



ISSN:1984-2295

Revista Brasileira de Geografia Física

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



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

Fábio Guimarães Oliva¹, Fernanda Cerqueira Vasconcellos², Telma Mendes da Silva³, Renan Martins Pizzochero⁴

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

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

RESUMO

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

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

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

ABSTRACT

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

extents. The correlations between the SAM and the sea ice extent are negative and between AMM and ASG with the sea ice extent are positive. These results are coherent with the results presented in the composite maps and the boxplots charts. Keywords: Teleconnection patterns, climate variability, antarctic sea ice, Weddell Sea.

Introdução

Conexões climáticas entre a variabilidade do gelo marinho antártico, o clima de diversas regiões da América do Sul e a circulação atmosférica extratropical têm sido amplamente investigadas nas últimas décadas, em decorrência da importância da Antártica e do gelo marinho no equilíbrio do sistema climático global e no controle da circulação atmosférica do Hemisfério Sul (Lefebvre e Goosse, 2005; Carvalho et al., 2005; Reboita et al., 2009; Silvestri e Vera, 2009; Oliva e Justi da Silva, 2011; Aquino, 2012; Pezza et al., 2012; Carpenedo e Ambrizzi, 2016).

O gelo marinho antártico exerce grande impacto no clima do Hemisfério Sul (Raphael et al., 2011; Carpenedo e Ambrizzi, 2016), uma vez que a atmosfera terrestre funciona como uma máquina de calor, caracterizada pelo aquecimento excessivo nos trópicos e um resfriamento nas altas latitudes. A Antártica representa um grande sorvedouro de calor para o planeta e para o Hemisfério Sul, exercendo controle sobre a circulação atmosférica nas médias e nas altas latitudes. É consenso entre pesquisadores que a criosfera modula o sistema climático global, sendo o continente Antártico e o gelo marinho fundamentais para o balanço de energia que influencia muitos processos meteorológicos.

Diversos autores (Renwick, 2001; Hall e Visbeck, 2002; Raphael et al., 2011; Lima e Carvalho, 2017; Comiso et al., 2017) mostraram que a interação entre a criosfera e a atmosfera é complexa e que os estudos merecem aprofundamento, devido à sua contribuição para melhor entendimento das particularidades do clima antártico e do gelo marinho em suas interações com a circulação atmosférica.

O gelo marinho que circunda a Antártica mostra grande variação entre sua concentração mínima e máxima anual. De acordo com Cavalieri e Parkinson (2008), os meses que representam estes extremos são fevereiro e setembro, com uma média climatológica de 2.500.000 km² a 3.800.000 km² de concentração em fevereiro e de 17.500.000 km² a 18.900.000 km² em setembro. No mês de maior concentração, em setembro, a cobertura de gelo marinho supera a do próprio continente antártico, que possui aproximadamente 14.000.000 km² (Wadhams, 2000). Diferentemente da porção oriental do Oceano Austral, onde a borda do

continente antártico alcança latitudes mais ao norte, o gelo marinho no Mar de Weddell (MW) é presente inclusive nos meses mais quentes. No entanto, a diferença para os meses mais frios ainda é considerável. Segundo Riffenburgh (2007), a significativa presença de gelo marinho no verão no MW em relação a outros setores deve-se à uma circulação ciclônica climatológica definida como Giro de Weddell, de modo que à leste da Península Antártica (setor MW) ocorra convergência de gelo marinho em função do transporte de Ekman.

O setor MW é o que possui a maior cobertura de gelo marinho. O período médio de congelamento entre a mínima e a máxima cobertura é de 213 dias e o período médio de derretimento entre a máxima e a mínima cobertura é de 152 dias. A variabilidade interanual de extensão de gelo marinho é evidente nos períodos de mínimos e máximos anuais. O mês de fevereiro oscilou, no período 1979-2013, entre 770.000 km² em 1999 e 2.070.000 km² em 2012. No mês de setembro, a variação foi de 5.890.000 km² em 1990 a 7.780.000 km² em 1980 (Carpenedo, 2017).

De acordo com Raphael et al. (2011), a variação da extensão de gelo marinho antártico possui potencial para afetar as células de circulação atmosférica da superfície até os níveis médios da troposfera, uma vez que a borda do gelo marinho está localizada em uma região muito sensível, sob a Frente Polar Antártica. Outros trabalhos prévios têm destacado a variabilidade espacial e temporal da extensão do gelo marinho antártico com padrões de variabilidade climática, particularmente o Modo Anular do Sul (*Southern Annular Mode* - SAM) e o El Niño-Oscilação Sul (ENOS) (Fogt e Bromwich, 2006; Pezza et al., 2012; Clem e Fogt, 2013; Clem et al., 2016; Reboita et al., 2019; Fogt e Marshall, 2020).

O SAM é o principal modo de variabilidade climática nas latitudes extratropicais no Hemisfério Sul, sendo caracterizado por uma anomalia no campo de pressão, entre regiões de latitudes médias e latitudes polares, indicando um padrão "gangorra" norte-sul de massa atmosférica (Thompson e Wallace, 2000). Alguns estudos têm mostrado o papel do SAM na influência e impactos sobre o clima de diversas regiões do Hemisfério Sul (Silvestri e Vera, 2003; Gillett et al., 2006; Pezza et al., 2008; Oliva e Justi da Silva, 2011; Vasconcellos et al., 2019; Fogt e Marshall, 2020). Outros trabalhos (e.g., Pezza et al., 2012)

estabeleceram relações entre o SAM e o gelo marinho antártico, mostrando que estas duas variáveis estão correlacionadas em algumas regiões, com destaque para o Mar de Bellingshausen e oeste do MW, setor do Oceano Índico e Pacífico Sul. Nestes casos, as correlações são positivas para todas as áreas, com exceção do Mar de Bellingshausen e oeste do MW onde as correlações são negativas.

Outro padrão de variabilidade climática importante, mas que se estabelece nos trópicos refere-se ao Modo Meridional do Atlântico (*Atlantic Meridional Mode* - AMM). Este padrão envolve flutuações interanuais e decadais do gradiente inter-hemisférico de Temperatura da Superfície do Mar (TSM) ao longo do Atlântico Tropical, o que dirige o fluxo da camada limite equatorial no sentido do hemisfério anormalmente quente (Nobre e Shukla, 1996; Chang et al., 1997). Alguns trabalhos (Hounsou-gbo et al., 2015; Bittencourt, 2016) fizeram associações do padrão AMM com as anomalias de temperatura do oceano Atlântico Tropical e chuvas no nordeste brasileiro. Assis et al. (2019) investigaram a sensibilidade de modelos acoplados oceano-atmosfera em simular a magnitude do gradiente meridional de anomalias de TSM no Atlântico Tropical, enquanto Chaves (2011) estudou a interação entre a TSM do Atlântico Sul e a convecção de verão sobre a América do Sul e adjacências através de análise de componentes principais. Entretanto, ainda não foram investigadas possíveis relações do padrão AMM ou de padrões tropicais do Atlântico com o gelo marinho antártico, uma vez que o foco dos estudos sobre relações de padrões tropicais com o gelo marinho sempre esteve mais voltado ao ENOS, que se manifesta no oceano Pacífico (e.g., Yuan, 2004; Pezza et al., 2012). De acordo com Wainer et al. (2014), índices climáticos baseados em TSM podem sintetizar informações relacionadas a processos físicos que descrevem mudanças e variabilidade na precipitação contribuindo para enchentes ou secas. O índice do Dipolo Subtropical do Atlântico Sul (DSAS), baseado na TSM no Atlântico Sul, representa o padrão dominante de variabilidade de TSM nesta região do Atlântico Sul e é modulado por mudanças na posição e intensidade da Alta Subtropical do Atlântico Sul (Wainer et al., 2014). Para este trabalho, foi construído um índice mensal similar ao DSAS, porém com foco para o Atlântico subtropical/extratropical, e que foi denominado de Gradiente Subtropical do Atlântico Sul (GSA).

Neste âmbito, o objetivo geral deste artigo é analisar as relações entre os índices SAM, AMM

e GSA e o gelo marinho antártico do setor MW no mês de setembro, assim como os comportamentos da variabilidade do gelo marinho antártico sob influências conjuntas destes padrões.

Material e métodos

Conjunto de dados

O conjunto de dados usados são mensais e referem-se ao período de 38 anos entre janeiro de 1981 e dezembro de 2018. Os dados de concentração de gelo marinho antártico foram obtidos do NSIDC (*National Snow and Ice Data Center - Bootstrap Sea Ice Concentrations from Nimbus-7 SMMR and DMSP SSM/I-SSM/I S, Version 3*) (dados disponíveis em <https://nsidc.org/data/NSIDC-0079/versions/3>). Os dados não se encontram em projeção lat/lon. A cobertura temporal é de 01/11/1978 até 31/12/2018, disponível em formato binário e com resolução temporal de até um dia. Entre 01/01/1979 e 08/07/1987 a resolução temporal dos dados é de dois dias. Há uma falha de cerca de seis semanas entre 03/12/1987 e 12/01/1988, não tendo sido possível obter os dados dos meses de dezembro de 1987 e janeiro de 1988. Esta lacuna foi preenchida através da média climatológica para cada respectivo mês considerando o período de 30 anos entre 1981-2010. Os dados estão organizados em pontos na grade estereográfica polar do SSM/I (25 x 25 km) e fornecidos em formato inteiro de dois bytes. Os dados incluem médias diárias e mensais de concentração de gelo marinho em uma célula de grade com pixels que apresentam espaçamento horizontal de 25 km x 25 km. No caso desta pesquisa, foram utilizados dados mensais.

Para calcular a área total de concentração de gelo marinho antártico, foi usado o programa *MatLab (Matrix Laboratory)*, versão R2016a (informações adicionais estão disponíveis em <https://www.mathworks.com/products/matlab.html>). Na literatura consultada, a concentração de gelo em quilômetros quadrados refere-se à área total composta pela quantidade de pixels que apresentam concentração de gelo igual ou superior a 15%. Na resolução apresentada, cada pixel contém 625 km². Assim, para o procedimento de cálculo da área total de concentração de gelo, foram considerados os pixels que apresentam concentração de gelo marinho igual ou superior a 15%, dando a estes o valor 1. Aos pixels com concentração de gelo marinho inferior a 15% é atribuído valor zero. Assim, a área total de concentração de gelo marinho é calculada

somando-se o número de pixels com valor 1 e multiplicando-se o valor obtido pela área total ocupada por cada pixel, que é de 625 km², obtendo assim a área total de concentração de gelo marinho em km² (Gloersen et al., 1992).

A extensão de gelo, usada neste artigo, refere-se à distância entre a borda continental e a borda do gelo marinho, acompanhando cada meridiano representativo das diferentes longitudes. Dessa forma, para o cálculo da extensão de gelo, foi necessário previamente obter a concentração de gelo pois esse dado gerou a posição latitudinal da borda do gelo, informação indispensável para a obtenção da extensão de gelo. Finalmente, para o cálculo de extensão de gelo marinho com a espacialização dos dados, isto é, obtenção de dados de extensão de gelo em quilômetros (km) para cada longitude ao longo dos mares que circundam a Antártica, foi considerada a distância entre a latitude situada na borda do continente antártico até a latitude onde a borda de gelo alcança. Para identificar a latitude e a longitude de cada ponto de interesse no código, foram utilizados os grids disponibilizados pelo NSIDC no link http://nsidc.org/data/polarstereo/tools_geo_pixel.html. Uma vez reconhecida a latitude da borda do continente e a de alcance do gelo marinho, foi encontrado o arco de círculo entre esses pontos (em graus) e depois foi convertido o valor deste arco de círculo de graus para quilômetros. Estas duas operações foram realizadas usando duas funções do próprio *Matlab* versão R2016a: a *distance* e, em seguida, a *deg2km*.

Utilizaram-se dados de TSM do *Extended Reconstructed Sea Surface Temperature version 5* (ERSSTv5) do NOAA. Trata-se de um conjunto de dados mensais globais de TSM, derivado do *International Comprehensive Ocean-Atmosphere Dataset* (ICOADS). A resolução do ERSSTv5 é de 2° × 2°, com completude espacial melhorada usando métodos estatísticos. A versão mais recente do ERSST, versão 5, utiliza novos conjuntos de dados de TSM do ICOADS Release 3.0; TSM dos flutuadores Argo acima de 5 m e concentração de gelo do *Hadley Center Ice-SST* versão 2 (HadISST2). Os cientistas aperfeiçoaram o ERSSTv5 usando o *First-Guess* não ajustado. Maiores detalhes podem ser encontrados em Huang et al. (2017). Para esta pesquisa, foram calculadas as anomalias de TSM para o mês de setembro tendo como parâmetro a climatologia mensal de 30 anos dos meses de setembro do período 1981-2010.

Foram utilizadas as saídas mensais das Reanálises do *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF) da *European*

Reanalysis Agency (ERA), denominado ERA-Interim (Dee et al., 2011). A variável utilizada foi altura geopotencial em 700 hPa. O espaçamento horizontal latitude x longitude = (0,5° x 0,5°). A reanálise é o processo pelo qual os dados observados são assimilados em um modelo numérico para a obtenção de uma interpolação física em grade regular a ser utilizada para estudos que exijam o cálculo de diferentes parâmetros, em especial o cálculo de derivadas temporais e espaciais. Diferentemente da interpolação matemática, a interpolação física leva em consideração a topografia, a cobertura vegetal e a evolução temporal dos processos como turbulência, radiação solar, convecção e processos de dinâmica de fluidos (Barry e Carleton, 2001). Da mesma forma que a TSM, foram calculadas as anomalias de altura geopotencial em 700 hPa para o mês de setembro levando em consideração a mesma climatologia mensal de 30 anos.

O índice SAM usado neste trabalho foi calculado através da Função Ortogonal Empírica (EOF) nas anomalias de altura geopotencial em 700 hPa na região ao sul de 30°S (Vasconcellos et al., 2019). A área utilizada para cálculo do EOF difere da usada pelo *Climate Prediction Center/National Oceanic and Atmospheric Administration* (CPC/NOAA) (disponível em <http://www.cpc.noaa.gov>) e em outros trabalhos, que usaram as latitudes 20°S-90°S (e.g., Thompson e Wallace, 2000). Os valores positivos (negativos) do índice associam-se a anomalias positivas (negativas) de altura geopotencial nas latitudes médias e anomalias negativas (positivas) em altas latitudes. O uso das coordenadas de 30°S a 90°S tem o propósito de reduzir a influência de fenômenos tropicais no cálculo do EOF, como o ENOS e o AMM.

Quanto ao AMM, este descreve a variabilidade ou o gradiente meridional da TSM no Oceano Atlântico Tropical. Seu padrão espacial é definido por meio da aplicação de MCA (*Maximum Covariance Analysis*) para a TSM e para as componentes meridional e zonal do campo de vento a 10 m para o período que se iniciou em 1948, utilizando as saídas da Reanálise do National Centers for Environmental Prediction/National Center for Atmospheric Research (NCEP/NCAR). A série temporal do AMM é calculada através da projeção da TSM ou do campo de vento a 10 m na estrutura espacial resultante do MCA. Com relação ao padrão espacial, os dados são definidos sobre a região (21°S-32°N; 74°W-15°E) e suavizados espacialmente (três pontos de longitude por dois pontos de latitude). O

ciclo sazonal e a tendência são removidos, uma média móvel de três meses é aplicada aos dados e o ajuste linear para o Índice da Língua Fria (*Cold Tongue Index – CTI*), uma medida da variabilidade do ENOS, é subtraído de cada ponto espacial. Sendo assim, a série temporal resultante é referida como série temporal do índice AMM na análise deste trabalho. Os dados são mensais e estão disponíveis no seguinte link: (<http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/timeseries/monthly/AMM/>). Mais detalhes podem ser encontrados em Chiang e Vimont (2004).

A série temporal mensal do índice GSA foi construída com o uso dos dados de TSM do ERSSTv5 do NOAA. Este índice foi gerado pelo cálculo da diferença das anomalias de TSM médias em duas distintas áreas situadas no Oceano Atlântico Subtropical. Neste trabalho, estas duas

áreas foram definidas e delimitadas como: área nordeste (20°S-40°S; 10°W-40°W) e área sudoeste (40°S-60°S; 30°W-60°W). Para o cálculo das anomalias, utilizou-se como referência a média climatológica do período 1981-2010.

Aplicação dos métodos

As relações entre os índices SAM, o AMM, o GSA e a extensão de gelo marinho do MW (60°W a 0°), que pode ser visualizado na Figura 1, foram investigadas e analisadas mediante a utilização de ferramentas e recursos estatísticos. A época do ano analisada é o mês de setembro, por representar o mês de maior extensão média climatológica de gelo marinho antártico no setor do MW (Cavalieri e Parkinson, 2008).

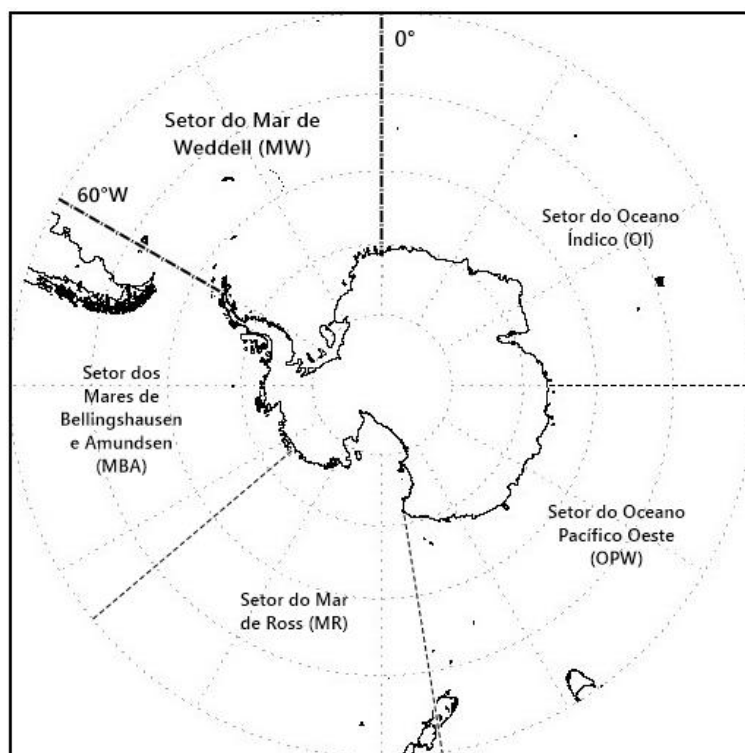


Figura 1 - Localização dos cinco setores do Oceano Austral com destaque para o setor MW (60°W-0°), delimitado por linhas tracejadas mais espessas.

Para a análise das relações entre os padrões tropicais, subtropicais e extratropicais e a extensão do gelo marinho, foram construídos compostos de anomalias de TSM e altura geopotencial em 700 hPa para os anos extremos de gelo marinho no MW. Os anos de extremos máximos (mínimos) de extensão de gelo se referem ao quintil extremo

máximo (mínimo) da série e que engloba os oito anos de máxima (mínima) extensão. A Tabela 1 mostra a classificação destes anos. Para verificar se os resultados dos compostos são representativos dos casos extremos, aplicou-se o teste *t-student* com nível de 90% de confiança (Wilks, 2006).

O cálculo da correlação temporal entre o gelo marinho no MW e os índices SAM, AMM e GSA foi realizado para cada longitude do MW. Utilizou-se os 38 meses de setembro do período 1981-2018 e produziu-se um gráfico Coeficiente de Correlação x Longitude que mostra a correlação dos índices SAM, AMM e GSA com a extensão de gelo marinho no referido mês em cada longitude.

Adicionalmente, os diagramas *boxplot* também foram elaborados para analisar o comportamento da extensão de gelo marinho no setor MW para cada uma das quatro combinações

entre o SAM e o AMM (SAM+/AMM-, SAM+/AMM+, SAM-/AMM-, SAM-/AMM+); e entre o SAM e o GSA (SAM+/GSA-, SAM+/GSA+, SAM-/GSA-, SAM-/GSA+). Os anos de cada uma dessas combinações estão apresentados na Tabela 1.

Tais diagramas também foram construídos separadamente para cada fase de cada índice, de modo a mostrar as relações da extensão de gelo marinho com cada fase de cada índice, desconsiderando a ação conjunta dos padrões.

Tabela 1 - Classificação dos anos de ocorrência das combinações de fases dos padrões e anos que compõem os quintis máximos e mínimos no período 1981-2018. Em verde: quintil extremo máximo de gelo marinho no MW. Em vermelho: quintil extremo mínimo de gelo marinho no MW.

MAR DE WEDDELL - SETEMBRO			
SAM+ / AMM-	1982, 1984 , 1985 , 1986 , 1992, 1993, 2018 (7)	SAM+ / GSA-	1984 , 1985 , 1986 , 1992, 1993, 2010, 2017 , 2018 (8)
SAM+ / AMM+	1990 , 1995 , 2001, 2004, 2008, 2010, 2012, 2015, 2016 , 2017 (10)	SAM+ / GSA+	1982, 1990 , 1995 , 2001, 2004, 2008, 2012, 2015, 2016 (9)
SAM- / AMM-	1983, 1994 , 1997, 2000, 2002 (5)	SAM- / GSA-	1981 , 1983, 1989 , 1996, 1997, 1998, 1999, 2011, 2014 (9)
SAM- / AMM+	1981 , 1987 , 1988 , 1989 , 1991 , 1996, 1998, 1999, 2003, 2005, 2006, 2007 , 2009, 2011, 2013, 2014 (16)	SAM- / GSA+	1987 , 1988 , 1991 , 1994 , 2000, 2002, 2003, 2005, 2006, 2007 , 2009, 2013 (12)

Resultados e discussão

A Figura 2 mostra a variação da extensão de gelo marinho considerando a extensão média de gelo de todas as longitudes/setores (Oceano Austral) e a curva de variação da extensão média de gelo somente do MW. O mês de fevereiro assume a posição de mês com menor extensão média, tanto no Oceano Austral, com 340,6 km, como no MW, com 705,2 km. O mês de setembro, por outro lado, ocupa a condição de mês com maior extensão média de gelo marinho, com 1.245,1 km

no Oceano Austral e 1.906,4 km no MW. Esses resultados concordam com pesquisas já divulgadas (King e Turner, 1997; Cavalieri e Parkinson, 2008). A notável diferença entre a extensão média de gelo no Oceano Austral e no MW deve-se, em grande parte, à área ocupada pelo setor, sendo o de maior cobertura de gelo marinho dentre os cinco setores, como já afirmado anteriormente. Desta forma, as análises subsequentes serão concentradas unicamente no mês de setembro, quando ocorre a maior extensão média climatológica de gelo marinho antártico no MW.

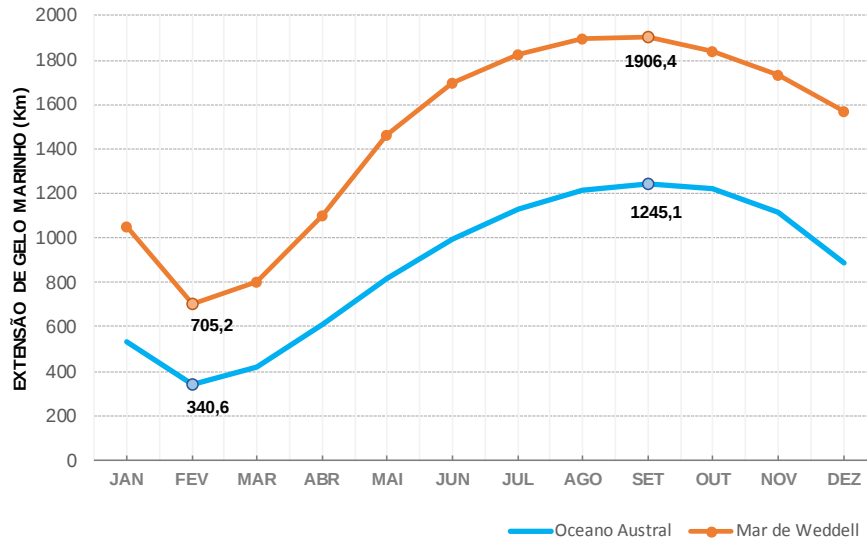


Figura 2 - Climatologia da extensão média de gelo marinho antártico no período 1981-2018 para todos os setores (representado pelo Oceano Austral, linha azul) e para o setor MW (linha laranja).

A variabilidade da extensão média de gelo marinho antártico somente para o mês de setembro durante o período analisado é apresentada na Figura 3. Assim, como pode ser observado, a

extensão média de gelo marinho no mês de setembro, variou, durante o período 1981-2018, entre a extensão máxima de gelo de 2.087,6 km (em setembro/1987) e a extensão mínima de gelo de 1.748,6 km (em setembro/2018), sendo a média de todos esses meses a extensão de gelo de 1.906,4 km, já apresentada na Figura 2.

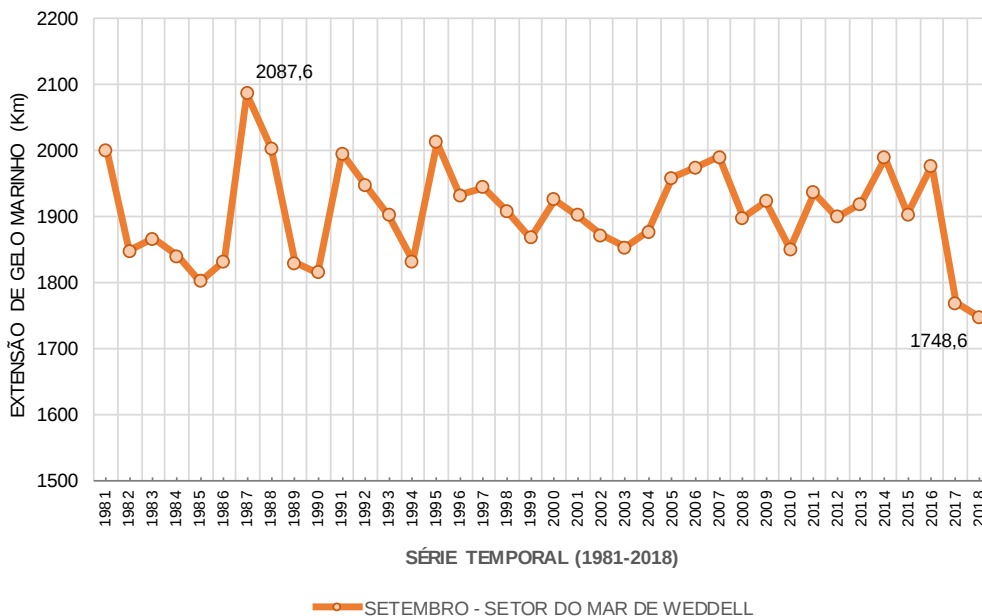


Figura 3 - Extensões médias de gelo marinho antártico no período 1981-2018 para o mês de setembro no setor MW.

Compostos

A seguir, são abordados os mapas de compostos de anomalias de altura geopotencial em 700 hPa e de anomalias de TSM. Estas anomalias

referem-se aos oito anos de extensão extrema máxima de gelo (quartil máximo) e aos oito anos de extensão extrema mínima de gelo (quartil mínimo) para o mês de setembro no setor em estudo.

Nos compostos de anomalias de altura geopotencial nos casos de extremos máximos de extensão de gelo marinho (Figura 4a), são observadas anomalias positivas sobre a região polar e também sobre restrita região de latitudes médias no Pacífico Sudeste. Há predomínio de anomalias negativas sobre as latitudes médias, com centros no extremo sul do Oceano Índico (à oeste da Austrália), no sul do Pacífico Oeste e no sul do Atlântico Sul. Com as anomalias positivas sendo registradas sobre a região da Antártica e as anomalias negativas apresentando predomínio sobre regiões de latitudes médias, o composto apresenta características relacionadas à fase negativa do SAM. Entretanto, a maior parte do padrão não apresenta significância estatística, com exceção apenas do extremo sul do Oceano Índico entre a Austrália e a África. Assim, tornou-se necessário observar quais sinais o índice SAM apresentou, nos meses de setembro dos oito anos citados, e avaliar a coerência com a configuração do padrão de anomalias exibidas no composto. No quartil extremo máximo, em seis anos, o sinal do

índice SAM foi negativo e em dois anos foi positivo, corroborando com a configuração de anomalias apresentadas no composto (Tabela 1). Neste contexto, percebe-se que os meses de setembro em que ocorreram os extremos máximos de gelo nos anos já informados, tiveram, em sua maioria, a ocorrência de fases negativas do SAM.

Os compostos de anomalias de altura geopotencial nos casos de extremos mínimos de extensão de gelo marinho (Figura 4b) mostram configuração oposta à anterior. Neste caso, há anomalias negativas sobre toda a Antártica. Nas latitudes médias, há predomínio de anomalias positivas, com centros sobre o sudoeste do Pacífico, sobre o sul do Atlântico Sul e à oeste da Austrália (sudeste do Índico). A configuração formada pelas anomalias exibe um padrão semelhante à gangorra típica do SAM em sua fase positiva, na qual observam-se anomalias negativas (positivas) sobre a Antártica (sobre as latitudes médias). Nota-se que os valores são mais intensos e com maiores áreas com significância estatística do que no caso de extremo máximo de gelo (Figura 4a). No quartil extremo mínimo, representado pelos oito anos, em seis anos o sinal do índice foi positivo (Tabela 1), corroborando com a configuração de anomalias apresentadas no composto.

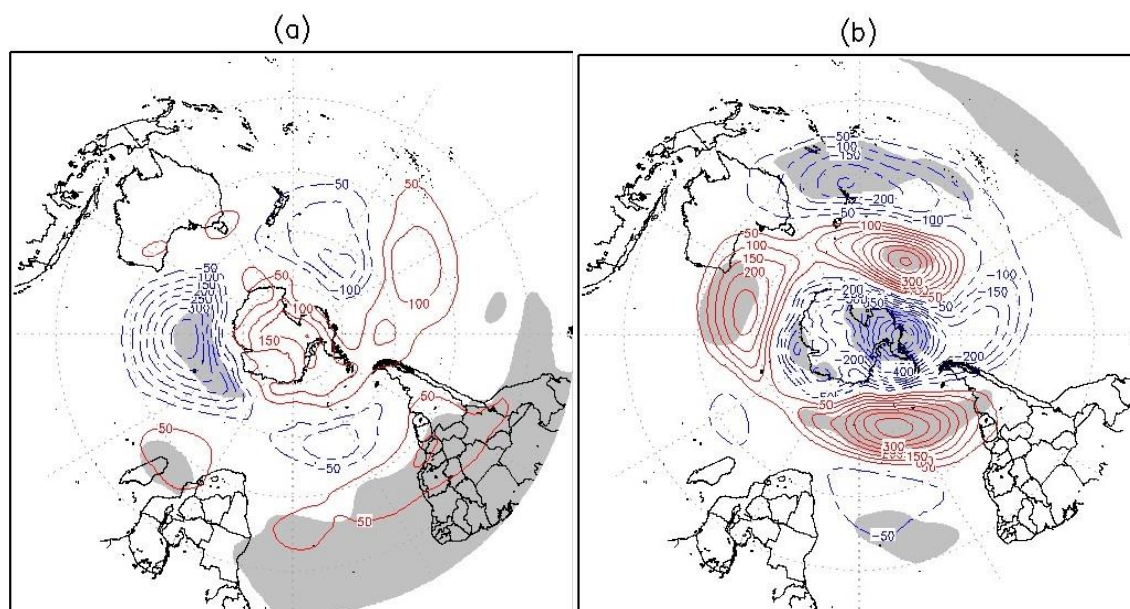


Figura 4 - Compostos de anomalias de altura geopotencial (m) em 700 hPa relacionados aos quintis extremos de extensão de gelo no MW. Contornos de 50m: linha vermelha contínua (valores positivos); linha azul tracejada (valores negativos). (a) quartil extremo máximo de gelo, (b) quartil extremo mínimo de gelo. Áreas com 90% de confiança estão sombreadas em cinza (teste *t-student*).

Ao analisar os compostos de anomalias de TSM para o mês de setembro nos extremos

máximos de extensão de gelo (Figura 5a), notam-se fracas anomalias negativas no Atlântico Tropical

Norte. No Atlântico Tropical Sul, observa-se anomalias positivas fracas à leste e anomalias negativas fracas mais à sul. A alternância entre fracas anomalias positivas e negativas na bacia do Atlântico Tropical indica gradiente meridional neutro de anomalias de TSM. No Atlântico Subtropical, intercalam-se anomalias positivas ao largo da costa do sudeste da América do Sul e anomalias negativas ao sul de 40°S, nas adjacências do Oceano Austral e do MW. Esta “gangorra” de anomalias de TSM entre a região subtropical e extratropical indica um GSA com sinal positivo, embora somente parte desse “dipolo” apresente significância estatística. Dos oito anos que representam o quintil extremo máximo, em seis deles o sinal do GSA foi positivo (Tabela 1), o que corrobora com o observado no composto.

Embora o AMM nos compostos não esteja bem configurado, dos oito anos relativos aos compostos, em todos eles o sinal do AMM foi positivo (Tabela 1). Destaca-se que os valores positivos do índice AMM nestes oito anos são todos muito próximos à zero o que possivelmente contribui para um gradiente neutro. No Pacífico Tropical, são observadas anomalias negativas de TSM de até -0,3°C em latitudes equatoriais e no Pacífico Tropical Sul. Pezza et al. (2012) encontraram resultados relacionando anos de La Niña com a fase positiva do SAM, os quais apresentariam as condições mais favoráveis para aumento da extensão de gelo marinho no Oceano Austral (incluindo o MW), com exceção do leste da Península Antártica (setor do Mar de Bellingshausen) onde ocorreria o inverso.

Ao considerar os casos de extremos mínimos de extensão de gelo (Figura 5b), são registradas anomalias negativas (positivas) no Atlântico Tropical Norte (Tropical Sul). Embora somente a parte sul apresente significância estatística, o padrão de gradiente negativo de anomalias de TSM caracteriza uma fase negativa do padrão AMM. O Atlântico Subtropical apresenta anomalias negativas, com centro em aproximadamente 30°S/30°W e, ao sul desta região, surgem anomalias positivas de TSM. Esta configuração no Atlântico Subtropical sugere a fase negativa do índice GSA, característica oposta ao composto de extremo máximo de gelo (Figura 5a). Nos oito anos em que ocorreram os meses de setembro que representam o quintil extremo mínimo de extensão de gelo, em cinco deles o sinal do AMM foi negativo (Tabela 1), o que é coerente com a observação no composto, onde notam-se águas mais frias no Atlântico Tropical Norte e uma fase negativa do modo meridional. Em relação ao GSA, nos oito anos do quintil mínimo, em seis deles o sinal foi negativo (Tabela 1), observação que também é coerente com o apontado no composto. No Pacífico Tropical, notam-se anomalias negativas de até -0,4°C em latitudes equatoriais e no Pacífico Tropical Sul. Yuan (2004) documentou que a influência do ENOS gera um padrão dipolo chamado dipolo antártico na região antártica ocidental, incluindo o setor MW. Para o autor, os processos dinâmicos e termodinâmicos que se relacionam à influência do ENOS no gelo marinho antártico têm sido bem investigados no hemisfério ocidental.

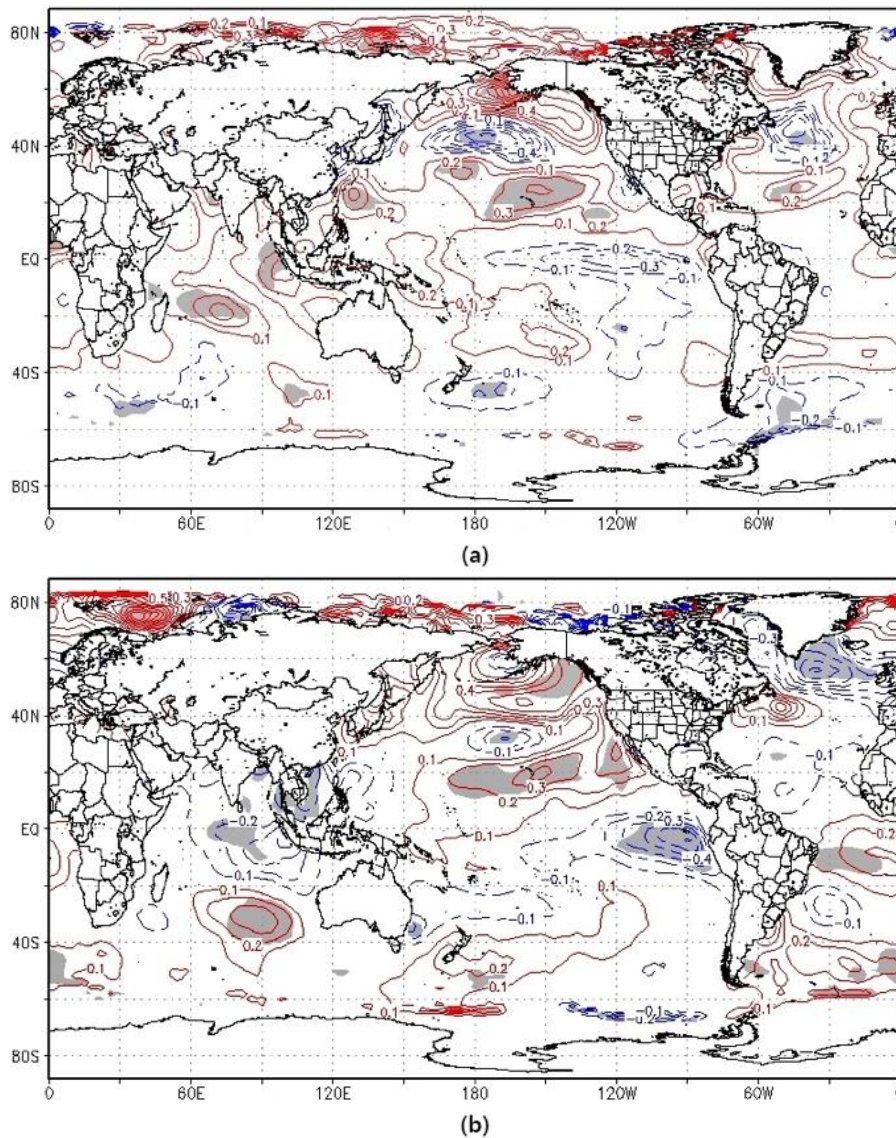


Figura 5 - Compostos de anomalias de temperatura da superfície do mar ($^{\circ}\text{C}$) relacionados aos quintis extremos de extensão de gelo no MW. Contornos de $0,1^{\circ}\text{C}$: linha vermelha contínua (valores positivos); linha azul tracejada (valores negativos). (a) quintil extremo máximo de gelo, (b) quintil extremo mínimo de gelo. Áreas com 90% de confiança estão sombreadas em cinza (teste *t-student*).

Coefficientes de correlação

Na Figura 6 é apresentado o gráfico com os coeficientes de correlação entre os índices SAM, AMM e GSA e a extensão de gelo marinho em cada longitude do MW. Nota-se um comportamento aparentemente em fase dos coeficientes de correlação entre os índices e a extensão de gelo, ou seja, quando a correlação com um dos índices aumenta ou diminui, com o outro índice também aumenta ou diminui. A correlação da extensão de gelo marinho no MW com o SAM é negativa em todo o setor, resultado esse que corrobora com os compostos (Figura 4). Essa correlação atinge os

valores mínimos entre $-0,4$ e $-0,5$ próximo à longitude de 30°W situada na parte central do setor. Portanto, a correlação negativa mais forte ocorre em torno desta longitude. Na maior parte do setor, os coeficientes oscilam entre $-0,1$ e $-0,3$ sendo a correlação mais fraca do que em 30°W .

Com o índice AMM, a correlação é positiva em quase todo o setor. Esse resultado é coerente ao apresentado nos compostos de extremo mínimo do gelo marinho (Figura 5b). Essa correlação positiva apresenta valores máximos de $+0,3$ no limite do setor MW com a Península Antártica, em 60°W . Porém, na maior parte do setor, a correlação situa-se entre $+0,2$ e zero,

apresentando algumas regiões com valores levemente negativos (entre 33° e 41°W).

No que se refere ao GSA, o coeficiente de correlação é positivo em todo o setor, o que também é coerente com os compostos (Figura 5). Os valores dessa correlação atingem um máximo de +0,4 próximo à 25°W e os mínimos entre +0,1 e zero a partir de 15°W para leste. De modo geral, as correlações são mais expressivas do que as do AMM com as extensões de gelo. As correlações dos índices do Atlântico (AMM e GSA) com a extensão de gelo marinho e do SAM com a extensão de gelo marinho demonstram uma oposição, onde nos primeiros notam-se correlações predominantemente positivas e com o SAM percebe-se correlações sempre negativas. Em relação aos índices do Atlântico, estes apresentam uma sinergia entre si dada pela curva de correlação positiva de ambos com as extensões de gelo marinho.

Pezza et al. (2012) realizaram análise de correlação semelhante, porém para o período 1979-2000 utilizando todos os meses do ano e avaliando o SAM e o ENOS. Os autores descobriram

correlações entre o SAM e a extensão de gelo marinho no sudeste do Oceano Índico (+0,5) e destacaram algumas áreas de correlação entre o SAM e a extensão de gelo como o leste do Mar de Bellingshausen no limite com o oeste do MW (correlação negativa) e o Oceano Pacífico Sul e o Oceano Índico (correlação positiva). Nas regiões de correlação negativa (Mar de Bellingshausen e oeste do MW), o gelo apresenta uma retração para sul quando ocorrem *westerlies* mais intensos do que o normal, região coincidente com a Península Antártica, onde também foram observadas correlações negativas entre a extensão de gelo e o SAM (Figura 6). Pezza et al. (2012) também apontaram que as correlações indicam que a extensões de gelo nas longitudes referentes ao sudoeste da Austrália tendem a ser maiores do que o normal na fase positiva do SAM. Isso direcionaria para uma correlação negativa com as chuvas no sudoeste da Austrália durante o inverno (Pezza et al., 2008) sugerindo que a fase positiva do SAM e o maior gelo marinho estão associados com a redução das chuvas no sudoeste da Austrália (Hendon et al., 2007).

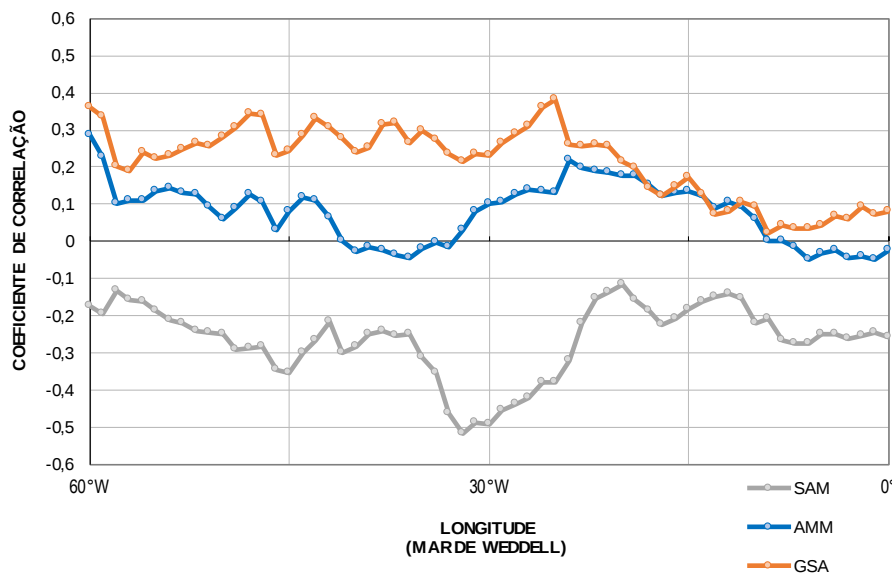


Figura 6 - Coeficientes de correlação entre os índices SAM (linha cinza), AMM (linha azul) e GSA (linha laranja) e a extensão de gelo marinho antártico no setor MW.

Diagramas *boxplot*

Nas Figuras 7 a 9 são mostrados os diagramas *boxplot* que apresentam o comportamento da variabilidade das extensões de gelo marinho (mínimo, máximo, 1º quartil, mediana e 3º quartil), respectivamente, nas distintas fases dos padrões SAM, AMM e GSA; nas quatro combinações de fases dos padrões SAM

e AMM (SAM+/AMM-, SAM+/AMM+, SAM-/AMM-, SAM-/AMM+) e nas quatro combinações de fases dos padrões SAM e GSA (SAM+/GSA-, SAM+/GSA+, SAM-/GSA-, SAM-/GSA+) por cada ação conjunta.

Na Figura 7, em relação ao SAM, é a fase negativa que apresenta a maior mediana de extensão de gelo (1.932 km) enquanto a fase positiva registra 1.876 km. A variabilidade de

extensão de gelo é semelhante nas duas fases do SAM, porém a fase negativa mostra também valores superiores em todas as outras estatísticas presentes no *boxplot* em comparação com as correspondentes da fase positiva (1º e 3º quartis, mediana e limites inferiores e superiores). Esses resultados ratificam os apresentados na correlação (Figura 6) e nos compostos (Figura 4) e indicam que no MW, em setembro, a fase negativa do SAM exerce influência na circulação atmosférica local, coincidindo com maiores extensões de gelo marinho. Por outro lado, a fase positiva está relacionada à menores extensões de gelo marinho.

Sobre as relações do AMM com o gelo marinho, a situação é contrária ao do SAM, pois é na fase positiva (negativa) que surgem as maiores (menores) extensões de gelo. No que se refere às medianas, a fase positiva apresenta 1.921 km e a fase negativa registra 1.857 km. As outras estatísticas presentes no *boxplot* também apresentam maiores valores na fase positiva, em comparação com as correspondentes da fase negativa da AMM. Em termos de valores de extensão de gelo marinho, o SAM negativo apresenta-se semelhante ao AMM positivo e o SAM positivo é próximo do AMM negativo. Apesar da situação inversa, deve-se ressaltar que os valores são próximos. Tanto os resultados para o AMM quanto essa comparação entre o SAM e o AMM estão de acordo com os coeficientes de correlações apresentados na Figura 6.

Ao analisar o comportamento das extensões de gelo com o índice GSA, percebe-se que este é similar ao AMM, com valores maiores na fase positiva e menores na fase negativa. No que se refere à medianas, a fase positiva apresenta 1.920 km e a fase negativa registra 1.868 km, sendo estes valores também muito próximos aos do AMM. Da mesma forma que o AMM, as outras estatísticas presentes no *boxplot* também apresentam maiores valores na fase positiva, em comparação com as correspondentes da fase negativa do GSA. Os resultados para o GSA estão de acordo com as correlações mostradas no gráfico da Figura 6 e com os compostos na Figura 5.

A Figura 8 analisa a ação combinada dos dois padrões SAM e AMM na extensão de gelo marinho no MW no mês de setembro. As medianas de extensões de gelo marinho apontadas pelas quatro distintas combinações são: SAM-/AMM+

(1.947 km), SAM-/AMM- (1.871 km), SAM+/AMM+ (1.898 km), SAM+/AMM- (1.840 km). É notório o destaque da combinação SAM-/AMM+ como a que apresenta a maior mediana de extensão de gelo, tendo também os mínimos, os máximos e os valores de 1º e 3º quartis superiores às demais combinações. Estes últimos situam-se entre 1.911 e 1.994 km, com mínimo de 1.830 km e máximo de 2.087 km. Os menores valores de extensão ocorrem na combinação inversa (SAM+/AMM-) com os valores de 1.802 e 1.902 km referentes ao 1º e 3º quartis, mínimo de 1.748 km e máximo de 1.947 km. As combinações de mesmo sinal apresentam extensões intermediárias em relação às supracitadas.

A Figura 9 mostra, de modo geral, diagramas com comportamentos similares de extensão de gelo em relação aos diagramas SAM/AMM. As medianas de extensão de gelo para as quatro distintas combinações são: SAM-/GSA+ (1.942 km), SAM-/GSA- (1.932 km), SAM+/GSA+ (1.899 km), SAM+/GSA- (1.836 km). A combinação de maior extensão é a SAM-/GSA+ que apresenta valores de 1.832 e 2.087 km para o mínimo e o máximo, o 1º e o 3º quartis situam-se entre 1.883 e 1.994 km. Todos os valores são superiores às demais combinações. Os menores valores ocorrem também na combinação inversa (SAM+/GSA-). Da mesma maneira que os diagramas da Figura 8, as combinações de mesmo sinal apontam extensões intermediárias em relação às demais que registram o máximo e o mínimo.

Como pode ser observado na Tabela 1, nos oito anos da série que compõem o quintil máximo de extensão de gelo, em seis deles ocorreu a combinação SAM-/AMM+ e, nesta mesma configuração, houve apenas um ano pertencente ao quintil mínimo de extensão de gelo. Por outro lado, na configuração inversa (SAM+/AMM-), dos oito anos há quatro pertencentes ao quintil mínimo de extensão. Na combinação SAM-/GSA+, a situação é similar, uma vez que dos oito anos, quatro pertencem ao quintil máximo de extensão e, nesta configuração, houve somente um ano pertencente ao quintil mínimo. Já na combinação inversa, SAM+/GSA-, cinco dos oito anos são pertencentes ao quintil mínimo de extensão. Tais características contribuem para explicar a dinâmica acima discutida. Vale destacar que os três diagramas se complementam e apresentam coerência entre si.

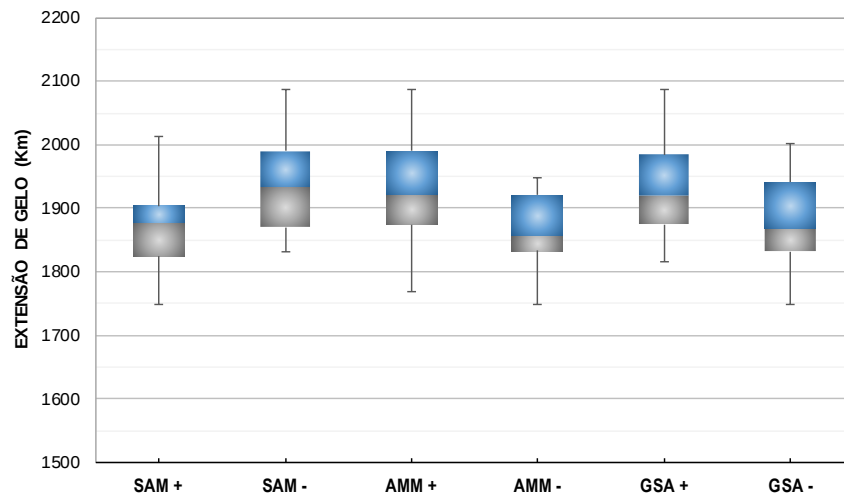


Figura 8 - Diagramas *boxplot* de extensão de gelo marinho para o mês de setembro no período 1981-2018 no setor MW nas fases dos padrões SAM, AMM e GSA.

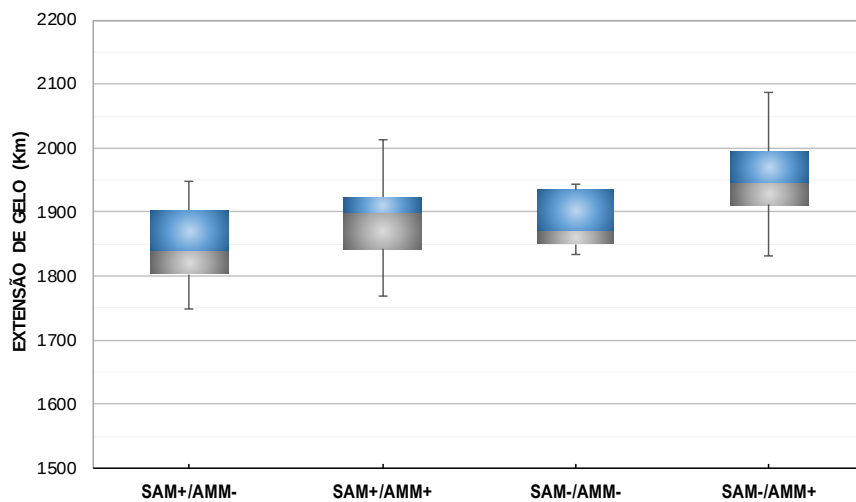


Figura 8 - Diagramas *boxplot* de extensão de gelo marinho para o mês de setembro no período 1981-2018 no setor MW nas quatro combinações dos padrões SAM/AMM.

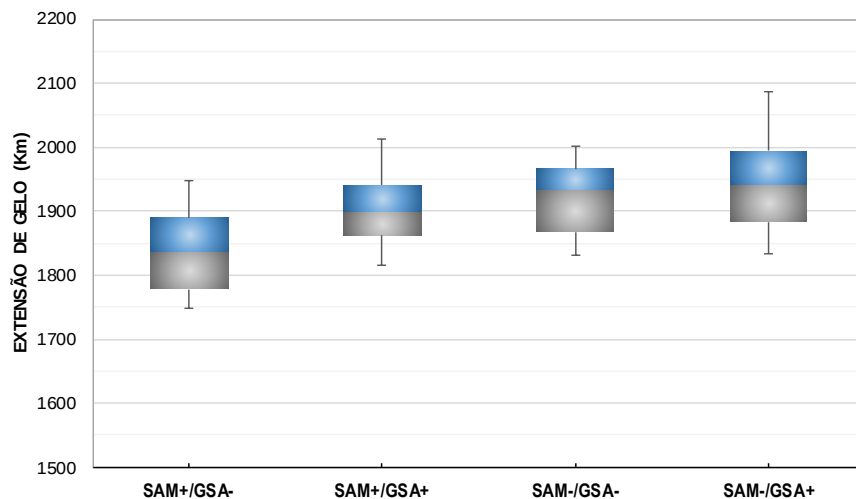


Figura 9 - Diagramas *boxplot* de extensão de gelo marinho para o mês de setembro no período 1981-2018 no setor MW nas quatro combinações dos padrões SAM/GSA.

Conclusões

Este trabalho analisou as relações entre padrões de teleconexões tropicais (AMM), subtropicais (GSA) e extratropicais (SAM) e as extensões de gelo marinho antártico do setor MW, através de técnicas estatísticas e análises de compostos para os extremos de gelo marinho.

Os resultados apontaram que a fase negativa do SAM está associada às maiores extensões de gelo marinho, enquanto a fase positiva associa-se às menores extensões. No caso do AMM e do GSA, ocorre o inverso, sendo a fase negativa (positiva) relacionada às menores (maiores) extensões de gelo marinho. Ao analisar as combinações de fases, nota-se, coerentemente, que quando se combinam as fases de cada índice associadas às maiores extensões, ou seja, SAM (-) e AMM (+) ou SAM (-) e GSA (+) ocorrem as maiores extensões de gelo em uma análise conjunta. Analogamente, porém de maneira inversa quanto aos sinais, quando se combina o SAM (+) e o AMM (-) ou o SAM (+) e o GSA (-), obtém-se as menores extensões de gelo. Quando os sinais dos índices são iguais, seja positivo ou negativo, são registradas extensões de gelo intermediárias em relação aos casos supracitados.

As correlações entre cada um dos três índices e as extensões de gelo apresentaram resultados coerentes com os resultados dos compostos e dos *boxplots*. O índice SAM apontou, em todo o setor do MW, coeficientes negativos de correlação com as extensões de gelo e a correlação mais forte ocorreu em torno de 30°W. Por outro lado, os índices AMM e GSA tiveram, em geral, correlações positivas com as extensões de gelo. Além disso, apresentaram um comportamento em fase entre si e correlações mais fortes do gelo marinho com o GSA, sendo a mais forte em torno de 25°W de longitude.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão da bolsa de Doutorado ao discente Fábio Guimarães Oliva e ao projeto ATMOS - *Antarctic Modeling and Observation System* (CNPq/PROANTAR 443013/2018-7).

Referências

- Aquino, F. E. 2012. Conexão Climática entre o Modo Anular do Hemisfério Sul com a Península Antártica e o Sul do Brasil. Tese (Doutorado em Geociências). Porto Alegre: IGEO/UFRGS, 121p.
- Assis, E. A., Alves, J. M. B., Silva, E. M., Vasconcelos Júnior, F. C., Barbosa, A. C. B., Santos, A. C. S., Sombra, S. S. 2019. Modelos acoplados do IPCC (CMIP3-CMIP5) e o gradiente meridional de anomalias de temperatura da superfície do mar (TSM) no oceano atlântico tropical. *Revista Brasileira de Meteorologia* 34, 217-226.
- Barry, R. G., Carleton, A. M. 2001. *Synoptic and Dynamic Climatology*. London, Routledge, 620p.
- Bittencourt, L. P. 2016. Resposta da circulação no oceano Atlântico Tropical oeste ao Modo Meridional do Atlântico. Dissertação (Mestrado em Ciências Marinhas Tropicais). Instituto de Ciências do Mar, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Ceará. 81 f.
- Carpeneo, C. B. 2017. Bloqueios atmosféricos associados à variabilidade extrema do gelo marinho antártico e impactos na América do Sul. Tese (Doutorado em Meteorologia). Departamento de Ciências Atmosféricas, IAG-USP, São Paulo (SP), 237 f.
- Carpeneo, C. B., Ambrizzi, T. 2016. Células de circulação meridional durante os eventos extremos de gelo marinho antártico. *Revista Brasileira de Meteorologia* 31, 251-261.
- Carvalho, L. M. V., Jones, C., Ambrizzi, T. 2005. Opposite phases of the Antarctic Oscillation and relationships with intraseasonal to interannual activity in the tropics during the austral summer. *Journal of Climate* 18, 702-718.
- Cavalieri, D. J., Parkinson, C. L. 2008. Antarctic sea ice variability and trends, 1979–2006. *Journal of Geophysical Research* 113, 1-19.
- Chang, P., Ji, L., Li, H. 1997. A decadal climate variation in the tropical atlantic ocean from thermodynamic air-sea interactions. *Nature* 385, 516–518.
- Chaves, R. R. 2011. Conexões entre a TSM do Atlântico Sul e a convecção de verão sobre a América do Sul - análise observacional. *Revista Brasileira de Geofísica* 29, 5-20.
- Chiang, J. C., Vimont, D. J. 2004. Analogous pacific and atlantic meridional modes of tropical

- atmosphere-ocean variability. *Journal of Climate* 17, 4143–4158.
- Clem, K. R., Fogt, R. L. 2013. Varying roles of ENSO and SAM on the antarctic peninsula climate in austral spring. *Journal of Geophysical Research Atmospheres* 118, 11481-11492.
- Clem, K. R., Renwick, J. A., McGregor, J., Fogt, R. L. 2016. The relative influence of ENSO and SAM on antarctic peninsula climate. *Journal of Geophysical Research Atmospheres* 121, 9324-9341.
- Comiso, J. C., Gersten, R. A., Stock, L. V., Turner, J., Perez, G. J., Cho, K. 2017. Positive trend in the antarctic sea ice cover and associated changes in surface temperature. *Journal of Climate* 30, 2251-2267.
- Dee, D. P., Källén, E., Simmons, A. J., Haimberger, L. 2011. Comments on reanalyses suitable for characterizing long-term trends. *Bulletin of American Meteorological Society* 92, 65-70.
- Fogt, R. L., Bromwich, D. H. 2006. Decadal variability of the ENSO teleconnection to the high latitude South Pacific governed by coupling with the Southern Annular Mode. *Journal of Climate* 19, 979-997.
- Fogt, R. L., Marshall, G. J. 2020. The Southern Annular Mode: variability, trends, and climate impacts across the southern hemisphere. *WIREs Climate Change* 11: e652
- Gillett, N. P., Kell, T. D., Jones, P. D. 2006. Regional climate impacts of the Southern Annular Mode. *Geophysical Research Letters* 33, L23704, doi:10.1029/2006GL027721.
- Gloersen, P., Campbell, W. J., Cavalieri, D. J., Comiso, J. C., Parkinson, C. L., Zwally, H. J. (Eds.). 1992. Arctic and antarctic sea ice: satellite passive-microwave observations and analysis. Washington D. C., NASA. (NASA Special publication, 511), 290 p.
- Hall, A., Visbeck, M. 2002. Synchronous variability in the southern hemisphere atmosphere, sea ice and ocean resulting from the annular mode. *Journal of Climate* 15, 3043-3057.
- Hendon, H. H., Thompson, D. W. J., Wheeler, M. C. 2007. Australian rainfall and surface temperature variations associated with the southern annular mode. *Journal of Climate* 20, 2452-2467.
- Hounsou-gbo, G. A., Araujo, M., Bourlès, B., Velela, D., Servain, J. 2015. Tropical Atlantic contributions to Strong rainfall variability along the northeast brazilian coast. *Advances in Meteorology* 2015, 1-13.
- Huang, B., Thorne, P. W., Banzon, V. F., Boyer, T., Chepurin, G., Lawrimore, J. H., Menne, M. J., Smith, T. M., Vose, R. S., Zhang, H-M. 2017. Extended reconstructed sea surface temperature, version 5 (ERSSTv5): upgrades, validations, and intercomparisons. *Journal of Climate* 30, 8179-8205.
- King, J. C., Turner, J. 1997. *Antarctic Meteorology and Climatology*. Cambridge: University Press, 409 p.
- Lefebvre, W., Goosse, H. 2005. Influence of the southern annular mode on the sea ice-ocean system: the role of the thermal and mechanical forcing. *Ocean Science, European Geosciences Union* 1, 145-157.
- Lima, F. U. F., Carvalho, L. M. V. 2017. Mechanisms associated with winter intraseasonal extreme sea ice extent in the Weddell Sea. *Advances in Polar Science* 28, 171-184.
- Nobre, P., Shukla, J. 1996. Variations of sea surface temperature, wind stress and rainfall over the Tropical Atlantic and South America. *Journal of Climate* 9, 2464-2479.
- Oliva, F. G., Justi da Silva, M. G. A. 2011. Opposite phases of the Antarctic Oscillation and relationships with precipitation and discharges in the Uruguai river hydrographic region, South region of Brazil. IV Simpósio Internacional de Climatologia. João Pessoa, PB, Brasil.
- Pezza, A. B., Durrant, T. H., Simmonds, I., Smith, I. 2008. Southern hemisphere synoptic behaviour in extreme phases of SAM, ENSO, sea ice extent and southern Australia rainfall. *Journal of Climate* 21, 5566-5584.
- Pezza, A. B., Rashid, H. A., Simmonds, I. 2012. Climate links and recent extremes in antarctic sea ice, high-latitude cyclones, Southern Annular Mode and ENSO. *Climate Dynamics* 38, 57-73.
- Raphael, M. N., Hobbs, W., Wainer, I. 2011. The effect of antarctic sea ice on the Southern Hemisphere atmosphere during the southern summer. *Climate Dynamics* 36, 1403-1417.
- Reboita, M. S., Ambrizzi, T., Rocha, R. P. 2009. Relations between the Southern Annular Mode and Southern Hemisphere Atmospheric Systems. *Revista Brasileira de Meteorologia* 24, 48-62.
- Reboita, M. S., Nieto, R., Rocha, R. P., Drumond, A., Vázquez, M., Gimeno, L. 2019. Characterization of moisture sources for Austral

- Seas and relationship with sea ice concentration. *Atmosphere* 10, 627-647
- Renwick, J. A. 2001. Southern Hemisphere circulation and relations with sea ice and sea surface temperature. *Journal of Climate* 15, 3058-3068
- Riffenburgh, B. (Ed.). 2007. *Encyclopedia of the Antarctic: índice L-Z*. New York: Routledge.
- Silvestri, G. E., Vera, C. S. 2003. Antarctic Oscillation signal on precipitation anomalies over southeastern South America. *Geophysical Research Letters* 30, 2115-2118.
- Silvestri, G. E., Vera, C. S. 2009. Nonstationary impacts of the southern annular mode on southern hemisphere climate. *Journal of Climate* 22, 6142-6148.
- Thompson, D. W., Wallace, J. M. 2000. Annular modes in the extratropical circulation. Part I: month-to-month variability. *Journal of Climate* 13, 1000-1016.
- Vasconcellos, F. C., Pizzochero, R. M., Cavalcanti, I. F. A. 2019. Month-to-month impacts of southern annular mode over south america climate. *Anuário do Instituto de Geociências* 42, 783-792.
- Wadhams, P. 2000. *Ice in the ocean*. Amsterdam: Gordon and Breach Science Publishers, 351p.
- Wainer, I., Prado, L. F., Khodri, M., Otto-Bliesner, B. 2014. Reconstruction of the south atlantic subtropical dipole index for the past 12000 years from surface temperature proxy. *Scientific Reports* 4, 5291; DOI:10.1038/srep05291.
- Wilks, D. S. 2006. *Statistical methods in the atmospheric sciences*. San Diego, CA: Academic Press. 627p. (International Geophysics Series 91) ISBN 978-0-12-751966-1.
- Yuan, X. 2004. ENSO-related impacts on antarctic sea ice: a synthesis of phenomenon and mechanisms. *Antarctic Science* 16, 415-42