais sobre a América do Sul. **Mestrado em Meteorologia, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos**, 2005.
- ANDREOLI, Rita Valéria 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, 2017.
- CARDOZO, A. B.; SANTOS, D. F.; CUSTÓDIO, I. S.; BORGES, M. V. V.; REBOITA, M. S.; SANTOS, I. A. Padrão sinótico da atmosfera na América do Sul e adjacências nos verões de 2013 e 2014. I Seminário de Recursos Naturais, Itajubá, 2014.
- CARPENEDO, C.B. **Climatologia das massas de ar formadas sobre o mar de Weddell–Antártica, entre 1949 e 2008**. 2009. 95 f. Monografia (Bacharel em Geografia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2009.
- CARVALHO, Leila MV; JONES, Charles; AMBRIZZI, Tércio. Opposite phases of the Antarctic Oscillation and relationships with intraseasonal to interannual activity in the tropics during the austral summer. **Journal of climate**, v. 18, n. 5, p. 702-718, 2005.
- COELHO, Caio AS et al. The 2014 southeast Brazil austral summer drought: regional scale mechanisms and teleconnections. **Climate Dynamics**, v. 46, p. 3737-3752, 2016.
- CHRYSOSTOMO DE OLIVEIRA NOGUEIRA, Natan; GOMES MACHADO, Pedro Henrique ; SIMÕES REBOITA, Michelle , Estudo Climatológico das Frentes Frias atuantes no Sul do Rio Grande do Sul e no Sul de Minas Gerais entre 2009 e 2021.
- DE LIMA NASCIMENTO, Ernani; AMBRIZZI, Tércio. The influence of atmospheric blocking on the Rossby wave propagation in Southern Hemisphere winter flows. **Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II**, v. 80, n. 2, p. 139-159, 2002.
- DE SOUZA, Christie Andre; REBOITA, Michelle Simões. Ferramenta para o monitoramento dos padrões de teleconexão na América do Sul. **Terræ Didática**, v. 17, p. e021009-e021009, 2021.
- DEL PINO, José Claudio; KRÜGER, Verno; FERREIRA, Maira. Poluição do ar. Porto Alegre: Área de Educação Química.[Air Pollution], 1996.
- FRANCA, R.R.da. **Anticiclones e umidade relativa do ar: um estudo sobre o clima de Belo Horizonte**. 2009. 109 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, 2009.

FERREIRA, Glauber WS; REBOITA, Michelle S. A new look into the South America precipitation regimes: Observation and Forecast. **Atmosphere**, v. 13, n. 6, p. 873, 2022.

GAN, Manoel Alonso; RODRIGUES, Luiz R.; RAO, Vadlamudi B. Monção na América do Sul. **Chapter**, v. 19, p. 297-312, 2009.

GIANNINI, A.; SARAVANAN, R.; CHANG, P. The preconditioning role of tropical Atlantic variability in the development of the ENSO teleconnection: Implications for the prediction of Nordeste rainfall. **Climate Dynamics**, v. 22, p. 839-855, 2004.

GOZZO, Luiz Felipe et al. Padrões climatológicos associados a eventos de seca no Leste do Estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 28, 2021.

GUPTA, Alexander Sen; ENGLAND, Matthew H. Coupled ocean–atmosphere–ice response to variations in the southern annular mode. **Journal of Climate**, v. 19, n. 18, p. 4457-4486, 2006.

HE, Chao et al. Responses of the summertime subtropical anticyclones to global warming. **Journal of Climate**, v. 30, n. 16, p. 6465-6479, 2017.

HERSBACH, Hans et al. The ERA5 global reanalysis. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 146, n. 730, p. 1999-2049, 2020.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE. **Estimativas de População. Estimativas 2021.** Disponível em: [https://ftp.ibge.gov.br/Estimativas\\_de\\_Populacao/Estimativas\\_2021/POP2021\\_20221\\_212.pdf](https://ftp.ibge.gov.br/Estimativas_de_Populacao/Estimativas_2021/POP2021_20221_212.pdf). Acesso em: 26 mai. 2023.

JOHNSON, S. J.; STOCKDALE, T. N.; FERRANTI, L. et al. (2019) SEAS5: The new ECMWF seasonal forecast system. *Geoscientific Model Development*, vol. 12, p. 1087–1117.

LEJENÄS, Harald. Characteristics of Southern Hemisphere blocking as determined from a time series of observational data. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 110, n. 466, p. 967-979, 1984.

MARQUES, F. C.; RAO, V.B. Bloqueio atmosférico no Hemisfério Sul, 1980–1993. In: **Congresso Brasileiro de Meteorologia**. 1996. p. 1078-1084.

MARSHALL, Gareth J. Trends in the Southern Annular Mode from observations and reanalyses. **Journal of climate**, v. 16, n. 24, p. 4134-4143, 2003.

MCPHADEN, M. J. El Niño and La Niña: Causes and global consequences. *Encyclopedia of Global Environmental Change*, Anonymous John Wiley and Sons, LTD, p. 353-370, 2002

MENDES, Monica Cristina Damião; DA SILVA ARAGÃO, Maria Regina; DE FATIMA CORREIA, Magaly. Bloqueios Atmosféricos sobre os Oceanos Pacífico Sudeste e Atlântico Sul: Características Sinótico-Dinâmicas e Termodinâmicas. **Anuário do Instituto de Geociências**, v. 42, n. 2, p. 309-324, 2019.

MINUZZI, Rosandro Boligon et al. Influência do fenômeno climático El Niño no período chuvoso da região sudeste do Brasil. **Geografia (Londrina)**, v. 15, n. 2, p. 5-19, 2006.

MOREIRAS, Stella M.; PONT, Ivan Vergara Dal; ARANEO, Diego. Were merely storm-landslides driven by the 2015-2016 Niño in the Mendoza River valley?. **Landslides**, v. 15, p. 997-1014, 2018.

Oliveira, F. N., Carvalho, L. M., & Ambrizzi, T. (2014). A new climatology for Southern Hemisphere blockings in the winter and the combined effect of ENSO and SAM phases. *International Journal of Climatology*, 34(5), 1676-1692.

PEZZI, L. P.; CAVALCANTI, I. F. A. The relative importance of ENSO and tropical Atlantic sea surface temperature anomalies for seasonal precipitation over South America: a numerical study. **Climate Dynamics**, v. 17, n. 2-3, p. 205-212, 2001.

**Região Sudeste - Portal Embrapa**, [www.embrapa.br](http://www.embrapa.br), disponível em: <https://www.embrapa.br/contando-ciencia/regiao-sudeste>. Acesso em: 24 mai. 2023.

REBOITA, Michelle Simões et al. Impacts of teleconnection patterns on South America climate. *Annals of the New York Academy of Sciences*, v. 1504, n. 1, p. 116-153, 2021.

REBOITA, Michelle Simões et al. Regimes de precipitação na América do Sul: uma revisão bibliográfica. **Revista brasileira de meteorologia**, v. 25, p. 185-204, 2010.

REBOITA, M. S.; KRUSCHE, N.; AMBRIZZI, T.; ROCHA, R. P. da. Entendendo o tempo e o clima na América do Sul. v. 8, n. 1, Campinas, SP, **Terrae Didatica**, 2012.

REBOITA, Michelle Simões et al. The South Atlantic subtropical anticyclone: present and future climate. **Frontiers in Earth Science**, v. 7, p. 8, 2019.

REBOITA, Michelle Simões et al. Impacts of teleconnection patterns on South America climate. **Annals of the New York Academy of Sciences**, v. 1504, n. 1, p. 116-153, 2021.

REBOITA, M. S.; SANTOS, I. A.; Influência de alguns padrões de teleconexão na precipitação no Norte e Nordeste do Brasil. *Revista Brasileira de Climatologia*. v. 15, p. 28-48, 2014.

RODRIGUES, R. R.; WOOLLINGS, T. Impact of atmospheric blocking on South America in austral summer. **Journal of Climate**, v. 30, n. 5, p. 1821-1837, 2017.

KIRTMAN, Ben P. et al. The North American multimodel ensemble: phase-1 seasonal-to-interannual prediction; phase-2 toward developing intraseasonal prediction. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 95, n. 4, p. 585-601, 2014.

SILVA, João Pedro Rodrigues; REBOITA, Michelle Simões; ESCOBAR, Gustavo Carlos Juan. Caracterização da Zona de Convergência do Atlântico Sul em campos atmosféricos recentes. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 25, 2019.

SANTOS, Tailine Corrêa; CARVALHO, Vanessa Silveira Barreto; REBOITA, Michelle Simões. Avaliação da influência das condições meteorológicas em dias com altas concentrações de material particulado na Região Metropolitana do Rio de Janeiro. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 21, p. 307-313, 2016.

SILVA, Rafael César. Eventos extremos de gelo marinho no mar de Weddell e sua relação com o Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul. 2018. 70 f. Monografia (Graduação em Geografia) – Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, 2018.

TIBALDI, S. et al. Northern and Southern Hemisphere seasonal variability of blocking frequency and predictability. **Monthly Weather Review**, v. 122, n. 9, p. 1971-2003, 1994.

TRENBERTH, K. E. The definition of el nino. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 78, n. 12, p. 2771-2777, 1997.

VASCONCELLOS, Fernanda Cerqueira; PIZZOCHERO, Renan Martins; DE ALBUQUERQUE CAVALCANTI, Iracema Fonseca. Month-to-month impacts of Southern annular mode over South America climate. **Anuário do Instituto de Geociências**, v. 42, n. 1, p. 783-792, 2019.

XIE, Pingping; CHEN, M.; SHI, W. CPC unified gauge-based analysis of global daily precipitation. In: **Preprints, 24th Conf. on Hydrology, Atlanta, GA, Amer. Meteor. Soc.** 2010.

## **ANEXOS**