



**Influência Climática na Formação do Gelo Marinho da  
Antártica Registrada por meio do Sensoriamento Remoto**  
Climate Influence on Antarctic Sea Ice  
Formation Recorded through Remote Sensing

Fernando Luis Hillebrand<sup>1</sup>; Cristiano Niederauer da Rosa<sup>1</sup>;  
Janisson Batista de Jesus<sup>2</sup> & Ulisses Franz Bremer<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Centro Polar e Climático,  
Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto  
Avenida Bento Gonçalves, 9500, Prédio 43136, salas 208 e 210, 91501-970, Porto Alegre, RS, Brasil

<sup>2</sup>Universidade Federal do Rio Grande do Sul,  
Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto  
Avenida Bento Gonçalves, 9500, 91501-970, Porto Alegre, RS, Brasil  
E-mails: fernando.hillebrand@rolante.ifrs.edu.br; cristianonrd@gmail.com; janisson.eng@gmail.com; bremer@ufrgs.br  
Recebido em: 01/08/2019 Aprovado em: 21/11/2019  
DOI: [http://dx.doi.org/10.11137/2020\\_1\\_151\\_161](http://dx.doi.org/10.11137/2020_1_151_161)

## Resumo

Entender os fatores climáticos que possam afetar a formação do gelo marinho no Oceano Austral é de fundamental importância para estudos climatológicos globais, principalmente para a região extratropical. Porém, encontram-se limitações para a coleta de dados meteorológicos “*in situ*” devido a dificuldades logísticas na instalação e manutenção periódica de estações meteorológicas na Antártica. Diante disto, o sensoriamento remoto está possibilitando o fornecimento de informações por meio de imagens satelitais e modelos de reanálise atmosférica para entender o impacto das mudanças climáticas sobre o gelo marinho. Este trabalho apresenta o estado da arte sobre a influência dos principais fatores climáticos na formação, localização e duração do gelo marinho na Antártica com o emprego de sensores remotos e modelos de reanálise atmosférica.

**Palavras-chave:** *Península Antártica; Dados climáticos; Informação remota*

## Abstract

Understanding the climatic factors that can affect the formation of sea ice in the Southern Ocean has fundamental importance for global climatological studies, especially for the extratropical region. However, there are limitations to the collection of meteorological data *in situ* due to logistical difficulties in the installation and periodic maintenance of meteorological stations in Antarctica. In view of this, the technique of remote sensing provides information through satellite imagery and atmospheric reanalysis models to understand the impact of climate change on sea ice. This paper presents the state of the art on the influence of major climatic factors on the formation, location and duration of sea ice in Antarctica with the use of remote sensors and atmospheric reanalysis models.

**Keywords:** *Antarctic Peninsula; Climatic data; Remote information*

## 1 Introdução

O gelo marinho tem potencial de influenciar o clima da Terra por meio do balanço de energia em função do albedo, na alteração do processo de formação das águas profundas afetando a circulação oceânica, e, conseqüentemente, na troca de calor, umidade e carbono (Simpkins *et al.*, 2012). Além disto, o pacote de gelo marinho também atua como isolante térmico entre o oceano e a atmosfera e sem o gelo, o oceano perderá calor para a atmosfera podendo atingir a uma temperatura de  $-30^{\circ}\text{C}$  resultando em um oceano mais frio e, portanto, mais denso. O deslocamento desta água densa para o fundo desempenha um papel significativo no sistema climático global, impulsionando a circulação termohalina (Killworth, 1983) e os ciclos biogeoquímicos, como a troca de dióxido de carbono entre a atmosfera e o oceano profundo.

Tendo em vista a circulação oceânica ao sul da ACC (*Antarctic Circumpolar Current*), os Mares de Weddell e Ross são importantes locais para a formação da água mais densa na Antártica e consequen-

temente na formação das correntes oceânicas (Talley *et al.*, 2011). A água encontrada no fundo do Mar de Weddell é fria e densa (temperatura  $< -0,7^{\circ}\text{C}$ , salinidade  $\approx 3,464\%$ ), dando origem a 70 % das águas de fundo na Antártica (Mata & Garcia, 2011). A figura 1 apresenta a localização dos principais mares do Oceano Austral, representado pelos Mares de Weddel, Ross, Bellingshausen e Amundsen.

O gelo marinho encontrado nos Mares de Weddel, Ross, Bellingshausen e Amundsen possui correlação com as temperaturas mínimas do ar registradas na América do Sul (Blank, 2009). Ao analisarmos a Península Antártica, o monitoramento do comportamento do gelo marinho é muito importante, pois a desintegração das plataformas de gelo na Península Antártica nos últimos 60 anos tem sido atribuída ao aquecimento atmosférico (Cook *et al.*, 2005). Nesta região, o fenômeno é intensificado com ventos da direção oeste que levam o ar marítimo quente para a região leste da Península Antártica, ocasionando um aumento de  $0,4^{\circ}\text{C}$  por década na temperatura superficial do ar a noroeste do Mar de Weddell. Este é

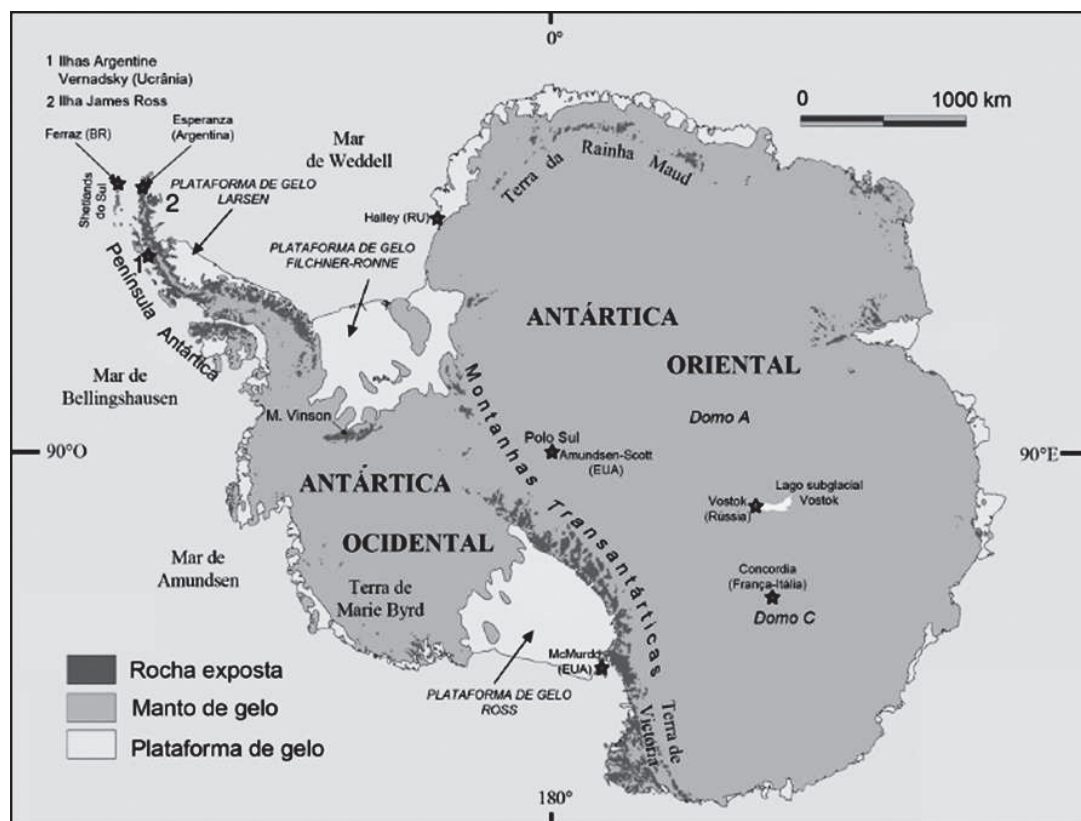


Figura 1 Mapa da Antártica e localização dos principais mares do Oceano Austral. Fonte: Adaptado por Simões (2011).

um dos fatores que contribuiu para a desintegração das plataformas de gelo Larsen A e B (Marshall *et al.*, 2006). Complementarmente, Stammerjohn *et al.* (2008) destacam que este aquecimento é mais pronunciado ao longo da face oeste da Península Antártica, com elevação das temperaturas médias desde 1950 de 2°C a 6°C apenas nas temperaturas registradas no inverno austral. Já Meredith & King (2005) também evidenciaram em seu trabalho que o estrato superior do oceano (até 100 m de profundidade) aqueceu a uma taxa de até 0,5°C por década durante o verão austral entre 1955 e 1998, acompanhado com o aumento da salinidade da água.

Visando acompanhar o comportamento do gelo marinho em análises multitemporais diante destas mudanças climáticas, encontram-se disponíveis desde 1973 dados de temperatura de brilho provenientes de sensores remotos passivos como o ESMR (*Electrically Scanning Microwave Radiometer*), SMMR (*Scanning Multichannel Microwave Radiometer*), SSM/I (*Special Sensor Microwave Imager*), SSMIS (*Special Sensor Microwave Imager/Sounder*) e AMSR-E (*Advanced Microwave Scanning Radiometer for EOS*), possibilitando calcular e mapear a extensão e concentração do gelo marinho no Ártico e na Antártica. Alguns trabalhos como Cavalieri *et al.* (1997), Smith (1998), Johannessen *et al.* (1999) e Parkinson *et al.* (1999) relatam sobre o uso de sensores remotos passivos para esta finalidade.

Com a dificuldade logística na instalação e manutenção de estações meteorológicas no Continente Antártico para coleta sistemática de dados meteorológicos, os modelos de reanálise atmosférica permitem disponibilizar dados meteorológicos para o acompanhamento das mudanças climáticas desta região. Na Antártica, trabalhos como Reynolds & Smith (1995), Mahrt (1999), Bracegirdle & Marshall (2012) e Tastula *et al.* (2013) validaram dados disponibilizados pelos modelos ERA-Interim e ERA-40 (*European Reanalysis Agency*), JRA-25 (*Japanese Meteorological Agency Reanalysis*), NCEP (*National Centers for Environmental Prediction*)/NCAR (*National Center for Atmospheric Research*), NCEP/CFSR (*Climate Forecast System Reanalysis*), MERRA (*Modern Era Retrospective-Analysis for Research and Applications*) e NMC (*National Meteorological Center*).

Diante do exposto, o presente trabalho apresenta o estado da arte sobre a influência dos principais fatores climáticos na formação, localização e duração do gelo marinho na Antártica com o emprego de sensores remotos e modelos de reanálise atmosférica.

## 2 Material e Métodos

Para a busca bibliográfica foi realizado primeiramente a organização da pesquisa por meio do planejamento do assunto, levando em consideração o objetivo do trabalho e as palavras-chave: *passive microwave, sea ice, remote sensing, Antarctic* e *atmospheric reanalysis*. O sistema de busca de artigos científicos utilizado foi o Portal de Periódicos da CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) disponibilizado no sítio <<https://www-periodicos-capes-gov-br.ez45.periodicos.capes.gov.br>>. Esta pesquisa retornou 317 artigos revisados por pares nos Periódicos.

A partir dos artigos científicos apresentados pela pesquisa, foram utilizados alguns critérios para seleção através da análise individual dos resumos. Os critérios são os seguintes:

- i. Temática: ampla escala temporal de análise, especificidade nos parâmetros do gelo marinho (extensão, concentração e volume) e local de estudo focado aos Mares de Ross, Amundsen, Bellingshausen e Weddell;
- ii. Abordagem: análise estatística dos resultados ou modelagem numérica dos parâmetros com fatores climáticos.

Finalizado o processo de seleção do material, foram realizadas análises e discussões seguindo estabelecer quais os principais fatores climáticos que atuam na formação e duração do gelo marinho no Oceano Austral em 26 artigos científicos. Os principais fatores climáticos constatados são: pressão atmosférica e precipitação pluviométrica, TSM (Temperatura da Superfície do Mar), TAS (Temperatura do Ar na Superfície) e componente eólico (meridional e zonal). Complementarmente, também foram analisadas algumas publicações de relevância científica citados nos artigos selecionados.

### 3 Resultados e Discussão

#### 3.1 Pressão Atmosférica e Precipitação Pluviométrica

Turner & Colwell (1995) relataram que entre 1956 a 1993 os eventos de precipitação aumentaram 10% no lado oeste da Península Antártica, à medida que a pressão atmosférica diminuiu. Ao utilizar dados de precipitação pluviométrica provenientes do modelo de reanálise atmosférica NCEP/NCAR para avaliar sua influência sobre o volume e extensão do gelo marinho no Oceano Austral, Zhang (2007) constatou por meio de modelos acoplados que o aumento da precipitação tende a incrementar o crescimento de gelo marinho com o aumento na profundidade da neve. Ao iniciar posteriormente o processo de derretimento desta neve, houve uma redução da salinidade e densidade no estrato superior do oceano, levando a uma redução do revolvimento convectivo e o transporte de calor ascendente associado, resultando baixas temperaturas no estrato superior do oceano.

Posteriormente, as pesquisas começaram a discutir sobre a influência do SAM (*Southern Hemisphere Annular Mode*) no Continente Antártico. O SAM consiste em um modo dominante de variabilidade na circulação atmosférica no Hemisfério Sul e está relacionado a uma alteração na massa atmosférica e, portanto, da pressão do nível do mar entre altas e médias latitudes (Gong & Wang, 1998). Na Península Antártica o aumento no índice do SAM induz um fluxo mais forte de ar relativamente quente de origem oceânica em sua direção pela face oeste, forçando-o a transpor a cadeia de montanhas ininterruptas e levando a um aquecimento acentuado na parte leste da península (Marshall *et al.*, 2006). Este fenômeno pode causar um aquecimento acentuado sobre esta região do Continente Antártico.

Ao utilizar dados do modelo de reanálise atmosférica NCEP/NCAR entre o período de 1979 a 2004 no modelo acoplado ORCA2-LIM, a análise da significância pelo Teste de Monte Carlo entre a extensão do gelo marinho no inverno e os modos de variabilidade atmosférica SAM, ENSO (*El Niño Southern Oscillation*) e SAO (*SemiAnnual Oscillation*) não apresentaram correlação estatística em todo Oceano Austral (Lefebvre & Goosse, 2008).

Porém, ao analisar setorialmente foi constatada nos meses de setembro de 1979 a 2004 uma correlação negativa entre a extensão do gelo marinho do Mar de Weddell com a dos Mares de Amundsen e Bellingshausen. Nestas regiões, identificaram mudanças no padrão da pressão atmosférica influenciando os ventos, conseqüentemente, na velocidade de expansão do gelo marinho. No Mar de Weddell a extensão do gelo marinho é máxima uma vez que se encontrou uma anomalia de baixa pressão que induz o vento da direção sul, empurrando o gelo para o norte (Lefebvre & Goosse, 2008). Este deslocamento do gelo marinho para o norte está ligado à estação de crescimento do gelo, compreendida entre os meses de abril a setembro. Já nos Mares de Amundsen e Bellingshausen encontramos padrões de pressão atmosférica opostos aos encontrados no Mar de Weddell, podendo ser visualizado na figura 2.

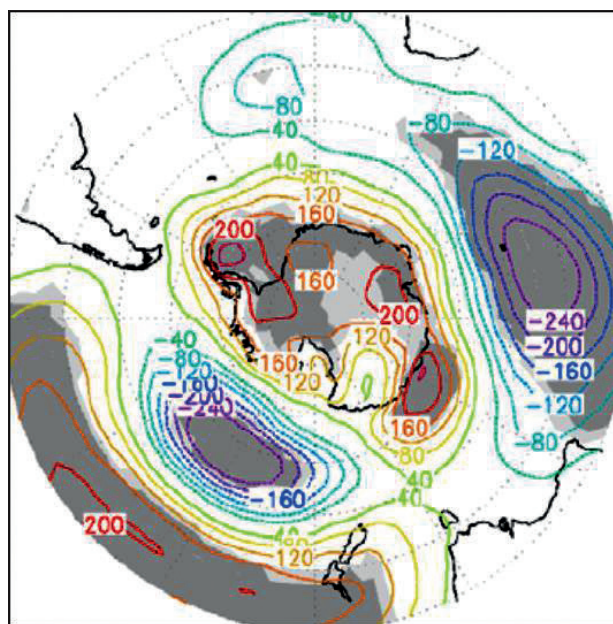


Figura 2 Superfície de pressão atmosférica sobre o Continente Antártico (NCEP/NCAR, em Pa, compreendendo o período de 1979 a 2004, nos meses de agosto a setembro). Fonte: Lefebvre & Goosse (2008).

Corroborando com Lefebvre & Goosse (2008), Hosking *et al.* (2013) avaliaram a relação da pressão atmosférica com a variabilidade sazonal do gelo marinho nos Mares de Amundsen e Bellingshausen entre 1979 e 2011. Ao aplicar o teste T de Student (intervalo de confiança de 95%), constata-

ram neste período uma oscilação semestral (inverno e verão) da posição longitudinal da zona de baixa pressão atmosférica, afetando no clima da Antártica Ocidental e no oceano circundante através da sua influência em parâmetros meteorológicos (velocidade do vento, TAS e precipitação pluviométrica) e na concentração do gelo marinho.

Pezza *et al.* (2012) em seu estudo referente à relação climática entre o SAM e a extensão do gelo marinho no Oceano Austral, analisaram a correlação dos dados espaciais de extensão do gelo marinho em relação a presença de ciclones de alta latitude, fluxo e anomalias do vento. No Mar de Bellingshausen e na região oeste do Mar de Weddell observaram-se correlações negativas significativas entre o aumento da extensão de gelo e a polaridade positiva do SAM. Esta relação pode estar sendo influenciada pelos ciclones mais intensos que podem quebrar e transportar o gelo marinho a outras regiões (Pezza *et al.*, 2012).

Em pesquisa recente Turner *et al.* (2016) avaliaram a relação da pressão atmosférica sobre a extensão do gelo marinho na região oeste do Continente Antártico entre 1979 a 2013. Nesta região identificou-se um comportamento bipolar na extensão do gelo entre o Mar de Ross e o Mar de Bellingshausen devido a anomalias no componente eólico ligadas ao ASL (*Amundsen Sea Low*). O ASL é um centro de pressão ao nível médio do mar, localizado entre as latitudes 60° e 70° S, com forte interação entre a orografia do Continente Antártico e ventos da direção oeste que atuam sobre o Oceano Austral (Baines & Fraedrich, 1989).

### 3.2 Temperatura da Superfície do Mar

Ledley & Huang (1997) examinaram a concentração de gelo no Mar de Ross entre 1982 e 1994, período que cobriu três episódios de ENSO. Os autores concluíram que ocorre uma diferença estatisticamente significativa (intervalo de confiança em 99%) entre a TSM e a concentração do gelo marinho, com anomalias de temperaturas quentes e frias correspondendo a variações na concentração do gelo marinho. A correlação máxima ( $R = 0,72$ ) entre as variáveis do gelo marinho e temperatura ocorreu com um retardo de três meses após o início do ENSO. Da mesma forma, no paralelo 50° S os autores encontraram um pico negativo na correlação ( $R = -0,70$ ), localizado a leste do Mar de Ross, apresentando um retardo na

apresentação das anomalias da TSM e o SOI (*Southern Oscillation Index*) entre 2 a 3 meses.

Estas mudanças observadas no Oceano Austral são os resultados do delicado equilíbrio entre vários processos: resposta termodinâmica à radiação, mudanças na intensidade do SAM, estratificação e transporte de calor oceânico e modificação do transporte de gelo marinho. O efeito líquido de todos esses elementos à TSM, extensão do gelo marinho ou formação de águas profundas, possuem diferentes respostas quando se analisa diferentes períodos (Goosse *et al.*, 2009). Por exemplo, Liu *et al.* (2004) detectaram tendências crescentes na extensão total do gelo marinho na Antártica no período de 1979 a 2002, constatando que durante o modo positivo do SAM há ampliação da extensão do gelo marinho na região leste do Mar de Ross e no Mar de Amundsen, e retração no Mar de Bellingshausen e ao norte do Mar de Weddell, enquanto os ciclos de ENSO apresentam situações opostas.

Já Zhang (2007) avaliou o impacto da TSM sobre o volume e extensão do gelo marinho de 1979 a 2004 por meio dos dados da reanálise atmosférica NCEP/NCAR e HadISST (*Hadley centre global sea Ice and Sea Surface Temperature*), respectivamente. O autor observou que a natureza do fenômeno da ampliação do gelo marinho na Antártica em um ambiente aquecido é o resultado de uma reação sequencial. Com alta correlação ( $R = 0,90$ ) entre a TAS e a radiação de ondas longas sobre a superfície, o aumento destas ocasiona elevação da TSM e a taxa de crescimento do gelo diminui, ocasionando uma redução na rejeição de sal do gelo novo e, portanto, na salinidade e densidade do oceano no estrato superior. Isto afeta a circulação termohalina e o enfraquecimento convectivo, reduzindo o transporte de calor do fundo do oceano para cima, tendo pouco calor disponível para derreter o gelo marinho. Por isso, que o transporte total de calor oceânico ascendente e o fluxo total de calor oceânico estão intimamente correlacionados ( $R = 0,83$ ).

Simpkins *et al.* (2012) avaliaram por meio do coeficiente de correlação linear entre os componentes principais o comportamento da concentração do gelo marinho na Antártica em relação ao SAM, no período de 1980 a 2008 e ao longo das quatro estações do ano. Nos períodos de inverno e primavera se encontraram as maiores correlações ( $R = 0,63$  para SAM e  $R = -0,60$  para ENSO, respectivamente).

te, ao intervalo de confiança de 95%) entre a concentração do gelo marinho Antártico e episódios de SAM. Também encontraram correlações com as outras estações do ano, porém, com menor magnitude. Esta perturbação na formação do gelo marinho está relacionada aos fluxos de calor anômalos afetando na TSM.

Ao analisar a circulação oceânica próximo as plataformas de gelo marinho, identifica-se que a ASBW (*Antarctic Continental Shelf Bottom Water*) possui um padrão distinto regional na temperatura e salinidade. Schmidtko *et al.* (2014) detectaram em sua pesquisa que nas plataformas dos Mares de Bellingshausen e Amundsen houve um significativo aquecimento ( $0,1^\circ$  a  $0,3^\circ\text{C}$  por década) e salinização ( $0,01$  a  $0,04$  g por década) desde 1990. A região

ocidental do Mar de Weddell apresenta um pequeno arrefecimento ( $-0,05^\circ \pm 0,04^\circ\text{C}$  por década) e des-salinização ( $-0,01 \pm 0,007$  g por década). A ligação entre as mudanças nas propriedades do ASBW e o CDW (*Circumpolar Deep Water*) estão associadas ao relevo continental. A CDW pode ser categorizada em dois regimes, inclinado para cima ou para baixo na direção da plataforma. Nos Mares de Amundsen e Bellingshausen encontramos ventos ciclônicos com o centro dos sistemas de baixa pressão sobre a plataforma continental, causando a inclinação para cima das isotermas, independente da direção do vento (leste ou oeste) (Figura 3 A). Já os Mares de Weddell e Ross estão sujeitos a fortes ventos ciclônicos da direção leste sobre o gelo marinho em formação, inclinndo para baixo as isotermas (Figura 3 B).

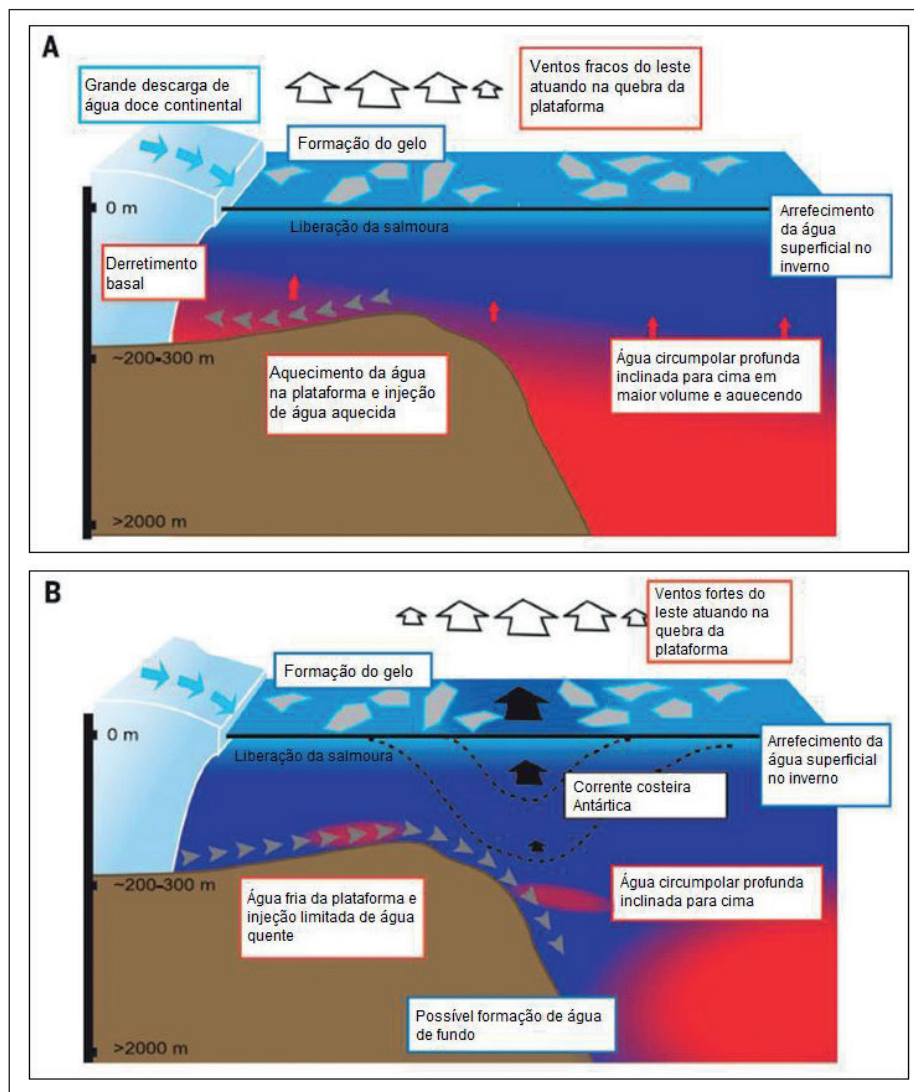


Figura 3 Diferenças esquemáticas de massas de água na plataforma. Fonte: Adaptado de Schmidtko *et al.* (2014).

### 3.3 Temperatura do Ar na Superfície

A TAS também é um dos principais parâmetros que determinam a distribuição da cobertura de gelo marinho. Por exemplo, a retração recorde na extensão do gelo marinho no Mar de Bellingshausen entre 1991 e 1998 deve-se ao vento sul e as altas TAS a oeste da Península Antártica em 1989. Este evento foi precedido por uma ampliação na extensão de gelo marinho registrada entre 1986 e 1987 (Jacobs & Comiso, 1993). Ao realizar uma regressão linear com dados anuais de extensão de gelo marinho do Mar de Bellingshausen por meio de dados do ESMR (1973-76), SMMR (1978-87) e SSM/I (1987-94) com a TAS da Estação de Faraday-Rothera, Jacobs & Comiso (1997) observaram que o aumento de 1°C da TAS corresponde a uma redução de  $0,11 \times 10^6$  Km<sup>2</sup> de gelo marinho, com uma correlação (R) em 0,77 no intervalo de confiança de 99%.

No Continente Antártico encontram-se regiões cobertas pelo gelo marinho pluri-anual e nestes locais podemos encontrar águas abertas em meio à banquisas e gelo fixo, sem formato linear, denominadas de polínias (Simões, 2004). Nihashi & Ohshima (2015) avaliaram a correlação do volume diário de gelo marinho produzido nas treze maiores polínias costeiras do Continente Antártico sob diferentes condições atmosféricas obtidas pelo ERA-Interim por meio da regressão linear múltipla, ao intervalo de confiança de 99,5%. Os resultados apresentaram correlação positiva com a umidade relativa do ar ( $\beta \leq 0,73$ ) e velocidade do vento ( $\beta \leq 0,35$ ), porém correlação negativa com a TAS ( $\beta \geq -0,75$ ). Já nas polínias que possuem ação dos ventos cabáticos verificou-se que nenhum dos três parâmetros foram suficientes para explicar o volume de gelo marinho produzido diariamente ( $R^2 \leq 0,30$ ), pois este parâmetro não consegue ser reproduzido acuradamente pelo modelo de reanálise atmosférica.

Já Lindemann & Justino (2015) analisaram a variação sazonal da TAS correlacionando com a AAO (*Antarctic Oscillation*) durante o período de 1989 a 2009 no Continente Antártico por meio do teste T de Student, aos níveis de significância de 1% e 5%. Para ambos os níveis de significância foram encontradas correlações positivas entre as TAS e a

AAO na Península Antártica e Ilhas Shetland do Sul durante os períodos de outono, inverno e primavera austral. Já durante o verão austral, a AAO apresentou correlação negativa para a variação da TAS principalmente para as regiões do Mar de Weddell, Oceano Índico e setor oriental da Antártica. Nas regiões do Mar de Ross, Península Antártica e Ilhas Shetland do Sul não foram observadas variações significativas associadas com a AAO nesta estação.

Uma forte ligação entre a TAS e a área coberta por gelo marinho no Hemisfério Sul também foi constatada por Comiso (2016) em análises quantitativas. Avaliando a dispersão das médias mensais entre 1981 a 2016 da área coberta por gelo marinho com a TAS derivada do sensor AVHRR (*Advanced Very-High-Resolution Radiometer*), constata-se um alto valor de correlação linear (R= -0,94) para a Antártica e os seguintes valores para os setores: Mar de Weddell (-0,90), Oceano Índico (-0,94), Oceano Pacífico Ocidental (-0,92), Mar de Ross (-0,93) e Mares de Bellingshausen e Amundsen (-0,89).

As alterações no comportamento climático constatadas pelos modelos de reanálise atmosférica podem ser validadas em trabalhos científicos, como Comin & Justino (2017). Os autores avaliaram alterações climatológicas na TAS e componente eólico nas Ilhas Shetland do Sul e na Península Antártica Oriental e Ocidental através de dados de estações meteorológicas automáticas distribuídas pela região. Nas estações meteorológicas de Bellingshausen e Jubany, localizadas nas Ilhas Shetland do Sul, os autores observaram um aumento de temperatura de 0,8°C e 1°C durante o período, mas nenhuma alteração significativa na velocidade do vento. Porém, nas outras regiões ocorreram mudanças na TAS e no componente eólico, com destaque para a parte oriental da Península Antártica onde houve aquecimento de 1,7°C na estação meteorológica Esperanza ao longo de 56 anos e 3,2°C na estação de Faraday ao longo de 63 anos, acompanhado com variações na velocidade do vento meridional e zonal.

### 3.4 Componente Eólico

As tendências do movimento do gelo marinho são dominadas pelos ventos e podem contribuir sig-

nificativamente para a distribuição da concentração de gelo, efeitos dinâmicos e termodinâmicos, reforçando a necessidade de uma melhor compreensão das mudanças do componente eólico (Holland & Kwok, 2012). Lefebvre *et al.* (2004) empregaram um modelo acoplado para identificar o comportamento do gelo marinho a partir de dados diários de temperatura do ar a 2 m e componentes do vento a 10 m advindos da reanálise atmosférica NCEP/NCAR. Lefebvre *et al.* (2004) identificaram que nos Mares de Weddell, Ross, Amundsen e Bellingshausen o padrão de pressão atmosférica associada ao SAM induz a ventos meridionais, circulando o ar mais quente nas regiões do Mar de Weddell e ao redor da Península Antártica, e o ar mais frio nos Mares Amundsen e Ross. Isto implica uma resposta bipolar do gelo marinho ao SAM, com uma diminuição na média de área coberta por gelo no Mar de Weddell e ao redor da Península Antártica e um aumento nos Mares de Ross e Amundsen durante os anos com um índice alto de SAM. Porém, a longo prazo a área coberta por gelo marinho não parece estar correlacionada com a tendência no índice SAM.

Harangozo (2006) avaliou em seu trabalho a influência do vento proveniente da circulação atmosférica meridional sobre a extensão do gelo marinho na região oeste da Península Antártica, no mês de agosto, entre os anos de 1979 a 2001. O autor verificou que o aumento da extensão de gelo está fortemente correlacionada à deriva do gelo e induzida pelo vento meridional ( $R= 0,74$  para longitude  $75^\circ$  W e  $R= 0,70$  para  $70^\circ$  W, ao intervalo de confiança de 99% pelo teste T de Student, a partir de dados da extensão do gelo marinho derivados do sensor SS-M/I entre 1988 a 2001).

No Oceano Austral encontra-se a ACC que consiste em uma forte circulação oceânica contornando o Continente Antártico, fluindo continuamente para o leste e cercando a Antártica pelo oeste. Ao longo da linha de costa da Antártica, ao sul da ACC, encontramos dois grandes giros localizados no Mar de Weddell e Mar de Ross (Talley *et al.*, 2011). Analisando a correlação linear (intervalo de confiança de 99%) entre os dados referentes sobre o deslocamento do gelo marinho e o componente eólico obtido por meio do modelo de reanálise atmosférica ERA-

-Interim entre o período de 1992 a 2010, foi identificada uma correlação (R) média superior a 0,70 para o Setor Atlântico nos meses de abril a outubro. Além disso, foram constatadas acelerações no giro de Ross, sendo este, possivelmente o fator responsável pelo derretimento das placas de gelo no Mar de Ross. Já no Mar de Weddell houve uma diminuição da ciclicidade do gelo marinho evidenciando assim uma desaceleração do giro de Weddell, mas não conseguindo sozinha explicar o aquecimento da água de fundo da Antártica exportado para as regiões abissais do Atlântico (Holland & Kwok, 2012).

Ao analisar o comportamento da extensão do gelo marinho do Continente Antártico, Goosse & Zunz (2014) relaciona a discreta anomalia positiva a um mecanismo de estabilização em escala de tempo interanual. Este mecanismo pode estar associado ao transporte descendente do sal durante o processo de formação do gelo marinho, misturando-se com a água de fundo da Antártica. Devido a esta forte estratificação e com a presença de gelo marinho, um calor maior é armazenado em profundidade no oceano e o fluxo de calor oceânico vertical é reduzido, o que contribui para manter uma maior extensão de gelo. Consequentemente, a distribuição espacial na concentração do gelo é imposta por mudanças do vento que podem fornecer a perturbação inicial, alterando a interação gelo-oceano.

Holland (2014) investigou a relação da concentração e extensão do gelo marinho obtido por meio de dados derivados de satélites de micro-ondas passivo, entre 1979 a 2012, com informações sobre direção do vento fornecidas pelo modelo de reanálise do ERA-Interim. Os resultados demonstram uma tendência de expansão positiva ao longo do verão austral no Mar de Weddell. Já para no Mar de Bellingshausen encontra-se uma tendência oposta, persistindo até o início do inverno austral. Ao analisar os resultados, verifica-se no Mar de Weddell, durante o outono austral, uma aceleração da intensificação no avanço da borda de gelo associada à direção leste do vento e no inverno austral da direção noroeste. No Mar de Bellingshausen a ligação entre as tendências do vento e do gelo não são conclusivas, sendo que o ganho reduzido de gelo no inverno austral pode estar atribuído a ventos no sentido oeste, o que su-



gere uma redução na importação de gelo pelo leste, e o aumento da perda de gelo na primavera austral poderia ser causado pelo vento do sentido norte ocasionando a menor convergência de gelo.

Já Zhang (2014) realizou a análise da influência do componente eólico sobre o volume de gelo marinho entre 1979 a 2010 através do coeficiente de correlação pela transformada de Fisher, sob intervalo de confiança em 95%, utilizando dados de reanálise atmosférica NCEP/NCAR e HadISST. Foi observado que intensificando o vento ocorre um aumento na velocidade do gelo marinho ( $R=0,75$ ) e na convergência ( $R=0,78$ ) principalmente nos Mares de Weddell, Bellingshausen, Amundsen e Ross. A análise também apresentou dentro período um aumento da espessura do gelo (espessura > 2 m) no Oceano Austral, enquanto os volumes de gelo fino (espessura < 1 m) e gelo com espessura média ( $1\text{ m} \leq \text{espessura} \leq 2\text{ m}$ ) resultados inalterados. Assim, conseqüentemente, o aumento da espessura leva a um aumento no volume do gelo marinho no Oceano Austral, principalmente ao sul do Mar de Weddell. Além disso, o aumento na espessura do gelo marinho poderá incrementar em 0,91% ao ano sobre o volume, sendo significativamente maior em relação aos outros parâmetros como extensão (0,14 a 0,21 % ao ano) ou concentração (0,24 a 0,28 % ao ano).

Diante do exposto acima, a quadro 1 apresenta uma síntese de todos os parâmetros meteorológicos (pressão atmosférica e precipitação pluviométrica, TSM, TAS e componente eólico) que correlacionem estatisticamente com o comportamento do gelo marinho em relação à extensão, concentração e volume. Estes estudos utilizaram técnicas de sensoriamento remoto por micro-ondas passivo e modelos de reanálise atmosférica para a avaliação de seus dados.

#### 4 Conclusões e Recomendações

Este trabalho possibilitou analisar a influência dos principais fatores climáticos na formação, localização e duração do gelo marinho na Antártica com o emprego de sensores remotos e modelos de reanálise atmosférica. Identificaram-se sistematicamente nos trabalhos que os Mares de Ross, Amundsen, Bellingshausen e Weddell apresentam padrões distintos na

Parâmetros Meteorológicos	Parâmetros do Gelo Marinho	Autores	Fontes de Dados Remotos	Técnica Estatística
TAS e componente eólico	Extensão	Jacobs & Comiso (1993)	ESMR, SMMR e SSM/I	Correlação linear
TAS	Extensão	Jacobs & Comiso (1997)	ESMR, SMMR e SSM/I	Correlação linear
TSM	Concentração	Ledley & Huang (1997)	NMC, SMMR e SSM/I	Correlação linear
TSM, TAS e pressão atmosférica	Extensão	Lefebvre et al. (2004)	NCEP/NCAR	Correlação linear
TAS, pressão atmosférica e componente eólico	Concentração	Liu et al. (2004)	NCEP/NCAR, SMMR e SSM/I	Correlação linear
Componente eólico	Extensão	Harangozo (2006)	ERA-40, SMMR e SSM/I	Teste T de Student
TAS e pressão atmosférica	Extensão	Marshall et al. (2006)	ERA-40 e SSM/I	Correlação linear
TSM, TAS e precipitação pluviométrica	Extensão e volume	Zhang (2007)	HadISST e NCEP/NCAR	Correlação linear
Pressão atmosférica e componente eólico	Extensão	Lefebvre & Goosse (2008)	NCEP/NCAR	Teste de Monte Carlo
Componente eólico	Concentração	Holland & Kwok (2012)	ERA-Interim e SSM/I	Correlação linear
Pressão atmosférica e componente eólico	Extensão	Pezza et al. (2012)	NCEP2, ERA-40, JRA25, SMMR e SSM/I	Correlação linear
Pressão atmosférica	Concentração	Simpkins et al. (2012)	NCEP/NCAR, SMMR e SSM/I	Coefficiente de correlação linear entre as componentes principais
Pressão atmosférica	Concentração e extensão	Hosking et al. (2013)	ERA-Interim, SMMR, SSM/I e SSMIS	Teste T de Student
Componente eólico	Concentração	Holland (2014)	ERA-Interim, SMMR, SSM/I e SSMIS	Correlação linear
Componente eólico	Concentração e volume	Zhang (2014)	HadISST e NCEP/NCAR	Correlação pela transformada de Fisher
Umidade relativa do ar, TAS e componente eólico	Extensão e volume	Nihashi & Ohshima (2015)	ERA-Interim, NCEP/ CFSR e AMSR-E	Regressão linear múltipla
TAS	Extensão	Comiso (2016)	AVHRR, SMMR e SSM/I	Correlação linear
Pressão atmosférica e componente eólico	Concentração e extensão	Turner et al. (2016)	ERA-Interim, SMMR, SSM/I e SSMIS	Correlação linear

Quadro 1 Resumo das pesquisas que apresentam correlação de variáveis climáticas no comportamento do gelo marinho utilizando dados obtidos pelo sensoriamento remoto por micro-ondas passivo e modelos de reanálise atmosférica.

formação, extensão e concentração do gelo marinho em episódios de SAM, evento onde são encontradas anomalias no comportamento padrão das variáveis meteorológicas (pressão atmosférica e precipitação pluviométrica, TSM, TAS e componente eólico). Em episódios com modo positivo de SAM, há uma maior concentração e extensão de gelo marinho na região leste do Mar de Ross e Mar de Amundsen, e menor no Mar de Bellingshausen e ao norte do Mar de Weddell.

Ao considerar o emprego de sensores remotos na Antártica, identificam-se limitações do sensoriamento remoto óptico nesta região devido à falta de luminosidade solar durante o dia no inverno e pela nebulosidade frequente encontrada durante o verão, sendo estes problemas superados com o uso de sensores remotos por micro-ondas passivo. Estes sensores permitem obter séries temporais da extensão e concentração do gelo marinho, destacando-se os sensores ESMR, SMMR, SSM/I e SSMIS com dados de temperatura de brilho disponíveis desde 1973. Ao utilizar estes dados para avaliar aspectos dimensionais da formação do gelo marinho (concentração, extensão e volume) em relação às condições climáticas, destaca-se nos trabalhos avaliados a utilização dos modelos de reanálise atmosférica ERA-Interim e NCEP/NCAR predominantemente.

Outro aspecto constatado é a escala de análise das regiões de estudo, sendo que a maioria dos trabalhos utilizam o Oceano Austral ou sua setorização por mares. Esta escala está relacionada principalmente com a resolução espacial do *pixel* (25 Km x 25 Km) dos sensores remotos apresentados. Neste sentido, uma técnica complementar que pode ser recomendada para melhorar a acurácia do mapeamento é a análise *subpixel*, utilizando para análise assinaturas espectrais de componentes puros provenientes de sensores remotos com resolução espacial superior, possibilitando assim estudos regionalizados. Além disso, como a atmosfera não se comporta como entidade única em todo Oceano Austral, necessitam-se estas avaliações regionalizadas para avaliar o comportamento do gelo marinho sob diferentes condições meteorológicas.

Nos artigos analisados constata-se o predomínio da estatística univariada, correlacionando determinado fator climático com o comportamento de

determinado parâmetro do gelo marinho, para um determinado mar ou setor do Oceano Austral. Portanto, recomendam-se pesquisas que apresentem em sua metodologia análises estatísticas multivariadas por meio da regressão múltipla, possibilitando estabelecer a correlação e previsão das alterações do comportamento de determinado parâmetro do gelo marinho em detrimento da interação entre as diferentes variáveis meteorológicas.

## 5 Agradecimentos

Os autores agradecem ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul (IFRS), a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de financiamento 001, e ao Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) pelo fomento ao desenvolvimento desta pesquisa.

## 6 Referências

- Baines, P.G. & Fraedrich, K. 1989. Topographic effects on the mean tropospheric flow patterns around Antarctica. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 46 (22): 3401-3415.
- Blank, D.M.P. 2009. *Relação entre a concentração de gelo marinho Antártico e a temperatura mínima na América do Sul*. Programa de Pós-Graduação em Meteorologia, Universidade Federal de Pelotas, Dissertação de Mestrado, 116 p.
- Bracegirdle, T.J. & Marshall, G.J. 2012. The reliability of Antarctic tropospheric pressure and temperature in the latest global reanalyses. *Journal of Climate*, 25 (20): 7138-7146.
- Cavalieri, D.J.; Gloersen, P.; Parkinson, C.L.; Comiso, J.C. & Zwally, H.J. 1997. Observed hemispheric asymmetry in global sea ice changes. *Science*, 278 (5340): 1104-1106.
- Comin, A.N. & Justino, F. 2017. Investigação Climatológica na Península Antártica e no Arquipélago das Shetland do Sul. *Anuário do Instituto de Geociências*, 40 (2): 74-81.
- Comiso, J.C. 2016. Global changes in the sea ice cover and associated surface temperature changes. In: INTERNATIONAL SOCIETY FOR PHOTOGRAMMETRY AND REMOTE SENSING, 23, Prague, 2016. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Prague, ISPRS, p. 469-479.
- Cook, A.J.; Fox, A.J.; Vaughan, D.G. & Ferrigno, J.G. 2005. Retreating glacier fronts on the Antarctic Peninsula over the past half-century. *Science*, 308 (5721): 541-544.
- Gong D. & Wang S. 1998. Antarctic oscillation: concept and applications. *Chinese Science Bulletin*, 43 (9): 734-738.

- Goosse, H. & Zunz, V. 2014. Decadal trends in the Antarctic sea ice extent ultimately controlled by ice-ocean feedback. *The Cryosphere*, 8 (2): 453-470.
- Goosse, H.; Lefebvre, W.; De Montety, A.; Crespin, E. & Orsi, A.H. 2009. Consistent past half-century trends in the atmosphere, the sea ice and the ocean at high southern latitudes. *Climate Dynamics*, 33 (7-8): 999-1016.
- Harangozo, S.A. 2006. Atmospheric circulation impacts on winter maximum sea ice extent in the west Antarctic Peninsula region (1979-2001). *Geophysical Research Letters*, 33 (2): 1-4.
- Holland, P.R. & Kwok, R. 2012. Wind-driven trends in Antarctic sea-ice drift. *Nature Geoscience*, 5: 872-875.
- Holland, P.R. 2014. The seasonality of Antarctic sea ice trends. *Geophysical Research Letters*, 41 (12): 4230-4237.
- Hosking, J.S.; Orr, A.; Marshall, G.J.; Turner, J. & Phillips, T. 2013. The influence of the Amundsen-Bellinghousen Seas low on the climate of West Antarctica and its representation in coupled climate model simulations. *Journal of Climate*, 26 (17): 6633-6648.
- Jacobs, S.S. & Comiso, J.C. 1993. A recent sea-ice retreat west of the Antarctic Peninsula. *Geophysical Research Letters*, 20 (12): 1171-1174.
- Jacobs, S.S. & Comiso, J.C. 1997. Climate variability in the Amundsen and Bellinghousen Seas. *Journal of Climate*, 10 (4): 697-709.
- Johannessen, O.M.; Shalina, E.V. & Miles, M.W. 1999. Satellite evidence for an Arctic sea ice cover in transformation. *Science*, 286 (5446): 1937-1939.
- Killworth, P.D. 1983. Deep convection in the world ocean. *Reviews of Geophysics*, 21 (1): 1-26.
- Ledley, T.S. & Huang, Z. 1997. A possible ENSO signal in the Ross Sea. *Geophysical Research Letters*, 24 (24): 3253-3256.
- Lefebvre, W. & Goosse, H. 2008. An analysis of the atmospheric processes driving the large-scale winter sea ice variability in the Southern Ocean. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 113 (C2): 1-15.
- Lefebvre, W.; Goosse, H.; Timmermann, R. & Fichet, T. 2004. Influence of the Southern Annular Mode on the sea ice-ocean system. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 109 (C9): 1-12.
- Lindemann, D.S. & Justino, F.B. 2015. A influência dos modos de variabilidade climática na temperatura em superfície na Antártica. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 30 (2): 214-222.
- Liu, J.; Curry, J.A. & Martinson, D.G. 2004. Interpretation of recent Antarctic sea ice variability. *Geophysical Research Letters*, 31 (2): 1-4.
- Mahrt, L. 1999. Stratified atmospheric boundary layers. *Boundary-Layer Meteorology*, 90 (3): 375-396.
- Marshall, G.J.; Orr, A.; Van Lipzig, N.P. & King, J.C. 2006. The impact of a changing Southern Hemisphere Annular Mode on Antarctic Peninsula summer temperatures. *Journal of Climate*, 19 (20): 5388-5404.
- Mata, M.M. & Garcia, C.A.E. 2011. Oceano Austral e o clima. In: GOLDEMBERG, J. (ed.). *Antártica e as mudanças globais: um desafio para humanidade*. Editora Blucher, p. 53-67.
- Meredith, M.P. & King, J.C. 2005. Rapid climate change in the ocean west of the Antarctic Peninsula during the second half of the 20th century. *Geophysical Research Letters*, 32 (19): 1-5.
- Nihashi, S. & Ohshima, K.I. 2015. Circumpolar mapping of Antarctic coastal polynyas and landfast sea ice: relationship and variability. *Journal of climate*, 28 (9): 3650-3670.
- Parkinson, C.L.; Cavalieri, D.J.; Gloersen, P.; Zwally, H.J. & Comiso, J.C. 1999. Arctic sea ice extents, areas, and trends, 1978-1996. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 104 (C9): 20837-20856.
- 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 (1-2): 57-73.
- Reynolds, R.W. & Smith, T.M. 1995. A High-Resolution Global Sea Surface Temperature Climatology. *Journal of Climate*, 8: 1571-1583.
- Schmidtke, S.; Heywood, K.J.; Thompson, A.F. & Aoki, S. 2014. Multidecadal warming of Antarctic waters. *Science*, 346 (6214): 1227-1231.
- Simões, J.C. 2004. Glossário da língua portuguesa da neve, do gelo e termos correlatos. *Pesquisa Antártica Brasileira*, 4: 119-154.
- Simões, J.C. 2011. O ambiente antártico: domínio de extremos. In: GOLDEMBERG, J. (ed.). *Antártica e as mudanças globais: um desafio para humanidade*. Editora Blucher, p. 15-27.
- Simpkins, G.R.; Ciasto, L.M.; Thompson, D.W. & England, M.H. 2012. Seasonal relationships between large-scale climate variability and Antarctic sea ice concentration. *Journal of Climate*, 25 (16): 5451-5469.
- Smith, D.M. 1998. Recent increase in the length of the melt season of perennial Arctic sea ice. *Geophysical Research Letters*, 25 (5): 655-658.
- Stammerjohn, S.E.; Martinson, D.G.; Smith, R.C. & Iannuzzi, R.A. 2008. Sea ice in the western Antarctic Peninsula region: Spatio-temporal variability from ecological and climate change perspectives. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 55 (18-19): 2041-2058.
- Talley, L.D.; Pickard, G.L.; Emery, W.J. & Swift, J.H. 2011. *Descriptive Physical Oceanography: an Introduction*. Oxford, Elsevier Ltd., 560p.
- Tastula, E.M.; Vihma, T.; Andreas, E.L. & Galperin, B. 2013. Validation of the diurnal cycles in atmospheric reanalyses over Antarctic sea ice. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118 (10): 4194-4204.
- Turner, J. & Colwell, S.R. 1995. Temporal variability of precipitation over the western Antarctic Peninsula. In: CONFERENCE ON POLAR METEOROLOGY AND OCEANOGRAPHY, 4, Dalas, 1995. Preprints, Boston, American Meteorological Society, p.113-116.
- Turner, J.; Hosking, J.S.; Marshall, G.J.; Phillips, T. & Bracegirdle, T.J. 2016. Antarctic sea ice increase consistent with intrinsic variability of the Amundsen Sea Low. *Climate Dynamics*, 46: 2391-2402.
- Zhang, J. 2007. Increasing Antarctic sea ice under warming atmospheric and oceanic conditions. *Journal of Climate*, 20 (11): 2515-2529.
- Zhang, J. 2014. Modeling the impact of wind intensification on Antarctic sea ice volume. *Journal of Climate*, 27 (1): 202-214.