



Impacto do Gelo Marinho Antártico, do ENOS e do Modo Anular Sul sobre as Frentes Frias na América do Sul
Impact of Antarctic Sea Ice, ENOS, and Southern Annular Mode on Cold Fronts in South America

Catharine Freire de Caldas¹; Fernanda Cerqueira Vasconcellos¹; Iracema Fonseca de Albuquerque Cavalcanti²; Natasha Oliveira de Carvalho¹ & Italo dos Reis Lopes³

¹Universidade Federal do Rio de Janeiro, Centro de Ciências Matemáticas e da Natureza, Instituto de Geociências, Departamento de Meteorologia, Av. Athos da Silveira Ramos 274, Bloco G, Cidade Universitária, 21941-916, Rio de Janeiro, RJ, Brasil

²Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos, Rodovia Presidente Dutra km 39, 12630-000, Cachoeira Paulista, São Paulo, Brasil

³Universidade Federal do Rio de Janeiro, Centro de Tecnologia, Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, Departamento de Engenharia Naval e Oceânica. Av. Athos da Silveira Ramos 149, Bloco C, Sala 203, Cidade Universitária, 21941-916, Rio de Janeiro, RJ, Brasil

Emails: catharinefreire@hotmail.com; fernandasvasconcellos@igeo.ufrj.br;

iracema.cavalcanti@gmail.com; decarvalho.natasha@gmail.com; italoreislopes@gmail.com

Recebido em: 20/05/2020 Aprovado em: 10/10/2020

DOI: http://dx.doi.org/10.11137/2020_4_229_237

Resumo

Padrões de teleconexões, tais como El Niño-Oscilação Sul (ENOS) e o Modo Anular Sul (SAM) afetam a circulação e, conseqüentemente, o clima da América do Sul. Alguns trabalhos mostram que esses padrões podem estar relacionados a variações na ocorrência de sistemas transientes, tais como, as frentes frias. A extensão de gelo marinho antártico também afeta a circulação em todo o Hemisfério Sul. Porém, não há um estudo analisando os impactos em conjunto do ENOS, do SAM e do gelo marinho antártico na atuação das frentes frias na América do Sul. Desta forma, o objetivo deste trabalho foi avaliar a frequência de frentes frias na América do Sul nos anos com anomalias do gelo marinho antártico nos mares de Bellingshausen-Amundsen (MBA) e Weddel (MWD) em conjunto com a atuação das fases do SAM e do ENOS. Os resultados apresentam diferença nas atuações das frentes entre o continente e o Oceano Atlântico adjacente. Em geral, para ambos os mares analisados, é possível notar a atuação da La Niña e SAM positivo em todas as análises de frequências máximas de frentes frias sobre o oceano, variando somente a extensão do gelo marinho. No continente, o El Niño junto com a fase negativa do SAM domina as máximas frequências de frentes em ambas as extensões de gelo marinho no MBA e combinado com máxima extensão de gelo marinho no MWD. As diferenças entre o oceano e continente indicam que os três fatores (SAM, ENOS e gelo marinho) influenciam na trajetória das frentes, mais meridional e continental ou então mais marítima.

Palavras-chave: *sistemas frontais; gelo marinho antártico; padrões de teleconexão*

Abstract

Teleconnection patterns, such as El Niño-Southern Oscillation (ENSO) and the Southern Annular Mode (SAM), affect circulation and, consequently, the South American climate. Some studies show that these patterns might be related to variations in transient systems (e.g., cold fronts) frequency. The extent of Antarctic sea ice also affects circulation throughout the Southern Hemisphere. However, there is no study analyzing the combined impacts of ENOS, SAM, and Antarctic sea ice on the cold fronts in South America. The goal of this paper was to evaluate the frequency of cold fronts in South America in the years with anomalies of the Antarctic sea ice extent in the Bellingshausen-Amundsen (MBA) and Weddel (MWD) seas together with the SAM and ENOS phases. The results show a difference in the cold front frequency between the continent and the adjacent Atlantic Ocean. In general, for both seas analyzed, we can see maximum front frequencies over the ocean on the La Niña and SAM positive analyzes, varying only the extent of sea ice. On the continent, El Niño and the negative phase of SAM dominates the maximum cold front frequencies in both minimum and maximum sea ice extensions in the MBA but combined only with the maximum sea ice extension in the MWD. The differences between the ocean and the continent indicate that the three factors (SAM, ENSO, and sea ice extent) influence the trajectory of the fronts, more meridional and continental, or more maritime.

Keywords: *frontal systems; Antarctic sea ice; teleconnection patterns*

1 Introdução

Os sistemas frontais afetam a América do Sul durante todo o ano (Andrade, 2005), influenciando o tempo e o clima sobre este continente e algumas vezes causando geadas e friagens no Sudeste e Sul do Brasil (Cavalcanti & Kousky, 2009). Os fenômenos de teleconexões também possuem impactos sobre o clima deste continente tanto de leste-oeste, quanto de norte-sul (Cavalcanti & Ambrizzi, 2009).

O El Niño-Oscilação Sul (ENOS) é um importante padrão de teleconexão que tem impactos em todo planeta, inclusive na América do Sul. Esse fenômeno ocorre através de uma alteração no sistema oceano-atmosfera na região do Pacífico tropical (Phinlander, 1990; Trenberth, 1997). Os períodos positivos do ENOS (El Niño) ocorrem quando há o aquecimento anormal na temperatura superficial e sub-superficial das águas do Pacífico equatorial central e leste, já na fase negativa (La Niña) ocorre o oposto, isto é, o resfriamento anormal dessas águas (Phinlander, 1990; Trenberth, 1997). Alguns trabalhos como o de Vera *et al.* (2004) e Tedeschi *et al.* (2013) relacionam os impactos do ENOS ao regime de precipitação na América do Sul, considerando suas fases positivas ao valor abaixo do normal da precipitação no norte e nordeste da América do Sul, e acima no Sudeste da América do Sul (SEAS). Na La Niña, os inversos na precipitação são observados. No entanto, seus impactos na precipitação no restante do continente não são claros.

A Oscilação Antártica (*Antarctic Oscillation*) ou Modo Anular do Sul (*Southern Hemisphere Annular Mode* - SAM) é o principal modo de variabilidade climática que afeta a região extratropical no Hemisfério Sul, sendo caracterizado como uma “gangorra” de massa entre as latitudes médias e polares (Thompson & Wallace, 2000). Gillet *et al.* (2006) demonstraram impactos do SAM na América do Sul, relacionando a fase positiva do SAM a um significativo aquecimento na Argentina e secas no sul do continente mencionado. Vasconcelos *et al.* (2019) analisaram o impacto, mês a mês, das fases do SAM na América do Sul. Os resultados indicam que o SEAS e parte das Regiões Sudeste e Centro-Oeste do Brasil são as regiões mais afetadas pelo SAM. Entretanto, seu impacto difere mês a mês e nem sempre há uma influência oposta entre as fases do SAM.

As mudanças na extensão de gelo marinho podem afetar todo o planeta, evidenciando a complexidade nas interações no sistema gelo-atmosfera. O gelo marinho possui inúmeros efeitos marcantes no Hemisfério Sul (Yuan & Martinson, 2000). Estudos recentes fazem análises das extensões de gelo marinho e seus impactos nos principais padrões de teleconexões. Pezza *et al.* (2012) verificaram as correlações de extensão de gelo marinho Sul no SAM

e ENOS, apontando correlação positiva (negativa) do ENOS (SAM) na maior parte dos Mares de Bellingshausen-Amundsen (MBA) e Weddel (MWD).

Alguns trabalhos mostram a relação do ENOS e do SAM, isoladamente, nas frentes frias na América do Sul (e.g. Fedorova & Carvalho, 2000; Reboita *et al.*, 2009). Entretanto, não há estudos que mostrem a relação conjunta desses modos de variabilidade e da influência da extensão do gelo marinho antártico nas frentes frias que atuam no continente. Uma vez que ambos os padrões possuem relação entre si e também influenciam o gelo marinho Antártico, espera-se que diferentes combinações desses três fatores (SAM, ENOS e gelo marinho) possam influenciar nas frentes frias que chegam ao continente.

Com isso, o presente trabalho tem como objetivo identificar os impactos das anomalias de gelo marinho antártico combinada com a atuação das fases do SAM e do ENOS nas frequências de frente frias da América do Sul. Na Seção 2, são abordados os dados e métodos utilizados para detecção objetiva das frentes frias e criação dos compostos. Na Seção 3, são apresentadas as análises e resultados para os MBA e MWD. As principais conclusões são abordadas na Seção 4.

2 Dados e Métodos

Neste estudo utilizou-se saídas a cada 6 horas da Reanálise Era-Interim do *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF), para o período de 1981-2010 (Dee *et al.*, 2011). As variáveis obtidas foram pressão atmosférica ao nível médio do mar, temperatura do ar e componente meridional do vento em 925 hPa. Essas saídas foram transformadas em médias diárias. Também foram utilizadas as séries temporais de extensão de gelo marinho antártico, que são determinadas a partir de estimativas de satélites, através do banco de dados e imagens do *National Snow and Ice Data Center* (NSIDC – Comiso, 2017). Para a identificação dos padrões de teleconexão, utilizou-se o índice ENOS (região Niño 3.4, disponível em <http://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/indices/>) e o índice SAM usado em Vasconcelos *et al.* (2019), obtido por comunicação pessoal.

Este trabalho contou com a metodologia de detecção de frentes frias baseada no trabalho de Andrade (2005) e de outras literaturas, como Cavalcanti & Kousky (2003) e Dereczynski *et al.* (2019). Os critérios estabelecidos para a identificação automática das frentes frias neste trabalho foram que houvesse, no intervalo de um dia para o outro, queda da temperatura do ar em 925 hPa de no mínimo 2°C, aumento da pressão ao nível médio do mar maior que 2 hPa e a mudança na componente meridional do vento em 925 hPa de norte (negativo) para de sul (positivo). Para a

elaboração desse método objetivo que detectasse frentes para cada ponto de grade da América do Sul, um programa utilizando a linguagem computacional python – jupyter foi criado baseado no programa usado em Dereczynski *et al.* (2019). Os dados em cada ponto de grade da região (50°S-10°N e 85°-30°W) foram transformados em matrizes (tamanho referente a latitude e longitude) em cada saída de média diária do mês correspondente. O programa realizou uma busca em cada ponto de grade onde os critérios da frente fria fossem obedecidos; foi somado o valor 1 ao ponto correspondente em uma matriz de mesmo tamanho. Essa matriz inicialmente continha em cada ponto o valor zero. Quando os critérios ocorreram em mais de um dia seguido no mesmo ponto de grade, foi contabilizado como a mesma frente (somado somente 1 na matriz de frequência mensal). A data da frente foi considerada como o dia em que a frente iniciou naquele ponto de grade. Ou seja, caso uma frente em um ponto de grade tenha iniciado no final de um mês e terminado no início do mês seguinte, ela foi contabilizada como do mês em que ela iniciou. O cálculo da frequência mensal de frentes frias em cada ponto de grade foi realizado para os 30 anos (1981-2010).

De acordo com Cavalieri & Parkinson (2008), o período com maior extensão de gelo ocorre no mês de setembro, com uma média climatológica de 17.500.000 km² a 18.900.000 km². Durante esse mês de maior concentração, a área de cobertura de gelo marinho supera a do próprio continente antártico, que possui aproximadamente 14.000.000 km² (Wadhams, 2000). Por esta razão, esse mês foi escolhido para a avaliação das frentes frias, através de compostos. Para a construção desses compostos, foram utilizadas anomalias do gelo marinho Antártico média na região do MBA (130° W a 60° W) e MWD (60°W a 0°). O MWD atinge até a longitude 20°E (Cavalieri & Parkinson, 2008), porém neste trabalho, optou-se por fazer a média da extensão do gelo do MWD até 0°, para manter áreas de tamanho similares, focando o lado ocidental. A anomalia foi gerada em relação à climatologia de 1981-

2010. Esses valores foram considerados em conjunto com os índices SAM e ENOS, de forma a criar categorias com as três variáveis. Por exemplo, extremo máximo (anomalias positivas) de gelo marinho no MWD, com SAM positivo e El Niño; extremo mínimo (anomalias negativas) de gelo marinho no MWD, com SAM negativo e El Niño, etc. O teste t-student foi aplicado nos compostos, considerando um nível de confiança de 90% (Wilks, 2006), com exceção das categorias em que houve somente um ano.

3 Resultados

Os resultados estão divididos em duas seções, conforme as regiões do gelo marinho antártico (MBA e MWD, vide Seção 2).

3.1 Mar de Bellingshausen-Amundsen (MBA)

Para a identificação dos compostos, foram analisados os anos de anomalias de extensão do gelo marinho antártico para o MBA no mês de setembro, no período de 30 anos (1981-2010). Assim, foram organizadas e categorizadas as máximas (anomalia positiva) e mínimas (anomalia negativa) extensões de gelo marinho, em conjunto com padrões ENOS e SAM. Na análise em conjunto dos fenômenos de teleconexões e das anomalias de extensão de gelo marinho, houve casos em que os eventos não ocorreram, conforme o critério, como no caso de La Niña e SAM positivo na mínima extensão em setembro (Tabela 1). Analisando a Tabela 1, nota-se que as maiores frequências de máxima extensão de gelo marinho ocorrem em anos de SAM negativo com El Niño, enquanto que na mínima extensão, SAM negativo com La Niña. Esses resultados estão de acordo com Pezza *et al.* (2012), onde eles associam o SAM negativo com El Niño a uma maior extensão de gelo marinho Antártico no MBA e MWD.

MÁX EXT	SAM Positivo	SAM Negativo
El Niño	2004, 1986	1991, 2009, 1997, 1994
La Niña	1995, 2010	2000
MÍN EXT	SAM Positivo	SAM Negativo
El Niño	1982	2002, 2006, 1987
La Niña	-	1988, 2007, 1983, 1998, 1999

Tabela 1 Anos envolvendo extensão de gelo marinho no MBA em conjunto com os padrões de teleconexões ENOS e SAM para setembro. Nas células preenchidas com “-” não houve anos na categoria.

Impacto do Gelo Marinho Antártico, do ENOS e do Modo Anular Sul sobre as Frentes Frias na América do Sul

Catharine Freire de Caldas; Fernanda Cerqueira Vasconcellos; Iracema Fonseca de Albuquerque Cavalcanti;
Natasha Oliveira de Carvalho & Italo dos Reis Lopes

Ao observar os compostos em análise combinada dos padrões de teleconexões (SAM e ENOS) durante a máxima extensão de gelo marinho na MBA podemos notar poucas áreas com significância estatística. Em geral, a maior frequência de frentes na fase positiva do SAM em La Niña (Figura 1B) ocorre no Oceano Atlântico, inclusive apresentando significância onde estão localizados os maiores valores. Entretanto, a fase negativa do SAM e La Niña (Figura 1D) também possui algumas regiões com valores acima de 6 frentes por mês sobre o oceano

(não há significância estatística, pois esta figura apresenta somente setembro de 2000). No continente, duas categorias se destacam com valores altos de ocorrência de frentes: fase positiva do SAM em La Niña (Figura 1B) e fase negativa do SAM em El Niño (Figura 1C). Na primeira, há um avanço das frentes no lado leste do continente, com valores maiores de 2-3 frentes sobre o norte de Minas Gerais; avanço das frentes pelo Acre até o norte do Peru (média de uma frente por setembro). Entretanto, há poucas áreas significativas. Já na segunda categoria, há uma maior frequência de frentes

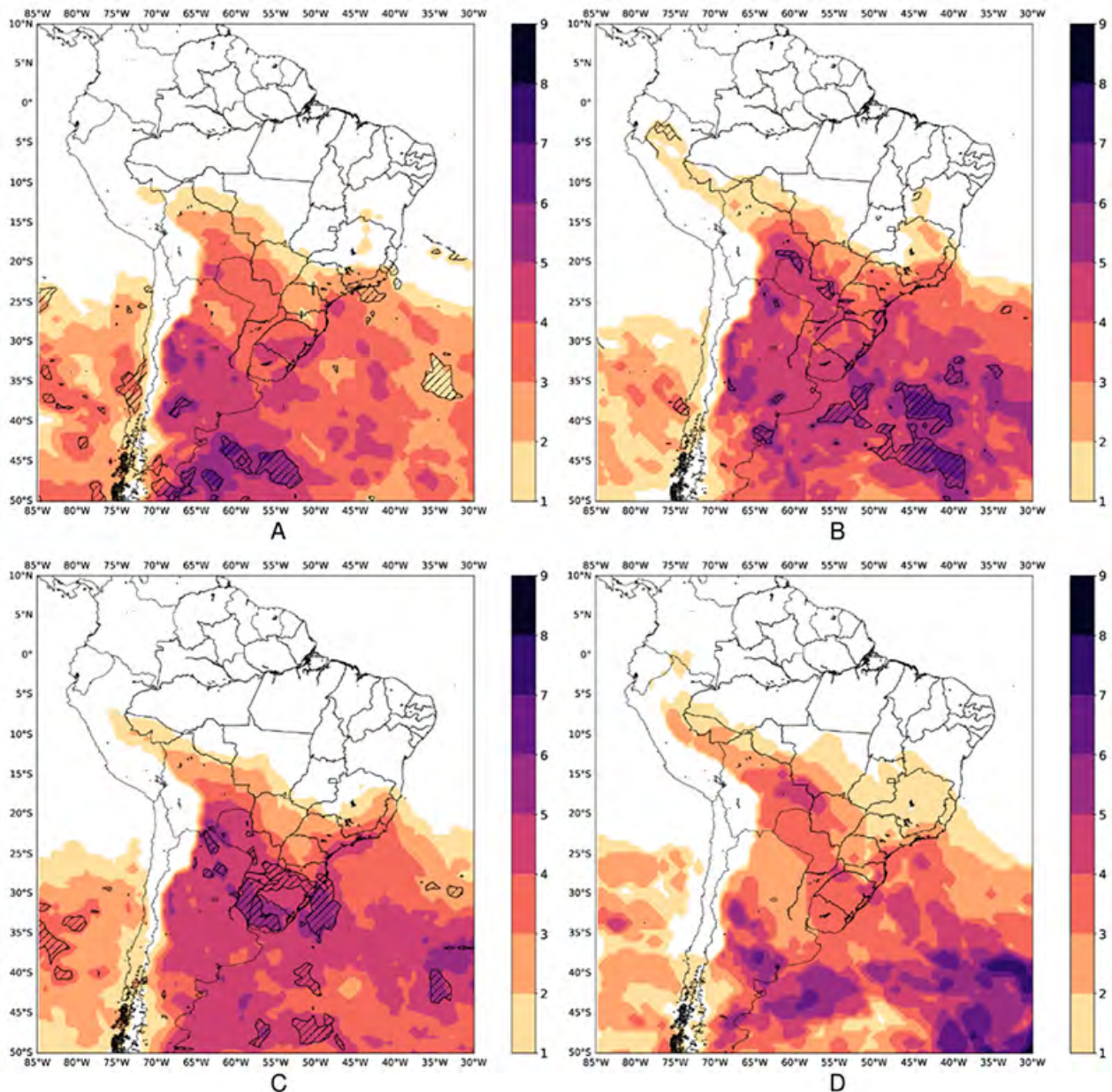


Figura 1 Compostos de frequências de frentes frias em períodos de máxima extensão do gelo marinho no MBA, para o mês de setembro: A. Fase positiva SAM e ENOS (El Niño); B. Fase positiva do SAM e negativa do ENOS (La Niña); C. Fase negativa SAM e positiva do ENOS (El Niño); D. Fase negativa do SAM e do ENOS (La Niña). Áreas hachuradas nas figuras A, B e C representam intervalo de confiança estatística de 90% (t-student). A figura D representa somente um ano.

Impacto do Gelo Marinho Antártico, do ENOS e do Modo Anular Sul sobre as Frentes Frias na América do Sul

Catharine Freire de Caldas; Fernanda Cerqueira Vasconcellos; Iracema Fonseca de Albuquerque Cavalcanti;
Natasha Oliveira de Carvalho & Italo dos Reis Lopes

no litoral do Sudeste, no Uruguai, Rio Grande do Sul e no norte da Bolívia, com áreas significativas sobre parte do SEAS. A fase positiva SAM e El Niño foi, em geral, a categoria com menor frequência de frente (Figura 1A), e apresentou significância estatística somente nas regiões com maiores valores de frentes.

Na análise combinada dos padrões de teleconexões (SAM e ENOS) para a mínima extensão de gelo marinho no MBA, os critérios na fase positiva do SAM e negativa do ENOS não foram atendidos, conforme a Tabela 1 demonstra. Observando a mínima extensão em conjunto com os

fenômenos de teleconexões podemos identificar novamente diferenças entre o continente e o oceano (Figura 2), apesar de poucas áreas apresentarem significância estatística. Embora haja algumas regiões no oceano ao sul de 40°S com valores acima de 6 frentes por mês na categoria SAM positivo e El Niño (Figura 2A), o Atlântico em geral apresenta uma maior área de alta frequência das frentes na fase negativa do SAM e La Niña (Figura 2C). No continente, em geral, os maiores valores encontram-se na categoria SAM negativo e El Niño (Figura 2B).

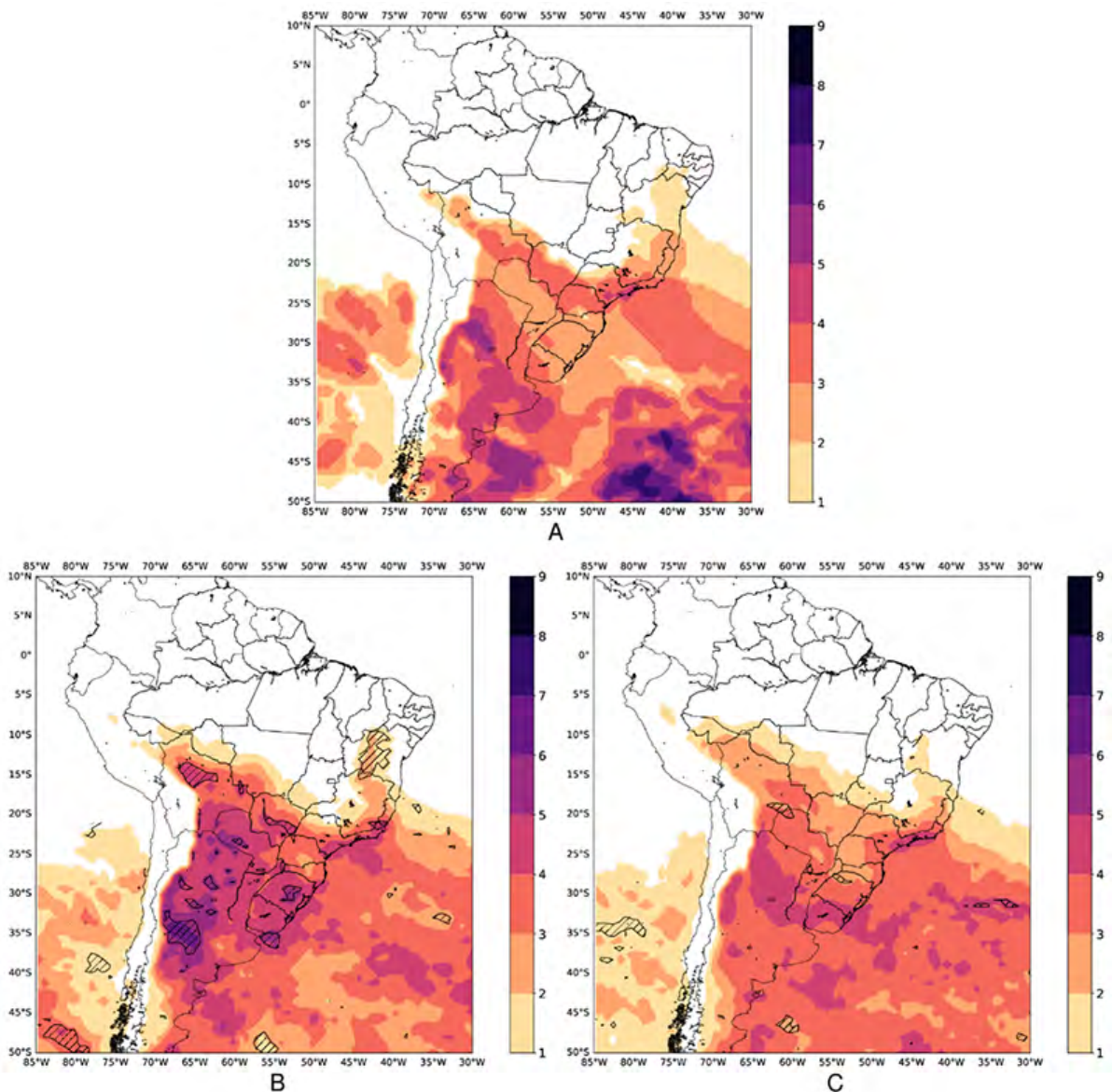


Figura 2 Compostos de frequências de frentes frias em períodos de mínima extensão do gelo marinho no MBA, para o mês de setembro: A. Fase positiva do SAM e positiva do ENOS (El Niño); B. Fase negativa do SAM e positiva do ENOS (El Niño); C. Fase negativa do SAM e do ENOS (La Niña). Áreas hachuradas nas figuras B e C representam intervalo de confiança estatística de 90% (t-student). A figura A representa somente um ano.

Ao analisar as Figuras 1 e 2, compostos em conjunto no mês de setembro para o MBA, pode-se concluir, que no oceano há uma maior área com valores altos de ocorrência de frentes na máxima extensão de gelo marinho no MBA com SAM positivo e La Niña, embora haja em outras categorias regiões menores com valores acima de 6 frentes por mês. No continente, as maiores frequências ocorrem, em geral, durante SAM negativo e El Niño, tanto na máxima quanto na mínima extensão, configuração completamente oposta à máxima frequência de frentes no oceano. A sugestão é que essas combinações influenciem na trajetória das frentes mais oceânicas ou continentais. Entretanto ressalta-se que poucas áreas apresentaram significância estatística. Uma possível explicação é o número baixo de casos em cada categoria.

3.2 Mar de Weddel (MDW)

No MWD, os mesmos métodos de organização e análise foram seguidos para o mês de setembro, envolvendo anomalias de extensão de gelo marinho e padrões de teleconexões (Tabela 2). Assim como no MBA, as maiores frequências de máxima extensão ocorrem em anos de SAM negativo com El Niño, enquanto que na mínima extensão, SAM negativo com La Niña.

Na Figura 3, conforme a Tabela 2, não houve anos que correspondessem aos critérios estabelecidos para máxima extensão de gelo nas fases positivas dos padrões de teleconexão (SAM e ENOS). Na fase positiva do SAM e La Niña (Figura 3A), podemos verificar as máximas frequências de frentes frias sobre o oceano. Ressalta-se que essa figura não apresenta significância, pois abrange somente o ano de 1995 (Tabela 2). Na fase negativa do SAM e El Niño (Figura 3B), observa-se a maior frequência no continente, principalmente no sudeste da América do Sul, sendo os maiores valores em geral com significância estatística. Entretanto, a Figura 3A mostra uma região de grande ocorrência no sul da Argentina e também um maior avanço das frentes no Acre. Na fase negativa do SAM com El Niño (Figura 3C), são observadas em geral as menores frequências de frentes frias e com poucas áreas significativas. Entretanto, a região do sudeste do Atlântico, ao sul de 40°S apresenta valores acima de cinco

frentes, sendo estatisticamente significativos. Uma possível explicação para isso é que nessa categoria as frentes ficam mais restritas ao sul e ao Atlântico.

Para a mínima extensão de gelo no MWD (Figura 4), no composto com fase positiva do SAM e La Niña (Figura 4B) é possível visualizar a máxima frequência de frentes frias em geral, inclusive com um avanço das frentes para o norte do Peru (uma frente atuou em setembro de 2010 nessa região). Ressalta-se que essa figura abrange somente um ano (1995). A fase negativa do SAM e positiva do ENOS apresentou em geral a menor frequência de frentes frias (Figura 4C), embora poucas áreas apresentem significância. O composto das fases negativas do SAM e do ENOS (Figura 4D) também apresenta valores altos de frentes no oceano e continente. Além disso, essa categoria também apresenta maiores frequências de frentes no litoral do Sudeste.

Por fim, avaliando o mês de setembro para o MWD, conclui-se que no oceano as maiores frequências de frentes frias ocorrem no SAM positivo e La Niña, na máxima e na mínima extensão de gelo. Enquanto que no continente, em geral, as maiores frequências ocorrem no SAM negativo, El Niño e máxima extensão de gelo.

4 Sumário e Conclusões

Neste estudo, foi realizada a detecção de frentes frias para a América do Sul, no período de 1981-2010. A análise focou no mês de setembro, o qual é climatologicamente o mês de maior extensão de gelo marinho antártico (Wadhams, 2000; Cavalieri & Parkinson, 2008). Foram realizadas análises para duas regiões antárticas (MBA e MWD), com a atuação de padrões de teleconexões (SAM e ENOS). Os resultados dos compostos foram resumidos na Tabela 3. Nas análises, observa-se a diferença nas atuações das frentes entre o continente e o Oceano Atlântico adjacente, embora nem toda região apresente significância estatística. Assim foram subdivididas as informações a fim de visualizar os impactos nas mesmas. Em geral, para ambos os mares analisados, pode-se notar a atuação da La Niña e SAM positivo em todas as análises de frequências máximas sobre o oceano, variando somente a extensão do gelo marinho. No continente, o El Niño domina as máximas frequências,

MÁX EXT	SAM Positivo	SAM Negativo
El Niño	-	2009, 1997, 2006, 1991, 1987
La Niña	1995	2000, 2007, 1988
MÍN EXT	SAM Positivo	SAM Negativo
El Niño	1986, 1982, 2004	1994, 2002
La Niña	2010	1983, 1999, 1998

Tabela 2 Anos envolvendo extensão de gelo marinho no MWD em conjunto com os padrões de teleconexões ENOS e SAM para setembro. Nas células preenchidas com “-” não houve anos na categoria.

Impacto do Gelo Marinho Antártico, do ENOS e do Modo Anular Sul sobre as Frentes Frias na América do Sul
 Catharine Freire de Caldas; Fernanda Cerqueira Vasconcellos; Iracema Fonseca de Albuquerque Cavalcanti;
 Natasha Oliveira de Carvalho & Italo dos Reis Lopes

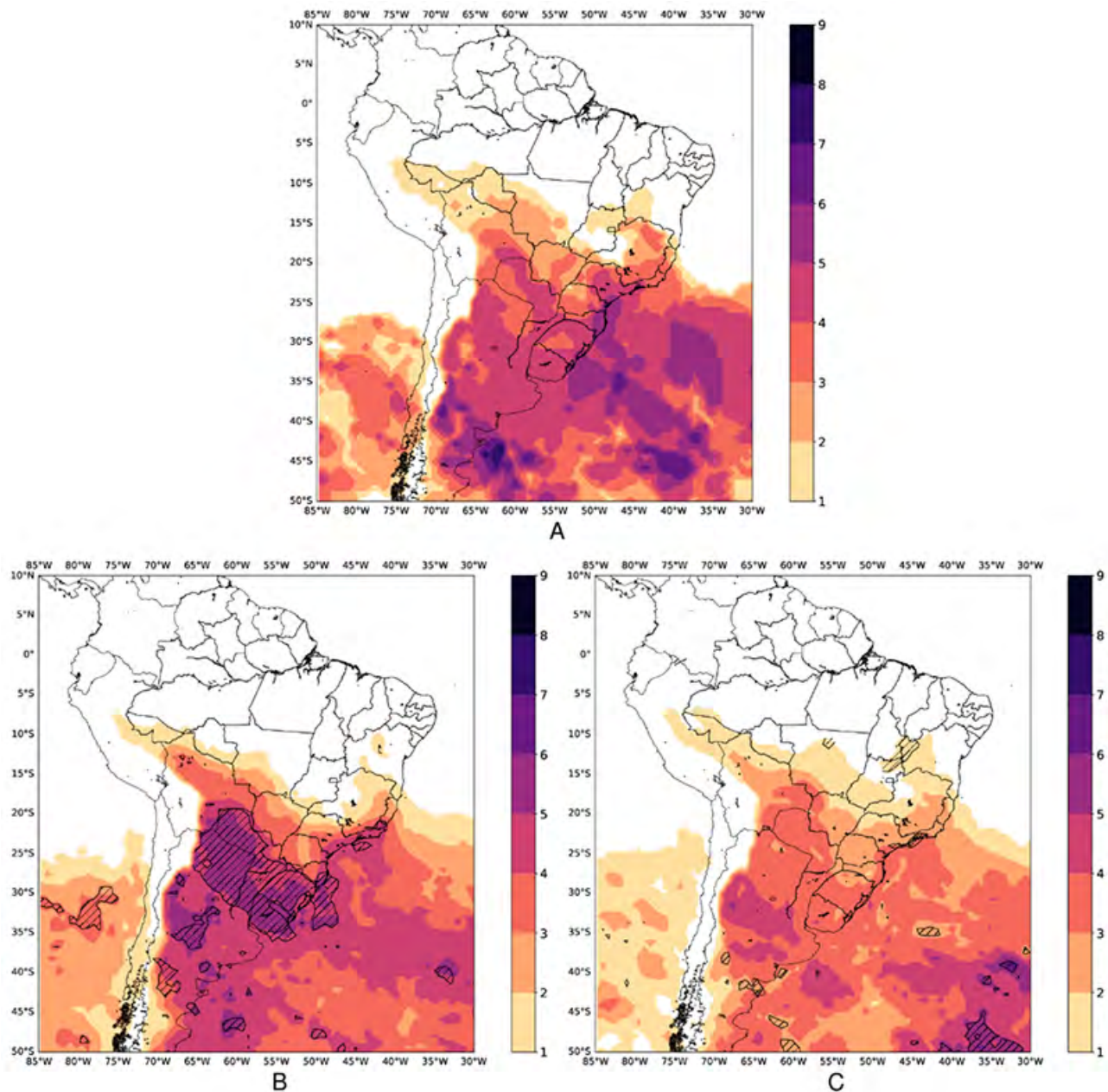


Figura 3 Compostos de frequências de frentes frias em períodos de máxima extensão do gelo marinho no MWD, para o mês de setembro: A. Fase positiva do SAM e negativa ENOS (La Niña); B. Fase negativa do SAM e positiva do ENOS (El Niño); C. Fase negativa do SAM e do ENOS (La Niña). Áreas hachuradas nas figuras B e C representam intervalo de confiança estatística de 90% (t-student). A figura A representa somente um ano.

junto com a fase negativa do SAM em ambas as extensões mínima e máxima do gelo marinho no MBA. Já no MWD, o continente também apresenta máximas frequências no El Niño e SAM negativo, mas somente na combinação com a máxima extensão de gelo marinho. As diferenças entre o oceano e continente indicam que os três fatores influenciam na trajetória das frentes, mais meridional continental ou mais marítima.

Os resultados apresentados aqui concordam parcialmente com os de Fedorova & Carvalho (2000), nas comparações envolvendo as fases do ENOS e as frentes frias. Em seu estudo, as maiores ocorrências de frentes frias na região de 20°-40°S estão presentes durante o El Niño. Nas análises mencionadas no presente trabalho é possível ver essa relação somente no continente (Tabela 3). Apenas no continente (em ambos os mares), os resultados aqui

Impacto do Gelo Marinho Antártico, do ENOS e do Modo Anular Sul sobre as Frentes Frias na América do Sul
 Catharine Freire de Caldas; Fernanda Cerqueira Vasconcellos; Iracema Fonseca de Albuquerque Cavalcanti;
 Natasha Oliveira de Carvalho & Italo dos Reis Lopes

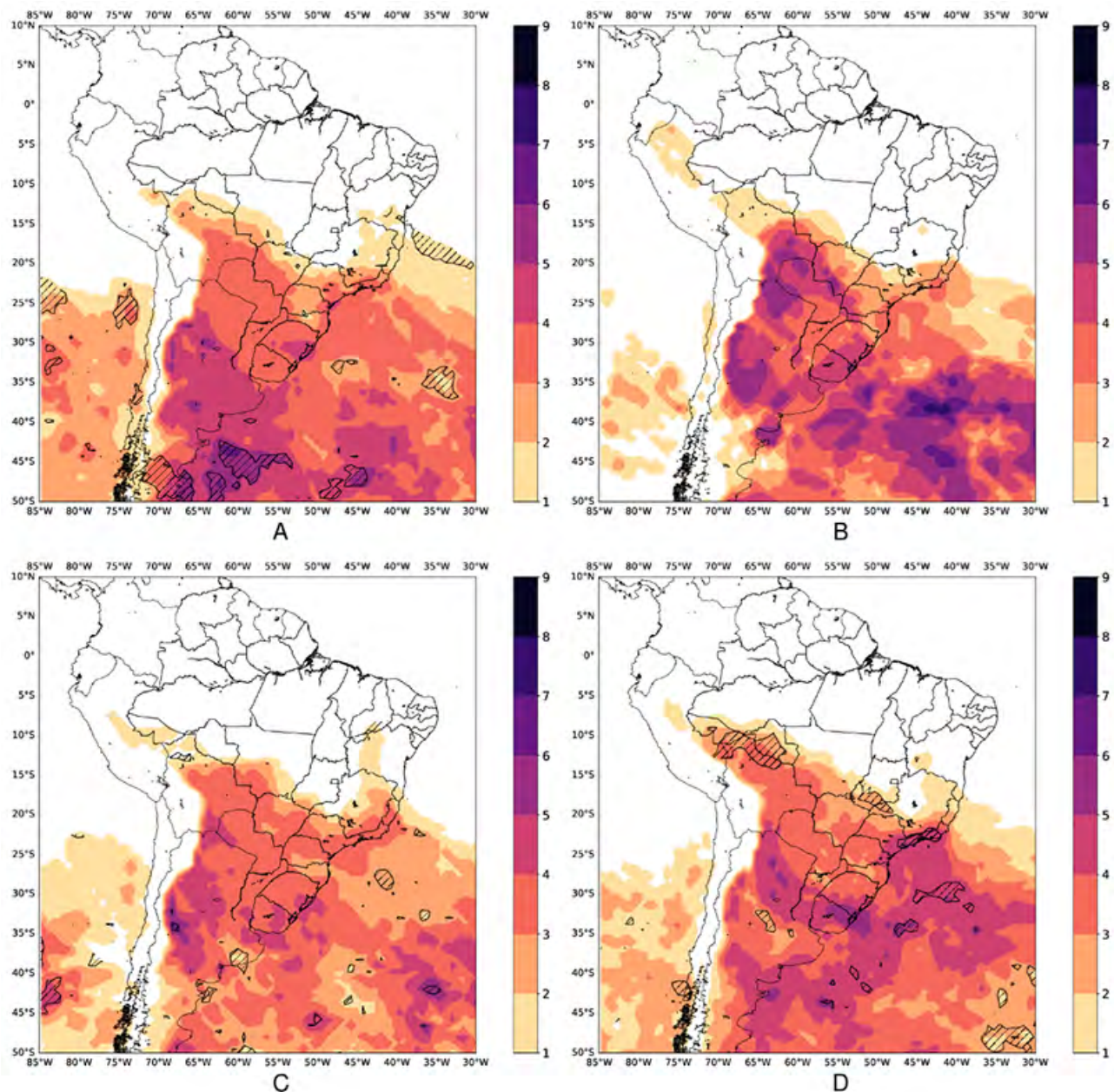


Figura 4 Compostos de frequências de frentes frias em períodos de mínima extensão do gelo marinho no MWD, para o mês de setembro: A. Fase positiva do SAM e positiva do ENOS (El Niño); B. Fase positiva do SAM e negativa ENOS (La Niña); C. Fase negativa do SAM e positiva do ENOS (El Niño); D. Fase negativa do SAM e do ENOS (La Niña). Áreas hachuradas nas figuras A, C e D representam intervalo de confiança estatística de 90% (t-student). A figura B representa somente um ano.

Máxima frequência de frentes frias	
MBA	Continente: SAM negativo- El Niño - Mínima e máxima extensão de gelo marinho Oceano: SAM positivo - La Niña - Máxima extensão de gelo marinho
MWD	Continente: SAM negativo- El Niño - Máxima extensão de gelo marinho Oceano: SAM positivo - La Niña - Máxima e na Mínima extensão de gelo marinho

Tabela 3 Sumário das análises de frequência máxima de frentes frias na América do Sul em conjunto dos padrões de teleconexões e os extremos de gelo marinho antártico para MBA e MWD.

apresentados concordam com os de Reboita *et al.* (2009), onde mostram uma maior frequência de frentes associadas com a fase negativa do SAM. As diferenças apresentadas do atual trabalho para as publicações prévias reforçam que a atuação combinada entre gelo marinho, SAM e ENOS pode influenciar nas frentes que atuam na América do Sul e Atlântico adjacente. Como continuação deste trabalho, pretende-se aprofundar o estudo, no intuito de entender a causa dessas diferenças.

5 Agradecimentos

Os autores agradecem ao Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica (PIBIC) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) pelo suporte a este estudo. Este trabalho é integrado ao projeto “Interação gelo marinho-oceano-atmosfera-ondas no setor Atlântico do Oceano Austral e a relação com o Clima da América do Sul” (ATMOS – Antarctic Modeling and Observation System – CNPq/PROANTAR Processo 443013/2018-7) e ao projeto CNPq (Processo 306394/2018-2).

6 Referências

- Andrade, K.M. 2005. *Climatologia e comportamento dos sistemas frontais sobre a América do Sul*. Programa de Pós-Graduação em Meteorologia, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), Dissertação de Mestrado, 185p.
- Cavalcanti, I.F.A. & Ambrizzi, T. 2009. Teleconexões e influências no Brasil. In: CAVALCANTI, I.F.A.; FERREIRA, N.J.; SILVA, M.G.A.J. & DIAS, M.A.F.S. (ed.). *Tempo e clima no Brasil*. São Paulo, Oficina de textos, p. 463. ISBN 9788586238925
- Cavalcanti, I.F.A. & Kousky, V.E. 2003. Climatology of South American cold fronts. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOUTHERN HEMISPHERE METEOROLOGY AND OCEANOGRAPHY, 7., Wellington, New Zealand, 2003. Proceedings, New Zealand, American Meteorological Society.
- Cavalcanti, I.F.A. & Kousky, V.E. 2009. Frentes Frias sobre o Brasil. In: CAVALCANTI, I.F.A.; FERREIRA, N.J.; SILVA, M.G.A.J. & DIAS, M.A.F.S. (ed.). *Tempo e clima no Brasil*. São Paulo, Oficina de textos, p. 463. ISBN 9788586238925
- Cavaleri, D.J. & Parkinson, C.L. 2008. Antarctic sea ice variability and trends, 1979–2006. *Journal of Geophysical Research*, 113: 1-19. DOI: <https://doi.org/10.1029/2007JC004558>
- Comiso, J.C. 2017. Bootstrap Sea Ice Concentrations from Nimbus-7 SMMR and DMSP SSM/I-SSMIS, Version 3. Boulder, Colorado USA. NASA National Snow and Ice Data Center Distributed Active Archive Center. DOI: <https://doi.org/10.5067/7Q8HCCWS4I0R>
- Dee, D.P.; Uppala, S.M.; Simmons, A.J.; Berrisford, P.; Poli, P.; Kobayashi, S.; Andrae, U.; Balmaseda, M.A.; Balsamo, G.; Bauer, P.; Bechtold, P.; Beljaars, A.C.M.; Van de Berg, L.; Bidlot, J.; Bormann, N.; Delsol, C.; Dragani, R.; Fuentes, M.; Geer, A.J.; Haimberger, L.; Healy, S.B.; Hersbach, H.; Hólm, E.V.; Isaksen, I.; Kållberg, P.; Köhler, M.; Matricardi, M.; McNally, A.P.; Monge-Sanz, B.M.; Morcrette, J.-J.; Park, B.-K.; Peubey, C.; de Rosnay, P.; Tavolato, C.; Thépaut, J.-N. & Vitart, F. 2011, The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 137: 553–597. DOI: 10.1002/qj.828
- Dereczynski, C.P.; Lopes, I.R.; Carvalho, N.O.; Silva, M.G.A.J.; Grossmann, K.S. & Martins, R.P. 2019. Climatology of Espírito Santo and the Northern Campos Basin, Offshore Southeast Brazil. *Anuário do Instituto de Geociências*, 42: 386-401. DOI: http://dx.doi.org/10.11137/2019_1_386_401
- Fedorova, N. & Carvalho, M.H. 2000. Processos sinóticos em anos de La Niña e de El Niño. Parte II: Zonas frontais. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 15: 57-72.
- Gillett, N.P.; Kell, T.D. & Jones, P.D. 2006. Regional climate impacts of the Southern Annular Mode. *Geophysical Research Letters* 33: L23704. DOI: <https://doi.org/10.1029/2006GL027721>
- 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. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00382-011-1044-y>
- Philander, S. G. 1990. *El Niño, La Niña and the Southern Oscillation*. San Diego, California. Academic Press. 293p.
- Reboita, M.S.; Ambrizzi, T. & Rocha, R.P.D. 2009. Relationship between the Southern Annular Mode and the Southern Hemisphere atmospheric systems. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 24: 48–55. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S0102-77862009000100005>.
- Tedeschi, R.G.; Cavalcanti, I.F.A. & Grimm, A.M. 2013. Influences of two types of ENSO on South American precipitation. *International Journal of Climatology*, 33: 1382-1400. DOI: <https://doi.org/10.1002/joc.3519>
- Thompson, D.W.J. & Wallace, J.M. 2000. Annular Modes in the Extratropical Circulation. Part I: Month-to-Month Variability. *Journal of Climate*, 13: 1000- 1017. DOI: [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2000\)013<1000:AMITEC>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2000)013<1000:AMITEC>2.0.CO;2)
- Trenberth, K.E., 1997: The Definition of El Niño. *Bulletin of American Meteorological Society*, 78: 2771–2778. DOI: [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1997\)078<2771:TDOE NO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1997)078<2771:TDOE NO>2.0.CO;2).
- 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*, 41: 783-792. DOI: http://dx.doi.org/10.11137/2019_1_783_792
- Vera, C.; Silvestri, G.; Barros, V & Carril, A. 2004. Differences in El Niño response over the Southern Hemisphere. *Journal of Climate*, 17: 1741–1753. DOI: [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2004\)017<1741:DIENRO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2004)017<1741:DIENRO>2.0.CO;2)
- Wadhams, P. 2000. *Ice in the ocean*. Amsterdam, Gordon and Breach Science Publishers, 351p.
- 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.J. & Martinson D.G. 2000. Antarctic Sea Ice Extent Variability and Its Global Connectivity. *Journal of Climate*, 13: 1697-1717.