

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO  
CENTRO DE CIÊNCIAS MATEMÁTICAS E DA NATUREZA  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA

**TESE DE DOUTORADO**

**INTERAÇÃO TRÓPICO-EXTRATRÓPICO COM EXTREMOS  
DE GELO MARINHO ANTÁRTICO: INFLUÊNCIA CONJUNTA  
NO CLIMA DA AMÉRICA DO SUL**

**FÁBIO GUIMARÃES OLIVA**

RIO DE JANEIRO  
2021

# **INTERAÇÃO TRÓPICO-EXTRATRÓPICO COM EXTREMOS DE GELO MARINHO ANTÁRTICO: INFLUÊNCIA CONJUNTA NO CLIMA DA AMÉRICA DO SUL**

**FÁBIO GUIMARÃES OLIVA**

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Geografia do Instituto de Geociências do Centro de Ciências Matemáticas e da Natureza da Universidade Federal do Rio de Janeiro (PPGG-IGEO-CCMN-UFRJ), como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Geografia.

Orientadora: Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Telma Mendes da Silva

Coorientadora: Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Fernanda Cerqueira Vasconcellos

RIO DE JANEIRO  
2021

# INTERAÇÃO TRÓPICO-EXTRATROPICO COM EXTREMOS DE GELO MARINHO ANTÁRTICO: INFLUÊNCIA CONJUNTA NO CLIMA DA AMÉRICA DO SUL

FÁBIO GUIMARÃES OLIVA

TESE DE DOUTORADO SUBMETIDA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA DO INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS DO CENTRO DE CIÊNCIAS MATEMÁTICAS E DA NATUREZA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO (PPGG-IGEO-CCMN-UFRJ) COMO REQUISITO PARCIAL À OBTENÇÃO DO TÍTULO DE DOUTOR EM GEOGRAFIA.

Aprovada em 03 de dezembro de 2021 por:



---

Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Telma Mendes da Silva (PPGG/UFRJ)

Documento assinado digitalmente



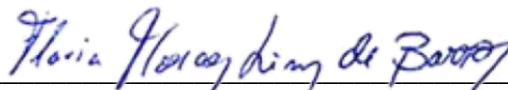
FERNANDA CERQUEIRA VASCONCELLOS

Data: 05/12/2021 17:41:00-0300

Verifique em <https://verificador.itl.br>

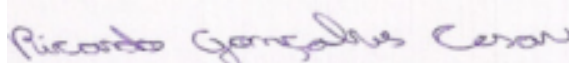
---

Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Fernanda Cerqueira Vasconcellos (PPGM/UFRJ)



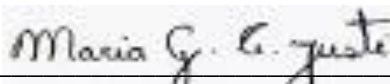
---

Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Flavia Moraes Lins de Barros (PPGG/UFRJ)



---

Prof. Dr. Ricardo Gonçalves Cesar (PPGG/UFRJ)



---

Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Maria Gertrudes Alvarez Justi da Silva (LAMET/UENF)



---

Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Carla Maciel Salgado (POSGEO/UFF)

RIO DE JANEIRO

2021

## CIP - Catalogação na Publicação

0048i      Oliva, Fábio Guimarães  
              Interação Trópico-Extratropical com Extremos de Gelo  
              Marinho Antártico: Influência Conjunta no Clima da  
              América do Sul / Fábio Guimarães Oliva. -- Rio de  
              Janeiro, 2021.  
              160 f.

              Orientadora: Telma Mendes Da Silva.  
              Coorientadora: Fernanda Cerqueira Vasconcellos.  
              Tese (doutorado) - Universidade Federal do Rio  
              de Janeiro, Instituto de Geociências, Programa de  
              Pós-Graduação em Geografia, 2021.

              1. Teleconexões. 2. Gelo Marinho Antártico. 3.  
              Variabilidade Climática. 4. Eventos Extremos. 5.  
              América do Sul. I. Da Silva, Telma Mendes, orient.  
              II. Vasconcellos, Fernanda Cerqueira, coorient.  
              III. Título.

Elaborado pelo Sistema de Geração Automática da UFRJ com os dados fornecidos pelo(a) autor(a), sob a responsabilidade de Miguel Romeu Amorim Neto - CRB-7/6283.

*Aos meus pais, Henrique Siqueira Oliva e Marilse Guimarães Siqueira Oliva.*

*Por sempre terem me incentivado a me dedicar aos estudos, me ensinando o melhor e o mais profundo sobre a vida: os valores, a justiça, o caráter e a integridade dos homens. Simplicidade, gentileza, altruísmo, resiliência e força para reverter situações adversas sempre foram características presentes em meu pai, ensinamentos que levo para a vida. Por vezes, precisei aplicar algumas dessas características durante o desenvolvimento desta Tese. Pai, meu amor e as saudades são eternas, você é o maior e o melhor amigo com que a vida me presenteou. Para onde vou, te levo comigo. É inexplicável, mas onde quer que esteja, sinto que você sabe de tudo. Estamos conectados, sempre e para sempre! Quanto à minha mãe, o que dizer? Ela é o melhor exemplo que amor de mãe é imensurável e infinito. Seus filhos são o que ela possui de mais importante na vida. Foram incontáveis as vezes em que eu ouvi e senti isso! Forte, autêntica, bem-humorada e sempre muito dedicada à sua família, assim como meu pai. Também tive que aplicar muitos de seus atributos, que fazem parte de mim, no percurso desta Tese. Mãe, estamos juntos sempre e para sempre, seu amor é o maior do mundo, assim como o meu por você.*

*O homem que me tornei se deve a vocês dois! Para sempre, meu orgulho, respeito e admiração. Gratidão eterna!*

## AGRADECIMENTOS

Sem ter a intenção ou preocupação de citar o nome de cada pessoa que colaborou com o avanço desta Tese para não correr o risco de cometer alguma injusta omissão, quero agradecer a todas as pessoas que, de alguma forma, direta ou indiretamente, contribuíram e agregaram para o desenvolvimento desta pesquisa. Nunca esquecerei da ajuda de cada um durante o longo e trabalhoso processo de execução desta pesquisa, especialmente professores, alunos e pesquisadores que integram os departamentos de Geografia e Meteorologia do Instituto de Geociências da UFRJ.

Entretanto, não poderia deixar de mencionar a minha orientadora, Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Telma Mendes da Silva (PPGG/UFRJ), cuja participação foi fundamental e decisiva no desenvolvimento da pesquisa e em sua conclusão, especialmente nos momentos de maior dificuldade quando o trabalho não apresentava a fluidez esperada. Com sua experiência e os devidos incentivos e críticas, a pesquisa finalmente encontrou o ritmo ideal e se materializou em documento científico. Prof<sup>ª</sup>. Telma, muito obrigado por tudo!

Gostaria também de agradecer a minha coorientadora, Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Fernanda Cerqueira Vasconcellos (PPGM/UFRJ), primeiramente pelo pronto aceite em me coorientar quando o doutorado já estava iniciado há mais de um ano. Sua experiência e conhecimento na temática pesquisada foram determinantes para a evolução e concretização da Tese com as imprescindíveis abordagens científicas exigidas em uma pesquisa em nível de doutoramento. Prof<sup>ª</sup>. Fernanda, deixo aqui registrado o meu agradecimento!

Faço questão de aqui agradecer também à cada um dos professores que formaram a banca examinadora, primeiramente por terem aceitado de imediato o convite para a participação. Com o perfil, conhecimento e experiência de cada um, suas análises e diferentes olhares sobre a Tese renderam excelentes contribuições que valorizaram e enriqueceram ainda mais a pesquisa. À Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Flavia Moraes Lins de Barros (PPGG/UFRJ), ao Prof. Dr. Ricardo Gonçalves Cesar (PPGG/UFRJ), à Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Maria Gertrudes Alvarez Justi da Silva (LAMET/UENF) e à Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Carla Maciel Salgado (POSGEO/UFF), os meus sinceros agradecimentos!

Por fim, encerro este texto reconhecendo a grande ajuda e importância do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) durante este ciclo, em virtude da concessão da bolsa de doutorado que me proporcionou uma valiosa segurança durante os 48 meses da pesquisa. Vida longa de qualidade à pesquisa científica no Brasil!

*“A man must always adapt himself to the circumstances around him and direct his efforts to a new goal, when he sees the old one destroyed”*

(Sir. Ernest Henry Shackleton - Antarctic Explorer)

## RESUMO

OLIVA, Fábio Guimarães. **Interação Trópico-Extratropical com Extremos de Gelo Marinho Antártico: Influência Conjunta no Clima da América do Sul.** 2021. Tese (Doutorado em Geografia). Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2021.

O continente sul-americano é densamente povoado em muitas regiões, além de apresentar áreas com alto grau de desenvolvimento econômico que sofrem influência do tempo e do clima em diversas escalas temporais. O clima da América do Sul é modulado por sistemas e fenômenos de variabilidade climática que agem conjuntamente sobre o continente. Ademais, eventos meteorológicos e climáticos que liberam muita energia impactam significativamente a economia e a vida humana, contribuindo para desastres e calamidades. O continente antártico, com sua extensão de gelo marinho, possui papel essencial na circulação atmosférica do Hemisfério Sul e é determinante no clima da América do Sul. O objetivo geral desta pesquisa é analisar as interações entre padrões de teleconexões climáticas com os extremos de gelo marinho antártico dos Mares de Bellingshausen-Amundsen (MBA) e Weddell (MW) e a possível influência conjunta sobre o clima do continente. Busca-se uma melhor compreensão acerca da variabilidade do gelo marinho e das interações entre a criosfera, os oceanos e a atmosfera, além de prover dados para diagnósticos climáticos. Para realizar as análises, foram utilizadas séries de dados mensais para o período de 38 anos entre janeiro de 1981 e dezembro de 2018, tais como: séries dos índices SAM (*Southern Annular Mode*), AMM (*Atlantic Meridional Mode*) e GSA (Gradiente Subtropical do Atlântico); concentração e extensão de gelo marinho antártico; temperatura da superfície do mar; altura geopotencial em 700 hPa; temperatura do ar à 2 m e precipitação. A metodologia consistiu em análises estatísticas e emprego de *softwares* para a manipulação dos dados e geração dos resultados. Para a significância estatística, foi aplicado o teste *T-student* com nível de confiança de 90%. Os resultados apontaram que no MBA, nas análises conjuntas no mês de fevereiro, a combinação SAM-/AMM- (SAM+/AMM+) esteve relacionada às maiores (menores) extensões de gelo. Nestes dois casos, o sinal do GSA se manteve positivo. Já no mês de setembro, os sinais do SAM se inverteram, de modo que a combinação SAM+/AMM+ (SAM-/AMM-) esteve associada às maiores (menores) extensões de gelo. No MW, em fevereiro, a combinação SAM+/AMM- (SAM-/AMM-) esteve relacionada às maiores (menores) extensões de gelo. Já em setembro, os sinais novamente se inverteram para o SAM de modo que se apresentou o SAM-/AMM+ (SAM+/AMM-) relacionado às maiores (menores) extensões. Quanto à combinação SAM/GSA, esta apresentou a mesma configuração de sinais do SAM/AMM em setembro no MW, uma vez que as relações SAM-/GSA+ (SAM+/GSA-) encontraram-se em associação com maior (menor) gelo marinho. Quanto à precipitação, a maior parte da América do Sul se mostrou mais seca nos casos de extensões máximas e mínimas de gelo marinho no MBA, com exceção do extremo norte da América do Sul (Venezuela), extremo sul do Brasil, Uruguai e nordeste da Argentina, que se apresentaram mais chuvosos. O norte do Brasil, mais seco, e o extremo norte da América do Sul, mais chuvoso, tiveram coerência com o AMM positivo em virtude do deslocamento para norte da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT). Os extremos máximos de gelo observados no MBA apresentaram relação com um menor volume de chuvas registrado no referido setor, sendo que o oposto também foi constatado. No tocante à temperatura, não foram notadas diferenças relevantes entre as anomalias nos casos máximos e mínimos de gelo marinho, porém ocorreu inversão de anomalias de temperatura entre os dois setores. Em relação ao MW, a América do Sul esteve predominantemente mais seca nos máximos de gelo e no SAM negativo. Na configuração oposta, predominou continente mais úmido. Entretanto, sinais opostos foram observados no extremo sul do Brasil, no Uruguai e na Argentina. O SAM negativo pode inibir a penetração de sistemas transientes nestes casos favorecendo seca em latitudes tropicais e equatoriais. A Amazônia e o nordeste do Brasil, mais secos, e a Venezuela, mais chuvosa, corroboraram com o AMM positivo observado nos máximos de gelo devido ao deslocamento da ZCIT para norte. Configuração de anomalias oposta ocorreu no AMM negativo. Nos casos extremos de gelo no MW, a temperatura se apresentou mais



elevada na maior parte da América do Sul nos casos de extremos máximos de gelo (SAM-/AMM+), exceto no sul da América do Sul. Nos casos de extremos mínimos (SAM+/AMM-), a maior parte da América do Sul apontou anomalia negativa de temperatura, com exceção do extremo sul do Brasil, Uruguai e parte da Argentina. No que tange aos eventos meteorológicos e climáticos extremos, constatou-se que estes podem apresentar relações com as variáveis pesquisadas, uma vez que estas influenciam o clima do continente. As ressacas marinhas sobre o sudeste do Brasil estiveram relacionadas predominantemente com as fases negativas do SAM e do GSA. Os eventos de seca na Amazônia estiveram relacionados com o AMM positivo e os eventos de chuvas intensas com o AMM negativo. Os casos de seca no sudeste do Brasil se associaram com o SAM negativo e GSA positivo e os eventos de chuvas intensas apontaram inversão do sinal das anomalias do Atlântico (GSA negativo) ao comparar com os eventos de seca. Os eventos de chuvas intensas no sul do Brasil indicaram o mesmo sinal do GSA no Atlântico Subtropical (GSA negativo) observado para os casos do sudeste, porém durante as fases positivas do SAM. No nordeste da Argentina, o evento de seca de 2013 apontou sinais opostos do SAM e do GSA (SAM-/GSA+) em comparação com os eventos de chuvas no sul do Brasil em 2004 e 2008 (SAM+/GSA-). Constatou-se que a variabilidade do gelo marinho e os sistemas tropicais e extratropicais interagem entre si e atuam conjuntamente na modulação do clima do continente podendo contribuir para a intensificação de eventos meteorológicos e climáticos e a ocorrência de desastres.

**Palavras-chave:** Teleconexões Climáticas; Gelo Marinho Antártico; América do Sul; Eventos Extremos.

## ABSTRACT

OLIVA, Fábio Guimarães. **Tropical-Extratropical Interactions with Extreme Antarctic Sea Ice: Combined Influence on the South American Climate.** 2021. Tese (Doutorado em Geografia). Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2021.

South America is densely populated in many regions and presents areas with important economic activities. These areas are affected by weather and climate in different time scales. The south american climate is influenced by many different meteorological systems and climate variability patterns that act together over the continent. Furthermore, extreme events impact the economy and human life contributing to disasters and calamities. Antarctica plays an important role in the Southern Hemisphere atmospheric circulation and is determinant on the south american climate. This work aims to analyze the relationships between climatic teleconnection patterns and the extremes of antarctic sea ice in the Bellingshausen-Amundsen Sea (BAS) and Weddell Sea (WS) and the possible combined influence on the south american climate. The work looks for a better understanding in respect of sea ice variability and the interactions between the cryosphere and the atmosphere. We used monthly data for a 38-year period between january 1981 and december 2018, such as: Southern Annular Mode (SAM), Atlantic Meridional Mode (AMM) and Atlantic Subtropical Gradient (ASG) indexes; antarctic sea ice extent and concentration; Sea Surface Temperature (SST); 700 hPa geopotential height; 2m-air temperature and precipitation. The methodology used statistical analysis and softwares to manipulate the data and generate tables, correlations charts, boxplots diagrams and composite maps. We also used t-student test to the statistical significance with a 90% confidence level. In the BAS the results revealed to the combined analysis in february, an association of SAM-/AMM- (SAM+/AMM+) with maximum (minimum) sea ice extent. In these two cases, ASG signal was positive. In september, the SAM signals were opposite, once the combination SAM+/AMM+ (SAM-/AMM-) was linked to maximum (minimum) antarctic sea ice extent. In the WS in february, the combination SAM+/AMM- (SAM-/AMM-) was related to maximum (minimum) sea ice extent. In september, the SAM signals were opposite once again and the combination SAM-/AMM+ (SAM+/AMM-) was related to maximum (minimum) sea ice extent. The combination SAM/ASG presented the same signal configuration of SAM/AMM in september in the WS, once the combination SAM-/ASG+ (SAM+/ASG-) was associated with maximum (minimum) antarctic sea ice. The most part of South America presented drier conditions in cases of maximum and minimum sea ice extents related to the BAS sector, except in northern South America (Venezuela), southern Brazil, Uruguay and northeastern Argentina, with wetter conditions. The northern Brazil, drier, and the north of South America, wetter, were coherent with positive AMM due to northward displacement of the Intertropical Convergence Zone (ITCZ). The maximum (minimum) sea ice extent observed in the BAS presented relations with negative (positive) precipitation anomalies in the BAS sector. In respect of air temperature, we observed opposite anomalies comparing both sectors. Considering precipitation anomalies, South America showed drier conditions in the maximum sea ice extent and negative SAM. In the opposite configuration, the continent showed wetter conditions. However, opposite signals were observed in southern Brazil, Uruguay and Argentina. The negative phase of SAM can inhibit the propagation of transient systems favoring drought over tropical and equatorial latitudes. Amazon region and northeastern Brazil, drier, and Venezuela, wetter, were coherent with positive AMM observed in the maximum sea ice extent due to the ITCZ northward displacement. Opposite anomalies occurred in the negative phase of AMM. In the cases related to extreme WS sea ice, the most part of South America showed hotter conditions in the maximum ice extent (SAM-/AMM+), except in southern South America that indicated negative anomalies of temperature. In the cases of minimum sea ice (SAM+/AMM-), the most part of the continent showed colder conditions, except in southern Brazil, Uruguay and part of Argentina. Extreme meteorological and climatic events may present relations with the variables investigated in this work, once they influence the climate over the continent. Marine storms over southeastern Brazil

were related in most of the cases with SAM negative phase and ASG negative phase. The drought events (extreme rainfall) in Amazon region were linked with positive (negative) AMM. The events of drought in southeastern Brazil were associated with negative SAM and positive ASG and extreme rainfall events were related with an opposite signal in the South Atlantic anomalies (negative ASG) comparing with the drought events. In southern Brazil, the extreme rainfall events indicated the same ASG signal in the Subtropical Atlantic observed in southeastern Brazil (negative ASG), however these events occurred during the SAM positive phases. In northeastern Argentina, the event of drought in 2013 indicated opposite signals of SAM and ASG (SAM-/ASG+) in comparison with the events of extreme rainfall in southern Brazil in 2004 and 2008 (SAM+/ASG-). Sea ice variability and the tropical and extratropical systems act together modulating the south american climate and can increase the intensity of climatic and meteorological events and the occurrence of disasters.

**Keywords:** Teleconnections Patterns; Antarctic Sea Ice; South America; Extreme Events.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

- Figura 1** - Mapa fisiográfico da Antártica mostrando sua localização geográfica centrada no polo sul e oceanos e mares que o circundam. Fonte: Ahlert e Aquino (2006) .....30
- Figura 2** - Concentração de gelo marinho. Linha amarela: mediana da concentração de gelo marinho entre 1981 e 2010. A figura à esquerda representa o mês de fevereiro e a da direita representa o mês de setembro, em 2018. Fonte: Modificado de *National Snow and Ice Data Center* (NSIDC, 2020) .....31
- Figura 3** - (a) Modelo conceitual da circulação troposférica sobre a Antártica. (b) Divergência em superfície resulta em ventos catabáticos que adquirem forte componente de leste próximo à costa. Fonte: King e Turner (1997) .....32
- Figura 4** - Representação esquemática da circulação atmosférica na região da Antártica, enfatizando a Baixa Pressão Circumpolar e a alta pressão sobre o continente. Fonte: [www.antarctica.gov.au](http://www.antarctica.gov.au) (*Australian Antarctic Program*) .....33
- Figura 5** - Localização da América do Sul e oceanos adjacentes, da Península Antártica e dos Mares de Bellingshausen-Amundsen (MBA) e de Weddell (MW).....35
- Figura 6** - (a) Seção transversal latitude x altura mostrando típicas amplitudes de anomalias de vento geostrófico médio zonal dos modos anulares (pressão expressa em hPa, intervalo dos contornos é de 0,5 m/s); (b) Altura geopotencial na baixa troposfera (o intervalo dos contornos é de 10 m). O esquema refere-se à fase positiva do SAM. Fonte: Thompson e Wallace (2000) .....42
- Figura 7** - Esquema simplificado dos padrões oceânicos e atmosféricos associados às distintas fases do AMM. A sigla AAN corresponde a Alta Subtropical do Atlântico Norte e a sigla AAS refere-se à Alta Subtropical do Atlântico Sul. Fonte: Adaptado de Ferreira e Mello (2005) ..... 50
- Figura 8** - Propriedades espaciais do modo principal do MCA-1 de TSM e vento a 10 m no Atlântico Tropical. (a) Mapas de regressão dos coeficientes de expansão normalizada do modo principal do MCA sobre a TSM (°C) e vetores de vento a 10 m. Vetores de vento são plotados onde a soma geométrica de seus coeficientes de correlação excedem 0,27% (95% do nível de confiança). (b) Mesmas informações do primeiro mapa, porém para a variável precipitação (mm/dia). As regiões sombreadas excedem o nível de confiança de 95%. Fonte: Adaptado de Chiang e Vimont (2004) .....51
- Figura 9** - Fluxograma exemplificando as etapas de pesquisa com os itens dos resultados, dados e ferramentas utilizadas e produtos/resultados gerados.....56
- Figura 10** - Delimitação dos dois polos/áreas que definem o índice GSA.....60
- Figura 11** - Localização dos cinco setores do Oceano Austral com destaque para os setores do MBA (130°W-61°W) e do MW (60°W-0°). Fonte: Adaptado de Cavalieri e Parkinson (2008) .....60
- Figura 12** - Variação temporal do Índice Mensal SAM no período 1981-2018 nos meses de fevereiro (linha laranja) e de setembro (linha azul) .....67

<b>Figura 13</b> - Variação temporal do Índice Mensal AMM no período 1981-2018 nos meses de fevereiro (linha vinho) e de setembro (linha azul) .....	68
<b>Figura 14</b> - Variação temporal do Índice Mensal GSA no período 1981-2018 nos meses de fevereiro (linha vinho) e de setembro (linha verde) .....	68
<b>Figura 15</b> - Climatologia de 38 anos (1981-2018) da extensão média de gelo marinho antártico (km) para o Oceano Austral e para os setores MBA e MW.....	69
<b>Figura 16</b> - Variação temporal da extensão média de gelo marinho antártico de todas as longitudes para os meses de fevereiro (linha azul) e setembro (linha laranja) referente ao período 1981-2018.....	72
<b>Figura 17</b> - Variação da extensão média de gelo marinho antártico para os setores MBA (a) e MW (b) para os meses de fevereiro (linha azul) e setembro (linha laranja) referente ao período 1981-2018.....	74
<b>Figura 18</b> - Compostos de anomalia de altura geopotencial (m) em 700 hPa relacionados aos quintis extremos de extensão de gelo no MBA. (a) (b) fevereiro e (c) (d) setembro. Lado esquerdo: quintil extremo máximo. Lado direito: quintil extremo mínimo. Áreas com 90% de significância estão pontilhadas (teste <i>t-student</i> ) .....	76
<b>Figura 19</b> - Compostos de anomalia de altura geopotencial (m) em 700 hPa relacionados aos quintis extremos de extensão de gelo no MW. (a) (b) fevereiro e (c) (d) setembro. Lado esquerdo: quintil extremo máximo. Lado direito: quintil extremo mínimo. Áreas com 90% de significância estão pontilhadas (teste <i>t-student</i> ) .....	82
<b>Figura 20</b> - Compostos de anomalias de temperatura da superfície do mar (°C) relacionados aos quintis extremos de extensão de gelo no MBA. (a) (b) fevereiro e (c) (d) setembro. Lado esquerdo: quintil extremo máximo. Lado direito: quintil extremo mínimo. Áreas com 90% de significância estão pontilhadas (teste <i>t-student</i> ) .....	86
<b>Figura 21</b> - Compostos de anomalias de temperatura da superfície do mar (°C) relacionados aos quintis extremos de extensão de gelo no MW. (a) (b) fevereiro e (c) (d) setembro. Lado esquerdo: quintil extremo máximo. Lado direito: quintil extremo mínimo. Áreas com 90% de significância estão pontilhadas (teste <i>t-student</i> ) .....	90
<b>Figura 22</b> - Correlações dos índices SAM (linha cinza), AMM (linha azul) e GSA (linha laranja) com a extensão de gelo marinho em diferentes longitudes do MBA (a) e do MW (b). Período 1981-2018 para o mês de fevereiro.....	94
<b>Figura 23</b> - Correlações dos índices SAM (linha cinza), AMM (linha azul) e GSA (linha laranja) com a extensão de gelo marinho em diferentes longitudes do MBA (a) e do MW (b). Período 1981-2018 para o mês de setembro.....	96
<b>Figura 24</b> - Boxplots representando a extensão média de gelo marinho antártico no setor MBA nos meses de fevereiro (a) e de setembro (b) para o período 1981-2018 nas fases positivas e negativas dos padrões SAM, AMM e GSA.....	98
<b>Figura 25</b> - Boxplots representando a extensão média de gelo marinho antártico no setor MW nos meses de fevereiro (a) e de setembro (b) para o período 1981-2018 nas fases positivas e negativas dos padrões SAM, AMM e GSA.....	100

<b>Figura 26</b> - Boxplots representando a extensão média de gelo marinho antártico no setor MBA no mês de fevereiro para o período 1981-2018 em cada uma das quatro combinações dos padrões SAM/AMM (a) e SAM/GSA (b).....	102
<b>Figura 27</b> - Boxplots representando a extensão média de gelo marinho antártico no setor MBA no mês de setembro para o período 1981-2018 em cada uma das quatro combinações dos padrões SAM/AMM (a) e SAM/GSA (b).....	104
<b>Figura 28</b> - Boxplots representando a extensão média de gelo marinho antártico no setor MW no mês de fevereiro para o período 1981-2018 em cada uma das quatro combinações dos padrões SAM/AMM (a) e SAM/GSA (b).....	107
<b>Figura 29</b> - Boxplots representando a extensão média de gelo marinho antártico no setor MW no mês de setembro para o período 1981-2018 em cada uma das quatro combinações dos padrões SAM/AMM (a) e SAM/GSA (b).....	109
<b>Figura 30</b> - Extensão de gelo marinho por longitude no setor MBA no mês de fevereiro para o período 1981-2018 em cada uma das quatro combinações dos padrões SAM/AMM (a) e SAM/GSA (b).....	112
<b>Figura 31</b> - Extensão de gelo marinho por longitude no setor MBA no mês de setembro para o período 1981-2018 em cada uma das quatro combinações dos padrões SAM/AMM (c) e SAM/GSA (d).....	113
<b>Figura 32</b> - Extensão de gelo marinho por longitude no setor MW no mês de fevereiro para o período 1981-2018 em cada uma das quatro combinações dos padrões SAM/AMM (e) e SAM/GSA (f).....	115
<b>Figura 33</b> - Extensão de gelo marinho por longitude no setor MW no mês de setembro para o período 1981-2018 em cada uma das quatro combinações dos padrões SAM/AMM (g) e SAM/GSA (h).....	116
<b>Figura 34</b> - Anomalias de temperatura do ar (°C) na América do Sul durante setembro: nos casos de extremos máximos (a, b: SAM+/AMM+) e mínimos (c, d: SAM-/AMM+) de gelo marinho no setor MBA. Áreas com nível de confiança de 90% estão pontilhadas (Teste <i>t-student</i> ). <b>Figuras a; c:</b> contém todos os anos da combinação extrema, mesmo não inclusas no quintil. <b>Figuras b; d:</b> contém apenas os anos da combinação extrema que pertencem ao quintil.....	118
<b>Figura 35</b> - Anomalias de precipitação (mm) na América do Sul durante setembro: nos casos de extremos máximos (a, b: SAM+/AMM+) e mínimos (c, d: SAM-/AMM+) de gelo marinho no setor MBA. Áreas com nível de confiança de 90% estão pontilhadas (Teste <i>t-student</i> ). <b>Figuras a; c:</b> contém todos os anos da combinação extrema, mesmo não inclusas no quintil. <b>Figuras b; d:</b> contém apenas os anos da combinação extrema que pertencem ao quintil.....	120
<b>Figura 36</b> - Anomalias de temperatura do ar (°C) na América do Sul durante setembro: nos casos de extremos máximos (a, b: SAM-/AMM+) e mínimos (c, d: SAM+/AMM-) de gelo marinho no setor MW. Áreas com nível de confiança de 90% estão pontilhadas (Teste <i>t-student</i> ). <b>Figuras a; c:</b> contém todos os anos da combinação extrema, mesmo não inclusas no quintil. <b>Figuras b; d:</b> contém apenas os anos da combinação extrema que pertencem ao quintil.....	121

**Figura 37** - Anomalias de precipitação (mm) na América do Sul durante setembro: nos casos de extremos máximos (**a, b: SAM-/AMM+**) e mínimos (**c, d: SAM+/AMM-**) de gelo marinho no setor MW. Áreas com nível de confiança de 90% estão pontilhadas (Teste *t-student*). **Figuras a; c:** contém todos os anos da combinação extrema, mesmo não inclusas no quintil. **Figuras b; d:** contém apenas os anos da combinação extrema que pertencem ao quintil.....124

## LISTA DE TABELAS

- Tabela 1** - Padrões/índices usados nesta pesquisa, o padrão de variabilidade e a ocorrência/localização.....55
- Tabela 2** - Extensão média de gelo marinho (Km) no Oceano Austral (todas as longitudes) e percentual de redução ou aumento da extensão (%) em relação ao mês antecedente. Três extensões médias mínimas (vermelho) e três extensões médias máximas (verde). Taxas de retração (vermelho) e de expansão (verde).....70
- Tabela 3** - Extensão média de gelo marinho (Km) no setor MBA e percentual de redução ou aumento da extensão (%) em relação ao mês antecedente. Três extensões médias mínimas (vermelho) e três extensões médias máximas (verde). Taxas de retração (vermelho) e de expansão (verde).....71
- Tabela 4** - Extensão média de gelo marinho (Km) no setor MW e percentual de redução ou aumento da extensão (%) em relação ao mês antecedente. Três extensões médias mínimas (vermelho) e três extensões médias máximas (verde). Taxas de retração (vermelho) e de expansão (verde).....71
- Tabela 5** - Extensões médias de gelo marinho para o Oceano Austral nos meses de fevereiro e de setembro dos respectivos anos do período 1981-2018. Em verde: ano de máxima extensão de cada mês. Em vermelho: ano de mínima extensão de cada mês.....73
- Tabela 6** - Extensões médias de gelo marinho para o setor MBA nos meses de fevereiro e de setembro dos respectivos anos do período 1981-2018. O quintil (oito anos) extremo máximo e mínimo dos meses de fevereiro e de setembro estão marcados em verde e em vermelho, respectivamente.....75
- Tabela 7** - Extensões médias de gelo marinho para o setor MW nos meses de fevereiro e de setembro dos respectivos anos do período 1981-2018. O quintil (oito anos) extremo máximo e mínimo dos meses de fevereiro e de setembro estão marcados em verde e em vermelho, respectivamente.....76
- Tabela 8** - Extensões médias de gelo marinho antártico no setor MBA nos meses de fevereiro e setembro nas fases positivas e negativas dos índices SAM, AMM e GSA. Em negrito, é destacada a maior extensão de cada índice.....99
- Tabela 9** - Extensões médias de gelo marinho antártico no setor MW nos meses de fevereiro e setembro nas fases positivas e negativas dos índices SAM, AMM e GSA. Em negrito, é destacada a maior extensão de cada índice.....101
- Tabela 10** - Classificação dos anos com sinais positivos e negativos para as combinações dos índices SAM/AMM (a) e SAM/GSA (b) para fevereiro e setembro no setor MBA. Em verde: anos representativos do quintil extremo máximo de gelo. Em vermelho: anos representativos do quintil extremo mínimo. Em cinza: combinação de maior e menor extensão de gelo em setembro. Entre parênteses: número total de anos por combinação....105



<b>Tabela 11</b> - Extensões médias de gelo marinho no setor MBA nas distintas combinações dos padrões SAM/AMM <b>(a)</b> e SAM/GSA <b>(b)</b> em fevereiro e em setembro. Em verde: maior extensão. Em vermelho: menor extensão.....	106
<b>Tabela 12</b> - Classificação dos anos com sinais positivos e negativos para as combinações dos índices SAM/AMM <b>(a)</b> e SAM/GSA <b>(b)</b> para fevereiro e setembro no setor MW. Em verde: anos representativos do quintil extremo máximo de gelo. Em vermelho: anos representativos do quintil extremo mínimo. Em cinza: combinação de maior e menor extensão de gelo em setembro. Entre parênteses: número total de anos por combinação....	110
<b>Tabela 13</b> - Extensões de gelo marinho no setor MW nas distintas combinações dos padrões SAM/AMM <b>(a)</b> e SAM/GSA <b>(b)</b> em fevereiro e em setembro. Em verde: maior extensão. Em vermelho: menor extensão.....	111
<b>Tabela 14</b> - Discriminação dos eventos de ressacas marinhas e associação com os índices AMM, GSA e SAM. Período analisado de 25 anos entre 1984 e 2008.....	132
<b>Tabela 15</b> - Discriminação dos eventos extremos de secas e associação com os índices AMM, GSA e SAM. Período analisado de 20 anos entre 1996 e 2015.....	136
<b>Tabela 16</b> - Discriminação dos eventos extremos de chuvas, enchentes e deslizamentos e associação com os índices AMM, GSA e SAM. Período analisado de 15 anos entre 1999 e 2013.....	140

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

- AAO** - *Antarctic Oscillation* / Oscilação Antártica
- AMM** - *Atlantic Meridional Mode* / Modo Meridional do Atlântico
- AO** – *Arctic Oscillation* / Oscilação Ártica
- AOI** - *Antarctic Oscillation Index* / Índice de Oscilação Antártica
- AZM** - *Atlantic Zonal Mode* / Modo Zonal do Atlântico
- CPC** - *Climate Prediction Center*
- CTI** - *Cold Tongue Index* / Índice da Língua Fria
- DMSP** - *Defense Meteorological Satellite Program's*
- ECMWF** - *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts*
- ENOS** - El Niño Oscilação Sul
- EOF** - *Empirical Orthogonal Function* / Função Ortogonal Empírica
- EOT** - *Empirical Orthogonal Teleconnection* / Teleconexão Ortogonal Empírica
- ERA** ou ERA-Interim - *European Reanalysis Agency*
- ERSSTv5** - *Extended Reconstructed Sea Surface Temperature version 5*
- GPCP** - *Global Precipitation Climatology Project*
- GSA** - Gradiente Subtropical do Atlântico
- HadISST2** - *Hadley Center Ice-Sea Surface Temperature* - versão 2
- ICOADS** - *International Comprehensive Ocean–Atmosphere Dataset*
- MatLab** - *Matrix Laboratory*
- MBA** - Mar de Bellingshausen-Amundsen
- MCA** - *Maximum Covariance Analysis* / Análise de Covariância Máxima
- MW** - Mar de Weddell
- NAO** - *North Atlantic Oscillation* / Oscilação do Atlântico Norte
- NCAR** - *National Center for Atmospheric Research*
- NCEP** - *National Centers for Environmental Prediction*
- NPO** - *North Pacific Oscillation* / Oscilação do Pacífico Norte
- NOAA** - *National Oceanic and Atmospheric Administration*
- NSIDC** - *National Snow and Ice Data Center*
- PSA** - *Pacific South America* / Modo Pacífico-América do Sul
- SAM** - Modo Anular Sul

**SSM/I** - *Special Sensor Microwave/Imager*  
**SSMIS** - *Special Sensor Microwave Imager/Sounder*  
**SMMR** - *Scanning Multichannel Microwave Radiometer*  
**SO** - *Southern Oscillation / Oscilação Sul*  
**TSM** - *Temperatura da Superfície do Mar*  
**ZCAS** - *Zona de Convergência do Atlântico Sul*  
**ZCIT** - *Zona de Convergência Intertropical*  
**WES** - *Wind Evaporation Sea Surface temperature*

## SUMÁRIO

<b>CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO.....</b>	<b>23</b>
<b>1.1. Apresentação.....</b>	<b>23</b>
<b>1.2. Objetivos.....</b>	<b>28</b>
<b>1.3. Hipóteses.....</b>	<b>28</b>
<b>CAPÍTULO 2 - ANTÁRTICA E AMÉRICA DO SUL: CARACTERÍSTICAS FÍSICAS E CLIMÁTICAS.....</b>	<b>30</b>
<b>2.1. Continente Antártico.....</b>	<b>30</b>
<b>2.2. América do Sul.....</b>	<b>34</b>
<b>CAPÍTULO 3 - VARIABILIDADE CLIMÁTICA: PADRÕES DE TELECONEXÕES E RELAÇÕES COM A ANTÁRTICA E A AMÉRICA DO SUL.....</b>	<b>39</b>
<b>3.1. O Modo Anular Sul.....</b>	<b>41</b>
<b>3.2. Variabilidade da TSM do Atlântico: os padrões AMM e GSA.....</b>	<b>46</b>
<b>CAPÍTULO 4 - MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>55</b>
<b>4.1. Conjunto de Dados.....</b>	<b>57</b>
4.1.1. Temperatura da Superfície do Mar.....	57
4.1.2. Temperatura do Ar à 2 m e Altura Geopotencial em 700 hPa (Reanálises).....	57
4.1.3. Precipitação.....	58
4.1.4. Índice SAM .....	58
4.1.5. Índice AMM.....	58
4.1.6. Índice GSA.....	59
4.1.7. Concentração e Extensão de Gelo Marinho Antártico.....	60
<b>4.2. Aplicação dos Métodos de Análise.....</b>	<b>63</b>
4.2.1. Análise da Relação entre a Extensão de Gelo Marinho Antártico e os Padrões de Teleconexões.....	63
4.2.1.1 Compostos.....	64
4.2.1.2 Correlações.....	64
4.2.1.3 Diagramas boxplots.....	64
4.2.1.4 Gráficos de Extensão de Gelo Marinho x Longitude.....	65

4.2.2. Análise da Relação do SAM/AMM com Extremos de Gelo Marinho e Temperatura e Precipitação na América do Sul.....	65
4.2.2.1 Compostos.....	65
4.2.3. Fenômenos Climáticos e Desastres: ocorrências no Brasil e na América do Sul.....	66
<b>CAPÍTULO 5 - RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>67</b>
<b>5.1. Variação Temporal dos Índices e da Extensão de Gelo Marinho Antártico.....</b>	<b>67</b>
<b>5.2. Análise da Relação entre a Extensão de Gelo Marinho Antártico e os Padrões de Teleconexões.....</b>	<b>77</b>
5.2.1. Compostos de Altura Geopotencial.....	77
5.2.1.1 Análise dos Compostos de Altura Geopotencial (setor MBA) .....	77
5.2.1.2 Análise dos Compostos de Altura Geopotencial (setor MW) .....	82
5.2.2. Compostos de TSM.....	85
5.2.2.1 Análise dos Compostos de TSM (setor MBA) .....	85
5.2.2.2 Análise dos Compostos de TSM (setor MW) .....	89
5.2.3. Correlações.....	93
5.2.3.1 Análise das Correlações entre os Índices e a Extensão de Gelo Marinho no Mês de Fevereiro (setores MBA e MW) .....	93
5.2.3.2 Análise das Correlações entre os Índices e a Extensão de Gelo Marinho no Mês de Setembro (setores MBA e MW) .....	95
5.2.4. Análise dos Diagramas Boxplots.....	97
5.2.4.1 Análise dos Índices Isolados.....	97
5.2.4.2 Análise dos Índices Combinados (setor MBA) .....	101
5.2.4.3 Análise dos Índices Combinados (setor MW) .....	106
5.2.5. Gráficos de Extensão de Gelo Marinho x Longitude.....	111
<b>5.3. Análise da Relação do SAM/AMM com Extremos de Gelo Marinho e Temperatura e Precipitação na América do Sul.....</b>	<b>117</b>
5.3.1. Temperatura na América do Sul nos Casos Extremos de Gelo no Setor MBA.....	117
5.3.2. Precipitação na América do Sul nos Casos Extremos de Gelo no Setor MBA.....	119
5.3.3. Temperatura na América do Sul nos Casos Extremos de Gelo no Setor MW.....	121
5.3.4. Precipitação na América do Sul nos Casos Extremos de Gelo no Setor MW.....	123
<b>5.4. Fenômenos Climáticos e Desastres: ocorrências no Brasil e na América do Sul.....</b>	<b>125</b>

5.4.1. Ressacas marinhas.....	129
5.4.2. Eventos extremos de secas, ondas de calor e incêndios florestais.....	132
5.4.3. Eventos extremos de chuvas, enchentes e deslizamentos.....	136
<b>6. CONCLUSÕES.....</b>	<b>141</b>
<b>7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>146</b>
<b>ANEXO.....</b>	<b>160</b>

## CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

### 1.1. Apresentação

Conexões climáticas entre o continente antártico, a variabilidade da extensão do gelo marinho que o circunda e o clima de diversas regiões da América do Sul têm sido amplamente investigadas nas últimas décadas, principalmente devido à importância da Antártica no equilíbrio do sistema climático global bem como no controle da circulação atmosférica do Hemisfério Sul (HALL; VISBECK, 2002; CARVALHO; JONES; AMBRIZZI, 2005; PEZZA et al. 2008; REBOITA; AMBRIZZI; ROCHA, 2009; SILVESTRI; VERA, 2009; OLIVA, 2011; VASCONCELLOS, 2012; LIMA, 2012; AQUINO, 2012; PEZZA; HASHID; SIMMONDS, 2012; PARISE, 2014; CARPENEDO; AMBRIZZI, 2016; OLIVA et al. 2021).

A variabilidade sazonal da temperatura na Antártica encontra-se diretamente associada à extensão do gelo marinho ao redor do continente, de modo que muitos estudos que utilizam modelos climáticos sugerem que uma redução da extensão do gelo pode levar à grandes mudanças no clima da própria Antártica e de regiões distintas da América do Sul (e.g. KING; TURNER, 1997), pois variações da cobertura de gelo marinho influenciam o balanço de energia global por meio de significativas alterações no albedo.

O gelo marinho antártico proporciona grande impacto no clima do Hemisfério Sul (RAPHAEL; HOBBS; WAINER, 2011; PARISE, 2014; CARPENEDO; AMBRIZZI, 2016), uma vez que a atmosfera terrestre funciona como uma grande máquina de calor, caracterizada pelo aquecimento excessivo nos trópicos e um resfriamento nas altas latitudes. Neste contexto, a circulação geral da atmosfera atua no sentido de transportar e distribuir calor entre os trópicos e os polos. Deste modo, a Antártica representa um grande sorvedouro de calor para o planeta e, principalmente, para o Hemisfério Sul, exercendo forte controle sobre a circulação atmosférica nas médias e altas latitudes. Sua vasta cobertura de neve e gelo faz com que a região possua um elevado albedo, contribuindo para o mecanismo de *feedback* gelo-albedo, o qual se revela de extrema importância nas variações e mudanças do clima polar que proporciona impactos no sistema climático global (KING; TURNER, 1997). Assim, é consenso entre pesquisadores que a criosfera<sup>1</sup> mantém controle significativo sobre o clima global, sendo que o continente Antártico e sua extensão de gelo marinho são

---

<sup>1</sup>O termo criosfera (do termo “crio” - congelamento - e esfera) refere-se aos componentes do sistema terrestre que são formados por água no seu estado sólido (WALLACE; HOBBS, 2006).

importantes para o balanço de energia e influenciam muitos processos meteorológicos que afetam, particularmente, o clima do Hemisfério Sul.

Diversos autores (RENWICK, 2001; HALL; VISBECK, 2002; LEFEBVRE et al. 2004; CUNNINGHAM; BONATTI, 2011; RAPHAEL; HOBBS; WAINER, 2011; PARISE et al. 2015; COMISO et al. 2017; LIMA; CARVALHO, 2017; OLIVA et al. 2021) mostraram que a interação criosfera-atmosfera é muito complexa e que seu estudo merece destaque, devido à sua relevância e contribuição para melhor entendimento das particularidades do clima antártico e suas interações com o regime climático do continente sul-americano.

Carpenedo e Ambrizzi (2016) investigaram as relações entre os extremos de gelo marinho antártico e as células de circulação meridional no Oceano Pacífico Sudeste por meio da dinâmica da célula de Ferrel. Estes autores constataram que, durante eventos extremos de expansão do gelo marinho no setor do Mar de Ross, há um resfriamento da temperatura da superfície do mar (TSM) e um reforço dos gradientes meridionais de pressão entre a borda do gelo marinho e o mar aberto, o que resulta em fortalecimento do ramo ascendente da célula de Ferrel em torno de 60°S no Pacífico Sudeste. De acordo com Raphael, Hobbs e Wainer (2011), a variação da extensão do gelo marinho antártico possui potencial para afetar as células de circulação atmosférica (da superfície até os níveis médios da troposfera) uma vez que a borda do gelo marinho está localizada em uma região muito sensível, sob a Frente Polar Antártica.

Outros trabalhos prévios têm destacado a variabilidade espacial e temporal da extensão do gelo marinho com padrões de variabilidade climática, particularmente o El Niño Oscilação Sul (ENOS) e o Modo Anular Sul (SAM – *Southern Annular Mode*) (FOGT; BROMWICH, 2006; PEZZA et al. 2008; PEZZA; HASHID; SIMMONDS, 2012; CLEM; FOGT, 2013; PARISE et al. 2015; CLEM et al. 2016, REBOITA et al. 2019; FOGT; MARSHALL, 2020; OLIVA et al. 2021).

Em um contexto de mudanças ambientais globais e variabilidade climática, o Hemisfério Sul e a Antártica apresentam-se com destaque por modularem a circulação atmosférica e também devido à atuação do vórtice circumpolar antártico, por estar associado ao significativo volume de gelo representado pela Antártica. De acordo com Bromwich e Parish (1998) e Thompson e Solomon (2002), este vórtice condiciona uma circulação atmosférica média de oeste que se estende da superfície até a estratosfera. Alguns estudos



indicam que o comportamento do vórtice influencia a circulação atmosférica da superfície até altos níveis nos extratropicos do Hemisfério Sul (e.g. THOMPSON; SOLOMON, 2002). Para estes autores, a variabilidade climática nas altas latitudes do Hemisfério Sul é dominada pelo SAM, que representa um padrão de grande escala de variabilidade caracterizado por flutuações na intensidade deste vórtice. O SAM é o principal modo de variabilidade climática nas latitudes extratropicais no Hemisfério Sul, sendo caracterizado por uma anomalia no campo de pressão, entre regiões de latitudes médias e latitudes polares, indicando um padrão "gangorra" norte-sul de massa atmosférica (THOMPSON; WALLACE, 2000).

Fogt e Bromwich (2006) exploraram os padrões de variabilidade climática de grande escala (teleconexões) entre o ENOS e as altas latitudes, mostrando que uma relação em fase com o Modo Pacífico América do Sul (PSA – *Pacific South America*) tem a habilidade de aumentar a correlação entre o ENOS e o SAM. Os autores sugeriram que latitudes tropicais e extratropicais atuam em conjunto para aumentar a influência do ENOS no clima do continente antártico. De acordo com Pezza, Hashid e Simmonds (2012), na fase positiva do SAM, ondas estacionárias podem ser amplificadas por perturbações anômalas associadas a ciclones de latitudes altas, resultando em maior gelo marinho. Os autores encontraram uma associação similar em anos com ENOS (La Niña). Embora trabalhos anteriores tenham mostrado a influência de padrões de teleconexões tropicais e extratropicais na extensão de gelo marinho na Antártica, uma análise mais abrangente e pormenorizada sobre essas influências torna-se necessária.

Neste sentido, o clima de diversas regiões da América do Sul é influenciado por sistemas atmosféricos e padrões de teleconexões que podem contribuir para a ocorrência de estações anormalmente chuvosas ou estiagens prolongadas, além de significativas variações de temperatura (SILVESTRI; VERA, 2003; AQUINO; SETZER; SIMÕES, 2006; RAIÁ; CAVALCANTI, 2008; VASCONCELLOS, 2008; REBOITA et al. 2010; GRIMM, 2011; BOMBARDI et al. 2014; VASCONCELLOS; PIZZOCHERO; CAVALCANTI, 2019; VASCONCELLOS; SOUZA, 2020; OLIVA; JUSTI DA SILVA, 2021). Os extremos de tempo e de clima podem afetar sobremaneira as atividades econômicas, como o setor elétrico e o agrícola, assim como desencadear problemas de seca e desabastecimento de água nos centros urbanos e a ocorrência de inundações e deslizamentos de encostas em áreas mais susceptíveis que impactam significativamente a vida humana.

Alguns estudos têm mostrado o papel do SAM na influência sobre o clima de distintas regiões da América do Sul (SILVESTRI; VERA, 2003; GILLETT; KELL; JONES,

2006; OLIVA, 2011; VASCONCELLOS; PIZZOCHERO; CAVALCANTI, 2019; CALDAS et al. 2020; OLIVA; JUSTI DA SILVA, 2021), especialmente no que se refere ao comportamento da temperatura e da precipitação. Entretanto, as relações entre este modo de variabilidade e o regime climático de distintas regiões do Brasil ainda não foram extensivamente investigadas.

Trabalhos como o de Reboita, Ambrizzi e Rocha (2009), Vasconcellos e Cavalcanti (2010) e Vasconcellos, Pizzochero e Cavalcanti (2019) abordaram a relação deste padrão com sistemas atmosféricos na América do Sul e com precipitação sobre o continente. Oliva (2011) investigou as possíveis relações entre as fases opostas da Oscilação Antártica (AAO), outra denominação para o SAM, e a precipitação e as vazões de rios da bacia do rio Uruguai, na Região Sul do Brasil. O autor mostrou resultados que indicaram uma tendência de a região de estudo apresentar volumes médios de vazões e de precipitação mais elevados durante a fase negativa desta oscilação e mais reduzidos durante a fase positiva. Oliva e Justi da Silva (2021), ao analisarem as relações entre a AAO e a precipitação, constataram que os campos médios exibiram maior volume de chuva durante a fase negativa da AAO e menor volume durante a fase positiva em sua área de estudo e regiões adjacentes, como parte da região Sul e do estado de São Paulo, nordeste da Argentina, Uruguai e o sudeste da América do Sul.

Estes resultados concordam com Vasconcellos e Cavalcanti (2010) que observaram, sobre o Uruguai e nordeste da Argentina, precipitação anômala positiva na fase negativa da AAO. Os resultados deste trabalho parecem corroborar com Reboita, Ambrizzi e Rocha (2009) uma vez que os autores apontaram que as trajetórias dos ciclones são influenciadas pelo SAM e isso pode também alterar o regime de chuvas sobre a América do Sul. Estes autores detectaram frontogênese mais intensa e anomalias positivas de precipitação sobre o Uruguai e o sul do Brasil durante a fase negativa. A configuração oposta também ocorreu. Ademais, tem-se no trabalho de Aquino (2012), que investigou as conexões climáticas entre o sul do Brasil e a Península Antártica, uma referência às variações da temperatura média mensal e sazonal no sul do Brasil e na Península Antártica sob a influência das distintas fases do SAM.

Outro padrão de variabilidade climática importante e que se estabelece nos trópicos refere-se ao Modo Meridional do Atlântico (AMM - *Atlantic Meridional Mode*). Este padrão envolve flutuações decadais e interanuais do gradiente inter-hemisférico de TSM ao longo do Atlântico Tropical, o que dirige o fluxo da camada limite equatorial em direção ao hemisfério anormalmente quente (NOBRE; SHUKLA, 1996; CHANG; JI; LI, 1997). Esta

flutuação do gradiente meridional de TSM modula de maneira significativa o deslocamento sazonal da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) que, por sua vez, impacta o volume de chuvas sobre o nordeste do Brasil e Sahel da África (FOLTZ; McPHADEN; LUMPKIN, 2012; XIE; CARTON, 2004). Além disso, alguns autores (e.g. VIMONT; KOSSIN, 2007) mostraram que o AMM pode afetar a atividade de furacões sobre o Oceano Atlântico. Bombardi, Carvalho e Jones (2014) investigaram a influência do Dipolo do Atlântico Sul sobre a precipitação no leste da América do Sul durante fases neutras do ENOS e constataram que anomalias negativas do dipolo se relacionam com aumento da ciclogênese próximo do sudeste do Brasil, migração de ciclones extratropicais mais para norte e, conseqüentemente, uma modulação das características da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) e aumento de precipitação sobre o leste da América do Sul.

Outro padrão usado nesta pesquisa refere-se ao índice do Gradiente Subtropical do Atlântico (GSA), criado especificamente para esta pesquisa com o uso da série temporal de TSM. O GSA é um índice similar ao Dipolo do Atlântico Sul com a diferença principal estando relacionada a área usada para a delimitação dos dois polos no Atlântico Subtropical. Esta área foi delimitada especificamente para esta pesquisa usando um procedimento metodológico próprio.

Tomando como base a definição de Sterl e Hazeleger (2003), o dipolo é formado por dois polos com anomalias de TSM de sinais opostos, sendo um polo Nordeste e um polo Sudoeste, ambos no Atlântico Subtropical. De acordo com Venegas, Mysak e Straub (1997), este padrão dipolo é o principal modo de variabilidade acoplada oceano-atmosfera no Atlântico Subtropical. Informações sobre o procedimento de criação do índice GSA encontram-se no capítulo 4 (item 4.1.6).

Embora muitas pesquisas já tenham investigado relações de padrões de teleconexões e variabilidade climáticas com o gelo marinho antártico e com o clima da América do Sul, ainda há um número reduzido de trabalhos que pesquisaram sobre relações entre três padrões remotos e sua influência combinada sobre o gelo marinho e sobre o clima do continente. Além disso, há uma ausência de pesquisas sobre a influência combinada do SAM/AMM e do SAM/GSA. Ademais, ainda existe uma lacuna de estudos sobre a relação entre índices associados ao Atlântico, tais como o AMM e o GSA, e o gelo marinho antártico e o clima da América do Sul.

## 1.2. Objetivos

Neste contexto, o objetivo geral desta pesquisa é analisar as interações entre padrões de teleconexões tropicais, subtropicais e extratropicais e a extensão de gelo marinho antártico e a influência conjunta destes padrões com a variabilidade do gelo sobre o regime climático (temperatura do ar e precipitação) do continente sul-americano. Os objetivos específicos incluem:

i. Analisar, estatisticamente, a relação isolada e conjunta dos padrões de teleconexões, como o SAM, o AMM e o GSA com a variabilidade da extensão do gelo marinho antártico. O estudo da influência conjunta destes padrões torna-se importante na medida em que podem proporcionar impactos distintos daqueles gerados pela ação isolada do SAM, do AMM ou do GSA sobre o gelo marinho;

ii. Avaliar, por meio da análise das variáveis meteorológicas temperatura do ar e precipitação, o impacto da variabilidade do gelo marinho, sob a influência desses padrões de teleconexão, no clima da América do Sul. Pelo fato de a variabilidade da extensão de gelo marinho interferir no clima da América do Sul, uma melhor compreensão acerca das causas desta variabilidade contribuirá para um entendimento mais completo da dinâmica climática da América do Sul. Faz-se necessário lembrar que uma das causas desta variabilidade pode estar associada às distintas fases dos padrões de teleconexões;

iii. Analisar eventos climáticos extremos associados a desastres ocorridos na América do Sul e relatados na literatura científica com o intuito de investigar relações destes eventos com os sinais dos padrões/índices que foram abordados nesta pesquisa.

## 1.3. Hipóteses

i. Nos extremos máximos (mínimos) de gelo marinho no MBA ou no MW, espera-se anomalias negativas (positivas) de temperatura e de precipitação nos referidos setores;

ii. Quando ocorrer a fase positiva (negativa) do AMM, espera-se que o norte e o nordeste do Brasil fiquem mais secos (chuvosos) e o extremo norte da América do Sul se apresente mais chuvoso (seco);

iii. Nos casos de ocorrência da fase negativa do SAM em associação com menores extensões de gelo no MW, acredita-se que o sul e o sudeste da América do Sul se mostrem mais secos;

iv. Nos casos de ocorrência da fase negativa do SAM com maiores extensões de gelo no MW pode ocorrer seca em latitudes tropicais e equatoriais, uma vez que a fase negativa tende a inibir a penetração de sistemas transientes pelo continente;

v. Nos casos de fase negativa do GSA, pela sua associação com a temperatura das águas do Atlântico Sul, acredita-se que este sinal tenha uma relação mais próxima com ocorrência de chuvas intensas e ressacas no sudeste do Brasil;

vi. É possível que os efeitos sejam distintos entre os setores MBA e MW, em função das oscilações nas intensidades dos ventos de oeste e das diferentes anomalias de pressões resultantes das fases opostas do SAM impactando o clima de diferentes maneiras;

vii. No nordeste da Argentina e no sul do Brasil, podem ocorrer sinais inversos do GSA e até mesmo do SAM relacionados às chuvas ou secas em comparação com o sudeste do Brasil;

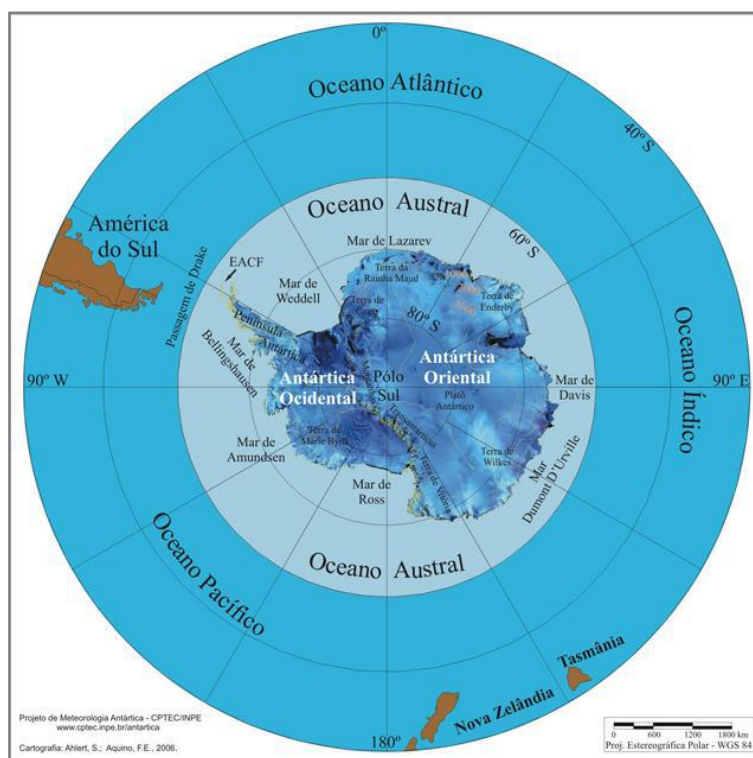
viii. A combinação das fases negativas (positivas) do SAM e positivas (negativas) do AMM podem favorecer condições mais secas (úmidas) e temperaturas mais altas (baixas) em grande parte da América do Sul e na Amazônia.

## CAPÍTULO 2 - ANTÁRTICA E AMÉRICA DO SUL: CARACTERÍSTICAS FÍSICAS E CLIMÁTICAS

### 2.1. Continente Antártico

A região antártica situa-se ao sul da latitude de 60°S abrangendo toda a região do polo sul do globo e inclui, além do próprio continente, um conjunto de ilhas, os mares próximos, as plataformas de gelo e o Oceano Austral que o circunda e é composto pelos mares de Weddell, Bellingshausen, Amundsen, Ross, Dumont D'Urville, Lazarev e Davis (<http://www.scar.org>) (**Figura 1**).

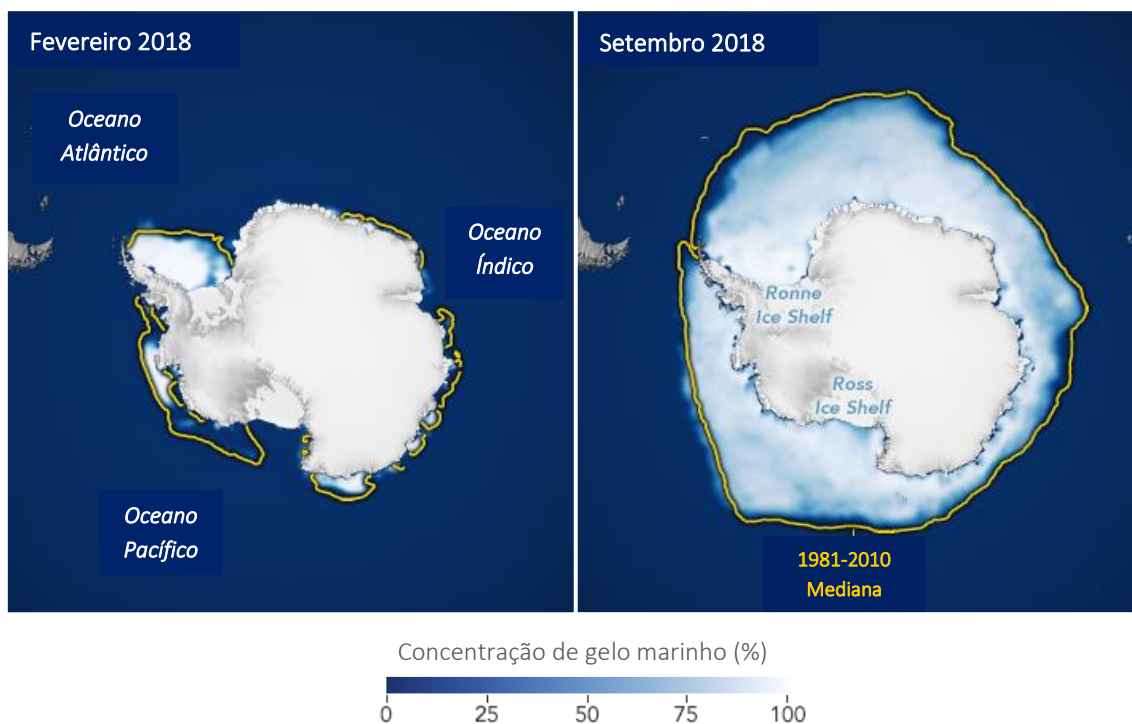
O continente antártico, o mais austral do planeta, apresenta condições meteorológicas e climáticas únicas, sendo o mais frio, o mais seco, o que apresenta os ventos mais intensos e o de altitude média mais elevada. Compreende uma área de aproximadamente  $14 \times 10^6 \text{ km}^2$  (1,6 vezes a área do Brasil), que é quase toda coberta por gelo (99,6%). Ainda abrange em torno de 10% da superfície terrestre continental e 90% do gelo da Terra ( $25 \times 10^6 \text{ km}^3$  de volume). A altitude média do manto de gelo é de 2.500 m alcançando mais de 4.000 m de altitude na região do platô antártico (<http://www.scar.org>).



**Figura 1** – Mapa fisiográfico do continente antártico mostrando sua localização geográfica centrada no polo sul e oceanos e mares que o circundam. Fonte: Ahlert e Aquino (2006).

Esse continente é cercado por um cinturão de gelo marinho que tem efeito significativo na interação oceano-criosfera-atmosfera. Ao longo do ano, este cinturão atinge sua extensão máxima no fim do inverno/início da primavera (setembro/outubro) com área de cerca de  $20 \times 10^6 \text{ km}^2$  e alcança sua extensão mínima no fim do verão (fevereiro/março) apresentando uma área de aproximadamente  $3 \times 10^6 \text{ km}^2$ , o que resulta numa variação de cerca de  $17 \times 10^6 \text{ km}^2$  que é superior à própria área do continente ( $14 \times 10^6 \text{ km}^2$ ). Este cinturão de gelo atinge, em alguns pontos, a latitude de  $55^\circ\text{S}$  no fim do inverno e desempenha um importante papel em muitos processos meteorológicos causando impactos no clima de regiões costeiras e marinhas (KING; TURNER, 1997) (**Figura 2**).

A Península Antártica se caracteriza por uma importante feição geomorfológica de orientação aproximada N-S, que apresenta uma largura média de 70 km e elevação média de 1.500 m, se estendendo para norte e atingindo a latitude de  $63^\circ\text{S}$ . Esta importante feição atua como uma barreira efetiva ao fluxo atmosférico zonal tanto na atmosfera como no oceano, determinando diferenciação climática entre os dois lados situados a oeste e a leste da Península (FERRON, 1999).

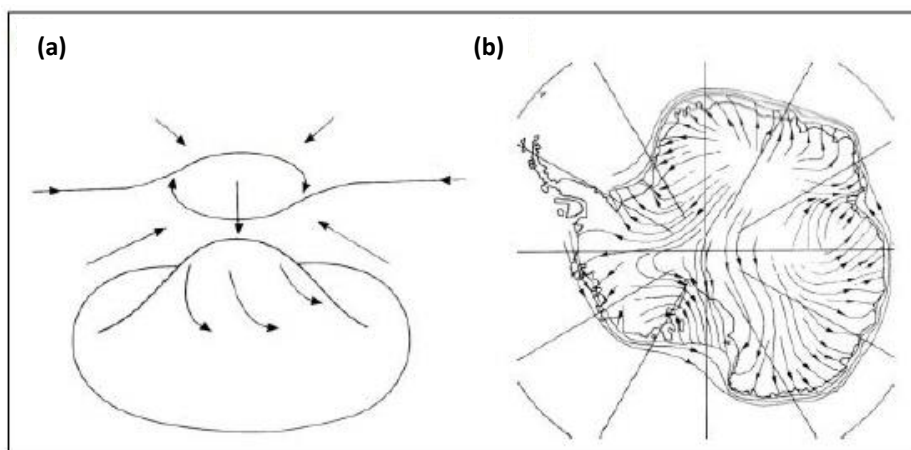


**Figura 2** – Concentração de gelo marinho. Linha amarela: mediana da concentração de gelo marinho entre 1981 e 2010. A figura à esquerda representa o mês de fevereiro e a da direita representa o mês de setembro, em 2018. Modificado de *National Snow and Ice Data Center (NSIDC, 2020)*.

O continente antártico, assim como o gelo marinho que o circunda, recebe, ao longo do ano, uma menor quantidade de radiação solar na superfície do que as regiões tropicais. Além disto, o albedo da neve e do gelo marinho varia entre 80 e 90%, contrastando com o albedo do mar não congelado que oscila em torno de 10 a 15% (KING; TURNER, 1997). Estas características da superfície do continente provocam a reflexão da maior parte da radiação solar que chega à superfície de volta para o espaço. Durante os meses de inverno, o gelo marinho atua de forma eficaz controlando a formação de nuvens, a estabilidade da atmosfera e, conseqüentemente, a precipitação sobre a região antártica.

O campo de vento na região é uma das características mais marcantes com destaque para a circulação catabática. Para o desencadeamento deste processo, de grande importância é a altitude do domo de gelo que ultrapassa 4.000 m na região do platô antártico. Esta altitude elevada, aliada à vasta cobertura de gelo permanente e temperaturas extremamente baixas, leva a formação de um centro de alta pressão sobre o continente, que gera uma forte e persistente circulação catabática na baixa atmosfera que conduz ar frio do interior do continente em direção à costa.

Os fortes ventos catabáticos, resultantes da divergência em superfície, possuem uma resultante orientada para a esquerda, devido à força de Coriolis, e adquirem uma forte componente de leste próximo à costa estando concentrada nos principais vales glaciais (**Figura 3**). O continente age como um eficiente gerador de Ondas de Rossby, em função de sua orografia não ser simétrica com relação ao polo sul, as quais se propagam em direção ao norte afetando a circulação nas latitudes médias (KING; TURNER, 1997).

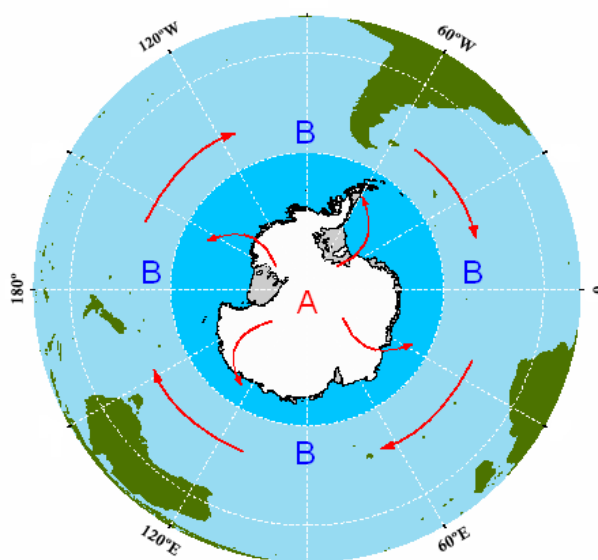


**Figura 3** – (a) Modelo conceitual da circulação troposférica sobre a Antártica. (b) Divergência em superfície resulta em ventos catabáticos que adquirem forte componente de leste próximo à costa. Fonte: King e Turner (1997).



A precipitação sobre a região é sustentada pelo transporte de ar úmido oriundo das latitudes médias para o sul. Ao sul da latitude de 60°S, os totais pluviométricos diminuem nitidamente à medida que se avança para latitudes mais altas. A precipitação, ao longo da região costeira a sudeste do Mar de Bellingshausen, área de frequente ciclogênese, é reforçada pela ausência de cobertura de gelo marinho no Mar de Bellingshausen durante os meses de verão. Este processo aumenta o fluxo de calor e de vapor d'água nas camadas mais baixas da atmosfera. No interior do continente, os totais pluviométricos são consideravelmente inferiores. Neste contexto, a região elevada situada na porção leste do continente antártico apresenta totais pluviométricos anuais inferiores a 50 mm (KING; TURNER, 1997, TURNER, 2003).

A região que cobre o Oceano Austral, próximo à latitude de 60°S, apresenta cobertura de nuvens em torno de 85-90% ao longo do ano sendo a região com maior cobertura de nuvens do Hemisfério Sul. Nesta latitude, a variação sazonal da cobertura de nuvens é pequena com uma ligeira redução na quantidade de nuvens durante os meses de inverno, devido provavelmente à presença de gelo marinho no entorno do continente que gera um decréscimo do fluxo de vapor d'água nas camadas mais baixas da atmosfera. Associada com a Baixa Pressão Circumpolar (**Figura 4**), o cinturão em torno de 60-70°S representa a região com a maior cobertura de nuvens de todo o planeta em virtude do encontro do ar frio proveniente das altas latitudes com o ar relativamente mais quente das latitudes mais baixas (KING; TURNER, 1997).



**Figura 4** – Representação esquemática da circulação atmosférica na região da Antártica, enfatizando a Baixa Pressão Circumpolar e a alta pressão sobre o continente. Fonte: [www.antarctica.gov.au](http://www.antarctica.gov.au) (Australian Antarctic Program).

Toda a região antártica desempenha função destacada no sistema climático global, especialmente por sua dimensão, elevado albedo e balanço de radiação com grandes contrastes sazonais, além das complexas interações existentes entre a atmosfera, os oceanos e a criosfera. A criosfera é importante para o equilíbrio do sistema climático, contribuindo para a refletividade ou albedo da Terra, influenciando a circulação oceânica termohalina e armazenando quantidade de água suficiente para exercer um forte controle sobre o nível do mar global (WALLACE; HOBBS, 2006).

Turner (2003) considera que, por se caracterizar por um imenso manto de gelo centrado próximo ao polo sul, a Antártica promove significativa influência na circulação atmosférica do Hemisfério Sul. Suas características peculiares, tal como temperatura média do ar entre  $-20^{\circ}$  e  $-60^{\circ}\text{C}$ , somados à sua grande dimensão, gigantesco volume de gelo e elevada altitude, conferem ao continente a importante função de contribuir decisivamente para a condução do clima no Hemisfério Sul, além de desempenhar papel essencial no controle da circulação atmosférica e oceânica nas médias e altas latitudes deste hemisfério (FLOHN, 1987).

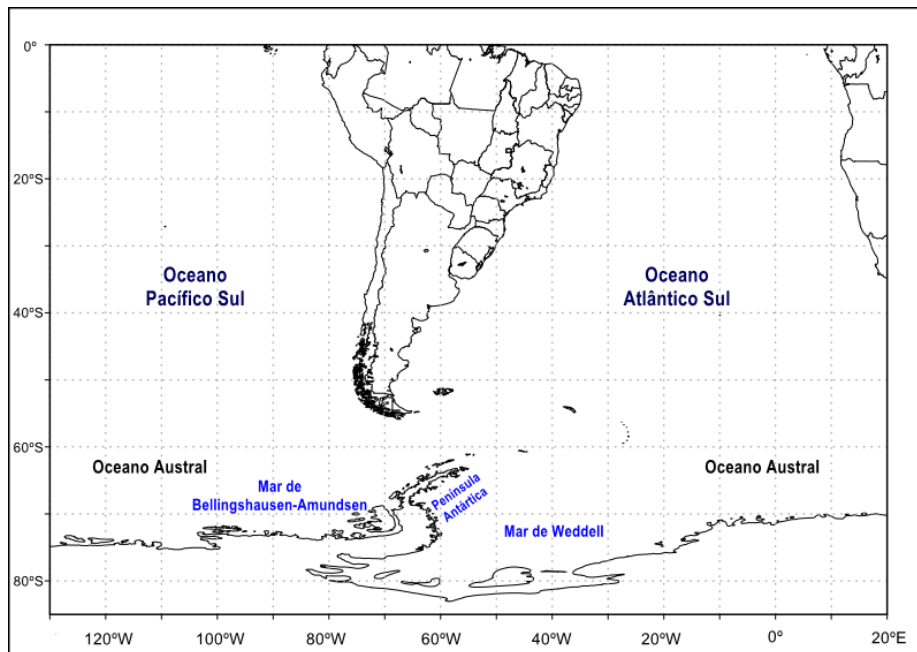
## **2.2. América do Sul**

O continente sul-americano possui uma configuração territorial com significativa extensão latitudinal, ocupando desde áreas equatoriais até áreas de latitudes médias (aproximadamente de  $55^{\circ}\text{S}$  à  $12^{\circ}\text{N}$ ) e, deste modo, variados e distintos regimes climáticos são observados neste continente (REBOITA et al. 2010).

A América do Sul (**Figura 5**), é frequentemente atingida por sistemas frontais e uma diversidade de sistemas atmosféricos (CAVALCANTI; KOUSKY, 2003). Além disso, outros fatores interferem de maneira decisiva para a heterogeneidade climática do continente, como a diversidade das formas de relevo e a presença de cobertura vegetal não homogênea. A América do Sul é circundada, a oeste, pelo Oceano Pacífico e, a leste, pelo Oceano Atlântico. Estes fatores combinados proporcionam a atuação de diferentes sistemas atmosféricos que contribuem para uma não homogeneidade climática.

O sudeste do Brasil que engloba parte do sudeste da América do Sul é uma região úmida no verão, devido ao período chuvoso do Sistema de Monção da América do Sul (VERA et al. 2006), e mais seca no inverno. Os baixos totais pluviométricos no inverno estão associados à atuação do Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul, pois nesta estação tal sistema alcança sua posição mais a oeste, se estendendo até o sudeste do Brasil. Eventos de chuva ocorrem quando os sistemas frontais e ciclones subtropicais e extratropicais

conseguem se sobrepôr ao Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul. Sistemas meteorológicos como linhas de instabilidade pré-frontais, sistemas convectivos de mesoescala, bloqueios atmosféricos e brisas também atuam na referida região (REBOITA et al. 2010).



**Figura 5** – Localização da América do Sul e oceanos adjacentes, da Península Antártica e dos Mares de Bellingshausen-Amundsen (MBA) e de Weddell (MW).

Os sistemas atmosféricos que atuam em parte do centro-oeste do Brasil são tanto de origem tropical quanto extratropical (CLIMANÁLISE, 1986). A porção mais ao sul desta região sofre influência de sistemas extratropicais, tais como frentes frias, sistemas convectivos de mesoescala e linhas de instabilidade. Assim como no sudeste do Brasil, a precipitação no centro-oeste do Brasil alcança o seu máximo na estação de verão, pois também é afetada pelo Sistema de Monção da América do Sul (VERA et al. 2006).

Como afirma Cavalcanti et al. (2009), o clima do sul do Brasil possui grandes contrastes nos regimes de precipitação e temperatura, sendo boa parte resultado de sua localização geográfica, situado entre os trópicos e as latitudes médias. O regime de precipitação apresenta transição bem definida: enquanto na porção mais ao norte predomina regime típico de monção com estação chuvosa iniciando na primavera e terminando no início do outono, na porção mais ao sul ocorre distribuição mais uniforme de chuva ao longo do ano com regime semelhante ao de latitudes médias que estão associados com a passagem de sistemas frontais e ciclones extratropicais.

A região que engloba o sul do Brasil, parte do norte da Argentina, parte do Paraguai e do Uruguai é afetada, de acordo com o Climanálise (1986) e outros estudos (REBOITA, 2008; SALIO; NICOLINI; ZIPSER, 2007; NASCIMENTO; AMBRIZZI, 2002), por sistemas atmosféricos, tais como: ciclones e frentes frias que se desenvolvem nesta região em função da presença de vórtices ciclônicos de altos níveis ou cavados em altos níveis sobre a costa oeste da América do Sul vindos do Pacífico (IWABE; ROCHA, 2009); sistemas frontais que se deslocam do Pacífico, passam pela Argentina e seguem para o nordeste do Brasil (RODRIGUES; FRANCO; SUGAHARA, 2004); e também devido a condições frontogenéticas e/ou ciclogenéticas originadas na própria região (REBOITA; AMBRIZZI; ROCHA, 2009); Complexos Convectivos de Mesoescala (FIGUEIREDO; SCOLAR, 1996) e bloqueios atmosféricos (MARQUES; RAO, 2000). Além disso, há atuação de sistemas de circulação locais como as brisas e a influência indireta da ZCAS (KODAMA, 1992; FERRAZ, 2004; CARVALHO; JONES; LIEBMANN, 2004), uma vez que este sistema, apesar de atuar climatologicamente sobre o sudeste do Brasil, pode gerar movimentos subsidentes no sul do Brasil.

A ZCAS é uma banda de nebulosidade com orientação NW-SE que pode ser formada a partir da interação da convecção tropical com os sistemas frontais que apresentam um caráter estacionário sobre o sul e o sudeste do Brasil por um período de no mínimo quatro dias (KODAMA, 1992; CARVALHO; JONES; LIEBMANN, 2004). A ZCAS também pode ser influenciada pela confluência entre os ventos de nordeste da Alta Subtropical do Atlântico Sul, que transportam calor e umidade do Oceano Atlântico para o interior do Brasil, e o Jato de Baixos Níveis a leste dos Andes, que transporta calor e umidade da Amazônia para o sudeste da América do Sul. A ZCAS é uma importante característica da circulação de verão na América do Sul sendo extremamente importante para a estação chuvosa no sudeste do Brasil. Embora este sistema possa gerar movimentos subsidentes na maior parte do sul do Brasil desfavorecendo precipitação, também pode causar chuvas no setor norte do sul do Brasil, uma vez que esta região tem localização próxima à sua posição climatológica. No sul do Brasil, o aquecimento e a convergência de umidade são maiores na porção norte, nas proximidades da ZCAS, motivo pelo qual esta é a área do sul do Brasil onde as chuvas de verão são mais intensas (GRIMM; FERRAZ; GOMES, 1998).

De acordo com Reboita (2008), no sudeste da América do Sul há duas importantes regiões ciclogenéticas: a da costa do Uruguai e a da costa do sul e do sudeste do Brasil. Portanto, frequentemente, a precipitação no entorno desta região está associada com os

sistemas ciclônicos em superfície. Neste sentido, as ciclogêneses nas duas regiões estão relacionadas tanto com a divergência a leste dos cavados transientes em níveis médios, como com a instabilidade frontal em superfície. Assim, a associação deste processo termodinâmico com um processo dinâmico favorece as ciclogêneses (REBOITA, 2008). Os ciclones em superfície nesta região também podem estar associados aos vórtices ciclônicos de altos níveis (IWABE; ROCHA, 2009). Campetella e Possia (2006) e Reboita, Ambrizzi e Rocha (2009) mostraram que o sudeste da América do Sul (nordeste da Argentina, Uruguai e Rio Grande do Sul, para estes autores) é a região de maior frequência destes sistemas quando considerada toda a América do Sul e oceanos adjacentes.

No sudeste do Brasil, há a formação de sistemas convectivos de mesoescala principalmente na primavera e no verão e que contribuem para altas taxas de precipitação (SALIO; NICOLINI; ZIPSER, 2007). Segundo Figueiredo e Scola (1996), 70% dos Complexos Convectivos de Mesoescala que se desenvolvem na região subtropical da América do Sul, deslocam-se para o sul do Brasil e nordeste da Argentina gerando precipitação elevada. Nas estações de transição, o jato subtropical de altos níveis está centrado sobre o sul do Brasil e nordeste da Argentina, o que influencia os máximos de precipitação na região a partir da ocorrência de Complexos Convectivos de Mesoescala, cuja origem é resultante da interação deste jato com o vento de baixos níveis, quente e úmido, proveniente da porção norte da América do Sul (CAVALCANTI et al. 2009). No período quente (outubro a abril), os Complexos Convectivos de Mesoescala são frequentes e respondem por grande parte da precipitação total, especialmente na primavera e no outono.

Conforte (1997) e Torres e Nicolini (2002) verificaram o local de formação dos Complexos Convectivos de Mesoescala notando o grande número de ocorrências na primavera-verão e uma preferência pela faixa latitudinal entre 15° e 30°S. Vale ressaltar que grande parte destes sistemas se forma em associação com o Jato de Baixos Níveis, fluxo de ar quente e úmido com máxima velocidade e situado a aproximadamente 3.000 m de altitude, proveniente da região amazônica.

Nieto Ferreira et al. (2003) constatou que a atividade convectiva sobre o norte da Argentina, Paraguai, sul e sudeste do Brasil apresenta correlação negativa com a convecção associada à ZCAS, onde em situações em que a zona de convergência estava ausente, notava-se uma intensificação do Jato de Baixos Níveis e, na presença dela, a circulação de noroeste-sudeste predomina e inibe o fornecimento de calor e umidade para os Complexos Convectivos de Mesoescala por parte do Jato de Baixos Níveis.

Estudos realizados por Ferreira, Sanches e Silva Dias (2004) mostram uma relação entre a atividade oceânica da ZCAS e o ENOS, de modo que fases quentes do ENOS tendem a favorecer a persistência da ZCAS oceânica mais intensa. A ZCAS possui um papel fundamental na modulação da precipitação sobre parte do sudeste da América do Sul. Assim sendo, variações na disponibilidade e no abastecimento de água para a população que habita essa região podem estar relacionadas à variabilidade ou à distribuição das chuvas causadas pela ZCAS. Além disso, a atividade agrícola e a pecuária também são bastante afetadas com uma distribuição irregular de chuvas.

Como discutido por Sen Gupta e England (2006), o sudeste da América do Sul parece ser a região continental do Hemisfério Sul onde a relação do SAM com anomalias de precipitação se manifesta de forma mais intensa. A relação das distintas fases do SAM com anomalias de precipitação sobre o sudeste da América do Sul foi bem examinada por Silvestri e Vera (2003). Estes autores descobriram que a influência é mais forte no inverno e no fim da primavera quando as fases positivas (negativas) do SAM estão associadas com a intensificação de uma anomalia anticiclônica (cyclônica) em altos níveis, enfraquecimento (fortalecimento) da convergência de umidade e diminuição (aumento) da precipitação sobre esta região da América do Sul. Ademais, observaram que, durante a primavera, a influência combinada do SAM e do ENOS gera valores significativos de correlação resultando em uma forte modulação do sinal do ENOS pela atividade do SAM nas anomalias de precipitação sobre o sudeste da América do Sul. Os resultados encontrados por estes autores parecem concordar com Rao, Carmo e Franchito (2003) que encontraram correlação negativa entre o SAM e as trajetórias de tempestades em latitudes altas e subtropicais e uma correlação positiva em latitudes médias.

Diversos setores do continente sul-americano apresentam grandes áreas produtivas em países como Brasil e Argentina em termos de agricultura e geração de energia hidroelétrica. Neste sentido, um melhor entendimento a respeito dos fatores locais e dos padrões remotos de teleconexões responsáveis por modular o regime climático e a variabilidade interanual da precipitação e da temperatura torna-se relevante.

### **CAPÍTULO 3 - VARIABILIDADE CLIMÁTICA: PADRÕES DE TELECONEXÕES E RELAÇÕES COM A ANTÁRTICA E A AMÉRICA DO SUL**

O clima não mantém exatamente o mesmo comportamento para uma determinada área, pois há anomalias que diferem do comportamento “padrão” climático de uma dada área. De acordo com Wallace e Hobbs (2006), a variabilidade do clima pode ser provocada por processos internos que ocorrem na atmosfera, processos acoplados com outros componentes do sistema terrestre (oceanos e criosfera) e também por forçantes externas (como variabilidade solar e erupções vulcânicas).

A abordagem sistêmica foi adotada pela ciência geográfica com o emprego de termos como sistema climático, sistema geomorfológico e sistema ecológico. Há também o uso do termo geossistema (SOTCHAVA, 1977), sendo este uma variação do primeiro e pensado nos padrões dos ecossistemas da Biologia. A Teoria Geral dos Sistemas foi apresentada pela primeira vez por Bertalanffy que afirmava que é necessário estudar não somente as partes e processos isoladamente, mas também a interação dinâmica das partes (BERTALANFFY, 1973). O sistema climático pode ser pensado como parte do sistema terrestre ou um subsistema do sistema terrestre se caracterizando como um sistema aberto, pois todas as partes funcionam de maneira interrelacionada com entradas e saídas de fluxos de energia e matéria, complexos intercâmbios que se movimentam em diversas escalas.

Neste contexto, em uma revisão da literatura sobre esta temática, surgem trabalhos que são analisados hoje como clássicos dentro da Geografia, como as obras de Monteiro (1975; 1991) e Christofolletti (1979). De acordo com Christofolletti (1979), o sistema é um conjunto de unidades com relações entre si, no qual o estado de cada unidade é controlado, condicionado ou dependente do estado das outras unidades. Quando um sistema opera, ele gera saídas que funcionam como “informações” que retornam a vários pontos do sistema por meio dos ciclos de retroalimentação. Segundo Christopherson e Birkeland (2017), a mudança climática global cria uma retroalimentação positiva quando o gelo marinho de verão derrete no Ártico, substituindo a superfície de neve e gelo marinho, de maior albedo, por superfícies abertas de oceano, mais escuras e de menor albedo que absorvem a radiação solar. O oceano absorve mais radiação solar, o que eleva a temperatura, que por sua vez derrete mais gelo marinho formando um ciclo de retroalimentação positiva que potencializa ainda mais os efeitos de elevação das temperaturas. Monteiro (1991) destaca a importância de analisar a atmosfera como fenômeno geográfico tornando a abordagem do clima inerente às propostas de Maximilien Sorre. A climatologia geográfica brasileira, proposta pelo

professor Carlos Augusto Figueiredo Monteiro baseada nas premissas de Maximilien Sorre busca explicar o clima como um fenômeno rítmico. Apesar da análise rítmica dinâmica ser complexa, hoje ainda é destacada uma vez que possibilita o entendimento da relação entre os fenômenos que ocorrem na atmosfera permitindo a compreensão de sua relação com a superfície terrestre e o espaço geográfico.

Segundo Turner (2003), em função dos mecanismos de *feedback* relacionados à neve e à cobertura de gelo marinho, a variabilidade climática interanual na Antártica é maior do que em baixas latitudes. De acordo com Aquino, Setzer e Simões (2006), este processo é reforçado pelas interações entre a atmosfera, os oceanos e a criosfera. Diferentemente do Ártico, que possui imensas áreas cobertas por neve e gelo que variam sazonalmente e respondem de forma rápida às mudanças de temperatura, o continente antártico é coberto por uma superfície de gelo permanente. Além disso, é o gelo marinho que o circunda que possui o potencial de contribuir para a mudança e a variabilidade do clima (KING; TURNER, 1997). Na América do Sul, ocorre variabilidade do clima em escala temporal, como oscilações de temperatura e de precipitação em resposta aos eventos ENOS que representam uma importante fonte de variabilidade interanual do clima do Brasil. No entanto, esta influência dominante do ENOS não exclui a possibilidade de influência por parte de outros padrões de variabilidade.

A América do Sul é afetada por padrões de variabilidade em diversas escalas temporais. As influências do ENOS no regime climático da América do Sul, principalmente sobre precipitação e temperatura, foram relatadas por diversos autores (GRIMM; FERRAZ; GOMES, 1998; GRIMM, 2004; BARROS; GRIMM; DOYLE, 2002; TEDESCHI; CAVALCANTI; GRIMM, 2013). Barros, Grimm e Doyle (2002) analisaram os impactos do ENOS sobre a temperatura no sudeste da América do Sul e perceberam que no setor sul do Brasil e norte da Argentina o efeito destes eventos é mais forte durante o inverno, quando ocorrem anomalias positivas (negativas) de temperatura em episódios El Niño (La Niña). Segundo Grimm, Ferraz e Gomes (1998), quando episódios El Niño persistem até o outono/inverno, anomalias positivas de precipitação ocorrem no outono em parte do sul do Brasil, Argentina e Paraguai, enquanto no inverno ocorrem sobre o sul do Brasil. As enchentes de maior magnitude na bacia do Paraná-Prata estão relacionadas à estas anomalias positivas de precipitação. Tedeschi, Cavalcanti e Grimm (2013) estudaram a influência de dois tipos de ENOS na precipitação na América do Sul constatando que durante o primeiro tipo de El Niño (La Niña) tende a ocorrer aumento (redução) da precipitação na Bacia do



Prata e uma redução (aumento) no norte da América do Sul durante todas as estações do ano. No segundo tipo, há fortes anomalias de precipitação no Pacífico Central e em algumas regiões as anomalias exibem sinais opostos. De modo geral, diferenças ou similaridades nas anomalias de precipitação nestes dois casos ocorrem em diferentes áreas e estações do ano.

### 3.1. O Modo Anular Sul

Um dos mais importantes modos de variabilidade climática nas médias e altas latitudes do Hemisfério Sul é a Oscilação Antártica - AAO (GONG; WANG, 1999), usualmente referida como SAM (THOMPSON; WALLACE, 2000). O SAM caracteriza-se por um padrão de grande escala de variabilidade que domina a circulação extratropical do Hemisfério Sul e a intensidade dos ventos de oeste (*westerlies*) na região da Corrente Circumpolar Antártica. Este padrão de teleconexão possui um importante papel estabelecendo conexões climáticas entre regiões remotas e é responsável por interações entre regiões polares/subpolares e de baixas latitudes.

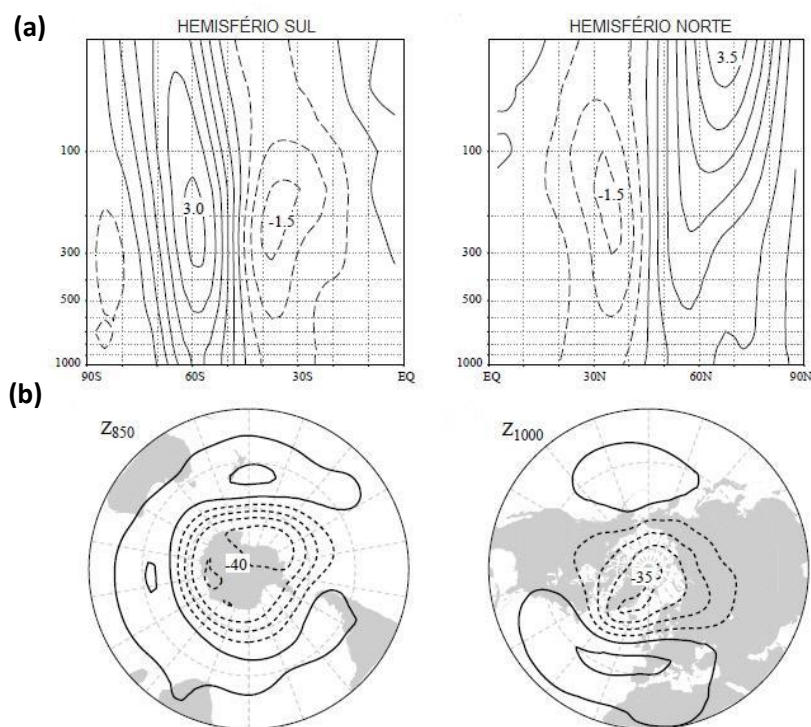
Durante o século XX, muita atenção foi dada ao estudo da circulação atmosférica em baixos níveis para melhor entendimento de anomalias climáticas em escala local e global. Gilbert Walker, durante as décadas de 1920 e 1930, foi um dos pioneiros neste assunto, realizando estudos sobre oscilações atmosféricas onde três delas foram nomeadas como: Oscilação do Atlântico Norte (NAO – *North Atlantic Oscillation*), Oscilação do Pacífico Norte (NPO – *North Pacific Oscillation*) e Oscilação Sul (SO – *Southern Oscillation*).

Walker (1928) documentou a existência de um padrão tipo oscilação no cinturão de pressão que cruza o Chile e a Argentina em oposição ao cinturão de pressão que cruza a região do Mar de Weddell (MW) e do Mar de Bellingshausen. Após o trabalho de Walker, muitos artigos foram publicados a respeito destas oscilações, e mais dados foram revelados (SHIOTANI, 1990; HARTMANN; LO, 1998; GONG; WANG, 1999; THOMPSON; WALLACE, 2000). Assim, o SAM foi identificado como um dos modos de variabilidade nas médias e altas latitudes do Hemisfério Sul (GONG; WANG, 1998). Estes autores definiram o SAM como uma oscilação ao nível do mar entre os cinturões de pressão das latitudes médias e altas do Hemisfério Sul e uma alternância de grande escala de massa atmosférica entre estes cinturões de pressão.

Gong e Wang (1999) descobriram que a Antártica e sua vizinhança representam um centro de mesmo sinal enquanto as latitudes de 40° a 50°S são cobertas por um centro de

sinal oposto e que essa “gangorra” de pressão ao nível do mar entre os diferentes cinturões de pressão é estável e significativa. Quando a pressão em torno de 40°S está alta, nas latitudes de 60° a 70°S ela se torna baixa e vice-versa. Gong e Wang (1999) definiram um índice objetivo para a AAO para compreender a estrutura espacial do campo de pressão, a variabilidade da AAO e sua possível conexão com anomalias climáticas do Hemisfério Sul.

Denominaram-no de Índice de Oscilação Antártica (AOI - *Antarctic Oscillation Index*), definido como a diferença de pressão ao nível do mar média zonal normalizada entre as latitudes de 40° e 65°S. Os valores positivos (negativos) do índice estão associados com anomalias negativas (positivas) de pressão ao nível do mar nas altas latitudes e anomalias positivas (negativas) de pressão ao nível do mar nas latitudes médias (GONG; WANG, 1999; THOMPSON; WALLACE, 2000; LEFEBVRE et al. 2004). (**Figura 6**).



**Figura 6** – (a) Seção transversal latitude x altura mostrando típicas amplitudes de anomalias de vento geostrófico médio zonal dos modos anulares (pressão expressa em hPa, intervalo dos contornos é de 0,5 m/s); (b) Altura geopotencial na baixa troposfera (o intervalo dos contornos é de 10 m). O esquema refere-se à fase positiva do SAM. Fonte: Thompson e Wallace (2000).

Thompson e Wallace (2000) definiram o índice do SAM por meio da Análise de Componentes Principais de anomalias de altura geopotencial em 700 hPa ao sul de 20°S, uma vez que o SAM é o principal modo de variabilidade ao sul desta latitude. Valores positivos (negativos) do índice estão associados com anomalias negativas (positivas) de

altura geopotencial sobre a Antártica e anomalias positivas (negativas) sobre as latitudes médias. Para estes autores, o SAM caracteriza-se como a primeira Função Ortogonal Empírica (EOF – *Empirical Orthogonal Function*) e seu índice como a primeira componente principal da pressão extratropical ao nível do mar. Um índice positivo (negativo) indica uma intensificação (enfraquecimento) do escoamento circumpolar de oeste. Assim como Gong e Wang (1999), estes autores consideram que o SAM se caracteriza por anomalias de pressão de um sinal centrado na Antártica ou na região polar e anomalias de sinal oposto centradas em torno de 40° a 50°S.

Além de Thompson e Wallace (2000), outros autores definem o SAM como o modo dominante da circulação atmosférica extratropical do Hemisfério Sul (KIDSON, 1988; LIMPASUVAN; HARTMANN, 2000; FOGT; MARSHALL, 2020). Em função de se caracterizar por um padrão de variabilidade climática de escala hemisférica, influencia variáveis atmosféricas e indicadores climáticos no Hemisfério Sul, como oscilações de temperatura sobre a Antártica (KWOK; COMISO, 2002; SCHNEIDER; STEIG; COMISO, 2004), precipitação e temperatura nas latitudes médias do Hemisfério Sul (JONES; WIDMANN, 2003; GILLET; KELL; JONES, 2006) e variações na extensão do gelo marinho e circulação oceânica (HALL; VISBECK, 2002; LEFEBVRE et al. 2004). A variabilidade atmosférica associada com o SAM possui um impacto significativo na cobertura de gelo marinho ao redor do continente antártico e na circulação oceânica (LEFEBVRE et al. 2004; PEZZA; HASHID; SIMMONDS, 2012). Jones e Widmann (2004) também definem o SAM como o modo principal de circulação atmosférica extratropical do Hemisfério Sul além de representar flutuações na intensidade do vórtice circumpolar.

Segundo Thompson e Wallace (2000), a fase positiva do SAM está associada com um resfriamento sobre a maior parte do continente antártico. A Península Antártica representa a exceção, pois os intensos ventos de oeste associados com a fase positiva aumentam a advecção de ar oceânico relativamente quente sobre esta região provocando significativo aquecimento. Thompson e Solomon (2002) também relataram esta ocorrência, observando que os fortes ventos de oeste agem diminuindo a incidência de ar frio, proveniente das latitudes mais altas, sobre a Península Antártica e, assim, permitindo o aumento da advecção de ar quente oriundo do Oceano Austral. O resfriamento sobre os polos durante a fase positiva também é explicado pelo fato de o SAM estar acompanhado por movimentos verticais termicamente indiretos em altas latitudes.

O trabalho realizado por Gillett, Kell e Jones (2006) corrobora com estes resultados, pois ao estudarem temperatura e precipitação para identificar a influência do SAM em regiões continentais do Hemisfério Sul, descobriram que este padrão causa forte impacto na temperatura e na precipitação sobre determinadas áreas, sendo a fase positiva associada à um significativo resfriamento sobre a Antártica e Austrália e aquecimento sobre a Península Antártica, Argentina, Tasmânia e sul da Nova Zelândia. Esta fase também está relacionada a condições anormalmente secas sobre o sul da América do Sul, Nova Zelândia e Tasmânia devido a um deslocamento para o sul das trajetórias de tempestades e também condições anormalmente úmidas sobre a Austrália e a África do Sul. Rao, Carmo e Franchito (2003) ao examinarem como o SAM está relacionado à variabilidade interanual das trajetórias de tempestades no Hemisfério Sul, encontraram maior ocorrência das perturbações baroclínicas nas latitudes médias durante as fases positivas e uma redução nas fases negativas.

Carvalho, Jones e Ambrizzi (2005) relacionaram as fases positivas e negativas do SAM com a atividade tropical intrassazonal e interanual e com as fases do ENOS durante o verão austral. Este trabalho teve como foco o estudo da variabilidade diária do índice e em como ele pode ser modulado pela atividade nos trópicos. Estes autores, ao analisarem a variabilidade diária do SAM, observaram que, durante episódios El Niño (La Niña), há um predomínio de valores negativos (positivos) do SAM. Esta ocorrência também foi constatada por Gong, Feldstein e Luo (2010) que mostraram que este fato pode estar relacionado ao escoamento básico troposférico associado com El Niño (La Niña) e a consequente convergência/divergência de fluxo de momentum turbulento que guia a fase negativa (positiva) do SAM.

Estes mesmos autores mostram que os padrões de teleconexões em anomalias diárias de vento zonal em 200 hPa evidenciam duas feições zonalmente simétricas em aproximadamente 45° e 60°S, o que parece estarem relacionadas com os jatos subtropical e polar, respectivamente. Segundo estes autores, a intensificação (enfraquecimento) do jato subtropical de altos níveis e também o enfraquecimento (intensificação) do jato polar de altos níveis estão relacionados com as fases negativas (positivas) do SAM.

A importância das variações do SAM pode ser também observada nas propriedades dos ciclones extratropicais, como origem, pressões centrais e seu deslocamento em direção ao equador. Durante as fases negativas do SAM, os ciclones extratropicais tendem a se formarem e se moverem para latitudes mais baixas, assim como possuem pressões centrais mais altas quando comparados com a fase positiva. Ademais, ciclones extratropicais

formados relativamente próximos a Antártica durante fases negativas do SAM possuem pressões centrais mais altas do que aqueles que se desenvolvem mais afastados deste continente. Isto ocorre, provavelmente, em função da forte baroclinia próximo ao continente antártico. Estas relações entre o SAM e a instabilidade baroclínica e, conseqüentemente, a dinâmica extratropical a partir das propriedades dos ciclones extratropicais, são consistentes com o fato de o SAM ser um modo interno das médias para as altas latitudes.

Rosso et al. (2018) avaliaram o papel do SAM em eventos de ZCAS na América do Sul, analisando que frequência, persistência e precipitação total relacionada a ZCAS são maiores nas fases positivas do SAM do que nas fases negativas. Os autores constataram um mecanismo de teleconexão entre a região da ZCAS e a região extratropical na fase positiva do SAM por meio da intensificação dos jatos polar e subtropical nos dias que antecedem a formação da ZCAS. Entretanto, a mesma configuração não é observada na fase negativa da ZCAS, na qual as anomalias estão confinadas na região subtropical e são deslocadas para o Oceano Atlântico sul.

Fases distintas do SAM, com seus próprios padrões de circulação atmosférica, influenciam a latitude de formação dos ciclones extratropicais e seus deslocamentos máximos para o equador em função do deslocamento do jato subtropical em direção ao equador durante a fase negativa, o que favorece os ciclones a iniciarem e se dissiparem em latitudes mais baixas (CARVALHO; JONES; AMBRIZZI, 2005). O tempo na região subtropical e nas regiões polares é sistematicamente afetado pela propagação de ciclones extratropicais. O regime de precipitação sobre o sudeste da América do Sul, durante o verão, pode ser influenciado por estes sistemas assim como modulam a atividade da ZCAS sobre o Oceano Atlântico Subtropical (CARVALHO; JONES; LIEBMANN, 2004).

Vasconcellos e Cavalcanti (2010) realizaram um estudo relacionando o SAM com precipitação extrema sobre parte do sudeste do Brasil durante o verão do Hemisfério Sul. Estes autores observaram que a precipitação anômala positiva nesta área ocorre na região da ZCAS durante a fase positiva do SAM e quando o modo PSA exibe forte centro ciclônico em 120° W, próximo a Antártica. Por outro lado, precipitação anômala negativa ocorre ao sul da ZCAS. Ademais, concluíram a que precipitação intensa sobre o sudeste do Brasil ocorre na fase positiva do SAM, enquanto condições de seca na região ocorrem na fase negativa. Sugeriram, ainda, que o SAM intensifica o centro ciclônico na parte sudoeste da América do Sul, que é parte do trem de ondas tipo PSA, contribuindo para a intensificação da circulação anômala sobre o sudeste do Brasil. De acordo com Reboita, Ambrizzi e Rocha

(2009), parece que a ZCAS apresenta uma tendência de enfraquecimento durante o verão quando ocorrem fases negativas do SAM.

Vasconcellos, Pizzochero e Cavalcanti (2019) também encontraram anomalias positivas (negativas) de precipitação sobre grande parte da América do Sul durante a fase positiva (negativa) do SAM e uma configuração oposta no sul do Brasil, sendo que o extremo norte da América do Sul apresentou um sinal similar ao do sul do Brasil. Segundo Cavalcanti e Kousky (2009), a maior frequência de frentes frias sobre a maior parte da América do Sul ocorre durante a primavera e esses resultados são coerentes com Caldas et al. (2020) que apontaram maior frequência de frentes frias sobre o sudeste da América do Sul na combinação da fase negativa do SAM com o El Niño e com as extensões máximas de gelo marinho no setor MW.

### **3.2. Variabilidade da TSM do Atlântico: os padrões AMM e GSA**

Com relação à variabilidade térmica dos oceanos, alguns modos, também chamados de dipolos ou gradientes de anomalias de TSM, são responsáveis por anomalias climáticas, em áreas do Caribe, da África e da América do Sul (NOBRE; SHUKLA, 1996). Entre esses modos de variabilidade destaca-se o gradiente meridional de anomalias de TSM, também chamado de modo ou dipolo meridional de anomalias de TSM, que se caracteriza, em geral, por dipolo de anomalias de TSM entre as áreas norte e sul do Atlântico Tropical. Existe também o modo zonal ou gradiente equatorial de anomalias de TSM que se manifesta como anomalias de TSM na faixa equatorial do Oceano Atlântico, entre os seus setores leste e oeste, e o modo subtropical de anomalias de TSM, sendo que este também pode ser denominado de Dipolo do Atlântico Sul.

São conhecidos, na literatura, alguns modos distintos de variabilidade da TSM sobre o Oceano Atlântico Tropical (XIE; CARTON, 2004). Um deles refere-se ao Modo Zonal do Atlântico (AZM - *Atlantic Zonal Mode*), que se apresenta mais intenso durante o verão setentrional (PHILANDER, 1986; XIE; CARTON, 2004). Outro modo de variabilidade é conhecido como AMM, caracterizado por um gradiente inter-hemisférico de TSM, quando em sua fase positiva a TSM apresenta anomalias negativas no Atlântico Tropical Sul (SERVAIN, 1991). De acordo com Assis et al. (2019), dentre estes modos de variabilidade, destaca-se também o modo subtropical de anomalias de TSM, sendo que este também pode ser denominado de Dipolo do Atlântico Sul, como mencionado no parágrafo anterior.

Alguns autores, por meio de estudos observacionais e simulações numéricas, evidenciaram que o padrão AMM surge como um fenômeno oceânico-atmosférico representativo de uma mudança anômala na TSM do Atlântico e comumente o denominam de padrão de Dipolo do Atlântico. Além disso, reportaram evidências de que este padrão é o modo de variabilidade oceânico-atmosférico de grande escala mais importante sobre a bacia do Atlântico durante os meses do outono austral (HASTENRATH; HELLER, 1977; MOURA; SHUKLA, 1981; SERVAIN, 1991; WARD; FOLLAND, 1991; NOBRE, 1993; SOUZA, 1997; UVO et al. 1998).

Segundo Souza e Nobre (1998), em ambas as fases do AMM são evidenciados os acoplamentos entre os campos de TSM, pressão ao nível do mar e vento, de maneira que o aquecimento acima do normal das águas oceânicas superficiais em ambos os hemisférios está associado à presença de pressão ao nível do mar mais baixa do que o normal e ao enfraquecimento relativo dos centros de alta pressão (altas subtropicais). Sendo o AMM caracterizado por um gradiente inter-hemisférico de TSM, durante a sua fase positiva (negativa) a TSM apresenta uma anomalia positiva (negativa) no Atlântico Tropical Norte e uma anomalia negativa (positiva) no Atlântico Tropical Sul (SERVAIN, 1991). Em outras palavras, durante a fase negativa do AMM, o Atlântico Tropical Norte apresenta anomalias negativas de TSM (abaixo da média), as quais estão relacionadas a anomalias positivas de pressão ao nível do mar (acima da média) e consequente fortalecimento da Alta Subtropical do Atlântico Norte, o que intensifica os alísios de nordeste. No Atlântico Sul, durante a fase negativa do AMM, ocorrem anomalias positivas de TSM (acima da média), anomalias negativas de pressão ao nível do mar e consequente enfraquecimento do Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul e dos alísios de sudeste. Na fase positiva do AMM, essas configurações são inversas (BITTENCOURT, 2016).

Estudos de modelagem atribuíram ao mecanismo de *feedback* vento-evaporação-TSM (WES – *Wind evaporation sea surface temperature*) a governabilidade da evolução do AMM ao longo da bacia do Oceano Atlântico (CHANG; JI; LI, 1997). Ainda, de acordo com Amaya et al. (2017), a variabilidade interanual do sistema acoplado oceano-atmosfera no Atlântico Tropical é mais fortemente influenciada por dois modos ou padrões de variabilidade climática: o Niño Atlântico (ZEBIAK, 1993) e o próprio AMM (CHIANG; VIMONT, 2004).

Algumas hipóteses foram propostas para explicar a gênese da dinâmica do AMM. Nobre e Shukla (1996) sugeriram, inicialmente, a ocorrência de um mecanismo externo no

qual as variações dos ventos alísios no Atlântico Tropical Norte forçam as anomalias de TSM através de anomalias de fluxo de calor latente em superfície. Como dito, um segundo mecanismo de gênese da dinâmica do AMM foi destacado por Chang, Ji e Li (1997) e implica no mecanismo de *feedback* WES, sendo considerado o principal mecanismo de gênese e desenvolvimento deste padrão de variabilidade.

Os padrões de anomalias de TSM característicos do AMM geram a manifestação de um gradiente meridional inter-hemisférico de temperatura nos baixos níveis da troposfera sobre o Oceano Atlântico Tropical (WAGNER, 1996). O gradiente térmico, juntamente com os padrões anômalos de vento e de pressão ao nível do mar, influencia a intensidade e a migração latitudinal da ZCIT sobre o Atlântico Tropical (NOBRE; SHUKLA, 1996), influenciando o clima e a distribuição espacial e temporal da precipitação de algumas áreas continentais adjacentes, tais como o Sahel e de Gana, na África (ANKOMAH; CORDERY, 1994), o norte da Amazônia e o nordeste do Brasil na América do Sul (MOURA; SHUKLA, 1981; NOBRE, 1993; NOBRE; SHUKLA, 1996; SOUZA, 1997).

O tempo e o clima na América do Sul são fortemente influenciados pela variabilidade da TSM no Atlântico Tropical e Subtropical, uma vez que a TSM está diretamente associada às trocas de energia e massa entre o oceano e a atmosfera. De acordo com Seager et al. (2010), um melhor entendimento sobre a variabilidade da TSM é fundamental, uma vez que esta variável exerce grande influência sobre diversas regiões da América do Sul, modulando, principalmente, o regime de precipitação.

Mudanças na intensidade dos ventos alísios surgem como uma das principais forçantes de alterações térmicas da superfície do Atlântico Tropical, o que gera padrões anômalos de TSM (NOBRE; SHUKLA, 1996). Estes autores mostraram que, no Atlântico Tropical, uma TSM mais fria está relacionada com ventos alísios mais intensos, enquanto uma TSM mais quente associa-se com ventos alísios mais fracos. Neste sentido, a componente meridional do vento parece ser a responsável pelos gradientes meridionais anômalos de TSM sobre o Atlântico Tropical.

Em baixos níveis da atmosfera, sobre o Atlântico Tropical, o sistema de ventos globais representado pelos alísios de nordeste, no Hemisfério Norte, e pelos alísios de sudeste, no Hemisfério Sul, é gerado devido à diferença de pressão entre as altas pressões de Açores e de Santa Helena e as baixas pressões equatoriais, de origem térmica, resultante da elevada incidência de radiação solar sobre a superfície terrestre. A convergência dos alísios de



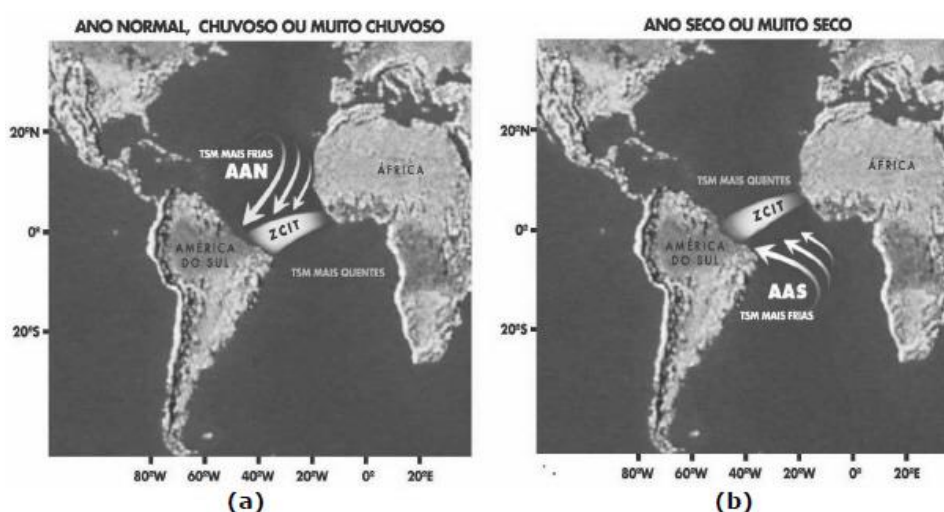
nordeste e de sudeste é responsável por marcar o posicionamento sazonal da ZCIT, que sofre uma variação latitudinal em seu posicionamento ao longo do ano em função de mudanças na intensidade dos alísios. Tal deslocamento sazonal da ZCIT é extremamente responsável por gerar precipitação na região do Atlântico Tropical e no nordeste do Brasil sendo que variações de seu posicionamento se associam com a variabilidade da TSM sobre o Atlântico Tropical (HASTENRATH, 2006).

Hounsou-Gbo (2015) analisou a dinâmica do Atlântico Tropical e seus impactos sobre o clima ao longo da costa do nordeste do Brasil utilizando índices como o AMM. Foi observado que, durante a fase negativa do AMM, ocorre intensificação dos alísios de nordeste e aumento de precipitação no norte do nordeste do Brasil. Hounsou-Gbo (2015) observou que quando a ZCIT é anormalmente deslocada para sul alguns meses antes da estação chuvosa (março-abril) no norte do nordeste do Brasil, a fase negativa do AMM aumenta a precipitação durante a estação chuvosa, uma vez que durante a fase negativa do AMM ocorre fortalecimento dos alísios de nordeste, relaxamento dos alísios de sudeste, maior evaporação no Hemisfério Norte, menor evaporação no Hemisfério Sul, TSM mais fria no Hemisfério Norte e TSM mais quente no Hemisfério Sul. O efeito oposto ocorre na fase positiva do AMM.

Os padrões de comportamento atmosférico e oceânico médios nos anos de AMM que contribuem para a ocorrência de anos normais, chuvosos ou muito chuvosos ou anos secos ou muito secos no norte do nordeste do Brasil foram investigados por Ferreira e Mello (2005) e podem ser visualizados na **Figura 7**. Na imagem representada pela **Figura 7a** é observada a fase negativa do AMM e, na imagem representada pela **Figura 7b**, é observada a fase positiva do referido índice. A área marcada na **Figura 7a** indica a posição da ZCIT e o "AAN" ou Alta Subtropical do Atlântico Norte. As setas indicam a intensificação dos ventos alísios de nordeste. Quando as águas do Atlântico Tropical Norte estão mais frias do que o normal, o Alta Subtropical do Atlântico Norte e os ventos alísios de nordeste intensificam-se. Se neste mesmo período o Atlântico Tropical Sul estiver mais quente do que o normal, o "AAS" ou Alta Subtropical do Atlântico Sul e os ventos alísios de sudeste enfraquecem. Este padrão favorece o deslocamento da ZCIT para posições mais ao sul do equador propiciando a ocorrência de anos normais, chuvosos ou muito chuvosos para o setor norte do nordeste do Brasil.

Na **Figura 7b**, a área marcada indica a posição da ZCIT e o "AAS" ou Alta Subtropical do Atlântico Sul. As setas indicam a intensificação dos ventos alísios de sudeste. Quando as

águas do Atlântico Tropical Sul estão mais frias que o normal, a Alta Subtropical do Atlântico Sul e os ventos alísios de sudeste intensificam-se. Se neste mesmo período as águas no Atlântico Tropical Norte estiverem mais quentes que o normal, a Alta Subtropical do Atlântico Norte e os ventos alísios de nordeste enfraquecem. Este padrão favorece o deslocamento da ZCIT para posições mais ao norte da linha do equador favorecendo a ocorrência de anos secos ou muitos secos para o setor norte do nordeste do Brasil (FERREIRA; MELLO, 2005).



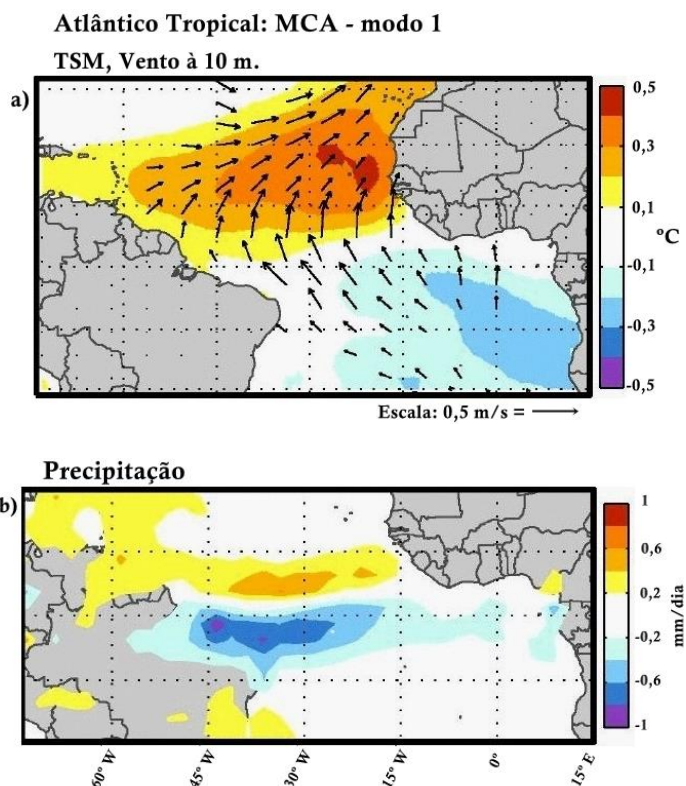
**Figura 7** – Esquema simplificado dos padrões oceânicos e atmosféricos associados às distintas fases do AMM. A sigla AAN corresponde a Alta Subtropical do Atlântico Norte e a sigla AAS refere-se à Alta Subtropical do Atlântico Sul. Fonte: Adaptado de Ferreira e Mello (2005).

Bittencourt (2016) investigou a influência do AMM na circulação oceânica do Atlântico Tropical para anos extremos de chuva e seca no norte do nordeste do Brasil e observou que nos anos extremos de seca (chuva) as anomalias positivas (negativas) de temperatura prevalecem na costa leste do nordeste do Brasil. Alguns autores (e.g. SARAVANAN; CHANG, 2000) estudaram as relações do AMM com o ENOS mostrando que fases positivas do ENOS no Pacífico coincidem geralmente com eventos da fase positiva do AMM. A fase positiva do ENOS, observada no Pacífico Equatorial durante o inverno boreal, cria perturbações na circulação atmosférica no Hemisfério Norte. Segundo estes autores, o El Niño interfere na intensidade dos alísios de nordeste que, através do mecanismo de variação de fluxo oceano-atmosfera, gera influência sobre a TSM.

Estudos prévios apontam uma conexão climática entre o ENOS, a NAO e o AMM (e.g. KUSHNIR et al. 2006). A fase positiva (negativa) da NAO corresponde a uma anomalia negativa (positiva) de pressão na Islândia e uma anomalia positiva (negativa) de pressão em Lisboa e no anticiclone dos Açores. A combinação do El Niño com a fase negativa da NAO

pode apresentar uma grande influência sobre o anticiclone dos Açores e sobre o regime dos alísios, o que contribui para a ocorrência de uma fase positiva forte do AMM. Uma fase positiva (negativa) da NAO, que corresponde a um reforço da circulação atmosférica nas latitudes médias do Atlântico Tropical Norte, é geralmente associada a uma evolução negativa (positiva) do AMM.

A estrutura espacial do modo principal da Análise de Covariância Máxima (MCA – *Maximum Covariance Analysis*) ou MCA-1 de TSM e vento a 10 m no Atlântico Tropical é retratada por mapas de regressão de TSM e ventos para os coeficientes de expansão de TSM normalizada para o Oceano Atlântico (**Figura 8a**). Uma regressão simultânea em um conjunto de dados de precipitação para o período 1979-2001 conforme abordado por Xie e Arkin (1997) mostra uma precipitação anômala consistente com o deslocamento anômalo da ZCIT na direção norte (**Figura 8b**).



**Figura 8** – Propriedades espaciais do modo principal do MCA-1 de TSM e vento a 10 m no Oceano Atlântico Tropical. **(a)** Mapas de regressão dos coeficientes de expansão normalizada do modo principal do MCA sobre a TSM (°C) e vetores de vento a 10 m. Vetores de vento são plotados onde a soma geométrica de seus coeficientes de correlação excedem 0,27% (95% do nível de confiança). **(b)** Mesmas informações do primeiro mapa, porém para a variável precipitação (mm/dia). As regiões sombreadas excedem o nível de confiança de 95%. Fonte: Adaptado de Chiang e Vimont (2004).

O fenômeno El Niño, por exemplo, dependendo da intensidade e período do ano em que ocorre, é um dos responsáveis por anos considerados secos ou muito secos no nordeste do Brasil, principalmente quando acontece conjuntamente com o dipolo positivo do Atlântico ou fase positiva do AMM (Dipolo do Atlântico, definida pela diferença entre a anomalia da TSM na bacia do Atlântico Tropical Norte e do Atlântico Tropical Sul), que é desfavorável às chuvas e contribui para anos mais secos no nordeste do Brasil. O fenômeno La Niña, associado ao dipolo negativo do Atlântico ou fase negativa do AMM (favorável às chuvas), é normalmente responsável por anos considerados normais, chuvosos ou muito chuvosos na referida região. Por fim, quando as águas do Pacífico estão em condições normais e o dipolo do Atlântico está negativo (positivo), a probabilidade de se ter um ano normal ou chuvoso (seco) também é alta (FERREIRA; MELLO, 2005).

A respeito da relação do ENOS com o clima do nordeste do Brasil, Kayano e Andreoli (2009) relatam que as condições secas sobre esta região em anos de ocorrência de El Niño são explicadas pela componente leste-oeste do ENOS. Alguns autores consideram que a relação entre o ENOS e o clima do nordeste do Brasil não se processa de maneira direta, mas através do Atlântico Tropical. Saravanan e Chang (2000) propuseram que as teleconexões do ENOS têm um papel importante na variabilidade climática do Atlântico Tropical que, por sua vez, afeta o clima desta região.

Em um trabalho complementar, Andreoli e Kayano (2007) compararam os casos de ENOS e padrões de gradientes inter-hemisféricos. Nos casos de eventos El Niño (La Niña) sem um gradiente inter-hemisférico no Atlântico Tropical há uma tendência de aumento (diminuição) de precipitação no norte do nordeste do Brasil. Por outro lado, El Niño e gradiente inter-hemisférico positivo (negativo) ocorrendo simultaneamente, aumentam (diminuem) as anomalias negativas de precipitação nesta região em março-abril-maio.

Estudos já realizados indicam que a variabilidade da TSM no Atlântico Subtropical contribui na regulação da sazonalidade e intensidade da precipitação sobre regiões da América do Sul (DIAZ; STUDZINSKI; MECHOSO, 1998; DOYLE; BARROS, 2002). Segundo Chaves (2011), comparativamente ao norte do nordeste do Brasil, um número inferior de trabalhos tem avaliado a influência das anomalias de TSM do Atlântico sobre a convecção de verão em outras regiões da América do Sul. Esta estação do ano representa o período chuvoso principal na maior parte da América do Sul (RAO; HADA, 1990) e corresponde também à fase de desenvolvimento e amadurecimento do sistema de monção sobre as regiões tropical e subtropical do continente (ZHOU; LAU, 1998).

Chaves e Nobre (2004) mostraram que a ZCAS causa o aparecimento de anomalias negativas de TSM ou a diminuição das anomalias positivas de TSM no Atlântico Sul sob este sistema de monção. Chaves (2006) apontou que a influência da TSM do Atlântico Norte sobre a convecção da América do Sul é significativa apenas na costa norte da América do Sul no período de dezembro-janeiro-fevereiro. Assim, a TSM sobre o Atlântico Norte tem pouca influência na previsibilidade da convecção sobre maior parte da América do Sul nos meses da estação de verão.

Natori (2003) investigou a relação entre a TSM do Atlântico e a precipitação no sudeste da América do Sul utilizando análise de correlação simples e análise de correlação canônica. A autora considerou que os modos que mais explicam a variância de precipitação e TSM são, geralmente, conectados aos eventos ENOS. Ademais, há uma significativa sazonalidade na relação TSM-precipitação, pois as anomalias de precipitação no verão em modos associados com o ENOS são muito distintas e até opostas às anomalias na primavera para o mesmo modo. Embora, aparentemente, as anomalias de TSM no Atlântico serem geralmente forçadas a partir da atmosfera por anomalias produzidas a partir do Pacífico, o Oceano Atlântico pode contribuir individualmente para as anomalias de precipitação, especialmente nos meses de verão.

Chaves (2011) buscou identificar como os principais padrões de anomalias de TSM do Atlântico Sul estão associados à convecção de verão da América do Sul e áreas adjacentes através de métodos estatísticos como Análise de Componentes Principais e Decomposição de Valores Singulares. A Análise de Componentes Principais mostrou que o primeiro modo das anomalias de TSM do Atlântico Sul apresenta predomínio de variabilidade interanual e associa-se com a convecção sobre o sul do nordeste do Brasil, o segundo modo associa-se com flutuações de escala interdecadal e o terceiro modo também apresenta, assim como o primeiro, variabilidade interanual e está associado ao ENOS.

As análises realizadas pela autora através de Decomposição de Valores Singulares e de compostos mostraram que a convecção sobre a porção oceânica da ZCAS e nas latitudes subtropicais da América do Sul está associada com anomalias positivas de TSM sobre o Atlântico Tropical Sul e com o enfraquecimento dos alísios de sudeste. Já para o segundo modo acoplado, os resultados da análise de Decomposição de Valores Singulares e de compostos, mostraram que a convecção sobre o sul do nordeste do Brasil e norte do sudeste do Brasil está associada com o resfriamento (aquecimento) da porção noroeste (sudeste) do Atlântico Tropical Sul. Nestas condições, observa-se escoamento anômalo da Amazônia em

direção ao sul do nordeste do Brasil. Nas regiões norte e sudeste da América do Sul, a convecção está associada com o aquecimento (resfriamento) da porção oeste e noroeste (sudeste) do Atlântico Tropical Sul. Os resultados encontrados por Chaves (2011) estão condizentes com os estudos de Diaz, Studzinski e Mechoso (1998) e Doyle e Barros (2002).

Jorgetti, Silva Dias e Freitas (2014), sobre a relação entre a TSM do Atlântico Sul e o posicionamento e intensidade da ZCAS, mostraram que a variabilidade acoplada entre a ZCAS e o Atlântico Sul indica que em casos de ZCAS posicionadas ao norte (sobre o sudeste do Brasil) anomalias de oeste são verificadas na circulação tropical continental de baixos níveis, consistente com a fase ativa do Sistema de Monção da América do Sul. Nestes casos, as anomalias frias no Oceano Atlântico Subtropical causam um aumento no gradiente de temperatura continente-oceano, favorecendo um fluxo de leste nesta região e bloqueando a ZCAS em sua posição a norte.

De acordo com Wainer et al. (2014), índices climáticos baseados em TSM podem sintetizar informações relacionadas a processos físicos que descrevem mudanças e variabilidade na precipitação contribuindo para enchentes ou secas. O índice do Dipolo Subtropical do Atlântico Sul, baseado na TSM no Atlântico Sul, representa o padrão dominante de variabilidade de TSM nesta região do Atlântico Sul e é modulado por mudanças na posição e intensidade da Alta Subtropical do Atlântico Sul (Wainer et al. 2014).

A formação do Dipolo Subtropical do Atlântico Sul está relacionada com anomalias de pressão e ventos. De acordo com Sterl e Hazeleger (2003), as anomalias de pressão ao nível do mar na configuração de um polo centrado em 15°W e 45°S estão relacionadas com as anomalias de TSM, uma vez que os ventos anômalos associados ao polo de pressão ao nível do mar são responsáveis pela geração do padrão de anomalias de TSM através de anomalias de fluxo de calor latente e mudanças na espessura da camada de mistura (MORIOKA; TOZUKA; YAMAGATA, 2011).

## CAPÍTULO 4 - MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo dedica-se à apresentação do conjunto de dados utilizados na pesquisa bem como à descrição dos métodos de análise empregados para obtenção dos resultados e alcance dos objetivos. Esta pesquisa utilizou o seguinte conjunto de dados mensais obtidos e calculados:

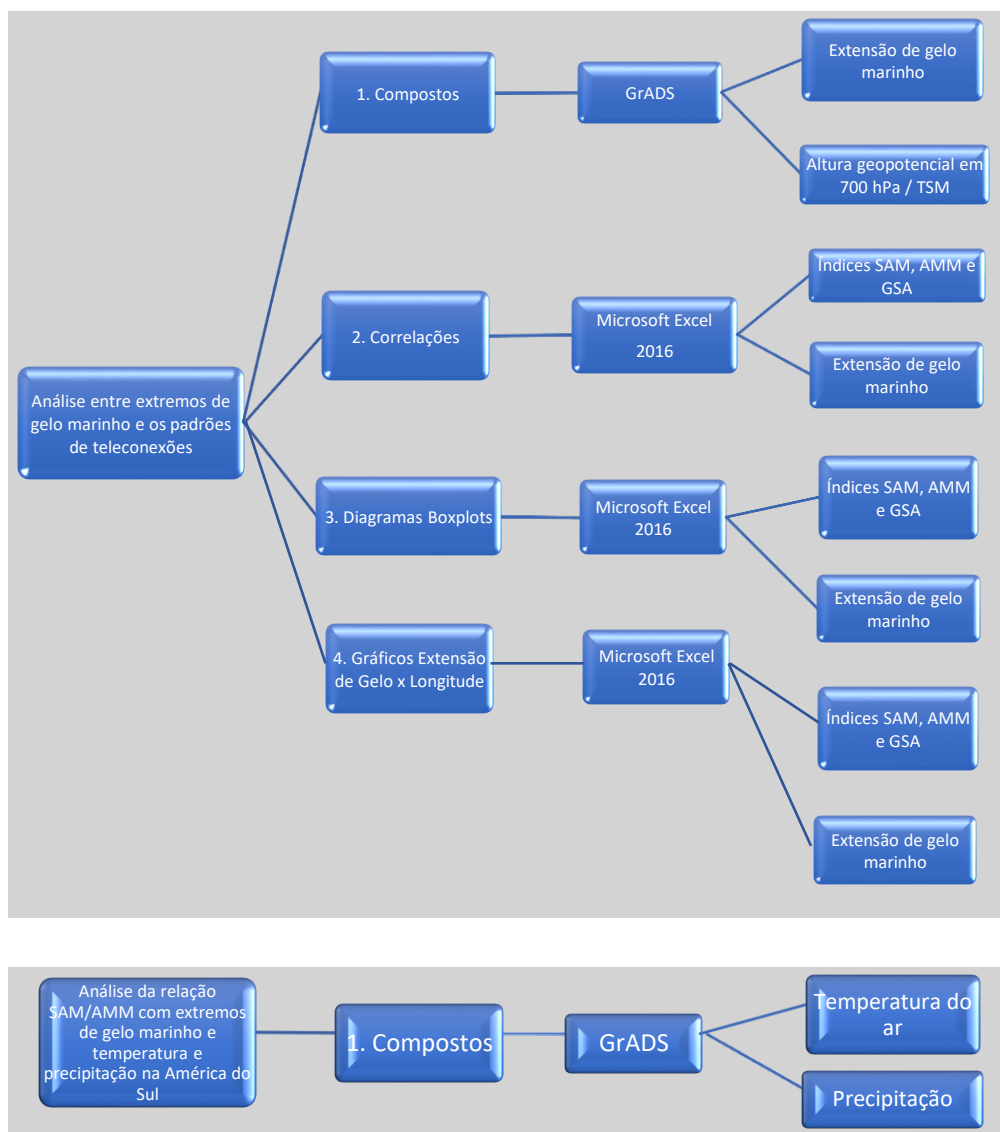
- 1) TSM (<https://psl.noaa.gov/data/gridded/data.noaa.ersst.v5.html>);
- 2) Temperatura do Ar à 2 m para a América do Sul e de Altura Geopotencial em 700 hPa (Reanálises) (<https://www.ecmwf.int/en/forecasts/dataset/ecmwf-reanalysis-v5>);
- 3) Precipitação para a América do Sul (<https://psl.noaa.gov/data/gridded/data.gpcp.html>);
- 4) Índice SAM ([https://psl.noaa.gov/data/20thC\\_Rean/timeseries/monthly/SAM/](https://psl.noaa.gov/data/20thC_Rean/timeseries/monthly/SAM/));
- 5) Índice AMM (<https://psl.noaa.gov/data/timeseries/monthly/AMM/>);
- 6) Índice GSA (criado para esta pesquisa com a utilização dos dados de TSM);
- 7) Concentração e Extensão de Gelo Marinho Antártico (<https://nsidc.org/data/NSIDC-0079/versions/3>).

Foi definida para esta tese a escolha de um índice extratropical, o SAM, atmosférico, pela mais próxima relação com a variabilidade do gelo marinho antártico, característica observada através de pesquisa na literatura científica. Os outros dois índices, AMM e GSA, representam padrões de variabilidade oceânica-atmosférica e estão relacionados ao Atlântico Tropical e Subtropical, respectivamente. Foram escolhidos com o objetivo de buscar inovação e ineditismo nesta tese, uma vez que outros padrões de variabilidade, como o ENOS, já foram bastante explorados em pesquisas científicas, inclusive em análises combinadas com o próprio SAM (**Tabela 1**).

**Tabela 1** – Padrões/índices usados nesta pesquisa, o padrão de variabilidade e a ocorrência/localização.

<b>Padrão/Índice</b>	<b>Tipo/Variabilidade</b>	<b>Ocorrência/Localização</b>
<b>SAM</b>	Atmosférico	Extratropical
<b>AMM</b>	Oceânico-atmosférico	Tropical
<b>GSA</b>	Oceânico-atmosférico	Subtropical

O período de análise para todos os dados foi de 38 anos, compreendidos entre janeiro de 1981 e dezembro de 2018. Os produtos gerados envolvem tabelas, gráficos de correlações, diagramas *boxplots* e mapas de compostos, sendo usados os seguintes *softwares*: MatLab (*Matrix Laboratory*) versão R2016a; Microsoft Excel 2016; *GrADS* (*Grid Analysis and Display System*). Do conjunto de dados utilizados, os que foram tratados e manipulados, foram os seguintes: série do índice SAM, dados de extensão de gelo marinho e série do índice GSA, que foi criada especificamente para uso nesta pesquisa de doutorado. Assim sendo, os outros dados foram obtidos praticamente prontos na fonte. Na **Figura 9** é apresentado um fluxograma que sintetiza as etapas metodológicas da pesquisa contendo os dados, seus tratamentos e os produtos gerados.



**Figura 9** – Fluxograma exemplificando as etapas de pesquisa com os itens dos resultados, dados e ferramentas utilizadas e produtos/resultados gerados.



## **4.1. Conjunto de Dados**

### **4.1.1. Temperatura da Superfície do Mar**

O *Extended Reconstructed Sea Surface Temperature version 5* (ERSSTv5) do NOAA é um conjunto de dados mensais globais de TSM, derivado do *International Comprehensive Ocean–Atmosphere Dataset* (ICOADS). A resolução do ERSSTv5 é de  $2^\circ \times 2^\circ$ , com completude espacial melhorada usando métodos estatísticos. Os dados começam em janeiro de 1854 continuando até o presente e incluem anomalias calculadas em relação a uma climatologia mensal de 1971 a 2000. A versão mais recente do ERSST, versão 5, utiliza novos conjuntos de dados de TSM do ICOADS *Release 3.0*; TSM dos flutuadores Argo acima de 5 m e concentração de gelo do *Hadley Center Ice-SST* versão 2 (HadISST2). O ERSSTv5 melhorou a variabilidade espacial e temporal da TSM reduzindo a filtragem espacial no treinamento da reconstrução de funções de Teleconexões Ortogonais Empíricas (EOTs), removendo o amortecimento de alta latitude em EOTs e adicionando mais 10 EOTs Ártico. O ERSSTv5 melhorou a TSM absoluta ao mudar a temperatura do ar marinho noturna como referência para a boia-TSM, como referência na correção do viés de TSM medida em navios. Maiores detalhes podem ser encontrados em Huang et al. (2017). Para esta pesquisa, foram calculadas as anomalias de TSM para os meses de fevereiro e setembro tendo como parâmetro a climatologia mensal de 30 anos dos meses de fevereiro e setembro para o período de 1981 a 2010.

### **4.1.2. Temperatura do Ar à 2 m e Altura Geopotencial em 700 hPa**

Foram utilizadas as saídas mensais das Reanálises do *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF) da *European Reanalysis Agency* (ERA), denominado ERA-Interim (DEE et al. 2011). As variáveis utilizadas são: temperatura do ar média mensal à 2 m e altura geopotencial em 700 hPa. O espaçamento horizontal será de latitude x longitude =  $(1,5^\circ \times 1,5^\circ)$ .

A reanálise é o processo pelo qual os dados observados são assimilados em um modelo numérico para a obtenção de uma interpolação física em uma grade regular a ser utilizada para estudos que exijam o cálculo de diferentes parâmetros, em especial o cálculo de derivadas temporais e espaciais. Diferentemente da interpolação matemática, a interpolação física leva em consideração a topografia, a cobertura vegetal e a evolução temporal dos processos como turbulência, radiação solar, convecção e os processos associados de dinâmica de fluidos (BARRY; CARLETON, 2001). Nesta pesquisa, foram

calculadas as anomalias de TMM a 2 m e as anomalias de altura geopotencial em 700 hPa levando em consideração a climatologia mensal de 30 anos compreendida no período de 1981 a 2010.

#### **4.1.3. Precipitação**

A série temporal de precipitação é composta por dados mensais obtidos junto ao *Global Precipitation Climatology Project (GPCP)* analisados em pontos de grade e empregados com uma resolução espacial de latitude x longitude =  $(2,5^\circ \times 2,5^\circ)$ . Esta série contém um conjunto de dados de precipitação adquiridos por meio de observações em superfície e de precipitação estimada através de canais de micro-ondas oriundos de satélites em órbita baixa e de canais infravermelhos provenientes de satélites em órbita geostacionária. Maiores informações e detalhes sobre a metodologia utilizada pelo *GPCP* podem ser encontrados em Adler et al. (2003).

#### **4.1.4. Índice SAM**

O índice SAM utilizado nesta pesquisa é calculado usando a primeira Função Ortogonal Empírica (EOF - *Empirical Orthogonal Function*) de anomalias de altura geopotencial em 700 hPa entre  $30^\circ$  e  $90^\circ$  S. Esse índice é uma adaptação do índice do *Climate Prediction Center/National Oceanic and Atmospheric Administration (CPC/NOAA)* (que utiliza as coordenadas de  $20^\circ$ S a  $90^\circ$ S) e segue a metodologia de Vasconcellos, Pizzochero e Cavalcanti (2019). Essa adaptação teve como objetivo reduzir a influência de fenômenos da região tropical, como exemplo o ENOS e o AMM, no cálculo do EOF. Os valores positivos (negativos) do índice associam-se a anomalias positivas (negativas) de altura geopotencial nas latitudes médias e anomalias negativas (positivas) em altas latitudes.

#### **4.1.5. Índice AMM**

Este modo tropical, que descreve a variabilidade ou o gradiente meridional da TSM no Oceano Atlântico Tropical e seu padrão espacial, é definido por meio da aplicação de MCA para a TSM e para as componentes meridional e zonal do campo de vento a 10 m para o período que se iniciou em 1948, utilizando as saídas da Reanálise do *National Centers for Environmental Prediction/National Center for Atmospheric Research (NCEP/NCAR)*.

Com relação ao padrão espacial, os dados são definidos sobre a região (21°S a 32°N; 74°W a 15°E) e suavizados espacialmente (três pontos de longitude por dois pontos de latitude). O ciclo sazonal e a tendência são removidos, uma média móvel de três meses é aplicada aos dados e o ajuste linear para o Índice da Língua Fria (CTI – *Cold Tongue Index*), uma medida de variabilidade do ENOS, é subtraído de cada ponto espacial.

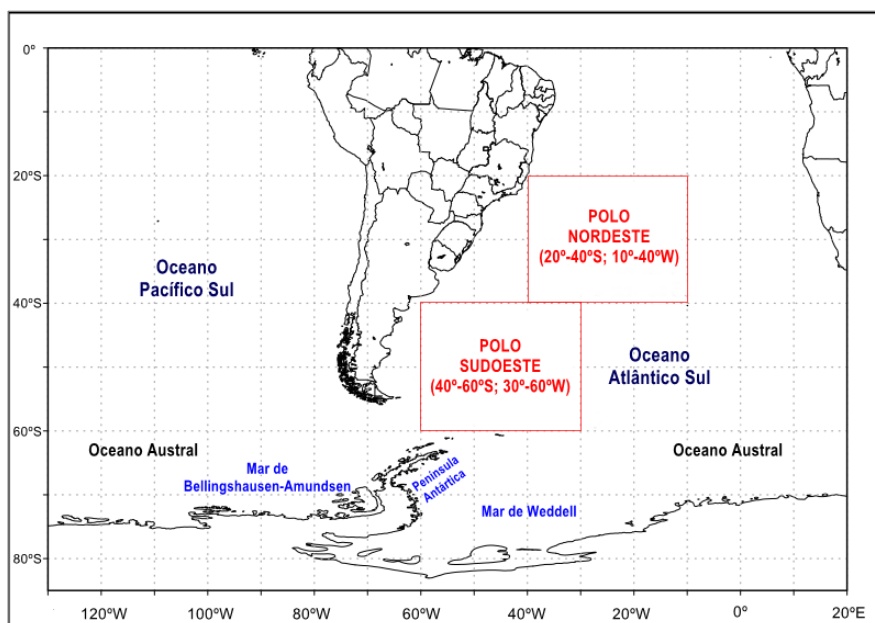
A série temporal do AMM foi calculada através da projeção da TSM ou do campo de vento a 10 m na estrutura espacial resultante do MCA. Sendo assim, a série temporal resultante foi referida como série temporal do índice AMM na análise desta pesquisa. Os dados são mensais e estão disponíveis desde janeiro de 1948 na seguinte página da web: (<http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/timeseries/monthly/AMM/>).

Estudos prévios empregaram análises através do MCA para encontrar modos de variabilidade acoplados entre TSM e ventos de superfície em regiões climaticamente equivalentes nas bacias do Atlântico e do Pacífico (CHIANG; VIMONT, 2004). Neste contexto, o MCA foi aplicado para extrair o índice AMM (e. g., CHANG; JI; LI, 1997).

#### **4.1.6. Índice GSA**

Para este trabalho, foi criado um índice mensal similar ao Dipolo Subtropical do Atlântico Sul (DSAS) (Oliva et al. 2021), porém com foco para o Atlântico subtropical, e que foi denominado de Gradiente Subtropical do Atlântico (GSA).

A série temporal mensal do índice GSA foi construída com o uso dos dados de TSM do ERSSTv5 do NOAA. Este índice foi gerado pelo cálculo da diferença das anomalias de TSM médias em duas distintas áreas situadas no Oceano Atlântico Subtropical. Nesta pesquisa, as duas áreas foram definidas e delimitadas como (**Figura 10**): polo nordeste (20°S a 40°S; 10°W a 40°W) e polo sudoeste (40°S a 60°S; 30°W a 60°W). Para o cálculo das anomalias, utilizou-se como referência a média climatológica do período 1981-2010.



**Figura 10** – Delimitação dos dois polos/áreas que definem o índice GSA.

#### 4.1.7. Concentração e Extensão de Gelo Marinho Antártico

As séries temporais de extensão de gelo marinho antártico foram calculadas a partir dos dados de concentração de gelo marinho, extraídas do banco de dados e imagens do *National Snow and Ice Data Center* (NSIDC), disponíveis desde 01 de novembro de 1978. Foram usados os dados *Bootstrap Sea Ice Concentrations from Nimbus-7 SMMR and DMSP SSM/I-SSM/I S, Version 3* com cobertura temporal de 01/11/1978 até 31/12/2018, disponível em formato binário e com resolução temporal de até um dia. Entre 01/01/1979 e 08/07/1987 a resolução temporal dos dados é de dois dias. Há uma falha de cerca de seis semanas entre 03/12/1987 e 12/01/1988, não tendo sido possível obter os dados dos meses de dezembro de 1987 e janeiro de 1988. Esta lacuna foi preenchida através da média climatológica para cada respectivo mês considerando o período de 30 anos entre 1981-2010. Maiores informações disponíveis em Comiso (2017).

O conjunto de dados de concentração de gelo marinho foi derivado a partir de estimativas de satélites utilizando mensurações do Radiômetro de Micro-ondas de Multicanais de Varredura (*Scanning Multichannel Microwave Radiometer - SMMR*) acoplado ao satélite Nimbus-7 e do Sensor Especial de Micro-ondas/Imageador (*Special Sensor Microwave/Imager - SSM/I*) acoplado aos satélites F8, F11 e F13 do Programa de Satélite Meteorológico de Defesa (*Defense Meteorological Satellite Program's - DMSP*). Mensurações provenientes do Sensor Especial de Micro-ondas Imageador/Sonda (*Special*

*Sensor Microwave Imager/Sounder - SSMIS*) acoplado ao DMSP - F17 também foram incluídas. O período dos satélites envolvidos nesta missão foram os seguintes:

- 01/11/1978 – 31/07/1987 (SMMR Nimbus-7)
- 01/08/1987 – 17/12/1991 (SSM/I DMSP-F8)
- 18/12/1991 – 09/05/1995 (SSM/I DMSP-F11)
- 10/05/1995 – 31/12/2007 (SSM/I DMSP-F13)
- 01/01/2008 – 31/12/2018 (SSMIS DMSP-F17)

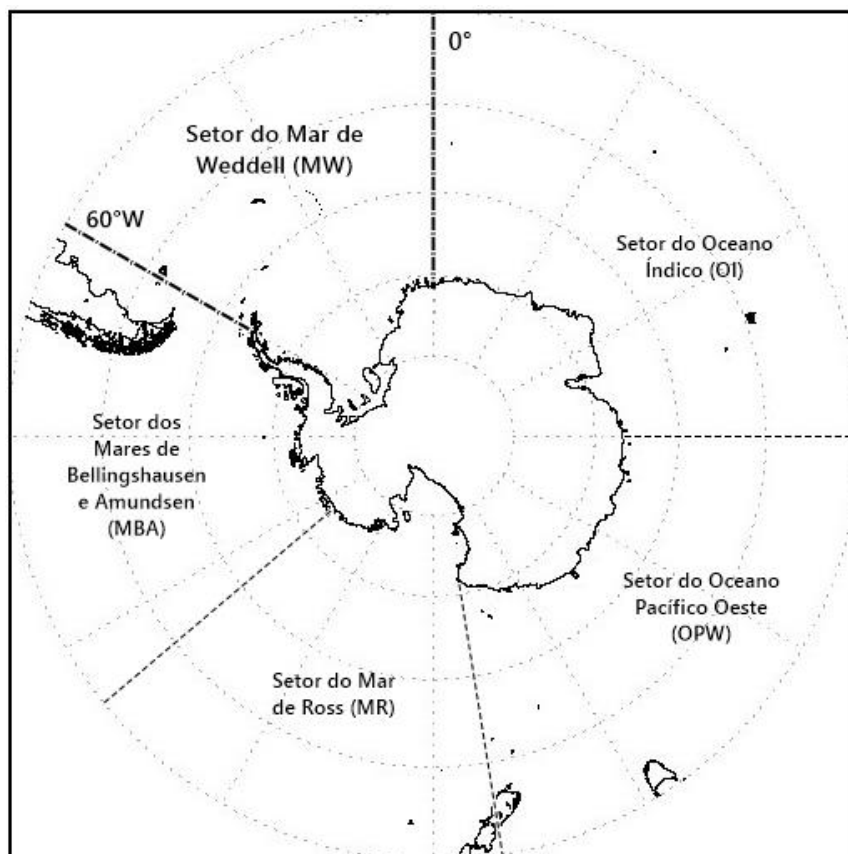
O conjunto de dados foi gerado utilizando o algoritmo *Bootstrap* com pontos de ligação variando diariamente. Dados diários (todos os dias antes de julho de 1987) e mensais estão disponíveis para as regiões polares norte e sul. Os dados estão organizados em pontos na grade estereográfica polar do SSM/I (25 x 25 km) e fornecidos em formato inteiro de dois *bytes*. Os dados incluem médias diárias e mensais de concentração de gelo marinho em uma célula de grade com pixels que apresentam espaçamento horizontal de 25 km x 25 km. No caso desta pesquisa, foram utilizados dados mensais.

Para calcular a área total de concentração de gelo marinho antártico, foi usado o programa MatLab versão R2016a. Para este procedimento, foram considerados os pixels que apresentam concentração de gelo marinho igual ou superior a 15%, dando a estes pixels o valor 1. Aos pixels com concentração de gelo marinho inferior a 15% é atribuído valor zero. Desta forma, a área total de concentração de gelo marinho é calculada somando-se o número de pixels com valor 1 e multiplicando-se o valor obtido pela área total ocupada por cada pixel, que é de 625 km<sup>2</sup>, obtendo assim a área total de concentração de gelo marinho em km<sup>2</sup> (GLOERSEN et al. 1992).

Para o cálculo de extensão de gelo marinho com a espacialização dos dados, isto é, obtendo dados de extensão de gelo em quilômetros (km) para cada diferente longitude ao longo dos mares que circundam a Antártica, foi considerada a distância desde o ponto (latitude) situado na borda do continente antártico até o ponto (latitude) onde a borda de gelo alcança. Foi identificada a latitude onde se situa a borda do continente e a latitude onde se encontra a borda de alcance do gelo para cada uma das longitudes. Para identificar a latitude e a longitude de cada ponto de interesse no código, foram utilizados os *grids* disponibilizados pelo próprio NSIDC no link ([https://nsidc.org/data/polar-stereo/tools\\_geo\\_pixel.html](https://nsidc.org/data/polar-stereo/tools_geo_pixel.html)). Uma vez com a latitude da borda do continente e do fim do gelo marinho, foi encontrado o arco de círculo entre esses pontos (em graus) e depois foi

convertido o valor deste arco de círculo de graus para quilômetros. As duas operações (achar o arco e converter de graus para quilômetros) foram feitas usando funções nativas do próprio Matlab versão R2016a, primeiro a *distance* e, em seguida, a *deg2km*.

Assim, foram gerados através do MatLab, os dados de extensão de gelo para cada longitude numa resolução espacial de aproximadamente um grau, variando desde a longitude de aproximadamente -180 graus até +180 graus. Neste sentido, foram obtidos 358 dados de extensão de gelo, mensais, totalizando 163.248 dados na série temporal de 38 anos entre janeiro de 1981 a dezembro de 2018. Para a setorização do Oceano Austral nos mares que circundam o continente antártico, foi usada e adaptada a proposta de setores divulgada por Cavalieri e Parkinson (2008), a saber: Mar de Bellingshausen-Amundsen (130°W a 60°W), Mar de Weddell (60°W a 20°E), Oceano Índico (20°E a 90°E), Oceano Pacífico Oeste (90°E a 160°E) e Mar de Ross (160°E a 130°W) como pode ser observado na **Figura 11**.



**Figura 11** – Localização dos cinco setores do Oceano Austral com destaque para os setores do MBA (130°W-61°W) e do MW (60°W-0°). Fonte: Adaptado de Cavalieri e Parkinson (2008).

Importante destacar que para efeito e adaptações desta pesquisa e análise das dinâmicas das extensões de gelo por longitude, foram consideradas as seguintes variações longitudinais para os setores MBA e MW:

- MBA (130°W a 61°W);
- MW (60°W a 0°); uma vez que análises foram realizadas comparando-se o MBA e o MW e seus efeitos sobre a América do Sul, sendo que de 0° a 20°E as influências seriam menores sobre este continente.

## **4.2. Aplicação dos Métodos de Análise**

As relações entre o índice SAM, o índice AMM e o índice GSA e a extensão de gelo marinho antártico ou de uma possível influência conjunta dos três índices sobre a extensão de gelo marinho e destes sobre o clima da América do Sul foram investigadas e analisadas mediante aplicação de ferramentas estatísticas.

As análises que relacionam os sinais dos índices com a extensão de gelo marinho e, posteriormente, com temperatura e precipitação sobre a América do Sul, ficaram restritas às extensões de gelo dos dois setores do Oceano Austral mais próximos da América do Sul e que exercem maior influência no clima do continente: setor MBA (130°W a 61°W) e setor MW (60°W a 0°). A Península Antártica, localizada entre esses dois setores, se situa em longitude bem próxima a do extremo sul do continente sul-americano.

O recorte temporal se deteve aos meses de fevereiro e de setembro, uma vez que se verificou, após prévia análise dos dados, que são os meses do ano que apresentam, climatologicamente, a menor e a maior extensão média de gelo anual nos dois setores em todo o período analisado (1981-2018), respectivamente. Estas informações podem ser observadas nos primeiros gráficos dispostos nos resultados.

### **4.2.1. Análise da Relação entre a Extensão de Gelo Marinho Antártico e os Padrões de Teleconexões**

A relação entre cada padrão, seja o SAM, o AMM ou o GSA e a extensão de gelo marinho antártico, foi analisada mediante o uso de técnicas/ferramentas estatísticas como: mapas de compostos, correlações temporais e diagramas *boxplots* isolados e combinados usando os índices de cada um dos padrões e a extensão de gelo marinho. No caso dos mapas de compostos, foram usadas variáveis como altura geopotencial em 700 hPa (para

altas latitudes), TSM (para o Atlântico) e precipitação e temperatura do ar à 2m (para a América do Sul).

#### **4.2.1.1 Compostos**

Foram construídos compostos de anomalias de altura geopotencial em 700 hPa e de anomalias de TSM nos casos dos quintis máximos e mínimos de extensão de gelo marinho, para os meses de fevereiro e de setembro nos setores MBA e MW com a utilização do *software GrADS*.

No caso dos compostos de altura geopotencial em 700 hPa, foram relacionados os padrões observados de altura geopotencial em latitudes médias e polares com os respectivos anos dessas ocorrências e os sinais do SAM associados. Em relação aos compostos de TSM, também se associou os padrões observados de TSM no Atlântico com os respectivos anos dessas ocorrências e os sinais do AMM e do GSA associados. Para verificar se os resultados dos compostos são representativos dos casos extremos, aplicou-se o teste *t-student* (WILKS, 2006) onde foi definido o nível de 90% de confiança. Esse procedimento é determinante e visa responder às questões:

- Considerando os meses de fevereiro e setembro, como se comportam as anomalias de TSM e de altura geopotencial nos quintis extremos de extensão de gelo marinho nos setores MBA e MW?
- Há algum sinal dos modos de variabilidade nestes compostos?

#### **4.2.1.2 Correlações**

A análise estatística por correlação foi realizada através do *software* Microsoft Excel 2016 para os meses de menor e maior extensão climatológica de gelo, fevereiro e setembro, respectivamente. Os gráficos mostram, para cada um desses meses, os coeficientes de correlação temporal entre a extensão de gelo, em cada longitude, e cada um dos índices (SAM, AMM e GSA). Assim, foram utilizados os 38 meses de fevereiro e de setembro (1981-2018) e produzidos gráficos Coeficiente de Correlação x Longitude.

#### **4.2.1.3 Diagramas Boxplots**

A análise por *boxplots* de forma isolada procedeu por meio de elaboração de diagramas através do *software* Microsoft Excel 2016 que associam os padrões ou índices com a extensão de gelo marinho. Através desses gráficos, é visualizada a extensão



máxima de gelo, a extensão mínima e a mediana (segundo quartil), além do primeiro e do terceiro quartis associados com cada fase dos padrões analisados (SAM, AMM, GSA).

A relação entre os diferentes padrões de teleconexões (de maneira conjunta) e a extensão de gelo marinho será analisada através de comparações entre as correlações da extensão de gelo com cada um dos padrões, no mesmo gráfico, e realizada de acordo com o item 4.2.1.2.

Diagramas *boxplots* também foram elaborados para analisar o comportamento da extensão de gelo marinho nos setores MBA e MW de maneira conjunta em cada uma das quatro combinações entre SAM e AMM (SAM+/AMM-, SAM+/AMM+, SAM-/AMM-, SAM-/AMM+) e para cada uma das quatro combinações entre SAM e GSA (SAM+/GSA-, SAM+/GSA+, SAM-/GSA-, SAM-/GSA+). Neste caso, os diagramas *boxplots* mostram o comportamento da extensão de gelo marinho em cada uma das diferentes combinações de fases do SAM, do AMM e do GSA nos setores MBA e MW.

#### **4.2.1.4 Gráficos de Extensão de Gelo Marinho x Longitude**

Foram elaborados gráficos de extensão de gelo marinho por longitude para cada uma das oito combinações dos padrões, por setor (MBA e MW) e por mês (fevereiro e setembro). Por exemplo, cada gráfico de extensão de gelo mostra as quatro combinações entre o SAM e o AMM em fevereiro e em setembro para o MBA e em fevereiro e em setembro para o MW. Estes quatro gráficos também foram elaborados para a combinação SAM/GSA, gerando um total de oito gráficos. Este procedimento visa ratificar os resultados encontrados nos diagramas *boxplots*, porém acrescentando as informações de extensão de gelo por longitude nos setores estudados e buscando analisar diferenciações na extensão de gelo em distintas longitudes.

### **4.2.2. Análise da Relação do SAM/AMM com Extremos de Gelo Marinho e Temperatura e Precipitação na América do Sul**

#### **4.2.2.1 Compostos**

Nesta etapa da pesquisa, após verificadas as combinações SAM/AMM que estão relacionadas com maiores e com menores extensões de gelo marinho nos setores MBA e MW, foram elaborados compostos dessas combinações para anomalias de temperatura do

ar e de precipitação na AS. Para esta etapa, foi selecionado apenas o mês de setembro uma vez que é o mês de maior extensão média climatológica para os setores em estudo. Além disso, foi verificado nos compostos a significância estatística considerando 90% de confiança.

Dessa forma, serão analisadas as relações dessas combinações que apresentaram maior e menor extensão de gelo marinho com a precipitação e a temperatura na América do Sul. Por exemplo, se os resultados mostraram que a combinação da fase positiva do SAM com a fase positiva do AMM (SAM+/AMM+) está relacionada com maior extensão do gelo marinho no setor MBA em setembro e que a combinação da fase negativa do SAM com a fase positiva do AMM (SAM-/AMM+) associa-se com maior extensão de gelo no setor MW, foram confeccionados compostos de precipitação e de temperatura utilizando essas combinações. Assim, ao comparar as anomalias de precipitação e temperatura sobre a América do Sul plotadas nos compostos associados à cada uma dessas configurações, tem-se como meta verificar o comportamento do clima do continente sob a influência desses padrões que estão, por sua vez, relacionados aos extremos (máximos ou mínimos) de extensão de gelo.

#### **4.2.3. Fenômenos Climáticos e Desastres: ocorrências no Brasil e na América do Sul**

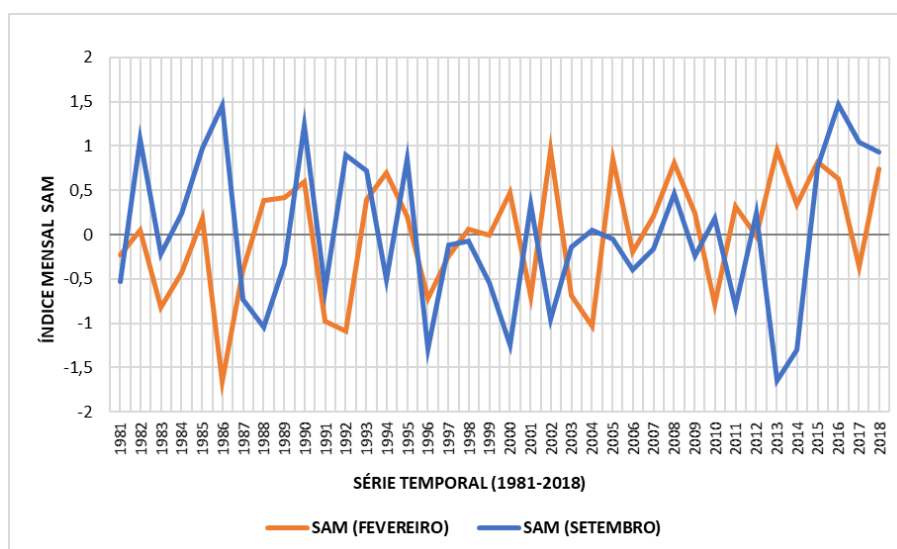
A parte final dos resultados apresenta alguns casos, relatados na literatura científica, de eventos climáticos extremos na América do Sul, como por exemplo chuvas intensas, secas ou ressacas marinhas, e possíveis relações com os sinais dos padrões abordados nesta pesquisa. O foco desta seção dos resultados é buscar possíveis relações entre os sinais dos índices e os eventos climáticos extremos que geraram ameaças ou desastres na América do Sul.

## CAPÍTULO 5 - RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1. Variação Temporal dos Índices e da Extensão de Gelo Marinho Antártico

Ao analisar a **Figura 12**, que mostra a variação mensal do índice SAM nos meses de fevereiro e setembro durante o período de 1981-2018, pode-se notar que até aproximadamente o início dos anos 2000, os valores do índice para setembro eram maiores, em sua média, do que fevereiro. Após os anos 2000, percebe-se um ligeiro aumento do índice em fevereiro e uma redução em setembro.

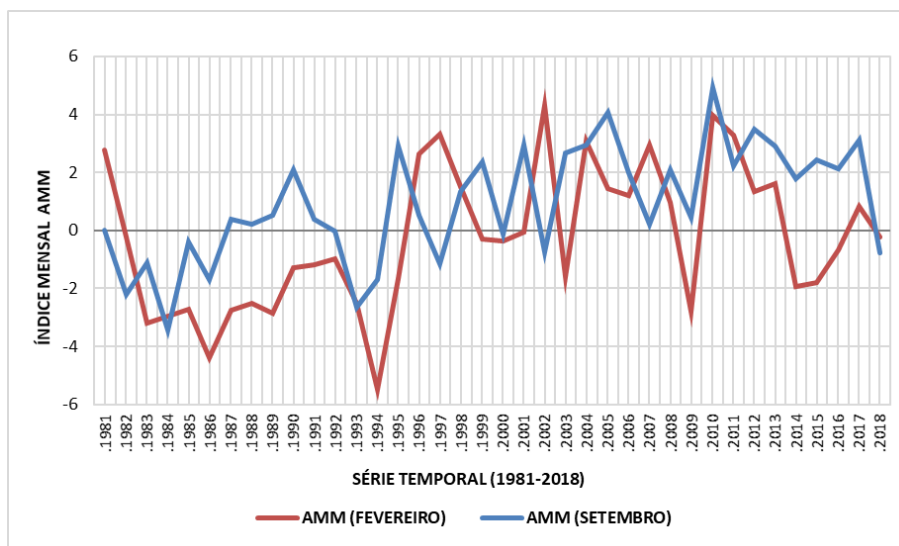
Os maiores valores do índice, nos meses de fevereiro, ocorreram em anos mais recentes da série, em 2002 e em 2013 (+ 0,95) e o menor ocorreu em 1986 (- 1,65). Já o mês de setembro apresentou os dois valores maiores em 1986 (+ 1,45) e em 2016 (+ 1,46) e o valor menor em 2013 (- 1,64).



**Figura 12** – Variação temporal do Índice Mensal SAM no período 1981-2018 nos meses de fevereiro (linha laranja) e de setembro (linha azul).

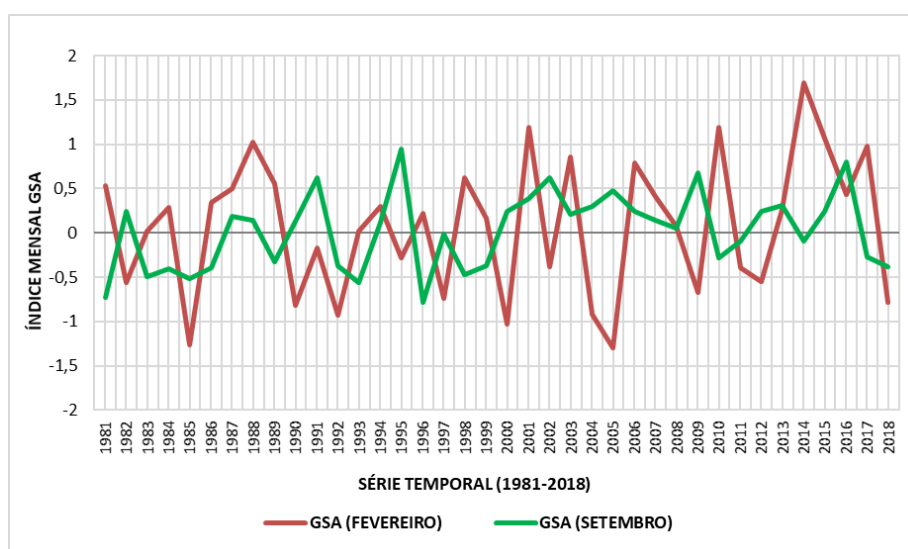
A **Figura 13** mostra a variação do índice mensal AMM nos meses de fevereiro e setembro ao longo da série de 38 anos entre 1981 e 2018. Nota-se, em média, valores mais elevados do índice em setembro em relação a fevereiro.

Em ambos os meses ocorre um aumento do índice mensal ao longo da série. O mês de fevereiro apresentou o valor mais baixo em 1994 (- 5,47) e o valor mais alto em 2002 (+ 4,3). Em setembro, o menor valor foi em 1984 (- 3,43) e o maior foi em 2010 (+ 4,92). Deste modo, nota-se que os valores mais positivos se concentram em anos mais recentes.



**Figura 13** – Variação temporal do Índice Mensal AMM no período 1981-2018 nos meses de fevereiro (linha vinho) e de setembro (linha azul).

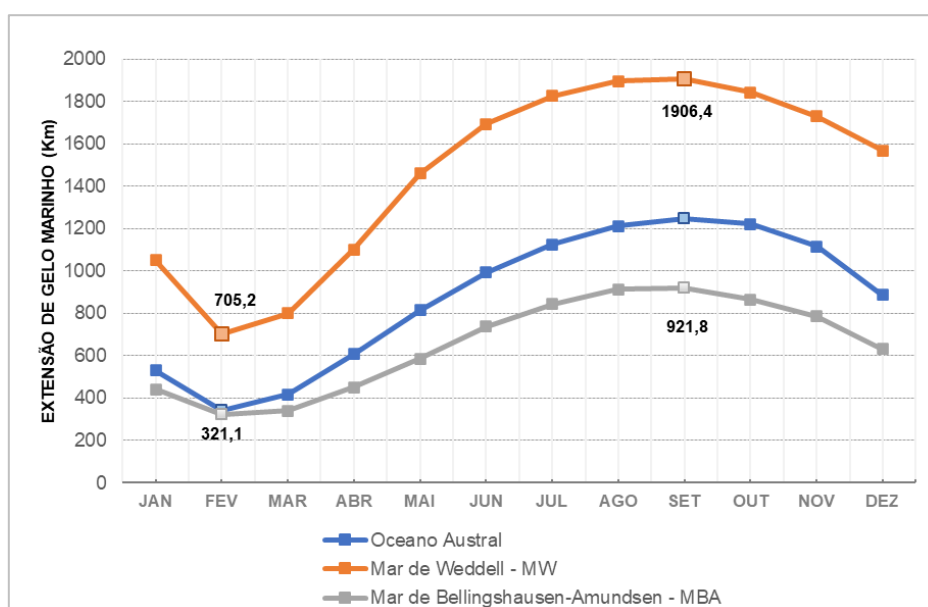
A **Figura 14** mostra a variação mensal do índice GSA nos meses de fevereiro e setembro. Se observa valores deste índice mais elevados no mês de fevereiro com máximo em 2014 (+ 1,69) e mínimo em 2005 (- 1,30). Setembro apresenta o valor máximo em 1995 (+ 0,94) e o valor mínimo em 1996 (- 0,78). Em ambos os meses, notam-se valores um pouco maiores do índice em anos mais recentes da série. Nota-se que até aproximadamente o início dos anos 2000, os valores do índice para setembro eram maiores, em sua média, do que fevereiro. Após o início dos anos 2000, percebe-se um ligeiro aumento do índice em fevereiro e em setembro.



**Figura 14** – Variação temporal do Índice Mensal GSA no período 1981-2018 nos meses de fevereiro (linha vinho) e de setembro (linha verde).

A **Figura 15** mostra a climatologia da extensão de gelo marinho considerando a média em todas as longitudes ao redor do continente antártico que levam em conta os dados de longitude que englobam todos os cinco mares circunvizinhos (Oceano Austral, linha azul), somente no setor MBA (linha cinza) e apenas no setor MW (linha laranja).

Nota-se que o mês de fevereiro assume a posição de mês com menor extensão média de gelo tanto ao redor de toda a Antártica quanto nos referidos setores. Este mês aponta uma extensão média de gelo marinho de 340,6 km (Oceano Austral), 321,1 km (setor MBA) e 706,2 km (setor MW). Para o Oceano Austral, o segundo mês com menor extensão é março com 417,1 km, seguido de janeiro com 531,9 km. O mesmo vale para os referidos setores, tendo março e janeiro como segunda e terceira menor extensão, respectivamente.



**Figura 15** – Climatologia de 38 anos (1981-2018) da extensão média de gelo marinho antártico (Km) para o Oceano Austral e para os setores MBA e MW.

O mês de maior extensão média é setembro que apresenta 1.245,1 km no Oceano Austral, 921,8 km (setor MBA) e 1.906,4 km (setor MW). Para o Oceano Austral, o segundo mês de maior extensão é outubro, com 1.220,6 km, seguido de agosto com 1.212,9 km. Nos setores MBA e MW, setembro também é o mês mais extenso, porém seguido de agosto e depois outubro.

Na média de todos os 38 anos tomando como exemplo os dados do Oceano Austral, a diferença é de 340,6 km para 1.245,1 km, o que significa que setembro apresenta quase

quatro vezes mais extensão do que fevereiro. Aplicando-se o mesmo comparativo para o setor MBA, setembro registra extensão de gelo cerca de três vezes maior e no caso do setor MW, setembro apresenta extensão superior a fevereiro em 2,5 vezes.

Os três meses de menor extensão são fevereiro, março e janeiro. Os três meses com maior extensão são setembro, outubro e agosto. Embora já se perceba uma redução considerável da extensão de gelo a partir do mês de outubro, é a partir do mês de dezembro para janeiro que se verifica uma diminuição expressiva da extensão de gelo. Enquanto novembro apresenta 1.115,8 km e dezembro possui 886,7 km, o mês de janeiro apresenta apenas 531,9 km em uma redução de 40% em relação a dezembro. De janeiro para fevereiro tem-se, ainda, mais uma redução. Pelas curvas no gráfico (**Figura 15**), pode-se notar que a brusca redução também acontece nos setores MBA e MW.

A partir de fevereiro, a extensão de gelo inicia seu processo de expansão, com aumento deste mês para março e assim por diante. O mês de maior extensão climatológica é setembro que apresenta 1.245,1 km no Oceano Austral, 921,8 km no setor MBA e 1.906,4 km no setor MW. O gelo marinho se expande de fevereiro a setembro, durante aproximadamente sete meses do ano, quando atinge seu máximo, e se retrai de setembro a fevereiro, durante cerca de cinco meses, quando atinge seu mínimo. Neste sentido, é interessante destacar que o processo de expansão do gelo a partir de fevereiro apresenta duração maior do que o processo de retração, uma vez que dura sete meses em média (**Tabelas 2 a 4**).

**Tabela 2** – Extensão média de gelo marinho (Km) no Oceano Austral (todas as longitudes) e percentual de redução ou aumento da extensão (%) em relação ao mês antecedente. Três extensões médias mínimas (vermelho) e três extensões médias máximas (verde). Taxas de retração (vermelho) e de expansão (verde).

OCEANO AUSTRAL	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
Extensão Média de Gelo Marinho (Km)	531,9	340,6	417,1	607,3	814,1	993,9	1126,3	1212,8	1245,1	1220,6	1115,8	886,7
Taxa de Retração ou Expansão da Extensão Média de Gelo (%)	-40,0%	-36,0%	22,5%	45,6%	34,1%	22,1%	13,3%	7,7%	2,7%	-2,0%	-8,6%	-20,5%

**Tabela 3** – Extensão média de gelo marinho (Km) no setor MBA e percentual de redução ou aumento da extensão (%) em relação ao mês antecedente. Três extensões médias mínimas (vermelho) e três extensões médias máximas (verde). Taxas de retração (vermelho) e de expansão (verde).

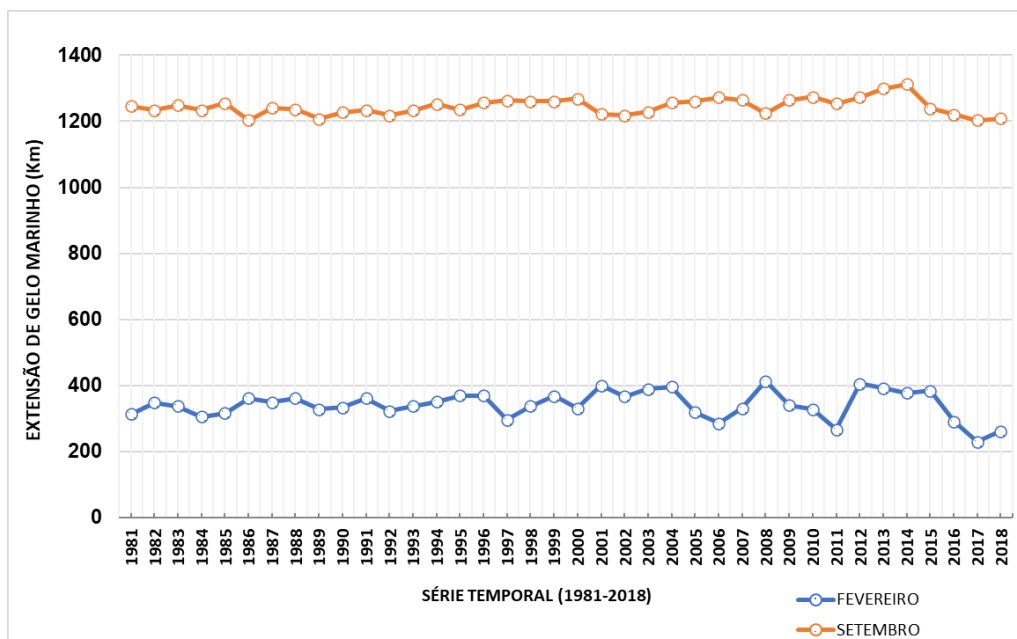
SETOR MBA	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
Extensão Média de Gelo Marinho (Km)	441,7	321,1	341,5	450,2	586,6	736,7	844,1	914,5	921,8	864,6	785,6	632,1
Taxa de Retração ou Expansão da Extensão Média de Gelo (%)	-30,1%	-27,3%	6,4%	31,8%	30,3%	25,6%	14,6%	8,3%	0,8%	-6,2%	-9,1%	-19,5%

**Tabela 4** – Extensão média de gelo marinho (Km) no setor MW e percentual de redução ou aumento da extensão (%) em relação ao mês antecedente. Três extensões médias mínimas (vermelho) e três extensões médias máximas (verde). Taxas de retração (vermelho) e de expansão (verde).

SETOR MW	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
Extensão Média de Gelo Marinho (Km)	1049,7	705,2	801,4	1100,3	1460,7	1694,4	1826,6	1896,1	1906,4	1842,5	1730,4	1567,3
Taxa de Retração ou Expansão da Extensão Média de Gelo (%)	-33%	-33%	13,6%	37,3%	32,8%	16,0%	7,8%	3,8%	0,5%	-3,4%	-6,1%	-9,4%

Relevante destacar que os meses de máximos de gelo ocorrem em atraso em relação ao período de inverno, uma vez que os meses mais frios são representados geralmente por junho, julho e agosto, mas os meses de maior extensão de gelo são representados por agosto, setembro e outubro. Portanto, a extensão de gelo apresenta uma resposta de, aproximadamente, dois meses.

A **Figura 16** mostra a variação da extensão de gelo marinho no período de 38 anos, exclusivamente nos meses de fevereiro e de setembro, considerando o Oceano Austral (todas as longitudes). O gráfico anterior mostrou a média destes 38 anos para todos os meses, inclusive para os dois meses em discussão: fevereiro apresenta extensão média de 340,6 km e setembro possui uma extensão média de 1.245,1 km.



**Figura 16** – Variação temporal da extensão média de gelo marinho antártico de todas as longitudes para os meses de fevereiro (linha azul) e setembro (linha laranja) referente ao período 1981-2018.

No entanto, no gráfico representado pela **Figura 16**, se discute a variação da extensão ao longo do período analisado. Ao longo do período, o mês de fevereiro apontou a menor extensão no ano de 2017 com 229,1 km e registrou a maior extensão no ano de 2008 com 412,2 km (**Tabela 5**). Nota-se, a partir dos anos 2000, uma maior variação das extensões de gelo, ao contrário do período até 2000 quando os valores se encontram todos mais próximos.

Quanto aos meses de setembro, o que apresenta menor extensão é o ano de 1986 com 1.202,8 km e o que possui maior extensão é 2014 com 1.313,1 km (**Tabela 5**). Os menos extensos ocorrem tanto no início do período como no final, mas os anos mais extensos ocorrem apenas no final do período, a partir de 2006. Da mesma forma que fevereiro, também se nota uma maior variação das extensões a partir dos anos 2000.

No gráfico representado pela **Figura 15**, está evidente a grande diferença na extensão de gelo entre os doze meses do ano e, principalmente, entre fevereiro e setembro. Nesse gráfico, a diferença fica bem explícita pois é destacada a variação da extensão de gelo em cada mês, enfatizando fevereiro e setembro e permitindo observar melhor as diferenças entre eles ao longo de todo o período. No ano de 2006, foi observada a maior diferença entre os dois meses no período de 38 anos, pois fevereiro registrou um dos meses menos extensos, com 284,1 km e setembro apontou um dos meses mais extensos,



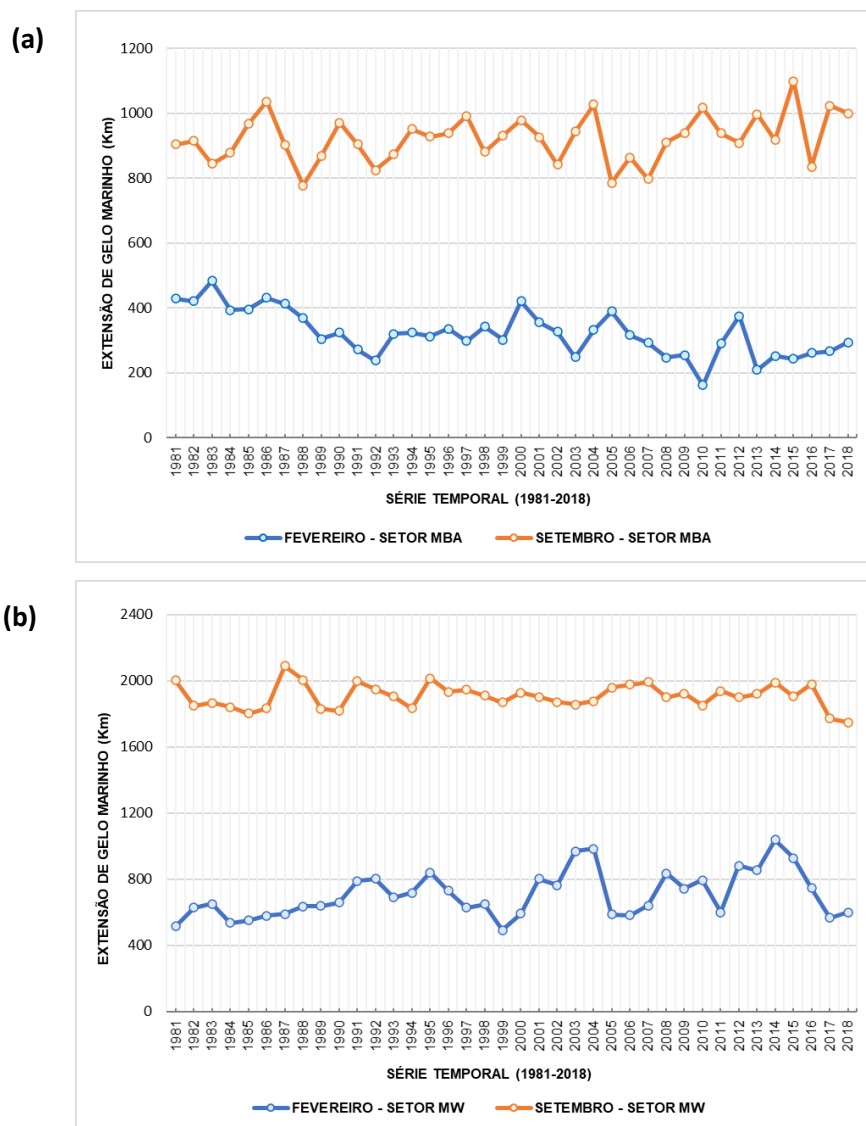
com 1.272,9 km, marcando uma diferença de 988,8 km. Neste ano, a extensão de gelo em setembro foi 4,5 vezes maior que a de fevereiro. Por outro lado, o ano em que os meses de fevereiro e setembro apresentaram a menor diferença foi 2008, quando fevereiro teve sua maior extensão (412,2 km) e setembro registrou extensão de 1.225 km. A **Tabela 5** abaixo exemplifica os dados mostrados na **Figura 16**.

**Tabela 5** – Extensões médias de gelo marinho para o Oceano Austral nos meses de fevereiro e de setembro dos respectivos anos do período 1981-2018. Em verde: ano de máxima extensão de cada mês. Em vermelho: ano de mínima extensão de cada mês.

Período (1981-1999)			Período (2000-2018)		
ANO	Extensão Média de Gelo Marinho (Km)		ANO	Extensão Média de Gelo Marinho (Km)	
	FEV	SET		FEV	SET
1981	312,4	1245,9	2000	330,7	1269
1982	347,3	1233,7	2001	398,9	1221,4
1983	336,6	1248,1	2002	365,7	1218,6
1984	304,4	1234,5	2003	388,7	1228,8
1985	315,4	1255,6	2004	395,7	1256,2
1986	360,7	1202,8	2005	318,7	1260,3
1987	349,3	1240,8	2006	284,1	1272,8
1988	361,3	1237	2007	329,4	1264,7
1989	327,2	1207,8	2008	412,2	1225
1990	332,2	1227,5	2009	338,9	1265,1
1991	360,3	1233,9	2010	326,9	1274,6
1992	321,5	1217,4	2011	265,6	1253,6
1993	336,8	1232,5	2012	404,1	1272
1994	349,6	1252,6	2013	391,5	1299,9
1995	368,1	1234,8	2014	377	1313,1
1996	369,1	1257	2015	383,6	1239
1997	295	1263,9	2016	289,5	1220
1998	336,6	1260	2017	229,1	1203
1999	367,8	1260,8	2018	260,1	1208,1

Uma vez mostrada a variação da extensão de gelo para o Oceano Austral, foi elaborada a **Figura 17** que mostra dois gráficos de extensão de gelo marinho para os meses de fevereiro e de setembro durante o período analisado para os setores MBA e

MW. O objetivo dos gráficos é realizar a comparação entre os meses de fevereiro e de setembro no mesmo setor, como feito na **Figura 16**, e não comparar extensões de um setor com outro. Este fato decorre da forma como o dado foi calculado e apresentado, ou seja, a extensão de gelo é medida da borda do continente antártico até a borda do gelo. Neste sentido, alguns setores têm sua borda continental situada em latitudes mais altas, o que amplia a extensão de gelo. Comparações não podem ser realizadas entre os setores MBA e MW, que apresenta sua borda continental situada, em média, mais ao sul e naturalmente apresentará extensões de gelo muito superiores. Decorrente deste processo, são esperadas, no setor MW, extensões de gelo marinho maiores.



**Figura 17** – Variação da extensão média de gelo marinho antártico para os setores MBA (a) e MW (b) para os meses de fevereiro (linha azul) e setembro (linha laranja) referente ao período 1981-2018.

## A) Setor MBA

No setor MBA, fevereiro apresenta extensões que variam entre o mínimo de 162,3 km (2010) até o máximo de 483,6 km (1983). As maiores extensões de gelo se concentram no início do período. No mês de setembro, as maiores extensões se concentram em anos mais recentes. A extensão mínima é de 776,8 km (1988) e a extensão máxima é de 1.098,8 km (2015) (**Figura 17**). De acordo com as variações de ambos os meses, é bastante evidente que fevereiro apresentou meses cada vez menos extensos e setembro meses cada vez mais extensos. A **Tabela 6** exemplifica os dados da **Figura 17** do setor MBA.

**Tabela 6** – Extensões médias de gelo marinho para o setor MBA nos meses de fevereiro e de setembro dos respectivos anos do período 1981-2018. O quintil (oito anos) extremo máximo e mínimo dos meses de fevereiro e de setembro estão marcados em verde e em vermelho, respectivamente.

Período (1981-1999)			Período (2000-2018)		
ANO	FEV	SET	ANO	FEV	SET
1981	428,1	903,9	2000	420,9	978,9
1982	420,6	914,1	2001	355,2	926,7
1983	483,6	843,6	2002	326,7	841,2
1984	392,5	877,4	2003	248,4	943,4
1985	395,5	966,7	2004	331,9	1027,3
1986	431,6	1036,5	2005	389,8	784,5
1987	413,3	903,1	2006	316,3	863,6
1988	368,5	776,8	2007	292,7	797,2
1989	303,7	866,9	2008	247,2	911,1
1990	324,3	970,4	2009	254,4	939,5
1991	271,5	904,1	2010	162,3	1015,8
1992	238,1	824,9	2011	290,3	937,5
1993	319,4	872,7	2012	374,5	908,4
1994	323,4	951,3	2013	208,6	997,1
1995	311,9	927,6	2014	252,3	917,1
1996	336,2	937,9	2015	243,1	1098,8
1997	298,1	991,9	2016	261,3	835,3
1998	341,7	880,4	2017	266,4	1023,5
1999	301,8	932,1	2018	293,8	998,8

## B) Setor MW

No setor MW, fevereiro registra extensões que oscilam entre 490 km (1999) e 1038,4 km (2014). Ao contrário do setor MBA, as maiores extensões se concentram no final do período. Em setembro, a variação fica entre 1748,6 km (2018) e 2087,6 km (1987). Nos dois setores, a variação da extensão ao longo do período é maior nos meses de fevereiro. No setor MBA, tanto em fevereiro como em setembro as variações são maiores do que no setor MW. A **Tabela 7** sintetiza os dados da **Figura 17** do setor MW.

**Tabela 7** – Extensões médias de gelo marinho para o setor MW nos meses de fevereiro e de setembro dos respectivos anos do período 1981-2018. O quintil (oito anos) extremo máximo e mínimo dos meses de fevereiro e de setembro estão marcados em verde e em vermelho, respectivamente.

Período (1981-1999)			Período (2000-2018)		
ANO	FEV	SET	ANO	FEV	SET
1981	513,4	2000,9	2000	590,3	1925,9
1982	627,9	1848,1	2001	801,8	1902,5
1983	650,9	1866,2	2002	763,3	1871,5
1984	534,2	1840,1	2003	967,7	1854,1
1985	551,1	1802,4	2004	982,2	1876,9
1986	577,9	1832,7	2005	585,8	1958,8
1987	588,5	2087,6	2006	581,8	1975,3
1988	635,7	2003,6	2007	640,4	1990,3
1989	638,4	1830,3	2008	833,6	1897,8
1990	658,1	1815,6	2009	741,6	1922,7
1991	788,4	1995,4	2010	792,5	1850,9
1992	801,5	1947,5	2011	600,1	1936,7
1993	689,1	1902,9	2012	881,5	1899,7
1994	717,8	1832,5	2013	852,7	1920,1
1995	840,6	2013,3	2014	1038,4	1989,3
1996	728,4	1932,6	2015	926,5	1903,8
1997	628,3	1943,9	2016	744,5	1977,5
1998	646,6	1909,3	2017	566,7	1769,4
1999	490,1	1868,1	2018	600,1	1748,6

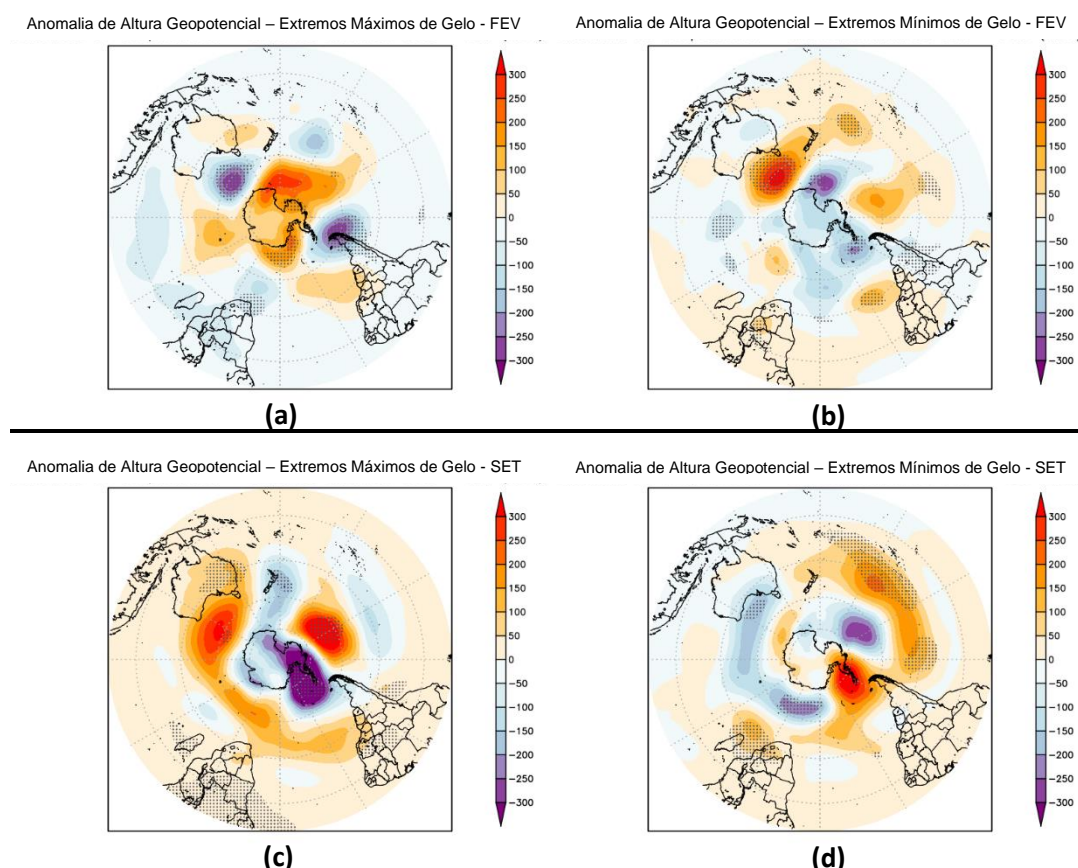
## 5.2. Análise da Relação entre a Extensão de Gelo Marinho Antártico e os Padrões de Teleconexões

### 5.2.1. Compostos de Altura Geopotencial

#### 5.2.1.1 Análise dos Compostos de Altura Geopotencial (setor MBA)

##### a) Fevereiro

Para o setor MBA, considerando os compostos de anomalias de altura geopotencial em 700 hPa para o mês de fevereiro nos casos de extremos máximos de extensão de gelo (quartil extremo máximo) (**Figura 18a**), notam-se anomalias positivas sobre a Antártica e predominam anomalias negativas nas latitudes médias. A América do Sul apresenta um sinal de anomalias negativas com máximo sobre o extremo sul do continente. A exceção ocorre sobre parte do sudeste da América do Sul, que apresenta anomalias positivas. O padrão observado remete à gangorra do SAM entre a região polar e as médias latitudes, na sua fase negativa, embora este padrão não esteja anular.



**Figura 18** – Compostos de anomalia de altura geopotencial (m) em 700 hPa relacionados aos quintis extremos de extensão de gelo no MBA. (a) (b) fevereiro e (c) (d) setembro. Lado esquerdo: quartil extremo máximo. Lado direito: quartil extremo mínimo. Áreas com 90% de significância estão pontilhadas (teste *t-student*).

Neste caso, os anos em que ocorreram os meses de fevereiro representativos do quintil extremo máximo de extensão de gelo foram: 1981, 1982, 1983, 1984, 1985, 1986, 1987 e 2000 (**Tabela 6**). As anomalias positivas (cores mais quentes) observadas sobre a Antártica e as anomalias negativas (cores mais frias) presentes nas latitudes médias relacionam-se às características da fase negativa do SAM, quando se torna mais evidente esta configuração. Neste sentido, faz-se necessário observar quais sinais do índice SAM ocorreram nos meses de fevereiro dos anos supracitados afim de avaliar se há coerência com o padrão de anomalias apresentado.

Dos oito referidos meses de fevereiro nos anos que compõem o quintil extremo máximo, em cinco deles ocorreu fase negativa do SAM, o que é coerente com a configuração apresentada no composto. Embora tenhamos uma quantidade de casos negativos superior à metade, não se pode desconsiderar os três casos referentes à fase positiva. É preciso ressaltar que não somente a quantidade de casos de índices positivos e negativos definirá o padrão de anomalias positivas e negativas sobre determinadas regiões, mas também os valores do índice em cada caso, seja positivo ou negativo.

Nesta presente análise, o fator associado ao valor do índice não está sendo levado em consideração diretamente, uma vez que o que se analisa são os padrões de anomalias de altura geopotencial em casos extremos de extensão de gelo e não em casos extremos do índice SAM. No entanto, para efeito de observação em relação ao que se espera em determinados padrões de anomalias de altura geopotencial, é importante verificar quais sinais do SAM ocorreram nos meses/anos em que foram registrados os extremos de gelo. Ressalta-se que nem todas as áreas descritas apresentam significância estatística. Formam-se centros negativos significativos em latitudes médias sobre o extremo sul da AS, no sul da África e ao sul da Austrália. Os centros positivos significativos são menores e localizam-se, basicamente, próximos à borda do continente antártico.

Considerando, ainda, o mês de fevereiro, porém os casos de extremos mínimos de extensão de gelo (quintil extremo mínimo) (**Figura 18b**) parece haver uma configuração de anomalias de forma oposta à analisada anteriormente, com predomínio de anomalias negativas sobre a Antártica e positivas sobre as latitudes médias (onda 4). Este resultado sugere que há predominância de uma circulação com características associadas à fase positiva do SAM, embora o padrão esteja menos configurado que no extremo máximo (**Figura 18a**).

Neste caso, os anos em que ocorreram os meses de fevereiro que representam o quintil extremo mínimo de extensão de gelo foram: 1992, 2003, 2008, 2009, 2010, 2013, 2014 e 2015 (**Tabela 6**). Com predomínio de anomalias negativas ocorrendo sobre a Antártica e anomalias positivas presentes nas latitudes médias, incluindo centros significativos, sugere-se que há predominância de uma circulação com características associadas à fase positiva do SAM. Dos oito anos supracitados, em cinco deles ocorre sinal positivo do índice. A mesma observação realizada para o caso anterior também pode ser usada para este caso, onde não só a quantidade de casos é importante, mas também o valor do índice em cada caso.

São verificados pequenos e médios centros significativos espalhados pelas latitudes médias, a grande maioria positivos, como ao sul da Austrália, o mais representativo. Este centro positivo aponta clara oposição à análise anterior que mostra um centro de sinal oposto na mesma região. Ocorre um centro negativo significativo no sul da América do Sul, este já similar ao caso anterior.

No setor MBA, em fevereiro, os extremos mínimos (máximos) de gelo marinho coincidem com a fase positiva (negativa) do SAM. Este resultado diverge dos obtidos por Pezza, Hashid e Simmonds (2012), que mostram que na fase positiva do SAM, ondas estacionárias podem ser amplificadas por perturbações anômalas associadas a ciclones de latitudes altas, resultando em maior gelo marinho. No entanto, os resultados apresentados por esses autores são coerentes com os casos de extremos máximos de gelo no mês de setembro, que estão associados à fase positiva do SAM. Em suma, os dados levantados por Pezza, Hashid e Simmonds (2012), concordam com os resultados desta pesquisa quando a mesma analisa os extremos máximos de gelo marinho no setor MBA no inverno austral (setembro). Mais adiante, quando forem analisados os casos referentes ao setor MW, poder-se-á observar que esta situação se aplica aos extremos máximos de gelo no verão austral (fevereiro), ou seja, os extremos máximos de gelo associam-se à fase positiva no setor MW em fevereiro, somente. Deste modo, nota-se que existe variabilidade espacial e sazonal nas relações dos extremos de gelo com o padrão SAM.

## **b) Setembro**

Analisando os compostos de anomalias para o mês de setembro nos casos de extremos máximos de extensão de gelo (quintil extremo máximo para setembro) (**Figura 18c**), destacam-se anomalias negativas sobre a Antártica e sobre algumas regiões de

latitudes médias, como a Nova Zelândia e o extremo sul da América do Sul. No entanto, nas latitudes médias prevalecem as anomalias positivas, como no sul do Oceano Pacífico, sul do Oceano Índico e Austrália. Os anos em que ocorreram os meses de setembro representativos do quintil extremo máximo de extensão de gelo foram: 1986, 1997, 2004, 2010, 2013, 2015, 2017 e 2018 (**Tabela 6**).

A presença de anomalias negativas sobre a região polar e a predominância de anomalias positivas sobre as latitudes médias apresenta coerência com a fase positiva do SAM e uma inversão de sinal do SAM em relação ao mês de fevereiro. Neste sentido, faz-se necessário observar quais sinais do índice SAM ocorreram nos meses de setembro dos anos supracitados afim de analisar se há alguma concordância com as anomalias apresentadas no composto. Dos oito referidos anos, em seis deles, no mês de setembro, o sinal do índice SAM foi positivo. Ainda que não somente o sinal seja relevante, mas inclusive o valor do sinal, deve-se destacar a importância de seis em oito casos apresentarem sinal positivo. Essa observação concorda com a configuração exibida no composto com predomínio de anomalias negativas (positivas) sobre a região polar (de latitudes médias). São observados centros significativos tanto positivos quanto negativos. Há um centro negativo significativo sobre a Península Antártica e sobre parte da Nova Zelândia, enquanto centros positivos significativos ocorrem sobre o sudeste da América do Sul, extremo sul do Pacífico e leste da Austrália. A configuração de anomalias apresentada por este composto assemelha-se com os compostos de extremos mínimos de gelo para o mês de fevereiro. Dessa forma, nos casos de extremos máximos em setembro, observa-se um padrão de anomalias mais semelhante aos casos dos extremos mínimos em fevereiro. Porém, vale lembrar que estes padrões são resultantes, principalmente, dos sinais observados do índice SAM nos respectivos meses/anos de extremos de gelo.

Os compostos de anomalias para o mês de setembro levando em conta os casos de extremos mínimos de extensão de gelo (quintil extremo mínimo para setembro) (**Figura 18d**) parece apresentar situação oposta à anterior que está relacionada aos casos extremos máximos pois há presença de anomalias positivas sobre a Antártica, especialmente sobre a Península Antártica. Por outro lado, anomalias negativas surgem sobre grande parte das latitudes médias, como sul do Oceano Índico, sul da Austrália e extremo sul do Pacífico. Entretanto, há anomalias positivas sobre o sul da AS e Nova Zelândia (ao contrário do que ocorre no caso anterior).



Os anos em que ocorreram os meses de setembro representativos do quintil extremo mínimo de extensão de gelo foram: 1983, 1988, 1992, 2002, 2005, 2006, 2007 e 2016 (**Tabela 6**). Da mesma maneira que o arranjo anterior mostra coerência com a fase positiva do SAM, este arranjo corrobora com a fase negativa do índice, uma vez que as regiões anômalas estão em oposição de sinais. Entretanto, esse é o composto em que o padrão SAM se encontra menos configurado. Neste sentido, faz-se necessário observar quais sinais do índice SAM ocorreram nos meses de setembro dos anos supracitados afim de avaliar se há de fato concordância com as anomalias apresentadas no composto em decorrência da fase do índice. Dos oito referidos anos, em seis deles o sinal do índice SAM foi negativo. Ainda que não apenas o sinal importe, mas inclusive o valor do sinal, deve-se destacar a relevância de seis em oito casos apresentarem sinal negativo, o que concorda com a configuração exibida no composto. As áreas com centros significativos na **Figura 18c** não são replicadas na **Figura 18d** mesmo se for considerada a oposição de sinais. Centros positivos significativos são vistos no extremo sul do Pacífico e centros negativos significativos ocorrem no Oceano Austral à leste da Península Antártica e ao sul da Austrália. Apesar destas observações e ao considerar a discussão preferencialmente entre fevereiro máximos e mínimos, separadamente dos setembros máximos e mínimos, tem-se uma inversão de fase do SAM quando também se inverte o extremo de gelo observado. Assim, tem-se:

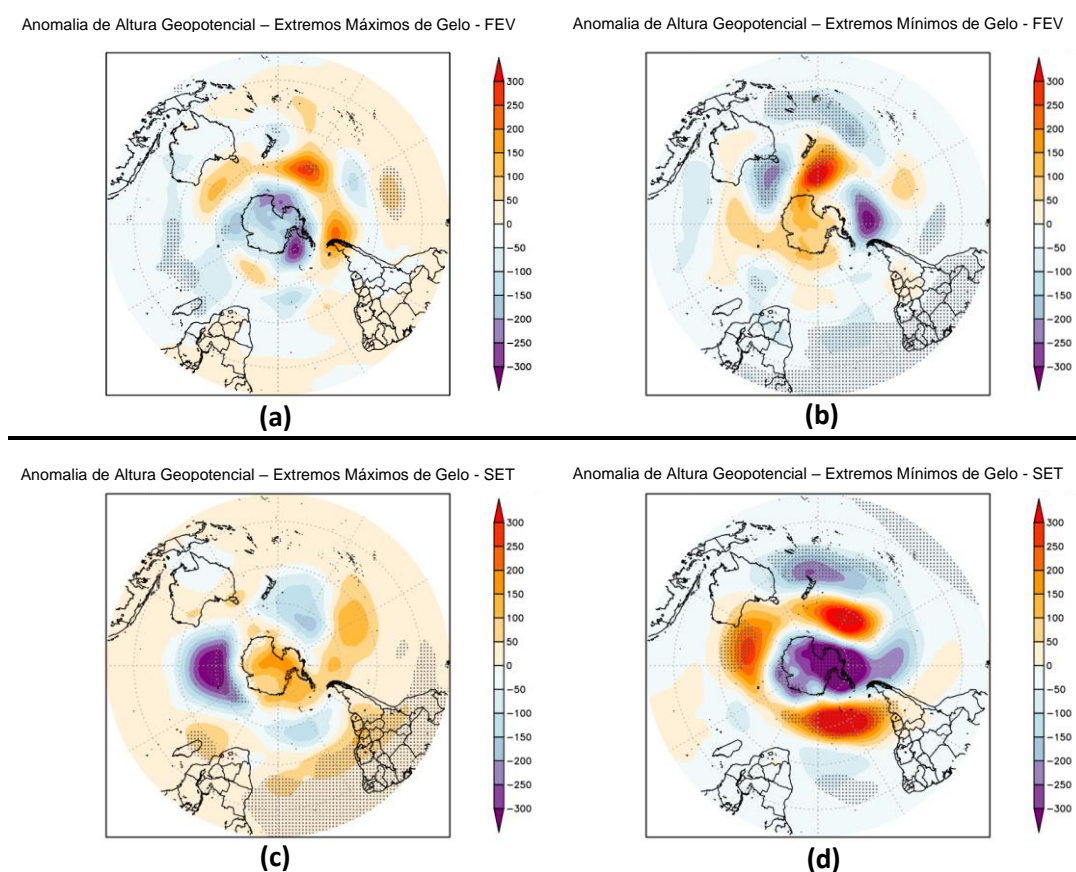
- **Figura 18a** - fevereiro nos casos máximos de gelo: SAM-
- **Figura 18b** - fevereiro nos casos mínimos de gelo: SAM+
- **Figura 18c** - setembro nos casos máximos de gelo: SAM+
- **Figura 18d** - setembro nos casos mínimos de gelo: SAM-

Observa-se que as anomalias de altura geopotencial sobre altas latitudes em decorrência da classificação entre extremos máximos e mínimos de gelo, nota-se com clareza situações opostas quando se analisa extremos de gelo opostos fixando o mesmo mês de análise, ou seja, fevereiro máximo com fevereiro mínimo e também setembro máximo com setembro mínimo. Desta forma, ao se analisar meses distintos, nota-se que fevereiro está relacionado aos seus máximos com a fase negativa do SAM, enquanto setembro associa seus máximos com a fase positiva. Da mesma forma, fevereiro associa seus mínimos a fase positiva e setembro associa com a fase negativa. Os próximos resultados visam complementar estas informações.

### 5.2.1.2 Análise dos Compostos de Altura Geopotencial (setor MW)

#### a) Fevereiro

Para o setor MW e considerando os compostos de anomalias de altura geopotencial em 700 hPa nos casos de extremos máximos de extensão de gelo em fevereiro (**Figura 19a**), notam-se anomalias negativas sobre a Antártica e parte das latitudes médias entre a África e a Austrália e anomalias positivas nas latitudes médias no extremo sul da América do Sul, extremo sul do Pacífico e ao sul da Austrália. O padrão observado remete à gangorra do SAM entre a região polar e as médias latitudes. Neste caso, os anos em que ocorreram os meses de fevereiro representativos do quintil extremo máximo de extensão de gelo foram: 1995, 2003, 2004, 2008, 2012, 2013, 2014 e 2015 (**Tabela 7**).



**Figura 19** – Compostos de anomalia de altura geopotencial (m) em 700 hPa relacionados aos quintis extremos de extensão de gelo no MW. (a) (b) fevereiro e (c) (d) setembro. Lado esquerdo: quintil extremo máximo. Lado direito: quintil extremo mínimo. Áreas com 90% de significância estão pontilhadas (teste *t-student*).

Com anomalias negativas ocorrendo sobre a Antártica e anomalias positivas sendo predominantes nas latitudes médias, sugere-se que prevaleça características relacionadas à fase positiva do SAM. Neste sentido, faz-se necessário observar quais sinais do índice ocorreram nos meses de fevereiro dos anos supracitados afim de avaliar se há concordância com o padrão das anomalias apresentadas no composto. No quintil extremo máximo representado pelos oito anos, em cinco deles o sinal do índice foi positivo, corroborando com as características apresentadas no composto. Centros negativos significativos despontam na Península Antártica e no MW, bem como no sul do Oceano Índico, enquanto um centro positivo significativo é observado no sul do Pacífico Leste.

Considerando, ainda, o mês de fevereiro, mas os casos de extremos mínimos de extensão de gelo (quintil extremo mínimo) (**Figura 19b**) parece se desenhar uma configuração das anomalias de forma oposta à analisada nos extremos máximos, com predomínio de anomalias positivas sobre a Antártica e negativas sobre a maior parte das latitudes médias em uma configuração de onda 4. Anomalias positivas, além de ocorrerem sobre a Antártica, ocorrem nas latitudes médias sobre a Nova Zelândia. Anomalias negativas predominam nas médias latitudes, despontando ao sul da Austrália e entre o sul da América do Sul e a Península Antártica, apresentando, nestes dois casos, centros significativos. Neste caso, os anos em que ocorreram os meses de fevereiro representativos do quintil extremo mínimo de extensão de gelo foram: 1981, 1984, 1985, 1986, 1999, 2005, 2006 e 2017 (**Tabela 7**).

A configuração apresentada sugere uma fase negativa do SAM. No quintil extremo mínimo representado pelos oito anos citados, em seis deles o sinal do índice foi negativo, sendo coerente com a configuração de anomalias apresentadas no composto. Em relação à significância estatística, centros negativos significativos predominam, ocorrendo ao sul da Austrália, sul do Pacífico Oeste, entre o sul da América do Sul e a Antártica e sobre uma vasta região que abrange o norte da América do Sul e grande parte do Oceano Atlântico. Um centro positivo significativo é observado entre a Antártica e a Nova Zelândia.

## **b) Setembro**

Nos compostos de anomalias para o mês de setembro nos casos de extremos máximos de extensão de gelo (quintil extremo máximo para setembro) (**Figura 19c**), observa-se, da mesma forma que o composto anterior (**Figura 19b**), anomalias positivas

sobre a região polar e sobre uma pequena região de latitudes médias no sudeste do Pacífico e o predomínio de anomalias negativas sobre as latitudes médias, como o sul do Oceano Índico, à oeste da Austrália, no sul do Pacífico e sul do Atlântico (padrão de onda 3). Centros significativos negativos ocorrem apenas no sul do Oceano Índico enquanto centros positivos significativos espalham-se por áreas mais amplas, como todo o norte da América do Sul, o sudeste da América do Sul e extensa área sobre o Atlântico.

Neste caso, os anos em que ocorreram os meses de setembro representativos do quintil extremo máximo de extensão de gelo foram: 1981, 1987, 1988, 1991, 1995, 2007, 2014 e 2016 (**Tabela 7**). Com anomalias positivas ocorrendo sobre a região antártica e anomalias negativas apresentando predomínio sobre as latitudes médias, sugere-se que há predominância de características relacionadas à fase negativa do SAM. No quintil extremo máximo representado pelos oito anos citados, em seis anos o sinal do índice foi negativo, corroborando com a configuração de anomalias apresentadas no composto. Esta observação é coerente com Pezza e colaboradores (2008; 2012), Parise et al. (2015) e Carpenedo (2017) que encontraram, num total de nove eventos de expansão de gelo marinho durante o inverno austral, quatro ocorrendo na fase negativa do SAM, nos anos de 1980, 1981, 1991 e 1992, e apenas um na fase positiva. Ou seja, a maioria dos anos de extremos máximos de gelo ocorreram na fase negativa do índice.

Os compostos de anomalias para o mês de setembro levando em conta os casos de extremos mínimos de extensão de gelo (quintil extremo mínimo para setembro) (**Figura 19d**) mostram configuração oposta à anterior e similar à **Figura 19a**, onde anomalias negativas preenchem a Antártica e Oceano Austral (além da Nova Zelândia e leste da Austrália) e anomalias positivas predominam nas latitudes médias, ocupando o extremo sul do Pacífico Oeste, sul do Atlântico e à oeste da Austrália (padrão de onda 3). A configuração formada pelas anomalias exibe um padrão semelhante à gangorra típica do SAM em sua fase positiva na qual observam-se anomalias negativas (positivas) sobre a Antártica (sobre as latitudes médias). Centros significativos negativos ocorrem sobre a Península Antártica e mares de Weddell, Bellingshausen-Amundsen e Ross, além da região à leste da Austrália. Já centros positivos significativos surgem nos núcleos das anomalias positivas, como o extremo sul do Pacífico Oeste, sul do Atlântico e à oeste da Austrália. Neste caso, os anos em que ocorreram os meses de setembro representativos do quintil extremo mínimo de extensão de gelo foram: 1984, 1985, 1986, 1989, 1990, 1994, 2017, 2018 (**Tabela 7**). Com anomalias negativas ocorrendo sobre a região

antártica e anomalias positivas predominando sobre latitudes médias, manifestam-se características associadas à fase positiva do SAM. No quintil extremo mínimo representado pelos oito anos citados, em seis anos o sinal do índice foi positivo, corroborando com a configuração de anomalias apresentadas no composto.

Pode-se concluir que no setor MW ocorrem relações opostas da mesma forma que ocorre no setor MBA. Os extremos máximos no mês de fevereiro relacionam-se com a fase positiva do SAM e os extremos mínimos associam-se à fase negativa. Em setembro, ocorre o contrário, de modo que o extremo máximo apresenta coerência com a fase negativa e o extremo mínimo concorda com a fase positiva. A partir deste ponto, se deve analisar mais detalhadamente estas oposições de sinais para diferentes extremos de gelo levando em conta o mês em questão, pois a relação que ocorre em fevereiro no setor MBA parece se manifestar em setembro no setor MW.

- **Figura 19a** - fevereiro nos casos máximos de gelo: SAM+
- **Figura 19b** - fevereiro nos casos mínimos de gelo: SAM-
- **Figura 19c** - setembro nos casos máximos de gelo: SAM-
- **Figura 19d** - setembro nos casos mínimos de gelo: SAM+

As anomalias negativas de altura geopotencial em 700 hPa observadas no Pacífico Sudeste (**Figuras 19b e 19d**) nos casos de extremos mínimos de gelo marinho em fevereiro e setembro, respectivamente, são resultados consistentes com Renwick (2001) que destacou um padrão similar ao verificar que extremos de retração de gelo (extremos mínimos) no setor do Atlântico (60° a 10°W, coincidentes com o setor MW) estão relacionados com anomalias negativas de altura geopotencial em 500 hPa no Oceano Pacífico Sudeste.

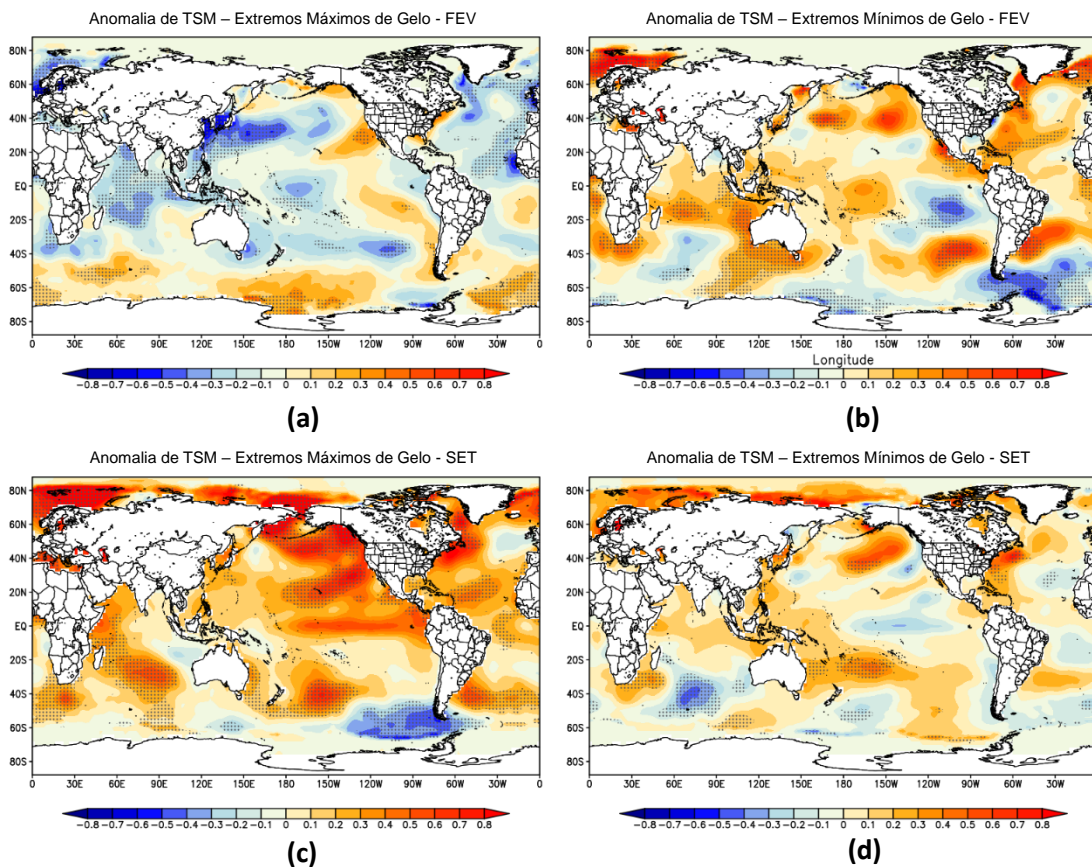
## 5.2.2. Compostos de TSM

### 5.2.2.1 Análise dos Compostos de TSM (setor MBA)

#### a) Fevereiro

Para o setor MBA considerando os compostos de anomalias de TSM observadas para o mês de fevereiro nos casos de extremos máximos de extensão de gelo (quintil extremo máximo) (**Figura 20a**), notam-se, anomalias negativas de TSM sobre o setor MBA, como esperado. Nas proximidades do setor MW, são observadas anomalias inversas. Nas latitudes correspondentes ao sul da AS são registradas anomalias positivas.

No Atlântico Tropical Norte, as águas estão mais frias do que no Atlântico Tropical Sul caracterizando um gradiente negativo de TSM e uma fase negativa do AMM. Este processo está associado à intensificação da Alta Subtropical do Atlântico Norte, ao fortalecimento dos alísios de nordeste e à maior evaporação das águas superficiais no Atlântico Norte, com o inverso ocorrendo no Atlântico Sul. Centros significativos negativos são observados no Atlântico Norte próximo à costa da África enquanto centros significativos positivos são observados no Atlântico Subtropical nas vizinhanças do MW. Gradiente negativo também ocorre no Atlântico Subtropical, uma vez que as águas oceânicas superficiais entre aproximadamente 30° e 40°S estão mais frias do que ao sul destas latitudes.



**Figura 20** – Compostos de anomalias de temperatura da superfície do mar (°C) relacionados aos quintis extremos de extensão de gelo no MBA. (a) (b) fevereiro e (c) (d) setembro. Lado esquerdo: quintil extremo máximo. Lado direito: quintil extremo mínimo. Áreas com 90% de significância estão pontilhadas (teste *t-student*).

Os anos em que ocorreram os meses de fevereiro representativos do quintil extremo máximo de extensão de gelo ocorreram quase todos na década de 1980 e foram: 1981, 1982, 1983, 1984, 1985, 1986, 1987 e 2000 (**Tabela 6**). Faz-se necessário observar

quais sinais do índice AMM ocorreram nos meses de fevereiro dos anos supracitados para analisar se há concordância com a fase do modo AMM. Assim, dos oito referidos anos, em sete há um sinal negativo do AMM o que mostra coerência com o gradiente e padrão de anomalias observado no composto apresentado. Entretanto, nestes mesmos oito anos, há cinco anos com sinal positivo do GSA, o que em princípio não corroboraria com o gradiente negativo e fase negativa do GSA observados no composto.

Nos extremos máximos de gelo no mês de fevereiro no setor MBA, ocorre: TSM mais fria no setor MBA, TSM mais quente no setor MW, TSM mais fria no Atlântico Tropical Norte e mais quente no Atlântico Tropical Sul, gradiente negativo de anomalias. Também TSM mais fria no Atlântico Sul/Subtropical e mais quente ao sul desta região. Índices climáticos baseados na TSM podem reunir informações relacionadas à processos físicos que apresentam grande variabilidade. Os índices AMM e GSA são baseados na distribuição de anomalias de TSM no Atlântico Tropical e Subtropical, respectivamente, e se adequam a este critério. Particularmente, o AMM é o modo dominante de variabilidade da TSM no Atlântico Tropical.

De acordo com os compostos de anomalias de TSM observadas para o mês de fevereiro, nos casos de extremos mínimos de extensão de gelo (**Figura 20b**), notam-se anomalias negativas de até  $-0,6^{\circ}\text{C}$  no Atlântico Subtropical e nas proximidades do MW e anomalias positivas de até  $+0,7^{\circ}\text{C}$  no Atlântico Sul próximo ao sudeste da América do Sul. As anomalias positivas observadas no setor MBA são visíveis, porém discretas. Já no MW, anomalias inversas, portanto negativas. No Atlântico Norte predominam anomalias ligeiramente positivas. Entretanto, na região tropical há a presença de anomalias negativas e positivas na porção sul o que acarreta em um gradiente negativo de TSM inter-hemisférico e estabelece a fase negativa do AMM. Com relação à significância estatística, há registro de um centro significativo negativo que acompanha as anomalias negativas nos arredores do MW e entre a América do Sul e a Península Antártica. Um centro significativo menor é observado no núcleo das anomalias positivas ao largo do sudeste da América do Sul. Em relação ao GSA, a fase é positiva, pois no Atlântico Sul as águas estão mais quentes do que na porção mais ao sul, diferenças e contrastes que estão bem visíveis na **Figura 20b**.

Os anos em que ocorreram os meses de fevereiro representativos do quintil extremo mínimo de extensão de gelo foram: 1992, 2003, 2008, 2009, 2010, 2013, 2014 e

2015 (**Tabela 6**). Dos oito referidos anos supracitados, em cinco deles foram observados sinais negativos do AMM, o que apresenta coerência com o gradiente de anomalias de TSM descrito e com a fase do AMM. Nestes mesmos anos, em seis foram registrados sinais positivos do GSA, o que corrobora com o gradiente positivo e a fase positiva configurados e observados no composto. Neste caso de extremos mínimos de gelo, o gradiente meridional do Atlântico Tropical também se comportou de forma negativa e a fase do AMM também é negativa. No setor MBA, é discreta, porém visível a presença de anomalias positivas. Já no setor MW, anomalias inversas, portanto negativas. O gradiente no Atlântico Subtropical é inverso ao caso anterior, portanto positivo, uma vez que as águas entre 30° e 40°S estão mais quentes do que mais ao sul desta faixa de latitude e os sinais da grande maioria dos anos envolvidos são coerentes com este resultado.

## **b) Setembro**

Analisando os compostos de anomalias de TSM para o mês de setembro, nos casos de extremos máximos de extensão de gelo (quartil extremo máximo) (**Figura 20c**), são observadas anomalias negativas em uma grande região entre a América do Sul e a Antártica e anomalias positivas no Atlântico Tropical Sul e Subtropical próximo ao sudeste da América do Sul. No Atlântico Tropical Norte são registradas anomalias positivas superiores às do Atlântico Tropical Sul, porém inferiores às do Atlântico Subtropical. Tendo como recorte espacial o Atlântico Tropical de ambos os hemisférios, tem-se um gradiente de anomalias positivo e uma fase positiva do AMM, pois considera-se, pelos resultados no mapa, as águas do Atlântico Tropical Norte mais aquecidas do que as do Atlântico Tropical Sul. Centros significativos despontam nas principais regiões de anomalias positivas acima descritas, ou seja, centros significativos positivos surgem no Atlântico Tropical Sul e Subtropical adjacente ao sudeste da América do Sul e centros significativos negativos são observados entre a Antártica e a América do Sul, incluindo o sul do Pacífico Leste. Em relação ao GSA, se observa a fase negativa do índice.

Os anos em que ocorreram os meses de setembro representativos do quartil extremo máximo de extensão de gelo foram: 1986, 1997, 2004, 2010, 2013, 2015, 2017 e 2018 (**Tabela 6**). Dos oito referidos anos supracitados, em cinco deles o sinal do AMM foi positivo e também em cinco o sinal do GSA foi negativo, concordando com os gradientes de anomalias de TSM observados no composto, tanto no Atlântico Tropical como no Subtropical. na análise para o mês de setembro, considerando os casos de



extremos mínimos de extensão de gelo (quartil extremo mínimo) (**Figura 20d**), são registradas anomalias negativas de apenas  $-0,1^{\circ}\text{C}$  no Atlântico Tropical Sul e anomalias positivas de até  $+0,2^{\circ}\text{C}$  no Atlântico Subtropical nas adjacências do sudeste da América do Sul. No Atlântico Tropical Norte são observadas anomalias positivas, porém bem próximas a zero. Da mesma maneira que o caso anterior, observam-se águas levemente mais aquecidas no Atlântico Tropical Norte, o que marca um gradiente meridional positivo de anomalias de TSM entre os dois hemisférios. Esta situação também configura uma fase positiva do padrão AMM. Da mesma maneira que o Atlântico Tropical, no Atlântico Subtropical as anomalias positivas estão mais ao norte, descrevendo um gradiente positivo e uma fase positiva do índice GSA.

Os anos em que ocorreram os meses de setembro representativos do quartil extremo mínimo de extensão de gelo foram: 1983, 1988, 1992, 2002, 2005, 2006, 2007 e 2016 (**Tabela 6**). Dos oito anos citados, em cinco deles ocorreu o sinal positivo do AMM e em seis ocorreu também sinal positivo do GSA, o que corrobora com o padrão de anomalias verificado no composto que aponta águas mais quentes no Atlântico Tropical Norte descrevendo um gradiente positivo de TSM e águas mais quentes no Atlântico Sul/Subtropical em relação ao setor mais à sul. Há escassez de centros significativos nos oceanos circundantes à AS, tendo sido observado somente um pequeno centro significativo negativo no sudeste do Atlântico Subtropical.

Carpenedo e Ambrizzi (2016) destacaram que nos eventos de expansão de gelo marinho no setor MBA, há um resfriamento da TSM neste setor e no Pacífico Sul, o que gera redução de temperatura do ar próximo à superfície. As anomalias negativas (frias) de TSM e de temperatura do ar são bastante abrangentes espacialmente compreendendo o setor MBA em torno de  $60^{\circ}\text{S}$  (todo o Pacífico Sul centro-leste). Assim, durante períodos de extremos de expansão há reforço dos gradientes meridionais de temperatura e pressão em superfície, o que reduz a pressão ao nível médio do mar e possivelmente favorece uma maior atividade ciclônica na região (YUAN, 2004; SONG et al. 2011).

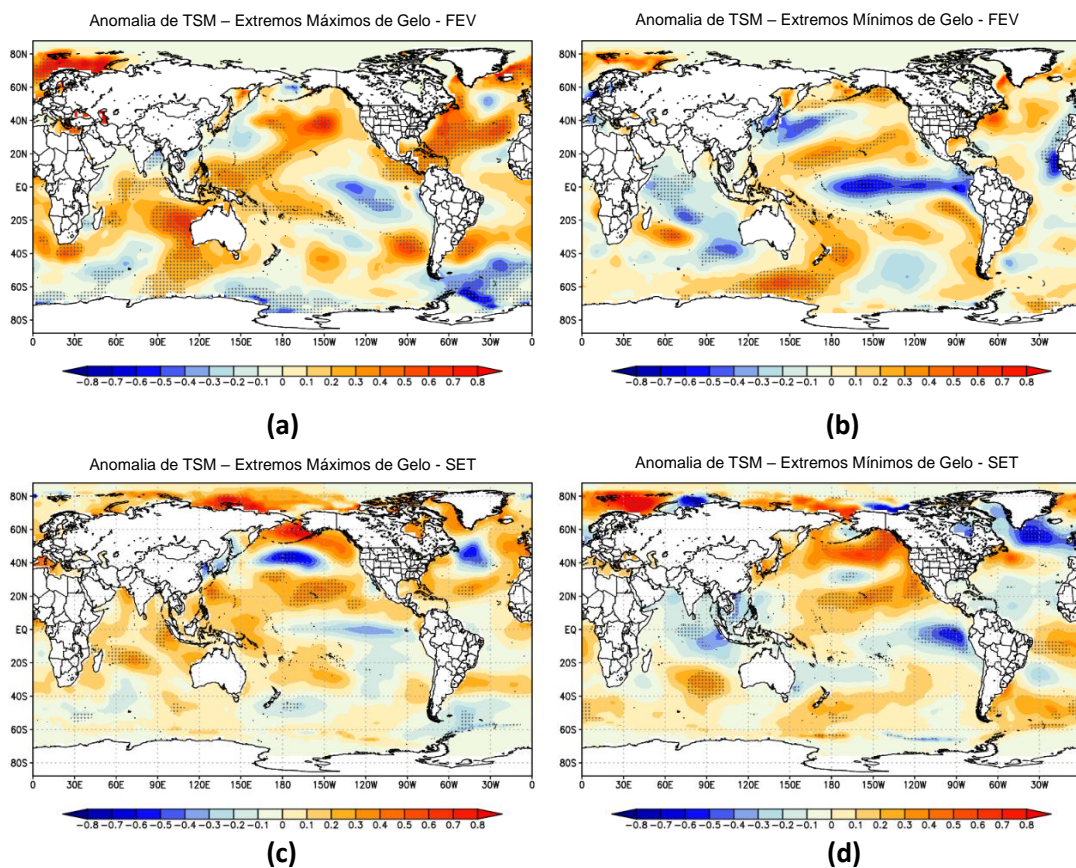
#### **5.2.2.2 Análise dos Compostos de TSM (setor MW)**

##### **a) Fevereiro**

Para o setor MW, considerando os compostos de anomalias de TSM, observados para o mês de fevereiro nos casos de extremos máximos de extensão de gelo (**Figura**

**21a)**, notam-se anomalias positivas na bacia do Atlântico Tropical Sul próximo ao sudeste da América do Sul. Verificam-se anomalias negativas no extremo sul do Atlântico Subtropical e nas adjacências do setor MW. No Atlântico Tropical Sul, além do registro de anomalias positivas há também anomalias negativas com valores próximos à zero.

Na bacia do Atlântico Tropical Norte, as anomalias também são positivas com valores próximos à zero, mas com anomalias ligeiramente superiores à bacia do Atlântico Tropical Sul. Este padrão de anomalias, onde as mesmas apontam valores semelhantes ao comparar os dois setores do Atlântico, sugere gradiente de anomalias neutro, pois as diferenças entre as anomalias dos dois setores do Atlântico são muito reduzidas. Neste sentido, pode-se apontar que não há uma fase definida do AMM ou a fase é neutra. Em relação ao Atlântico Subtropical, ao analisar a **Figura 21a**, nota-se que a porção norte apresenta anomalias positivas e a porção sul aponta TSM mais fria. Neste sentido, a análise sugere um gradiente positivo de anomalias e uma fase positiva do padrão GSA.



**Figura 21** – Compostos de anomalias de temperatura da superfície do mar ( $^{\circ}\text{C}$ ) relacionados aos quintis extremos de extensão de gelo no MW. (a) (b) fevereiro e (c) (d) setembro. Lado esquerdo: quintil extremo máximo. Lado direito: quintil extremo mínimo. Áreas com 90% de significância estão pontilhadas (teste *t-student*).

Os anos em que ocorreram os meses de fevereiro representativos do quintil extremo máximo de extensão de gelo foram: 1995, 2003, 2004, 2008, 2012, 2013, 2014 e 2015 (**Tabela 7**). Destes oito anos, em quatro ocorreram sinais negativos do AMM e em outros quatro o sinal foi positivo. Estes dados concordam com um gradiente neutro de anomalias, pois nenhum dos sinais opostos do AMM foi predominante. No que tange ao GSA, destes mesmos oito anos, em cinco o sinal foi positivo, o que é coerente com o observado no composto (fase positiva do GSA). Um centro significativo positivo é observado próximo à costa do sudeste da América do Sul, enquanto um grande centro negativo está presente no Atlântico Subtropical e nas vizinhanças do setor MW.

De acordo com os compostos de anomalias de TSM observadas para o mês de fevereiro, nos casos de extremos mínimos de extensão de gelo (**Figura 21b**), notam-se fracas anomalias positivas à oeste do Atlântico Tropical Norte e anomalias negativas à leste. Acompanhando as anomalias positivas da bacia norte, destacam-se anomalias também positivas no Atlântico Tropical Sul ao longo da costa do Brasil e do sudeste da América do Sul e fracas anomalias negativas no setor central do Atlântico Tropical Sul. Observam-se pequenas diferenças entre as anomalias dos dois setores do Atlântico Tropical, sugerindo, da mesma forma que o caso anterior, um gradiente neutro de anomalias no Atlântico. No tocante ao Atlântico Subtropical, as regiões com anomalias positivas e negativas são mais esparsas, mas considerando a região entre 30° e 40°S, há predomínio de anomalias positivas e a porção mais ao sul aponta anomalias positivas e negativas. Esta configuração sugere TSM ligeiramente mais aquecida na porção norte desta região e um gradiente positivo de anomalias e uma fase positiva do GSA.

Os anos em que ocorreram os meses de fevereiro representativos do quintil extremo mínimo de extensão de gelo foram: 1981, 1984, 1985, 1986, 1999, 2005, 2006 e 2017 (**Tabela 7**). Destes oito anos, em quatro ocorreram sinais negativos do AMM e em outros quatro o sinal positivo. Estes dados corroboram com a observação sobre um gradiente neutro de anomalias, pois nenhum dos sinais opostos do AMM prevaleceu. Neste caso, não se pode definir uma fase negativa ou positiva do padrão AMM. Sobre o índice GSA, dos oito anos, em seis se observou sinal positivo do índice, concordando com o apontado no composto, a fase positiva do GSA. Centros significativos são escassos em todo o Atlântico Tropical, de modo que há o registro de apenas um centro negativo no Atlântico Tropical Norte próximo à costa da África e outro centro positivo no extremo sul, no setor MW.

## b) Setembro

Analisando os compostos de anomalias de TSM para o mês de setembro, nos casos de extremos máximos de extensão de gelo (quartil extremo máximo) (**Figura 21c**), pode-se notar fracas anomalias positivas no norte do Atlântico Tropical Norte e fracas anomalias negativas no sul do Atlântico Tropical Norte. No Atlântico Tropical Sul, observam-se anomalias positivas fracas à leste e anomalias negativas fracas em sua porção central. No Atlântico Subtropical, intercalam-se anomalias positivas ao largo da costa do sudeste da América do Sul e anomalias negativas mais ao sul nas adjacências do Oceano Austral e MW. A alternância entre fracas anomalias positivas e negativas ao longo da bacia do Atlântico Tropical Norte e do Atlântico Tropical Sul indica gradiente meridional neutro de anomalias de TSM e uma fase neutra do AMM. Por outro lado, a configuração das anomalias no Atlântico Subtropical sugere um gradiente positivo e uma fase positiva do GSA.

Os anos em que ocorreram os meses de setembro representativos do quartil extremo máximo foram: 1981, 1987, 1988, 1991, 1995, 2007, 2014 e 2016 (**Tabela 7**). Dos oito anos citados, em todos o sinal do AMM foi positivo. Tais informações discordam com o gradiente neutro de anomalias no Atlântico Tropical, como é observado no composto. No caso de oito anos com sinal positivo do AMM, seria esperado um gradiente positivo e uma fase positiva do AMM, indicando águas superficiais mais quentes no Atlântico Tropical Norte em relação ao Atlântico Tropical Sul. Entretanto, não é o aspecto observado. Vale destacar que os valores positivos do índice AMM nestes oito anos são todos muito próximos à zero, o que contribui para um gradiente neutro ainda que todos os anos sejam positivos. Em relação ao índice GSA, dos oito anos, seis têm sinal positivo, o que concorda com as características das anomalias de TSM observadas. Há praticamente ausência de centros significativos no Atlântico Tropical, podendo-se destacar um pequeno centro negativo no sul do Atlântico Subtropical e um centro positivo também de reduzidas dimensões no norte do Atlântico Tropical Norte.

Na análise para o mês de setembro, considerando os casos de extremos mínimos de extensão de gelo (quartil extremo mínimo) (**Figura 21d**), são registradas anomalias negativas no Atlântico Tropical Norte. No Atlântico Tropical Sul são observadas anomalias positivas no norte da bacia e negativas no sul. No Atlântico Subtropical e ao largo do sudeste da América do Sul são vistas anomalias positivas. Este padrão confere

um gradiente negativo de anomalias e uma fase negativa do AMM, visto que a TSM do Atlântico Tropical Norte está mais fria do que a do Atlântico Tropical Sul. Esta configuração de anomalias no Atlântico Subtropical aponta também um gradiente negativo na região, ou seja, uma fase negativa do padrão GSA.

Os anos em que ocorreram os meses de setembro representativos do quintil extremo mínimo de extensão de gelo foram: 1984, 1985, 1986, 1989, 1990, 1994, 2017, 2018 (**Figura 7**). Dos oito anos, em cinco deles o sinal do AMM foi negativo, o que concorda com a observação realizada no composto, onde notam-se águas mais frias no Atlântico Tropical Norte e uma fase negativa do AMM. A mesma análise é válida para o índice GSA, de modo que dos oito anos, em seis o sinal do GSA é negativo. Com relação aos centros significativos, os mesmos praticamente não são observados do longo do Atlântico Tropical. No entanto, pode-se destacar um pequeno centro positivo no setor central do Atlântico Tropical Sul. Estes resultados concordam com Carpenedo e Ambrizzi (2016) que observaram durante eventos extremos de expansão de gelo marinho no MW durante o inverno austral (setembro) um resfriamento da TSM neste setor e no Atlântico Sul, o que resulta em redução de temperatura do ar próxima à superfície.

Carpenedo (2017) observou que a situação de retração de gelo no setor leva aos efeitos opostos, como anomalias quentes (positivas) de TSM no referido setor e no Atlântico Sul entre 45° e 60°S. Por outro lado, no Pacífico Sul, foram observadas anomalias frias (negativas) nas latitudes médias e altas e nos mares de Ross e Amundsen. Isso pode indicar uma retroalimentação negativa entre oceano e atmosfera, de modo que com a anomalia negativa de TSM, há uma redução nos fluxos de calor em superfície. Desta forma, há um aumento de calor armazenado no oceano, então a TSM aquece. Assim, os fluxos de calor em superfície aumentam. O resfriamento da TSM no Pacífico Sul resulta em fortalecimento dos gradientes meridionais de temperatura e pressão.

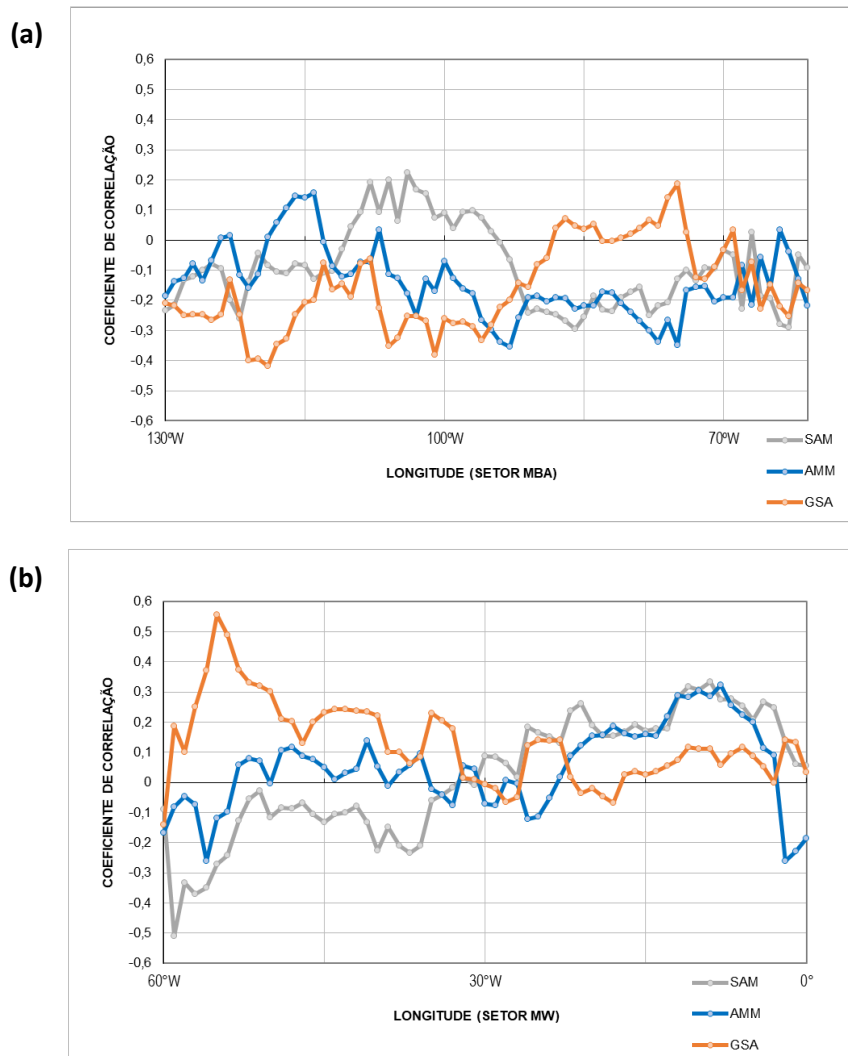
### **5.2.3. Correlações**

#### **5.2.3.1 Análise das Correlações entre os Índices e a Extensão de Gelo Marinho no Mês de Fevereiro (setores MBA e MW)**

Os gráficos representados pelas **Figuras 22 e 23** mostram a correlação da extensão de gelo marinho nos meses de fevereiro (**Figuras 22a e 22b**) e de setembro (**Figuras 23a e 23b**) com os índices AMM (linha azul), SAM (linha cinza) e GSA (linha laranja) em

diferentes longitudes dos setores estudados. O eixo vertical mostra o coeficiente de correlação e o eixo horizontal mostra a variação deste coeficiente em função da longitude. Assim, pode-se ver em quais setores/longitudes as correlações são mais fortes e mais fracas ou se são positivas ou negativas. A análise é para todo o período 1981-2018.

Na **Figura 22**, é possível observar que na maioria das longitudes os três índices estão em fase, ou seja, quando um índice apresenta correlação positiva ou negativa o outro também apresenta. Este processo só não é observado basicamente em longitudes isoladas, como em parte dos setores MBA (em torno de 120° e 80°W) (**Figura 22a**) e MW (55° e 5°W) (**Figura 22b**), entretanto com pequenas diferenças nos coeficientes de correlação.



**Figura 22** – Correlações dos índices SAM (linha cinza), AMM (linha azul) e GSA (linha laranja) com a extensão de gelo marinho em diferentes longitudes do MBA (a) e do MW (b). Período 1981-2018 para o mês de fevereiro.

No auge da retração do gelo, em fevereiro, o índice SAM apresenta as correlações mais fortes negativas (abaixo de -0,4) entre as longitudes 60° e 55°W (setor MW, **Figura 22b**) e as correlações mais fortes positivas (acima de +0,3) apenas na longitude em torno de 10° W (setor MW, **Figura 22b**). Assim, entre os dois setores, o MW é o setor onde correlações mais fortes ocorrem entre a extensão de gelo e o SAM. Deve-se destacar que os sinais das correlações variam bastante conforme a mudança de longitude, pois a correlação compara a extensão de gelo do mesmo ponto de longitude. De acordo com Pezza, Hashid e Simmonds (2012) esta dinâmica sugere que os processos atmosféricos podem ter papel importante na modulação das variações no gelo marinho antártico.

Como dito, o gráfico do mês de fevereiro (**Figura 22**) mostra os índices AMM e GSA em fase com o índice SAM em basicamente todas as longitudes. Em relação ao AMM, este apresentou correlação mais forte negativa de aproximadamente -0,35 em 90° e 75°W (setor MBA, **Figura 22a**). Já a correlação mais forte positiva (acima de +0,3) ocorre no setor MW coincidindo com o SAM (em torno de 10°W). Quanto ao GSA, a correlação mais forte negativa é de -0,4 e ocorre em 120°W (**Figura 22a**) e a correlação positiva mais forte ocorre no setor MW, cerca de +0,55 (em 55°W). Outras correlações próximas a -0,4 do GSA também foram observadas no setor MBA.

Pezza, Hashid e Simmonds (2012) apontou correlações negativas entre a média de extensão de gelo marinho e o SAM para todos os meses no setor MBA, o que mostra coerência com o apresentado na **Figura 22a** que indica na maior parte do setor MBA correlações negativas entre o SAM e a extensão de gelo. Pezza, Hashid e Simmonds (2012) acrescenta que as áreas com correlações negativas apresentam uma retração para sul da extensão de gelo quando ocorrem *westerlies* mais fortes do que o normal. Esta situação também é válida para a porção oeste do setor MW (60° a 30°W) que também apresentou correlações negativas entre o SAM e a extensão de gelo marinho em fevereiro.

#### **5.2.3.2 Análise das Correlações entre Índices e a Extensão de Gelo Marinho no Mês de Setembro (setores MBA e MW)**

Na **Figura 23**, que diz respeito a setembro, no gráfico referente ao setor MW (**Figura 23b**) é possível observar que na maioria das longitudes os três índices estão em fase, porém no setor MBA o índice SAM não está em fase com os índices AMM e GSA entre 80° e 60°W. No auge da expansão do gelo, em setembro, o índice SAM apresenta

as correlações mais fortes negativas (abaixo de  $-0,5$ ) entre as longitudes  $35^\circ$  e  $30^\circ\text{W}$  (**Figura 23b**) e as correlações mais fortes positivas ( $+0,3$ ) no setor MBA (**Figura 23a**) na longitude de  $105^\circ\text{W}$ .

No gráfico de setembro (**Figura 23**) os índices AMM e GSA estão em fase em praticamente todas as longitudes dos dois setores. Em relação ao AMM, este apresentou correlação mais forte negativa de aproximadamente  $-0,15$  em  $95^\circ\text{W}$  (setor MBA), visto que as correlações negativas do AMM com a extensão de gelo não são fortes. Já a correlação mais forte positiva ( $+0,35$  a  $+0,4$ ) ocorre também no setor MBA entre  $75^\circ$  e  $60^\circ\text{W}$ . Quanto ao GSA, a correlação mais forte negativa é de  $-0,35$  em  $105^\circ\text{W}$  (setor MBA) e a correlação positiva mais forte ocorre no setor MW, cerca de  $+0,4$  (em  $25^\circ\text{W}$ ).



**Figura 23** – Correlações dos índices SAM (linha cinza), AMM (linha azul) e GSA (linha laranja) com a extensão de gelo marinho em diferentes longitudes do MBA (a) e do MW (b). Período 1981-2018 para o mês de setembro.



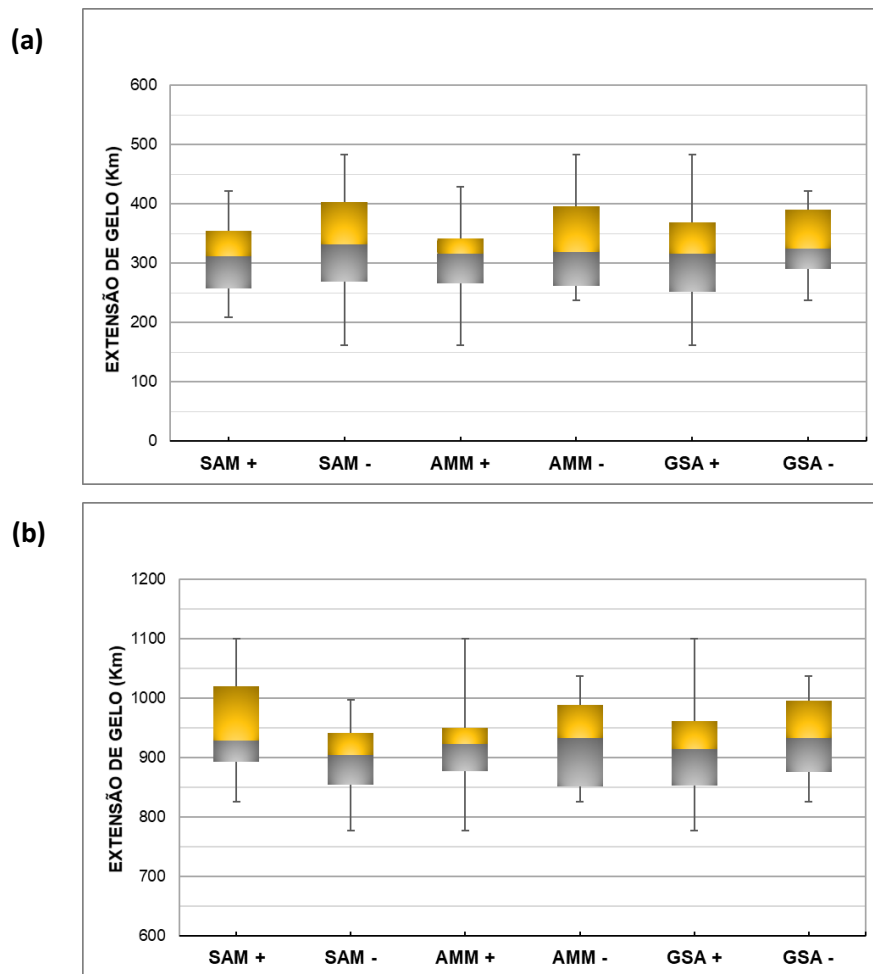
Vale ressaltar que a maior correlação negativa com o SAM no gráfico de fevereiro aparece no setor MW (-0,5) e esta mesma localidade apresenta correlação mais fraca de apenas -0,2 no gráfico de setembro, quando as extensões de gelo são superiores. As correlações do SAM, em geral, são mais fortes em setembro. Isso pode estar relacionado à maior extensão climatológica de gelo em setembro e, conseqüentemente, à maior variabilidade das extensões de gelo, bem como ao fato de o SAM ser mais fraco no verão e mais intenso na primavera (THOMPSON; WALLACE, 2000; VASCONCELLOS, 2012; FOGT; MARSHALL, 2020). Pezza, Hashid e Simmonds (2012) realizaram análise de correlação semelhante entre o SAM e a extensão de gelo, entretanto para o período 1979-2000 utilizando todos os meses do ano. Os autores descobriram correlações mais fortes no sudeste do Oceano Índico (+0,5).

Para o mês de fevereiro, os resultados com o SAM apontaram uma correlação negativa para a maior parte do setor MBA, concordando com Pezza, Hashid e Simmonds (2012). Segundo os autores, no Oceano Índico e Pacífico, as correlações implicam que a intensificação dos *westerlies* estão associadas com um avanço da extensão de gelo para norte. Nas regiões de correlação negativa (MBA e oeste do MW), o gelo apresenta uma retração para sul quando ocorrem *westerlies* mais intensos do que o normal, região coincidente com a Península Antártica, onde também foram observadas correlações negativas na atual pesquisa (PEZZA; HASHID; SIMMONDS, 2012).

#### **5.2.4. Análise dos Diagramas Boxplots**

##### **5.2.4.1 Análise dos Índices Isolados**

A análise através dos diagramas *boxplots* utilizando os sinais de cada índice separadamente é importante para identificar quais sinais se relacionam com maiores ou menores extensões de gelo marinho, levando à discussão sobre qual padrão e seu respectivo sinal se associa com as extensões máximas e mínimas de gelo marinho, principalmente com a informação sobre a mediana e os máximos e mínimos alcançados nos diagramas. A presente análise complementa os resultados encontrados anteriormente. Deste modo, foram construídos os *boxplots* da **Figura 24** que mostram o comportamento da extensão de gelo em cada fase dos índices SAM, AMM e GSA no setor MBA, separadamente, em fevereiro (**Figura 24a**) e em setembro (**Figura 24b**).



**Figura 24** – Boxplots representando a extensão média de gelo marinho antártico no setor MBA nos meses de fevereiro **(a)** e de setembro **(b)** para o período 1981-2018 nas fases positivas e negativas dos padrões SAM, AMM e GSA.

A **Figura 24a** e a **Tabela 8** mostram que a fase positiva (negativa) dos três índices é relacionada à uma menor (maior) extensão de gelo marinho em fevereiro. Esse comportamento se repete no mês de setembro (**Figura 24b** e **Tabela 8**) somente para os índices AMM e GSA, não ocorrendo para o índice SAM que inverte o seu sinal e sua fase positiva está associada à maior extensão de gelo marinho. Em setembro, o AMM e o GSA apresentam comportamento muito semelhante a fevereiro em relação às extensões de gelo com seu sinal positivo (negativo) associado à menores (maiores) extensões de gelo. A **Tabela 8** resume as informações sobre médias de extensão de gelo, sabendo-se que na maioria dos casos analisados o índice/sinal de maior média coincide com o índice/sinal de maior mediana e vice-versa, observados nos *boxplots*. Nesta análise, pode-se destacar que o SAM+ (SAM-) se relaciona com extensões menores (maiores) em fevereiro e o inverso ocorre em setembro.

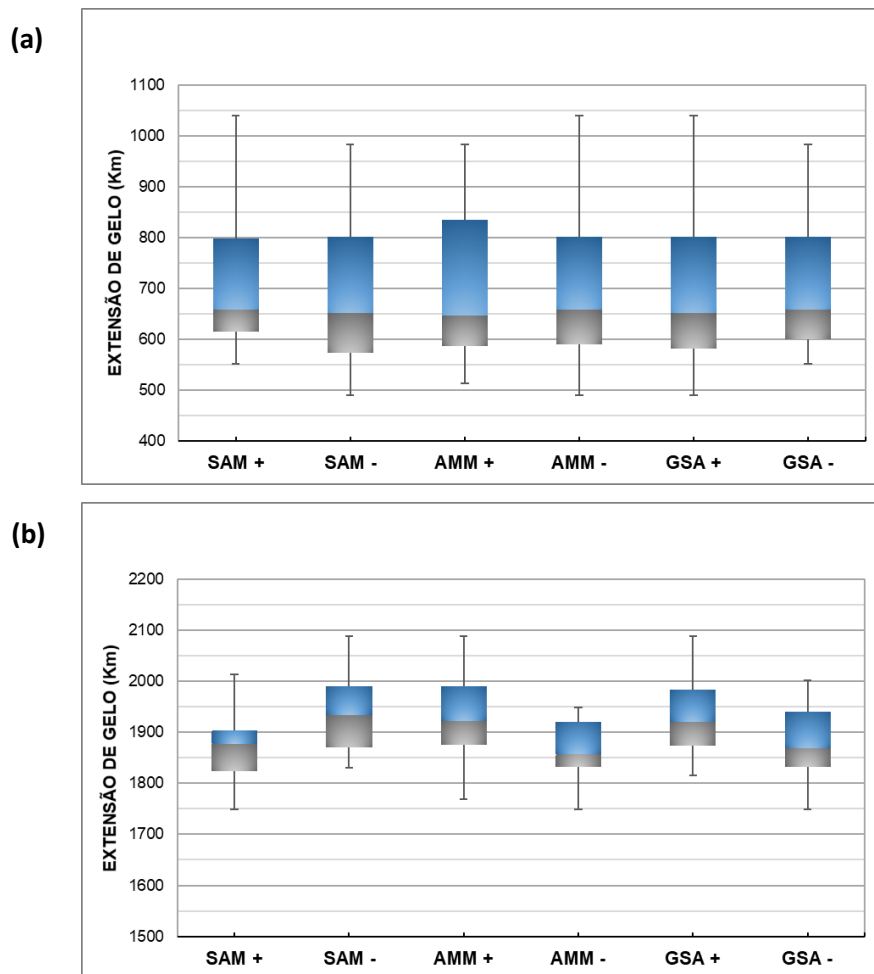
**Tabela 8** – Extensões médias de gelo marinho antártico no setor MBA nos meses de fevereiro e setembro nas fases positivas e negativas dos índices SAM, AMM e GSA. Em negrito, é destacada a maior extensão de cada índice.

	FEVEREIRO	SETEMBRO
<b>SAM +</b>	313,8 km	<b>949,2 km</b>
<b>SAM -</b>	<b>332,3 km</b>	899,6 km
<b>AMM +</b>	307,4 km	920,4 km
<b>AMM -</b>	<b>331,7 km</b>	<b>924,8 km</b>
<b>GSA +</b>	317,3 km	914,3 km
<b>GSA -</b>	<b>329,5 km</b>	<b>931,1 km</b>

Ao estender as análises e discussões para o setor MW (**Figura 25**) e ao observar o comportamento da extensão de gelo no mês de fevereiro nas fases do SAM (**Figura 25a**), nota-se maior (menor) extensão na fase positiva (negativa). Inclusive, na fase positiva, observa-se extremo mínimo e máximo de extensão superiores aos da fase negativa e, também, valores compreendidos entre primeiro e terceiro quartil superiores. No entanto, pode-se dizer que não há médias discrepantes, uma vez que a fase positiva registra média de 710 km e a fase negativa apresenta 698 km, ou seja, parece que as fases influenciam mais os extremos de gelo o que é coerente com os compostos.

No tocante ao padrão AMM, as duas fases do índice mostram comportamentos muito similares em termos de médias (fase positiva com 706 km e negativa 704 km), sendo que a fase positiva mostra menor variação entre extremos mínimo e máximo. Em relação ao GSA, este não apresenta diferença considerável em relação ao AMM.

Ao observar e comparar os gráficos do MBA e do MW em relação ao SAM, nota-se pelas “caixas” nos diagramas que este padrão inverte seu sinal também ao comparar os diferentes setores, de modo que a relação do sinal com o extremo de gelo observado é sempre invertida, tanto na comparação entre setores como na comparação sazonal (**Figuras 24 e 25 e Tabelas 8 e 9**).



**Figura 25** – Boxplots representando a extensão média de gelo marinho antártico no setor MW nos meses de fevereiro **(a)** e de setembro **(b)** para o período 1981-2018 nas fases positivas e negativas dos padrões SAM, AMM e GSA.

No mês de setembro (**Figura 25b**), em relação ao SAM, a situação se inverte ao comparar com fevereiro, pois é o SAM negativo que apresenta a maior média de extensão (1934 km) enquanto a fase positiva registra 1872 km. A variação de extensão de gelo entre extremo mínimo e máximo é semelhante na fase negativa e na positiva, porém ao observar as extensões mínima e máxima, e não apenas a média, a fase negativa mostra também resultados superiores. No setor MW, em setembro, parece que a fase negativa do SAM exerce influência na circulação atmosférica contribuindo para maiores extensões de gelo marinho. Entretanto, o mesmo não se pode dizer em relação ao verão no mês de fevereiro. Sobre as relações do AMM com a extensão de gelo, a situação é contrária ao do SAM, pois é na fase positiva (negativa) que surgem as maiores (menores) extensões de gelo. No que se refere às médias, o AMM positivo apresenta 1926 km e o AMM negativo registra 1863 km. Em termos de médias de extensão, o SAM negativo é

semelhante ao AMM positivo e o SAM positivo é muito próximo do AMM negativo. Da mesma forma que a fase negativa do SAM parece relacionar-se com maiores extensões de gelo, a fase positiva do AMM também mostra esta tendência (**Tabela 9**)

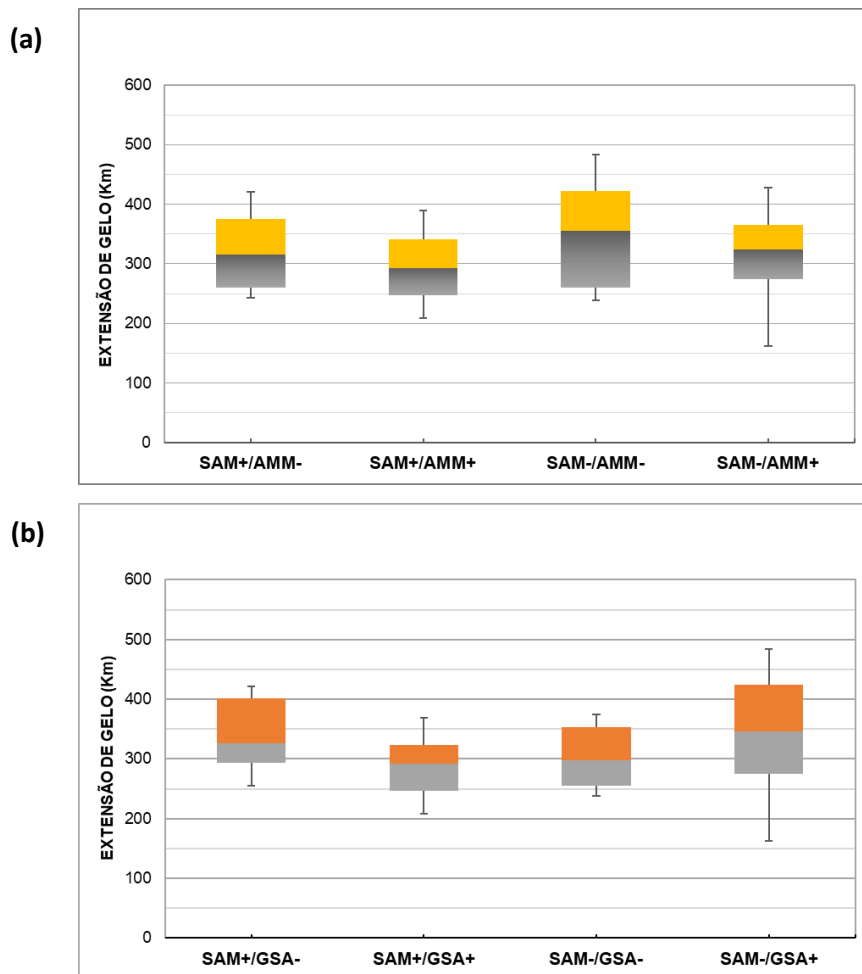
**Tabela 9** – Extensões médias de gelo marinho antártico no setor MW nos meses de fevereiro e setembro nas fases positivas e negativas dos índices SAM, AMM e GSA. Em negrito, é destacada a maior extensão de cada índice.

	FEVEREIRO	SETEMBRO
<b>SAM +</b>	<b>710,6 km</b>	1872,3 km
<b>SAM -</b>	698,6 km	<b>1934,1 km</b>
<b>AMM +</b>	<b>706,5 km</b>	<b>1926,2 km</b>
<b>AMM -</b>	704,4 km	1863,5 km
<b>GSA +</b>	702,5 km	<b>1927,3 km</b>
<b>GSA -</b>	<b>709,4 km</b>	1880,7 km

#### 5.2.4.2 Análise dos Índices Combinados (setor MBA)

Na análise dos *boxplots* que contemplam as combinações de fases, foi analisada a variação da extensão de gelo nas combinações de fases dos índices SAM/AMM e SAM/GSA com discussão relativa às maiores e menores extensões médias e medianas de gelo, os extremos máximos e mínimos alcançados e a variação da extensão de gelo entre o primeiro e o terceiro quartil. Assim, busca-se investigar relações entre o comportamento da variação do gelo em cada combinação de fase SAM/AMM e SAM/GSA.

Na **Figura 26a** observa-se que a maior mediana de gelo ocorre nas fases negativas dos padrões SAM/AMM com 355 km e a menor mediana ocorre nas fases positivas dos referidos padrões, com 292 km. Na combinação SAM-/AMM-, a de maior mediana, o mínimo é 238 km e o máximo é 483 km. Já na combinação SAM+/AMM+, a de menor mediana, a extensão de gelo entre mínimos e máximos varia entre 208 km e 389 km (**Figura 26a e Tabelas 10 e 11**).



**Figura 26** – Boxplots representando a extensão média de gelo marinho antártico no setor MBA no mês de fevereiro para o período 1981-2018 em cada uma das quatro combinações dos padrões SAM/AMM (a) e SAM/GSA (b).

Quando se analisa as extensões de gelo com as combinações restantes (SAM+/AMM- ou SAM-/AMM+), tem-se valores de extensões de gelo similares entre estas combinações. É importante destacar que dos oito anos que compõem o quintil extremo máximo, em quatro deles ocorreu a combinação (SAM-/AMM-), fato que reforça a informação de que as maiores extensões acontecem nesta combinação. Os outros quatro anos estão distribuídos em duas diferentes combinações.

Analogamente, a combinação SAM+/AMM+ comporta dois anos do quintil extremo mínimo e nenhum do quintil extremo máximo, sendo a combinação de menor mediana, mesmo tendo somente dois anos no quintil mínimo. Neste sentido, para o mês de fevereiro, os extremos máximos (mínimos) de gelo tendem a ocorrer nas fases negativas (positivas) dos padrões SAM e AMM (**Tabelas 10 e 11**).

Em relação aos padrões SAM/GSA (**Figura 26b**), a maior mediana ocorre na combinação SAM-/GSA+ com 345 km. Nesta combinação, o mínimo é de 162 km e o máximo é de 483 km. A menor mediana ocorre na combinação SAM+/GSA+ com 292 km e entre os mínimos e os máximos, a variação é de 208 km a 368 km.

Dos oito anos que compõem o quintil máximo, em cinco deles ocorreu a combinação SAM-/GSA+. Isso reforça a informação das maiores extensões ocorrerem nesta combinação. A combinação SAM+/GSA+, por outro lado, não possui anos pertencentes ao quintil máximo e possui quatro anos inseridos no quintil mínimo. Em fevereiro, os extremos máximos têm relação com as combinações SAM-/GSA+ e os extremos mínimos com as combinações SAM+/GSA+ (**Tabelas 10 e 11**).

O diagrama *boxplot* do mês de setembro (**Figura 27a**) mostra dinâmica oposta ao do mês de fevereiro. Verifica-se a maior mediana na combinação (SAM+/AMM+), com 949 km, tendo esta combinação quatro dos oito anos no quintil máximo. Os outros quatro anos estão distribuídos em três combinações diferentes. Na referida combinação positiva, a extensão varia entre mínima e máxima de 835 à 1098 km.

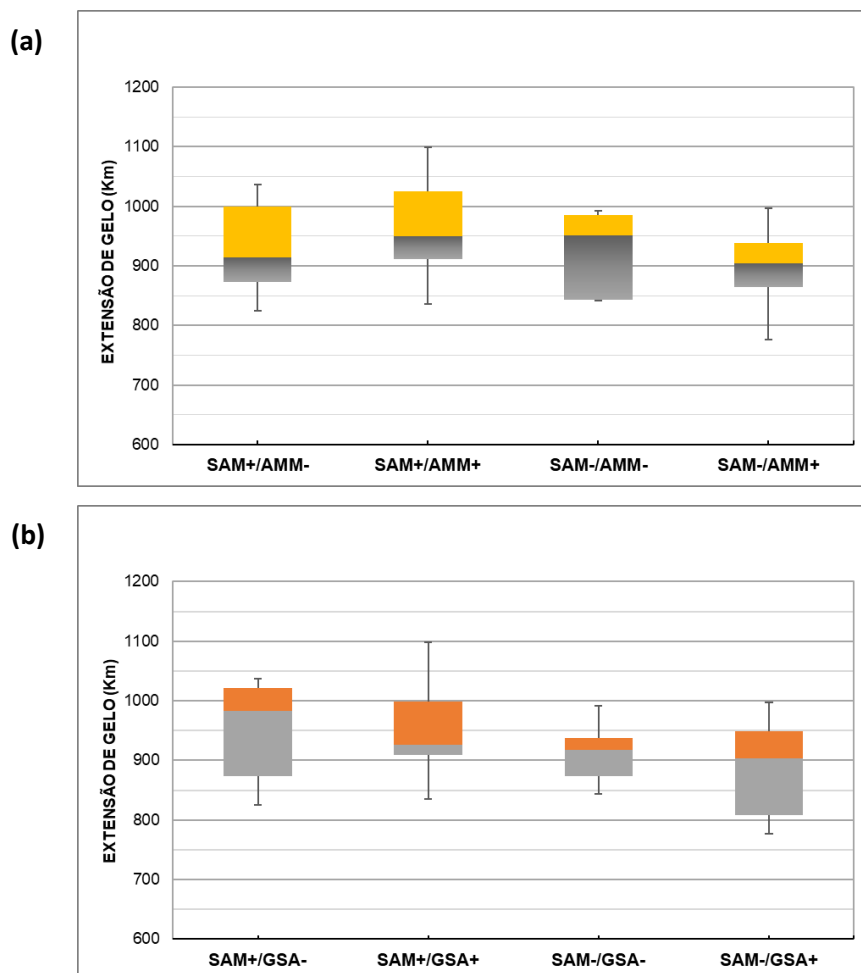
No entanto, a combinação negativa dos padrões não é a que apresenta a menor mediana. Essa característica foi apresentada pela combinação SAM-/AMM+, com 904 km. Essa combinação comporta quatro anos de extremos mínimos de gelo do quintil e apenas um ano dentre os extremos máximos (**Tabelas 10 e 11**).

Em relação ao quintil mínimo, dos oito anos, dois ocorrem na combinação SAM-/AMM- e quatro na combinação SAM-/AMM+, ou seja, pode ser que o SAM- tenha se relacionado mais fortemente com os extremos mínimos. Assim, pode-se dizer que o SAM- (SAM+) favorece extremos mínimos (máximos) de gelo, enquanto o AMM manteve o seu sinal positivo. Basicamente, em setembro ocorreu uma inversão em relação ao mês de fevereiro.

Quando se analisa a combinação SAM/GSA (**Figura 27b**), a maior mediana (982 km) é apresentada pela combinação SAM+/GSA- com variação entre 824 e 1036 km entre mínimo e máximo. A menor mediana ocorre na combinação oposta (SAM-/GSA+) com 903 km. A variação entre mínimo e máximo oscila de 776 à 997 km. A situação é aproximadamente oposta ao que se observa no mês de fevereiro.

A combinação que detém a maior mediana apresenta quatro anos inseridos no quintil máximo de extensão de gelo enquanto que a combinação que possui a menor

mediana apresenta cinco anos pertencentes ao quintil mínimo e estas informações ajudam a confirmar as combinações que apresentam valores máximos e mínimos de extensão de gelo marinho (**Tabelas 10 e 11**).



**Figura 27** – Boxplots representando a extensão média de gelo marinho antártico no setor MBA no mês de setembro para o período 1981-2018 em cada uma das quatro combinações dos padrões SAM/AMM (a) e SAM/GSA (b).

As **Tabelas 10 e 11** mostram um resumo dos anos em que ocorreram as combinações dos padrões nos meses de fevereiro e de setembro no setor MBA. Pode-se observar, na **Tabela 10**, uma síntese de parte do que foi discutido, ou seja, em relação às combinações de maior e menor mediana, bem como as combinações que detém o maior número de anos pertencentes ao quintil máximo e ao quintil mínimo de extensão de gelo marinho antártico.

Especificamente, a **Tabela 11** mostra as médias de extensão de gelo marinho em cada combinação, bem como as combinações de maiores (em verde) e menores (em



vermelho) extensões de gelo, o que na grande maioria dos casos coincidiu com as combinações de maiores e menores medianas de extensão de gelo.

**Tabela 10** – Classificação dos anos com sinais positivos e negativos para as combinações dos índices SAM/AMM (a) e SAM/GSA (b) para fevereiro e setembro no setor MBA. Em verde: anos representativos do quintil extremo máximo de gelo. Em vermelho: anos representativos do quintil extremo mínimo. Em cinza: combinação de maior e menor extensão de gelo em setembro. Entre parênteses: número total de anos por combinação.

(a)	FEVEREIRO	SETEMBRO
SAM+ / AMM-	1982, 1985, 1988, 1989, 1990, 1993, 1994, 1995, 2000, 2009, 2014, 2015, 2016, 2018 (14)	1982, 1984, 1985, 1986, 1992, 1993, 2018 (7)
SAM+ / AMM+	1998, 2002, 2005, 2007, 2008, 2011, 2013 (7)	1990, 1995, 2001, 2004, 2008, 2010, 2012, 2015, 2016, 2017 (10)
SAM- / AMM-	1983, 1984, 1986, 1987, 1991, 1992, 1999, 2001, 2003 (9)	1983, 1994, 1997, 2000, 2002 (5)
SAM- / AMM+	1981, 1996, 1997, 2004, 2006, 2010, 2012, 2017 (8)	1981, 1987, 1988, 1989, 1991, 1996, 1998, 1999, 2003, 2005, 2006, 2007, 2009, 2011, 2013, 2014 (16)

(b)	FEVEREIRO	SETEMBRO
SAM+ / GSA-	1982, 1985, 1990, 1995, 2000, 2002, 2005, 2009, 2011, 2018 (10)	1984, 1985, 1986, 1992, 1993, 2010, 2017, 2018 (8)
SAM+ / GSA+	1988, 1989, 1993, 1994, 1998, 2007, 2008, 2013, 2014, 2015, 2016 (11)	1982, 1990, 1995, 2001, 2004, 2008, 2012, 2015, 2016 (9)
SAM- / GSA-	1991, 1992, 1997, 2004, 2012 (5)	1981, 1983, 1989, 1996, 1997, 1998, 1999, 2011, 2014 (9)
SAM- / GSA+	1981, 1983, 1984, 1986, 1987, 1996, 1999, 2001, 2003, 2006, 2010, 2017 (12)	1987, 1988, 1991, 1994, 2000, 2002, 2003, 2005, 2006, 2007, 2009, 2013 (12)

**Tabela 11** – Extensões médias de gelo marinho no setor MBA nas distintas combinações dos padrões SAM/AMM **(a)** e SAM/GSA **(b)** em fevereiro e em setembro. Em verde: maior extensão. Em vermelho: menor extensão.

<b>(a)</b>	<b>FEVEREIRO</b>	<b>SETEMBRO</b>
SAM+ / AMM-	320,9 km	927,3 km
SAM+ / AMM+	<b>299,6 km</b>	<b>964,5 km</b>
SAM- / AMM-	<b>348,4 km</b>	921,4 km
SAM- / AMM+	314,2 km	<b>892,8 km</b>

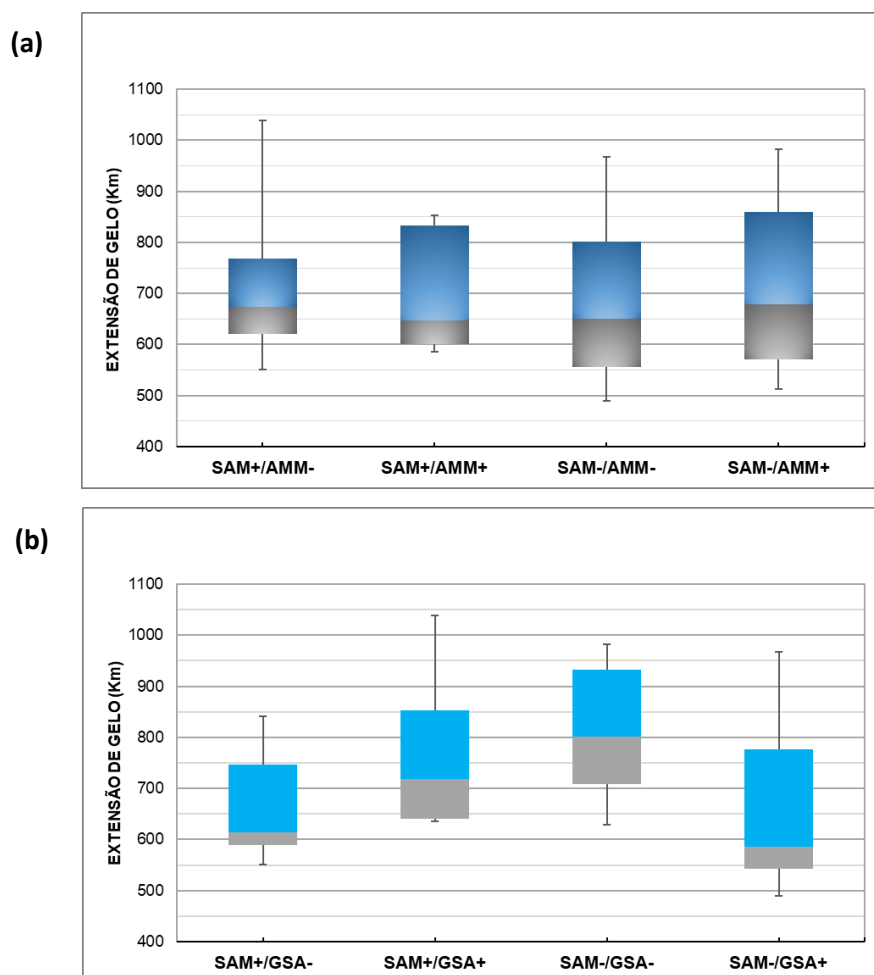
  

<b>(b)</b>	<b>FEVEREIRO</b>	<b>SETEMBRO</b>
SAM+ / GSA-	342,8 km	<b>952,1 km</b>
SAM+ / GSA+	<b>287,4 km</b>	946,6 km
SAM- / GSA-	302,8 km	912,3 km
SAM- / GSA+	<b>344,6 km</b>	<b>890,1 km</b>

#### 5.2.4.3 Análise dos Índices Combinados (setor MW)

O diagrama *boxplot* referente ao setor MW para o mês de fevereiro na combinação SAM/AMM (**Figura 28a**) apresenta dinâmica aproximadamente inversa à do setor MBA para os mesmos meses de análise. A combinação de maior mediana é SAM-/AMM+, com 678 km. Essa combinação apresentou como mínimo e máximo as extensões de 513 e 982 km. Já a combinação de menor mediana é a SAM+/AMM+ que apresenta 646 km, tendo como mínimo e máximo os valores de 585 e 852 km (**Figura 28a**).

Nesta análise, as medianas das quatro distintas combinações mostram valores bem próximos, de forma que não é a combinação de maior mediana que detém maior número de anos no quintil máximo. Da mesma forma, não é a combinação de menor mediana que possui maior quantidade de anos pertencentes ao quintil mínimo (Tabelas 12 e 13).



**Figura 28** – Boxplots representando a extensão média de gelo marinho antártico no setor MW no mês de fevereiro para o período 1981-2018 em cada uma das quatro combinações dos padrões SAM/AMM (a) e SAM/GSA (b).

Em relação às médias, a combinação que apresenta a maior é a SAM+/AMM-. Essa combinação não é a de maior mediana, como dito, mas sim apresenta a segunda maior mediana. A menor média é mostrada na combinação SAM-/AMM- que não apresenta a menor mediana, e sim a segunda menor mediana. Tais situações ocorrem pelo fato das medianas e médias neste mês de análise e neste setor se apresentarem todas muito próximas ao observarmos cada diferente combinação.

Considerando as combinações SAM/GSA (**Figura 28b**), a combinação de maior mediana é SAM-/GSA- com 801 km, onde o mínimo e o máximo situam-se entre 628 e 982 km. A combinação de menor mediana é SAM-/GSA+ com 585 km. Esta combinação teve variação entre 490 e 967 km. A combinação de maior mediana não é a que detém o maior número de anos no quintil máximo, porém a combinação de menor mediana é a que possui maior número de anos no quintil mínimo (**Tabela 12**).

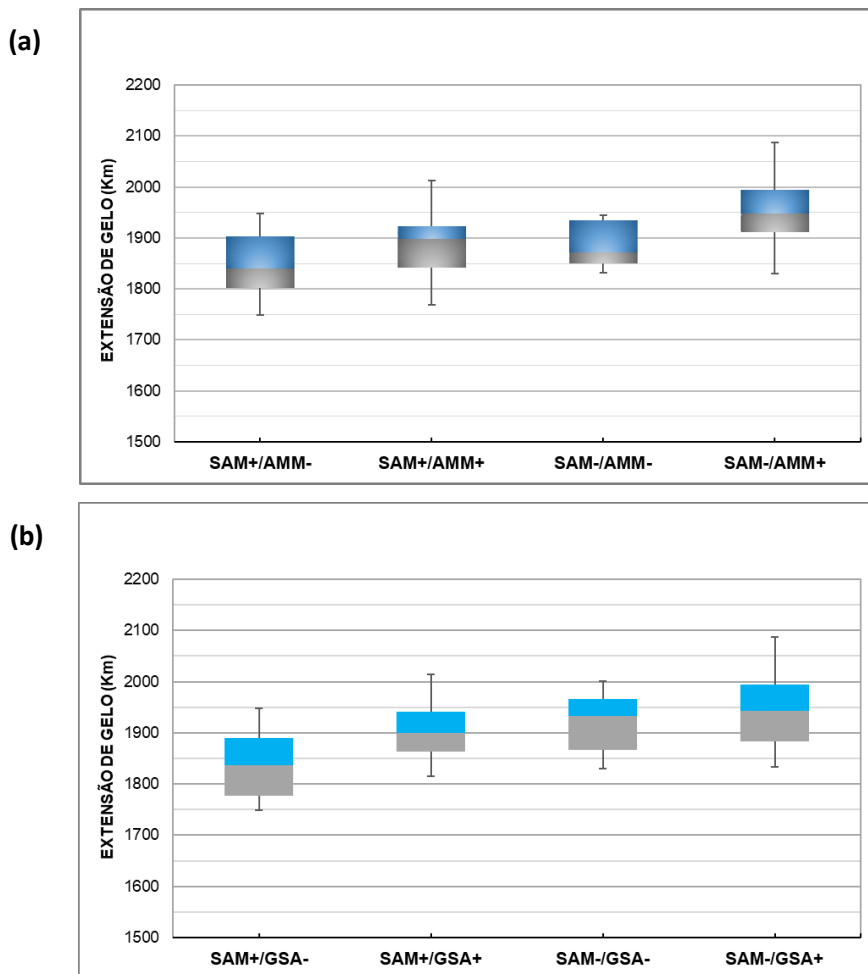
Em relação às médias de extensão de gelo marinho, a que apresenta a maior média é SAM-/GSA-, sendo a mesma combinação de maior mediana. A combinação de menor média é SAM-/GSA+ que também coincide com a de menor mediana.

O gelo marinho no setor MW no mês de setembro (**Figuras 29a e 29b**) apresenta variação pequena entre máximos e mínimos se comparado ao mês de fevereiro no mesmo setor, como pode ser conferido no tamanho das “caixas” do diagrama. Apenas com a observação do diagrama (**Figura 29a**), é notório o destaque da combinação SAM-/AMM+ como a que apresenta as maiores extensões, sendo mínimos, máximos e valores entre 25 e 75% superiores às demais combinações. O mínimo é 1.830 km e o máximo é 2.087 km. A maior mediana é apresentada por esta combinação (1.947 km).

A combinação que detém a maior mediana, também apresenta a maior média e é a combinação que possui seis anos no quintil máximo. Da mesma forma, a combinação de menor mediana é a combinação de menor média e a que apresenta um total de quatro anos no quintil mínimo (SAM+/AMM-), sendo também uma combinação de inversão de sinais em relação à de maior mediana. Essa característica contribui para explicar a dinâmica acima discutida (**Tabelas 12 e 13**).

Neste sentido, ocorre o inverso do que foi apresentado no mês de fevereiro. O SAM negativo mostra importância nas maiores extensões, assim como o AMM positivo. No caso do SAM, ocorre o inverso do mês de fevereiro, onde a fase positiva (negativa) esteve relacionada com as maiores (menores) extensões.

Em relação ao gráfico da combinação SAM/GSA (**Figura 29b**), a configuração de sinais das combinações é a mesma do SAM/AMM, de forma que se pode notar pelo gráfico que a combinação SAM-/GSA+ é a de maior mediana (1.942 km) e o mínimo e o máximo estão entre 1.832 e 2.087 km. A combinação de menor mediana é a inversa, SAM+/GSA- (1.836 km), com mínimo e máximo entre 1.748 e 1.947 km.



**Figura 29** – Boxplots representando a extensão média de gelo marinho antártico no setor MW no mês de setembro para o período 1981-2018 em cada uma das quatro combinações dos padrões SAM/AMM (a) e SAM/GSA (b).

A combinação que detém a maior mediana, também apresenta a maior média de extensão e é a combinação que possui quatro anos no quintil máximo. Da mesma forma, a combinação de menor mediana é a combinação de menor média de extensão e a que apresenta um total de cinco anos no quintil mínimo (**Tabela 12**).

No mês de setembro neste setor (**Figura 29b**), para as combinações entre SAM e GSA, ocorre situação semelhante à dos casos entre SAM e AMM, de modo que o SAM negativo parece se relacionar com maiores extensões, bem como o GSA positivo. Em relação a fevereiro, o comportamento do SAM negativo é parecido, pois neste mês ele também esteve relacionado com maiores extensões. Já o GSA positivo apresentou uma relação inversa, estando associado com as menores extensões no mês de setembro.

As **Tabelas 12 e 13** mostram a relação dos anos em que ocorreram as combinações dos padrões nos meses de fevereiro e de setembro no setor MW. Pode-se observar, nesta

tabela, alguns dados anteriormente expostos no texto, ou seja, em relação às combinações que detém o maior número de anos dentro do quintil extremo máximo e dentro do quintil extremo mínimo de extensão de gelo, que geralmente coincidem com as combinações de maiores medianas e médias e com as de menores medianas e médias, respectivamente. Os gráficos para o MW em setembro permitem uma análise mais direta e estão coerentes com os *boxplots* de análises isoladas.

**Tabela 12** – Classificação dos anos com sinais positivos e negativos para as combinações dos índices SAM/AMM (a) e SAM/GSA (b) para fevereiro e setembro no setor MW. Em verde: anos representativos do quintil extremo máximo de gelo. Em vermelho: anos representativos do quintil extremo mínimo. Em cinza: combinação de maior e menor extensão de gelo em setembro. Entre parênteses: número total de anos por combinação.

(a)	FEVEREIRO	SETEMBRO
SAM+ / AMM-	1982, <b>1985</b> , 1988, 1989, 1990, 1993, 1994, <b>1995</b> , 2000, 2009, <b>2014</b> , <b>2015</b> , 2016, 2018 (14)	1982, <b>1984</b> , <b>1985</b> , <b>1986</b> , 1992, 1993, <b>2018</b> (7)
SAM+ / AMM+	1998, 2002, <b>2005</b> , 2007, <b>2008</b> , 2011, <b>2013</b> (7)	<b>1990</b> , <b>1995</b> , 2001, 2004, 2008, 2010, 2012, 2015, <b>2016</b> , <b>2017</b> (10)
SAM- / AMM-	1983, <b>1984</b> , <b>1986</b> , 1987, 1991, 1992, <b>1999</b> , 2001, <b>2003</b> (9)	1983, <b>1994</b> , 1997, 2000, 2002 (5)
SAM- / AMM+	<b>1981</b> , 1996, 1997, <b>2004</b> , <b>2006</b> , 2010, <b>2012</b> , <b>2017</b> (8)	<b>1981</b> , <b>1987</b> , <b>1988</b> , <b>1989</b> , <b>1991</b> , 1996, 1998, 1999, 2003, 2005, 2006, <b>2007</b> , 2009, 2011, 2013, <b>2014</b> (16)

(b)	FEVEREIRO	SETEMBRO
SAM+ / GSA-	1982, <b>1985</b> , 1990, <b>1995</b> , 2000, 2002, <b>2005</b> , 2009, 2011, 2018 (10)	<b>1984</b> , <b>1985</b> , <b>1986</b> , 1992, 1993, 2010, <b>2017</b> , <b>2018</b> (8)
SAM+ / GSA+	1988, 1989, 1993, 1994, 1998, 2007, <b>2008</b> , <b>2013</b> , <b>2014</b> , <b>2015</b> , 2016 (11)	1982, <b>1990</b> , <b>1995</b> , 2001, 2004, 2008, 2012, 2015, <b>2016</b> (9)
SAM- / GSA-	1991, 1992, 1997, <b>2004</b> , <b>2012</b> (5)	<b>1981</b> , 1983, <b>1989</b> , 1996, 1997, 1998, 1999, 2011, <b>2014</b> (9)
SAM- / GSA+	<b>1981</b> , 1983, <b>1984</b> , <b>1986</b> , 1987, 1996, <b>1999</b> , 2001, <b>2003</b> , <b>2006</b> , 2010, <b>2017</b> (12)	<b>1987</b> , <b>1988</b> , <b>1991</b> , <b>1994</b> , 2000, 2002, 2003, 2005, 2006, <b>2007</b> , 2009, 2013 (12)

**Tabela 13** – Extensões de gelo marinho no setor MW nas distintas combinações dos padrões SAM/AMM **(a)** e SAM/GSA **(b)** em fevereiro e em setembro. Em verde: maior extensão. Em vermelho: menor extensão.

<b>(a)</b>	<b>FEVEREIRO</b>	<b>SETEMBRO</b>
SAM+ / AMM-	714,3 km	1846,1 km
SAM+ / AMM+	703,2 km	1890,7 km
SAM- / AMM-	689,1 km	1888,1 km
SAM- / AMM+	709,4 km	1948,4 km

<b>(b)</b>	<b>FEVEREIRO</b>	<b>SETEMBRO</b>
SAM+ / GSA-	655,9 Km	1836,8 Km
SAM+ / GSA+	760,3 Km	1903,9 Km
SAM- / GSA-	816,4 Km	1919,7 Km
SAM- / GSA+	649,5 Km	1944,8 Km

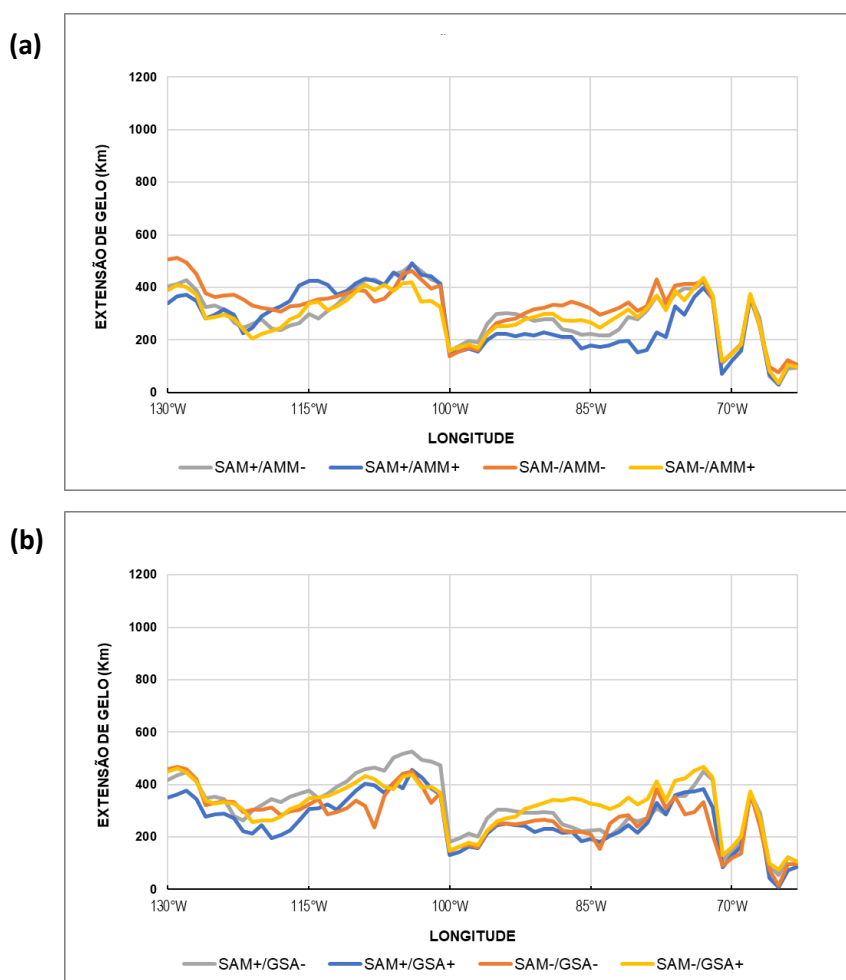
### 5.2.5. Gráficos de Extensão de Gelo Marinho x Longitude

#### A) Setor MBA

Os gráficos abaixo (**Figura 30**) mostram a extensão de gelo marinho por longitude no setor MBA em fevereiro nas diferentes combinações dos padrões SAM/AMM (**Figura 30a**) e dos padrões SAM/GSA (**Figura 30b**).

Ao observar os dois gráficos, percebe-se pouca diferença no comportamento das extensões de gelo ao longo das longitudes. No primeiro gráfico, a maior extensão média ocorre no SAM-/AMM- (linha laranja) e esta combinação apresenta a maior extensão na

maioria das longitudes. No segundo gráfico ocorre no SAM-/GSA+ (linha amarela), combinação que também apresenta a maior extensão na maioria das longitudes. Já as menores extensões médias ocorrem nas combinações de mesmos sinais em ambos os gráficos (SAM+/AMM+ e SAM+/GSA+) que apresentam linha azul e apontam a menor extensão na maioria das longitudes. Nota-se que as combinações que apontaram as maiores e as menores extensões médias são as mesmas verificadas nos gráficos *boxplots* discutidos na seção anterior.



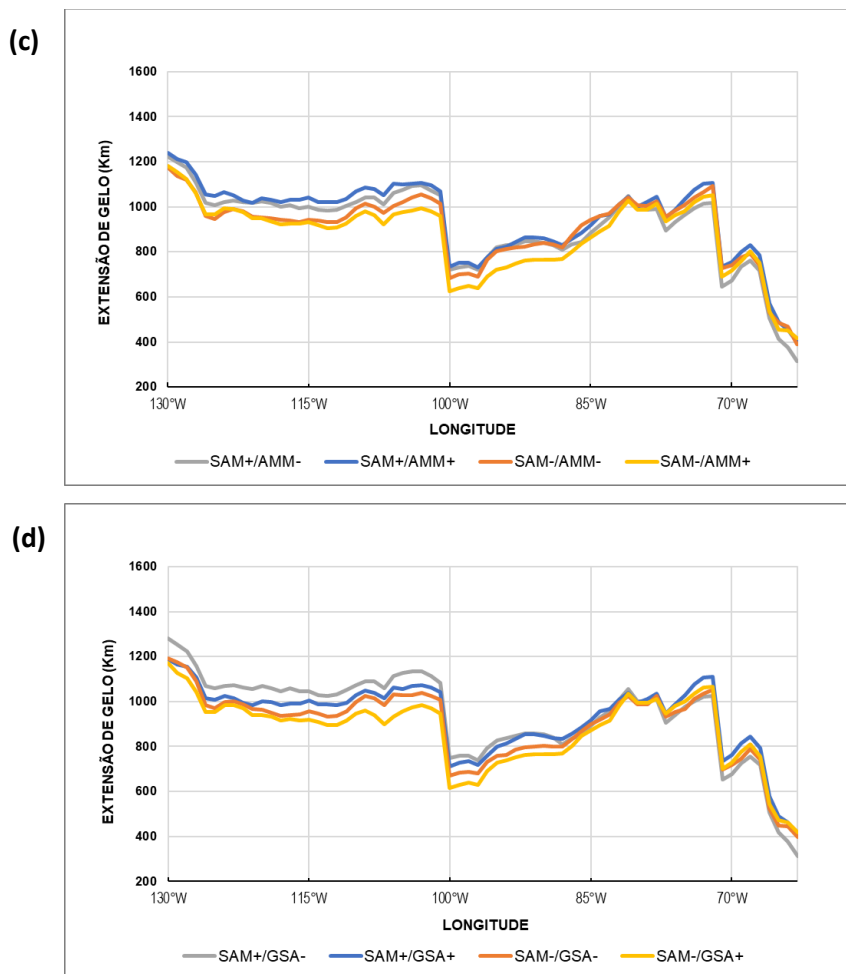
**Figura 30** – Extensão de gelo marinho por longitude no setor MBA no mês de fevereiro para o período 1981-2018 em cada uma das quatro combinações dos padrões SAM/AMM (a) e SAM/GSA (b).

Os gráficos seguintes (**Figura 31**) mostram a extensão de gelo marinho por longitude no setor MBA em setembro nas diferentes combinações dos padrões SAM/AMM (**Figura 31c**) e dos padrões SAM/GSA (**Figura 31d**).

Ao analisar os dois gráficos, percebe-se uma configuração das extensões de gelo muito semelhante. Inclusive, ao realizar breve comparação com os gráficos de fevereiro,



nota-se que em ambos os meses há a mudança marcante nas extensões de gelo na longitude de 100°W e também nas longitudes próximas a 70°W e 65°W, resultantes da morfologia da linha de costa da região do MBA. A maior extensão de gelo ocorre em SAM+/AMM+ e em SAM+/GSA-, as duas combinações que registram as maiores extensões na maioria das longitudes do setor. Em relação às menores extensões, estas ocorrem em combinações correspondentes em termos de sinais (SAM-/AMM+ e SAM-/GSA+). Em relação às maiores extensões, há uma oposição de sinais ao comparar os meses de fevereiro e setembro.



**Figura 31** – Extensão de gelo marinho por longitude no setor MBA no mês de setembro para o período 1981-2018 em cada uma das quatro combinações dos padrões SAM/AMM (c) e SAM/GSA (d).

A **Tabela 11** mostra as extensões médias de gelo marinho no setor MBA exemplificando o que foi observado nos quatro gráficos anteriores. É importante destacar que as extensões mostradas são válidas para o setor em questão e se tratam da média de

extensão de gelo no setor considerando todas as longitudes que abrangem o mesmo. É interessante destacar que quando a discussão é sobre as extensões mínimas de gelo, tanto em fevereiro como em setembro, ela ocorre nas combinações correspondentes: fase positiva com fase positiva de cada índice em fevereiro e fase negativa com positiva de cada índice em setembro. Já em relação às extensões máximas, elas ocorrem em combinações diferentes, seja em fevereiro ou em setembro. É válido ressaltar o comportamento do sinal do SAM, pois em fevereiro o SAM+ se relaciona com extensões menores e o SAM- com extensões maiores. Em setembro ocorre o inverso e o SAM+ se relaciona com extensões maiores e o SAM- com extensões menores.

Ao se comparar o par de gráficos que representam os meses de fevereiro (**Figura 30**) e de setembro (**Figura 31**), percebe-se que a extensão de gelo marinho aumentou consideravelmente de um mês para outro, de forma aproximadamente proporcional ao se comparar longitudes correspondentes, de modo que não há uma região deste setor que mereça ser destacada como a que apresentou um aumento ou uma redução da extensão de gelo mais pronunciada do que outra.

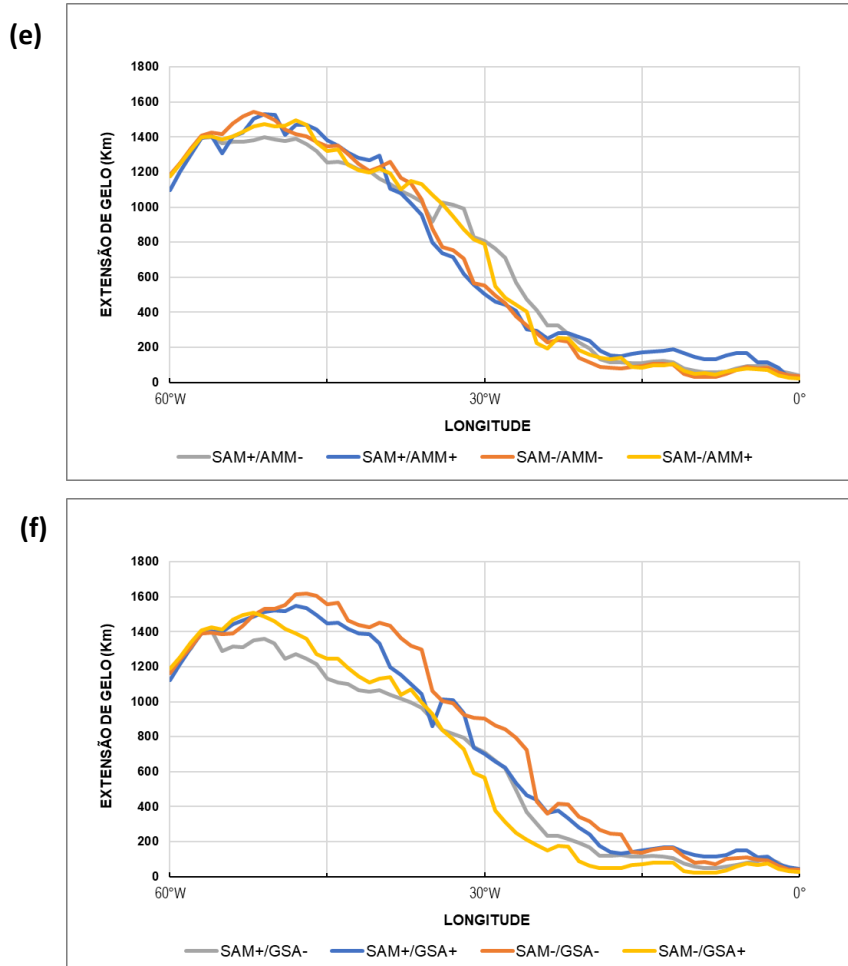
## **B) Setor MW**

Os gráficos apresentados nas **Figuras 32e e 32f** mostram a extensão de gelo marinho por longitude no setor MW em fevereiro nas diferentes combinações dos padrões SAM/AMM (**Figura 32e**) e dos padrões SAM/GSA (**Figura 32f**). Ao observar os dois gráficos, nota-se configuração da extensão de gelo similar. Além disso, se observam extensões maiores entre 60°W e 30°W em comparação com o trecho entre 30°W e 0°. As extensões de gelo vão diminuindo gradativamente à medida que nos dirigimos para leste. Isso ocorre devido ao fato de a borda do continente antártico atingir latitudes mais ao sul na metade oeste do setor MW enquanto na metade leste (de 30°W para leste, principalmente) a borda do continente situa-se em latitudes mais ao norte.

A maior extensão média de gelo marinho ocorre na combinação SAM+/AMM- (linha cinza) e em SAM-/GSA- (linha laranja), sendo as combinações com maior extensão de gelo na maior parte das longitudes. Já em relação às menores extensões médias, estas ocorrem em SAM-/AMM- (linha laranja) e em SAM-/GSA+ (linha amarela), que representam as combinações com menores extensões na maior parte das longitudes.

Nestes casos, a maior extensão representada por SAM+/AMM- não é coincidente com a combinação de maior mediana observada nos *boxplots*, coincidindo com a

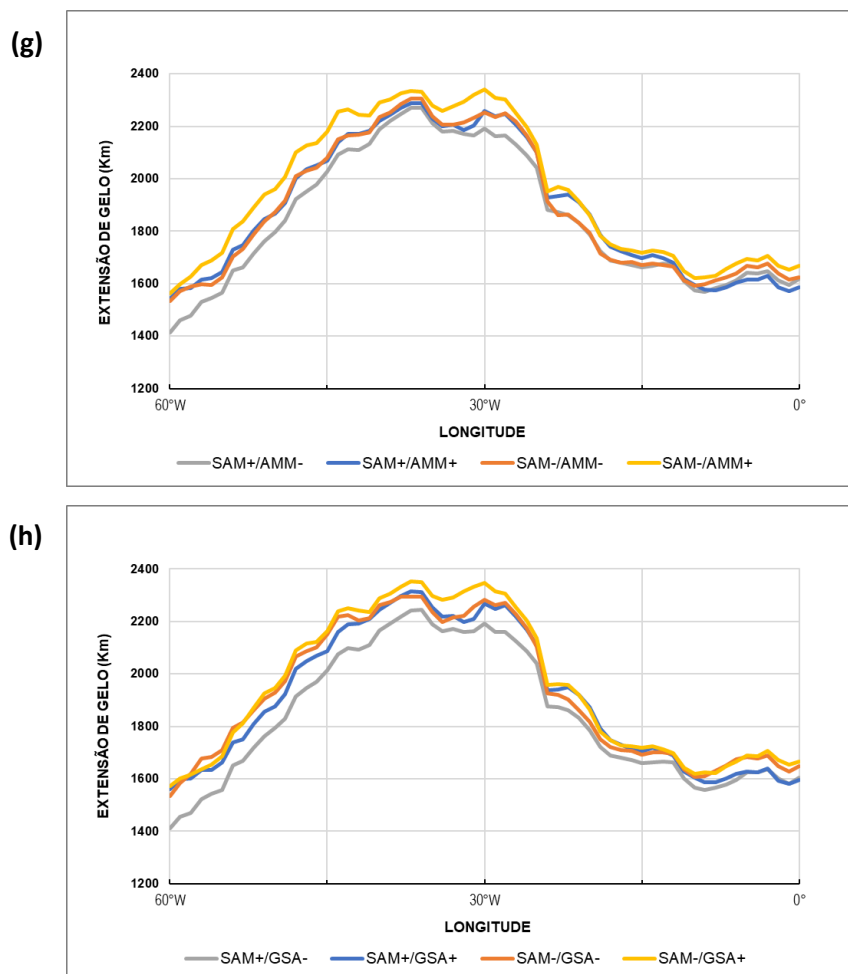
combinação de maior média de extensão. Em alguns casos, a combinação de maior mediana não é a mesma que apresenta a maior média. Já no caso da combinação SAM-/GSA-, esta também é a combinação de maior mediana nos *boxplots*.



**Figura 32** – Extensão de gelo marinho por longitude no setor MW no mês de fevereiro para o período 1981-2018 em cada uma das quatro combinações dos padrões SAM/AMM (e) e SAM/GSA (f).

Os gráficos abaixo mostram a extensão de gelo marinho por longitude no setor MW em setembro nas diferentes combinações dos padrões SAM/AMM (**Figura 33g**) e dos padrões SAM/GSA (**Figura 33h**). Na **Figura 33g**, a combinação SAM-/AMM+ (linha amarela) é a que apresenta a maior média de extensão de gelo e também a combinação que detém a maior extensão na grande maioria das longitudes do setor. Na **Figura 33h** é a combinação SAM-/GSA+ (linha amarela) que mostra a maior média de extensão de gelo e inclusive apresentando a maior extensão de gelo na maioria das longitudes ao longo do setor MW. As combinações de menores extensões são representadas pelas linhas cinzas em ambos os gráficos (SAM+/AMM- e SAM+/GSA-), de modo que é notória a

menor extensão apresentada por estas duas combinações nos gráficos na maior parte das longitudes. Analisando o setor MW entre fevereiro e setembro, nota-se uma grande expansão do gelo marinho na porção central do setor (em torno de 30°W), enquanto na porção mais à oeste (60°W) a extensão de gelo, em média, não sofreu uma expansão tão significativa de fevereiro para setembro. Já na porção leste (entre 0° e 15°W) a extensão de gelo era quase inexistente em fevereiro atingindo em torno de 1400/1500 km de extensão em setembro.



**Figura 33** – Extensão de gelo marinho por longitude no setor MW no mês de setembro para o período 1981-2018 em cada uma das quatro combinações dos padrões SAM/AMM (g) e SAM/GSA (h).

Ao comparar estes resultados com os *boxplots*, fica evidente que as combinações que apresentam as maiores (menores) médias de extensão de gelo são as mesmas que apresentam as maiores (menores) medianas nos *boxplots*. As **Tabelas 11 e 13** presentes no item anterior mostram as extensões médias de gelo marinho nos setores MBA e MW. As **Tabelas 11a e 13a** mostram a combinação SAM/AMM e as **Tabelas 11b e 13b**

mostram a combinação SAM/GSA. É importante destacar que as extensões mostradas são válidas para o setor em questão e se tratam da média de extensão do setor considerando todas as longitudes que abrangem o mesmo.

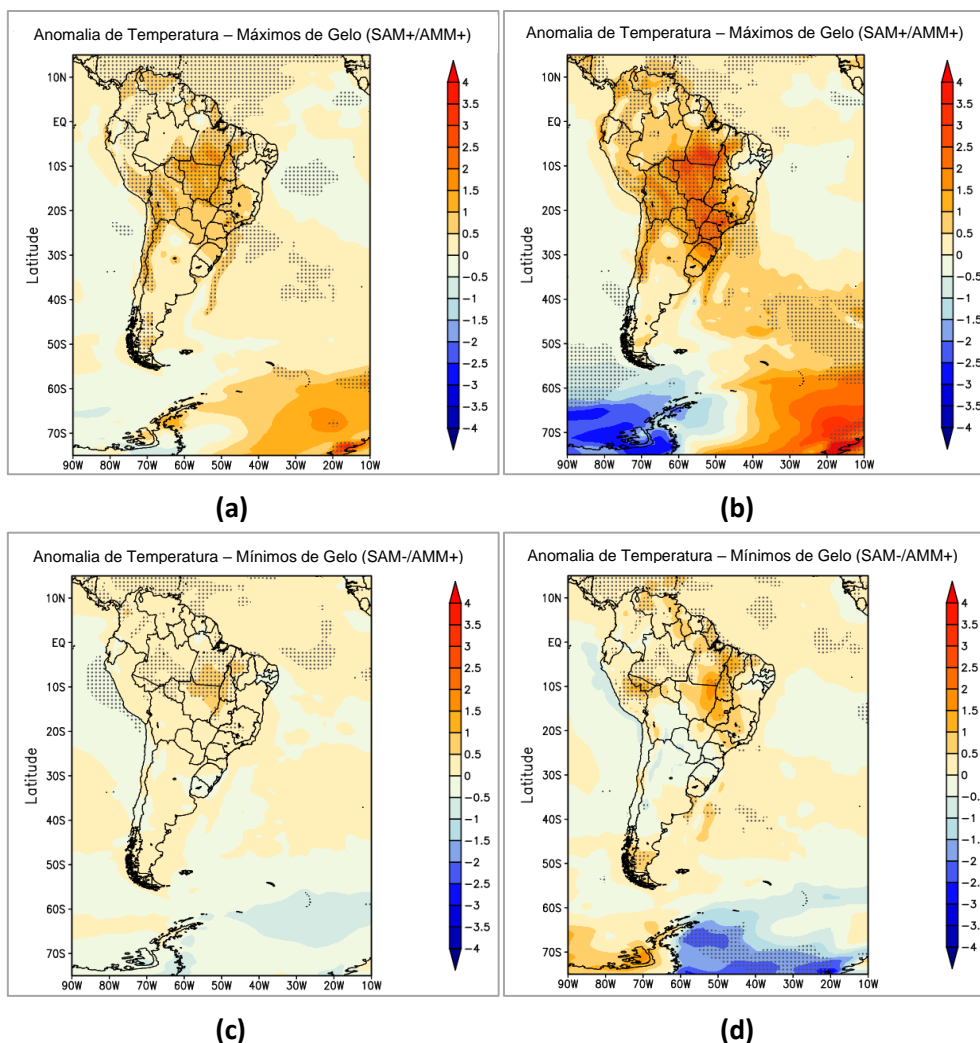
Para o mês de setembro, enquanto a combinação SAM+/AMM- está relacionada às menores extensões, a combinação inversa está associada às maiores extensões. A mesma situação ocorre na combinação SAM/GSA. Para o setor MBA, em fevereiro, o SAM- parece estar relacionado com maiores extensões e o SAM+ com menores extensões. No mesmo setor, porém em setembro, a situação se inverte e é o SAM+ (SAM-) que se associa com maiores (menores) extensões. No setor MW, alguns sinais se invertem e, em fevereiro, é o SAM+ que está relacionado com maiores extensões. Estes resultados serão úteis para verificar quais combinações de fases ocorreram nestes meses de gelo marinho mais extenso e menos extenso. E, assim, com as combinações de fases definidas, montar os compostos de temperatura e precipitação (item 4.2.2 da Metodologia).

- No MBA, a **máxima extensão** de gelo ocorreu na combinação **SAM+/AMM+**, que apresentou, além da maior média, quatro anos máximos e apenas um mínimo levando em conta os quintis.
- No MBA, a **mínima extensão** de gelo ocorreu na combinação **SAM-/AMM+**, que apresentou, além da menor média, quatro anos mínimos e apenas um máximo, considerando os quintis.
- No MW, a **máxima extensão** de gelo ocorreu na combinação **SAM-/AMM+**, que apresentou, além da maior média, seis anos máximos e apenas um mínimo. Neste caso, a combinação que apresenta a máxima extensão no MW é a mesma que detém a mínima extensão no MBA.
- No MW, a **mínima extensão** de gelo ocorreu na combinação **SAM+/AMM-** que, além da menor média, deteve quatro anos mínimos e nenhum máximo. (transferir para os resultados).

### **5.3. Análise da Relação do SAM/AMM com Extremos de Gelo Marinho e Temperatura e Precipitação na América do Sul**

#### **5.3.1. Temperatura na América do Sul nos Casos Extremos de Gelo no Setor MBA**

As figuras seguintes mostram as anomalias de temperatura do ar na América do Sul durante as combinações relacionadas aos extremos máximos (**Figuras 34a e 34b**) e mínimos (**Figuras 34c e 34d**) de extensão de gelo marinho no mês de setembro no setor MBA.



**Figura 34** – Anomalias de temperatura do ar ( $^{\circ}\text{C}$ ) na América do Sul durante setembro: nos casos de extremos máximos (**a, b: SAM+/AMM+**) e mínimos (**c, d: SAM-/AMM+**) de gelo marinho no setor MBA. Áreas com nível de confiança de 90% estão pontilhadas (Teste *t-student*). **Figuras a; c:** contém todos os anos da combinação extrema, mesmo não inclusas no quintil. **Figuras b; d:** contém apenas os anos da combinação extrema que pertencem ao quintil.

Na **Figura 34a** são apresentadas as anomalias de temperatura referentes aos anos de ocorrência da combinação de maior extensão média (SAM+/AMM+) ainda que sejam incluídos também os anos que não fazem parte do quintil máximo. Já na **Figura 34b** são considerados, no cálculo das anomalias, apenas os anos de ocorrência da combinação de maior extensão que pertencem ao quintil máximo. Nesse segundo caso, o número de anos se restringe à apenas quatro.

A mesma situação é válida para as **Figuras 34c** e **34d**, porém as anomalias de temperatura do ar na América do Sul são referentes aos anos de ocorrência da combinação de menor extensão média de gelo marinho (SAM-/AMM+).

Como é esperado, observam-se anomalias negativas de temperatura no setor MBA quando se analisa os mapas de extremos máximos de gelo deste setor, o que é coerente com a observação de Carpenedo e Ambrizzi (2016) que destacaram que nos eventos de expansão de gelo marinho no MBA, ocorre resfriamento da TSM neste setor e no Pacífico Sul provocando diminuição de temperatura do ar próximo à superfície. Da mesma forma, se verifica o predomínio de anomalias positivas neste mesmo setor quando se analisa os mapas de extremos mínimos de gelo. Um dado interessante é a inversão das anomalias entre os setores MBA e MW, pois quando são apresentadas anomalias negativas no setor MBA, são verificadas anomalias inversas no setor MW (**Figuras 34b e 34d**).

Os compostos de extremos máximos de gelo (**Figuras 34a e 34b**) se relacionam com anomalias positivas de temperatura do ar entre 0,5° e 2,5°C no sudeste da América do Sul e no Centro-Sul do Brasil. Anomalias ligeiramente positivas também são observadas no norte e no sul da América do Sul. Os mapas de extremos mínimos de gelo (**Figuras 34c e 34d**) também se associam com anomalias positivas na maior parte do sudeste da América do Sul, no entanto com anomalias inferiores, entre 0° e 1°C. No restante da América do Sul, as anomalias positivas também são mais fracas, encontrando inclusive anomalias ligeiramente negativas no sul da América do Sul e norte da Argentina e do Paraguai.

### **5.3.2. Precipitação na América do Sul nos Casos Extremos de Gelo no Setor MBA**

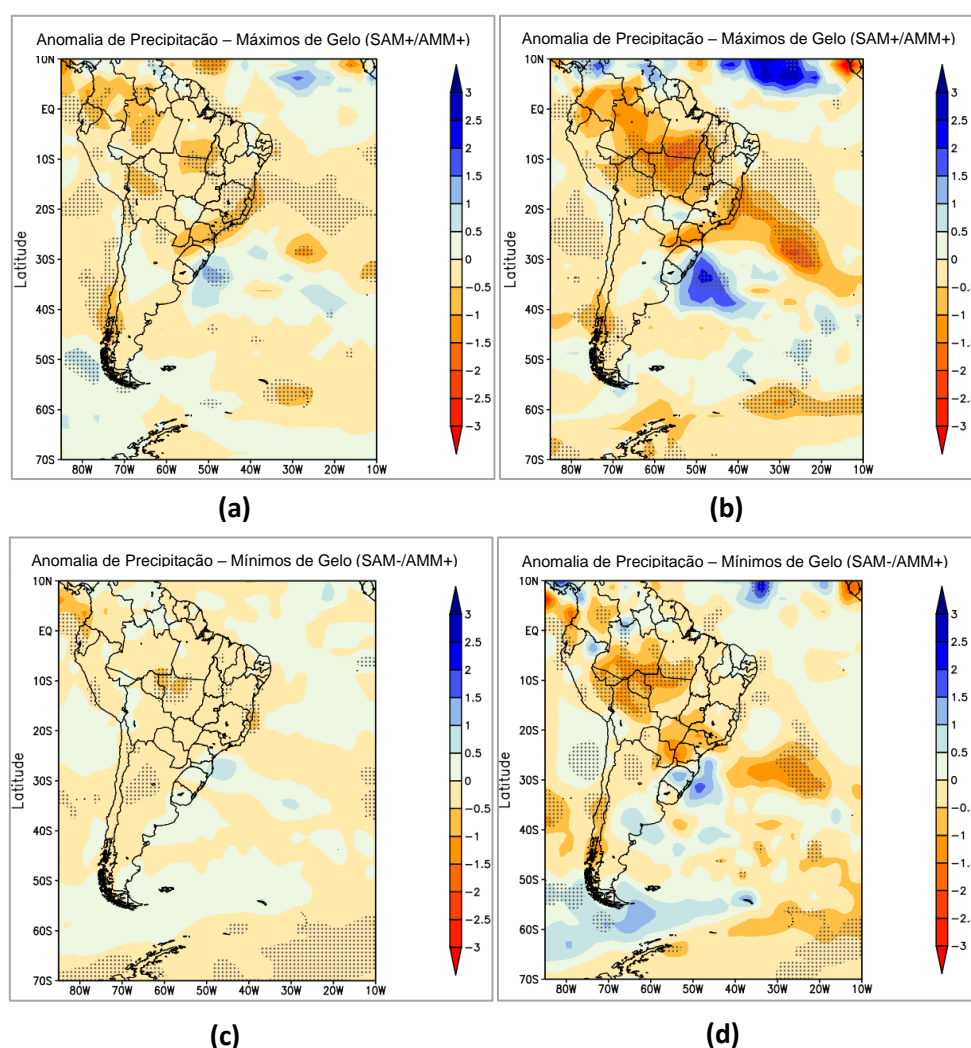
As figuras a seguir apontam as anomalias de precipitação na América do Sul durante os casos de extremos máximos (**Figuras 35a e 35b**) e mínimos (**Figuras 35c e 35d**) de extensão de gelo marinho no mês de setembro.

Na **Figura 35a** são apresentadas as anomalias de precipitação associadas aos anos de ocorrência da combinação de maior extensão média (SAM+/AMM+) ainda que sejam incluídos também os anos que não fazem parte do quintil máximo, totalizando dez diferentes anos. Já na **Figura 35b** são considerados, para o cálculo das anomalias, somente os anos de ocorrência da combinação de maior extensão que pertencem ao quintil máximo. Nesse segundo caso, o número de anos se restringe à somente quatro.

Observa-se o predomínio de anomalias negativas de precipitação, ainda que fracas, no setor MBA quando se analisa os compostos de extremos máximos de gelo (**Figuras 35a e 35b**). Da mesma forma, se verifica o predomínio de anomalias positivas neste mesmo setor quando se analisa os mapas de extremos mínimos de gelo (**Figuras 35c e**

**35d**). Os compostos de extremos máximos de gelo (**Figuras 35a e 35b**) relacionam mais fortemente com anomalias negativas de precipitação. Estas variam entre -0,5 e -2,0 mm/dia no sudeste da América do Sul e no centro-norte do Brasil e da América do Sul. Entretanto, na área mais ao sul do sudeste da América do Sul, englobando Uruguai e Nordeste da Argentina, notam-se anomalias positivas entre 0,5 e 2,0 mm/dia.

Os compostos de extremos mínimos de gelo (**Figuras 35c e 35d**) também se associam com anomalias de precipitação tanto positivas quanto negativas no sudeste da América do Sul e em partes isoladas no continente, entretanto apresentam anomalias mais fracas, positivas e negativas (**Figuras 35c e 35d**), que ocorrem entre 1,0 e -1,0 mm/dia.

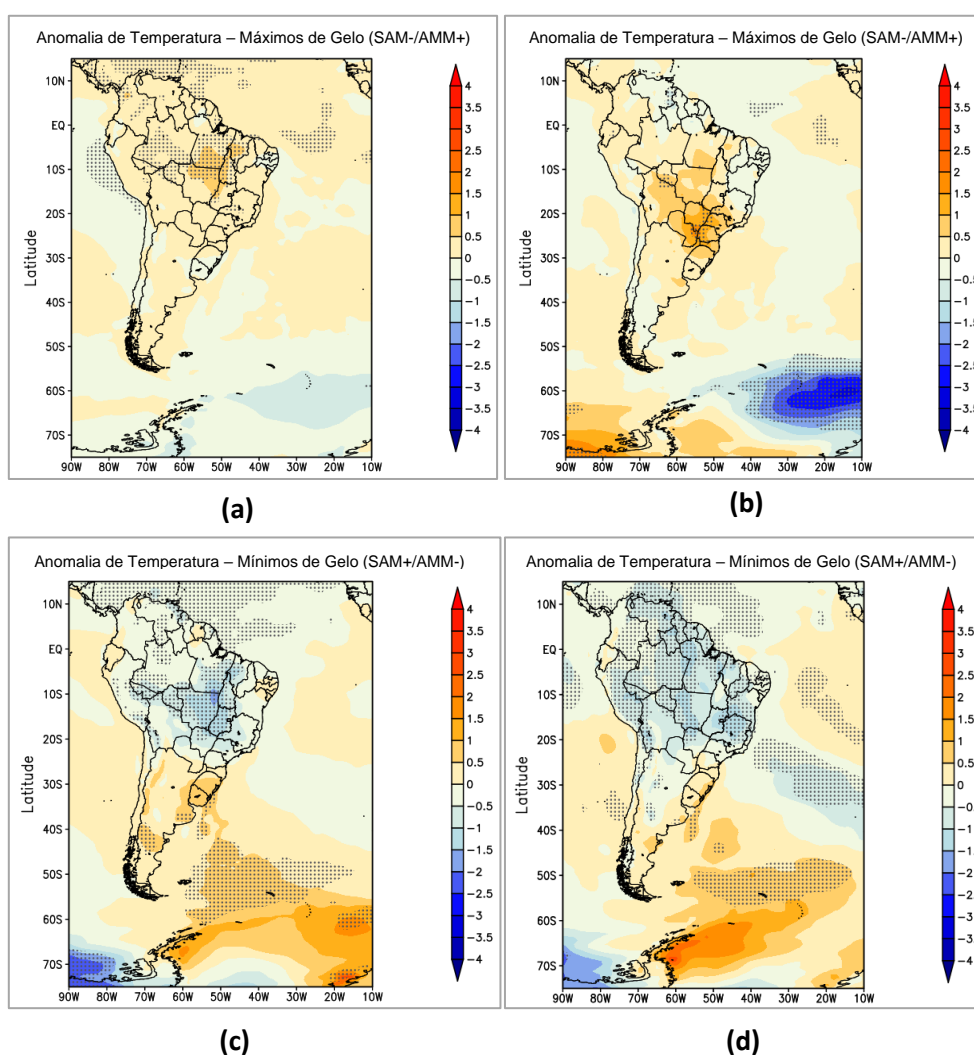


**Figura 35** – Anomalias de precipitação (mm) na América do Sul durante setembro: nos casos de extremos máximos (**a, b: SAM+/AMM+**) e mínimos (**c, d: SAM-/AMM+**) de gelo marinho no setor MBA. Áreas com nível de confiança de 90% estão pontilhadas (Teste *t*-student). **Figuras a; c:** contém todos os anos da combinação extrema, mesmo não inclusas no quintil. **Figuras b; d:** contém apenas os anos da combinação extrema que pertencem ao quintil.



### 5.3.3. Temperatura na América do Sul nos Casos Extremos de Gelo no Setor MW

As **Figuras 36a a 36d** mostram dados de temperatura do ar relacionadas às extensões de gelo no setor MW. Tratam-se das anomalias de temperatura do ar na América do Sul durante os extremos máximos (**Figuras 36a e 36b**) e mínimos (**Figuras 36c e 36d**) de extensão de gelo no mês de setembro. Na **Figura 36a** são apresentadas as anomalias de temperatura referentes aos anos de ocorrência da combinação de maior extensão média (SAM-/AMM+) ainda que sejam incluídos também os anos que não estão inseridos no quintil máximo. Na **Figura 36b** são considerados apenas os anos de ocorrência da combinação de maior extensão que pertencem ao quintil máximo.



**Figura 36** – Anomalias de temperatura do ar (°C) na América do Sul durante setembro: nos casos de extremos máximos (**a, b: SAM-/AMM+**) e mínimos (**c, d: SAM+/AMM-**) de gelo marinho no setor MW. Áreas com nível de confiança de 90% estão pontilhadas (Teste *t-student*). **Figuras a; c:** contém todos os anos da combinação extrema, mesmo não inclusas no quintil. **Figuras b; d:** contém apenas os anos da combinação extrema que pertencem ao quintil.

A mesma situação é válida para as **Figuras 36c e 36d**, porém as anomalias de temperatura na América do Sul são referentes aos anos de ocorrência da combinação de menor extensão média (SAM+/AMM-). Para os extremos máximos e mínimos, ocorre a combinação inversa em termos de sinais. Também pode-se destacar que a combinação referente às maiores extensões neste caso (SAM-/AMM+) é a mesma combinação referente às menores extensões no caso anterior, relativo ao setor MBA.

Se observam, nos extremos máximos (**Figuras 36a e 36b**), anomalias negativas de temperatura próximo ao setor MW e Península Antártica, porém sem significância estatística. Estes resultados concordam com Carpenedo e Ambrizzi (2016) que observaram nos casos de expansão de gelo marinho no MW durante o inverno austral um resfriamento da TSM neste setor e no Atlântico Sul gerando redução da temperatura do ar próximo à superfície. Há uma inversão dessas anomalias no setor MBA, setor adjacente ao primeiro. No caso dos extremos mínimos de extensão de gelo, ocorre o oposto e anomalias positivas de temperatura do ar surgem no setor MW (**Figuras 36c e 36d**). A situação inversa é constatada no setor MBA.

Os compostos de extremos máximos de gelo (**Figuras 36a e 36b**) se relacionam com anomalias positivas de temperatura do ar em quase todo o continente, oscilando entre 0° e 1,5°C no sudeste da América do Sul e na porção central da América do Sul, centradas em aproximadamente 20°S e 55°W. Ainda que as anomalias de temperatura sejam positivas, são inferiores às registradas na análise anterior relacionada ao setor MBA.

Os mapas de extremos mínimos de gelo (**Figuras 36c e 36d**), ao contrário do setor MBA, se associam predominantemente com anomalias negativas na maior parte da América do Sul, portanto um sinal oposto é observado em comparação aos mapas de extremos máximos. Estas oscilam entre 0° e -1,5°C aproximadamente, centradas ao norte de 25°S, com significância estatística. Entretanto, no extremo sul do sudeste da América do Sul e no sul da América do Sul, englobando grande parte do território argentino, se observam anomalias positivas. Como esperado, são observadas anomalias positivas de temperatura do ar sobre o setor MW até o sul da América do Sul nos casos de extremos mínimos de gelo.

Parte dos resultados concordam com Vasconcellos, Pizzochero e Cavalcanti (2019) que mostraram uma relação negativa entre o SAM e a temperatura do ar sobre parte do continente sul-americano durante o mês de setembro. Estudos anteriores também

abordaram a relação entre o SAM e a extensão de gelo marinho (e.g. PEZZA; HASHID; SIMMONDS, 2012; PARISE et al. 2015; OLIVA et al. 2021). As anomalias positivas sobre a porção norte da América do Sul, norte do Atlântico Tropical Norte e região tropical da América do Sul (**Figuras 36a e 36b**), são coerentes com a fase positiva do AMM da mesma forma que as anomalias negativas (**Figuras 36c e 36d**) são coerentes com a fase negativa desse padrão. Esses resultados podem indicar que o SAM, o AMM e a extensão de gelo agem conjuntamente sobre a região tropical da América do Sul.

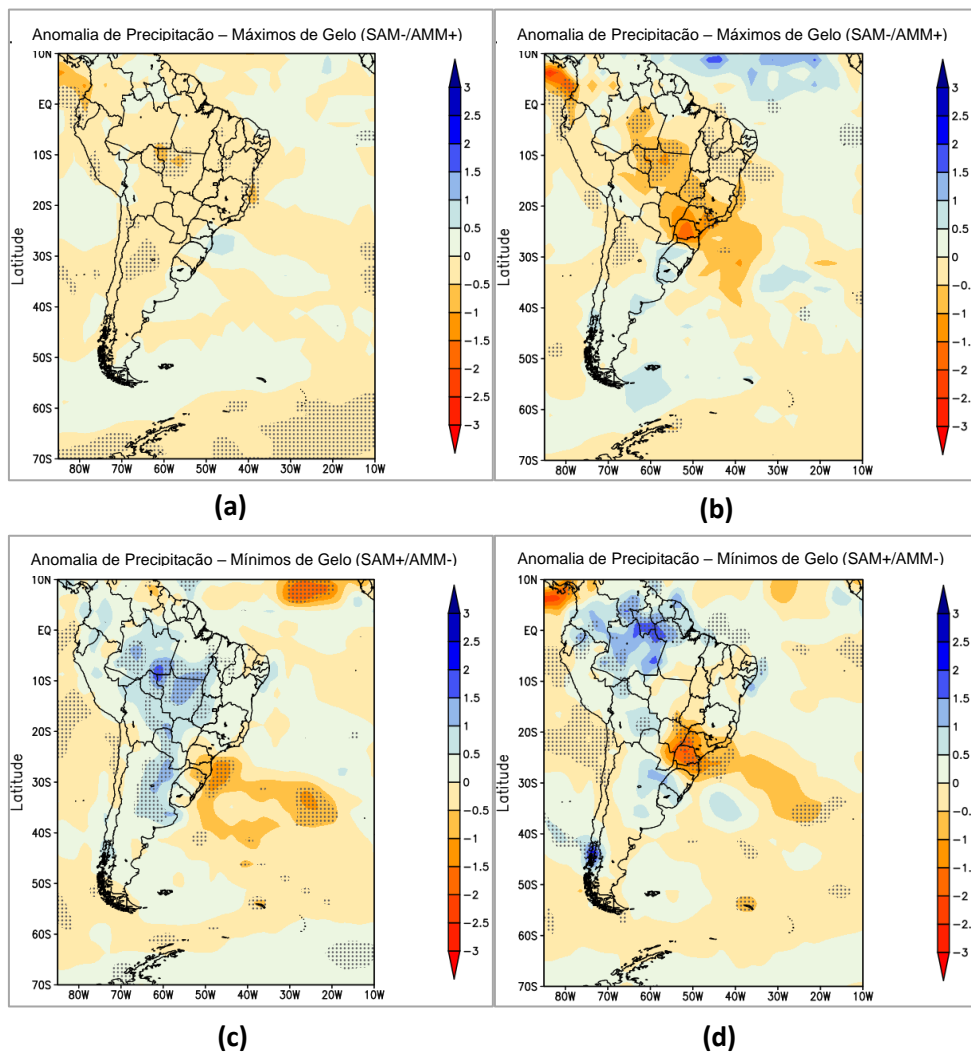
#### 5.3.4. Precipitação na América do Sul nos Casos Extremos de Gelo no Setor MW

As figuras seguintes apresentam as anomalias de precipitação na América do Sul durante os extremos máximos (**Figuras 37a e 37b**) e mínimos (**Figuras 37c e 37d**) de extensão de gelo marinho no mês de setembro no setor MW. Na **Figura 37a** são indicadas as anomalias de precipitação relacionadas aos anos de ocorrência da combinação de maior extensão média (SAM-/AMM+) ainda que sejam incluídos também os anos que não fazem parte do quintil máximo. Já na **Figura 37b** são considerados apenas os anos de ocorrência da combinação de maior extensão que pertencem ao quintil máximo. No segundo caso, há um menor número de anos (ocorrências) por conta da restrição realizada.

Nos compostos de extremos máximos de extensão de gelo marinho (**Figuras 37a e 37b**), há predomínio de anomalias negativas precipitação entre -0,5 e -2,0 mm/dia no sudeste da América do Sul e na porção central do continente (**Figura 37b**), mas ainda há a presença de áreas com anomalias positivas entre 0,5 e 1,0 mm/dia, como no sul do Brasil, no Uruguai e na Argentina. Na **Figura 37a**, encontra-se uma situação semelhante, porém com anomalias mais fracas. Em relação aos compostos de extremos mínimos de gelo, nota-se uma configuração de anomalias similar entre os compostos (**Figuras 37b e 37d**), ou seja, anomalias negativas na porção mais central da América do Sul e no sudeste da América do Sul e positivas na parte mais ao sul, indicando não ocorrer diferenças, neste caso, entre possíveis influências de extremos de gelo máximo ou mínimo.

Em relação às anomalias de precipitação no setor MW propriamente dito, há uma coerência com os resultados obtidos no setor MBA, uma vez que são observadas, nos quatro compostos (**Figuras 37a, 37b, 37c e 37d**), anomalias negativas de precipitação nos casos de extremos máximos de gelo e anomalias positivas de precipitação quando ocorrem os mínimos de gelo. Estes resultados, especificamente, são interessantes para se observar a relação entre a criosfera e a atmosfera no que se refere às chuvas.

Comparando-se as **Figuras 37a e 37c**, nota-se uma inversão de sinal entre os casos de extremos máximos (SAM-/AMM+) e mínimos de gelo (SAM+/AMM-). A Península Antártica e o setor MW mostram anomalias negativas de precipitação durante os extremos máximos de gelo (SAM-/AMM+). Neste caso, a fase negativa do SAM pode inibir a ocorrência de sistemas transientes. Situação inversa está relacionada à fase positiva do SAM. Em suma, praticamente a totalidade da América do Sul apresenta menor precipitação na combinação SAM-/AMM+, a qual está associada com extremos máximos de gelo. Como já dito, a exceção ocorre em parte do sul do Brasil e Uruguai.



**Figura 37** – Anomalias de precipitação (mm) na América do Sul durante setembro: nos casos de extremos máximos (**a, b: SAM-/AMM+**) e mínimos (**c, d: SAM+/AMM-**) de gelo marinho no setor MW. Áreas com nível de confiança de 90% estão pontilhadas (Teste *t-student*). **Figuras a; c:** contém todos os anos da combinação extrema, mesmo não inclusas no quintil. **Figuras b; d:** contém apenas os anos da combinação extrema que pertencem ao quintil.

A Península Antártica e o setor MW se apresentam mais secos (úmidos) nos compostos SAM-/AMM+ (SAM+/AMM-) que representam os extremos máximos (mínimos) de gelo. Vasconcellos, Pizzochero e Cavalcanti (2019) também encontraram esta relação sobre a maior parte da América do Sul e uma configuração oposta no sul do Brasil e Uruguai, no entanto, nestes resultados, o extremo norte da América do Sul apresentou um sinal similar ao sul do Brasil. De acordo com Cavalcanti e Kousky (2009) a maior frequência de frentes frias sobre a maior parte da região tropical da América do Sul ocorre durante a primavera. Os resultados podem indicar que as frentes frias que atingem o sudeste da América do Sul nas fases SAM-/AMM+ causam maior precipitação sobre esta região, entretanto não avançam para latitudes mais baixas, contribuindo para mais seca nas regiões da América do Sul mais ao norte. Estes resultados concordam com Caldas et al. (2020) que indicaram maior frequência de frentes frias sobre o sudeste da América do Sul na combinação entre fase negativa do SAM, El Niño e extremos máximos de gelo no MW. Quanto ao AMM, sua fase positiva (negativa) (**Figuras 37a e 37c**), sugere um deslocamento para norte (sul) da ZCIT através do *feedback* WES (e.g., XIE; PHILANDER, 1994; CHIANG; KUSHNIR; GIANNINI, 2002; VASCONCELLOS et al. 2020) que contribui para menor (maior) precipitação sobre o extremo norte do continente sul-americano, como observado nas **Figuras 37a e 37c**.

#### **5.4. Fenômenos Climáticos e Desastres: ocorrências no Brasil e na América do Sul**

Ameaças ou eventos naturais e climáticos que liberam muita energia, como chuvas intensas, deslizamentos, enchentes, ventos, ressacas marinhas, terremotos e vulcanismo, podem contribuir para desastres consideráveis e impactar uma parcela cada vez maior da população mundial. Além disso, secas severas, ondas de calor e incêndios também afetam sobremaneira a sociedade e as atividades econômicas.

De acordo com Nunes (2015), não seria exagero afirmar que todos os seres humanos correm risco de serem vitimados de alguma forma por determinada calamidade ao longo de suas vidas. Além de o mundo inteiro ser passível de registrar algum fenômeno natural que promova desastres, a mobilidade crescente de pessoas, o aumento populacional, a urbanização e a vulnerabilidade da população também contribuem para que os seres humanos sejam afetados por eventos climáticos e meteorológicos extremos e desastres correlacionados.

Eventos climáticos extremos se tornaram mais intensos e/ou mais frequentes durante os últimos cinquenta anos na América do Sul (NUNES, 2015). Os eventos de enchentes<sup>2</sup>, por exemplo, causam prejuízos econômicos e podem tirar um grande número de vidas humanas. Por sua vez, secas podem comprometer o fornecimento de eletricidade, gerada por fontes alimentadas pela água da chuva, além de afetar a agricultura, o que gera grandes prejuízos econômicos. Episódios de falta de água podem causar graves problemas para a sociedade, além do êxodo de populações.

Sete em cada dez latino-americanos moram atualmente em cidades, onde a ocupação do solo sem critérios e algumas características geoclimáticas específicas tendem a aumentar a vulnerabilidade da população local a desastres (NUNES, 2015). De acordo com Marchezini (2018), os desastres naturais são um evento socioambiental e resultam da junção de ameaças naturais e das vulnerabilidades das áreas ocupadas.

Fenômenos da natureza turbulentos e, ao menos em parte, imprevisíveis, podem desarticular, temporária ou definitivamente, nossos modos de vida. A desarticulação socioespacial, em escala mundial, contribui para o advento dos desastres naturais e, especificamente na América do Sul, a relação entre urbanização, globalização e desastres é muito direta (NUNES, 2015).

Segundo Nunes (2015), nas últimas décadas, grandes transformações se operaram nas nações sul-americanas, como a transferência da população para as cidades em velocidade maior do que os serviços de infraestrutura conseguiram acompanhar, afetando os ambientes de maneira profunda e contribuindo para o aumento de desastres.

A variabilidade do clima e dos eventos climáticos extremos tem afetado seriamente o Brasil durante os últimos anos. No Brasil subtropical, Groisman et al. (2005) e Marengo et al. (2009) identificaram um grande aumento dos eventos extremos de fortes chuvas desde os anos 1950 e, no sudeste do Brasil, detectaram um aumento na frequência dos eventos pluviais extremos. Para o estado de São Paulo, Carvalho, Jones e Liebmann (2004) debatem que os eventos pluviais extremos exibem uma variabilidade interanual

---

<sup>2</sup> Inundações e enchentes são determinadas por combinações de processos atmosféricos, topografia, características das bacias hidrográficas e uso do solo, aspectos que se alteram em importância ao longo do tempo, dado o dinamismo dos elementos físicos e da sociedade. Smith (2006) alerta que praticamente nenhum lugar está totalmente a salvo do registro de inundações e que áreas que apresentam maior risco não deveriam ser ocupadas.

ligada ao El Niño e à La Niña, assim como variações intrassazonais associadas à atividade da ZCAS e do Jato de Baixos Níveis.

Eventos de chuva excepcionais ocorreram em meados de dezembro de 1999 no extremo norte da América do Sul, causando inundações e deslizamentos ao longo da costa central da Venezuela, havendo informações de mais de 10.000 mortes, além de perdas econômicas estimadas em mais de 1,8 bilhão de dólares (LYON, 2003). Em março de 2004, um furacão afetou a região litorânea do estado de Santa Catarina, com perdas da ordem de 1 bilhão de dólares (PEZZA; SIMMONDS, 2005; PEZZA; SIMMONDS; PEREIRA FILHO, 2009). A chegada do furacão, denominado de Catarina, à costa brasileira em 2004 ficou conhecida como a primeira vez em que um furacão foi documentado no Oceano Atlântico sul, inaugurando a visão de como um evento em grande escala pode contribuir para a ocorrência deste fenômeno atmosférico em uma região antes considerada livre de furacões.

Conforme alerta Wilhite (2005) em relação aos eventos de secas, estas diferem de outros fenômenos que geram desastres de várias maneiras, uma vez que seus inícios e terminos são difíceis de precisar e são menos óbvios, além de seus efeitos se acumularem lentamente ao longo de um período estendido, afetando, em geral, áreas bem maiores do que outros fenômenos deflagradores e não geram danos estruturais. Para o autor, tais características fazem com que a quantificação de seus impactos e a assistência aos atingidos sejam mais dificultosas.

Entre 1900 e 2011 o número das calamidades aumentou em todo o planeta, com pico maior no início dos anos 2000. Kellett e Sparks (2012) assinalam que entre 2000 e 2009 mais de 2,2 bilhões de pessoas foram afetadas por desastres no mundo, que provocaram perto de 840.000 óbitos e prejuízos de ao menos 891 bilhões de dólares. Dados do *United Nations Office for Disaster Risk Reduction* (UNISDR) apontam que entre 2000 e 2012 os prejuízos mundiais ocasionados por desastres naturais foram da ordem de 1,7 trilhões de dólares americanos, tendo afetado 2,9 bilhões de pessoas e causado a cifra de 1,2 bilhões de mortos (UNISDR, 2015).

Para efeito de análise dos desastres em categorias a serem abordadas nesta pesquisa, foi utilizado como referência o trabalho de Nunes (2015), que os organiza em três categorias contendo um total de dez tipos de desastres ou ocorrências. As três categorias são: a) fenômenos de natureza geológica representados pelas ocorrências de terremotos, vulcanismo e movimentos de massa seca (como queda de blocos em dias sem

precipitação); b) fenômenos de natureza meteorológica ou climática que incluem as ocorrências de tempestades, chuvas intensas, inundações, deslizamentos em encostas, secas, incêndios e extremos de temperatura (calor ou frio atípicos); e c) fenômenos de natureza biológica, representado por ocorrências epidemiológicas. Para esta pesquisa, foram analisados apenas os estudos de natureza meteorológica ou climática, onde foi adicionado exemplos de ocorrência de eventos de ressacas marinhas.

Ao longo das últimas décadas, tem-se observado que registros de eventos naturais extremos têm aumentado na América do Sul. A qualidade das informações melhorou nas últimas décadas e parece haver um aumento real no número de eventos ocorridos. Segundo Nunes (2015), o aumento do número de eventos se deve, em grande parte, a quantidade crescente de fenômenos meteorológicos e climáticos de grande intensidade que atingiram a América do Sul. Na década de 1960, houve 51 eventos desse tipo; enquanto, nos anos 2000, o número subiu para 257.

Na América do Sul, aproximadamente 32% das mortes ocorreram em razão de eventos associados a ocorrências meteorológicas ou climáticas, categoria que engloba quatro de cada cinco desastres registrados no continente (NUNES, 2015). No Brasil, 10.225 pessoas morreram ao longo dessas cinco décadas em razão de desastres naturais, pouco mais de 5% do total, a maioria em inundações e deslizamentos de encostas durante eventos pluviais extremos (NUNES, 2015). Ainda, segundo a autora, a situação se inverteu quando o parâmetro analisado foi, em vez da quantidade de mortos, o número de indivíduos afetados em cada tipo de desastre. Dos 138 milhões de vítimas não fatais atingidas por esses eventos, 1% foi alvo de epidemias, 11% de terremotos e vulcanismo e 88% de fenômenos climáticos. As secas e as inundações foram as ocorrências que provocaram impactos em mais indivíduos. As grandes estiagens atingiram 57 milhões de pessoas (41% de todos os afetados), e as enchentes, 52 milhões de habitantes (38%). O Brasil respondeu por cerca de 85% das vítimas não fatais de eventos de secas, essencialmente moradores do Nordeste, e por um terço dos atingidos por inundações, a grande maioria habitantes das grandes cidades do Sul e do Sudeste.

De acordo com Nunes (2015), os prejuízos foram estimados em 44 bilhões de dólares ao longo das cinco décadas e os prejuízos materiais associados aos quase 900 eventos extremos contabilizados foram decorrentes, em 80% dos casos, de fenômenos de natureza climática ou meteorológica. O Brasil detém quase 50% do território e mais da metade da população da América do Sul e foi palco de 20% dos desastres, 5% das mortes



e 30% dos prejuízos econômicos associados a esses eventos. O número de pessoas afetadas, no entanto, foi alto, representando 53% do total de atingidos no continente.

Segundo a autora, o Brasil apresenta vulnerabilidades, mas não tanto quanto países andinos como Peru, Colômbia e Equador, em função da intensidade de ocorrência de eventos como os terremotos e vulcanismos nestes países. Historicamente, na América do Sul, as vítimas fatais se concentram em razão de eventos de terremotos e erupções vulcânicas que, apesar de poucas ocorrências são de enormes proporções. O pior evento foi um terremoto no Peru em maio de 1970, com 66.000 mortes. No entanto, o segundo pior foi uma inundação na Venezuela em dezembro de 1999, evento caracterizado como de natureza meteorológica ou climática que causou 30.000 mortes. O Brasil registra um dos piores desastres dessa natureza, que foram as inundações e os deslizamentos de encostas em razão de fortes chuvas na região serrana do estado do Rio de Janeiro em janeiro de 2011, provocando a morte de cerca de mil pessoas e incontáveis prejuízos (PINHEIRO; ANDRADE; MOURA, 2011).

Considerando este contexto, neste capítulo serão discutidos alguns eventos extremos e desastres de natureza climática ou meteorológica, procurando relacioná-los com as fases dos padrões de variabilidade climática tratados nessa pesquisa, como o SAM, o GSA e o AMM que, dentre outros fatores, podem estar associados a eventos climáticos extremos. O objetivo é realizar um esforço para reunir informações acerca da influência destes padrões climáticos sobre eventos extremos de natureza meteorológica/climática já ocorridos.

#### **5.4.1. Ressacas marinhas**

Os fenômenos das ressacas marinhas são produzidos a partir de passagens de frentes frias e são caracterizadas por ondas provindas do quadrante sul, com duração média de dois dias e potencial para gerar danos à zona costeira (BULHÕES et al. 2014; LINS-DE-BARROS; KLUMB-OLIVEIRA; LIMA, 2018).

Eventos de ressacas ocorridos no litoral do estado do Espírito Santo entre 1948 e 2008 foram pesquisados por Eguchi e Albino (2021) tendo sido observados um total de 208 ocorrências. Os autores pesquisaram o clima de ressacas marinhas e a relação do SAM com os padrões associados à energia e ao número de ressacas. Os resultados levantados indicaram que a energia das ressacas, a duração e a quantidade foram maiores na fase negativa do SAM. Na fase negativa do SAM ocorre o deslocamento dos ventos

de oeste em direção ao equador e a redução da atividade de ondas baroclínicas na região de tempestades extratropicais (MARSHALL et al. 2018).

De acordo com os estudos de Reboita, Ambrizzi e Rocha (2009), a fase negativa do SAM apresenta menor concentração de ciclones no entorno da Antártica e condições mais favoráveis para ciclogêneses em torno de 45°S. Considerando a relação da fase negativa do SAM com a circulação atmosférica, podem ser geradas condições atmosféricas propícias a formação de ressacas no litoral do sudeste do Brasil.

Segundo Lins-de-Barros, Klumb-Oliveira e Lima (2018), os anos de 1988, 1990, 1999 e 2007 foram os que apresentaram o maior número de eventos de ressacas no litoral do Rio de Janeiro noticiados em veículos de comunicação. Em relação aos meses com ocorrências de ressacas, o maior número de eventos ocorreu entre os meses de abril e setembro, tendo como destaque o mês de junho. Sendo assim, nos quatro meses de junho dos referidos anos, observou-se a ocorrência da fase negativa do índice SAM em três, a saber: 1988 (-1,33), 1999 (-1,44) e 2007 (-0,77). O ano de 1990 apresentou a fase positiva do SAM (+0,04). Essas observações são coerentes com os resultados apresentados por Eguchi e Albino (2021) para o litoral do sudeste no estado do Espírito Santo, nos quais os autores verificaram energia, duração e quantidade de ressacas maiores durante a fase negativa do padrão SAM.

De acordo com Lima, Lins-de-Barros e Cirano (2021), as ressacas marinhas podem ser entendidas como fenômenos de sobrelevação do nível do mar de origem astronômica e meteoceanográfica que, somados à ação das ondas, geram efeitos e impactos no litoral e podem resultar em danos e prejuízos. Os autores investigaram os eventos dessa natureza que ocorreram no estado do Rio de Janeiro durante o período 1948-2008 a partir da sazonalidade e da relação com os fenômenos El Niño/La Niña, correlacionando com o Índice de Oscilação Sul. Além disso, observaram dois eventos específicos que se destacaram pela quantidade de danos que foram gerados. No que se refere ao Índice de Oscilação Sul, os autores encontraram uma quantidade de eventos semelhantes em períodos de El Niño ou La Niña (72 eventos) se comparado ao período neutro (68 eventos). Ao compararem El Niño e La Niña, os resultados mostraram 44 eventos durante a La Niña e 28 durante o El Niño.

Tomando como exemplo os resultados da frequência anual de eventos de ressacas no estado do Rio de Janeiro (LIMA; LINS-DE-BARROS; CIRANO, 2021) compilados a partir de notícias do acervo “O Globo”, observa-se que os anos com cinco ou mais

eventos de ressacas foram 1984, 1987, 1988, 1990, 1997, 1999 e 2006. Ainda, segundo os autores, do total de 141 eventos, a grande maioria, 111 eventos, ocorreu no outono (63) e no inverno (48). Neste sentido e para efeito de análise de possíveis relações entre eventos de ressacas marinhas e os sinais do padrão SAM, foram verificados os sinais do índice nos meses de abril, maio e junho dos anos supracitados, considerando que esses meses representam o outono, período do ano com maior incidência de ressacas. Nos meses de abril, em todos os anos, o SAM esteve na fase negativa, exceto o ano de 1999. Em maio e junho, ocorreu fase negativa em quatro dos sete anos, mostrando predomínio da fase negativa nos meses/anos com ocorrências de ressacas.

Lima, Lins-de-Barros e Cirano (2021) também analisaram dois estudos de caso baseados na quantidade de locais impactados por esses eventos, sendo escolhido um evento com registro de impactos em 20 locais e outro com impactos em 17 locais. Uma vez que o primeiro foi em agosto de 1988 e o segundo foi em abril de 1966, serão observadas as relações com o SAM somente no primeiro caso. De acordo com os dados observados, o padrão SAM no mês de agosto de 1988 esteve em sua fase negativa. Após as análises de alguns eventos de ressacas neste item, notou-se que a grande maioria dos eventos de ressacas ocorreu em meses nos quais o sinal do índice foi negativo.

Em relação ao GSA, constatou-se que a grande maioria dos eventos de ressacas relatados ocorreu também durante a fase negativa do referido índice. Todas as ressacas marinhas ocorridas nos meses de abril que foram abordadas, um total de 7, ocorreram na fase negativa do GSA. Do total de 21 eventos de ressacas ocorridos no litoral do sudeste do Brasil (Rio de Janeiro e Espírito Santo), 14 eventos, ou seja, dois terços aconteceram na fase negativa do GSA.

A **Tabela 14** sintetiza os eventos meteoceanográficos abordados no atual item e as respectivas relações com os sinais dos índices estudados nesta pesquisa. Em resumo, pode-se verificar 14 eventos durante a fase negativa e 7 eventos durante a fase positiva do SAM. Da mesma forma, observa-se 14 eventos durante a fase negativa do GSA e 7 durante a fase positiva. Em 10 eventos houve ocorrência simultânea da combinação formada pelas fases negativas dos dois índices (SAM-/GSA-).

**Tabela 14** – Discriminação dos eventos de ressacas marinhas e associação com os índices AMM, GSA e SAM. Período analisado de 25 anos entre 1984 e 2008.

<b>Eventos extremos</b>	<b>Índice AMM ou GSA</b>	<b>Índice SAM</b>
<b>Ressacas abril de 1984, 1987, 1988, 1990, 1997 e 2006 (6)</b>	GSA-/AMM-	SAM-
<b>Ressaca abril de 1999 (1)</b>	GSA-/AMM-	SAM+
<b>Ressacas maio de 1984, 1987, 1988 e 1990 (4)</b>	GSA+	SAM-
<b>Ressacas maio de 1997, 1999 e 2006 (3)</b>	GSA-	SAM+
<b>Ressacas junho de 1987, 1988, 1997, 1999 (4)</b>	GSA-/AMM+	SAM-
<b>Ressacas junho de 1984, 1990 e 2006 (3)</b>	GSA+/AMM-	SAM+

Fontes: Lins-de-Barros, Klumb-Oliveira e Lima (2018); Eguchi e Albino (2021); Lima, Lins-de-Barros e Cirano (2021).

#### **5.4.2. Eventos extremos de secas, ondas de calor e incêndios**

Entre a primavera de 1997 e o verão de 1998, incêndios associados à uma seca excepcional causada pelo El Niño devastaram grandes áreas de florestas no norte e no leste da Amazônia (NEPSTAD; MOREIRA; ALENCAR, 1999). Tais incêndios destruíram centenas de hectares e produziram grande quantidade de fumaça, afetando a saúde humana e fechando aeroportos (COX et al. 2008).

Em setembro de 2005, grande parte do sudoeste da Amazônia sofreu uma das secas mais intensas em cerca de um século. A seca afetou gravemente a população ribeirinha ao longo do canal principal do rio Amazonas e seus tributários: rios Solimões e Madeira. Os níveis fluviais chegaram aos mais baixos da história e a navegação ao longo desses rios teve que ser suspensa, afetando o turismo e isolando vilarejos e moradias. Países da região amazônica, como Brasil, Bolívia, Peru e Colômbia declararam estado de calamidade pública em setembro de 2005.

De acordo com Marengo et al. (2008), o número de incêndios florestais neste ano foi cerca de 300% maior do que no ano anterior, principalmente como consequência da ausência de umidade. De acordo com os autores, as causas da seca não estavam relacionadas ao El Niño, mas sim a um Atlântico Tropical Norte anormalmente quente.

Uma das consequências das secas é a redução dos níveis dos rios de uma região. Segundo Zeng et al. (2008), no rio Amazonas, desde 2000, foi constatado um longo e lento decréscimo dos níveis fluviais relativo ao seu fluxo hídrico. Segundo os autores, desde o ano de 1979, os anos mais secos foram 1981, 1983, 1988, 1991, 1997, 1998 e 2005. O déficit de chuvas de 2005 ocorreu principalmente no sudoeste da Amazônia, conforme foi observado em Tabatinga, estação no rio Solimões, que captura a chuva da bacia do alto Amazonas (ZENG et al. 2008).

Uma vez que os níveis fluviais mais baixos foram observados nos meses de setembro dos respectivos anos supracitados, observa-se a fase do índice durante esses meses e constata-se a ocorrência da fase negativa do SAM em todos os meses de setembro dos anos acima mencionados. Esses dados são coerentes com os compostos das **Figuras 35c e 35d** (SAM-/AMM+ e extremos mínimos de gelo) e das **Figuras 37a e 37b** (SAM-/AMM+ e extremos máximos de gelo). Quanto ao AMM, no mês de setembro de 2005, em uma tentativa de relacionar o padrão com a seca extrema de 2005 na Amazônia, o modo apresentou índice + 4,08, sendo o segundo maior índice da série analisada (1981 a 2018). Esse dado caracteriza a fase positiva do AMM e um gradiente meridional de anomalias que aponta para águas mais aquecidas no Atlântico Tropical Norte em relação ao Atlântico Tropical Sul com o deslocamento para norte da ZCIT que favoreceria mais seca na região Amazônica. Esse dado também corrobora com a observação de Marengo et al. (2008) ao analisarem as anomalias positivas de TSM no Atlântico Tropical Norte e com as combinações supracitadas.

No nordeste, centro-oeste e sudeste do Brasil, o déficit de chuvas durante o verão e outono de 2001 resultou em uma redução significativa do fluxo dos rios, o que diminuiu a capacidade de produção de energia hidrelétrica nessas regiões. Em um verão anormalmente seco e quente, houve um excesso de demanda por energia para sistemas de refrigeração, causando reduções nos níveis dos reservatórios das usinas hidrelétricas, que atingiram níveis mínimos críticos. Segundo Cavalcanti e Kousky (2004), a natureza de larga escala dos déficits, que afetou quase o país inteiro, causou uma crise energética que forçou o governo brasileiro a impor medidas de conservação de energia para evitar a interrupção total do fornecimento de energia durante parte dos anos de 2001 e 2002.

Considerando o relato da seca ocorrida no verão e outono de 2001, ao confrontar os meses de ocorrência desse evento e os sinais do índice SAM, verificou-se que entre janeiro e maio do mesmo ano o SAM esteve em sua fase negativa. Esse dado coincide

com as informações anteriores que mostram os anos secos na Amazônia associados a fase negativa do SAM. Assim, ao analisar o período seco no Centro-Oeste e no sudeste do Brasil, se observa uma relação do déficit de chuvas com a fase negativa do índice. No tocante ao índice GSA, este esteve em sua fase positiva durante o verão e outono de 2001 (meses de janeiro a maio) mostrando que o déficit de chuvas em 2001 pode estar relacionado à um Atlântico Tropical Sul mais quente como é característico da fase positiva do GSA.

Alguns modelos de circulação global da atmosfera sugerem que a Amazônia pode estar vulnerável a seca extrema em resposta aos deslocamentos de circulação causados pelo aquecimento global (LI; FU; DICKINSON, 2006). A seca extrema contribui para a redução dos níveis fluviais, para a ocorrência de incêndios e perdas de florestas tropicais, com possível aceleração potencial do aquecimento global (COX et al. 2004). Com o aumento da frequência de eventos meteorológicos e climáticos extremos, começaram a surgir estudos na última década (e.g. COELHO et al. 2015) com o objetivo de avaliar se esses eventos podem ser atribuídos às mudanças climáticas causadas pela ação humana ou para estimar riscos de novos eventos nas próximas décadas.

Alguns dos estudos realizados nos últimos anos na América do Sul com o intuito de avaliar a relação de um evento extremo com a ação humana foi o trabalho sobre o fenômeno da seca ocorrida no verão de 2014 no sudeste do Brasil (COELHO et al. 2015), que fez com que os estados pertencentes ao sudeste do Brasil enfrentassem um dos maiores déficits de água das últimas décadas. Os autores constataram que as mudanças antrópicas não podem ser entendidas como o fator que mais influenciou o evento de seca. A análise da TSM revelou que o sudoeste do Atlântico Sul apresentou forte associação negativa com a precipitação sobre o sudeste do Brasil, apontando que o aumento da TSM no Atlântico Tropical Sul, associado ao GSA+, está relacionado à precipitação reduzida, como observado no verão de 2014 e como já relatado nos eventos de seca ocorridos no verão de 2001 na mesma região do Brasil.

Nos meses de verão de 2014, a análise do índice GSA aponta valores positivos para janeiro, fevereiro e março o que significa gradiente positivo de anomalias e águas mais aquecidas nessa região do Atlântico em relação ao Atlântico Subtropical Sul, o que pode corroborar com os resultados divulgados por Coelho et al. (2015). Como dito, esta relação também é coerente com a observada no evento de seca de 2001 no sudeste do Brasil. Embora os autores não tenham feito relatos a respeito do padrão de teleconexão SAM,

este esteve em sua fase negativa durante os meses de dezembro de 2013 e janeiro de 2014, informação que concorda com a relação apresentada nos demais eventos de seca relatados (1997, 1998, 2001 e 2005).

No ano anterior, em dezembro de 2013, o sudeste do Brasil vivenciou um evento extremo oposto a esse evento de seca de 2014, no qual chuvas intensas causaram severos impactos socioeconômicos, ou seja, em um intervalo de tempo muito curto ocorreram dois eventos extremos opostos. Tal evento será abordado no próximo item. Além disso, no mesmo ano, em 2013, o nordeste do Brasil viveu a pior seca dos últimos 50 anos segundo o relatório "Declaração sobre o Estado do Clima", divulgado pela Organização Meteorológica Mundial (OMM) em 2013. O relatório traz detalhes sobre chuvas, inundações, secas, ciclones tropicais e o nível do mar em cada região do planeta. O documento mostrou que 2013 foi o sexto ano mais quente desde 1961. A temperatura média da superfície do oceano e da Terra em 2013 foi de 14,5°C, marca que está 0,5°C acima da média registrada entre 1961 e 1990 e 0,03°C acima da média da década mais recente (2001-2010). De acordo com a OMM, cada década é mais quente que a anterior e treze dos quatorze anos mais quentes registrados desde 1961 ocorreram no século XXI (OMM, 2013). Muitos estudos (e.g. COX et al. 2004; 2008; LI et al. 2008; COELHO et al. 2015) já documentaram a relação entre a TSM do Atlântico com as anomalias de chuvas no sudeste e nordeste do Brasil e na Amazônia, causando secas extremas ou chuvas intensas.

Nesse mesmo ano, em dezembro de 2013, a Argentina enfrentou uma onda de calor extremo durante cerca de 15 dias que foi a mais intensa dos últimos 75 anos, prejudicando o sistema de geração de energia da capital, Buenos Aires. Hannart et al. (2015) identificaram que o evento foi causado em parte pelo aquecimento global antropogênico e estimaram que esse tipo de evento que ocorria uma vez a cada 75 anos passaria a ocorrer uma vez a cada 15 anos se as tendências atuais de aquecimento do planeta se mantivessem. Os autores também observaram que as temperaturas extremas registradas na Argentina estiveram associadas, principalmente, à intensificação da ZCAS (HANNART et al. 2015). Durante esse evento, o Atlântico Tropical Sul apresentou índice GSA+, tendo coerência com a relação apresentada nos eventos anteriores de seca. Em relação ao índice SAM, este apresentou sua fase negativa, o que corrobora com os eventos de seca de 2001 e 2014 no sudeste do Brasil.

Santos et al. (2017) identificaram eventos extremos de seca na Amazônia entre 1979 e 2014 e mostraram que a seca de 1998 foi a mais intensa por conta do menor valor do índice de precipitação, inclusive mais que as outras duas secas intensas do período, a de 2005 e a de

2010. As secas de 2005 e 2010 duraram mais do que a de 1998 e desencadearam maiores impactos socioeconômicos, porém a de 1998 foi superior em intensidade. No caso da seca de 2010, em setembro daquele ano as condições oceânicas no Atlântico Tropical Norte mostraram índice AMM positivo (sendo o valor mais alto de AMM no período total analisado de 1981-2018). Tais informações são coerentes com as relações apresentadas do índice AMM com os outros eventos de seca na Amazônia aqui relatados (1997/1998, 2005) onde o sinal do AMM foi positivo apontando para águas mais aquecidas no Atlântico Tropical Norte em relação ao Atlântico Tropical Sul. A **Tabela 15** simplifica os eventos extremos de seca abordados no presente item e as respectivas relações com os sinais dos índices estudados.

**Tabela 15** – Discriminação dos eventos extremos de secas e associação com os índices AMM, GSA e SAM. Período analisado de 20 anos entre 1996 e 2015.

<b>Eventos extremos</b>	<b>Índice AMM ou GSA</b>	<b>Índice SAM</b>
<b>Seca na Amazônia 1997/1998</b>	AMM+	SAM-
<b>Seca na Amazônia 2005</b>	AMM+	SAM-
<b>Seca na Amazônia 2010</b>	AMM+	SAM+
<b>Seca no sudeste e centro-oeste do Brasil 2001</b>	GSA+	SAM-
<b>Seca no sudeste do Brasil 2014</b>	GSA+	SAM-
<b>Seca na Argentina 2013</b>	GSA +	SAM-

Fontes: Cavalcanti e Kousky (2001); Marengo et al. (2008); Zeng et al. (2008); Coelho et al. (2015); Hannart et al. (2015); Santos et al. (2017).

#### **5.4.3. Eventos extremos de chuvas, enchentes e deslizamentos**

Já foi mencionado que os eventos extremos relacionados às características meteorológicas ou climáticas impactam a vida humana. Mais importante para afetar as atividades humanas, entretanto, talvez sejam os eventos extremos de curto prazo (relacionados à meteorologia) devido ao seu potencial para gerar impactos significativos. Um desastre pode ser decorrente, em parte, de atividades humanas, como o desmatamento de encostas próximas a áreas urbanas ou construções em áreas de risco, que tende a aumentar as consequências de chuvas fortes. Neste contexto, as chuvas dificilmente causam mortes de pessoas por si só, mas os deslizamentos produzidos por elas ou eventos



de inundações e enchentes, em áreas próximas a leitos de rios, podem causar danos às populações com perda de vidas.

Em março de 2004, um furacão afetou a região litorânea do estado de Santa Catarina, com prejuízos financeiros da ordem de 1 bilhão de dólares (PEZZA; SIMMONDS, 2005; PEZZA; SIMMONDS; PEREIRA FILHO, 2009). A chegada do furacão Catarina à costa brasileira ficou registrada como a primeira vez em que um furacão foi documentado no Atlântico Sul. O evento deixou nove mortes e muitas perdas econômicas e para a sociedade.

No sul do Brasil, em novembro de 2008, chuvas intensas causaram grandes inundações e deslizamentos fatais, que afetaram mais de 1 milhão de pessoas, resultando em 120 mortes e deixando 69.000 pessoas desabrigadas. Os deslizamentos e as inundações causadas pelas tempestades bloquearam muitas estradas da região, interrompendo o fornecimento de água e de eletricidade para milhares de residências. Relatou-se que a maior parte das fatalidades foi causada por deslizamentos. Além disso, as tempestades romperam um trecho do gasoduto entre a Bolívia e o sul do Brasil, forçando a suspensão de fornecimento de combustível para parte dos estados de Santa Catarina e Rio Grande do Sul (INPE, 2009). Nos dois casos de eventos extremos, em março de 2004 e em novembro 2008, o SAM esteve em sua fase positiva. Durante os dois eventos, o índice GSA esteve na fase negativa, apontando águas superficiais do Atlântico mais frias do que o Atlântico Subtropical, o que pode ter relação com os eventos relatados. Nos eventos de seca na mesma região e no setor nordeste da Argentina, este índice apresentou sinal inverso.

O verão de 2009 apresentou chuvas muito intensas e enchentes na região Amazônica e no nordeste do Brasil. De acordo com a *British Broadcasting Corporation* (BBC), as autoridades brasileiras declararam que quase 400.000 pessoas não puderam retornar às suas casas em junho daquele ano devido às enchentes que começaram no início de 2009. Habitantes ribeirinhos tiveram que acrescentar novos andares às suas casas sobre estacas para tentar ficar acima do nível das águas das enchentes, que causaram a morte de 44 pessoas e cerca de 400.000 desabrigadas (BBC, 2009).

De acordo com Marengo et al. (2009), as chuvas anormalmente intensas foram causadas por dois fenômenos climáticos simultâneos: La Niña e as águas superficiais anormalmente quentes do Atlântico Tropical Sul, que favoreceram a formação de um cinturão de baixa pressão sobre a região equatorial, causando chuvas mais fortes do que

o normal no nordeste do Brasil. Geralmente, a ZCIT se desloca a partir de março, porém em 2009 ela permaneceu estacionada até meados de maio, contribuindo para elevados volumes de precipitação sobre a região.

O padrão AMM, durante o verão e o outono de 2009, apresentou sinal negativo que caracteriza a fase negativa do índice e um gradiente meridional de anomalias que indica águas mais aquecidas no Atlântico Tropical Sul em relação ao Atlântico Tropical Norte, apresentando coerência com a observação de Marengo et al. (2009) e com uma das causas relacionadas aos eventos de chuvas intensas na região amazônica e no nordeste do Brasil. Em relação ao índice SAM, este esteve em sua fase positiva durante o verão de 2009, nos meses de janeiro, fevereiro e março, mostrando uma associação da fase positiva do índice com anomalias positivas de precipitação.

Na costa norte da Venezuela, em dezembro de 1999, chuvas abundantes causaram enchentes e deslizamentos que afetaram uma extensão de cerca de 300 km da costa do país. Segundo Marengo et al. (2002), os eventos de chuva foram relacionados com interações entre anomalias de TSM no Pacífico e na região caribenha do Atlântico, que combinados com um alto grau de desmatamento nas encostas das montanhas El Ávila e com o solo saturado, produziram grandes deslizamentos na seção norte da capital Caracas, destruindo bairros inteiros e causando a morte de mais de 30.000 pessoas.

Análises das condições de TSM e as circulações em níveis superiores e baixos da atmosfera indicaram que os remanescentes de uma frente fria que se deslocou do Caribe e a convergência de ar úmido e quente que se deslocou sobre o Atlântico Tropical Norte (anormalmente aquecido próximo à região afetada) determinaram o desenvolvimento de forte atividade convectiva, produzindo chuvas intensas e abundantes, suficientes para gerar grandes enchentes (MARENGO et al. 2002).

Não há dúvida de que parte dos danos foi causado pela urbanização sem planejamento e controle em área de alto risco, uma vez que a área afetada também foi desmatada para permitir o crescimento urbano. O desmatamento ocorreu também nos leitos dos rios, alguns deles com vazões intermitentes que desembocam no Mar do Caribe. Aconteceram grandes inundações após os dias de chuvas muito intensas, o que não acontecia desde fevereiro de 1951, causando uma das maiores catástrofes da história da Venezuela (MARENGO et al. 2002).

Em dezembro de 1999, o SAM esteve na fase positiva, sugerindo que os eventos ocorridos na Venezuela pudessem estar associados à essa fase do índice, da mesma forma que os outros casos já relatados de fortes chuvas. O sinal positivo do AMM também ocorreu em dezembro de 1999, caracterizando a fase positiva deste padrão e um gradiente meridional de anomalias que indica águas mais aquecidas no Atlântico Tropical Norte em relação ao Atlântico Tropical Sul, o que concorda com a observação de Marengo et al. (2002) ao analisarem as anomalias positivas de TSM no Atlântico Tropical Norte próximo à região afetada.

Flutuações do gradiente de TSM representam a forma dominante de variabilidade no Atlântico Tropical sobre escalas temporais com intervalos interanuais a multidecadais, tendo sido relacionadas principalmente a secas e enchentes na Amazônia e no nordeste e sudeste do Brasil. Assim sendo, alterações do gradiente de TSM no Atlântico Tropical representam um potencial fator de alteração climática especialmente para a região amazônica, entretanto com impactos em escala regional e inclusive global (COX et al. 2004, 2008; LI et al. 2008).

No mês de janeiro de 2011, fortes chuvas atingiram a região serrana do estado do Rio de Janeiro, provocando a morte de mais de 900 pessoas em função de deslizamentos de encostas e inundações. Segundo Pinheiro, Andrade e Moura (2011), a análise do evento apontou que o padrão sinótico esteve associado à ZCAS. O impacto das chuvas foi muito grande em função de uma combinação de fatores, como adensamento populacional e presença de habitações em áreas irregulares. Em dezembro de 2013, outro evento de chuvas intensas afetou novamente o sudeste do Brasil e impactou principalmente o estado do Espírito Santo e a porção leste do estado de Minas Gerais, gerando 46 mortes e 54.000 pessoas desabrigadas, além de grandes prejuízos econômicos. As características atmosféricas relacionadas ao SAM nesses dois eventos apontaram que o padrão esteve na sua fase negativa, sinal oposto ao observado nos eventos de chuvas relatados no sul do Brasil.

Em relação às características oceânicas, o padrão GSA apresentou sinal negativo nesses eventos, o que é coerente com o sinal desse índice durante os eventos de chuvas intensas no sul do Brasil e também representa um sinal oposto ao registrado nos casos de secas extremas no sudeste do Brasil. O GSA negativo aponta para anomalias negativas de TSM no Atlântico Tropical Sul o que pode ter forte relação com o volume de chuvas acima da média e tem coerência com o GSA negativo apontado na maioria dos casos de

ressacas marinhas na costa do sudeste do Brasil. A **Tabela 16** traz uma síntese dos eventos extremos de chuvas, enchentes e deslizamentos abordados no presente item e as respectivas relações com os sinais dos índices estudados.

**Tabela 16** – Discriminação dos eventos extremos de chuvas, enchentes e deslizamentos e associação com os índices AMM, GSA e SAM. Período analisado de 15 anos entre 1999 e 2013.

<b>Eventos extremos</b>	<b>Índice AMM ou GSA</b>	<b>Índice SAM</b>
<b>Chuvas na Amazônia e nordeste do Brasil 2009</b>	AMM-	SAM+
<b>Tempestade/furacão no sul do Brasil 2004</b>	GSA-	SAM+
<b>Chuvas no sul do Brasil 2008</b>	GSA-	SAM+
<b>Chuvas na Venezuela 1999</b>	AMM+	SAM+
<b>Chuvas no sudeste do Brasil 2011</b>	GSA-	SAM-
<b>Chuvas no sudeste do Brasil 2013</b>	GSA-	SAM-

Fontes: Marengo et al. (2002); Pezza e Simmonds (2005); Marengo et al. (2009); INPE (2009); Pinheiro, Andrade e Moura (2011).

## 6. CONCLUSÕES

Esta pesquisa investigou as relações entre extremos de gelo marinho antártico nos setores MBA e MW, os padrões de teleconexões climáticas SAM, AMM e GSA e o clima da América do Sul. Uma vez identificadas as combinações dos padrões que se relacionaram com os extremos máximos e mínimos de extensão de gelo marinho, foram gerados os compostos de anomalias de temperatura do ar e de precipitação na América do Sul ocorridas nos casos de extremos de gelo marinho.

Como era esperado, foram observadas anomalias negativas de temperatura do ar no setor MBA em setembro quando se analisou os mapas de extremos máximos de gelo deste setor. Da mesma forma, verificou-se o predomínio de anomalias positivas neste mesmo setor quando foram analisados os mapas de extremos mínimos de gelo. Vale destacar que houve inversão das anomalias de temperatura do ar entre os setores MBA e MW e essa observação pode estar relacionada com a análise de Ferron (1999) quando menciona que a Península Antártica, situada entre os dois setores, atua como barreira efetiva ao fluxo atmosférico determinando diferenciação climática entre os dois lados situados a oeste e a leste da mesma.

Os extremos máximos de gelo marinho no setor MBA em setembro se relacionaram com a combinação SAM+/AMM+ e anomalias positivas de temperatura do ar entre 0,5° e 2,5°C no sudeste da América do Sul e na parte central do continente, além de um resfriamento já esperado no próprio setor MBA. Já os extremos mínimos associaram-se com a combinação SAM-/AMM+ e com anomalias positivas na maior parte do sudeste da América do Sul, no entanto com anomalias inferiores, entre 0° e 1°C. Parte desses resultados corroboram com Carpenedo e Ambrizzi (2016) que verificaram que nos eventos de expansão de gelo marinho no MBA, é de se esperar um resfriamento da TSM no referido setor que, inclusive, reduz a temperatura do ar próximo à superfície.

Sobre o comportamento da precipitação, os extremos máximos de gelo ocorridos no setor MBA estiveram associados com a combinação SAM+/AMM+ e se relacionaram mais fortemente com anomalias negativas de precipitação na maior parte da América do Sul. Estas variaram entre -0,5 e -2,0 mm/dia, no sudeste da América do Sul e em grande parte do continente. Entretanto, na área mais ao sul do sudeste da América do Sul, entre o sul do Brasil e o Uruguai, além de parte do Atlântico Subtropical, foram registradas anomalias positivas entre 0,5 e 2,0 mm/dia. Os compostos de extremos mínimos de gelo cuja relação é com a combinação SAM-/AMM+ também se associaram com anomalias

de precipitação tanto positivas quanto negativas no sudeste da América do Sul, entretanto entre 1,0 e -1,0 mm/dia. Em suma, os mapas de precipitação para máximos e mínimos de gelo mostraram predomínio de continente mais seco, com exceção da Venezuela, extremo sul do Brasil, Uruguai e nordeste da Argentina, mais úmidos. O extremo norte da América do Sul (Venezuela), mais chuvoso, e o norte do Brasil, mais seco, apresentaram coerência com o AMM+ em virtude do deslocamento para norte da ZCIT na fase positiva deste índice, o que concorda com observações de Marengo et al. (2002; 2008). Além disso, pode-se destacar que a maior extensão de gelo no setor MBA deve estar relacionada à menor precipitação constatada no próprio setor (e da mesma forma o inverso), em virtude dos mecanismos de *feedback* entre a criosfera e a atmosfera.

Para os extremos máximos e mínimos de gelo no MW, ocorreu a combinação inversa em termos de sinais dos índices. A combinação associada às maiores extensões neste caso (SAM-/AMM+) foi a mesma combinação referente às menores extensões relativas ao MBA. Os compostos de extremos máximos de gelo se relacionaram com anomalias positivas de temperatura do ar na maior parte do continente, oscilando entre 0° e 1,5°C no sudeste da América do Sul e na porção central do Brasil, em aproximadamente 20°S e 55°W. Carpenedo (2017) também encontrou relações dos máximos de gelo com o SAM negativo, onde registrou, num total de nove eventos de extremos máximos de gelo marinho durante o inverno, quatro ocorrendo na fase negativa do SAM e apenas um na fase positiva. Assim sendo, a maioria dos anos de extremos máximos de gelo ocorreram na fase negativa do índice. Os máximos de gelo associados ao SAM negativo concordaram também com as análises de Pezza, Hashid e Simmonds (2012) que observaram esta relação durante o inverno. No próprio setor MW, como esperado, registraram-se anomalias positivas de temperatura do ar nos mínimos de gelo corroborando com resultados apontados por Morioka, Engelbrecht e Behera (2017).

Os mapas de extremos mínimos de gelo se associaram com anomalias negativas de temperatura na maior parte do continente (entre 0° e -1,5°C aproximadamente), centradas ao norte de 25°S, com significância estatística. Na maior parte da América do Sul, portanto, um sinal oposto foi observado em comparação com os extremos máximos de gelo. Em suma, foi observado um continente predominantemente mais quente nos máximos de gelo marinho e mais frio nos mínimos, entretanto sinais opostos a esses sinais ocorreram no extremo sul do Brasil, no Uruguai e em parte do território argentino.

Os resultados desta pesquisa relacionados à temperatura do ar apresentaram coerência com os apontados por Vasconcellos, Pizzochero e Cavalcanti (2019) que mostraram uma relação inversa entre o SAM e anomalias de temperatura do ar sobre parte do continente sul-americano durante o mês de setembro. Ainda em relação à temperatura, as anomalias positivas sobre a porção norte da América do Sul são coerentes com a fase positiva do AMM do mesmo modo que as anomalias negativas apresentaram coerência com a fase negativa desse padrão.

Em relação a precipitação, os resultados se mostraram bem contrastantes ao observar os extremos de gelo do setor MW. A América do Sul, de modo geral, apresentou-se mais seca nos casos de extremos máximos de gelo (SAM-/AMM+) e mais chuvosa nos casos de extremos mínimos (SAM+/AMM-).

Há inversão de sinal das anomalias de precipitação entre os casos de extremos máximos e mínimos de gelo no setor MW. A Península Antártica e o setor MW mostraram anomalias negativas de precipitação durante os extremos máximos de gelo. Situação inversa está relacionada à fase positiva do SAM. Em suma, a maior parte da América do Sul apresentou menor precipitação na combinação SAM-/AMM+ quando se teve os máximos de gelo, com a exceção ocorrendo em parte do sul do Brasil, Uruguai e nordeste da Argentina, como já observado por Oliva (2011) e Vasconcellos, Pizzochero e Cavalcanti (2019).

Estes resultados se relacionaram com Caldas et al. (2020) que verificaram maior frequência de frentes frias sobre o sudeste da América do Sul na combinação entre fase negativa do SAM, El Niño e extremos máximos de gelo no MW. Neste caso, a fase negativa do SAM pode inibir a ocorrência de sistemas transientes. Tais resultados podem indicar que as frentes frias que atingem o sudeste da América do Sul nas combinações das fases SAM-/AMM+ nos máximos de gelo marinho causam maior precipitação sobre esta região. Entretanto, esses sistemas não avançam para a grande região de baixas latitudes mais ao norte contribuindo para mais seca na porção mais ao norte da América do Sul, como verificado nas análises das combinações desta pesquisa.

Quanto ao AMM, a sua fase positiva sugere um deslocamento para norte da ZCIT através do *feedback* WES (e.g. XIE; PHILANDER, 1994) que contribui para maior precipitação sobre o extremo norte do continente sul-americano (Venezuela) e precipitação reduzida na Amazônia e nordeste do Brasil. Efeitos opostos ocorreram na fase negativa do AMM, devido ao posicionamento mais ao sul da ZCIT. Esses resultados

indicam que o SAM, o AMM, o GSA e a extensão de gelo atuam conjuntamente na modulação do clima da América do Sul tropical.

Foram selecionados e analisados alguns eventos meteorológicos e climáticos extremos de diferentes naturezas já relatados na literatura com o objetivo de verificar relações com os sinais mensais apresentados pelos índices abordados nesta pesquisa. Foram observados 21 eventos de ressacas já estudados na literatura ocorridos nos meses de abril, maio e junho entre os anos de 1948 e 2008 e em 14 eventos o sinal mensal encontrado para o SAM foi negativo, enquanto que em 7 eventos o sinal foi positivo.

Os resultados levantados por Eguchi e Albino (2021) apontaram que tanto a energia como a quantidade de ressacas foram maiores na fase negativa do SAM. Segundo Marshall et al. (2018), na fase negativa do SAM ocorre o deslocamento dos ventos de oeste em direção ao equador e a redução da atividade de ondas baroclínicas na região de tempestades extratropicais. Os resultados são coerentes com os estudos de Reboita, Ambrizzi e Rocha (2009), que mostraram que a fase negativa do SAM apresenta menor concentração de ciclones no entorno da Antártica e condições mais favoráveis para ciclogêneses em torno de 45°S. Em suma, nesta pesquisa, foi observado que as fases negativas dos índices SAM e GSA estiveram associadas à maior frequência de ressacas ao longo da costa do sudeste do Brasil.

Foram observados eventos de seca na Amazônia, no centro-oeste e no sudeste do Brasil e na Argentina tendo sido selecionados os eventos mais extremos, que ocorreram entre os anos de 1996 e 2015. Em relação aos eventos ocorridos nos meses de setembro, estes estiveram associados a fase negativa do SAM e a fase positiva do AMM nos casos de seca na Amazônia em 1997/1998 e em 2005, o que apresentou coerência com os resultados mostrados nos compostos de precipitação (**Figuras 35c e 35d; 37a e 37b**). Estes resultados apontaram anomalias negativas de precipitação e seca na região da Amazônia e também no Sudeste/Centro-Oeste do Brasil durante as combinações SAM-/AMM+. Em relação ao evento de seca na Amazônia em 2010, o AMM esteve em sua fase positiva o que é coerente com as anomalias de precipitação negativas apontadas nos compostos na região norte do Brasil. Esses resultados são coerentes com os estudos de Marengo et al. (2008).

Na análise dos eventos extremos de chuvas para a Amazônia e nordeste do Brasil, foram observadas combinações dos padrões inversas em relação aos eventos de secas. Deste modo, nos eventos de chuvas intensas, a combinação SAM+/AMM- esteve



associada, concordando com as investigações de Marengo et al. (2009) em relação ao comportamento do Atlântico Tropical, principalmente quanto ao posicionamento da ZCIT na fase negativa do AMM que se desloca mais para sul favorecendo chuvas na região e no nordeste do Brasil.

Nos casos de fortes chuvas relatados no sudeste do Brasil, o SAM apresentou sinal negativo já observado nos eventos de seca no próprio sudeste do Brasil, entretanto o sinal do índice GSA se mostrou invertido (GSA negativo), tendo sido observado o sinal negativo (positivo) para os eventos de chuvas fortes (secas severas), mostrando que o padrão de anomalias de TSM para o Atlântico Sul/Subtropical pode estar relacionado com chuvas sobre o sudeste do Brasil como apontaram estudos prévios (e.g. Bombardi et al. 2014). Sobre o Rio Grande do Sul, Uruguai e nordeste da Argentina, ocorreram sinais inversos onde a seca de 2013 na Argentina se associou ao SAM-/GSA+ e as chuvas no sul do Brasil em 2004 e 2008 se associaram aos sinais opostos destes padrões.

Esta tese de doutorado contribuiu para investigar a dinâmica e a variabilidade climática da Antártica e do continente sul-americano, buscando compreender melhor os mecanismos dos padrões de teleconexões climáticas e possíveis relações com a variabilidade extrema do gelo marinho e a influência sobre o clima da América do Sul. O estudo visa auxiliar para um diagnóstico climático e no melhor entendimento da influência dos mecanismos atmosféricos, criosféricos e oceânicos sobre o clima do continente e deste sobre as atividades humanas e os impactos na sociedade. Constatou-se que a Antártica e os sistemas tropicais, subtropicais e extratropicais interagem entre si e agem conjuntamente na modulação do clima da América do Sul equatorial, tropical e subtropical, podendo inclusive contribuir para a intensificação de eventos meteorológicos e climáticos e influenciar sobremaneira a vida humana.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADLER, R. et al. 2003. The version 2 Global Precipitation Climatology Project (GPCP) monthly precipitation analysis (1979-present). **Journal of Hydrometeorology**, v. 4, n. 6, p. 1147-1167.
- AHLERT, S.; AQUINO, F. E. **Mapa da Antártica**. Climanálise, Boletim de Monitoramento e Análise Climática - CPTEC/INPE. Disponível em: <<http://www6.cptec.inpe.br/revclima/boletim>>. Acesso em: 10 de junho de 2020.
- AMAYA, D. J.; De FLORIO, M. J.; MILLER, A. J.; XIE, S. P. 2017. WES feedback and the atlantic meridional mode: observations and CMIP5 comparisons. **Climate Dynamics**, doi:10.1007/s00382-016-3411-1.
- ANDREOLI, R. V.; KAYANO, M. T. 2007. A importância do Atlântico Tropical Sul e Pacífico Leste na variabilidade de precipitação do nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 22, p. 63-74.
- ANKOMAH, O. Y.; CORDERY, I. 1994. Atlantic Sea surface temperatures and rainfall variability in Ghana. **Journal of Atmospheric Sciences**, n. 7, p. 551-558.
- AQUINO, F. E. 2012. **Conexão climática entre o Modo Anular do Hemisfério Sul com a Península Antártica e o sul do Brasil**. Tese (Doutorado em Geociências). Porto Alegre: IGEO/UFRGS, 121f.
- AQUINO, F. E.; SETZER, A.; SIMÕES, J. C. 2006. Conexões climáticas entre o Rio Grande do Sul e o mar de Weddell. In: **Congresso Brasileiro de Meteorologia**, 14, 2006. A Meteorologia a Serviço da Sociedade. Florianópolis: Sociedade Brasileira de Meteorologia, p. 1-6.
- ASSIS, E. A., ALVES, J. M. B., SILVA, E. M., VASCONCELOS JÚNIOR, F. C., BARBOSA, A. C. B., SANTOS, A. C. S., SOMBRA, S. S. 2019. Modelos acoplados do IPCC (CMIP3-CMIP5) e o gradiente meridional de anomalias de temperatura da superfície do mar (TSM) no Oceano Atlântico tropical. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 34, p. 217-226.
- BARROS, V.; GRIMM, A. M.; DOYLE, M. E. 2002. Relationship between temperature and circulation in southeastern South America and its influence from El Niño and La Niña events. **Journal of the Meteorological Society of Japan**, v. 80, p. 21-32.
- BARRY, R. G.; CARLETON, A. M. 2001. **Synoptic and Dynamic Climatology**. London Routledge, 620p.
- BERTALANFFY, L. V. 1973. **Teoria Geral dos Sistemas**. Petrópolis: Vozes.
- BITTENCOURT, L. P. 2016. **Resposta da circulação no oceano Atlântico Tropical oeste ao Modo Meridional do Atlântico**. Dissertação (Mestrado em Ciências Marinhas Tropicais). Instituto de Ciências do Mar, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Ceará. 81f.

- BOMBARDI, R. J.; CARVALHO, L. M. V.; JONES, C.; REBOITA, M. S. 2014. Precipitation over eastern South America and the South Atlantic Sea surface temperature during neutral ENSO periods. **Climate Dynamics**, v. 42, p. 1553-1568.
- BOMBARDI, R. J.; CARVALHO, L. M. V.; JONES, C. 2014. Simulating the influence of the South Atlantic dipole on the South Atlantic Convergence Zone during neutral ENSO. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 118, p. 251–269.
- BROWWICH, D. J.; PARISH, T. R. 1998. Meteorology of the Antarctic. In: Karoly, D. J.; Vicent, D. G. **Meteorology of the Southern Hemisphere**. Boston, American Meteorological Society, Meteorological Monographs, v. 27, n. 49, p. 175-200.
- BULHÕES, E. M. R.; FERNANDEZ, G. B.; OLIVEIRA FILHO, S. R.; PEREIRA, T. G.; ROCHA, T. B. 2014. Impactos costeiros induzidos por ondas de tempestade entre o Cabo Frio e o Cabo Búzios, Rio de Janeiro, Brasil. **Quaternary and Environmental Geosciences**, 5 (2), p. 155-165.
- CALDAS, C. F.; VASCONCELLOS, F. C.; CAVALCANTI, I. F. A.; CARVALHO, N. O.; LOPES, I. R. 2020. Impact of antarctic sea ice, ENOS and Southern Annular Mode on cold fronts in South America. **Anuário do Instituto de Geociências**, v. 43, p. 229-237.
- CAMPETELLA, C.; POSSIA, N. 2006. Upper-level cut-off lows in southern South America. **Meteorology and Atmospheric Physics**, v. 96, p. 181-191.
- CARPENEDO, C. B. 2017. **Bloqueios atmosféricos associados à variabilidade extrema do gelo marinho antártico e impactos na América do Sul**. Tese (Doutorado em Meteorologia). Departamento de Ciências Atmosféricas, IAG-USP, São Paulo (SP), 237f.
- CARPENEDO, C. B.; AMBRIZZI, T. 2016. Células de circulação meridional durante os eventos extremos de gelo marinho antártico. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 31, p. 251-261.
- CARVALHO, L. M. V.; JONES, C., LIEBMANN, B. 2004. The South Atlantic Convergence Zone: persistence, intensity, form, extreme precipitation and relationships with intraseasonal to interannual activity and extreme rainfall. **Journal of Climate**, v. 17, p. 88-108.
- CARVALHO, L. M. V.; JONES, C.; AMBRIZZI, T. 2005. 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, p. 702-718.
- CAVALCANTI, I. F. A.; KOUSKY, V. E. 2003. **Climatology of South American Cold Fronts**. In: VII International Conference on Southern Hemisphere Meteorology and Oceanography, Wellington, New Zealand. Proceedings... Wellington: American Meteorological Society.
- CAVALCANTI, I. F. A.; KOUSKY, V. E. 2004. Drought in Brazil during summer and fall 2001 and associated atmospheric circulation feature. **Climanálise**, v. 2 (1), p. 1-10

- CAVALCANTI, I. F. A.; KOUSKY, V. E. 2009. Frentes frias sobre o Brasil. In: CAVALCANTI, I. F. A.; FERREIRA, N. J.; JUSTI DA SILVA, M. G. A.; DIAS, M. A. F. S. (Eds.). **Tempo e Clima no Brasil**. São Paulo: Oficina de Textos, 463p.
- CAVALIERI, D. J.; PARKINSON, C. L. 2008. Antarctic sea ice variability and trends, 1979–2006. **Journal of Geophysical Research**, n.113, p.1-19.
- CHANG, P.; JI, L.; LI, H. 1997. A decadal climate variation in the tropical Atlantic Ocean from thermodynamic air-sea interactions. **Nature**, n. 385, p. 516-518.
- CHAVES, R. R. 2006. Associação entre a TSM do Atlântico Norte e a convecção de verão sobre a América do Sul - simulações numéricas. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 24, p. 243-250.
- CHAVES, R. R. 2011. Conexões entre a TSM do Atlântico Sul e a convecção de verão sobre a América do Sul – análise observacional. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 29, p. 5-20.
- CHAVES, R. R.; NOBRE, P. 2004. Interactions between sea surface temperature over the South Atlantic Ocean and the South Atlantic Convergence Zone. **Geophysical Research Letters**, v. 31, n. 3, doi: 10.1029/2003GL018647.
- CHIANG, J. C.; KUSHNIR, Y.; GIANNINI, A. 2002. Deconstructing Atlantic Intertropical Convergence Zone variability: influence of the local cross-equatorial sea surface temperature gradient and remote forcing from the eastern equatorial Pacific. **Journal of Geophysical Research**, v. 107: 4004.
- CHIANG, J. C.; VIMONT, D. J. 2004. Analogous Pacific and Atlantic meridional modes of tropical atmosphere-ocean variability. **Journal of Climate**, v. 17, p. 4143-4158.
- CHRISTOFOLETTI, A. 1979. **Análise de Sistemas em Geografia**. São Paulo: HUI TEC.
- CHRISTOPHERSON, R. W.; BIRKELAND, G. H. 2017. **Geossistemas: uma introdução à geografia física**. Tradução: Théo Amon. Revisão técnica: Francisco Eliseu Aquino... et al. 9ª ed. Porto Alegre: Bookman. 656p.
- CLEM, K. R.; FOGT, R. L. 2013. Varying roles of ENSO and SAM on the Antarctic Peninsula climate in austral spring. **Journal of Geophysical Research Atmospheres**, n. 118, p. 11481-11492.
- CLEM, K. R.; RENWICK, J. A.; MCGREGOR, J.; FOGT, R. L. 2016. The relative influence of ENSO and SAM on Antarctic Peninsula climate. **Journal of Geophysical Research Atmospheres**, n. 121, p. 9324-9341.
- CLIMANÁLISE. 1986. **Boletim de Monitoramento e Análise Climática - INPE/CPTEC**. Número especial. CPTEC-INPE, 125 p.
- COELHO, C. A. S.; OLIVEIRA, C. P.; AMBRIZZI, T.; REBOITA, M. S.; CARPENEDO, C. B.; CAMPOS, J. L. P. S.; TOMAZIELLO, A. C. N.; PAMPUCH, L. A.; CUSTÓDIO, M. S.; DUTRA, L. M. M.; ROCHA, R. P.; REHBEIN, A. 2016. The 2014 southeast Brazil austral summer drought: regional scale mechanisms and teleconnections. **Climate Dynamics**, v. 46, p. 3737-3752.

COMISO, J. C. 2017. **Bootstrap Sea Ice Concentrations from Nimbus-7 SMMR and DMSP SSM/I-SSMIS, Version 3**. Boulder, Colorado USA. NASA National Snow and Ice Data Center. Distributed Active Archive Center.

COMISO, J. C.; GERSTEN, R. A.; STOCK, L. V.; TURNER, J.; PEREZ, G. J.; CHO, K. 2017. Positive trend in the antarctic sea ice cover and associated changes in surface temperature. **Journal of Climate**, v. 30, p. 2251-2267.

CONFORTE, J. C. 1997. **Um estudo de complexos convectivos de mesoescala sobre a América do Sul**. Tese (Doutorado em Meteorologia). Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos - SP. 140f.

COX, P. M.; BETTS, R. A.; COLLINS, M.; HARRIS, C.; HUNTINGFORD, C.; JONES, C., 2004. Amazon forest dieback under climate-carbon cycle projections for the 21st Century. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 78 (1), p. 137-156.

COX, P. M.; HARRIS, P. P.; HUNTINGFORD, C.; COLLINS, M.; BETTS, R. A.; JONES, C.; JUPP, T.; MARENGO, J. A.; NOBRE, C. A. 2008. Increasing risk of Amazonian drought due to decreasing aerosol pollution. **Nature (London)**, v. 453. 212-215.

CUNNINGHAM, C. A.; BONATTI, J. P. 2011. Local and remote responses to opposite Ross Sea ice anomalies: a numerical experiment with the CPTEC/INPE AGCM. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 106, p. 23-44.

DEE, D. P. et al. 2011. Comments on reanalyses suitable for characterizing long-term trends. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 92, p. 65-70.

DIAZ, A. F.; STUDZINSKI, C. D.; MECHOSO, C. R. 1998. Relationships between precipitation anomalies in Uruguay and Southern Brazil and sea surface temperature in the Pacific and Atlantic Oceans. **Journal of Climate**, v. 11, p. 251-271.

DOYLE, M. E.; BARROS, V. R. 2002. Midsummer low-level circulation and precipitation in subtropical South America and related sea surface temperature anomalies in the South Atlantic. **Journal of Climate**, v. 15, p. 3394-3410.

EGUCHI, B.; ALBINO, J. 2021. Influência dos modos de variabilidade climática sobre eventos de ressacas no litoral sul do Espírito Santo, Brasil. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 28, p. 165-183.

FERRAZ, S. E. T. 2004. **Variabilidade intrassazonal da precipitação sobre o sudeste brasileiro**. Tese de Doutorado em Meteorologia, Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, IAG-USP, 216f.

FERREIRA, A. G.; MELLO, N. G. S. 2005. Principais sistemas atmosféricos atuantes sobre a região Nordeste do Brasil e a influência dos oceanos Pacífico e Atlântico no clima da região. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 1, p. 15-28.

FERREIRA, N. J.; SANCHES, M.; SILVA DIAS, M. A. F. 2004. Composição da Zona de Convergência do Atlântico Sul em períodos de El Niño e La Niña. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 19, p. 89-98.

- FERRON, F. A. 1999. **Variações nas razões de isótopos estáveis na neve e no gelo da Ilha Rei George, Antártica**. Dissertação de Mestrado, IG/UFRGS, 125f.
- FIGUEIREDO, J. C.; SCOLAR, J. 1996. **O Tempo de vida médio dos sistemas convectivos de mesoescala na América do Sul**. In: Congresso Brasileiro de Meteorologia, Campos de Jordão, SP, p. 984-986.
- FLOHN, H. 1987. The role of large-scale ice sheets in climate history. **The Physical Basis of Ice Sheet Modelling**, p. 231-241 (IAHS Publ. 170).
- FOGT, R. L.; BROMWICH, D. H. 2006. Decadal variability of the ENSO teleconnection to the high latitude South Pacific governed by coupling with the Southern Annular Mode. **Journal of Climate**, v. 19, p. 979-997.
- FOGT, R. L., MARSHALL, G. J. 2020. The Southern Annular Mode: variability, trends, and climate impacts across the southern hemisphere. **WIREs Climate Change**, n. 11: e652.
- FOLTZ, G. R.; McPHADEN, M. J.; LUMPKIN, R. 2012. A strong Atlantic Meridional Mode event in 2009: the role of mixed layer dynamics. **Journal of Climate**, v. 25, p. 363-380.
- GILLETT, N. P.; KELL, T. D.; JONES, P. D. 2006. Regional climate impacts of the Southern Annular Mode. **Geophysical Research Letters**, n. 33, L23704, doi:10.1029/2006GL027721.
- GLOERSEN, P.; CAMPBELL, W. J.; CAVALIERI, D. J.; COMISO, C.; PARKINSON, C. L.; ZWALLY, H. J. (Eds.). 1992. **Arctic and antarctic sea ice: satellite passive-microwave observations and analysis**. Washington D. C., NASA. (NASA Special publication, 511), 290p.
- GONG, D.; WANG, S. 1998. Antarctic Oscillation: concept and applications. **Chinese Science Bulletin**, v. 43, n. 9, p. 734-738.
- GONG, D.; WANG, S. 1999. Definition of Antarctic Oscillation Index. **Geophysical Research Letters**, n. 26, p. 459-462.
- GONG, T., FELDSTEIN, S. B., LUO, D. 2010. The impact of ENSO on wave breaking and Southern Annular Mode events. **Journal of Atmospheric Sciences**, n. 67, p. 2854-2870.
- GRIMM, A. M. 2004. How do La Niña events disturb the summer monsoon system in Brazil? **Climate Dynamics**, v. 22, n. 2-3, p. 123-138.
- GRIMM, A. M. 2011. Interannual climate variability in South America: impacts on seasonal precipitation, extreme events, and possible effects of climate change. **Stochastic Environmental Research and Risk Assessment**. n. 25, p. 537-554.
- GRIMM, A. M., FERRAZ, S. E. T., GOMES, J. 1998. Precipitation anomalies in southern Brazil associated with El Niño and La Niña events. **Journal of Climate**, v. 11, p. 2863-2880.

GROISMAN, P. Y.; KNIGHT, R. W.; EASTERLING, D. R.; KARL, T. R.; HEGERL, G. C.; RAZUVAEV, V. N. 2005. Trends in intense precipitation in the climate record. **Journal of Climate**, v. 18. 1326-1350.

HALL, A.; VISBECK, M. 2002. Synchronous variability in the Southern Hemisphere atmosphere, sea ice and ocean resulting from the annular mode. **Journal of Climate**, v. 15, p. 3043-3057.

HANNART, A.; VERA, C.; OTTO, F. E. L.; CERNE, B. 2015. Causal influence of anthropogenic forcings on the argentinian heat wave of december 2013. **Bulletin of the American Meteorological Society**. Special Supplement, v. 96, n. 12.

HARTMANN, D. L.; LO, F. 1998. Wave-Driven zonal flow vacillation in the Southern Hemisphere. **Journal of Atmospheric Sciences**, n. 55, p. 1303-1315.

HASTENRATH, S. 2006. Circulation and teleconnection mechanisms of northeast Brazil droughts. **Progress in Oceanography**, n. 70, p. 407-415.

HASTENRATH, S.; HELLER, L. 1977. Dynamics of climatic hazards in north-east Brazil. **Quarterly Journal of The Royal Meteorological Society**, v. 110, p. 411- 425.

HOUNSOU-GBO, G. A. 2015. **Dinâmica do Atlântico Tropical e seus impactos sobre o clima ao longo da costa do nordeste do Brasil**. Tese (Doutorado em Oceanografia). Recife: DOCEAN/UFPE, 146f.

HUANG, B.; THORNE, P. W.; BANZON, V. F.; et al. 2017. Extended reconstructed sea surface temperature version 5 (ERSSTv5): upgrades, validations and intercomparisons. **Journal of Climate**, v. 30, p. 8179-8205.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS – INPE. 2009. **As chuvas de novembro de 2008 em Santa Catarina: um estudo de caso visando à melhoria do monitoramento e da previsão de eventos extremos**. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). São José dos Campos/SP. 24 pp.

IWABE, C. M. N.; da ROCHA, R. P. 2009. An event of stratospheric air intrusion and its associated secondary surface cyclogenesis over the South Atlantic Ocean. **Journal of Geophysical Research**, v. 114, D09101, doi:10.1029/2008JD011119.

JONES, J. M., WIDMANN, M. 2003: Instrument and tree-ring-based estimates of the Antarctic Oscillation. **Journal of Climate**, v. 6, p. 3511-3524.

JONES, J. M.; WIDMANN, M. 2004. Atmospheric Science: early peak in Antarctic Oscillation Index. **Nature**, n. 432, p. 290-291.

JORGETTI T.; SILVA DIAS, P. L.; FREITAS, E. D. 2014. The relationship between South Atlantic SST and SACZ intensity and positioning. **Climate Dynamics**, v. 42, p. 3077-3086.

KAYANO, M. T.; ANDREOLI, R. V. 2009. Clima da Região Nordeste do Brasil. In: CAVALCANTI, I. F. A.; FERREIRA, N. J.; JUSTI DA SILVA, M. G. A.; DIAS, M. A. F. S. (Eds.). **Tempo e Clima no Brasil**. São Paulo: Oficina de Textos, 463p.

- KELLETT, J.; SPARKS, D. 2012. **Disaster Risk Reduction: spending where it should count**. Global Humanitarian Assistance – GHA. Briefing paper. 40 pp.
- KIDSON, J. W. 1988. Interannual variations in the Southern Hemisphere circulation. **Journal of Climate**, v. 1, p. 1177–1198.
- KING, J. C.; TURNER, J. 1997. **Antarctic Meteorology and Climatology**. Cambridge: University Press, 409 p.
- KODAMA, Y. M. 1992. 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**, v. 70, p. 813–835.
- KUSHNIR, Y.; ROBINSON, W. A.; CHANG, P.; ROBERTSON, A. W. 2006. The physical basis for predicting Atlantic sector seasonal-to-interannual climate variability. **Journal of Climate**, v. 19, p. 5949–5970.
- KWOK, R.; COMISO, J. C. 2002. Spatial patterns of variability in antarctic surface temperature: connections to the Southern Hemisphere Annular Mode and the Southern Oscillation. **Geophysical Research Letters**, n. 29, p. 1705–1708.
- LEFEBVRE, W.; GOOSSE, H.; TIMMERMANN, R.; FICHEFET, T. 2004. Influence of the Southern Annular Mode on the sea ice–ocean system. **Journal of Geophysical Research**, v. 109, C09005, doi:10.1029/2004JC002403.
- LI, W.; FU, R.; DICKINSON, R. E. 2006. Rainfall and its seasonality over the Amazon in the 21st century as assessed by the coupled models for the IPCC AR4. **Journal of Geophysical Research**, v. 111, D02111.
- LI, W.; FU, R.; JUAREZ, R. I. N.; FERNANDES, K. 2008. Causes of recent changes of rainfall variabilities and implications to the future climate in the Amazon region. **Philosophical Transactions of the Royal Society**, v. 363, p. 1767–1772.
- LIMA, F. U. F. 2012. **Interação trópicos-extratrópicos, relações com o Oceano Austral e impactos no gelo marinho antártico**. Tese (Doutorado em Meteorologia). Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, IAG-USP, São Paulo – SP. 142f.
- LIMA, F. U. F.; CARVALHO, L. M. V. 2017. Mechanism associated with winter intraseasonal extreme sea ice extent in the Weddell Sea. **Advances in Polar Science**, v. 28, p. 171–184.
- LIMA, R. F.; LINS-DE-BARROS, F. M.; CIRANO, M. 2021. Análise das condições meteocanográficas em eventos de ressaca do mar no litoral do estado do Rio de Janeiro, Brasil, no período de 1948 a 2008. **Anuário do Instituto de Geociências/UFRJ**, v. 44, p. 1–12.
- LIMPASUVAN, V.; HARTMANN, D. L. 2000. Wave-Maintained Annular Modes of climate variability. **Journal of Climate**, v. 13, p. 4414–4429.
- LINS-DE-BARROS, F. M.; KLUMB-OLIVEIRA, L.; LIMA, R. F. 2018. Avaliação histórica da ocorrência de ressacas marinhas e danos associados entre os anos de 1979 e 2013 no litoral do estado do Rio de Janeiro (Brasil). **Revista da Gestão Costeira Integrada**, v. 18, p. 85–102.



- LYON, B. 2003. Enhanced seasonal rainfall in northern Venezuela and the extreme events of December 1999. **Journal of Climate**, v. 16, p. 2302-2306.
- MARCHEZINI, V. 2018. As ciências sociais nos desastres: um campo de pesquisa em construção. **Revista Brasileira de Informação Bibliográfica em Ciências Sociais - BIB**, v. 83, p. 43-72.
- MARENGO J. A.; BUSTAMANTE, J. F.; SOARES, W. R.; ROJAS, M. I. 2002. Avaliação dos extremos de chuva no norte da Venezuela de 13-17 de dezembro 1999 - estudos observacionais. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 18, p. 43-60.
- MARENGO, J. A.; NOBRE, C. A.; TOMASELLA, J.; OYAMA, M. D.; OLIVEIRA, G. S.; OLIVEIRA, R.; CAMARGO, H.; ALVES, L. M.; BROWN, I. F. 2008. The drought of Amazonia in 2005. **Journal of Climate**, v. 21, p. 495-516.
- MARENGO, J. A.; JONES, R.; ALVES, L.; VALVERDE, M. 2009. Future change of temperature and precipitation extremes in South America as derived from the PRECIS regional climate modeling system. **International Journal of Climatology**. Published online in Wiley InterScience (www.interscience.wiley.com). DOI: 10.1002/joc.1863
- MARQUES, R. F. C.; RAO; V. B. 2000. Interannual variations of blocking in the Southern Hemisphere and their energetics. **Journal Geophysical Research**, n. 105, p. 4625-4636.
- MARSHALL, A. G.; HEMER, M. A.; HENDON, H. H.; MCINNES, K. L. 2018. Southern annular mode impacts on global ocean surface waves. **Ocean Modelling**, v. 129, p. 58-74.
- MONTEIRO, C. A. F. 1975. **Teoria e Clima Urbano**. Tese (Livre Docência) – Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo.
- MONTEIRO, C. A. F. 1991. **Clima e excepcionalismo: conjecturas sobre o desempenho da atmosfera como fenômeno geográfico**. Florianópolis: Editora da Universidade Federal de Santa Catarina.
- MORIOKA, Y.; TOZUKA, T.; YAMAGATA, T. 2011. On the growth and decay of the Subtropical Dipole Mode in the South Atlantic. **Journal of Climate**, v. 24, p. 5538-5554.
- MORIOKA, Y.; ENGELBRECHT, F.; BEHERA, S. K. 2017. Role of Weddell Sea ice in South Atlantic atmospheric variability. **Climate Research**, v. 74, p. 171-184.
- MOURA, A. D.; SHUKLA, J. 1981. On the dynamics of droughts in northeast Brazil: observations, theory and numerical experiments with a general circulation model. **Journal of Atmospheric Sciences**, [s. L], n. 38, p. 2653-2675.
- NASCIMENTO, E. L.; AMBRIZZI, T. 2002. The influence of atmospheric blocking on the Rossby Wave propagation in Southern Hemisphere winter flows. **Journal of the Meteorological Society of Japan**, v. 80, n. 2, p. 139-159.
- NATORI, A. A. 2003. **Relação entre precipitação no sudeste da América do Sul e TSM nos Oceanos Pacíficos e Atlântico**. Dissertação de (Mestrado em Meteorologia). Departamento de Ciências Atmosféricas, IAG-USP, São Paulo-SP, 243f.

NEPSTAD, D.; MOREIRA, A.; ALENCAR, A. 1999. **A Floresta em chamas: origens, impactos e prevenção de fogo na Amazônia**. Programa Piloto para a Prevenção das Florestas Tropicais do Brasil, PPG7. Ed. Revisada, Brasília, 202 pp.

NIETO FERREIRA, R.; RICKENBACH, T. M.; HERDIES, D. L.; CARVALHO, L. M. 2003. Variability of south american convective cloud systems and tropospheric circulation during January-March 1998 and 1999. **Monthly Weather Review**, v. 131, p. 961-973.

NOBRE, P. 1993. **On the genesis of anomalous SST and rainfall patterns over the tropical Atlantic basin**. Dissertação de Mestrado, University of Maryland at College Park, Maryland, 151f.

NOBRE, P.; SHUKLA, J. 1996. Variations of sea surface temperature, wind stress and rainfall over the tropical Atlantic and South America. **Journal of Climate**, v. 9, p. 2464-2479.

NUNES, L. H. 2015. **Urbanização e Desastres Naturais – abrangência América do Sul**. São Paulo: Oficina de Textos

OLIVA, F. G. 2011. **Relações entre o Índice de Oscilação Antártica e as vazões na bacia hidrográfica do rio Uruguai, Região Sul do Brasil**. Dissertação (Mestrado em Meteorologia). Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Rio de Janeiro – RJ. 83f.

OLIVA, F. G.; JUSTI DA SILVA, M. G. A. 2021. Does Antarctic Oscillation have links and influence precipitation over the Uruguay river drainage basin in southeastern South America? **Journal of Weather and Climate Change**, v. 12, p. 1501-1514.

OLIVA, F. G.; VASCONCELLOS, F. C.; SILVA, T. M.; PIZZOCHERO, R. M. 2021. Extremos de gelo marinho antártico no mar de Weddell e relações com padrões de teleconexões climáticas. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 14, n. 5, p. 2739-2754.

PARISE, C. K. 2014. **Sensitivity and memory of the current mean climate to increased antarctic sea ice: the role of sea ice dynamics**. Ph. D. thesis, National Institute for Space Research (INPE), 218f.

PARISE, C. K.; PEZZI, L. P.; HODGES, K. I.; JUSTINO, F. 2015. The influence of sea ice dynamics on the climate sensitivity and memory to increased antarctic sea ice. **Journal of Climate**, v. 28, p. 9642-9688.

PEZZA, A. B.; SIMMONDS, I. 2005. The first South Atlantic hurricane: unprecedented blocking, low shear and climate change. **Geophysical Research Letters**, v. 32, L15712.

PEZZA, A. B.; DURRANT, T. H.; SIMMONDS, I., SMITH, I. 2008. Southern Hemisphere synoptic behaviour in extreme phases of SAM, ENSO, sea ice extent and southern Australia rainfall. **Journal of Climate**, v. 21, p. 5566-5584.

PEZZA, A. B.; SIMMONDS, I.; PEREIRA FILHO, A. 2009. Climate perspective on the large-scale circulation associated with the transition of the first South Atlantic hurricane. **International Journal of Climatology**, v. 29, n. 8, p. 1116-1130.

PEZZA, A. B.; RASHID, H. A.; SIMMONDS, I. 2012. Climate links and recent extremes in antarctic sea ice, high-latitude cyclones, Southern Annular Mode and ENSO. **Climate Dynamics**, n. 38, p. 57-73.

PHILANDER, S. G. H., 1986. Unusual conditions in the tropical Atlantic Ocean in 1984. **Nature**, n. 322, p. 236-238.

PINHEIRO, H. R.; ANDRADE, K. M.; MOURA, C. W. 2011. A maior catástrofe climática do Brasil sob a visão operacional do CPTEC/INPE. In: **Simpósio Internacional de Climatologia**, 2011, João Pessoa - PB. Mudanças Climáticas e Eventos Extremos de Tempo e seus Impactos nas Áreas Urbanas.

RAIA, A.; CAVALCANTI, I. F. A. 2008. The life cycle of the south american monsoon system. **Journal of Climate**, v. 21, p. 6227-6246.

RAO, V. B.; HADA, K. 1990. Characteristics of rainfall over Brazil: annual variations and connections with the Southern Oscillation. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 42, p. 81-91.

RAO, V. B., CARMO, A. M. C., FRANCHITO, S. H. 2003. Interannual variations of storm tracks in the Southern Hemisphere and their connections with the Antarctic Oscillation. **International Journal of Climatology**, n.23, p.1537-1545.

RAPHAEL, M. N.; HOBBS, W.; WAINER, I. 2011. The effect of antarctic sea ice on the Southern Hemisphere atmosphere during the southern summer. **Climate Dynamics**, n. 36, p.1403-1417.

REBOITA, M. S. 2008. **Ciclones extratropicais sobre o Atlântico Sul: simulação climática e experimentos de sensibilidade**. Tese de Doutorado em Meteorologia, Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas – IAG/USP, 359 f.

REBOITA, M. S.; AMBRIZZI, T.; ROCHA, R. P. 2009. Relations between the Southern Annular Mode and Southern Hemisphere atmospheric systems. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 24, n. 1, p. 48-62.

REBOITA, M. S.; GAN, M. A; ROCHA, R. P.; AMBRIZZI, T. 2010. Regimes de precipitação na América do Sul: uma revisão bibliográfica. **Revista Brasileira de Meteorologia**, n. 25, p. 185-204.

REBOITA, M. S., NIETO FERREIRA, R., ROCHA, R. P., DRUMOND, A., VÁZQUEZ, M., GIMENO, L. 2019. Characterization of moisture sources for Austral Seas and relationship with sea ice concentration. **Atmosphere**, n. 10, p. 627-647.

RENWICK, J. A. 2001. Southern Hemisphere Circulation and relations with sea ice and sea surface temperature. **Journal of Climate**, v. 15, p. 3058-3068.

RODRIGUES, M. L. G.; FRANCO, D.; SUGAHARA, S. 2004. Climatologia de frentes frias no litoral de Santa Catarina. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 22, n. 2, p. 135-151.

ROSSO, F. V.; BOIASKI, N. T.; FERRAZ, S. E. T.; ROBLES, T. C. 2018. Influence of the Antarctic Oscillation on the South Atlantic Convergence Zone. **Atmosphere**, v. 9 (11), 431.

- SALIO, P., NICOLINI, M.; ZIPSER, J. 2007. Mesoscale convective systems over southeastern South American low-level jet. **Monthly Weather Review**, n. 135, p. 1290-1309.
- SANTOS, S. R. Q.; BRAGA, C. C.; SANSÍGOLO, C. A.; NEVES, T. T. A. T.; SANTOS, A. P. P. 2017. Droughts in the Amazon: identification, characterization and dynamical mechanisms associated. **American Journal of Climate Change**, v. 6 (02), p. 425-442.
- SARAVANAN, R.; CHANG, P. 2000. Interaction between tropical Atlantic variability and El Niño-Southern Oscillation. **Journal of Climate**, v. 13, p. 2177-2194.
- SCHNEIDER, D. P., STEIG, E. J., COMISO, J. C. 2004: Recent climate variability in Antarctica from satellite-derived temperature data. **Journal of Climate**, v. 17, p. 1569-1583.
- SEAGER, R.; NAIK, N.; BAETHGEN, W.; ROBERTSON, A.; KUSHNIR, Y.; NAKAMURA, J.; JURBURG, S. 2010. Tropical oceanic causes of interannual to multidecadal precipitation variability in southeast South America over the past century. **Journal of Climate**, v. 23, p. 5517-5539.
- SEN GUPTA, A. S.; ENGLAND, M. H. 2006. Coupled ocean-atmosphere-ice response to variations in the Southern Annular Mode. **Journal of Climate**, v. 19, p. 4457-4486.
- SERVAIN, J. 1991. Simple climatic indices for the tropical Atlantic Ocean and some applications. **Journal of Geophysical Research**, v. 96, p. 137-146.
- SHIOTANI, M. 1990. Low-frequency variations of the zonal mean state of the Southern Hemisphere troposphere. **Journal of Meteorological Society of Japan**, n. 68, p. 461-471.
- SILVESTRI, G. E.; VERA, C. S. 2003. Antarctic Oscillation signal on precipitation anomalies over southeastern South America. **Geophysical Research Letters**, v. 30, n. 21, p. 2115-2118.
- SILVESTRI, G. E.; VERA, C. S. 2009. Nonstationary impacts of the southern annular mode on southern hemisphere climate. **Journal of Climate**, v. 22, p. 6142-6148.
- SONG, H.-J.; CHOI, E.; LIM, G.-H.; KIM, Y.H.; KUG, J.-S. 2011. The central Pacific as the export region of the El Niño-Southern Oscillation Sea surface temperature anomaly to antarctic sea ice. **Journal of Geophysical Research**, v. 116, p. 1-12.
- SOTCHAVA, V. B. 1977. **O estudo de geossistemas**. São Paulo: Instituto de Geografia USP (Métodos em Questão, 16).
- SOUZA, E. B. 1997. **Um estudo observacional sobre o padrão de dipolo de anomalias de temperatura da superfície do mar no Oceano Atlântico tropical**. Dissertação (Mestrado em Meteorologia). Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos - SP, 117 f.
- SOUZA, E. B.; NOBRE, P. 1998. Uma revisão sobre o padrão de dipolo no Atlântico tropical. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 13, n. 1, p. 31-44.

- STERL, A.; HAZELEGER, W. 2003. Coupled variability and air-sea interactions in the south atlantic ocean. **Climate Dynamics**, v. 21, p. 559-571.
- TEDESCHI, R. G.; CAVALCANTI, I. F. A.; GRIMM, A. M. 2013. Influences of two types of ENSO on south american precipitation. **International Journal of Climatology**, n. 33, p. 1382-1400.
- THOMPSON, D. W. J.; SOLOMON, S. 2002. Interpretation of recent Southern Hemisphere climate change. **Science**, n. 296, p. 895-899.
- THOMPSON, D. W. J.; WALLACE, J. M. 2000. Annular Modes in the extratropical circulation. Part I: Month-to-month variability. **Journal of Climate**, n. 13, p. 1000-1016.
- TORRES, J. C.; NICOLINI, M. A. 2002. A composite of mesoscale convective systems over southern South America and its relationship to low level jet events. VAMOS/CLIVAR/WCRP. **Conference on South American low-level jet**. Santa Cruz de la Sierra, Bolívia.
- TURNER, J. 2003. **The Meteorology and Climatology of the Antarctic Plateau**. Memorie Della Supplementi, Società Astronomica Italiana, n. 2, p. 26-31.
- UVO, C.B.; REPELLI, C. A.; ZEBIAK, S. E.; KUSHNIR, Y. 1998. The relationships between tropical Pacific and Atlantic SST and northeast Brazil monthly precipitation. **Journal of Climate**, v. 11, p. 551-562.
- VASCONCELLOS, F. C. 2008. **Variabilidade atmosférica associada a casos extremos de precipitação na Região Sudeste do Brasil**. Dissertação (Mestrado em Meteorologia). Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos - SP.110 f.
- VASCONCELLOS, F. C. 2012. **A Oscilação Antártica – mecanismos físicos e a relação com características atmosféricas sobre a América do Sul e oceanos adjacentes**. Tese (Doutorado em Meteorologia). Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos - SP. 195 f.
- VASCONCELLOS, F. C.; CAVALCANTI, I. F. A. 2010. Extreme precipitation over southeastern Brazil in the austral summer and relations with the Southern Hemisphere Annular Mode. **Atmospheric Science Letters**, v. 11, n. 01, p. 21-26.
- VASCONCELLOS, F. C.; PIZZOCHERO, R. M; CAVALCANTI, I. F. A. 2019. Month-to-month impacts of Southern Annular Mode over South America climate. **Anuário do Instituto de Geociências/UFRJ**, v. 42, p. 783-792.
- VASCONCELLOS, F. C.; DENG, Y.; ZHANG, H.; MARTINS, G. 2020. Austral summer precipitation biases over tropical South America in five CMIP5 earth system models. **International Journal of Climatology**, v. 40, p. 6506-6525.
- VASCONCELLOS, F. C.; SOUZA, J. N. 2020. The anomalous wet 2020 southeast Brazil austral summer: characterization and possible mechanisms. **Atmosfera**, v. NA, p. NA.
- VENEGAS, S. A.; MYSAK, L. A.; STRAUB, D. N. 1997. Atmosphere-ocean coupled variability in the South Atlantic. **Journal of Climate**, v. 10, p. 2904-2920.
- VERA, C.; HIGGINS, W.; AMBRIZZI, T.; AMADOR, J.; GARREAUD, R.; GOCHIS, D.; GUTZLER, D.; LETTENMAIER, D.; MARENGO, J.; MECHOSO, C. R.;

- NOGUÉS-PAEGLE, J.; SILVA DIAS, P. L.; ZHANG, C. 2006. Toward a Unified View of the American Monsoon Systems. **Journal of Climate**, v. 19, p. 4977-5000.
- VIMONT, D. J.; KOSSIN, J. P. 2007. The Atlantic Meridional Mode and hurricane activity. **Geophysical Research Letters**, v. 34, L07709.
- WAGNER, R. G. Mechanisms controlling variability of the interhemispheric sea surface temperature gradient in the tropical Atlantic. 1996. **Journal of Climate**, v. 9, p. 2010-2019.
- WAINER, I., PRADO, L. F., KHODRI, M., OTTO-BLIESNER, B. 2014. Reconstruction of the south atlantic subtropical dipole index for the past 12000 years from surface temperature proxy. **Scientific Reports** 4, 5291; DOI:10.1038/srep05291.
- WALKER, G. T., 1928: World Weather. **Quarterly Journal of Royal Meteorological Society**, v. 54, n. 226, p. 79–87.
- WALLACE, J.; HOBBS, P. 2006. **Atmospheric Science - An Introduction Survey**. Elsevier, 504p.
- WARD, M. N.; FOLLAND, C. K. 1991. Prediction of seasonal rainfall in the north Northeast of Brazil using eigenvectors of sea surface temperature. **International Journal of Climatology**, 11, 711–743.
- WILHITE, D. A. **The role of disaster preparedness in national planning with specific reference to droughts**. In: SIVAKUMAR, M. V., MOTHA, R. P., DAS, H. P. (eds.) *Natural Disasters and Extreme Events in Agriculture*. Springer, Berlin, Heidelberg.
- WILKS, D. S. 2006. **Statistical methods in the atmospheric sciences**. San Diego, CA: Academic Press. 627p. (International Geophysics Series 91) ISBN 978-0-12-751966-1.
- XIE, P. P.; ARKIN, P. A. 1997. Global precipitation: a 17-year monthly analysis based on gauge observations, satellite estimates and numerical model outputs. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 78, p. 2539-2558.
- XIE, S.-P.; CARTON, J. A. 2004. Tropical Atlantic variability: patterns, mechanisms, and impacts. In: WANG, C.; XIE, S. P.; CARTON, J. A. (Ed.). **Earth's Climate**, American Geophysical Union, Washington D.C.
- XIE S.-P.; PHILANDER, S. G. H. 1994. A coupled ocean-atmosphere model of relevance to the ITCZ in the eastern Pacific. **Tellus**, n. 46A, p. 340–350.
- YUAN, X. J. 2004. ENSO-related impacts on antarctic sea ice: a synthesis of phenomenon and mechanisms. **Antarctic Science**, v. 16, n. 4, p. 415-425.
- ZEBIAK, S. E. 1993. Air-sea interaction in the equatorial Atlantic region. **Journal of Climate**, v. 6, p. 1567-1586.
- ZENG, N.; HO YOON, J.; MARENGO, J. A.; SUBRAMANIAM, A.; NOBRE, C. A.; MARIOTTI, A.; NEELIN, J. D. 2008. Causes and impacts of the 2005 Amazon drought. **Environmental Research Letters**, n. 3. DOI: 10.1088/1748-9326/3/1/014002

ZHOU, J.; LAU, K. -M. 1998. Does a monsoon climate exist over South America? **Journal of Climate**, v. 11, p. 1020-1040.

Páginas da Web:

AUSTRALIAN GOVERNMENT – Australian Antarctic Division. **Australian Antarctic Program**. Disponível em: <http://www.antarctica.gov.au>. Acesso em 05/06/2021

NOAA – National Oceanic and Atmospheric Administration. **Physical Sciences Laboratory**. Disponível em: <http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/timeseries/monthly/AMM/>. Acesso em 11/01/2019.

NOAA – National Oceanic and Atmospheric Administration. **Climate Prediction Center**. Disponível em: [http://www.cpc.noaa.gov/products/precip/CWlink/daily\\_ao\\_index/history/metod.shtml](http://www.cpc.noaa.gov/products/precip/CWlink/daily_ao_index/history/metod.shtml). Acesso em 15/01/2019.

NSIDC – National Snow and Ice Data Center. **Polar Stereographic Data**. Disponível em: [https://nsidc.org/data/polar-stereo/tools\\_geo\\_pixel.html](https://nsidc.org/data/polar-stereo/tools_geo_pixel.html). Acesso em 20/11/2018.

SCAR – Scientific Committee on Antarctic Research. **Some Antarctic Statistics**. Disponível em: <http://www.scar.org>. Acesso em 12/10/2018.

UNISDR. United Nations, 2015. International Strategy for Disaster Reduction. Sendai Framework for Disaster Risk Reduction 2015-2030. United Nations, 2015. Disponível em: [https://www.preventionweb.net/files/43291\\_sendaiframeworkfordrren.pdf](https://www.preventionweb.net/files/43291_sendaiframeworkfordrren.pdf)

## ANEXO

Disponível em: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe/article/viewFile/249034/39140>.

Revista Brasileira de Geografia Física v.14, n 05 (2021) 2739-2754



ISSN:1984-2295

# Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe>



## Extremos de Gelo Marinho Antártico no Mar de Weddell e Relações com Padrões de Teleconexões Climáticas

Fábio Guimarães Oliva<sup>1</sup>, Fernanda Cerqueira Vasconcellos<sup>2</sup>, Telma Mendes da Silva<sup>3</sup>, Renan Martins Pizzochero<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Licenciado e Bacharel em Geografia, Mestre em Meteorologia, Doutorando em Geografia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rua Athos da Silveira Ramos, 274, CCMN, Instituto de Geociências, Bloco G1, Cidade Universitária, Ilha do Fundão, CEP: 21941-916 (faoliva@hotmail.com, autor correspondente). <sup>2</sup>Doutora em Meteorologia, Meteorologista, Professora Adjunta, Departamento de Meteorologia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rua Athos da Silveira Ramos, 274, CCMN, Instituto de Geociências, Bloco G1, Cidade Universitária, Ilha do Fundão, CEP: 21941-916 (fernandavasconcellos@igeo.ufrj.br). <sup>3</sup>Doutora em Geografia, Bacharel em Geografia, Professora Associada II, Departamento de Geografia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rua Athos da Silveira Ramos, 274, CCMN, Instituto de Geociências, Bloco G1, Cidade Universitária, Ilha do Fundão, CEP: 21941-916 (telmendes@globo.com). <sup>4</sup>Meteorologista, Mestrando em Meteorologia, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE, Rodovia Presidente Dutra, Km 39, Cachoeira Paulista/SP, CEP: 12630-000 (renan18martins@gmail.com).

Artigo recebido em 13/12/2020 e aceito em 09/09/2021

### RESUMO

Este artigo tem como objetivo analisar relações entre as fases de padrões de teleconexões tropicais, subtropicais e extratropicais e as extensões de gelo marinho antártico no Mar de Weddell (MW). Busca-se melhor compreensão acerca da variabilidade do gelo marinho e das interações entre a criosfera e a atmosfera, além de prover dados para estudos sobre previsões e variabilidade climáticas. Este artigo analisa setembro, o mês com a maior cobertura de gelo marinho no Mar de Weddell. Utilizou-se os índices mensais dos padrões Modo Anular do Sul (*Southern Annular Mode* – SAM), Modo Meridional do Atlântico (*Atlantic Meridional Mode* – AMM) e Gradiente Subtropical do Atlântico Sul (GSA). O índice SAM foi calculado através da Função Ortogonal Empírica nas anomalias de altura geopotencial em 700 hPa na região ao sul de 30°S, o índice AMM foi extraído do *National Centers for Environmental Prediction/National Center for Atmospheric Research* (NCEP/NCAR) e o índice GSA foi criado a partir dos dados de temperatura da superfície do mar (TSM) do ERSSTv5 do *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA). Nas avaliações conjuntas, as combinações de fases que se relacionaram às maiores extensões de gelo foram SAM negativo/AMM positivo e SAM negativo/GSA positivo enquanto as que se associaram às menores extensões foram as de sinais opostos. As correlações do SAM com o gelo marinho são negativas e dos índices AMM e GSA com o gelo marinho são positivas, mostrando coerência com os resultados apresentados nos compostos e nos gráficos boxplots.

Palavras-chave: Teleconexão, variabilidade climática, gelo marinho antártico, Mar de Weddell.

## Extreme Antarctic Sea Ice in the Weddell Sea and Links With Teleconnection Patterns of Climate Variability

### ABSTRACT

This article examines the links between the phases of teleconnection patterns of climate variability and the Weddell's Sea ice extent. The goal is to understand better the sea ice variability and connections between the cryosphere and the atmosphere. This paper focuses on September, the month with the largest sea ice cover in the Weddell Sea. The Southern Annular Mode (SAM), the Atlantic Meridional Mode (AMM) and the Atlantic Subtropical Gradient (ASG) monthly indices were used. The SAM index was calculated through Empirical Orthogonal Function in the geopotential height anomalies of 700 hPa. The AMM index was obtained by the National Centers for Environmental Prediction/National Center for Atmospheric Research (NCEP/NCAR). The ASG index was created using sea surface temperature (SST) data obtained by the National Oceanic and Atmospheric Administration (ERSSTv5/NOAA) through the difference of SST anomalies averaged at two distinct areas situated in the Subtropical Atlantic Ocean. Considering the effect of these indices combined, the negative SAM/positive AMM phase and the negative SAM/positive ASG phase were associated with maximum Antarctic sea ice extents. The opposite combinations of indices were related with minimum Antarctic sea ice

2739

Oliva, F., G., Vasconcellos, F., C., Silva, T., M., Pizzochero, R., M.