

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
INSTITUTO DE GEOGRAFIA
CURSO DE BACHARELADO EM GEOGRAFIA

Laboratório de Climatologia e Recursos Hídricos - LCRH



**EVENTOS EXTREMOS DE GELO MARINHO NO MAR DE
WEDDELL E SUA RELAÇÃO COM O ANTICICLONE
SUBTROPICAL DO ATLÂNTICO SUL**

Rafael César Silva

Orientadora:

Prof.^a Dr^a Camila Bertoletti Carpenedo

Uberlândia, dezembro de 2018.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
INSTITUTO DE GEOGRAFIA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA

Laboratório de Climatologia e Recursos Hídricos - LCRH

**EVENTOS EXTREMOS DE GELO MARINHO NO MAR DE
WEDDELL E SUA RELAÇÃO COM O ANTICICLONE
SUBTROPICAL DO ATLÂNTICO SUL**

Rafael César Silva

Monografia realizada como requisito obrigatório para obtenção do título de Bacharel em Geografia na Universidade Federal de Uberlândia

Versão corrigida. A versão original se encontra arquivada no Serviço de Graduação do IG.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Guilherme Resende Corrêa (Instituto de Geografia/UFU)

Prof. Msc. Thiago Almeida Andrade Pinto (Departamento de Agronomia/UFVJM)

Uberlândia, dezembro de 2018.

Imagem de capa:

Sobrevoo do DC-8/NASA sobre o mar de Weddell em 2011

Michael Studinger/NASA, 2011

“A ciência é o capitão e a prática, os soldados.”

Leonardo da Vinci

Dedico este trabalho à minha família,
amigos e professores.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer aos meus pais Carlos Cezar e Maria Madalena e meu irmão Samuel, por me proporcionarem todas as ferramentas e suporte possível para alcançar meus sonhos na vida, e que em meio a todas as dificuldades, não deixamos nada nos abalar. Os melhores exemplos sempre estiveram muito perto de mim. Agradeço também a toda minha família por apoio e torcida.

Quero também agradecer a minha namorada Jéssica, que durante este tempo me proporcionou muitos momentos bons, companheirismo e apoio, seja qual fosse. Você tornou minhas tristezas mais amenas e minhas alegrias mais intensas.

Gostaria de dedicar para minha orientadora Camila Carpenedo, um agradecimento que mais do que nunca sei que não se mede em palavras. Desde 2017, tornando possível cada empreitada e me direcionando para os melhores caminhos. Fico muito satisfeito em dizer que passei por sua orientação (e amizade) aprendendo como ser um estudante, pesquisador, escritor, profissional, professor e acima de tudo, um ser humano melhor. Tenho uma enorme admiração pela pessoa que representa para mim e para o mundo. Os sempre presentes “calma, respira, faça sem pressa, tem como melhorar, não é o fim do mundo, humildade sempre” irão me acompanhar para sempre.

Para o laboratório que me acolheu, sem ressalvas, gostaria de agradecer a tudo que o Laboratório de Climatologia e Recursos Hídricos da UFU me proporcionou. Ali aprendi a ter compromisso, dedicação, inspiração, amizade, companheirismo. Todos os seus membros sempre foram muito solícitos, e espero que possamos continuar o bom trabalho durante muitos anos.

Gostaria de agradecer meus amigos Palucci, Gustavo, Maruschi, Paulinho, João Guilherme e Ruan pelas companhias sempre presentes, não importa aonde fosse a aula, palestra, minicurso ou curiosidade. Vocês me fazem buscar sempre o melhor. Às minhas amigas, Júlia, Patrícia e Luana, que sempre me apoiam em todas as necessidades, seja uma conversa ou apenas a boa companhia.

Aos meus veteranos, Adriano Silva, Lucas, Gabriel Pires, Tatiana Souza, Paula Queiroz, Eduardo Petrucci, Renato Silva e Tatiane Régis, por terem sido

sempre ótimos exemplos como pessoa e como acadêmicos, além de me guiarem pelas dificuldades da graduação. Deixo também meu agradecimento para todos meus colegas de classe, amigos de outros cursos, membros do PETGEO, Terra Consultoria e muitos que foram muito importantes para mim, não dá pra citar todos aqui pessoal!

Quero agradecer a todos que em algum momento foram meus professores, tutores, mentores ou simplesmente dedicaram seu tempo para me ensinar. Não existe profissão mais nobre do que aquela que doa seu tempo, conhecimento e paciência. Gostaria de agradecer a todos servidores, laboratórios e espaços de todas Universidades que me ajudaram nesta empreitada. Um agradecimento em especial os professores Vanderlei e Antônio Marcos, por terem me direcionado muito bem do início ao final da graduação.

Agradeço a UFU, IG e FAPEMIG pelo apoio financeiro e estrutural que me foi concedido.

RESUMO

SILVA, R. C. **Eventos extremos de gelo marinho no mar de Weddell e sua relação com o Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul**. 2018. 84 f. Monografia (Bacharelado em Geografia) – Instituto de Geografia, Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, 2018.

No Brasil, estamos sobre a influência do Sistema de Monção da América do Sul (SMAS), que distribui irregularmente a precipitação sobre grande parte do território, concentrando suas chuvas na estação do verão. No inverno, um dos sistemas responsável por modular as condições climáticas é o Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul (ASAS), o qual gera uma zona de alta pressão que tende a avançar sobre o continente e inibir a precipitação. No verão, o ASAS possui uma posição climatológica posicionada a leste e contribui para entrada de umidade do oceano. A Antártica também possui seu papel no clima do planeta, visto que possui conexões com regiões distantes via massas de ar polares, sistemas frontais, ciclones e *stormtracks*. Neste estudo, foi analisado o papel do gelo marinho antártico do mar de Weddell (MW) durante seus eventos extremos de retração (ERGM) e expansão (EEGM), para que se possa entender sua capacidade de afetar a circulação do ASAS, indiretamente afetando a precipitação no continente. Além disso, foi comparado o papel do gelo marinho do mar de Weddell na polaridade do índice do Modo Anular Sul (SAM). Para atingir estes objetivos, foram utilizados: dados de extensão de gelo marinho do NSIDC entre 1981-2015; Dados da reanálise climática *Era-Interim*, fornecida pelo ECMWF, entre 1981-2015; Dados de precipitação em grade fornecidos pelo *dataset* de Xavier, King e Scanlon (2017); Índice mensal SAM obtido através do CPC/NOAA, entre 1981-2015. Os eventos extremos dos meses de fevereiro/março e setembro/outubro foram obtidos através da técnica dos percentis, sendo analisados os anos referentes aos percentis de 10% e 90%, com a defasagem de um mês também sendo analisada ($\text{lag}=0$ e $\text{lag}=+1$). Após a determinação dos eventos, foram gerados campos atmosféricos para as anomalias de pressão ao nível do mar, altura geopotencial em 500 hPa, vento zonal em 250 hPa e precipitação no Brasil, a uma significância estatística de 10%. O índice mensal do SAM foi comparado com os anos de ERGM e EEGM. Os resultados indicaram

que eventos de ERGM no MW durante os meses analisados causam um possível enfraquecimento no ASAS e no jato polar, enquanto fortalecem o jato subtropical e a pressão em superfície no MW, resultando em uma diminuição na precipitação da estação chuvosa na região tropical do Brasil, com uma provável supressão da atividade da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS). As condições opostas foram observadas durante eventos EEGM. Na análise do índice SAM e os eventos extremos de gelo marinho, foi constatada a relação prévia levantada por Raphael et. al (2010) e Parise et. al (2015), com os eventos ERGM no MW tendo uma maior influência no sinal do SAM para a fase negativa. Ambos os resultados encontrados comprovam a importância do gelo marinho antártico na circulação atmosférica, tanto na propagação de sistemas transientes quanto na precipitação no Brasil, evidenciando a necessidade da inclusão destes fatores no monitoramento e previsão nacional para um melhor planejamento e gestão dos recursos hídricos, energéticos e agrícolas.

Palavras-chave: Gelo Marinho; Anticiclone Subtropical; Precipitação;

ABSTRACT

SILVA, R. C. **Extreme sea ice events in the Weddell Sea and its relationship with the South Atlantic Subtropical High**. 2018. 84 p. Monography (Bachelor of Geography) - Institute of Geography, Federal University of Uberlândia. Uberlândia, 2018.

In Brazil, we are under the influence of the South American Monsoon System (SAMS), which irregularly distributes precipitation over a big part of the territory, concentrating the rains in the summer season. In winter, one of the systems responsible for modifying climatic conditions is the South Atlantic Subtropical High (SASH), which generates a high pressure zone that tends to advance over the continent and inhibit precipitation. In the summer, SASH has a climatological position positioned to the east and contributes to the entry of moisture from the ocean. Antarctica also plays a role in the planet's climate, as it has connections to distant regions via polar air masses, frontal systems, cyclones and stormtracks. In this study, the role of Weddell Sea ice during its extreme retraction (SIER) and expansion (SIEE) events was analyzed in order to understand its capacity to affect SASH circulation, indirectly affecting precipitation on the continent. In addition, the role of sea ice of Weddell Sea in the polarity of the Southern Annular Mode (SAM) index was compared. To achieve these objectives, the following data were used: NSIDC sea ice extent between 1981-2015; Data from the Era-Interim climate reanalysis, provided by the ECMWF, between 1981-2015; Precipitation gridded data provided by the dataset of Xavier, King and Scanlon (2017); Monthly SAM index obtained through CPC / NOAA, between 1981-2015. The extreme events of the months of February / March and September / October were obtained using the percentiles technique, and the years referring to the percentiles of 10% and 90% were analyzed, with lag of one month also being analyzed (lag=0 and lag=+1). After determining the events, atmospheric fields were generated for pressure anomalies at sea level, geopotential height at 500 hPa, zonal wind at 250 hPa and precipitation in Brazil, at a statistical significance of 10%. The monthly SAM index was compared to the years of SIER and SIEE. The results indicated that SIER events in the WS during the analyzed months cause a possible weakening in the SASH and the polar jet stream, while

strengthening the subtropical jet stream and the surface pressure in the WS, resulting in a decrease in rainfall in the tropical region of Brazil, with a probable suppression of the activity of the South Atlantic Convergence Zone (SACZ). The opposite conditions were observed during SIEE events. In the analysis of the SAM index and the extreme events of sea ice, it was verified the previous relation raised by Raphael et. al (2010) and Parise et. al (2015), with the SIER events in the WS having a greater influence in the signal of the SAM for the negative phase. Both results confirm the importance of the Antarctic sea ice in the atmospheric circulation, both in the propagation of transient systems and in precipitation in Brazil, evidencing the necessity of including these factors in the national monitoring and forecasting for a better planning and management of water, energy and agricultural resources.

Keywords: Sea Ice; Subtropical High; Precipitation;

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Mapa da Antártica e do Oceano Austral.....	5
Figura 2: Escoamento médio dos ventos catabáticos durante o inverno	6
Figura 3: Estação Antártica Comandante Ferraz	7
Figura 4: Imagem área de um iceberg rodeado por gelo marinho no mar de Bellingshausen, Antártica.....	10
Figura 5: Extensão máxima e mínima de gelo marinho antártico, conforme a climatologia 1982-2011	11
Figura 6: Regionalização dos diferentes ciclos anuais de precipitação na América do Sul, conforme as regiões descritas por Reboita et al. (2010).....	15
Figura 7: Circulação Geral da Atmosfera com a localização do ASAS.	17
Figura 8: Distribuição das Altas Subtropicais nos Oceanos Pacífico e Atlântico, conforme a climatologia anual de pressão ao nível médio do mar de 1980 a 2010. .	18
Figura 9: Padrão espacial da Oscilação Antártica (AAO ou SAM), mostrada aqui como um mapa de regressão em metros para a primeira EOF (27%).	25
Figura 10: Setores do Hemisfério Sul.....	30
Figura 11: Extensão média do gelo marinho no MW (climatologia 1981-2010).	30
Figura 12: Extensão média mensal de gelo marinho (climatologia 1982-2011).	33
Figura 13: Gráfico das anomalias da extensão de gelo marinho no MW no mês de fevereiro, entre 1980 a 2015.	35
Figura 14: Gráfico das anomalias da extensão de gelo marinho no Mar de Weddell no mês de março, entre 1980 a 2015.....	35
Figura 15: Gráfico das anomalias da extensão de gelo marinho no Mar de Weddell no mês de setembro, entre 1980 a 2015.....	36
Figura 16: Gráfico das anomalias da extensão de gelo marinho no Mar de Weddell no mês de outubro, entre 1980 a 2015.	36
Figura 17: Gráfico do Índice SAM mensal no período de 1980-2015.....	39
Figura 18: Composições anômalas de (a, e) pressão ao nível médio do mar (PNMM), (b, f) altura geopotencial em 500 hPa (H500), (c, g) vento zonal em 250 hPa (U250) e (d, h) precipitação durante (lag=0) e um mês após (lag=+1) os eventos ERGM no setor do MW no mês de fevereiro, entre 1980 e 2015. Linhas pontilhadas indicam anomalias significativas ao nível de 10%.....	41

Figura 19: Similar à Figura 18, mas para eventos EEGM no setor do MW no mês de fevereiro.	43
Figura 20: Similar à Figura 19, mas para eventos ERGM no setor do MW no mês de março.	45
Figura 21: Similar à Figura 19, mas para eventos EEGM no setor do MW no mês de março.	47
Figura 22: Similar à Figura 19, mas para eventos ERGM no setor do MW no mês de setembro.	49
Figura 23: Similar à Figura 19, mas para eventos EEGM no setor do MW no mês de setembro.	51
Figura 24: Similar à Figura 11, mas para eventos ERGM no setor do MW no mês de outubro.	53
Figura 25: Similar à Figura 11, mas para eventos EEGM no setor do MW no mês de outubro.	55
Figura 26: Índice SAM durante ($\text{lag}=0$) e após ($\text{lag}=+1$) os eventos ERGM no MW em fevereiro, março, setembro e outubro.	57
Figura 27: Índice SAM durante ($\text{lag}=0$) e após ($\text{lag}=+1$) os eventos EEGM no MW em fevereiro, março, setembro e outubro.	58
Figura 28: Representação visual dos resultados encontrados	61

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- ASAS (SASH) – Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul (*South Atlantic Subtropical High*)
- ECMWF – *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts*
- EEGM – Extremo de expansão de gelo marinho
- EOF – *Empirical Orthogonal Function*
- ENSO – *El Niño Southern Oscillation* ou El Niño Oscilação Sul
- ERGM - Extremo de retração de gelo marinho
- IPCC – *Intergovernmental Panel on Climate Change*, Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas
- MW – Mar de Weddell
- NOAA/CPC – *National Oceanic and Atmospheric Administration/Climate Prediction Center*
- NSIDC – *National Snow and Ice Data Center*
- PNMM – Pressão ao nível médio do mar
- PROANTAR – Programa Antártico Brasileiro
- SAM – *Southern Annular Mode*, Modo Anular Sul, Oscilação Antártica
- SMAS (SAMS) – Sistema de Monção da América do Sul (*South American Monsoon System*)
- TSM – Temperatura da superfície do mar
- ZCAS – Zona de Convergência do Atlântico Sul, *South Atlantic Convergence Zone*
- ZCIT – Zona de Convergência Intertropical

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1 - Apresentação	1
1.2 - Objetivos.....	2
1.2.1 - Objetivo Geral.....	2
1.2.2 - Objetivos Específicos	2
1.3 - Justificativa	2
1.4 - Área de Estudo	4
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	8
2.1 - A importância da Antártica no clima global	8
2.1.1 - Gelo Marinho Antártico	9
2.2 - Sistema de Monções e regimes de precipitação na América do Sul	13
2.3 - Modo Anular Sul (SAM)	24
3. MATERIAL E MÉTODOS	29
3.1 - Natureza dos Dados	29
3.1.1 - Extensão de gelo marinho antártico	29
3.1.2 - Reanálises Climáticas	31
3.1.3 - Dados de Precipitação.....	32
3.1.4. Índice SAM (Modo Anular Sul).....	32
3.2 - Metodologia	32
3.2.2. Composições dos campos atmosféricos.....	37
3.2.3 - Índice SAM	38
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	40
4.1 - Fevereiro: Circulação Atmosférica e Comportamento do ASAS.....	40
4.1.1 - Eventos ERGM no MW	40
4.1.2 - Eventos EEGM no MW	42
4.2 – Março: Circulação Atmosférica e Comportamento do ASAS	44
4.2.1 - Eventos ERGM no MW.....	44
4.2.2 - Eventos EEGM no MW	46
4.3 – Setembro: Circulação Atmosférica e Comportamento do ASAS	48
4.3.1 - Eventos ERGM no MW.....	48
4.3.2 - Eventos EEGM no MW	50

4.4 - Outubro: Circulação Atmosférica e Comportamento do ASAS	52
4.4.1 - Eventos ERGM no MW	52
4.4.2 - Eventos EEGM no MW	54
4.5 Eventos extremos de gelo marinho no MW e SAM	56
5. CONCLUSÕES	59
5.1 - Sugestões para trabalhos futuros	62

1. INTRODUÇÃO

1.1 - Apresentação

Esta monografia analisará a variabilidade do Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul (ASAS) durante os eventos extremos de gelo marinho no setor do mar de Weddell (MW) e os possíveis impactos na precipitação sobre o território do Brasil, durante os meses de fevereiro/março e setembro/outubro entre 1980 e 2015.

O ASAS é uma área de alta pressão semipermanente, originada do ramo descendente da célula de Ferrel. Sua variação sazonal em latitude e longitude é responsável por variações na precipitação no Brasil, sendo assim um componente importante do Sistema de Monção da América do Sul (SMAS) (GAN, RODRIGUES e RAO, 2009). Conforme já foi observado por trabalhos prévios (e.g., RAPHAEL et al., 2010; PARISE et al., 2015), existe a possibilidade do ASAS, assim como o Modo Anular Sul (*Southern Annular Mode* - SAM), ser afetado pelo gelo marinho, resultando em mudanças no padrão de circulação atmosférico no Atlântico Sul e no Brasil.

O trabalho está organizado em cinco capítulos. No Primeiro Capítulo é apresentado o tema, a justificativa, a área de estudo e os objetivos. No Segundo Capítulo é feita uma revisão bibliográfica da importância da Antártica no clima global, bem como do gelo marinho; o Sistema de Monções e os regimes de precipitação no Brasil; o ASAS e o SAM. No Terceiro Capítulo estão especificados os dados utilizados para elaboração do trabalho e a metodologia adotada. No Quarto Capítulo são apresentados os resultados, discutindo os eventos extremos de gelo marinho no MW, a circulação atmosférica associada e a posição do ASAS, bem como sua associação com o SAM. Por fim, no Sexto Capítulo são apresentadas as conclusões e as sugestões para trabalhos futuros.

Este trabalho almeja apresentar subsídios para a compreensão do papel do gelo marinho na circulação atmosférica do Brasil, através da sua associação com a variabilidade do ASAS.

1.2 - Objetivos

1.2.1 - Objetivo Geral

O objetivo geral desta monografia é avaliar a variabilidade do ASAS em eventos extremos de gelo marinho no MW, nos meses de fevereiro/março e setembro/outubro de 1980 a 2015.

1.2.2 - Objetivos Específicos

Os objetivos específicos são:

- a) Identificar os eventos extremos de retração e expansão de gelo marinho no MW;
- b) Avaliar a circulação atmosférica durante e após os eventos extremos de gelo marinho no MW;
- c) Investigar se houve mudanças em relação à posição do ASAS durante e após os eventos extremos de gelo marinho no MW;
- d) Entender a relação entre os eventos extremos de gelo marinho no MW e o SAM;
- e) Analisar os possíveis impactos na precipitação sobre o Brasil.

1.3 - Justificativa

A superfície da Terra é coberta por água, ainda que pouco deste volume seja aproveitado pelos seres humanos, com uma baixa aplicação para as suas necessidades. O Brasil, como um país de proporções continentais, possui grandes demandas para o uso da água, seja para consumo ou atividades agroindustriais. Do total de água doce brasileiro, 73,6% está localizada na Região hidrográfica Amazônia, enquanto apenas 6,4% estão na Região hidrográfica mais populosa, a do Paraná (ANA, 2010).

De certa forma, podemos assumir que a disponibilidade de água potável da Terra tem diminuído proporcionalmente devido ao crescimento da população, aumento das áreas cultivadas e a redução das áreas de proteção às fontes de recursos hídricos (mata ciliar, áreas de reservatórios e aquíferos). De acordo com o último censo, entre o século XIX e XXI, a população brasileira chegou a 190,8 milhões de habitantes (IBGE, 2010). Com o aumento populacional, aumenta-se o estresse sobre os recursos hídricos, seja por esgotamento, demanda, poluição, produção de alimentos ou até mesmo geração de energia.

Segundo Reboita et al. (2012), a precipitação no Brasil é distribuída irregularmente, tanto espacial como temporalmente. Na região tropical do Brasil, o verão é chuvoso, enquanto o inverno tende a ser marcadamente seco (SILVA; KOUSKY, 2012). Isso caracteriza o SMAS (GAN; KOUSKY; ROUPELEWSKI, 2004).

Além desta especificidade, o Brasil também é afetado por conexões climáticas provenientes da Antártica. Envolvida na circulação global, os polos atuam como verdadeiros refrigeradores, possuindo um saldo negativo de radiação solar e temperaturas do ar bem abaixo da média global (BARRY; CHORLEY, 2003). Lá são formadas massas de ar que atingem o Brasil em grande parte do ano, reduzindo as temperaturas do ar e trazendo precipitações associadas a sistemas frontais. Um elemento fundamental desse continente é o gelo marinho, que se forma em seus oceanos e mares, o qual tem baixa condutividade térmica e afeta o balanço de energia (KING; TURNER, 1997).

O gelo marinho tem potencial para impedir as trocas de calor entre oceano e atmosfera, totalizando uma grande gama de influências sobre os processos físicos, como nos dizem Thomas e Dieckmann (2008), tais como o aumento do albedo e da retirada de calor do ar que está próximo do oceano. Além disso, é através das massas de ar polares pelas quais as latitudes menores podem ser afetadas com quedas na temperatura do ar (AQUINO; SETZER; SIMÕES, 2006; HARTMANN, 2015).

Segundo Raphael et al. (2010), por se localizar em uma região sensível para a circulação atmosférica (ao sul de 60°S), o gelo marinho tem capacidade de alterar o gradiente meridional de temperatura e pressão atmosférica, além de afetar o cinturão de baixas pressões e deslocar o jato polar (CARPENEDO; AMBRIZZI, 2016).

Através de estudos prévios (RAPHAEL et al., 2010; TANG; ZHANG; FRANCIS, 2014; PARISE et al., 2015; CARPENEDO; AMBRIZZI, 2016; CARPENEDO, 2017) sugere-se que eventos extremos de retração de gelo marinho no MW causariam um aumento na PNMM no MW, enfraquecendo o jato polar e fortalecendo o jato subtropical. Desta forma, com o enfraquecimento do ramo ascendente da célula de Ferrel em torno de 60°S sobre o MW, haveria um enfraquecimento na circulação do ASAS. As condições opostas seriam observadas durante eventos extremos de expansão. Através destas mudanças, seriam observadas alterações na precipitação durante a estação chuvosa no Brasil.

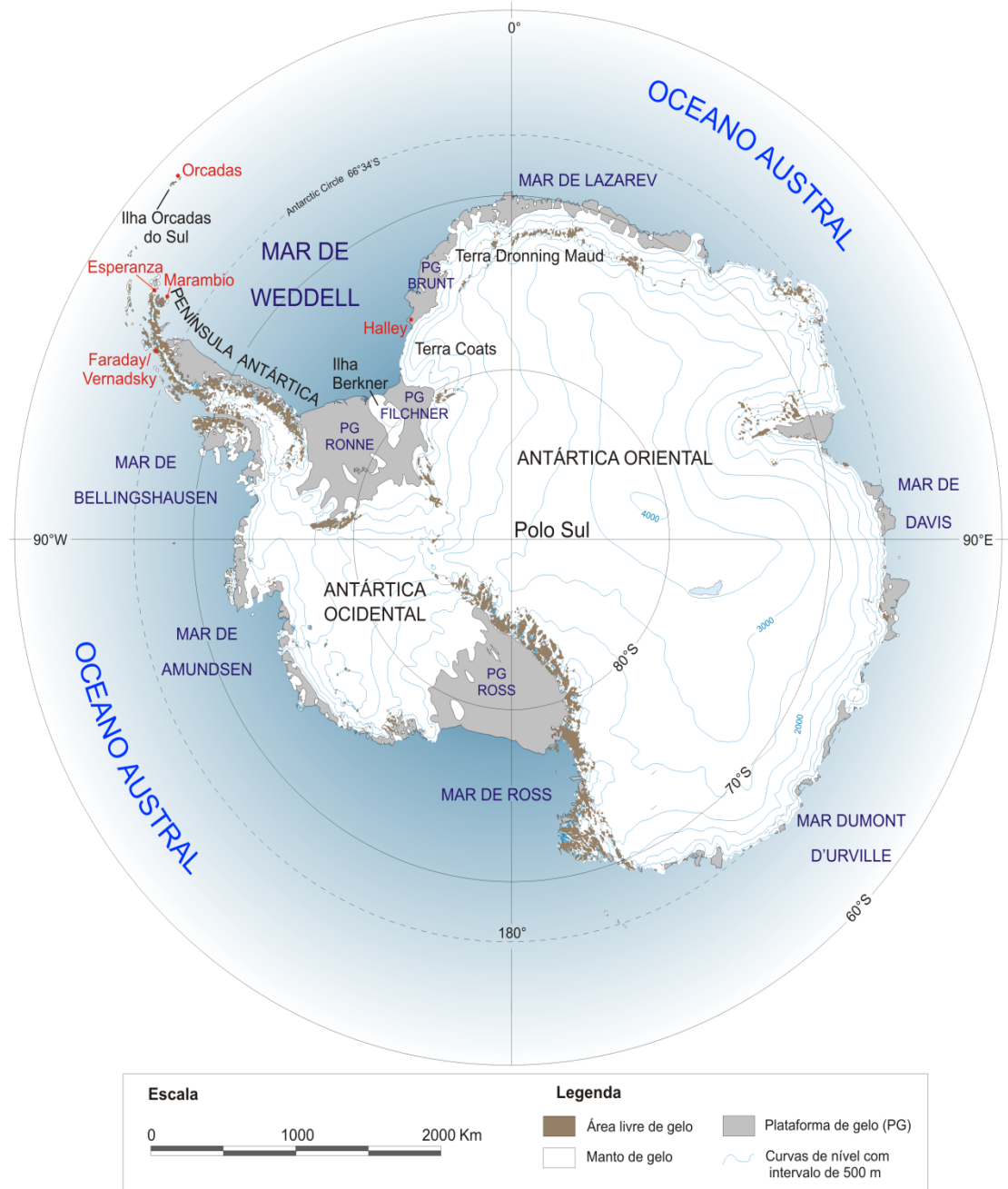
Logo, é fundamental entender os eventos extremos de gelo marinho para mensurar sua influência no ASAS, o qual é um componente fundamental do SMAS. Tal SMAS possui uma variabilidade interanual, podendo apresentar extremos hidrológicos em uma região com uma pressão já existente sobre seus recursos hídricos, que é a região tropical do Brasil. Entender os mecanismos associados ao ASAS e, por extensão, o SMAS, é importante para estratégias e prevenção de custos socioeconômicos sobre o Brasil e a América do Sul.

1.4 - Área de Estudo

A região Antártica (Figura 1) corresponde a ilhas, oceanos e mares, além do continente localizado ao sul de 60°S (FORD, 2018). O continente possui cerca de 14 milhões de km², sendo o quinto maior do planeta. Para efeitos de comparação, o Brasil possui “apenas” 8.516.000 km², totalizando 60% do continente antártico (FRETWELL et al., 2013).

Possuindo o clima mais frio, com os ventos mais intensos (os chamados “catabáticos”, do grego *katabasis*, Figura 2) e menor precipitação do planeta, as temperaturas do ar na Antártica variam de acordo com a altitude e a distância do oceano. Os verões são característicos com luz diurna contínua (WALLACE; HOBBS, 2006), enquanto os invernos são imersos em escuridão. A alta pressão atmosférica persistente no interior do continente resulta em pouca cobertura de nuvens e precipitação (KING; TURNER, 1997).

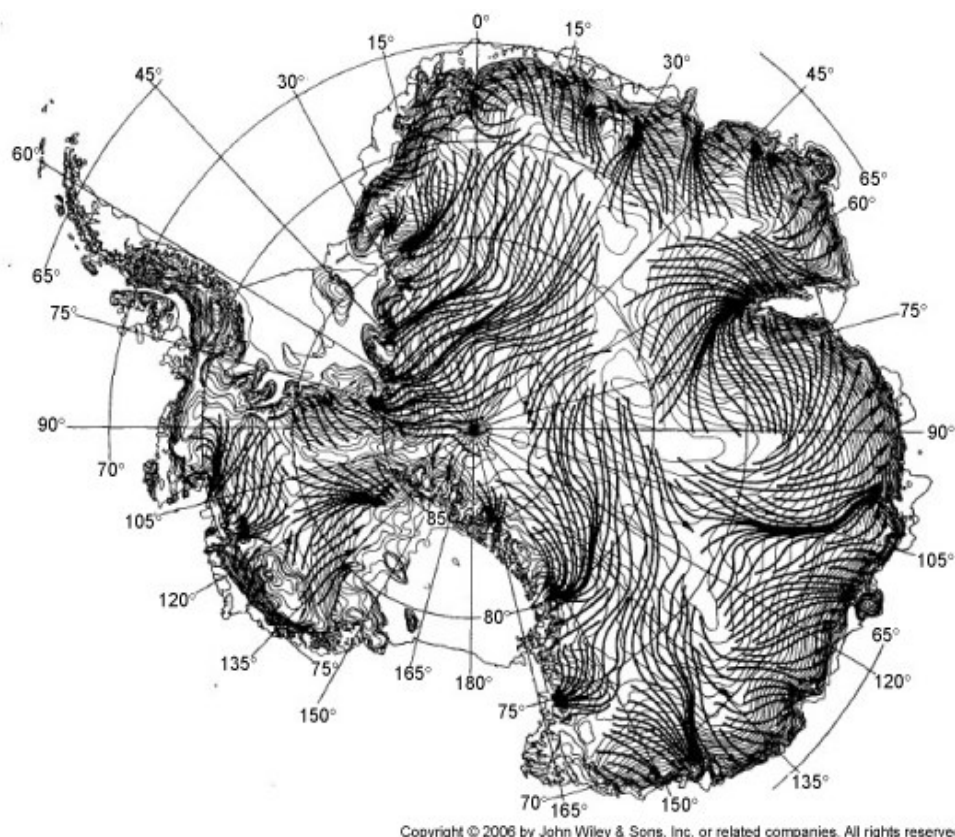
Figura 1: Mapa da Antártica e do Oceano Austral



Fonte: LIMA Project (2008). Adaptado por: Carpenedo (2009).

Cerca de 98% do continente é coberto pelo manto de gelo, com apenas 2% de rochas expostas (CIA, 2018). A média de elevações está entre 2.000 e 4.000 metros, com cumes de até 5.000 metros. A Antártica possui diversas riquezas minerais, tais como ferro, cromo, ouro e platina, porém nenhuma delas é tomada em exploração comercial (CIA, 2018). Os recursos marítimos são explorados por algumas nações, principalmente a pesca.

Figura 2: Escoamento médio dos ventos catabáticos durante o inverno



Fonte: Parish e Bromwich (1987).

Grande parte do continente é inabitado durante o inverno, com um aumento populacional no verão devido às condições ambientais menos adversas para pesquisa e exploração. Na Antártica vigora o Tratado Antártico (TREATY, 1959; BRASIL, 2007), aprovado em 1961, o qual compromete diversos países a manterem a cooperação internacional para exploração científica do continente. O Brasil aderiu ao Tratado em 1975 e mantém uma estação de pesquisa, a chamada Estação Antártica Comandante Ferraz (EAFC), como vista na Figura 3. Ela está localizada na ilha Rei George, a 130 quilômetros da península Antártica. Operando desde 1984, a estação possui importante papel para o programa antártico brasileiro (PROANTAR), o qual cumpre um dos requisitos para a participação nos conselhos de votação do Tratado, que é desenvolver pesquisa antártica continuamente.

O Brasil também é responsável pelo Criosfera 1, um módulo científico localizado no interior do continente antártico, a 670 km do Polo Sul geográfico. Operando de forma autônoma, foi inaugurado em 2012 e é importante para a

realização de pesquisa no interior do continente antártico. É gerido pelo Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia e pelo INPE.

Figura 3: Estação Antártica Comandante Ferraz



Fonte: Agência Brasil (2012).

O MW (Figura 1) é parte do Oceano Austral e seus limites são definidos pela Península Antártica a oeste e a Terra de Coats a leste (BRITANNICA, 2018). Seu centro está localizado em 73°S e 45°W, com seus limites ao sul sendo ocupados pelas plataformas de gelo de Filchner e Ronne. O MW possui uma área de até 2.800.000 km².

O nome do mar vem de um explorador britânico chamado James Weddell, que atingiu a rota para o sul em 1823. Grande parte das condições climáticas restringiu as explorações oceanográficas até os tempos modernos (ENCYCLOPAEDIA BRITANNICA, 2018). Como está localizado próximo ao continente antártico, sua fauna consiste de pinguins, a típica foca-de-weddell, etc.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 - A importância da Antártica no clima global

Entre as esferas da Terra (Atmosfera, Litosfera, Hidrosfera e Biosfera), grande importância é dada à hidrosfera e, consequentemente, aos recursos hídricos. Porém, cabe ressaltar que até 2% de toda a água do planeta está congelada, e desse percentual, 77,2% é de água doce (HARTMANN, 2015). Ainda, de acordo com Hartmann (2015), todo o gelo que está sobre a superfície do planeta é chamado de criosfera. Para o clima, esta massa de gelo é de vital importância, haja visto que cobre 11% das áreas emersas e 7% dos oceanos do mundo. Do total de água doce do planeta, 90% está na superfície antártica (KING; TURNER, 1997).

O alto albedo das superfícies de neve e gelo reflete grandes quantidades de radiação solar, diminuindo a temperatura do ar e aumentando a cobertura de gelo, o que tende a amplificar as mudanças de temperatura originais (KING; TURNER, 1997). Além disto, a Antártica é coberta permanentemente pelo gelo continental e com a cobertura de gelo marinho apresentando grande variabilidade sazonal. Os autores também atribuem à orografia do continente a capacidade de afetar o escoamento de ar gelado sobre a superfície em direção à costa. Tais ventos, denominados de ventos catabáticos, se desenvolvem em uma circulação permanente, afetando a circulação de alta e média latitude. Por esta orografia não ser simétrica, a Antártica atua como um gerador de ondas de Rossby (KING; TURNER, 1997).

Uma das conexões climáticas mais importantes entre a Antártica e outras regiões do globo se dá via massas de ar. De acordo com Barry e Chorley (2003), um dos fatores que rege as características de uma massa de ar é a natureza da sua área fonte, sendo, portanto, fundamental para suas características termo-higrométricas. Sobre isso, Taljaard (1972) descreve as massas de ar que se formam sobre a Antártica e áreas adjacentes: Marítima Polar, Marítima Antártica e Continental Antártica. Essas massas de ar tem a propriedade de se deslocarem para latitudes menores, transportando ar frio e precipitação associada ao sistema frontal (BARRY; CHORLEY, 2003). Cabe destacar que a massa de ar Marítima Antártica se

forma apenas durante o inverno, com o papel exercido pelo congelamento do oceano na forma de gelo marinho (TALJAARD, 1972).

Em outra conexão climática importante, podemos citar a importância da Antártica para a interação entre a massa de ar polar e a massa de ar subtropical, formando a chamada Frente Polar (BARRY; CHORLEY, 2003). Nesta região é onde se formam os ciclones extratropicais, sistemas de baixa pressão com núcleo frio (BJERKNES, 1919), que têm a capacidade de atuar em latitudes médias, afetando as condições de tempo no continente da América do Sul, quando associados à frentes frias, causando precipitação com ventos fortes e quedas de temperatura do ar (AQUINO; SETZER, 2005).

No que tange à circulação oceânica, o continente antártico possui uma influência global. De acordo com King e Turner (1997), os mares ao redor da Antártica são conhecidos por uma das regiões formadoras da Água de Fundo Antártica. Os deslocamentos latitudinais destas águas afetam toda a circulação oceânica termohalina, que é conhecida por ter uma velocidade menor que as correntes superficiais, porém transportando grandes massas de água por todo o globo (CHRISTOPHERSON, 2015).

O trabalho de Ahrens (2012) define a região antártica com um clima de “calota de gelo polar”. Nesta região, o crescimento de vegetação é improvável, devido às temperaturas abaixo do ponto de congelamento que ocorrem até mesmo no meio do verão. O autor nos diz que muitas regiões recebem pouca precipitação, com menos de 100 mm por ano, sendo a maioria na forma de neve. Esse contraste é extremamente importante no Hemisfério Sul devido à baixa quantidade de continentes, o que acaba por formar um grande contraste térmico entre a Antártica e os oceanos à sua volta, aumentando sua condição de isolamento.

2.1.1 - Gelo Marinho Antártico

Gelo marinho (Figura 4) é a água do mar congelada (SIMÕES, 2004; NSIDC, 2018), que cobre até 25 milhões de metros quadrados da superfície terrestre, chegando a 15% dos oceanos durante o período de inverno (NSIDC, 2018). Na Antártica, esse gelo possui a espessura de até 2 metros, podendo atingir latitudes de até 55°S (NSIDC, 2018). Os estudos de gelo marinho se iniciaram na

década de 70, com o uso de satélites, devido à dificuldade de acesso para observações *in loco* (PARKINSON, 2004).

Figura 4: Imagem área de um iceberg rodeado por gelo marinho no mar de Bellingshausen, Antártica.



Fonte: NASA/Hale (2012).

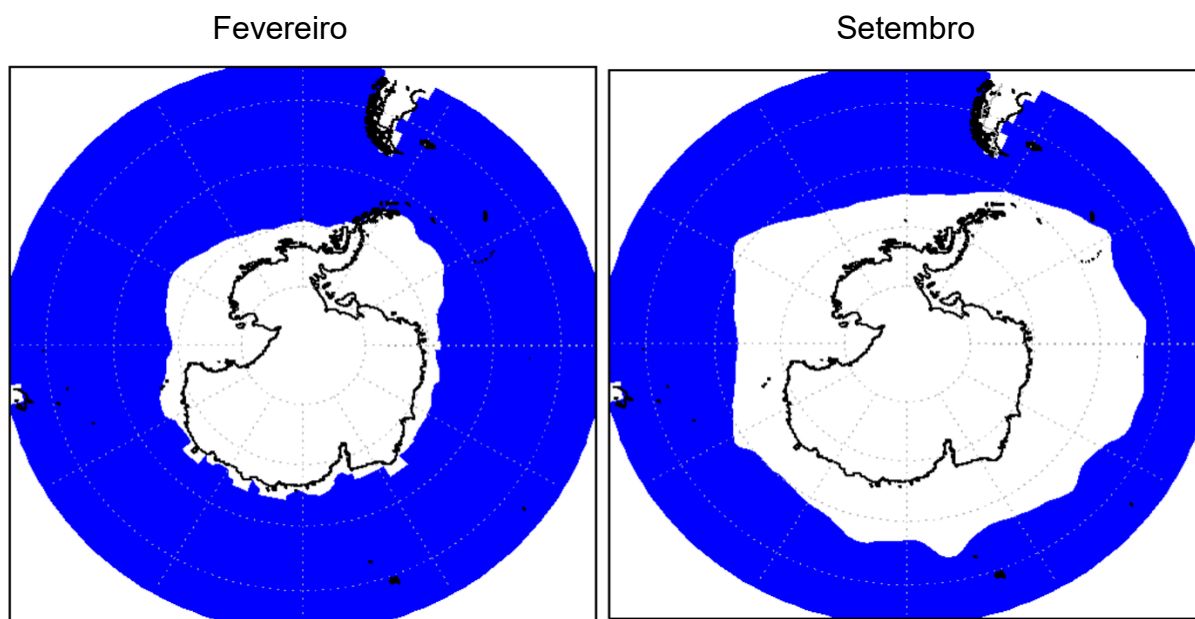
Em termos de sazonalidade, o gelo marinho derrete quase toda a sua extensão durante o verão, voltando a atingir seu máximo em setembro, com valores de 3 e 18 milhões de km² em toda a Antártica, respectivamente, conforme a Tabela 1 e a Figura 5. Essa extensão é responsável pela redução da temperatura oceânica e atmosférica.

Tabela 1. Características do gelo marinho antártico.

Características	Antártica
Média de Extensão Máxima	18.800.000 km ²
Média de Extensão Mínima	3.100.000 km ²
Espessura Típica	~ 1 m
Distribuição Geográfica	Simétrica
Espessura da Neve	Grossa
Tendência, 1979-2008	Pequeno aumento de 1.8% (~219.000 km ²) por década

Adaptado de: NSIDC (2018). Tradução: Próprio Autor (2018).

Figura 5: Extensão máxima e mínima de gelo marinho antártico, conforme a climatologia 1982-2011



Fonte: NOAA (2018). Elaboração: Silva (2018).

Para Bromwich e Parish (1998), o gelo marinho é um componente essencial para o continente Antártico atuar como um grande dissipador de calor global. A atuação da borda do gelo marinho durante sua variação sazonal permite que o oceano e a atmosfera experimentem variações nas trocas de calor, que alteram a circulação local, regional e hemisférica.

De acordo com Wadhams (2000), o gelo marinho antártico é de vital importância para a circulação oceânica do Hemisfério Sul. A sua variação latitudinal é em grande parte regida pelas diferenças de temperatura da superfície do mar (TSM), com pequenas variações causadas pela Corrente Circumpolar Antártica, que é a corrente observada no entorno do continente em direção a leste, isolando as águas mais frias a sul (WHITWORTH III, 1988).

Segundo Cavalieri e Parkinson (2008), o gelo marinho possui a capacidade de inibir trocas de calor, massa e momento entre o oceano e a atmosfera, além de reduzir a quantidade de radiação solar absorvida devido ao seu alto albedo. Para Wallace e Hobbs (2006), com a variação sazonal do gelo marinho, ele afeta o albedo oceânico e a formação do *brine* (rejeição salina proveniente do congelamento). Com o derretimento do gelo e a diminuição do albedo, há uma retroalimentação positiva, que aumenta a temperatura do ar e TSM e, consequentemente, aumenta os

processos de derretimento do gelo marinho. De acordo com Thomas e Dieckmann (2003), o gelo marinho é vulnerável a mudanças no oceano e na atmosfera, enquanto possui uma temperatura de congelamento de $-1,9^{\circ}\text{C}$ para as águas oceânicas na Antártica. Ele pode crescer em até 10 cm por dia, enquanto inibe o aquecimento da atmosfera, além dos já citados efeitos sobre a retroalimentação e a circulação termohalina.

Com experimentos numéricos, Raphael et al. (2010) foram capazes de demonstrar que uma redução (expansão) na cobertura de gelo marinho gera uma diminuição (aumento) nas diferenças meridionais de temperatura e pressão. Dessa maneira, a célula de circulação polar tende a apresentar uma expansão com enfraquecimento, o que influencia em um deslocamento da célula de Ferrel para norte. O contrário é observado na expansão do gelo marinho.

Carpenedo e Ambrizzi (2016) investigaram as possíveis relações entre os eventos extremos de gelo marinho antártico e as células de circulação meridional no Pacífico Sudeste. Os resultados mostram que eventos de expansão de gelo marinho no mar de Ross há um resfriamento na TSM, diminuindo a temperatura da atmosfera próxima e aumentando os gradientes térmicos entre a borda do gelo marinho e o mar aberto. Isso fortalece o cinturão circumpolar de baixas pressões e o jato polar, intensificando o ramo ascendente da célula de Ferrel sobre o Oceano Austral, enquanto há enfraquecimento nas latitudes médias. O padrão oposto é observado em eventos de retração de gelo marinho no mar de Ross e expansão no setor do MW (CARPENEDO; AMBRIZZI, 2016).

Variações na extensão de gelo marinho Antártico também podem afetar a propagação de sistemas transientes e a atividade de bloqueios atmosféricos no Hemisfério Sul (CARPENEDO, 2012; CARPENEDO, 2017), Carpenedo (2012) observa que os eventos extremos de retração (expansão) de gelo marinho de alta frequência no setor dos mares de Bellingshausen-Amundsen durante o inverno austral estão associados com um trem de ondas de alta frequência extratropicais (tropicais-extratropicais). Como consequência, há anomalias de temperatura do ar a 2 metros nas latitudes extratropicais (tropicais-extratropicais) da América do Sul, com aquecimento/resfriamento associado à baixa/alta pressão anômala em superfície. Por outro lado, o trem de ondas de alta frequência associado aos eventos extremos de retração (expansão) de gelo marinho no setor do MW não afetam a

América do Sul, mas sim modulam eventos de aquecimento/resfriamento na Austrália.

Com o objetivo de avaliar a frequência de bloqueios atmosféricos no Hemisfério Sul durante extremos interanuais de extensão de gelo marinho antártico no inverno austral, de 1979 a 2013, Carpenedo (2017) observa que durante eventos extremos de retração (expansão) de gelo marinho no setor dos mares de Bellingshausen-Amundsen (setor do mar de Ross), no Pacífico Sul existe anomalias negativas de TSM, o que resulta em resfriamento da atmosfera adjacente, reforçando os gradientes meridionais de temperatura e pressão entre a borda do gelo marinho e a região de mar aberto, o que resulta em reforço do jato polar e do cinturão circumpolar de baixas pressões entre 50° e 60° S. Essa configuração anômala desfavorece a formação de bloqueios atmosféricos no Pacífico Sudeste, o que resulta em redução na atividade de ciclones extratropicais junto ao continente Antártico e aumento no sul da América do Sul, com consequente resfriamento anômalo sobre o centro-sul do continente (CARPENEDO, 2017).

Durante as últimas quatro décadas, o gelo marinho antártico tem demonstrado um leve aumento em sua tendência de extensão (PARKINSON, 2004; IPCC, 2014; PARISE et al., 2015; NSIDC, 2018), porém ainda é comprovado que sua resposta regional tende a ser diferente para cada setor do Oceano Austral.

2.2 - Sistema de Monções e regimes de precipitação na América do Sul

Sobre o SMAS, Gan et al. (2004, 2009) nos apresenta alguns fatores que permitem a afirmação da sua existência. Durante muito tempo, a definição mais simples de monção foi a presença de reversões sazonais na circulação do vento, o que causaria verões chuvosos e invernos secos. Contudo, estudos mais recentes apresentam novas argumentações para a discussão do conceito.

A definição dada por Moran e Morgan (1986) está de acordo com o aquecimento diferenciado entre continentes e oceanos, graças ao seu diferente valor de calor específico. Isso acaba por estabelecer um sistema de baixa pressão sobre o continente durante a primavera e verão, aumentando o gradiente de pressão com o oceano. Essa convecção intensifica-se com a liberação de calor latente, com o ar

resfriando ao atingir os altos níveis da troposfera e descendendo sobre o oceano, portanto correspondendo ao SMAS.

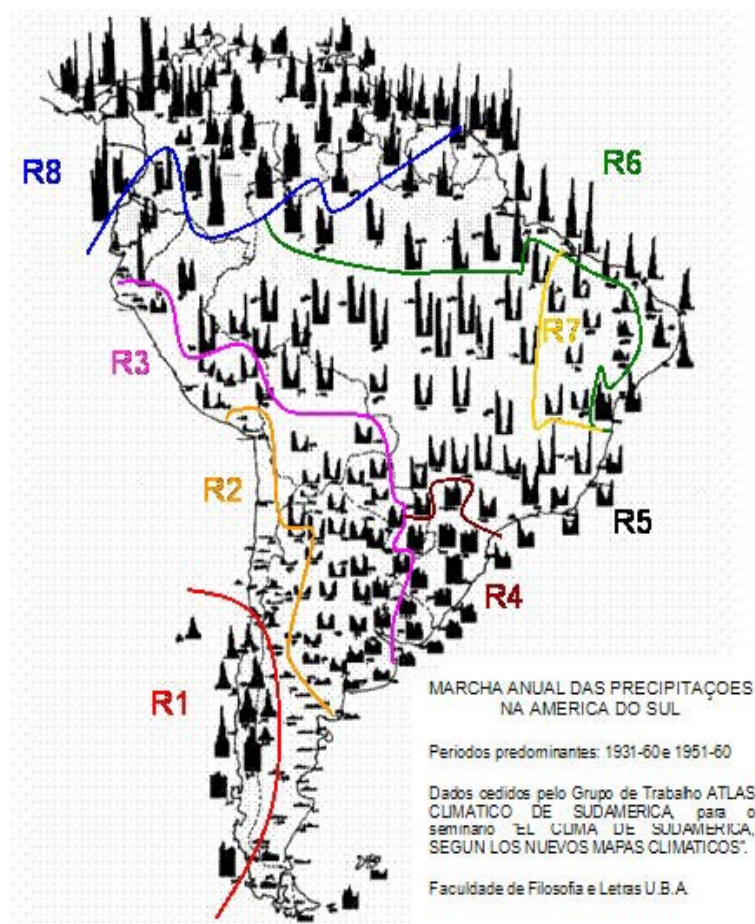
Um dos autores que também define o sistema de monção é Ramage (1971), utilizando como critérios: mudança de direção no vento entre janeiro e julho, a qual deve apresentar frequência maior que 40%, com mais de 3 m/s; e alternância entre ciclone e anticiclone a cada dois anos, em cada mês, em uma área de 50° de latitude e longitude. Se estes critérios forem satisfeitos, a América do Sul estaria sobre a circulação de monção.

Para Asnani (1993), uma região que está sobre circulação de monção é a qual sua Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) se desloca entre 5°N e 5°S. Se este conceito for seguido, podemos considerar a região central da América do Sul como parte de um Sistema de Monção. O autor se utiliza da atividade convectiva para determinar o posicionamento da ZCIT.

Na região central da América do Sul, 90% da precipitação ocorre durante os meses mais quentes do ano (GAN et al., 2009). Apesar disso, sempre foi considerado que não seria um Sistema de Monção devido à falta de estudos que comprovassem a existência da reversão dos ventos (GAN et al., 2009). Em seus estudos, o autor cita o trabalho de Zhou e Lau (1998), no qual é analisada a circulação em baixos níveis e demonstram que o SMAS se inicia durante a primavera, com grande parte da convecção se iniciando na Amazônia e indo em direção à região Sudeste do Brasil. Os ventos são de oeste (leste) nos baixos (altos) níveis da troposfera durante a estação seca, e de leste (oeste) na estação chuvosa (GAN et al., 2004).

No seu trabalho que trata dos regimes de precipitação na América do Sul, Reboita et al. (2010) divide o continente em oito setores, de forma a facilitar a discussão sobre a temática, conforme a Figura 6. A regionalização foi baseada na precipitação mensal observada em gráficos. Neste trabalho, devemos destacar que as regiões do noroeste e sudeste do Brasil (R5, conforme a Figura 6) estão incluídos na área abrangida pela circulação monçônica.

Figura 6: Regionalização dos diferentes ciclos anuais de precipitação na América do Sul, conforme as regiões descritas por Reboita et al. (2010).



Fonte: Reboita (2010).

No noroeste e sudeste do Brasil (R5), Reboita et al. (2010) nos diz que os totais pluviométricos são máximos no verão e mínimos no inverno. Aqui a autora se utiliza do trabalho de Ramage (1971) para também definir a circulação de monção, que produz um regime de precipitação bastante marcado. Devemos notar que se trata de uma área de abrangência continental. Para a região Norte (R5), o máximo de precipitação pode variar entre 3.000 mm e 1.750 mm. Muito da mesma está relacionada aos ventos alísios, que também sofrem com a flutuação sazonal da ZCIT (REBOITA et al. 2010). Também são relatadas as Linhas de Instabilidade (LI), Complexos Convectivos de Mesoescala (CCM) de curta duração e algumas poucas frentes frias e brisa fluvial.

Para a região Centro-Oeste (R5), a autora nos diz que excede os 1.500 mm, com influência de sistemas tropicais e extratropicais. A região Sudeste também

apresenta valores anuais semelhantes, com a estação seca sendo marcada pela influência do ASAS, enquanto os máximos de precipitação no verão são caracterizados pelas LI e CCM, além de bloqueios e brisas (REBOITA et al., 2010).

Em sua dissertação, Garcia (2006) analisa a relação do SMAS com as fases da Oscilação Decadal do Pacífico. Foi observado que este modo é dominante na variação multidecadal do SMAS, seguido pelo El Niño-Oscilação Sul. Também foi identificado uma relação do SMAS em escala multidecadal com a do sistema de monções do leste da Ásia.

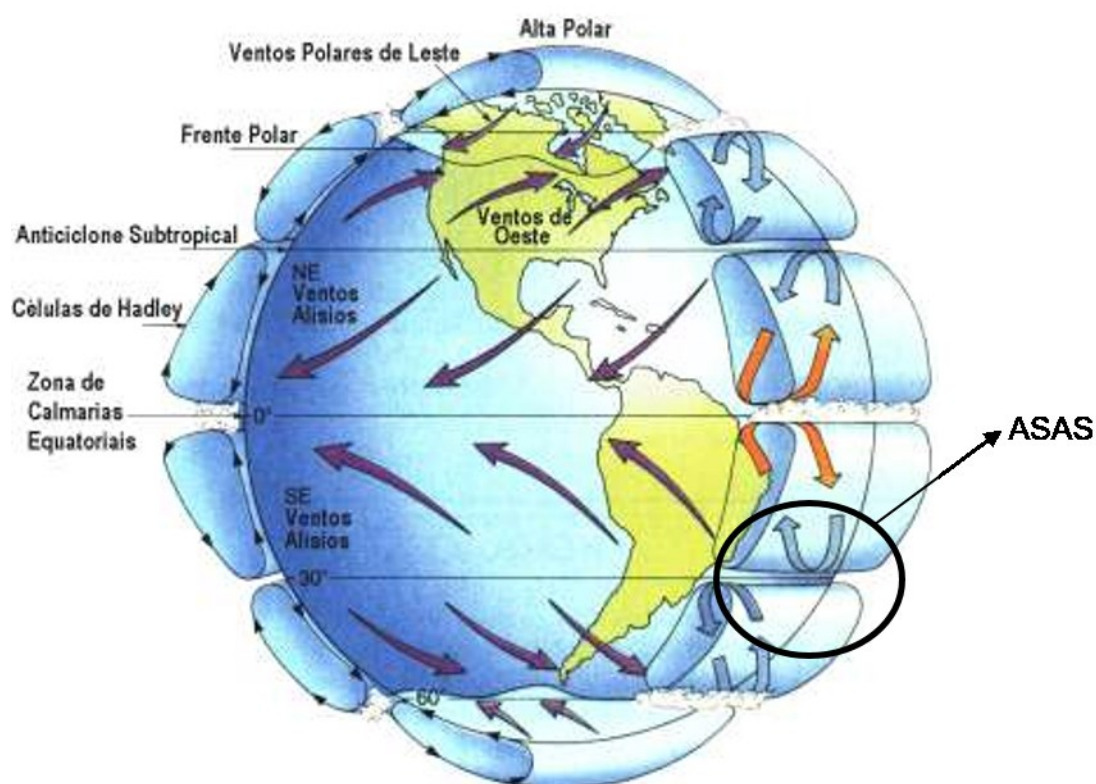
Bombardi e Carvalho (2008) realizaram uma análise do regime de monções sobre o Brasil no clima presente e projeções para um cenário futuro. Se valendo do cenário 2xCO₂ do modelo MIROC, os autores encontraram um indicativo de que haverá uma mudança na distribuição sazonal da precipitação, com o aumento de eventos extremos secos ou úmidos principalmente na região sob o domínio do bioma Cerrado.

Em um estudo que relaciona o gelo marinho antártico e sistemas de monções, Dugam e Kakade (2004) realizaram a análise da relação entre a extensão do gelo marinho antártico e a variabilidade da circulação monçônica asiática durante o verão. Os autores encontraram resultados que indicam que anos mais fortes de monção são precedidos pela expansão do gelo marinho, enquanto a relação inversa é observada. Em um trabalho semelhante, Prabhu et. al (2009) encontraram uma relação entre o verão monçônico da Índia e anomalias na extensão do gelo marinho no setor do Oceano Pacífico. Analisando entre 1988 e 2005, os autores constataram um padrão entre a precipitação nas regiões geográficas indianas e a variação do gelo marinho, associado com um evento de seca em 2002 que aconteceu após um evento de retração de gelo marinho. Na época, isto foi considerado um indicativo de que o gelo marinho pode ser utilizado na previsão da monção indiana durante o verão.

2.2.1 - Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul (ASAS)

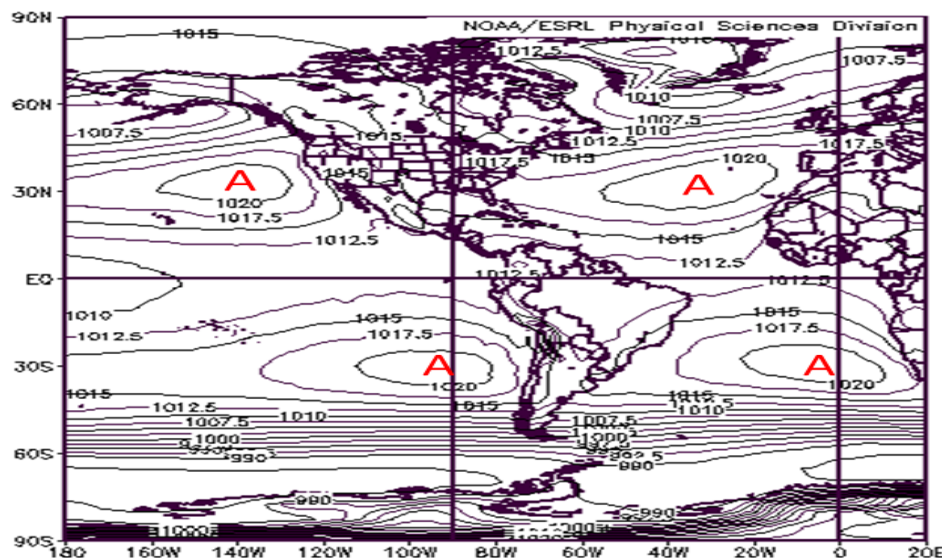
Um anticiclone subtropical se caracteriza por ser o ramo descendente da célula de Ferrel (WALLACE; HOBBS, 2006; BARRY; CHORLEY, 2009; CHRISTOPHERSON, 2015). Esses sistemas são formados pelos movimentos subsidentes em toda a troposfera, gerando zonas de altas pressões em torno de 30° de latitude, formando um cinturão ao redor do globo em ambos os hemisférios (Figuras 7 e 8). Em sua localidade, são característicos o tempo seco e a ausência de nuvens (BASTOS; FERREIRA, 2000). O ASAS também é conhecido como Alta Subtropical do Atlântico Sul ou Anticiclone de Santa Helena.

Figura 7: Circulação Geral da Atmosfera com a localização do ASAS.



Fonte: Grimm (1995)

Figura 8: Distribuição das Altas Subtropicais nos Oceanos Pacífico e Atlântico, conforme a climatologia anual de pressão ao nível médio do mar de 1980 a 2010.



Fonte: NCEP/NCAR (2018). Elaboração: Silva (2018).

Os primeiros trabalhos que definiram grandes centros de alta pressão semipermanentes como o ASAS foram feitos por Teisserenc de Bort (1983), os quais desenvolveram mapas mensais de pressão média ao nível do mar. Após tal período, é verificada uma escassez de trabalhos sobre esses sistemas, que são voltados em maior quantidade para o Atlântico Norte e Europa, com maior disponibilidade de dados e quantidade de pesquisadores envolvidos (DEGOLA, 2013). Hastenrath (1985) analisou cinco anos de dados para o comportamento de anticiclones subtropicais, verificando a variação de latitude e longitude. Machel et al. (1998) e Ito (1999) demonstram que a variação do ASAS é longitudinal ao longo do ano, estando mais afastado do continente em outubro e abril, e se tornando mais próximo de janeiro a março.

Outros trabalhos analisam a influência do ASAS sobre o Brasil. De Lima (1991) conclui que o ASAS favorece/desfavorece a precipitação sobre o litoral da região Nordeste brasileiro devido à sua posição e intensificação dos ventos alísios no seu ramo norte. Ao se aproximar do continente, a alta pressão desfavorece a ocorrência de precipitação, enquanto seu posicionamento mais a leste favorece o aporte de umidade do oceano via os alísios.

Já Prates (1994), Cupolillo (1997), Paiva (1997) e Silva Dias e Marengo (2002) caracterizam a aproximação do ASAS em direção ao continente no verão

como causa dos veranicos, os quais reduzem a precipitação na estação chuvosa da região tropical do país. Já os trabalhos de Bastos e Ferreira (2000), Padilha e Satyamurty (2004) e Ferreira et al. (2006) demonstram que o ASAS é responsável pela ausência de chuva e intensificação da poluição durante episódios de baixa umidade relacionados com sua posição sobre o continente.

O trabalho de Rodwell and Hoskins (2001) destaca a importância das monções de verão como moduladoras dos anticiclones subtropicais. Através de estudos de modelagem, ambos os autores destacam que a orografia e os jatos de baixos níveis são fundamentais para a formação de uma zona de convecção sobre o continente no período ativo da monção, que por consequência posicionaria a circulação anticiclônica sobre o oceano. Os autores também encontram resultados semelhantes afirmando que a principal contribuição para os anticiclones subtropicais no inverno provém através da circulação das células de Hadley e Ferrel.

Outro estudo desenvolvido sobre centros de alta pressão é o de Seager et al. (2003), no qual são examinados as causas dos ciclos sazonais dos anticiclones subtropicais e suas relações com as assimetrias zonais de TSM. Quando os anticiclones estão mais desenvolvidos no Hemisfério Norte, a subsidência e advecção em direção ao Equador nos flancos leste reduzem a TSM, enquanto em direção ao polo nos flancos oeste aquecem o oceano. Para o Hemisfério Sul isso é especialmente importante, pois influenciam no resfriamento dos oceanos a leste durante o inverno, fortalecendo os anticiclones e posicionando-os em direção a leste (SEAGER et al., 2003). Estudos com modelagem numérica indicam que os anticiclones são originados de um aquecimento derivado do Sistema de Monção no verão (RODWELL e HOSKINS, 2000; SEAGER et al., 2003).

Em estudo semelhante, Liu et al. (2003) discorrem sobre a relação entre um anticiclone subtropical e o aquecimento diabático. Os dados de reanálise mensal do *National Centers for Environment Prediction/National Center for Atmospheric Research* (NCEP/NCAR) foram utilizados para mensurar os impactos derivados de diferentes tipos de aquecimento e seus efeitos sobre a formação dos anticiclones subtropicais durante o verão. Os resultados mostraram que um resfriamento intenso sobre o oceano gera anticiclones em baixos níveis e ciclones em altos níveis. Já sobre o continente, um aquecimento gera um padrão oposto.

O estudo desenvolvido por Liebmann et al. (2004) analisa os padrões mensais de pressão ao nível mar para explorar mudanças na circulação em superfície e sua conexão com as tendências positivas de precipitação nos últimos 40 anos para a região sudeste da América do Sul. São apresentados dois padrões espaciais: um representando os campos de inverno dominados pelo ASAS na sua posição mais a norte; e outro representando os campos de verão com o ASAS deslocado para sul (CAMILLONI et al. 2004). Quando o ASAS está deslocado para sul, existe uma indicação de redução na precipitação entre 25° e 35°S, enquanto a região da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), entre 30° e 40°S, apresenta valores positivos de precipitação. O padrão oposto é observado quando o ASAS se encontra deslocado para norte (CAMILLONI et al., 2004).

Para Reboita et al. (2010, 2012), o ASAS é um dos principais componentes dos regimes de precipitação da América do Sul, principalmente nas regiões Nordeste, Centro-Oeste e Sul do país. Por ser um ramo descendente da célula de Ferrel e Hadley, seu posicionamento é importante para inibir a convecção durante a estação seca do ano, dificultando a ocorrência de precipitação. Durante a estação chuvosa, o ASAS está deslocado para leste e contribui com seu ramo norte para os ventos alísios que atingem a região Nordeste do Brasil com precipitação (SILVA; CARPENEDO, 2018).

Para analisar o que influencia a posição e intensidade do ASAS durante o inverno austral, Ritcher, Mechoso e Robertson (2008) se utilizam de modelos de circulação geral e investigam a sensibilidade dos mesmos à orografia, TSM e umidade do solo. Ao verificar que a posição do ASAS estava representada de forma alongada e muito a oeste, os autores puderam concluir que a orografia entre a América do Sul e a África é essencial para o posicionamento do sistema sobre o oceano. Alguns fatores também possuem uma influência menor sobre o posicionamento e intensidade do ASAS, como gradientes zonais da TSM na região. Ao examinar o período de inverno, os resultados indicam uma relação entre a posição do ASAS no inverno e as monções no verão do Hemisfério Norte (RITCHER, MECHOSO E ROBERTSON, 2003).

Para Lübbecke et al. (2010) existe uma relação entre o aquecimento do oceano, conhecidos como “Benguela Niño” e “Niño do Atlântico equatorial”, e o ASAS. Se valendo de dados de TSM, os autores identificam que variações na

direção do vento podem causar alterações na TSM do Atlântico Sul equatorial, relacionadas com as variações de intensidade do ASAS, podendo ser utilizadas futuramente para previsão de aquecimentos anômalos da TSM do Atlântico.

Li et al. (2012) estudam a intensificação das altas subtropicais do Hemisfério Norte em um contexto de aquecimento global. Através de simulações com modelos climáticos da Terceira Fase do Projeto de Intercomparação de Modelos Acoplados (Coupled Model Intercomparison Project – CMIP3) do *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC), reanálises do *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (EMCWF) e um modelo de circulação global, os autores encontram projeções futuras de aumento na intensidade das altas subtropicais em um cenário de aumento nas concentrações atmosféricas de gases de efeito estufa, principalmente durante o verão. Isto é indicado pelo aumento do contraste de temperatura entre o oceano e o continente.

Em um estudo realizado por Lübbecke et al. (2014), foram encontrados impactos na TSM causados pelo ASAS no setor leste do Atlântico equatorial. O trabalho é baseado em dados de reanálises, demonstrando que a intensidade do anticiclone entre fevereiro e maio afeta a ressurgência de águas mais frias através de anomalias na velocidade do vento em superfície.

Degola (2013) realiza uma análise climatológica do ASAS, buscando entender o comportamento do sistema em escalas anuais, sazonais e mensais, dimensionando seus valores médios de pressão, posição e intensidade. Segundo o autor, o ASAS possui um comportamento climatológico mensal marcado por duas fases. Entre novembro e abril, há uma diminuição nos seus valores de pressão central. Nos meses de verão há uma estabilidade na sua abrangência espacial, contraindo-se devido ao aquecimento do continente. No período entre maio e outubro, sua abrangência espacial é mais variada, com tendência a se expandir para o continente que está mais frio. O centro do anticiclone tende a se localizar em 30°S e 5°W. Estes resultados são corroborados por Silva e Carpenedo (2017).

Em estudo realizado por Lee et al. (2013), foram exploradas as respostas entre o aquecimento gerado por monção no Hemisfério Norte e os anticiclones subtropicais no Hemisfério Sul. Através de modelos numéricos, foi descoberto que a atividade convectiva tropical tem um papel importante na manutenção ou fortalecimento dos anticiclones no Hemisfério Sul. Em eventos de monção intensa

no verão, é propagada uma subsidência em direção aos trópicos e aumenta os níveis de pressão localmente (LEE et al., 2013). Essa supressão de convecção produz ondas de Rossby, com a resposta mais intensa no Anticiclone Subtropical do Pacífico Sul, o qual quase desaparece durante o inverno se não houver a influência do Hemisfério Norte.

Sun et al. (2017) realizaram um estudo através de reanálises climáticas de variadas fontes para documentar e analisar o ciclo anual do ASAS e como sua variabilidade interanual se relaciona com a variabilidade climática de grande escala entre 1979 e 2015. Para a realização do estudo, foram feitas análises de composições sazonais e Função Ortogonal Empírica (EOF) dos campos de anomalias de altura geopotencial em 850 hPa, para maior entendimento dos padrões de circulação entre 70°W e 20°E (SUN et al., 2016). Os autores encontram duas variações no ciclo anual, tanto na intensidade quanto no tamanho do ASAS. O centro de alta pressão é mais intenso durante os meses de inverno, quando o centro se encontra mais próximo do equador e do setor oeste do Atlântico Sul; ou para os meses de verão austral, o qual se encontra enfraquecido e deslocado para sul no centro da bacia do Atlântico Sul (SUN et al., 2016). As variações interanuais na posição são maiores nos deslocamentos zonais do que meridionais, enquanto os deslocamentos para norte tendem a reduzir a intensidade da alta pressão. O entendimento do ASAS e sua variabilidade interanual não é tão explícito no inverno quanto no verão. As composições de EOF indicam que vários fatores influenciam nesta época do ano. Em exemplo, o SAM e o El Niño-Oscilação Sul são responsáveis por 38% da variância. Esse valor é bem menor que o verão, no qual explicam 50% da variância. Isso indica uma maior necessidade de aprofundamento nos mecanismos que atuam nessa estação do ano (SUN et al., 2016).

Como fonte dos ventos alísios de sudeste, o ASAS tem um papel importante na circulação atmosférico sobre o Atlântico equatorial (SUN et al., 2016). Segundo os autores, o anticiclone cumpre um papel importante nas variações de TSM em todas as estações do ano, exceto no inverno. Estas anomalias podem atuar como forçantes para trens de onda de Rossby.

O estudo de He et al. (2017) analisa a resposta dos anticiclones subtropicais ao aquecimento global. Ao conceituar os anticiclones como dominantes nas bacias oceânicas durante o verão, os autores analisaram mudanças na subsidência,

divergência em baixos níveis e vorticidade em um modelo –do CMIP5 do IPCC. Seguindo o padrão de aumento na quantidade de gases estufa, causando mudanças na estabilidade estática na troposfera e no aquecimento diabático, a tendência é que os anticiclones do Pacífico Norte, Atlântico Sul e Índico se enfraqueçam.

No trabalho de Gilliland and Keim (2018) foi desenvolvida uma avaliação sobre a influência da posição do ASAS na circulação atmosférica em superfície no Brasil entre 1980 e 2014. Ao examinar as condições do vento, os autores concluíram que há um aumento linear na velocidade do vento sobre o Brasil, relacionado com a ZCIT e o ASAS, especialmente para o norte e nordeste. Foi documentado que a posição do ASAS se desloca para leste no inverno e para o oeste na primavera. Os autores também demonstram como a localização do ASAS está diretamente relacionada com a velocidade do vento, pressão ao nível médio do mar (PNMM) e temperatura do ar. Quando o ASAS está localizado em latitudes menores, a PNMM aumenta em direção ao norte, enquanto a temperatura do ar diminui em direção ao oeste, aumentando a velocidade do vento. Esses resultados indicam que a posição do ASAS é de grande importância para as características do vento no Brasil. Qualquer mudança na posição do anticiclone afeta as condições de tempo diárias observadas no Brasil, tornando de grande importância a observação climatológica em projeções futuras (GILLILAND; KEIM, 2018).

No estudo conduzido por Cherchi et al. (2018), o foco foi realizar uma revisão sobre o entendimento de anticiclones subtropicais no contexto do aquecimento global. Para tanto, erros nos modelos climáticos, variabilidade de baixa frequência e processos de interação oceano-atmosfera devem ser considerados. Para os autores, as altas subtropicais, em conjunto com o jato subtropical, determinam o limite polar da circulação tropical, com seu movimento acompanhando a ZCIT (CHERCHI et al., 2018). Essas zonas são importantes por alterar o transporte de umidade, ciclones tropicais, zonas de convergência e circulação de monção. Além disso, são próximas delas que se formam os desertos subtropicais e os climas mediterrâneos (CHERCHI et al., 2018).

O ASAS é mais intenso e abrange uma área maior durante os meses de solstício, seja mais próximo do equador e do oeste durante o inverno ou mais ao sul no verão (CHERCHI et al., 2018). Durante o inverno, vários mecanismos como o SAM, El Niño-Oscilação Sul, variações na monção Africana e Asiática, convecção

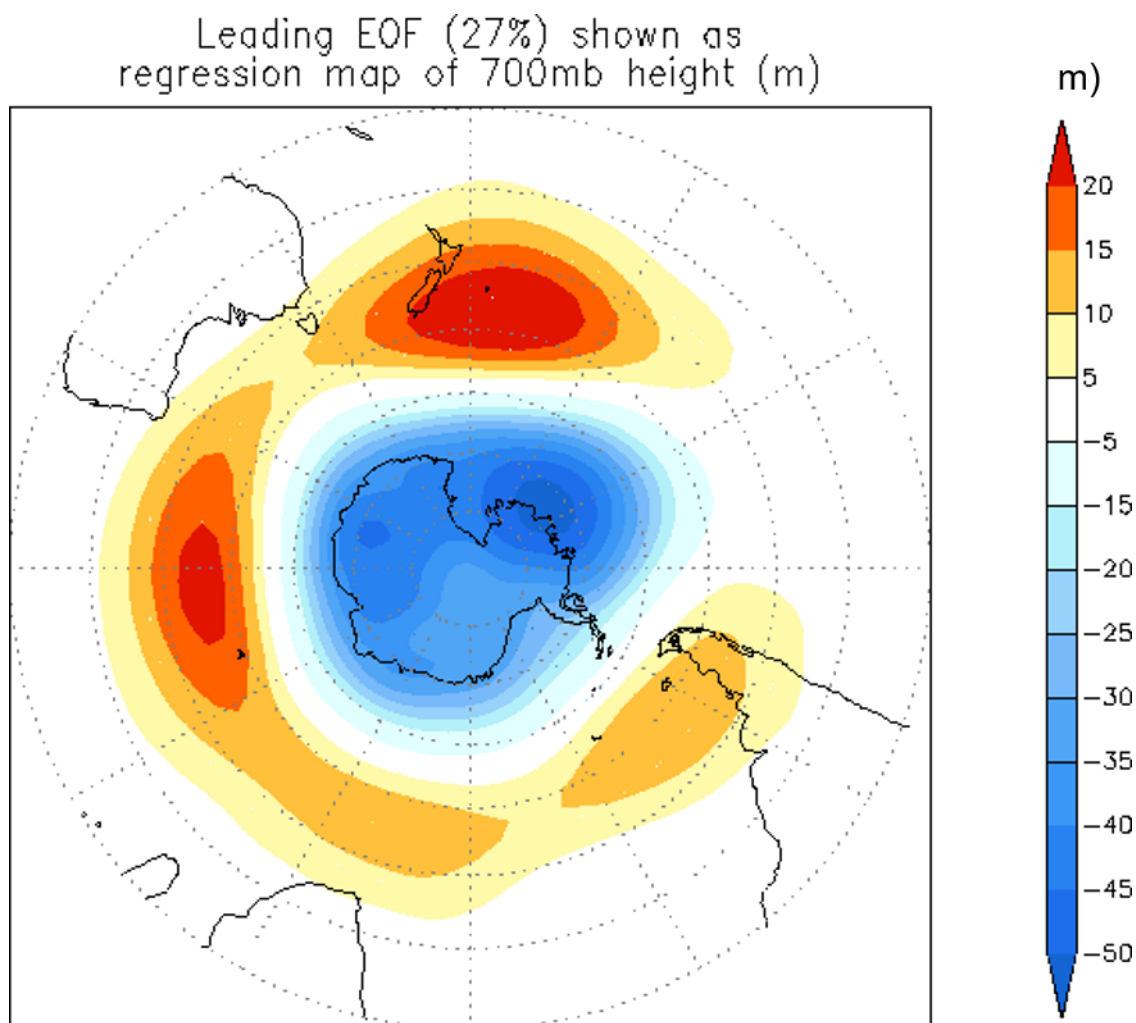
sobre o mar Árábico e da Austrália, bem como as *storm tracks* do Hemisfério Sul, também influenciam na posição do anticiclone, porém sem dominância. Como conclusão, o estudo afirma que a falta de estações no Hemisfério Sul dificultam o conhecimento dos padrões sinóticos e de circulação atmosférica. Com isso, apesar do avanço dos estudos desde o século XIX, ainda existem muitas “áreas cinzas” a serem exploradas (CHERCHI et al., 2018). Os desafios residem nas relações entre oceano e atmosfera, variabilidade de baixa frequência e forçantes climáticas.

2.3 - Modo Anular Sul (SAM)

O SAM, também chamado de Oscilação Antártica, é um modo de variabilidade climática com sinais opostos entre a altura geopotencial das regiões polares e as latitudes médias (CAVALCANTI; AMBRIZZI, 2009). Seu nome se deve ao padrão anular verificado nas anomalias de pressão e altura geopotencial entre as latitudes médias e altas do Hemisfério Sul (Figura 9).

O índice SAM foi desenvolvido por Gong e Wang (1999), seguindo o trabalho de Walker nos anos 20 sobre as três oscilações no Hemisfério Norte. De acordo com os autores, a chamada Oscilação Antártica se referia a um padrão de alternância atmosférico da pressão em superfície entre latitudes médias e altas do Hemisfério Sul. Para a composição do índice foram utilizadas reanálises do NCEP-NCAR e EOF. Na medida em que foram espacializadas as anomalias de pressão, foi descoberto que o padrão de “gangorra” era observado em todos os meses do ano, porém com maior intensidade durante o inverno (GONG; WANG, 1999). O índice foi padronizado pela diferença entre a pressão aferida em 40°S e 65°S. O comportamento indica que na fase positiva do SAM há um fortalecimento dos ventos de oeste, enquanto durante a fase negativa o oposto é encontrado.

Figura 9: Padrão espacial da Oscilação Antártica (AAO ou SAM), mostrada aqui como um mapa de regressão em metros para a primeira EOF (27%).



Fonte: CPC (2018).

No trabalho de Thompson e Wallace (2000), foi realizada uma comparação entre os modos anulares Norte e Sul (NAM e SAM), através de dados de reanálise do NCEP-NCAR. Os resultados encontrados corroboraram com trabalhos prévios, mostrando as semelhanças entre os modos. Foram encontradas também fases “ativas” do NAM e SAM (meio do inverno no Hemisfério Norte e final da primavera no Hemisfério Sul), no qual os Modos Anulares interagem com ondas planetárias e modulam a circulação da baixa estratosfera, bem como a coluna de ozônio, altura da tropopausa e ventos alísios (THOMPSON; WALLACE, 2000). O SAM apresenta um padrão mais simétrico em relação ao NAM devido a maior quantidade de oceano no Hemisfério Sul.

O trabalho de Mo (2000) analisou os padrões interanuais e de longa duração na circulação do Hemisfério Sul e na TSM, também se utilizando de dados de reanálise do NCEP-NCAR de 1949 até 2000. O estudo teve como resultado que o SAM também é dominante em flutuações maiores que 60 meses, podendo modular a TSM. Já Barry e Chorley (2003) definem o padrão SAM como mais simétrico do que o NAM, porém possuindo efeitos semelhantes: transporte de massa entre latitudes polares e latitudes médias, se estendendo por toda a troposfera, associado com mudanças nas trilhas de tempestade, intensificação dos ventos de oeste e anomalias de pressão em superfície.

Em estudo buscando analisar a variabilidade entre o Hemisfério Sul e o gelo marinho, Hall e Visbeck (2002) se utilizaram de um modelo de interação oceano-atmosfera para simular o papel das flutuações simétricas dos ventos de oeste. O trabalho buscava comparar dados observados com um modelo com integração de até 15.000 anos. Os resultados mostram que a circulação oceânica e as variações no gelo marinho estão ligadas com o SAM nas escalas de tempo interanuais e até centenárias. A fase positiva do SAM está associada com uma intensificação dos ventos em 60°S e o enfraquecimento mais ao norte, bem como um fluxo divergente em superfície, que leva o gelo marinho mais ao norte, aumentando sua cobertura (HALL; VISBECK, 2000). O efeito oposto é observado durante a fase negativa.

O estudo desenvolvido por Marshall (2003) mostra que existem diferentes trabalhos que indicam uma tendência ao sinal positivo do SAM para as próximas décadas. O autor trabalha com a possibilidade de haver alguns erros nos dados de reanálise, logo toma como base dados de estações, entre 1958 e 2000. Foi concluído que há tendência de aumento na diferença de pressão entre 40° e 65°S com significância estatística, principalmente após os anos 70. Apesar disso, os modelos baseados em dados de reanálise indicavam que a grande tendência de mudança se localizava nos meses de inverno, o que seria o contrário dos dados observados que demonstram ser no verão (MARSHALL, 2003).

Silvestri e Vera (2003) desenvolveram uma pesquisa utilizando dados de precipitação das reanálises do NCEP-NCAR (1979-1999) para analisar a influência do SAM na precipitação no sudeste da América do Sul. Os autores encontram uma relação oposta entre os efeitos causados por ambas as fases do SAM: durante principalmente a primavera, a fase positiva (negativa) do SAM está associada com

anomalias anticiclônicas (ciclônicas) em altos níveis, enfraquecendo (fortalecendo) a convergência e diminuindo a precipitação sobre a região analisada (SILVESTRI; VERA, 2003).

Já Carvalho, Jones e Ambrizzi (2005) analisam as fases opostas do SAM e sua relação com a atividade intrassazonal e interanual nos trópicos durante o verão austral. Os autores analisaram anomalias de altura geopotencial em 700 hPa, enquanto realizam EOF para verificar a relação entre a atividade convectiva intrasazonal nos trópicos e as fases do El Niño-Oscilação Sul. Os resultados mostram que a fase negativa (positiva) do SAM é dominante quando os padrões de TSM, convecção e circulação se aproximam do padrão de El Niño (La Niña). Também é indicada a possibilidade de que as fases negativas da SAM estão relacionadas com a propagação da Oscilação de Madden-Julian (CARVALHO; JONES; AMBRIZZI, 2005).

Yuan e Li (2008) estudam sobre o impacto causado no gelo marinho antártico pelos modos de variabilidade climática em altas latitudes. São utilizados dados de concentração de gelo marinho do *National Snow and Ice Data Center* (NSIDC) e reanálises do NCEP-NCAR. O trabalho se valeu de coeficientes de correlação e significância estatística para representar que o SAM apresenta menor influência no gelo marinho que os outros modos climáticos, sendo analisado com uma defasagem de até dois meses (YUAN; LI, 2008). Os valores regionais indicam uma correlação negativa entre o gelo marinho no norte do MW e o SAM.

Em um trabalho desenvolvido por Reboita, Ambrizzi e da Rocha (2009), foi explorada a relação entre o SAM e os sistemas atmosféricos do Hemisfério Sul. Neste estudo foram utilizadas as reanálises do NCEP-NCAR do período entre 1980 e 1999, além da função frontogenética para calcular a frontogênese e mapas de densidade de ciclones. Os resultados demonstraram que a fase negativa do SAM desloca a trajetória dos ciclones em todo Hemisfério Sul para norte, em relação à fase positiva. Além disso, são observadas uma maior atividade frontogenética e anomalias positivas de precipitação na América do Sul e Atlântico Sul. Na fase positiva o padrão é o oposto (REBOITA; AMBRIZZI; DA ROCHA, 2009).

Já Fogt et al. (2009), analisam a variabilidade do SAM em reconstruções, índices observados e simulações de modelos climáticos do IPCC, entre 1865 e 2005. As comparações feitas mostram que os modelos não representam a duração

da variabilidade natural durante os anos de 1930 e 1960. Os modelos conseguem representar a tendência positiva do SAM durante o verão austral entre 1957 e 2005, causada pela depleção do ozônio (FOGT et al., 2009). Apesar disso, os autores concluem que as tendências diferem entre os modelos e os dados observados na primavera, indicando que um maior cuidado deve ser tomado para projeções futuras do SAM.

O trabalho de Magalhães Neto et al. (2012) se vale de observações de satélite para o gelo marinho e organização de dados em cluster com diversos parâmetros climáticos e geoquímicos, dentre eles o índice SAM, para analisar a resposta dos mesmos na extensão mínima, média e máxima do gelo marinho. O resultado foi que a tendência do SAM em sua fase positiva é intensificar os ventos de oeste e carregar águas profundas geladas para norte, reduzindo o transporte de calor oceânico. A correlação negativa entre gelo marinho e SAM durante a concentração máxima de gelo marinho em setembro foi observada apenas no MW (MAGALHÃES NETO et al., 2012).

Em um estudo desenvolvido por Cardozo, Reboita e Garcia (2015), foram avaliadas a ocorrência de frentes frias na América do Sul no período entre 2007 e 2013. Entre seus objetivos, visava relacionar a ocorrência de frentes frias com o SAM. Utilizando cartas sinóticas do Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC) e também dados de reanálise climática do NCEP-NCAR e do Era-Interim, o trabalho demonstra que a maior ocorrência de frentes frias durante a fase positiva do SAM é no verão, enquanto na fase negativa do SAM são nas estações de inverno e primavera (CARDOZO; REBOITA; GARCIA, 2015).

Uma reconstrução do SAM no último milênio foi realizada por Abram et al. (2014), a qual atribui a tendência de fase positiva para a diminuição do ozônio. Foram utilizados dados *proxy*, indicando a tendência positiva desde o século XV, causando o resfriamento do continente Antártico, enquanto a Península Antártica passava por um aquecimento. O estudo também indica que esta é a fase mais positiva do SAM dos últimos mil anos. Estudo semelhante foi conduzido por Hessel (2017), no qual as reconstruções paleoclimáticas indicam padrões similares de variabilidade do SAM nos últimos dois séculos, porém com maiores diferenças na medida em que regressamos na análise de tempos pretéritos.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 - Natureza dos Dados

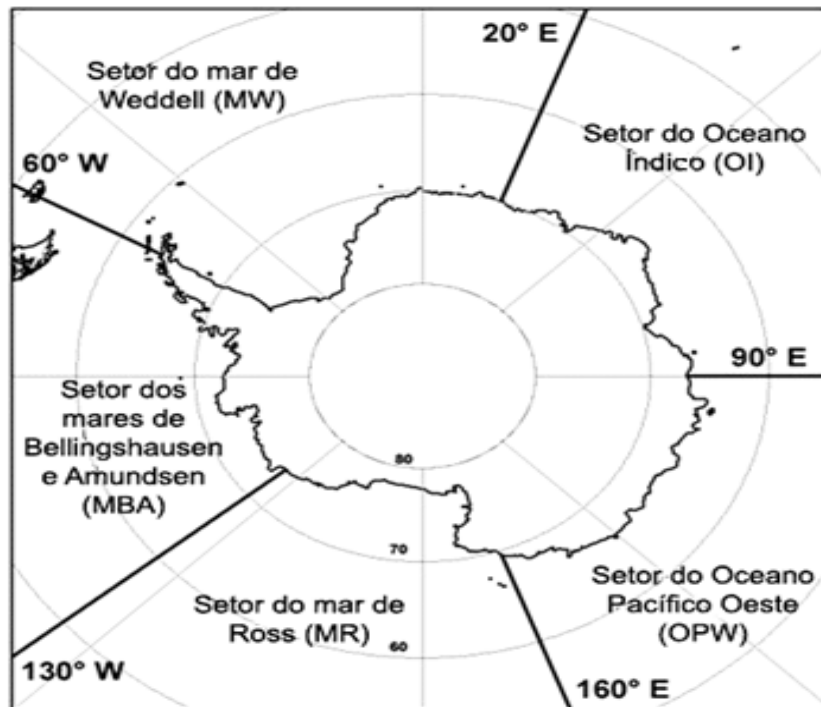
3.1.1 - Extensão de gelo marinho antártico

Foram utilizados dados de extensão de gelo marinho do NSIDC para o período de 1981 a 2015, totalizando 35 anos de análise. O NSIDC apoia a pesquisa sobre a criosfera, distribuindo dados científicos e disponibilizando resultados científicos e educacionais. Para o cálculo da extensão do gelo marinho, primeiro é aplicado um algoritmo descrito por Cavalieri et al. (1999), o qual converte a temperatura de brilho captada por sensores a bordo de satélites em órbita polar para uma estimativa da concentração do gelo marinho. Essa concentração é uma estimativa média da cobertura de gelo marinho sobre os mares antárticos, necessitando ser superior a 15% em cada pixel de 25 km x 25 km. Deste dado é obtida a extensão de gelo marinho, a qual é definida como a área que apresentou sua cobertura com uma concentração média maior que 15%. Os dados são disponibilizados em <https://nsidc.org/data/G02135>.

Na Figura 10 é apresentada a divisão dos setores de cobertura de gelo marinho dos mares antárticos, conforme a disponibilidade dos dados do NSIDC, sendo eles: mar de Weddell (60°W a 20°E), Oceano Índico (20°E a 90°E), Oceano Pacífico Oeste (90°E a 160°E), mar de Ross (160°E a 130°W) e mares de Bellingshausen-Amundsen (130°W a 60°W).

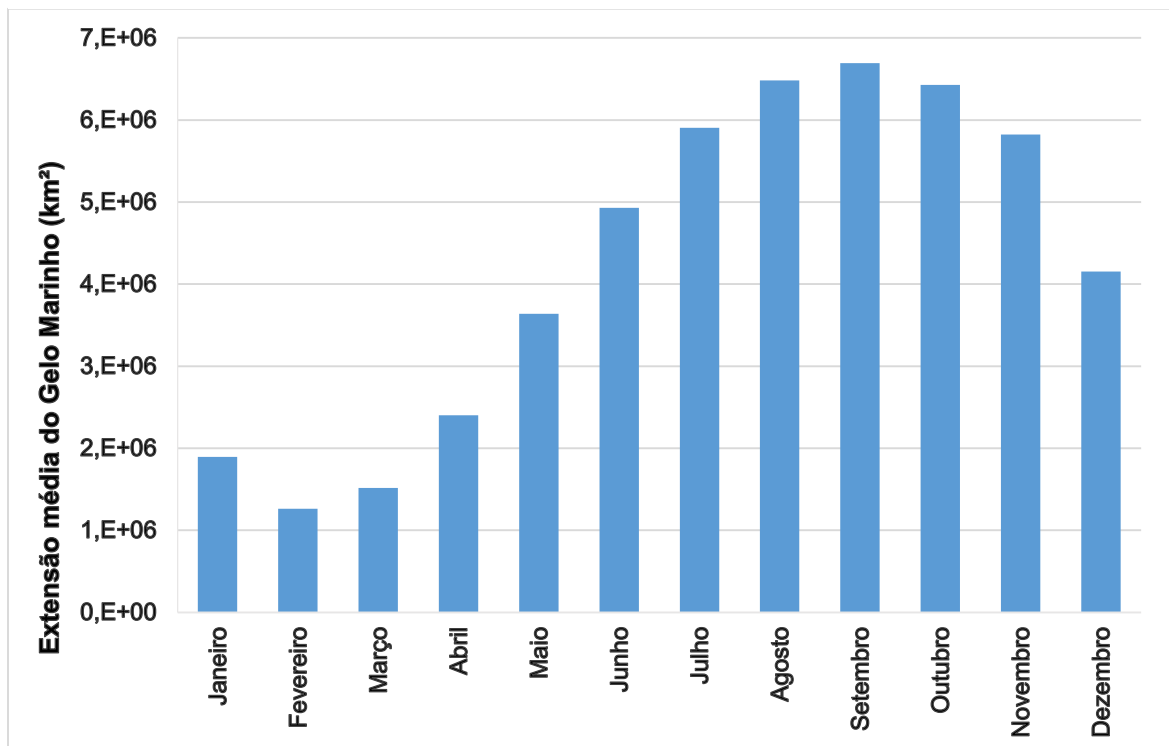
O setor do MW é o que apresenta a maior área entre os cinco setores, bem como a maior extensão de gelo marinho registradas (Figura 11), sendo sua extensão média da ordem de $4,28 \pm 2,03 \times 10^6$ km², com mínima extensão média no dia 20 de fevereiro e máxima em 21 de setembro (CARPENEDO, 2017). De acordo com King e Turner (1997), o gelo marinho no oeste do MW pode perdurar por até mesmo mais de uma estação.

Figura 10: Setores do Hemisfério Sul.



Fonte: Cavalieri e Parkinson (2008). Adaptado por: Carpenedo (2017).

Figura 11: Extensão média do gelo marinho no MW (climatologia 1981-2010).



Fonte: NSIDC (2018). Elaboração: Silva (2018).

3.1.2 - Reanálises Climáticas

Os campos atmosféricos utilizados são oriundos das reanálises do ERA-Interim fornecida pelo *European Centre for Medium-Range Weather Forecast* (ECMWF) *Data Server* (<http://apps.ecmwf.int/datasets/data/interim-full-moda/levtype=sfc>). Estes dados cobrem o período de 1979 até os dias atuais. A descrição completa pode ser obtida em Dee et al. (2004).

O processo de reanálise de dados envolve o uso de modelos numéricos e interpolações físicas para a geração de uma grade regular, que leva em conta a topografia, cobertura vegetal e evolução temporal dos processos de radiação, convecção, deslocamento de massas e outras variáveis relevantes para o estudo da circulação geral da atmosfera (BIAZETO; SILVA DIA; DIAS, 2006).

A necessidade da criação das reanálises data desde o início da utilização de dados meteorológicos, os quais tinham como intenção melhorar o uso de dados observados para a previsão do tempo (DEE et al., 2011). As reanálises podem produzir campos espaciais com diferentes variáveis que representam de forma coerente a circulação atmosférica global. Apesar disso, sua qualidade depende fielmente dos dados observados coletados, não podendo ser utilizadas como equivalentes dos mesmos. Sua utilização para pesquisa tem sido fundamental para o alcance de áreas que não possuem nenhuma estação ou não há estações completas para aferição de parâmetros meteorológicos.

A reanálise fornecida pelo ECMWF produz dados da superfície até os níveis superiores, em 0,1 hPa (BERRISFORD et al., 2009; DEE et al., 2011). O espaçamento horizontal é de 1,5° de latitude x 1,5° de longitude. Os campos espaciais atmosféricos utilizados foram:

- Pressão ao Nível do Mar (PNMM): hPa
- Vento Zonal em 250 hPa: m/s
- Altura Geopotencial em 500 hPa: m

3.1.3 - Dados de Precipitação

Os dados de precipitação foram obtidos através do *dataset* criado por Xavier, King e Scanlon (2017). A base de dados é criada para alimentar as pesquisas que envolvem dados de precipitação no Brasil, sendo obtida online principalmente pelas estações do Sistema de Informações Hidrológicas (ANA), do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), Departamento de Águas e Energia Elétrica (DAEE-SP), Superintendência do desenvolvimento do Nordeste (SUDENE), dentre outras fontes. Em seguida, os dados são tratados por meio de interpolações com o método ADW (*Angular Distance Weighting*) para obter uma grade de 0,25° de latitude x 0,25° de longitude (XAVIER et. al, 2016). Mais detalhes sobre o processo de geração dos dados podem ser vistos em Scanlon et al. (2017).

3.1.4 - Índice SAM (Modo Anular Sul)

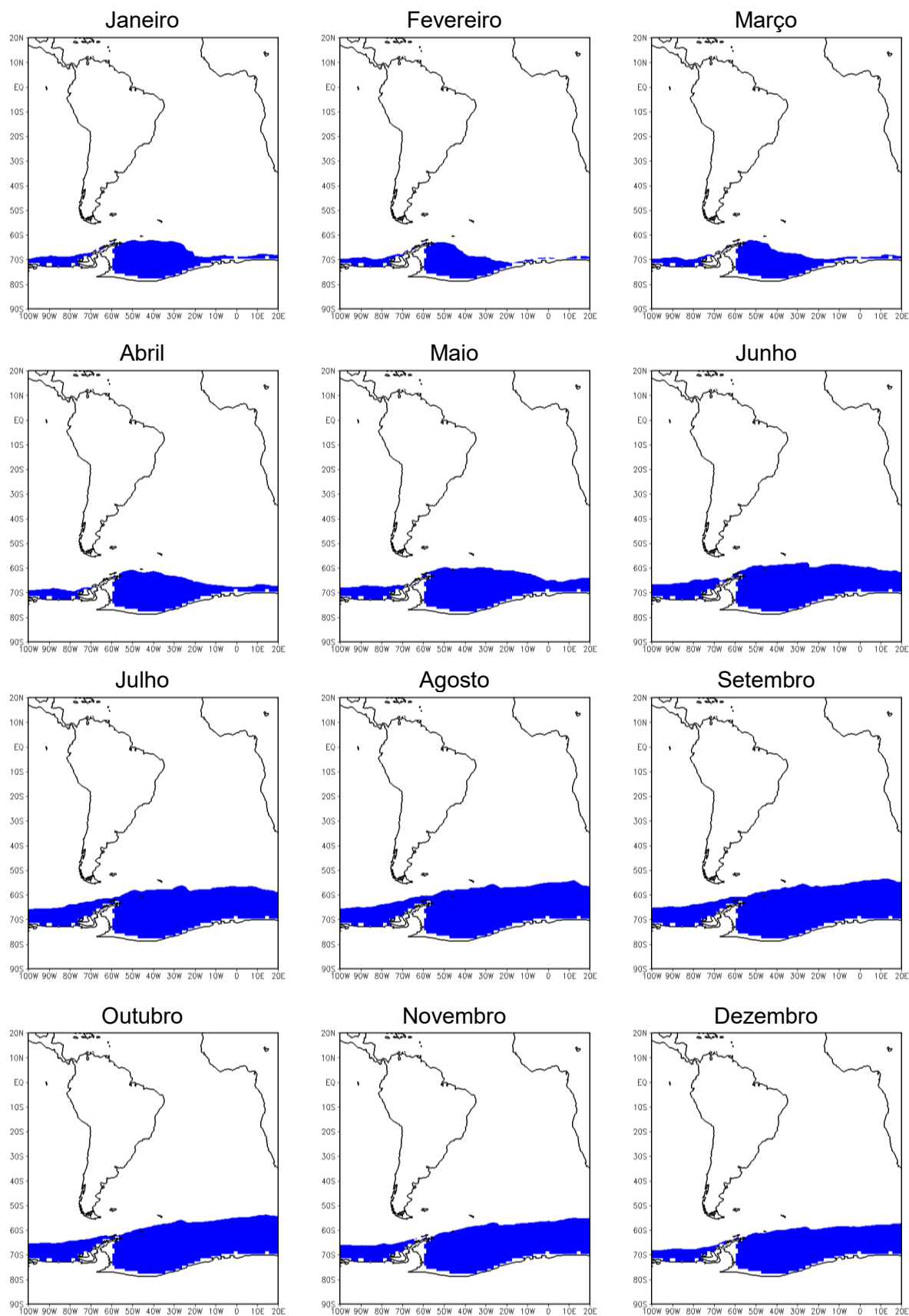
O índice SAM mensal foi obtido do CPC/NOAA (*Climate Prediction Center/ National Oceanic & Atmospheric Administration*). O valor do índice é gerado pelas anomalias diárias de altura geopotencial em 700 hPa ao sul de 20°S, sendo padronizadas pelo desvio padrão do índice mensal (CPC, 2018). Neste estudo foi utilizado os índices para o período de 1980 a 2015 (CPC, 2018) obtidos através do site: http://www.cpc.noaa.gov/products/precip/CWlink/daily_ao_index/ao/monthly.ao.index.b79.current.ascii.table.

3.2 - Metodologia

3.2.1 - Eventos extremos de extensão de gelo marinho

A partir dos dados diários de extensão de gelo marinho no setor do MW, foram calculadas as médias mensais. Posteriormente foi calculada a climatologia mensal entre 1981 e 2010. Subsequentemente foram calculadas as anomalias mensais de extensão de gelo marinho em relação à climatologia mensal. Foram selecionados os meses de fevereiro/março e setembro/outubro (Figura 12) por serem os meses de menor e maior extensão do gelo marinho, respectivamente.

Figura 12: Extensão média mensal de gelo marinho (climatologia 1982-2011).



Fonte: NOAA (2018). Elaboração: Carpenedo (2018).

A escolha da metodologia dos percentis se deve ao fato de muitas técnicas estatísticas partirem de suposições restritas sobre os dados ali contidos. Para evitar-se o erro de presumir que os eventos seguem uma distribuição “normal” (gaussiana), se utiliza da análise exploratória de dados para aplicar um método que funcione na maioria das circunstâncias e também não seja influenciado por “outliers”, como uma simples média seria (WILKS, 2006; CRESPO, 2017).

A partir das anomalias mensais de extensão de gelo marinho, foi utilizado o método estatístico dos percentis (Equação 1) para determinar os eventos extremos mensais de retração (percentil de 10% - q_{10}), chamados daqui em diante de eventos ERGM, e de expansão (percentil de 90% - q_{90}), chamados daqui em diante de eventos EEGM. De acordo com Wilks (2006), para a determinação dos percentis, primeiro se organiza os dados em uma sequência, neste caso, crescente. Em seguida, é feito uma indexação destes eventos, para que se possa calcular a quantidade e a posição dos eventos extremos. Após o ordenamento dos dados, foram selecionados os percentis de q_{10} e q_{90} , através da Equação 1.1, que inicialmente determina a posição do percentil desejado. Em seguida, determina-se o percentil desejado através da Equação 1.2.

$$L_p = (n - 1) \frac{p}{100} + 1 \quad (1.1)$$

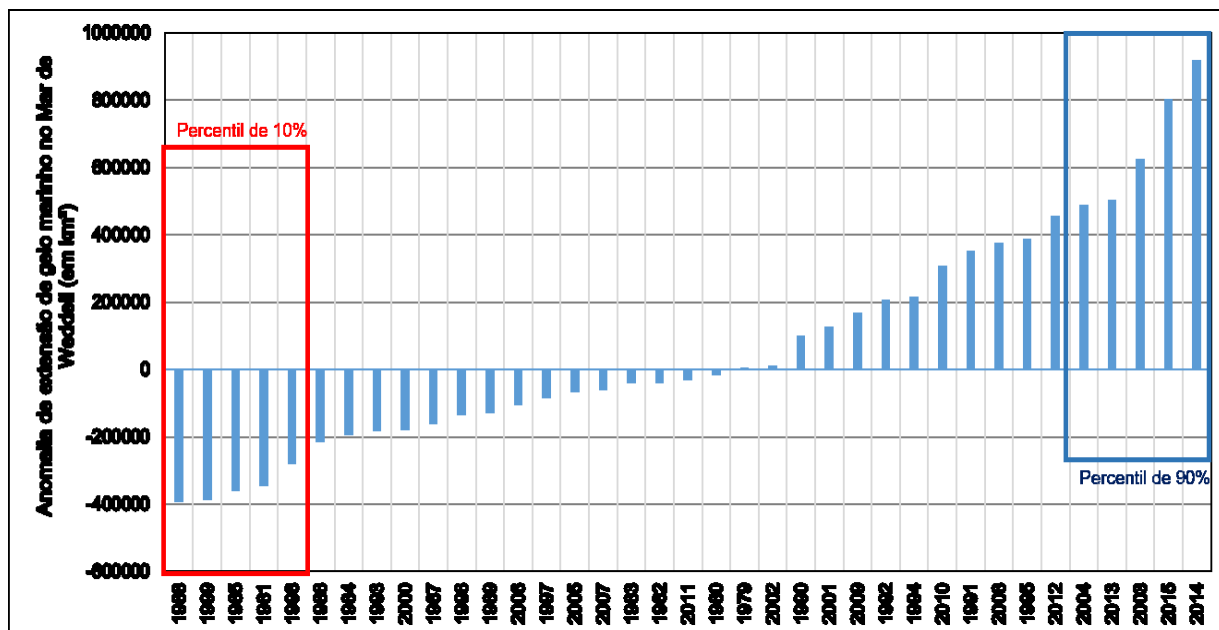
$$P_q = X_i + (X_{i+1} - X_i) * (L_{pi} - L_p) \quad (1.2)$$

Equação 1: método estatístico dos percentis. Fonte: Wilks, 2006

Nesta equação, L_p é a posição do percentil desejado; n é o número de eventos; p é o percentil desejado; p_q é o número real no qual $q\%$ das observações são menores (maiores) ou iguais a ele; L_{pi} é o número inteiro mais próximo de L_p .

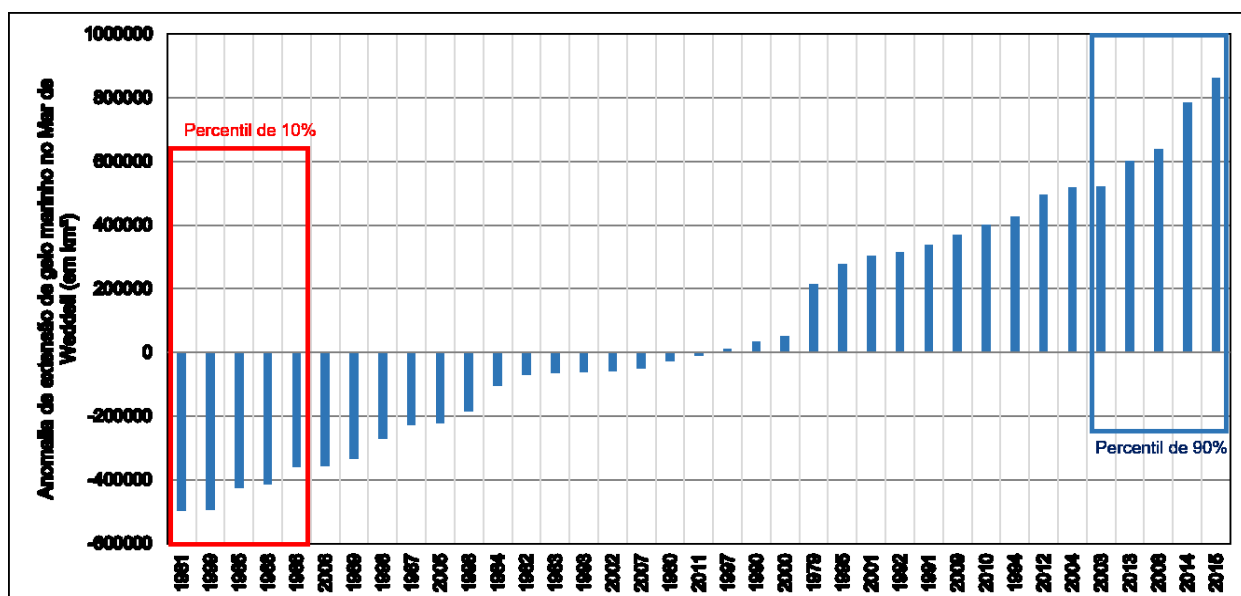
Logo, com a determinação de P_q , que é um número real, nos indicando que pelo menos $q\%$ das observações são menores (maiores) ou iguais ao valor do percentil. Assim, temos a determinação de todos os eventos extremos de retração (q_{10}) e de expansão (q_{90}), realizando um cálculo do percentil para cada mês de análise (fevereiro, março, setembro e outubro). As anomalias e os respectivos percentis estão representados nas Figuras 13 a 16.

Figura 13: Gráfico das anomalias da extensão de gelo marinho no MW no mês de fevereiro, entre 1980 a 2015.



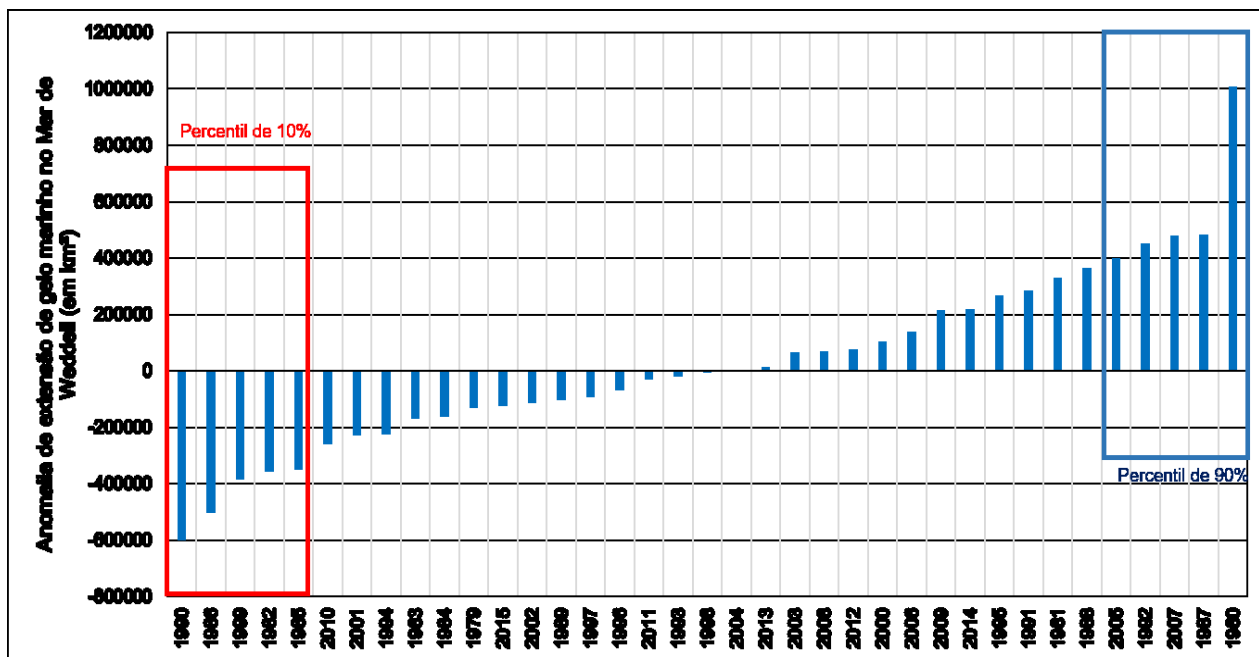
Elaboração: Silva (2018).

Figura 14: Gráfico das anomalias da extensão de gelo marinho no Mar de Weddell no mês de março, entre 1980 a 2015



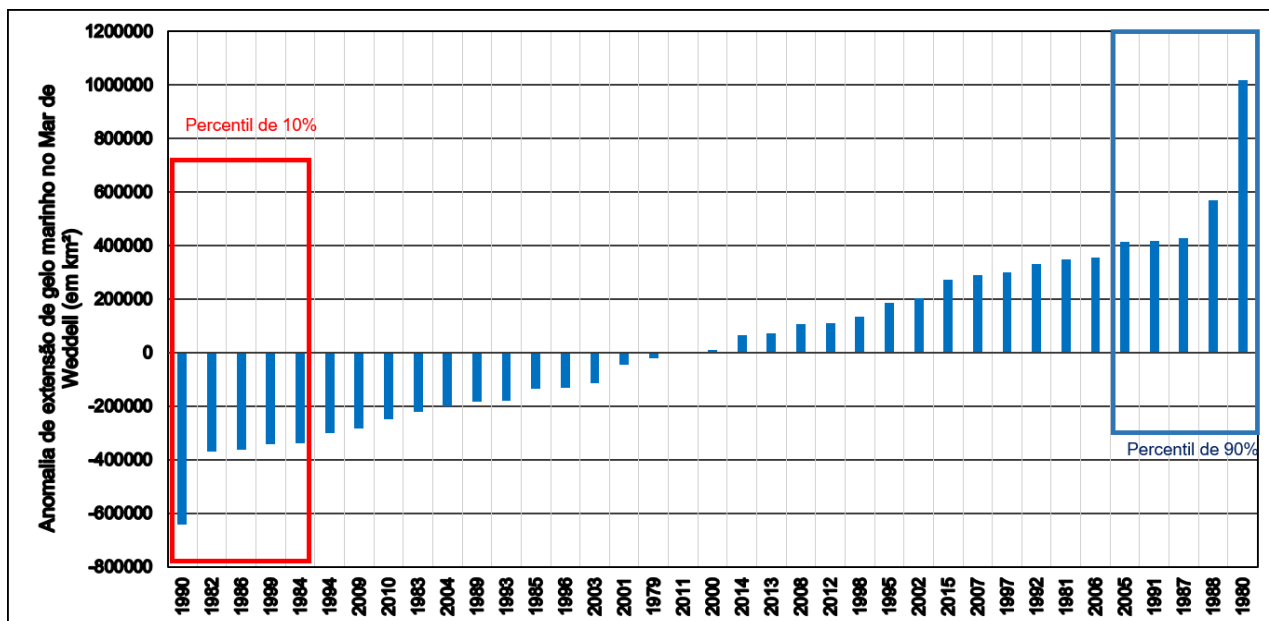
Elaboração: Silva (2018).

Figura 15: Gráfico das anomalias da extensão de gelo marinho no Mar de Weddell no mês de setembro, entre 1980 a 2015.



Elaboração: Silva (2018).

Figura 16: Gráfico das anomalias da extensão de gelo marinho no Mar de Weddell no mês de outubro, entre 1980 a 2015.



Elaboração: Silva (2018).

3.2.2 - Composições dos campos atmosféricos

No presente estudo, a delimitação da área analisada é da latitude de 80°S a 20°N e da longitude de 100°W a 20°E, abrangendo parte do oceano Atlântico Norte tropical, todo o oceano Atlântico Sul tropical e extratropical, além da América do Sul, parte do continente antártico e o MW.

A espacialização dos dados foi feita no *Grid Analysis and Display System* (GrADS). O GrADS é uma ferramenta que permite fácil acesso, manipulação e visualização de dados para as ciências da Terra (DOTY, 1995). Sendo um modelo de quatro dimensões (latitude, longitude, altitude e tempo), o programa é utilizado para gerar as composições atmosféricas.

Composições atmosféricas são resultado da disposição dos dados de reanálises no programa GrADS (KINTER III, 1993), selecionando os anos de eventos extremos de gelo marinho, conforme o item 3.2.1. O programa permite que seja inserido uma rotina (*script*) que determine as coordenadas geográficas, o nível atmosférico e os anos de análise. O resultado é uma Figura no formato *gif*.

São geradas Figuras no lag= 0 e lag=+1, que são utilizadas para representar o mês do evento extremo de gelo marinho e o mês subsequente, respectivamente. Esta análise é conduzida em todas as variáveis do trabalho para que se possa verificar os possíveis impactos dos eventos extremos de gelo marinho no mês posterior.

Cada resultado é uma anomalia espacializada conforme a série climatológica de 1981-2010, sendo selecionado através da inserção da fórmula “média do mês – climatologia” no script. Esta composição permite que os valores acima e abaixo da média sejam postados em cada área do mapa, de acordo com as condições mensais esperadas.

A significância estatística das composições foi obtida através do teste *t*-Student. O teste foi desenvolvido para diversas finalidades, entre elas a comparação de dois eventos e suas variações, sendo comprovadas pelas hipóteses determinadas (WILKS, 2006). A distribuição *t* é uma distribuição simétrica, que é muito similar à distribuição Gaussiana, porém com mais probabilidades designadas para as “caudas” (WILKS, 2006). Nesta distribuição, *t* é controlado pelo parâmetro *v*, os chamados graus de liberdade. Segue o teste:

$$t = \frac{V_{\psi} - v_0}{[var(V_{\psi})]^{1/2}} \quad (2.1)$$

$$var(V_{\psi}) = \frac{s^2}{v} \quad (2.2)$$

Equação 2: Fórmulas para o Desvio Padrão. Fonte: Wilks (2006).

O teste t (Equação 2) segue uma distribuição em que 2.1 (Equação 2) corresponde a variância, sendo s o desvio padrão da amostra e v o número de graus de liberdade para eventos independentes. Para este trabalho, foi selecionado o nível de significância de 10%.

Este teste também é inserido no *script*, para que o programa selecione apenas os eventos que passam no teste, representando a área com uma linha pontilhada. Desta forma, é feita a análise apenas das áreas com significância estatística associadas aos eventos extremos de gelo marinho.

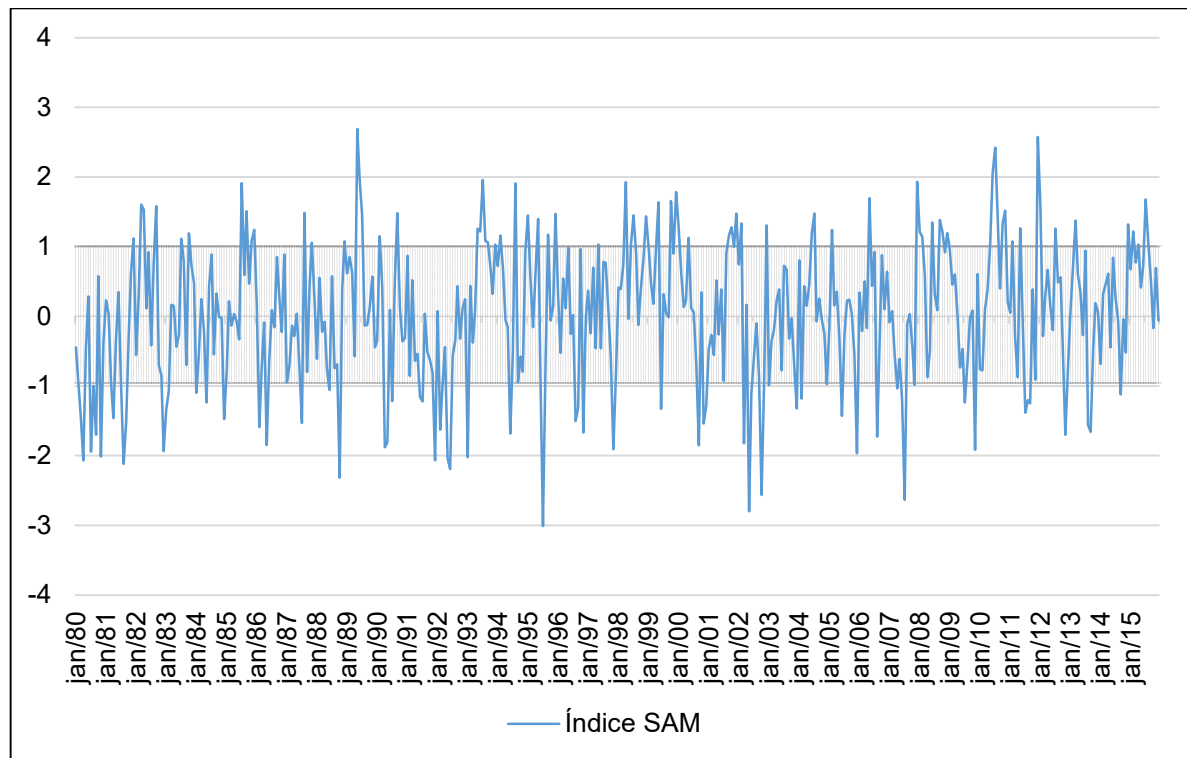
3.2.3 - Índice SAM

Os índices mensais do SAM são confrontados com cada evento extremo de gelo marinho, de forma a se saber o valor do índice e qual sua reação com os eventos extremos de gelo marinho.

Eventos positivos e negativos do SAM foram definidos pelo desvio padrão de +1 e -1, calculados na série mensal do SAM. A série temporal do índice SAM, bem como o desvio padrão, é apresentado na Figura 17.

São selecionados os índices SAM nos anos de eventos extremos de gelo marinho para analisar o potencial efeito do gelo marinho no índice SAM, tanto no mês ocorrido quanto no mês subsequente. A hipótese é levantada em trabalhos anteriores, como Raphael et. al (2010) e Parise et al. (2015), os quais indicam correlações positivas entre o gelo marinho no MW e o SAM.

Figura 17: Gráfico do Índice SAM mensal no período de 1980-2015.



Fonte: CPC (2018). Elaboração: Silva (2018).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentadas as análises da circulação atmosférica, comportamento do ASAS e SAM associados aos eventos extremos de extensão gelo marinho no setor do mar de Weddell. Ao final, são realizadas as discussões sobre os resultados.

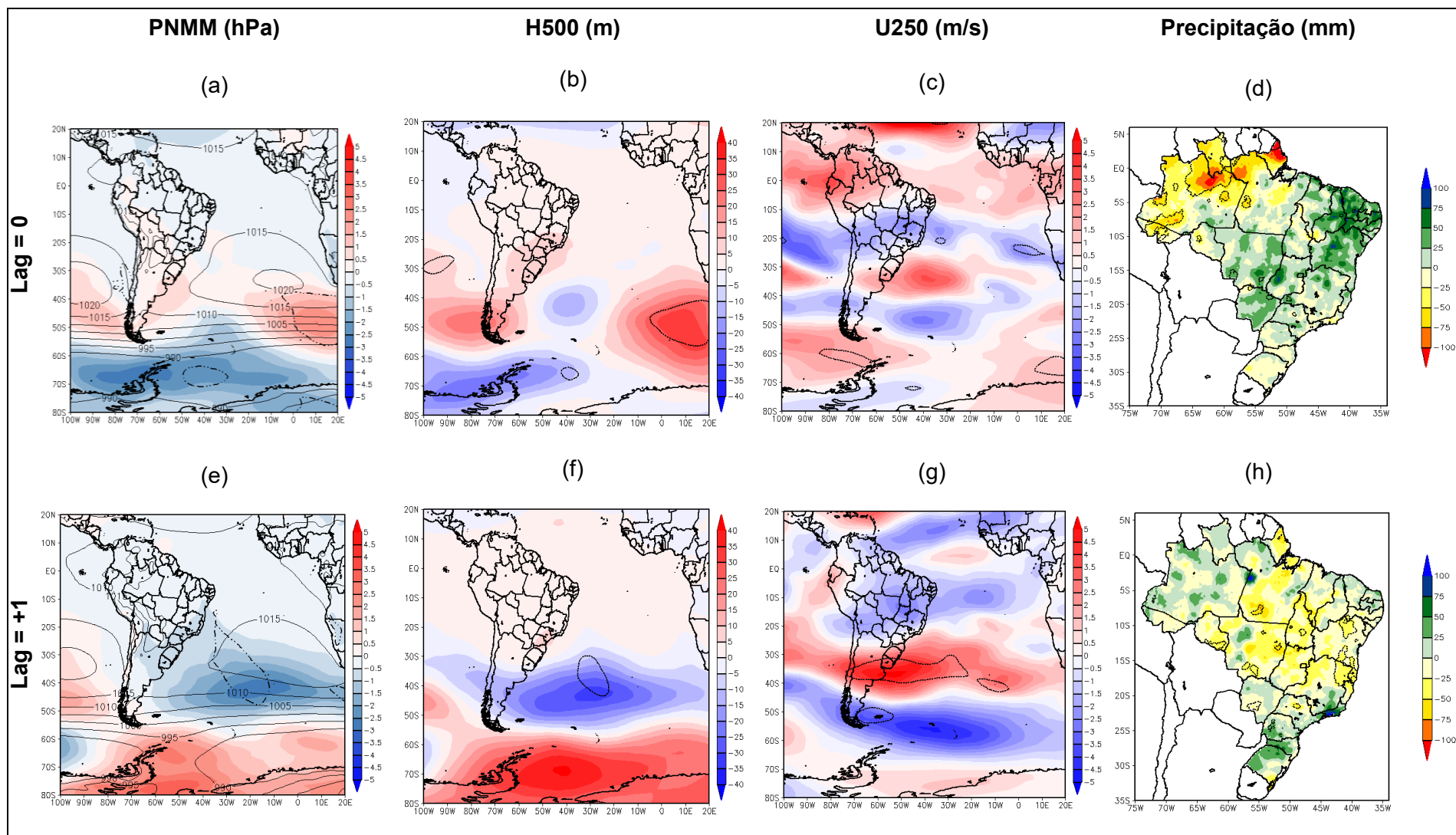
4.1 - Fevereiro: Circulação Atmosférica e Comportamento do ASAS

4.1.1 - Eventos ERGM no MW

Durante os eventos ERGM ($\text{lag}=0$) no mês de fevereiro, os resultados encontrados indicam um fortalecimento do ramo sudeste do ASAS, observado tanto em superfície quanto em 500 hPa (Figuras 18a, 18b). Também são encontradas anomalias negativas de PNMM e altura geopotencial em 500 hPa (Figuras 18a, 8b) no MW, bem como um fortalecimento do jato polar (Figura 11c). Na análise da precipitação, foram encontradas anomalias negativas da ordem de -50 mm no sudoeste de Minas Gerais (Figura 18d).

Com a defasagem de um mês ($\text{lag}=+1$), ou seja, um mês após os eventos ERGM, os resultados indicam um enfraquecimento do ramo oeste e sudoeste do ASAS (Figura 18e) em 20°W e $30^{\circ}\text{-}40^{\circ}\text{S}$, da ordem de -5 hPa, também sendo observadas anomalias negativas de altura geopotencial em 500 hPa entre 30° e 40°S e 39°W , da ordem de -40 m. O jato subtropical é fortalecido entre 30° e 40°S , com anomalia positiva da ordem de +5 m/s (Figura 18g). No extremo sul da América do Sul é constatado um enfraquecimento do jato polar. Na Figura 18h são observadas anomalias negativas de precipitação com orientação noroeste-sudeste sobre o Brasil, entre a região Norte e Sudeste, o que pode indicar uma menor atividade da ZCAS devido ao enfraquecimento do ramo oeste do ASAS, resultando assim em menor transporte de umidade em direção ao país.

Figura 18: Composições anômalas de (a, e) pressão ao nível médio do mar (PNMM), (b, f) altura geopotencial em 500 hPa (H500), (c, g) vento zonal em 250 hPa (U250) e (d, h) precipitação durante (lag=0) e um mês após (lag=+1) os eventos ERGM no setor do MW no mês de fevereiro, entre 1980 e 2015. Linhas pontilhadas indicam anomalias significativas ao nível de 10%.

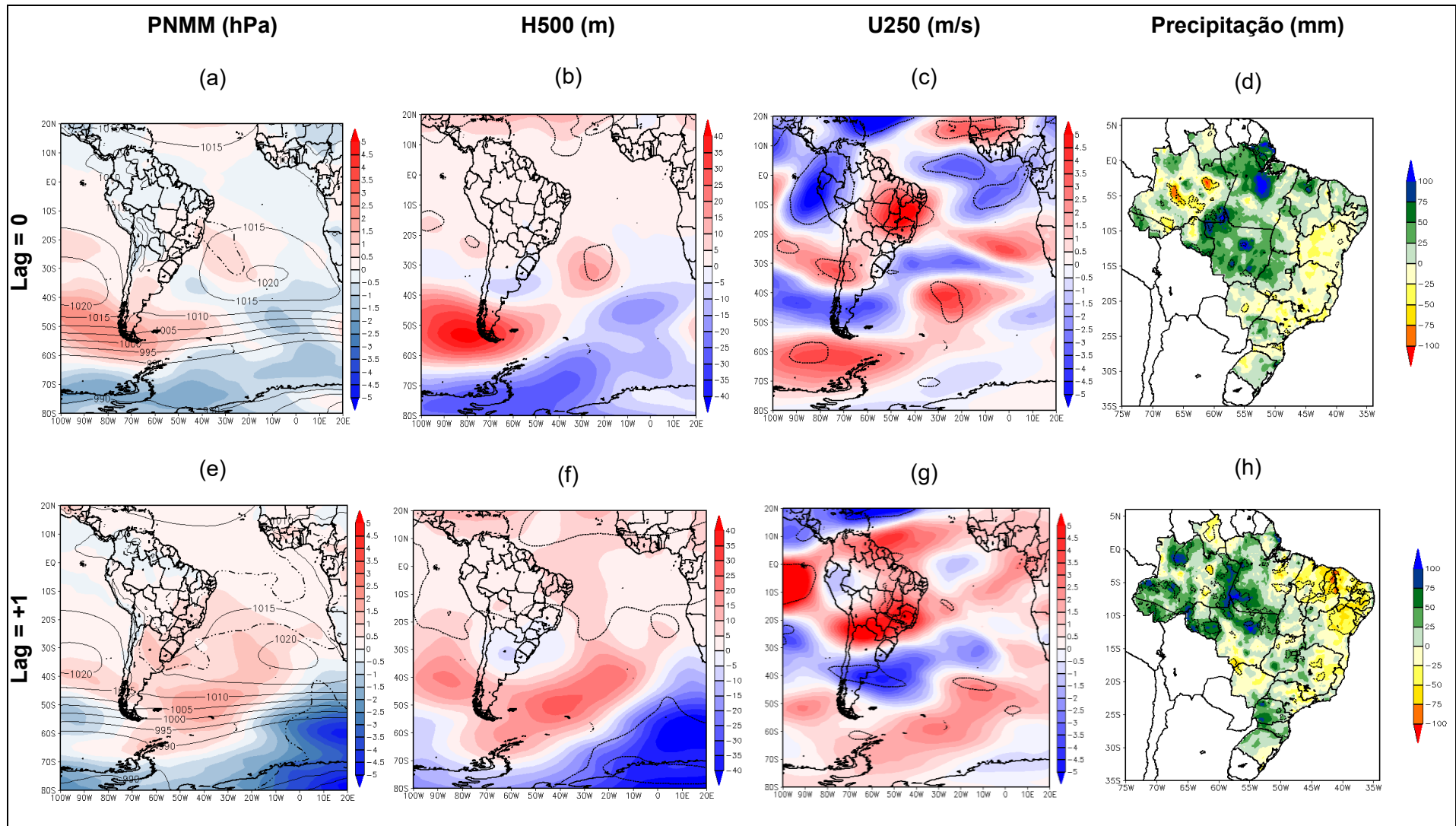


4.1.2 - Eventos EEGM no MW

Durante os eventos EEGM no MW em fevereiro ($\text{lag}=0$) foi constatado um fortalecimento do ramo noroeste do ASAS de até +1 hPa (Figura 19a), bem como anomalia positiva de altura geopotencial em 500 hPa centrada em torno de 30°S, da ordem de +3 m (Figura 19b). No Atlântico Sudoeste foi observada uma anomalia de +3 m/s nas composições de vento zonal em 250 hPa, entre 40° e 50°S e 30°W (Figura 19 c). No Brasil, há anomalias positivas de PNMM em 20°-30°S e 40°W, da ordem de + 1 hPa (Figura 19a). Durante os eventos EEGM há anomalias negativas pontuais de precipitação na Bahia, no oeste da mesorregião do Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba, sudeste de Goiás, centro do Mato Grosso do Sul, sudeste de São Paulo e nordeste de Santa Catarina (Figura 19d).

No $\text{lag}=+1$ foi observado um fortalecimento do ramo norte e oeste do ASAS, tanto em superfície quanto em 500 hPa (Figuras 19e, 19f). Estas anomalias positivas estendem-se sobre as regiões Sul, Sudeste, parte do Centro-Oeste e Nordeste do Brasil. Foi verificado um enfraquecimento do jato subtropical em torno de 40°S e um fortalecimento do jato polar ao norte da Península Antártica (Figura 19g). Também há anomalias positivas de PNMM no Atlântico equatorial, localizadas entre 40°W e 20°E, da ordem de +1 hPa, com uma crista anômala em 500 hPa, observada nas composições de altura geopotencial (Figura 19f). Em relação à precipitação, há anomalias negativas em grande parte da região Nordeste, parte de Minas Gerais e São Paulo, de até -75 mm (Figura 19h).

Figura 19: Similar à Figura 18, mas para eventos EEGM no setor do MW no mês de fevereiro.



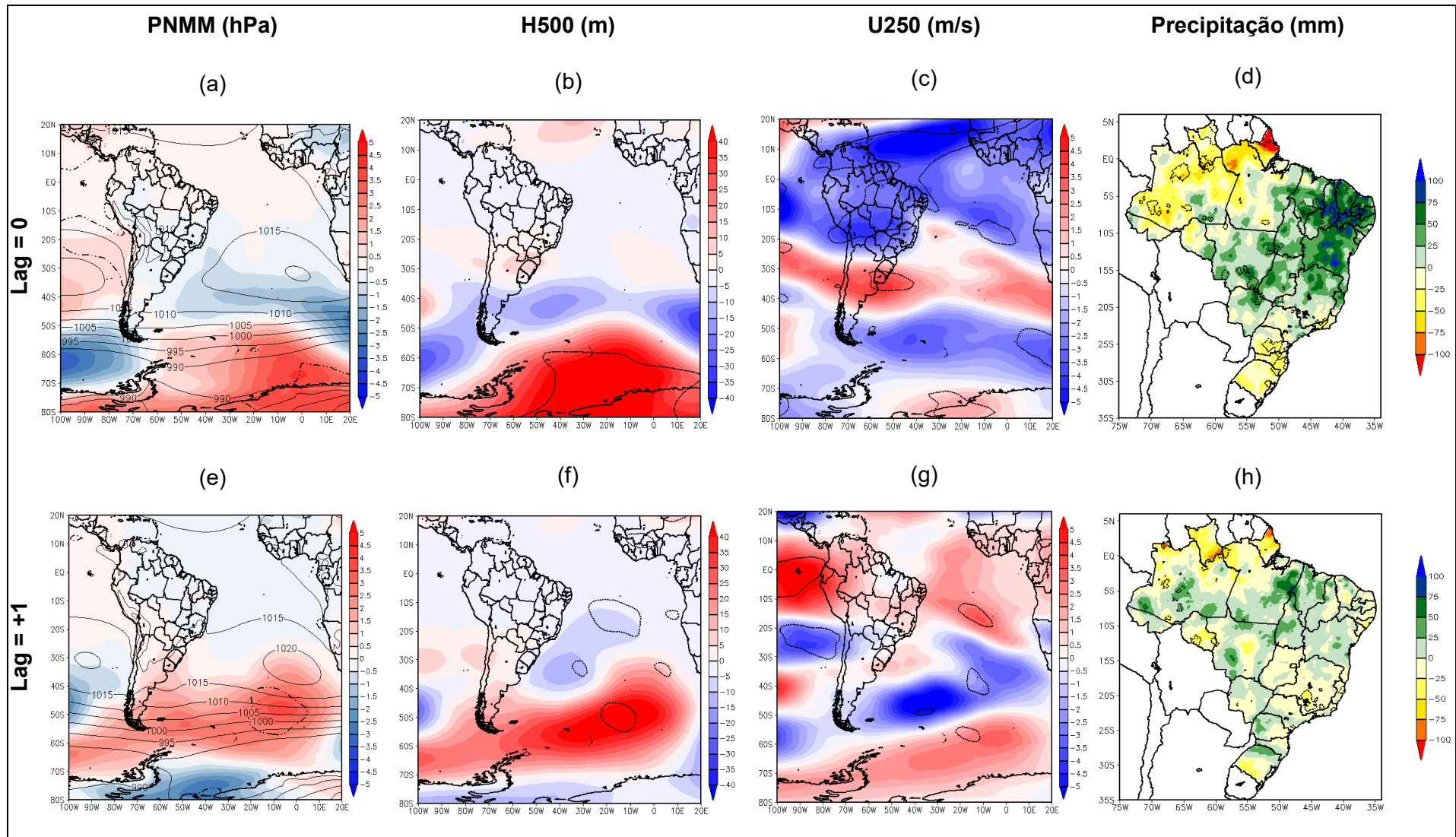
4.2 – Março: Circulação Atmosférica e Comportamento do ASAS

4.2.1 - Eventos ERGM no MW

Durante os eventos ERGM no mês de março foi verificado um fortalecimento do jato subtropical, enquanto o jato polar se encontra enfraquecido (Figura 20c). Sobre o MW foram observadas anomalias positivas de altura geopotencial em 500 hPa e de PNMM (Figuras 20a, 20b). Em termos de precipitação, no Brasil há anomalias positivas no Maranhão, Piauí, Pernambuco e Paraíba, de até +75 mm (Figura 20d). Por outro lado, no leste da região Sul do país há anomalias negativas de até -50 mm.

No lag=+1 foi observado um fortalecimento do ramo sudeste do ASAS entre 20°-30° W e 20°-40° S, da ordem de +3 hPa (Figura 20e). Em 500 hPa, o ASAS apresentou um enfraquecimento do ramo oeste e norte, da ordem de -40 m, enquanto os ramos leste e sul apresentam um fortalecimento de até +15 m (Figura 20f). Também foi verificado um fortalecimento do ramo sul do jato polar, enquanto o ramo norte apresentou um enfraquecimento (Figura 20g). A precipitação apresentou anomalias negativas apenas no sul de Minas Gerais, de até -25 mm (Figura 20h).

Figura 20: Similar à Figura 19, mas para eventos ERGM no setor do MW no mês de março.

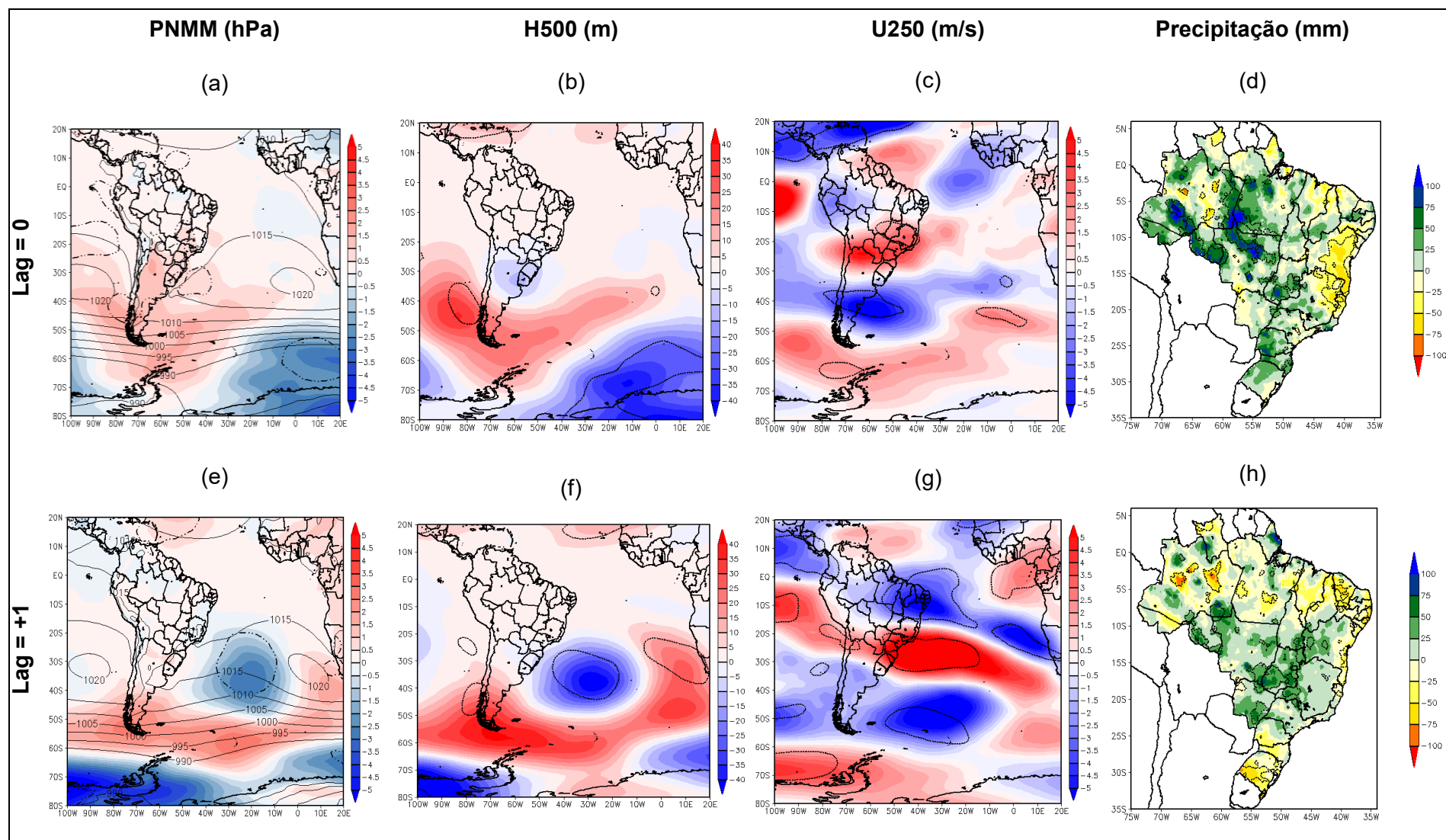


4.2.2 - Eventos EEGM no MW

Durante os eventos EEGM no MW em março foi observado um fortalecimento do ramo sudoeste do ASAS e de uma área pequena do ramo leste (Figura 21a). No MW há uma baixa PNMM anômala em superfície e em 500 hPa (Figura 21b). Nas anomalias de vento zonal em 250 hPa foi verificado um fortalecimento do jato polar e um enfraquecimento do jato subtropical no sul da América do Sul e Atlântico Sudoeste, com uma anomalia de até +5 m/s entre 30°S e 40°S (Figura 21c). As anomalias de precipitação foram negativas no nordeste de Minas Gerais, centro-norte do Espírito Santos e em grande parte da Bahia, com desvios de até -75 mm (Figura 21d). Já entre o sudoeste do Amazonas em direção à região Sudeste do Brasil há anomalias positivas de precipitação.

No lag=+1 foi observado um enfraquecimento do ramo oeste e centro do ASAS, tanto em superfície quanto em 500 hPa (Figuras 21a, 21b). Também foi verificada anomalia positiva de altura geopotencial em 500 hPa entre 10°-20°W no Atlântico Sul, de até -10 m. Nas anomalias de vento zonal em 250 hPa foi constatado um fortalecimento do ramo sul do jato polar, enquanto o ramo norte se encontra enfraquecimento (Figura 21g). Por outro lado, o jato subtropical se encontra fortalecido. As composições de precipitação apresentam anomalias positivas de até +75 mm em grande parte da região Centro-Oeste, norte de São Paulo, oeste de Minas Gerais, centro-oeste da Bahia, além de Rondônia e sudeste do Amazonas (Figura 21h). O padrão espacial de anomalias de precipitação é semelhante ao padrão de ZCAS, o que pode ser um indicativo de um fortalecimento da atividade da ZCAS até o mês de abril, quando se inicia a estação seca na região tropical do Brasil. Desta forma, sugere-se que a estação chuvosa persistir por mais tempo associada a eventos EEGM no MW.

Figura 21: Similar à Figura 19, mas para eventos EEGM no setor do MW no mês de março.



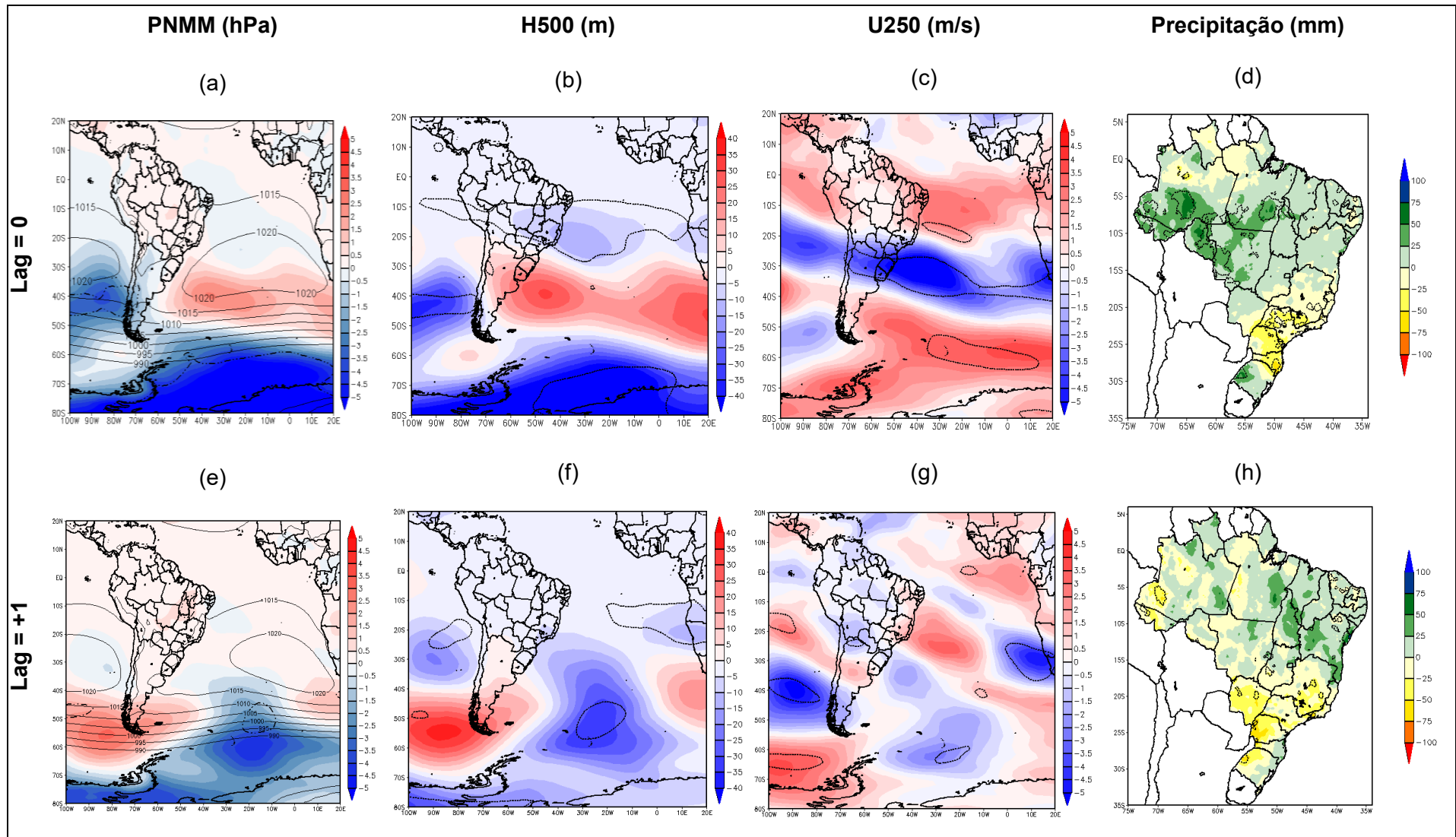
4.3 – Setembro: Circulação Atmosférica e Comportamento do ASAS

4.3.1 - Eventos ERGM no MW

Durante os eventos ERGM no MW em setembro foram observadas anomalias negativas de PNMM no MW (Figura 22a), com anomalias negativas de vento zonal em 250 hPa entre 30°-40°S, de até -5 m/s, o que indica um enfraquecimento do jato subtropical no Atlântico Sul (Figura 22c). O jato polar encontra-se fortalecido (Figura 22c). Além disso, foi observado um cavado entre 10°-30°S. Para a precipitação, há anomalias negativas no norte de São Paulo e Santa Catarina, de até -25 mm (Figura 22d). Nas regiões Norte e Centro Oeste, no sul do Amazonas e Pará, bem como Rondônia e Acre, além do norte do Mato Grosso, são encontradas anomalias positivas de precipitação de até +70 mm.

No lag=+1 foi encontrada uma anomalia negativa de PNMM e altura geopotencial em 500 hPa em 50°S da ordem de -3 hPa e -10 m, respectivamente (Figuras 22e, 22f). No centro-oeste do Atlântico Sul há uma anomalia de altura geopotencial em 500 hPa, localizada entre 10° e 20°S, da ordem de -15 m. No MW existe um enfraquecimento do jato polar (Figura 22g).

Figura 22: Similar à Figura 19, mas para eventos ERGM no setor do MW no mês de setembro.

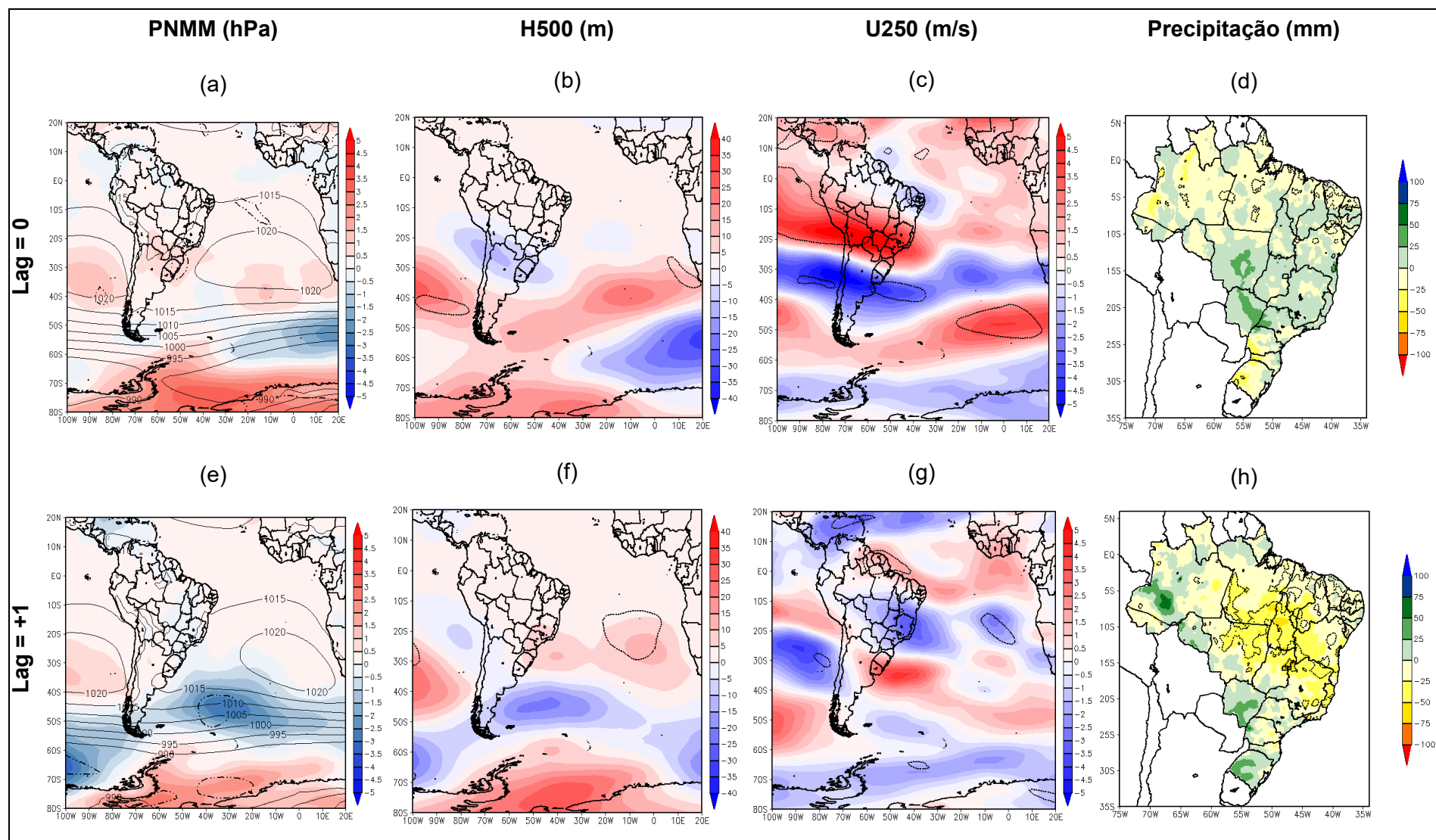


4.3.2 - Eventos EEGM no MW

Durante os eventos EEGM no mês de setembro foi observado um fortalecimento do ramo norte e oeste do ASAS (Figura 23a), bem como uma crista no ramo leste em 500 hPa (Figura 23b). O jato subtropical se encontra enfraquecido entre 30° e 40°S no Atlântico Sul, com anomalias de até de -4 m/s, e o jato polar fortalecido (Figura 23c). Na Figura 23d pode-se observar anomalias negativas de precipitação de até -25 mm em grande parte da Região Nordeste e parte da região Norte.

No lag=+1 foi constatado um enfraquecimento no ramo sudoeste do ASAS, como pode-se observar através das anomalias negativas de PNMM entre 40° e 50°S, de até -5 hPa (Figura 23e). Foi observada uma crista anômala no centro e no ramo norte do ASAS em 500 hPa, entre 15 e 25°S, com anomalias positivas da ordem de +10 m (Figura 23f). As anomalias de precipitação são negativas no norte de Minas Gerais e na região Nordeste do Brasil, de até -50 mm (Figura 23h). No norte de Goiás e Mato Grosso, bem como no sul do Pará e em todo Tocantins, são registradas anomalias negativas de precipitação de até -75 mm.

Figura 23: Similar à Figura 19, mas para eventos EEGM no setor do MW no mês de setembro.



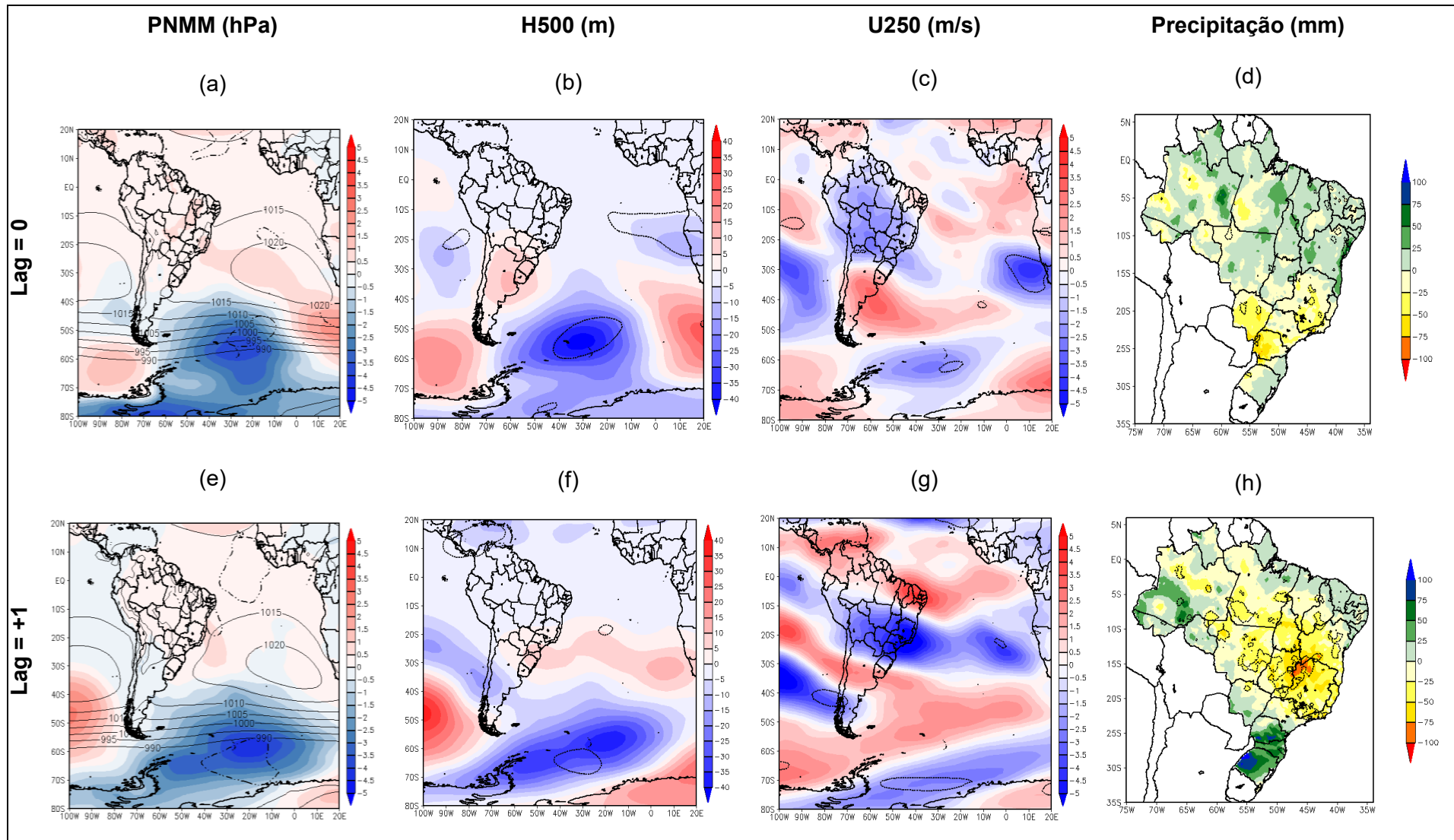
4.4 - Outubro: Circulação Atmosférica e Comportamento do ASAS

4.4.1 - Eventos ERGM no MW

Durante os eventos ERGM no MW em outubro foi observado um enfraquecimento do ramo sul e um fortalecimento do ramo norte do ASAS (Figura 24a), com anomalias positivas de PNMM da ordem de +0,5 hPa em 20°S. Os campos anômalos de altura geopotencial em 500 hPa também indicam um enfraquecimento do ramo sul e nordeste do ASAS, além de uma anomalia negativa de -15 m em 20°W (Figura 24b). O jato polar se encontra enfraquecido no sul do Atlântico Sul (Figura 24c). São observadas anomalias positivas de precipitação no litoral nordestino de até +50 mm (Figura 24c). Nos estados do Mato Grosso do Sul, Paraná e Minas Gerais são observadas anomalias negativas de precipitação de até -50 mm.

Já no lag=+1 é observado um fortalecimento do ramo noroeste do ASAS, enquanto o litoral da Bahia apresenta uma anomalia positiva de PNMM de até +1,5 hPa (Figura 24e). É observada uma baixa pressão anômala da superfície até 500 hPa sobre o MW. O ramo sul do jato polar, sobre o MW, se encontra enfraquecido (Figura 24g). As anomalias de precipitação entre o sul da região Norte e o leste da região Sudeste mostram um padrão noroeste-sudeste, com anomalias de até -75 mm no noroeste de Minas Gerais, Goiás e Rio de Janeiro (Figura 24h). Este comportamento pode indicar um enfraquecimento da ZCAS.

Figura 24: Similar à Figura 11, mas para eventos ERGM no setor do MW no mês de outubro.

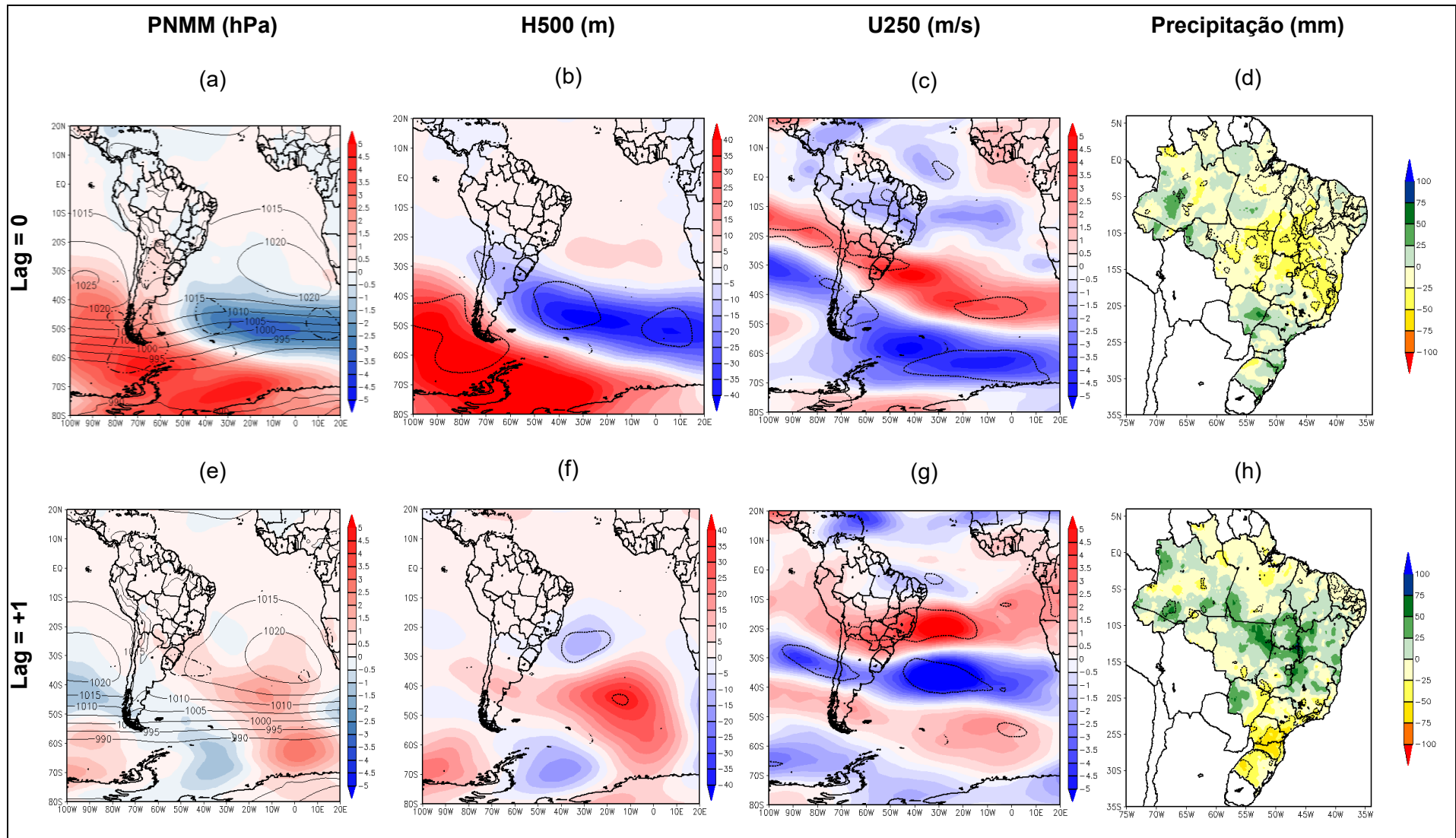


4.4.2 - Eventos EEGM no MW

Durante os eventos EEGM no mês de outubro é observado um enfraquecimento do ramo sudoeste e sudeste do ASAS, com uma anomalia negativa de PNMM de até -5 hPa entre 40°-50°W no Atlântico Sudoeste (Figura 25a). Esta anomalia se estende em 500 hPa, no campo de altura geopotencial, com desvios de até -30 m (Figura 25b). O jato polar se encontra enfraquecido, enquanto o jato subtropical está fortalecido, o qual se estende sobre a região Sul do Brasil (Figura 25c). As anomalias de precipitação mostram valores negativos de até -50 mm no nordeste de Minas Gerais, oeste da Bahia, Piauí e Maranhão (Figura 25d). Valores semelhantes também são observados em Goiás e Mato Grosso

No lag=+1 é observado um fortalecimento do ramo sudoeste e sudeste do ASAS, constatado através das anomalias positiva de PNMM entre 30°-40°S de até +1 hPa (Figura 25e). Em 500 hPa, as anomalias de altura geopotencial se encontram no ramo sul do ASAS, de até +40 m, e entre 20°-30°S, de até -15 m (Figura 25f). O jato subtropical se encontra enfraquecido em torno de 30°S no Atlântico Sul (Figura 25 g). Foram observadas anomalias negativas de precipitação nos estados do Rio Grande do Sul, Santa Catarina e São Paulo, de até -70 mm (Figura 25h).

Figura 25: Similar à Figura 11, mas para eventos EEGM no setor do MW no mês de outubro.

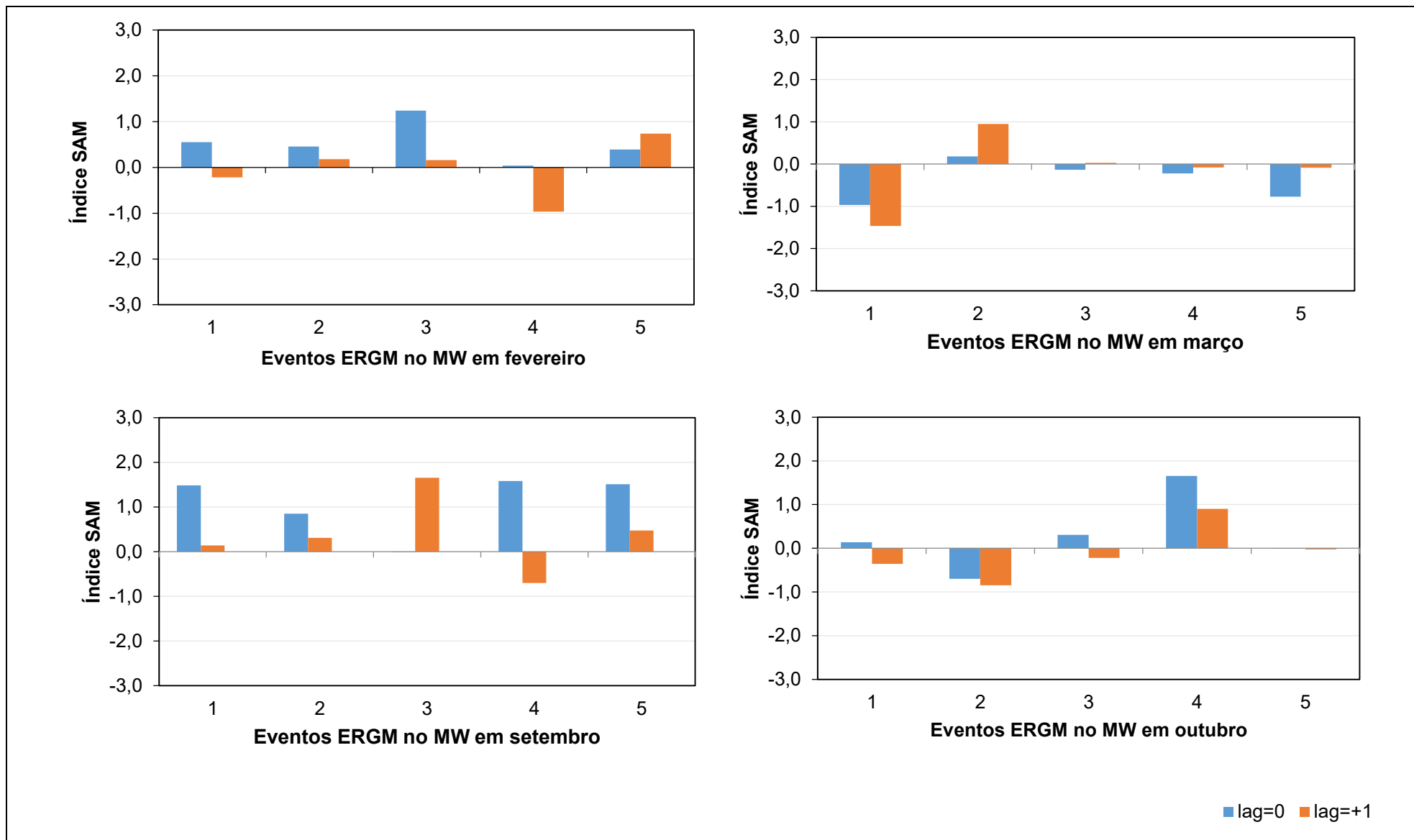


4.5 - Eventos extremos de gelo marinho no MW e SAM

Com base no índice SAM em comparação com os meses de eventos extremos de gelo marinho, foi gerada uma comparação entre o comportamento do índice durante o lag=0 e lag=+1. Os resultados foram condensados nas Figuras 26 e 27. De acordo com Raphael et al. (2010) e Parise et al. (2015), o SAM apresenta uma correlação positiva com eventos extremos de gelo marinho.

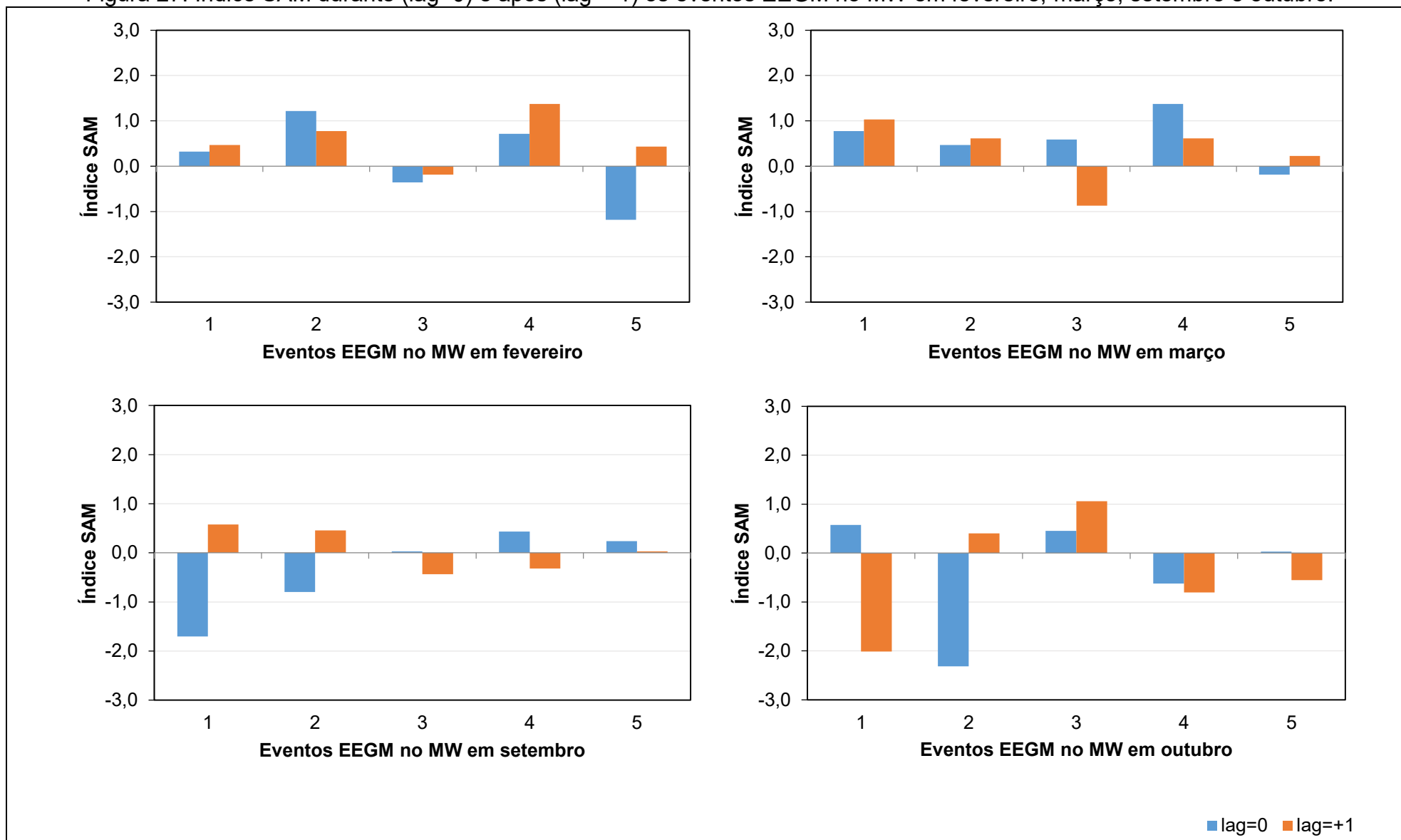
Entre os eventos ERGM (lag=0) e um mês após (lag=+1) foi observada uma redução na polaridade do índice SAM em fevereiro, com quatro casos; março, com três casos; setembro, com quatro casos; e outubro, com cinco casos (Figura 26). Entre os eventos ERGM (lag=0) e um mês após (lag=+1) foi observado um aumento na polaridade do índice SAM em: fevereiro, com quatro casos; março, com três casos; setembro, com dois casos; e outubro, com dois casos (Figura 27).

Figura 26: Índice SAM durante (lag=0) e após (lag=+1) os eventos ERGM no MW em fevereiro, março, setembro e outubro.



Fonte: CPC/NOAA (2018). Elaboração: SILVA (2018).

Figura 27: Índice SAM durante (lag=0) e após (lag=+1) os eventos EEGM no MW em fevereiro, março, setembro e outubro.



Fonte: CPC/NOAA (2018). Elaboração: SILVA (2018).

5. CONCLUSÕES

Neste estudo foi investigada a variabilidade do ASAS em eventos extremos de gelo marinho no MW, nos meses de fevereiro/março e setembro/outubro de 1980 a 2015, bem como a circulação atmosférica associada, os impactos na precipitação sobre o Brasil e a relação com o SAM.

Durante os eventos ERGM em fevereiro foi observada uma diminuição na precipitação na região norte do país durante o lag=0. No lag=+1 foi observado um enfraquecimento no ASAS, bem como um fortalecimento do jato subtropical e enfraquecimento do jato polar, resultando em anomalias negativas de precipitação sobre o Brasil. Nos eventos ERGM de março, no lag= 0 foi observado um aumento na PNMM no MW, enquanto um fortalecimento do jato subtropical foi registrado, bem como uma diminuição na precipitação da região Norte e Sul do país. No lag=+1 houve um fortalecimento do ASAS e diminuição na precipitação na região sudeste de Minas Gerais e na região Norte.

Durante os eventos ERGM em setembro foi observado um cavado no Atlântico Sul e uma diminuição na precipitação da região Sul e parte da região Sudeste do país. No lag=+1 é observado um enfraquecimento do ASAS, bem como uma diminuição na precipitação na região Sul e parte das regiões Centro-Oeste e Sudeste. No mês de outubro, durante os eventos de ERGM houve um enfraquecimento do ASAS e do jato polar, causando uma diminuição da chuva em Minas Gerais, Mato Grosso do Sul e Paraná. No lag=+1 é observado um enfraquecimento da precipitação com um padrão espacial semelhante à ZCAS.

Já durante os eventos de EEGM no mês de fevereiro foi observado um fortalecimento do ASAS e do jato polar, acompanhado de uma diminuição da precipitação na região Centro-Oeste. No lag=+1 foi observado o fortalecimento do ASAS e do jato polar, desta vez acompanhados por um enfraquecimento do jato subtropical e uma diminuição da PNMM no MW, causando um aumento da precipitação nas regiões Norte, Centro Oeste e no Paraná. Nos eventos EEGM do mês de março, foi observado um fortalecimento do ASAS e do jato polar, em conjunto com o enfraquecimento do jato subtropical. Juntamente com essas anomalias é observado um aumento intenso da precipitação nas regiões Norte e

Centro Oeste. O lag=+1 apresentou um fortalecimento do jato polar e um fortalecimento da precipitação com padrão espacial semelhante à ZCAS.

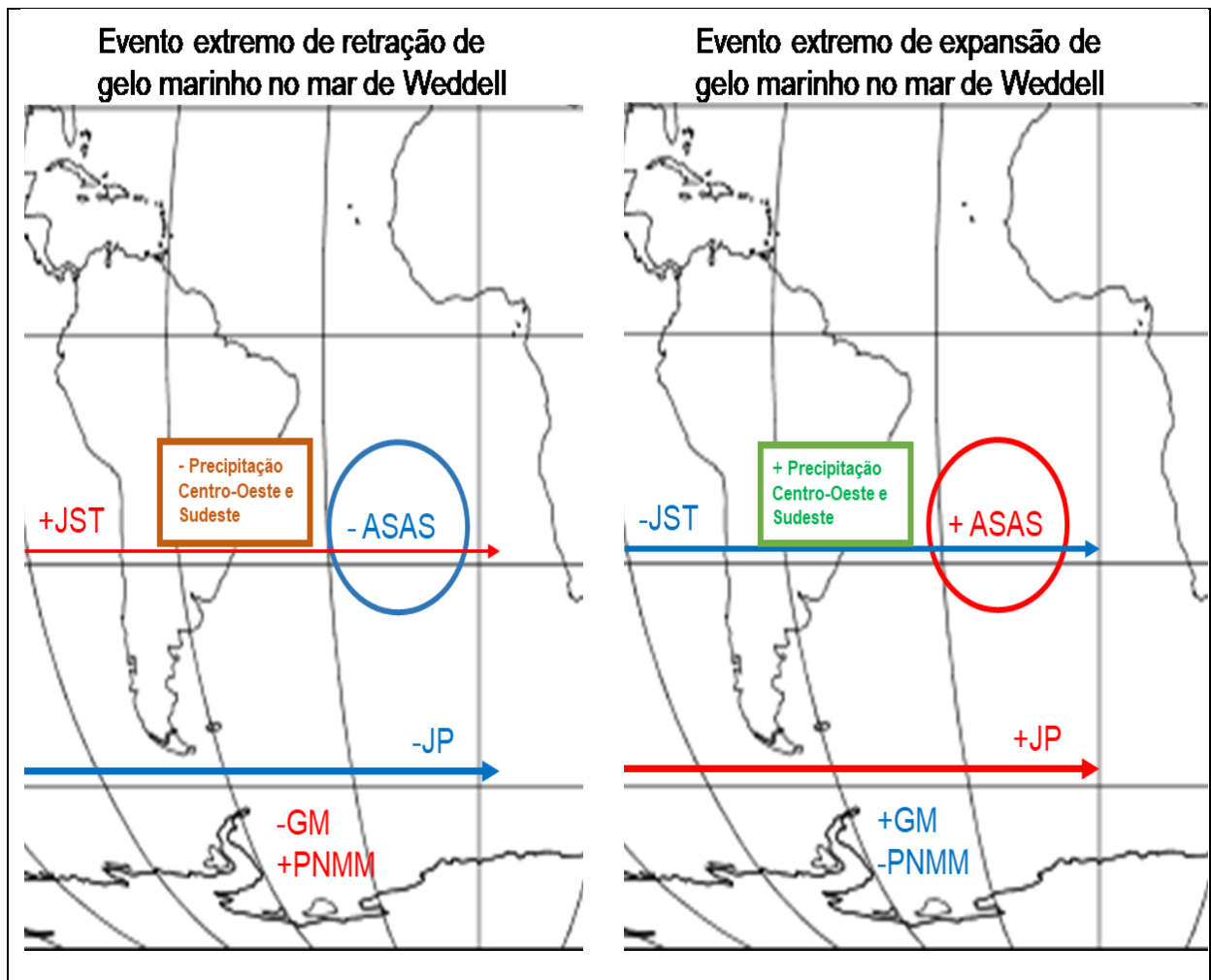
Na ocorrência dos eventos EEGM no mês de setembro, houve um fortalecimento do ASAS e do jato polar, acompanhado por um enfraquecimento do jato subtropical. Durante o lag=+1 é observado um enfraquecimento da região Centro-Oeste, Norte, Nordeste e Sudeste. Já no lag=+1 em relação aos eventos EEGM no mês de outubro é observado um enfraquecimento do jato subtropical e um fortalecimento do ASAS, enquanto existe um aumento na precipitação na região Centro-Oeste e sul do Amazonas.

Através destes resultados conclui-se que a hipótese levantada para o comportamento anômalo da atmosfera durante os eventos extremos de gelo marinho no MW é válida para os meses de fevereiro/março e setembro/outubro, bem como sua influência na precipitação durante a estação chuvosa no Brasil. Durante os ERGM, foi observado o comportamento esperado em: Fevereiro (lag=+1), Setembro (lag=0 e lag=+1) e Outubro (lag=0 e lag=+1). Já durante os EEGM, a hipótese formulada foi observada em: Fevereiro (lag=0 e lag=+1), Março (lag=0) e Outubro (lag=+1).

Desta forma, os eventos ERGM no MW causariam um possível enfraquecimento do ASAS e do jato polar, enquanto fortaleceria o jato subtropical e a PNMM no MW. Isto causaria uma consequente diminuição na precipitação durante a estação chuvosa na região tropical do Brasil, indicando uma possível supressão da atividade da ZCAS (Figura 28). As condições opostas são observadas durante eventos EEGM no MW.

Já para a relação entre os eventos extremos de gelo marinho no MW e a polaridade do índice SAM, foi constatada a relação levantada por Raphael et al. (2010) e Parise et al. (2015) nos meses de fevereiro (eventos ERGM e EEGM), março (eventos EEGM), setembro (eventos ERGM) e outubro (eventos ERGM). Como podemos ver, eventos ERGM no MW tem uma maior influência no sinal do SAM, tendendo para a fase negativa durante os meses de fevereiro, setembro e outubro. Esta relação é importante devido a influência do SAM na circulação atmosférica e propagação de sistemas transientes, conforme já foi constatado por Reboita et al. (2009) e Cardozo et al. (2015).

Figura 28: Representação visual dos resultados encontrados



Elaboração: Silva e Carpenedo (2018).

As anomalias de precipitação registradas indicam que o gelo marinho possui um papel indireto sobre a diminuição ou aumento do volume de precipitação que ocorre no Brasil. Através de sua influência no ASAS, a capacidade de um evento extremo de gelo marinho no mar de Weddell deve ser considerada no acompanhamento e previsão em estudos que fornecem suporte para o planejamento e gestão de recursos hídricos, demanda energética, defesa civil e também para o setor agrícola. Este é um estudo que indica muitas possibilidades de conexão entre o gelo marinho antártico e a estação chuvosa brasileira, possuindo portanto grande relevância para trabalhos sobre as conexões atmosféricas entre a Antártica e regiões tropicais e subtropicais.

5.1 - Sugestões para trabalhos futuros

Após o estudo aqui desenvolvido, ficam questionamentos em aberto e possibilidades a serem seguidas em trabalhos futuros:

- Análise dos eventos extremos de gelo marinho no MW em todos os meses do ano, bem como sua influência na circulação atmosférica;
- Análise do posicionamento anômalo do ASAS sobre os regimes de precipitação na América do Sul em todos os meses do ano;
- Análise da contribuição dos eventos extremos de gelo marinho de todos os setores antárticos para mudanças no índice SAM em todos os meses do ano.

REFERÊNCIAS

ABRAM, Nerilie J. et al. Evolution of the Southern Annular Mode during the past millennium. **Nature Climate Change**, v. 4, n. 7, p. 564, 2014.

AGÊNCIA BRASIL, EACF, 2017. Disponível em: <<http://www.brasil.gov.br/noticias/educacao-e-ciencia/2017/01/estacao-antartica-comandante-ferraz-comeca-a-ser-reconstruida>> Acesso em: 25 de novembro de 2018

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). Atlas Brasil: abastecimento urbano de água. Brasília: ANA, 2010. Disponível em: <http://atlas.ana.gov.br/Atlas/forms/Home.aspx>. Acesso em: 25 de novembro de 2018.

AHRENS, C. Donald. **Meteorology today: an introduction to weather, climate, and the environment**. Cengage Learning, 2012.

AQUINO, F. E. e SETZER, A. O clima na Amazônia Azul. In: SIMÕES, Carlos F.; CHAVES, Paulo de Tarso (ed.) **Geografia: ensino fundamental e médio: O mar no espaço geográfico brasileiro**. Brasília: Ministério da Educação, Secretaria da Educação Básica, p. 226-230. (Coleção Explorando o Ensino, v. 8). 2005

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, Florianópolis: Sociedade Brasileira de Meteorologia, 2006.

ASNANI G.C. **Tropical Meteorology**. Pune, India: Nobel Printers, 1993.

BARRY, Roger G.; CHORLEY, Richard J. **Atmosfera, tempo e clima**. Bookman Editora, 2009.

BASTOS, CAMILLA C.; FERREIRA, NELSON J. Análise climatológica da alta subtropical do Atlântico Sul. **CEP**, v. 12220, p. 110, 2000.

BERRISFORD, Paul et al. The ERA-interim archive. **ERA report series**, n. 1, p. 1-16, 2009.

BIAZETO, B., SILVA DIA, M. A. F. e DIAS, P. L. Impacto da precipitação no ciclo de assimilação em modelos de mesoescala. In: **Congresso Brasileiro de Meteorologia**, 14. 2006, Florianópolis: Sociedade Brasileira de Meteorologia. 1 CD-ROM. 2009

BOMBARDI, Rodrigo José et al. Variabilidade do regime de monções sobre o Brasil: o clima presente e projeções para um cenário com 2xCO₂ usando o modelo MIROC. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 23, n. 1, p. 58-72, 2008.

BRASIL, Resolução da Assembleia da República nº 10/2007, de 07 de Março de 2007. Recomenda ao Governo que assine o Tratado da Antártida de 1961. **Diário Oficial da União**. Brasília, DF, 7 mar. 2007.

BROMWICH, D. H.; PARISH, T. R. Meteorology of the Antarctic. In **Meteorology of the Southern Hemisphere**, edited by D.J. Karoly and D.G. Vincent, Meteorological Monographs, v. 27, number 49. American Meteorological Society, Boston, p. 175-200. 1998

CARDOZO, Amanda Balbino et al. CLIMATOLOGIA DE FRENTES FRIAS NA AMÉRICA DO SUL E SUA RELAÇÃO COM O MODO ANULAR SUL (CLIMATOLOGY OF COLD FRONTS OVER SOUTH AMERICA AND ITS RELATION WITH THE SOUTHERN ANNULAR MODE). **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 17, 2015.

CARPENEDO, Camila Bertoletti. **Interações entre os ciclones extratropicais e a variabilidade extrema do gelo marinho nos mares de Bellingshausen-Amundsen e no mar de Weddell, Antártica**. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo, 2012.

CARPENEDO, Camila Bertoletti; AMBRIZZI, Tércio. Cells of Meridional Circulation During the Extreme Events of Antarctic Sea Ice. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 31, n. 3, p. 251-261, 2016.

CARPENEDO, C. B. **Bloqueios atmosféricos associados à variabilidade extrema do gelo marinho antártico e impactos na América do Sul**. Tese (Doutorado em Meteorologia) – IAG/USP. São Paulo, 2017.

CARVALHO, Leila MV; JONES, Charles; AMBRIZZI, Tércio. Opposite phases of the Antarctic Oscillation and relationships with intraseasonal to interannual activity in the tropics during the austral summer. **Journal of climate**, v. 18, n. 5, p. 702-718, 2005.

CAVALCANTI, IFA; AMBRIZZI, T. Teleconexões e suas influências no Brasil. **Iracema Fonseca de Albuquerque Cavalcanti; Nelson Jesus Ferreira; Maria Gertrudes Alvarez Justi da Silva**, p. 317-335, 2009.

CAVALIERI, Donald J. et al. Deriving long-term time series of sea ice cover from satellite passive-microwave multisensor data sets. **Journal of Geophysical Research: Oceans**, v. 104, n. C7, p. 15803-15814, 1999.

CAVALIERI, D. J.; PARKINSON, C. L. Antarctic sea ice variability and trends, 1979–2006, **Geophysical Research Letters**, 113, C07004, doi:10.1029/2007JC004564. 2008

CHERCHI, Annalisa et al. The response of subtropical highs to climate change. **Current Climate Change Reports**, p. 1-12, 2018.

CHRISTOPHERSON, W. Robert; BIRKELAND, Ginger. **Geosystems: An Introduction to Physical Geography**: [Julien Moreau: editing the questions of each chapter of the book]. Pearson Education Limited, 2015.

CIA. **The World Factbook**. Disponível em: <https://www.cia.gov/library/publications/the-world-factbook>, Acesso em: 01 de dezembro de 2018.

CRESPO, Antônio Arnot. **Estatística fácil**. Editora Saraiva, 2017.

CPC/NOAA. Disponível em: <https://www.cpc.ncep.noaa.gov/> Acesso em: 25 de novembro de 2018

CUPOLILLO, Fulvio et al. Períodos de estiagem durante a estação chuvosa no Estado de Minas Gerais: espacialização e aspectos dinâmicos relacionados. 1997.

DE MAGALHÃES NETO, Newton et al. A multivariate analysis of Antarctic sea ice since 1979. **Climate dynamics**, v. 38, n. 5-6, p. 1115-1128, 2012.

DEE, Dick P. et al. The ERA-Interim reanalysis: ConFiguration and performance of the data assimilation system. **Quarterly Journal of the royal meteorological society**, v. 137, n. 656, p. 553-597, 2011.

DEGOLA, T. S. D. Impactos e variabilidade do Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul sobre o Brasil no clima presente e em cenários futuros. **Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo**, p. 91, 2013.

DE LIMA, Marley Cavalcante. VARIABILIDADE DA PRECIPITAÇÃO NO LITORAL LESTE DA REGIÃO NORDESTE DO BRASIL. 1991.

DOTY, Brian. The grid analysis and display system. **GRADS Manual**, v. 10, p. 148, 1995.

DUGAM, S. S.; KAKADE, S. B. Antarctica sea-ice and monsoon variability. **Indian Journal of Radio and Space Physics**, v. 33, n. 5, p. 306-309, 2004.

ECMWF, Era-Interim. Disponível em: <https://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets/archive-datasets/reanalysis-datasets/era-interim> Acesso em: 25 de novembro de 2018

ENCYCLOPAEDIA BRITANNICA, The Editors of. **Weddel Sea**. Encyclopaedia Britannica. Encyclopaedia Britannica, inc. 2018.

FERREIRA, E. A.; MELO, M. L.; ALMEIDA, J. M. V.; BEZERRA, W. A.; REINKE, C. K.; SEABRA, M. S. Estudo de Caso: ConFiguração da atmosfera na ocorrência de baixo índice de umidade relativa do ar no Centro-Oeste do Brasil. In: XIV CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 2006. Anais... Florianópolis: XIV CBMet, 2006.

FOGT, Ryan L. et al. Historical SAM variability. Part II: Twentieth-century variability and trends from reconstructions, observations, and the IPCC AR4 models. **Journal of Climate**, v. 22, n. 20, p. 5346-5365, 2009.

FORD, A.B. **Antarctica**. Encyclopaedia Britannica. Encyclopaedia Britannica, inc. 2018.

FRETWELL, P. et al. Bedmap2: improved ice bed, surface and thickness datasets for Antarctica. 2013.

GAN, M. A.; KOUSKY, V. E.; ROUPELEWSKI, C. F. The South America Monsoon Rainfall over West-Central Brazil. **Journal of Climate**, v. 17, n. 1, p. 47-66, 2004.

GAN, Manoel Alonso; RODRIGUES, L. R.; RAO, V. B. Monção na America do Sul. **Chapter**, v. 19, p. 297-312, 2009.

GARCIA, Sâmia Regina. Variabilidade do sistema de monção da América do Sul: Relações com a oscilação decadal do Pacífico. **Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais–INPE**, 2006.

GILLILAND, Joshua M.; KEIM, Barry D. Position of the South Atlantic Anticyclone and its impact on surface conditions across Brazil. **Journal of Applied Meteorology and Climatology**, v. 57, n. 3, p. 535-553, 2018.

GRIMM, Circulação Geral da Atmosfera, 1995. Disponível em: <<http://fisica.ufpr.br/grimm/aposmeteo/>> Acesso em: 25 de novembro de 2018

GONG, Daoyi; WANG, Shaowu. Definition of Antarctic oscillation index. **Geophysical research letters**, v. 26, n. 4, p. 459-462, 1999.

HALL, Alex; VISBECK, Martin. Synchronous variability in the Southern Hemisphere atmosphere, sea ice, and ocean resulting from the annular mode. **Journal of Climate**, v. 15, n. 21, p. 3043-3057, 2002.

HARTMANN, Dennis L. **Global physical climatology**. Newnes, 2015.

HASTENRATH, S. Climate and Circulation of the Tropics. D. Reidel, Dordrecht, 455 p. 1985.

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

HESSL, Amy et al. Reconstructions of the southern annular mode (SAM) during the last millennium. **Progress in Physical Geography**, v. 41, n. 6, p. 834-849, 2017.

IBGE. **Censo Demográfico**. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2010. v. 15, 2010.

IPCC, 2014: climate change 2014: synthesis report. **Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the intergovernmental panel on Climate Change**. IPCC, Geneva, Switzerland, v. 151, 2014.

ITO, Ester Regina K. **Um estudo climatológico do anticiclone subtropical do Atlântico Sul e sua possível influência em sistemas frontais**. Tese de Doutorado. 1999.

KING, J. C.; TURNER, J. **Antarctic Meteorology and Climatology**. Cambridge Atmospheric and Space Sciences Series. Cambridge: Cambridge University Press, UK, v. 409, 1997.

KINTER III, James L. **The Grid Analysis and Display System (GRADS): A practical tool for Earth science visualization**. 1993.

LEE, Sang-Ki et al. Interhemispheric influence of the northern summer monsoons on southern subtropical anticyclones. **Journal of Climate**, v. 26, n. 24, p. 10193-10204, 2013.

LI, Wenhong et al. Intensification of Northern Hemisphere subtropical highs in a warming climate. **Nature Geoscience**, v. 5, n. 11, p. 830, 2012.

LIEBMANN, Brant et al. An observed trend in central South American precipitation. **Journal of Climate**, v. 17, n. 22, p. 4357-4367, 2004.

LIU, Yimin; WU, Guoxiong; REN, Rongcai. Relationship between the subtropical anticyclone and diabatic heating. **Journal of Climate**, v. 17, n. 4, p. 682-698, 2004.

LÜBBECKE, Joke F. et al. On the connection between Benguela and equatorial Atlantic Niños and the role of the South Atlantic Anticyclone. **Journal of Geophysical Research: Oceans**, v. 115, n. C9, 2010.

LÜBBECKE, Joke F. et al. Variability in the South Atlantic anticyclone and the Atlantic Niño mode. **Journal of Climate**, v. 27, n. 21, p. 8135-8150, 2014.

DE MAGALHÃES NETO, Newton et al. A multivariate analysis of Antarctic sea ice since 1979. **Climate dynamics**, v. 38, n. 5-6, p. 1115-1128, 2012.

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

MO, Kingtse C. Relationships between low-frequency variability in the Southern Hemisphere and sea surface temperature anomalies. **Journal of Climate**, v. 13, n. 20, p. 3599-3610, 2000.

MORAN J.M, MORGAN, M.D. **Meteorology: The atmosphere and the science of weather**. Minneapolis: Burgess Publishing, 1986.

NASA, HALE, Icebridge, 2012 Disponível em: <https://www.nasa.gov/mission_pages/icebridge/news/fall12/index.html>. Acesso em: 25 de novembro de 2018.

NSIDC. All about Sea Ice. Disponível em: <<https://nsidc.org/cryosphere/seaice/index.html>> Acesso em: 01 de dezembro de 2018.

PADILHA REINKE, C. K.; SATYAMURTY, P. Um Caso de Estagnação de Ar Quente e Seco sobre a Região Central do Brasil. In: XIII CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 2004, Fortaleza. Anais... Fortaleza, 2004.

PAIVA, Célia Maria. **Determinação das datas de início e fim da estação chuvosa e da ocorrência de veranico na Bacia do Rio Doce**. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Viçosa, 1997.

PARISE, Claudia K. et al. The Influence of Sea Ice Dynamics on the Climate Sensitivity and Memory to Increased Antarctic Sea Ice. **Journal of Climate**, v. 28, n. 24, p. 9642-9668, 2015.

PARKINSON, Claire L. Southern Ocean sea ice and its wider linkages: insights revealed from models and observations. **Antarctic Science**, v. 16, n. 4, p. 387-400, 2004.

PRABHU, Amita et al. Connection between Antarctic sea-ice extent and Indian summer monsoon rainfall. **International Journal of Remote Sensing**, v. 30, n. 13, p. 3485-3494, 2009.

PRATES, J. E. **Controles associados à distribuição espacial de precipitação no verão em Minas Gerais: aspectos fisiográficos e meteorológicos**. 1994. 160 f. 1994. Tese de Doutorado. Tese (Doutorado em Ciências Atmosféricas) – Universidade de São Paulo, São Paulo. Geografias, 1999.

RAMAGE C.S. **Monsoon meteorology**. New York: Academic Press. 1971.

RAPHAEL, M. N.; HOBBS, W.; WAINER, I. The effect of Antarctic sea ice on the Southern Hemisphere atmosphere during the southern summer. **Climate dynamics**, v. 36, n. 7-8, p. 1403-1417, 2010.

REBOITA, Michelle Simões et al. Entendendo o Tempo e o Clima na América do Sul. 2012.

REBOITA, Michelle Simões et al. Regimes de precipitação na América do Sul: uma revisão bibliográfica. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 25, n. 2, 2010.

REBOITA, Michelle Simões; AMBRIZZI, Tércio; ROCHA, Rosmeri Porfírio da. Relationship between the southern annular mode and southern hemisphere atmospheric systems. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 24, n. 1, p. 48-55, 2009.

RICHTER, Ingo; MECHOSO, Carlos R.; ROBERTSON, Andrew W. What determines the position and intensity of the South Atlantic anticyclone in austral winter?—An AGCM study. **Journal of Climate**, v. 21, n. 2, p. 214-229, 2008.

RODWELL, Mark J.; HOSKINS, Brian J. Subtropical anticyclones and summer monsoons. **Journal of Climate**, v. 14, n. 15, p. 3192-3211, 2001.

SEAGER, Richard et al. Air–sea interaction and the seasonal cycle of the subtropical anticyclones. **Journal of climate**, v. 16, n. 12, p. 1948-1966, 2003.

SILVA, R.C. e CARPENEDO, C.B. Revisão Bibliográfica e Análise Climatológica da influência do Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul sobre a América do Sul. 2017. In: XXª SEMANA ACADÊMICA DE GEOGRAFIA DA UFU. **Anais...** Uberlândia, 2017.

SILVA, Viviane; KOUSKY, Vernon E. **05 The South American Monsoon System: Climatology and Variability**. InTech, 2012.

SILVESTRI, Gabriel E.; VERA, Carolina S. Antarctic Oscillation signal on precipitation anomalies over southeastern South America. **Geophysical Research Letters**, v. 30, n. 21, 2003.

SIMÕES, JEFFERSON C. Glossário da língua portuguesa da neve, do gelo e termos correlatos. **Pesquisa Antártica Brasileira**, v. 4, n. 119-154, 2004.

SUN, Xiaoming; COOK, Kerry H.; VIZY, Edward K. The South Atlantic subtropical high: Climatology and interannual variability. **Journal of Climate**, v. 30, n. 9, p. 3279-3296, 2017.

TALJAARD, J. J. Synoptic meteorology of the Southern Hemisphere. Meteorology of the Southern Hemisphere, Meteorology. Monography, N°. 35, **American Meteorological Society**, 139–211. 1972

TANG, Qihong; ZHANG, Xuejun; FRANCIS, Jennifer A. Extreme summer weather in northern mid-latitudes linked to a vanishing cryosphere. **Nature Climate Change**, v. 4, n. 1, p. 45, 2014.

TEISSERENC DE BORT, L. P. Etude sur l'hiver de 1879–80 et recherches sur l'influence de la position des grands centres d'action de l'atmosphère dans les hivers anormaux. **Ann. de la soc. Météor. de France**, v. 31, p. 70-79, 1883.

THOMAS, David N.; DIECKMANN, Gerhard S. (Ed.). **Sea ice: an introduction to its physics, chemistry, biology and geology**. John Wiley & Sons, 2008.

THOMPSON, David WJ; WALLACE, John M. Annular modes in the extratropical circulation. Part I: Month-to-month variability. **Journal of climate**, v. 13, n. 5, p. 1000-1016, 2000.

TREATY, Antarctic. Dec. 1, 1959, 12 UST 794. LA. S, n. 4780, p. 402. 1959

WADHAMS, P. **Ice in the ocean**. Amsterdam: Gordon and Breach Science Publishers. 351 p. 2000.

WALLACE, John M.; HOBBS, Peter V. **Atmospheric science: an introductory survey**. Elsevier, 2006.

WHITWORTH III, T. The Antarctic circumpolar current. **Oceanus**, v. 31, n. 2, p. 53-58, 1988.

WILKS, Daniel S. **Statistical Methods in the Atmospheric Sciences (International Geophysics Series; V. 91)**. Academic Press, 2006.

XAVIER, A. C. An update of Xavier, King and Scanlon (2016) daily precipitation gridded data set for the Brazil. In: **Proceedings of the 18th Brazilian Symposium on Remote Sensing, Santos, São Paulo, Brazil**. 2017.

YUAN, Xiaojun; LI, Cuihua. Climate modes in southern high latitudes and their impacts on Antarctic sea ice. **Journal of Geophysical Research: Oceans**, v. 113, n. C6, 2008.

ZHOU, Jiayu; LAU, K.-M. Principal modes of interannual and decadal variability of summer rainfall over South America. **International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 21, n. 13, p. 1623-1644, 2001.