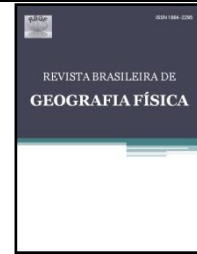




Revista Brasileira de Geografia Física

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



Caracterização de mudanças climáticas na Antártica a partir da segunda metade do Século XX

Natália Silva, Ilana Wainer e Marcos Tonelli. Universidade de São Paulo. E-mail de correspondência: natalia3.silva@usp.br

Artigo recebido em 02/08/2019 e aceito em 01/11/2019

RESUMO

A Antártica é uma região do planeta extremamente sensível às mudanças globais do clima. Para quantificar essas mudanças, é possível estudar a variação de algumas propriedades atmosféricas como temperatura (T), pressão no nível do mar (PNM) e velocidade de ventos (v). Dados de estações meteorológicas espalhadas pela Antártica distribuídos pelo British Antarctic Survey foram analisados. Os resultados mostram que as tendências de temperatura apresentam uma distribuição peculiar, visto que na porção oeste do continente há um intenso aquecimento (e.g., 0.55°C/década em San Martin), enquanto que o lado leste observa um resfriamento (-0.06°C/década em Zhongshan). O índice Intervalo de Temperatura Diária (ITD) também foi utilizado para caracterizar mudanças climáticas e é consistente com as variações obtidas para a temperatura, caracterizando, portanto, o chamado Padrão de Dipolo na temperatura. Com relação à PNM, 19 estações meteorológicas das 20 estudadas, apresentam tendências negativas e na grande maioria dessas observa-se também intensificação da velocidade dos ventos. Essas mudanças estão associadas principalmente aos modos de variabilidade natural do planeta, sendo que o maior determinante das características climáticas nas regiões extratropicais do Hemisfério Sul é o Modo Anular do Hemisfério Sul (SAM).

Palavras-chave: Antártica, Mudanças Climáticas, Dipolo de Temperatura, Modo Anular do Hemisfério Sul.

Characterization of climate change in Antarctica from the second half of 20th Century

ABSTRACT

Antarctica is a region of the planet extremely sensitive to global climate change. To quantify these changes, it is possible to study the variation of some atmospheric properties such as Temperature, Sea Level Pressure and Wind Speed. Data from meteorological stations in Antarctica provided by the British Antarctic Survey are analyzed. The results show that Temperature trends have a peculiar distribution, since on the western side of the continent there is intense heating (e.g., 0.55°C/decade in San Martin), while the east side observes cooling trends (-0.06°C/decade in Zhongshan). The Daily Temperature Range index is also used to characterize climatic changes and agrees with the variations obtained for the Temperature, thus characterizing the so-called Dipole Pattern in temperature. About the Sea Level Pressure, 19 meteorological stations of the 20 studied, present negative trends and in the great majority of these it is also observed intensification on the wind speed. These changes are mainly associated with the natural modes of variability of the planet, and the Southern Hemisphere Annular Mode (SAM) is the major determinant of the climatic characteristics in the extratropical regions of the Southern Hemisphere.

Keywords: Antarctica, Climate Change, Temperature Dipole, Southern Hemisphere Annular Mode.

Introdução

Nas últimas centenas de anos o clima da Terra tem passado por mudanças. Uma das maneiras de observar tal efeito é através do aumento da temperatura média global, que já foi investigada por diversos autores (IPCC, 2014; Fischer e Knutti, 2015; Waters et al., 2016;

Randel et al., 2017). Um dos mais recentes documentos do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC, 2018) discute que a atividade humana já elevou a temperatura média global em 1°C desde a época pré-industrial. A distribuição espacial dessas tendências não é

uniforme, e existem regiões do mundo que são mais suscetíveis às mudanças do clima.

A Antártica responde de maneira particular às mudanças climáticas: estudos já relataram um contraste entre o aquecimento na Península Antártica e o resfriamento no leste do continente (Turner et al., 2014; Nicolas e Bromwich, 2014; Lindemann e Justino, 2015; Turner et al. - a, 2016; Turner et al. - b, 2016; Ekaykin et al., 2017; Comiso et al., 2017).

Não apenas valores de temperatura média, máxima e mínima podem ser usados para estudar mudanças no clima, mas também a diferença entre as duas últimas, que fornece o índice chamado Intervalo de Temperatura Diária (DTR, do inglês *Diurnal Temperature Range*). Este índice complementa as informações relacionadas às variações de temperatura, mostrando-se um bom indicador da estabilidade climática (Easterling, 1997). Durante o século 20, o aumento da temperatura média veio acompanhado pela diminuição de aproximadamente 2°C no DTR global (Braganza, 2004) e também de variações diversas desse índice na Antártica (Jones, 1995).

Além de temperatura (T), outras informações meteorológicas também são importantes para o estudo de variações do clima na Antártica, como pressão no nível do mar (PNM) e velocidade dos ventos (v). Tais propriedades são determinadas pelo principal modo de variabilidade climática natural do Hemisfério Sul, o Modo Anular do Hemisfério Sul (SAM), que explica aproximadamente 35% da variabilidade climática desta região, além de ser fortemente correlacionado com as propriedades meteorológicas da Antártica (Marshall, 2007). Kwok e Comiso (2002) afirmam que a fase positiva do SAM tem se intensificado ao longo das últimas décadas, principalmente em virtude do buraco na camada de ozônio sob a Antártica e, portanto, é fundamental para explicar a variabilidade de PNM e v (Turner J. , 2009; Hazel e Stewart, 2019).

Como relatado por Marshall (2003) e por Kwok e Comiso (2002), na fase positiva do SAM, tende-se a observar tendências negativas de PNM e intensificação dos ventos no continente

antártico, além de aumento na temperatura da Península Antártica (PA) (Turner, et al., 2009).

Este artigo busca analisar se houve variação significativa das propriedades meteorológicas citadas, de maneira a caracterizar possíveis mudanças climáticas na Antártica. Previamente, no ano de 2005, John Turner coordenou um trabalho semelhante (Turner, et al., 2005), sendo o presente artigo, portanto, uma atualização. Além disso, os resultados encontrados anteriormente foram utilizados como uma base de referências neste estudo mais recente.

Material e métodos

O estudo do continente antártico sempre foi dificultado pela falta de dados de boa qualidade, uma vez que acessibilidade restrita e as condições climáticas desfavoráveis comprometem a aquisição de informações. Algumas tentativas de projetos para aquisição e distribuição de dados foram iniciadas (Schwerdtfeger, 1984, Jones P. D., 2001), entretanto por diversas razões nenhum parecia satisfazer as necessidades para um banco de dados meteorológicos de alta qualidade.

Desta maneira, o Comitê Científico de Pesquisas na Antártica (SCAR) desenvolveu o banco de dados Reference Antarctic Data for Environmental Research (READER), com o objetivo de criar um conjunto de informações de alta qualidade com medidas meteorológicas de longo prazo a partir de sistemas de observação *in situ*. As fontes primárias de dados são as estações meteorológicas distribuídas no continente (Turner et al, 2004; SCAR *online*).

Neste trabalho, apenas estações meteorológicas localizadas ao sul de 60°S e com 90% de dados disponíveis foram contempladas (Figura 1) e suas médias mensais de T, PNM e v foram coletadas no READER. Com as médias mensais de T, puderam-se construir séries de temperaturas máxima (Tmax) e mínima (Tmin) e, através de sua diferença, calcular o DTR. Além disso, médias anuais e sazonais de todas as variáveis também foram calculadas através de seus dados mensais.

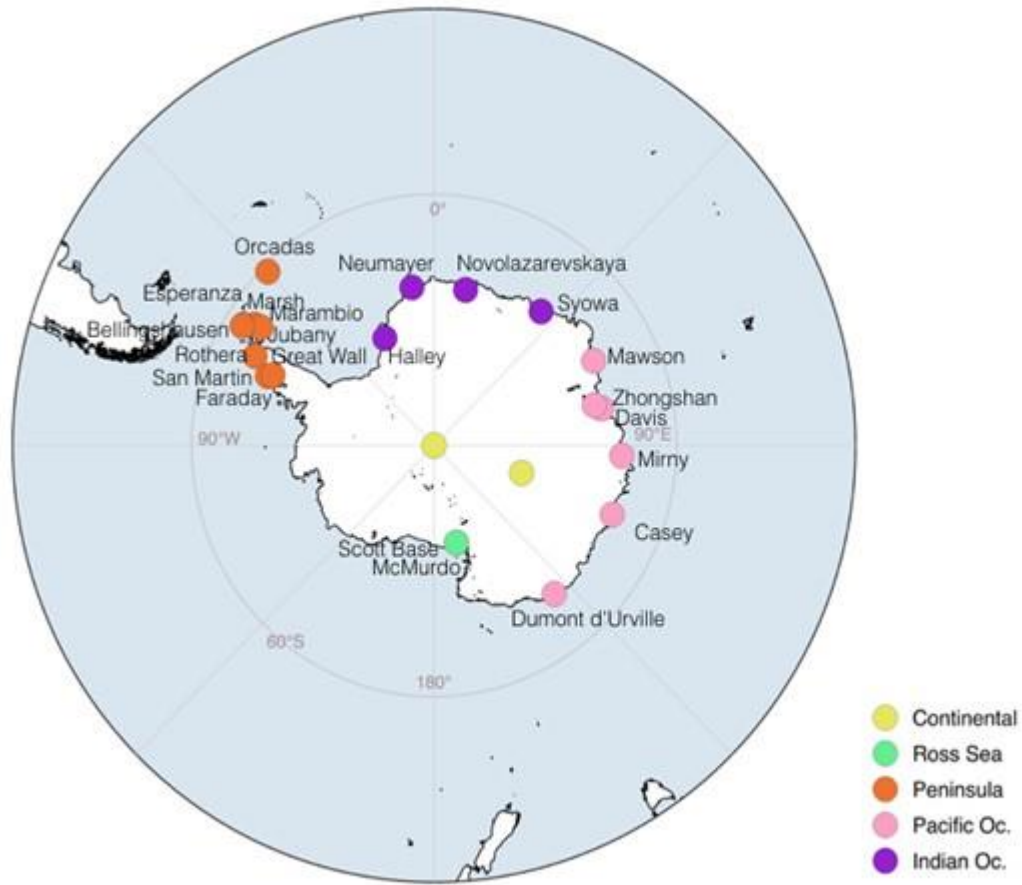


Figura 1. Disposição das estações meteorológicas analisadas. As diferentes cores classificam as estações em cinco regiões.

Gonzalez e Fortuny (2018) afirmam que uma série temporal menor que 30 anos não é conveniente para estudar mudanças climáticas na Antártica, pois os dados são sensíveis à variabilidade interna, diminuindo a robustez do cálculo das tendências. Assim, o tamanho das séries temporais obtidas a partir do READER (aproximadamente 70 anos) pode ser considerado adequado.

Ainda que o READER seja uma excelente fonte de dados, é importante ressaltar que não é

perfeito, devido às dificuldades operacionais na da região de estudo. Por este motivo, cada estação apresenta um ano inicial diferente, além de alguns dados mensais faltantes. Em grande parte das estações só constam dados a partir de 1950, ainda que Orcadas tenha registros desde 1903. A Tabela 1 apresenta, para cada estação meteorológica, o ano a partir do qual os dados estão disponíveis no READER.

Tabela1. Ano a partir do qual constam dados no READER, para cada estação meteorológica.

Estação	Início	Estação	Início
Amundsen-Scott	1957	Mawson	1964
Bellingshausen	1957	McMurdo	1956
Casey	1959	Mirny	1956
Davis	1957	Neumayer	1981
Dumont d'Urville	1956	Novolazarevskaya	1961

Esperanza	1945	Orcadas	1903
Faraday	1947	Rothera	1976
Great Wall	1985	San Martín	1977
Halley VI	1957	Scott Base	1957
Jubany/Carlini	1985	Syowa	1957
Marambio	1970	Vostok	1958
Marsh	1969	Zhongshan	1989

Também é interessante notar que para cada uma das propriedades (T, PNM e v) o conjunto de estações meteorológicas analisadas diferiu à custa do critério de exclusão de dados incompletos (< 90%). Por exemplo, a estação Jubany (Figura 1) apresenta diversos dados mensais faltantes de temperatura, porém as informações sobre PNM e v são completas. Esta estação, portanto, foi utilizada para as análises de PNM e v, mas não de T.

As tendências para cada propriedade foram calculadas de acordo com o Método dos Mínimos Quadrados e a significância do teste utilizando o teste F (Holland e Welsch, 1977).

Resultados e Discussão

Intervalo de Temperatura Diária (DTR)

Dentre as tendências de DTR calculadas para a Antártica (Tabela 2 – Anexo I), 14 são negativas e correspondem em sua maioria às estações meteorológicas situadas na PA como, por exemplo Faraday (Figura 2a), que apresentou o menor valor. Diferentemente, as estações meteorológicas do leste antártico apresentam tendências de DTR levemente negativas até mesmo positivas, como em Zhongshan (Figura 2b).

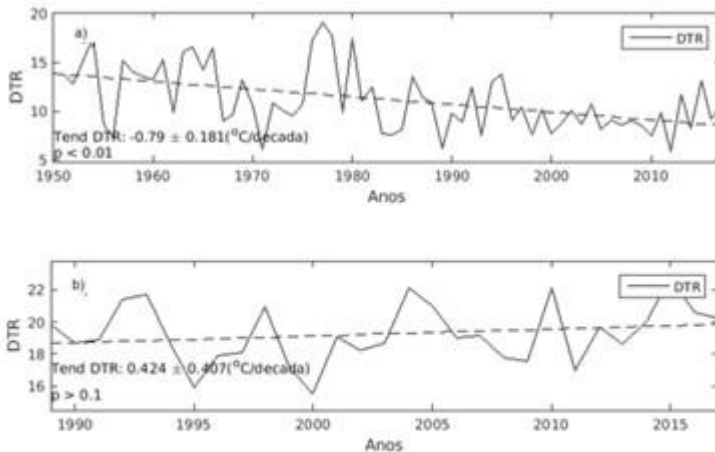


Figura 2 - Séries temporais de DTR e suas tendências entre 1950 e 2017 na estação Faraday (-0.79°C/década; painel superior) e entre 1989 e 2017 em Zhongshan (0.42°C/década; painel inferior).

A distribuição espacial deste índice também pode ser observada na Figura 3 e estes resultados

parecem indicar aquecimento na região oeste do continente e o oposto no lado leste, consistente com Turner et al. (2005).

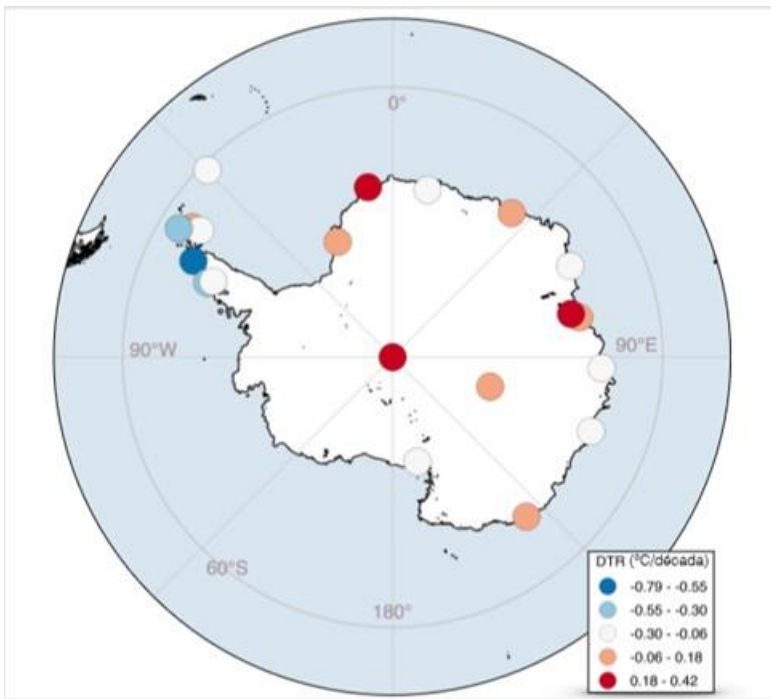


Figura 3 - Distribuição espacial das tendências do DTR (°C/década) para cada estação meteorológica.

Dentre as 23 estações analisadas, cinco apresentam tendência anual de T negativa e as demais, tendências positivas (Tabela 3 – Anexo II). Dentre as cinco estações que apresentam tendências anuais negativas, três estão localizadas na região leste do continente. Além disso, as demais estações meteorológicas que compõem a região leste do continente antártico apresentam tendências anuais positivas muito pequenas e que não são estatisticamente significativas. Com relação ao lado oeste do continente antártico, observa-se na Figura 4, as estações meteorológicas de maior aquecimento, com tendências de T anual variando entre 0 e 1°C/década ou, mais especificamente, entre 0.3 a 0.6°C/década de acordo com os valores da Tabela 3.

Os resultados apontam tendências opostas entre o lado leste (negativas ou neutras) e oeste (positivas) da Antártica, como relatado por Kwok e Comiso (2002) e Smith e Polvani (2017). Atribui-se esse padrão de variabilidade de T em

sua maioria ao SAM (Lindemann e Justino, 2015), já que a intensificação dos ventos de oeste advecta massas de água oceânicas quentes para a região da PA e menos massas de ar úmidas penetram o interior do continente (Turner et al., 2009).

Com relação às médias sazonais (Figura 5), no outono observam-se tendências peculiares: aquecimento, por exemplo em San Martin com 0.79°C/década e Marambio com 0.67°C/década, bem como tendências negativas que indicam resfriamento de -0.22 °C/década em Dumont Durville e -0.39 °C/década em Halley.

Esta diferença entre as tendências no outono pode estar relacionada com a distribuição geográfica das estações meteorológicas, já que as estações no leste apresentam tendências de T negativas e as da PA, no oeste, positivas. Esta resposta é consistente com as condições climáticas exercidas pelo SAM, uma vez que no outono sua ação sob a superfície é intensificada (Turner et al., 2009).

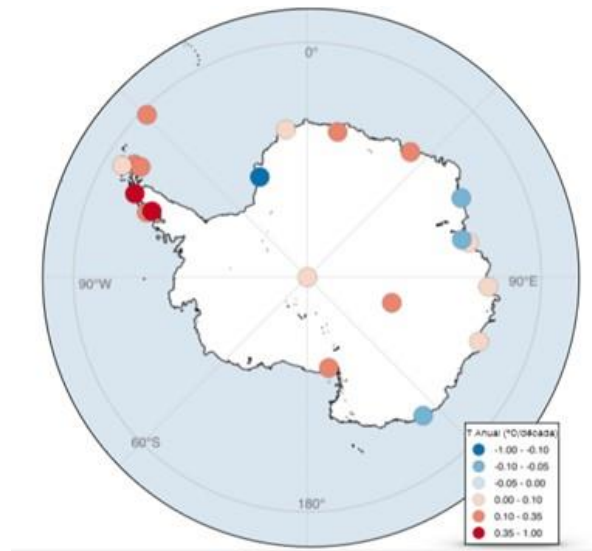


Figura 4 - Distribuição espacial das tendências de T (°C/década) para cada estação meteorológica

O inverno é a estação do ano com tendências positivas mais elevadas, na qual Faraday (Figura 6) apresenta o valor máximo de 0.86°C/década; Rothera e San Martín superaram um aquecimento de 0.66°C/década. Isto se dá muito provavelmente pela baixa concentração de gelo marinho observada durante esta época do ano, como pontuado por Turner et al. (2005). Os trabalhos de Raphael (2003) e Schlosser et al.

(2018), discutem a importância do gelo marinho na variabilidade da temperatura, especialmente no lado oeste do continente, já que o elevado albedo do gelo determina a quantidade de radiação solar absorvida na Antártica. Assim, como discutido por Lachlan-Cope (2005), no início do inverno ocorre a menor concentração de gelo marinho na região da Antártica, que corresponde às maiores taxas de aquecimento.

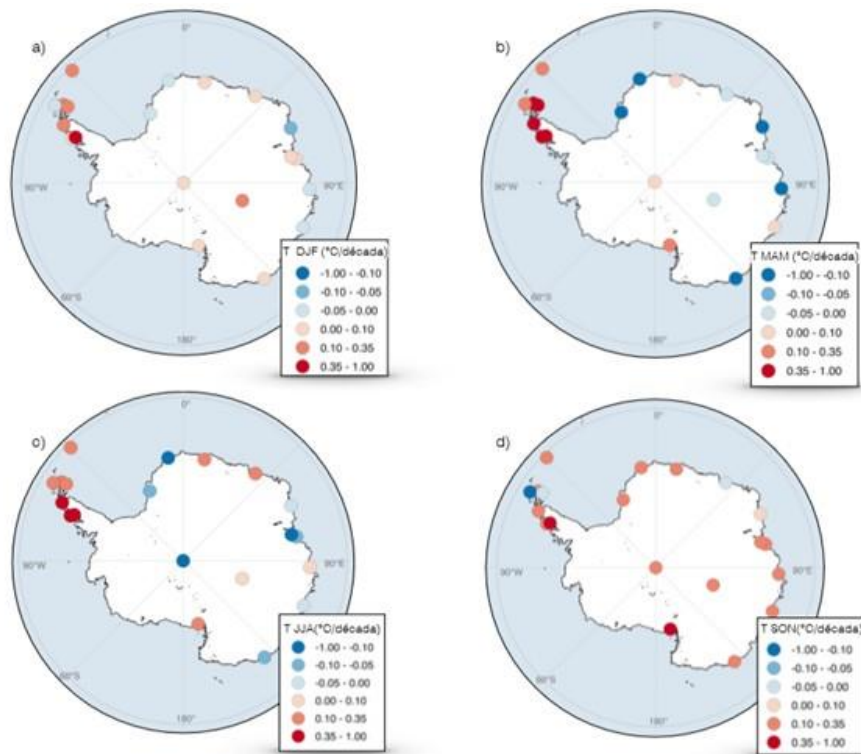


Figura 5 - Distribuição espacial das tendências sazonais de T (°C/década) no verão (a), outono (b), inverno (c) e primavera (d).

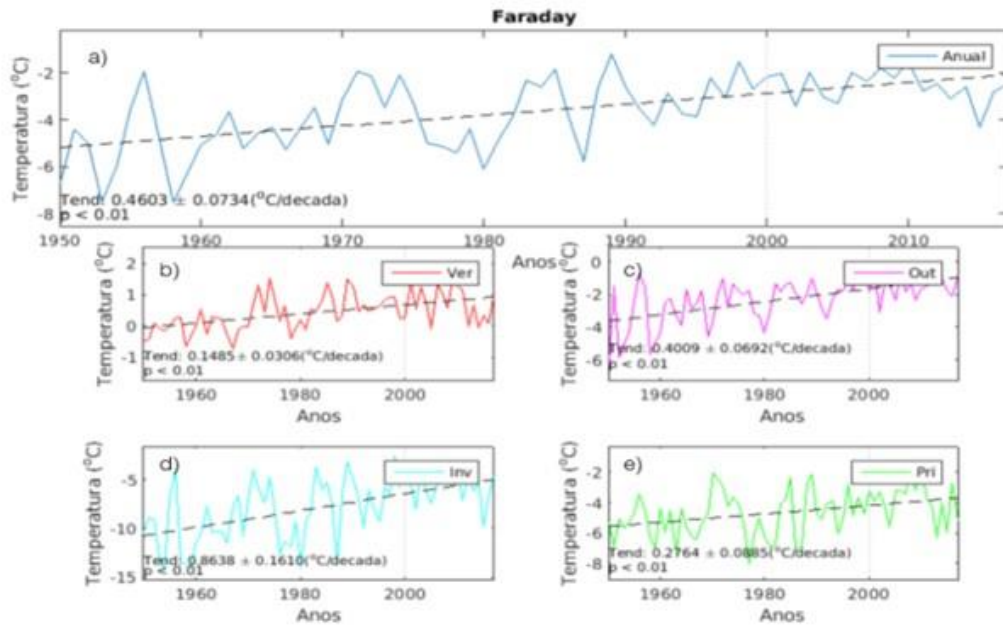


Figura 6 - Séries temporais de T e suas tendências entre 1950 e 2017 na estação Faraday. As tendências são de 0.460 °C/década para a média anual (a), 0.148 °C/década para a média de verão (DJF) (b), 0.400 °C/década para a média de outono (MAM) (c), 0.863 °C/década para a média de inverno (JJA) (d) e 0.276°C/década para a média de primavera (SON) (e).

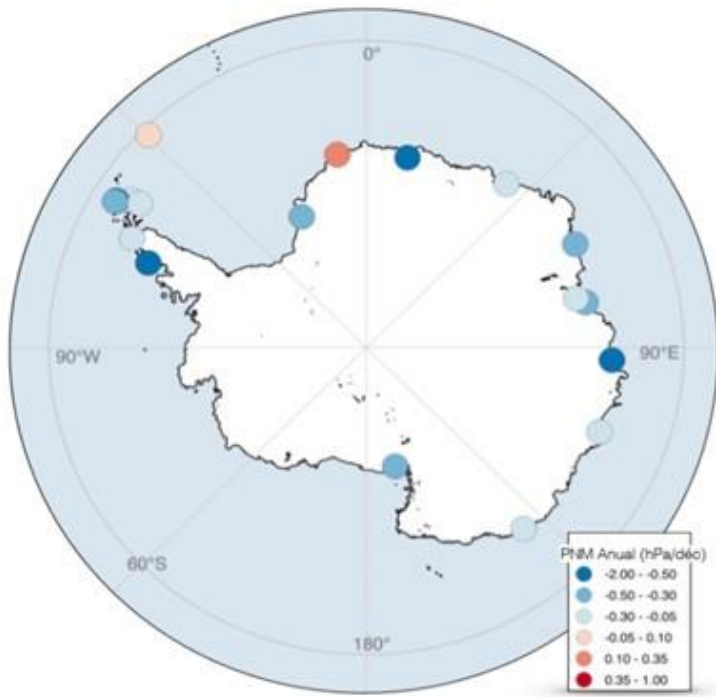


Figura 7 - Distribuição espacial das tendências de PNM (hPa/década) para cada estação meteorológica.

Pressão ao nível do mar (PNM) velocidade dos ventos (v)

As tendências anuais e sazonais de PNM e v são explicitadas nas Tabelas 4 e 5 (anexos III e IV, respectivamente).

Dentre as 20 estações analisadas, 19 apresentaram tendência anual negativa para PNM (Figura 7), exceto Neumayer (localização na Figura 1) onde ocorreu tendência de aumento da PNM. Duas estações meteorológicas com tendências anuais de PNM negativas extremas estão situadas na PA (Great Wall e Jubany, ambas com tendências menores que -0.70 hPa/década), bem como Novolazarevskaya e Mirny que, situadas no setor leste do continente, apresentaram tendências negativas igualmente elevadas (menores que -0.60 hPa/década) e estatisticamente significativas (nível de significância < 10%).

Além do mais, Raphael, et al. (2016), pontua que variações na PNM ou, mais

especificamente, a sua diminuição, impactam diretamente nos campos de velocidade dos ventos e de temperatura. Este mesmo trabalho ainda aponta que tendências negativas de PNM na região do Mar de Amundsen (à oeste da PA) são estritamente relacionadas com o aquecimento da Península.

Os valores de tendências sazonais de PNM (Figura 8) são mais extremos no verão e no inverno: no verão Bellingshausen, Marambio, Neumayer e Novolazarevskaya apresentam tendências menores que -0.8 hPa/década, resultados que no inverno são observados em Great Wall, Jubany e Marsh. Esta variabilidade sazonal, de acordo com Van Den Broeke (1998) e Turner et al. (2005), pode ser explicada pela Oscilação Semi-Anual (SAO), que consiste basicamente da expansão e contração da frente de pressão ao redor da Antártica.

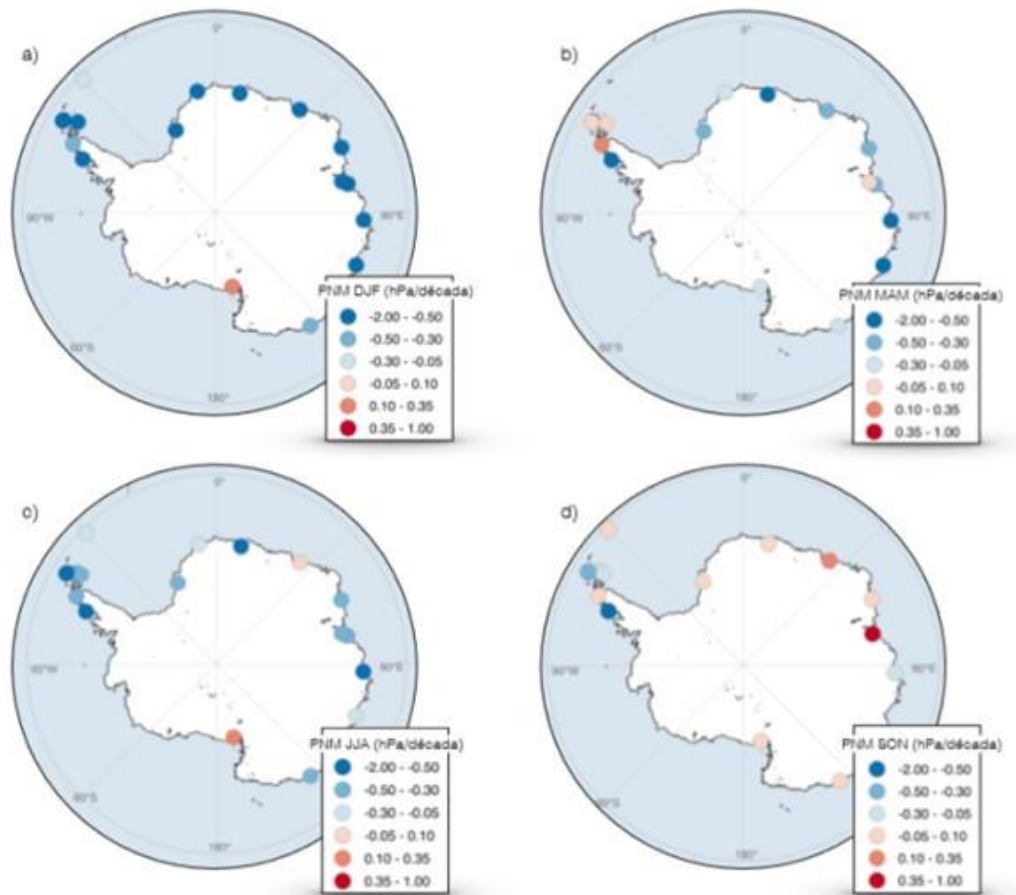


Figura 8 - Distribuição espacial das tendências sazonais de PNM (hPa/década) no verão (a), outono (b), inverno (c) e primavera (d).

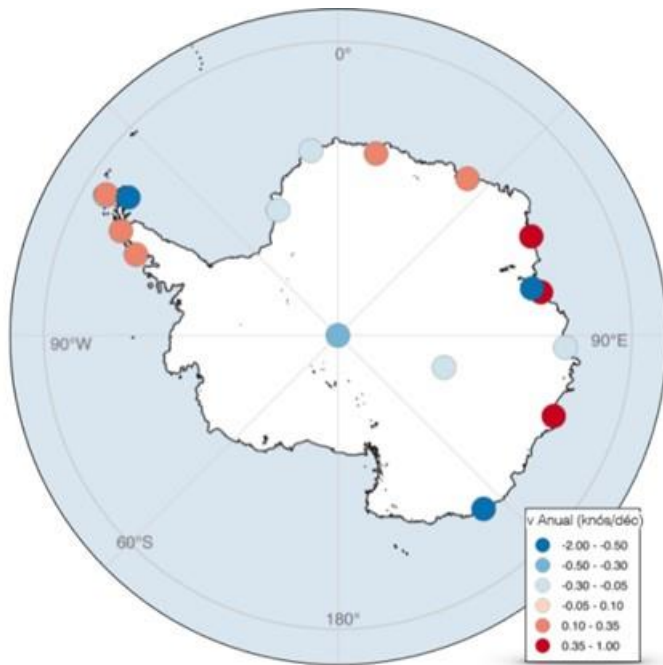


Figura 9 - Distribuição espacial das tendências de v (knós/década) para cada estação meteorológica.

As tendências negativas de pressão e o aumento na intensidade dos ventos também podem ser explicadas, de maneira geral, pelo SAM. O trabalho de Turner et al. (2014), por exemplo, afirma que a velocidade dos ventos de oeste ao redor da Antártica aumentou entre 15 e 20% desde 1970 em função deste modo de variabilidade climática. Contudo, algumas tendências de velocidade de vento observadas neste trabalho não são consistentes com essas informações e a variação do SAM não é suficiente para explicá-las. Tão pouco é possível diferenciar as tendências de velocidade dos ventos com relação à suas posições geográficas (Figura 9), já

que ambos os lados leste e oeste do continente apresentam tendências positivas e negativas. Assim, consistente com o trabalho de Turner et al. (2005), a tendência observada nos ventos pode ser devida às possíveis variações na dinâmica de ventos regional, que não são estudadas neste trabalho. As Figuras 10 e 11 ilustram a variabilidade de v nas estações meteorológicas que apresentaram tendências mais extremas e significantes ao nível de 1%, sendo que em algumas estações meteorológicas houve intensificação dos ventos e, em outras, enfraquecimento.

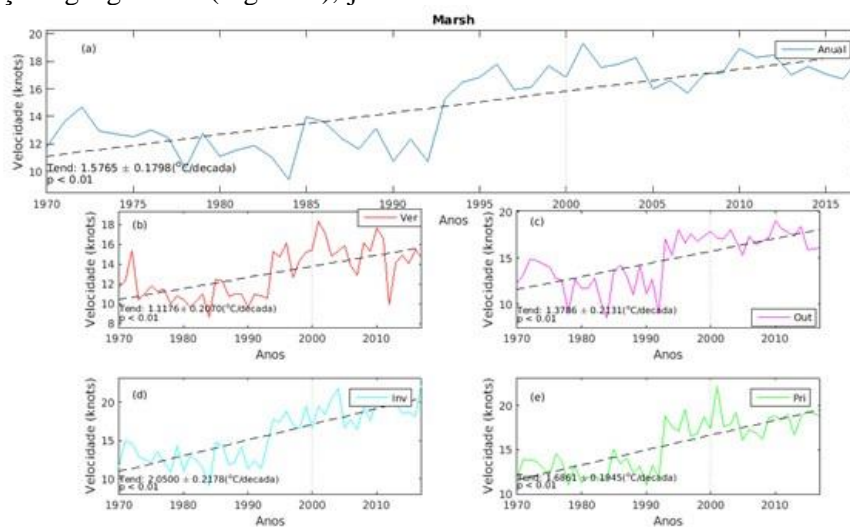


Figura 10 - Séries temporais de velocidade de ventos e suas tendências entre 1950 e 2017 para a estação meteorológica Marsh. As tendências são de 1.576 knós/década para a média anual (a), 1.117 knós/década para a média de verão (DJF) (b), 1.378 knós/década para a média de outono (MAM) (c), 2.050 knós/década para a média de inverno (JJA) (d) e 1.686 knós/década para a média de primavera (SON) (e).

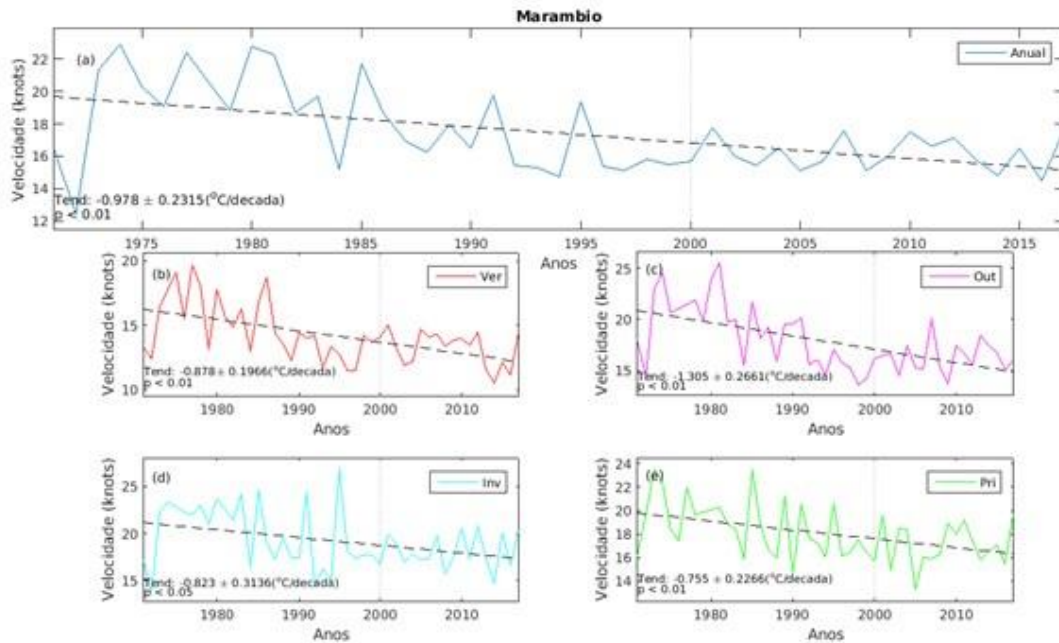


Figura 11 - Séries temporais de velocidade de ventos e suas tendências entre 1950 e 2017 para a estação meteorológica Marambio. As tendências são de -0.978 knós/década para a média anual (a), -0.878 knós/década para a média de verão (DJF) (b), -1.305 knós/década para a média de outono (MAM) (c), -0.823 knós/década para a média de inverno (JJA) (d) e -0.755 knós/década para a média de primavera (SON) (e).

Tendências regionais

Há uma literatura robusta que trata sobre o comportamento de algumas propriedades na Antártica, inclusive T, PNM e v. Através de trabalhos prévios na Antártica (Turner et al, 2005; Gonzalez e Fortuny, 2018), construíram-se evidências para supor que existe um Padrão de Dipolo na temperatura. Assim, optou-se por Tabela 6. Estações meteorológicas que compõem cada região a Antártica.

dividir o continente em cinco setores (representadas por cores diferentes na Figura 1), de maneira a investigar melhor este aspecto. As estações meteorológicas que compõem cada região estão explicitadas na Tabela 6. Definidas as estações, a partir de agora se abrevia a região Oceano Índico/ Mar de Weddell para Mar de Weddell apenas.

Região	Estações Meteorológicas
Península	Bellingshausen, Esperanza, Faraday, Great Wall, Jubany, Marambio, Marsh, Orcadas, Rothera, San Martin
Oc Índico e Mar de Weddell	Halley, Neumayer, Novolazarevskaya, Syowa
Oc Pacífico	Casey, Davis, Dumont Durville, Mawson, Mirny, Zhongshan
Mar de Ross	McMurdo, Scott Base
Continental	Amundsen Scott, Vostok

As médias das variáveis entre as estações meteorológicas resultam no valor desta variável na região. Para cada setor realizou-se os mesmos cálculos de tendências como para as estações meteorológicas. Deste modo, obtiveram-se tendências de Tmax e Tmin e, consequentemente, tendências do DTR, além de tendências de médias sazonais e anuais de T, PNM e v para cada uma das cinco regiões definidas.

Os resultados do DTR (Tabela 7) para as regiões não são tão consistentes com as variações de T como quando calculados para as estações meteorológicas individualmente. Na PA onde se esperava encontrar o menor valor de DTR por ser a região de aquecimento intenso, observou-se o maior valor, devido à elevada diminuição da temperatura mínima (Figura 12). Já na região do Mar de Ross e do Oc. Pacífico, os valores do DTR parecem ser bons indicadores da variabilidade de T.

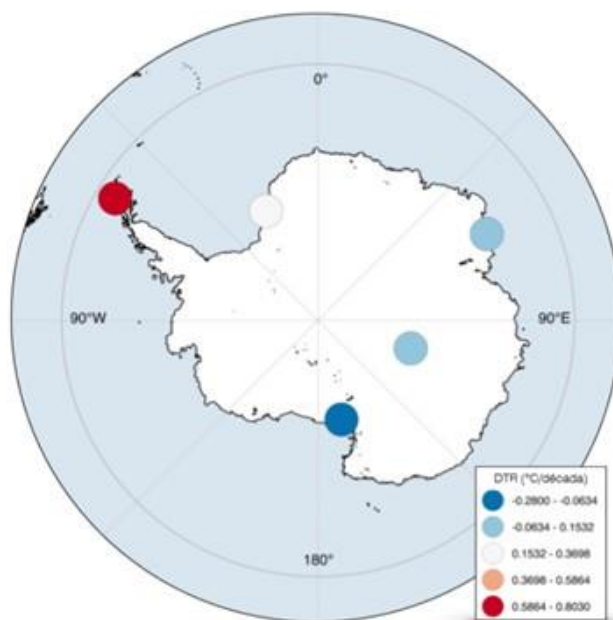


Figura 12 - Distribuição espacial das tendências do DTR (°C/década) para cada região.

Tabela 7. Tendências anuais de temperaturas máxima e mínima, e do DTR (°C/década) para as regiões. Valores em negrito correspondem ao nível de 1% de significância; valores sublinhados, ao nível de 5%; valores em itálico, nível de 10%.

Tendências de Tmax, Tmin e DTR (°C/década)			
Região	Temp. Máxima	Temp. Mínima	DTR
Península	0.22±0.02	-0.57±0.08	0.80±0.09
Mar de Weddell	<u>0.14±0.06</u>	-0.08±0.17	0.23±0.17
Oc. Pacífico	<i>0.10±0.05</i>	0.14±0.11	-
			0.04±0.12
Mar de Ross	0.11±0.07	<u>0.39±0.18</u>	-
			0.28±0.20
Continental	0.15±0.11	0.08±0.18	0.06±0.20

As tendências anuais e sazonais de temperatura média podem ser vistas na Tabela 8, indicando que a região do Mar de Ross (Figura 13) é a de valor mais intenso positivo. Kwok e Comiso (2002) atribuem este resultado à

Oscilação Sul (SO) que, devido a intensificação de sua fase negativa nas últimas décadas, torna a região do Mar de Ross mais suscetível à aquecimento.

Tabela 8. Tendências anuais e sazonais de temperaturas (°C/década) para as regiões. Valores em negrito correspondem ao nível de 1% de significância; valores sublinhados, ao nível de 5%; valores em itálico, nível de 10%.

Tendências de temperatura (°C/década)					
	Península	Mar de Weddell	Oc. Pacífico	Mar de Ross	Continental
Anual	0.09±0.02	0.05±0.06	0.02±0.01	0.29±0.07	0.07±0.08
Verão	0.09±0.05	-0.01±0.05	0.04±0.04	0.06±0.07	0.10±0.08
Outono	0.01±0.04	-0.14±0.09	-	0.32±0.09	0.04±0.1
			0.05±0.08		
Inverno	0.17±0.05	0.07±0.08	-	<i>0.26±0.14</i>	-0.06±0.14
			0.03±0.07		
Primavera	0.03±0.03	<u>-0.12±0.06</u>	<u>0.16±0.06</u>	-0.99±0.1	<i>0.13±0.07</i>

Outra região com tendência de T alta foi a PA, que é a região de maior aquecimento quando analisada toda a série temporal (1.62°C entre 1903 e 2017). Já no lado leste do continente ocorre

outra situação: a tendência de temperatura média para a região do Oc. Pacífico é a menor de todas, de acordo com os valores da Tabela 8.

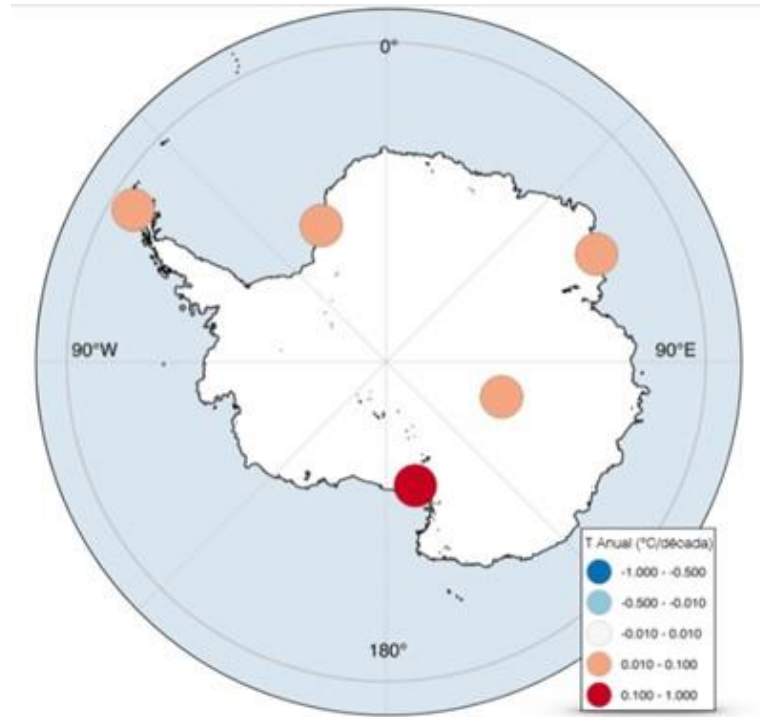


Figura 13- Distribuição espacial das tendências de T (°C/década) para cada região.

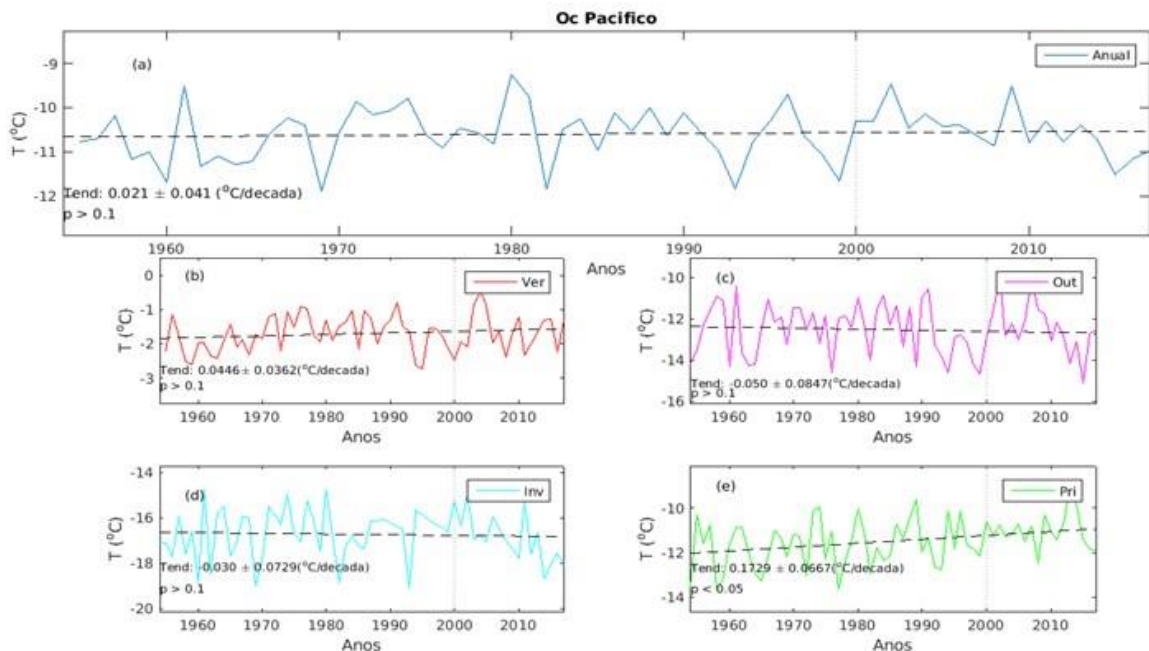


Figura 14 - Séries temporais de temperatura e suas tendências entre 1950 e 2017 para a região do Oceano Pacífico. As tendências são de 0,021°C/década para a média anual (a), 0,044°C/década para a média de verão (DJF) (b), -0,05°C/década para a média de outono (MAM) (c), -0,03°C/década para a média de inverno (JJA) (d) e 0,158°C/década para a média de primavera (SON) (e).

As Figuras 14 e 15 evidenciam a diferença entre as regiões de maior e menor

aquecimento da Antártica, respectivamente, as regiões da PA e do Oceano Pacífico.

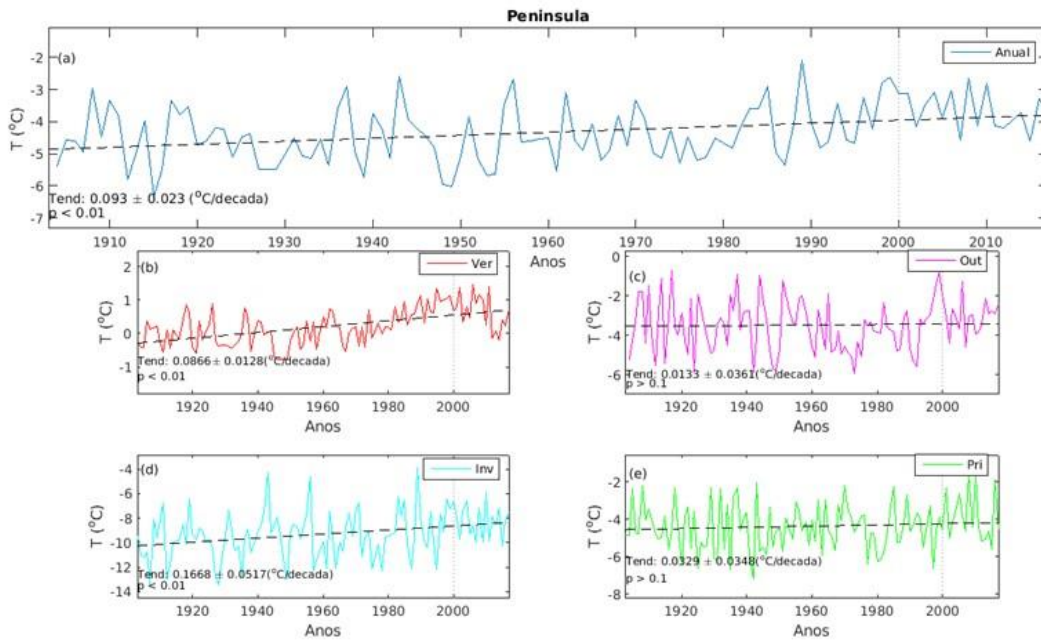


Figura 15 - Séries temporais de temperatura e suas tendências entre 1903 e 2017 para PA. As tendências são de 0.093°C/década para a média anual (a), 0.088°C/década para a média de verão (DJF) (b), 0.013°C/década para a média de outono (MAM) (c), 0.166°C/década para a média de inverno (JJA) (d) e 0.032°C/década para a média de primavera (SON) (e).

As tendências de PNM e v para as regiões seguem o mesmo padrão da variabilidade individual de cada estação meteorológica (Tabelas 9 e 10): todas as tendências de PNM são negativas

e não há um padrão na variação da intensidade dos ventos. As distribuições espaciais destas tendências estão, respectivamente, nas Figuras 16 e 17.

Tabela 9. Tendências anuais e sazonais de PNM (hPa/década) para as regiões. Valores em negrito correspondem ao nível de 1% de significância; valores sublinhados, ao nível de 5%; valores em itálico, nível de 10%.

Tendências de PNM (hPa/década)				
	Península	Mar de Wedell	Oc. Pacífico	Mar de Ross
Anual	-0.19±0.03	-0.42±0.10	-0.38±0.10	-0.46±0.11
Verão	-0.24±0.05	-0.78±0.18	-0.67±0.17	<u>0.11±0.18</u>
Outo.	-0.07±0.06	-0.53±0.18	-0.49±0.15	-0.27±0.26
Inver.	-0.29±0.07	<u>-0.51±0.19</u>	<u>-0.44±0.20</u>	-0.64±0.20
Prim.	-0.23±0.06	0.11±0.17	0.00±0.15	0.02±0.22

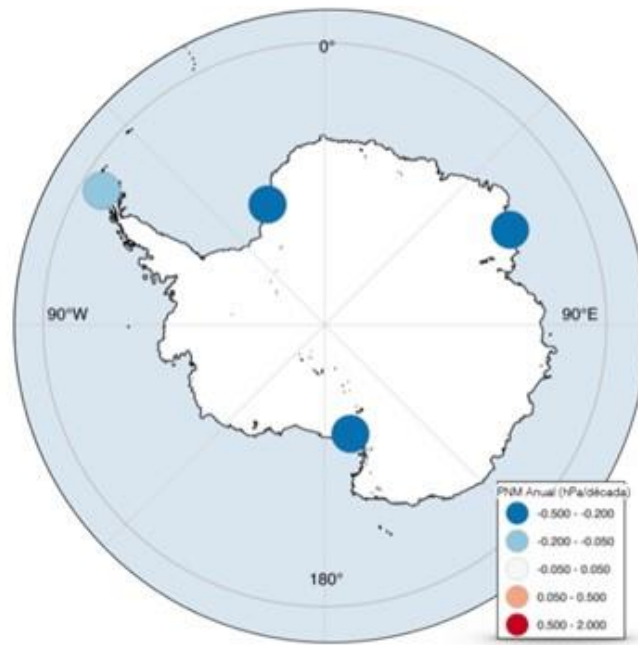


Figura 16 - Distribuição espacial das tendências de PNM (hPa/década) para cada região.

Tabela 10. Tendências anuais e sazonais de v (knós/década) para as regiões. Valores em negrito correspondem ao nível de 1% de significância; valores sublinhados, ao nível de 5%; valores em *itálico*, nível de 10%.

Tendências de v (knós/década)				
	Península	Mar de Wedell	Oc. Pacífico	
Anual	1.13±0.09	0.28±0.06	-0.26±0.06	-0.21±0.05
Verão	1.23± 0.12	0.40± 0.08	-0.24± 0.07	-0.00±0.05
Outo.	0.95±0.08	<u>0.23±0.10</u>	-0.15±0.08	-0.26±0.06
Inver.	-0.21±0.05	0.36±0.09	<u>-0.21±0.08</u>	-0.39±0.06
Prim.	0.95±0.08	0.17±0.08	<u>-0.19±0.07</u>	-0.22±0.08

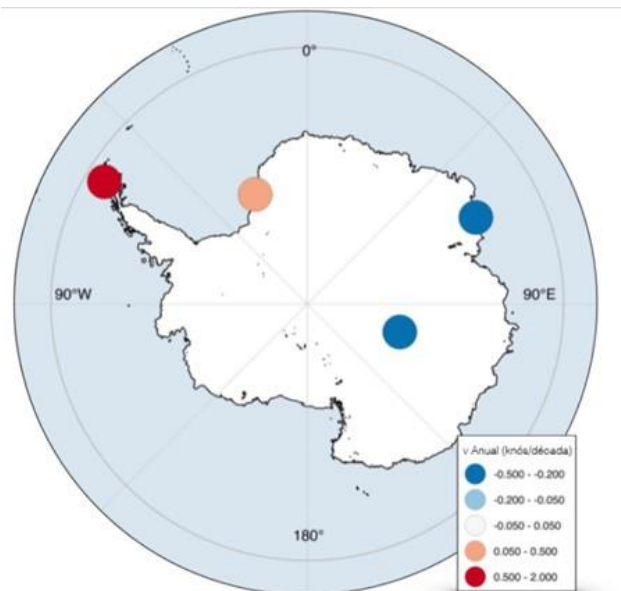


Figura 17 – Distribuição espacial das tendências de v (knós/década) para cada região.

Conclusão

Através da obtenção de séries temporais e do cálculo das tendências tanto para as estações individuais quanto agrupadas em regiões, fica evidente que existe uma complexidade espacial das propriedades meteorológicas analisadas na Antártica.

O Padrão de Dipolo na Temperatura, discutido por Turner et al. (2005) de fato ocorre, e observa-se um rápido aquecimento no oeste do continente, enquanto que no lado leste o aquecimento é bem discreto ou neutro. A maioria dos valores de tendências difere dos calculados por Turner et al. (2005), indicando que mudanças continuaram a ocorrer após o ano 2000, ano em que se encerrou este primeiro trabalho. Ainda assim, a Península Antártica continua sendo a região onde o continente mais aquece, e a estação meteorológica de Faraday, dentre as que apresentam maior tendência positiva (0.46°C/década). Como discutido em Turner et al. (2005), o número razoável de estações do lado leste permite confiabilidade na caracterização das tendências de temperatura. A Antártica oeste continental e o interior do continente contam com poucas estações meteorológicas para estudo, tornando mais difícil investigar essas regiões.

Com relação à variabilidade de PNM e v , as tendências seguem o padrão conhecido, mudando de acordo com os modos de

variabilidade natural. As tendências de PNM concordam com Turner et al. (2005) e são negativas em todo o continente (exceto em Neumayer). Por sua vez, as tendências de v apontam, em sua maioria, para uma intensificação da velocidade dos ventos conferindo com os resultados de referência, ainda que em algumas estações meteorológicas isto não aconteça, provavelmente devido a dinâmica de ventos regional.

É possível, portanto, atribuir a maior parte da variabilidade dessas propriedades aos modos de variabilidade natural do planeta, em especial SAM e SAO que, por sua vez, são modificados de acordo com às mudanças globais do clima, ou seja, aumento da concentração de gases estufa e depleção da camada de ozônio.

Agradecimentos

A realização deste trabalho foi possível graças do British Antarctic Survey que disponibiliza dados meteorológicos através do banco READER. O projeto foi financiado pela FAPESP (2018/05741-2) e Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) 556848/2009-8; CAPES 405869/2013-4, CAPES 23038.001421/2014-30); CNPq-301726/2013-2; CNPq-405869/2013-4; CNPq-MCT-INCT-594 Criosfera 573720/2008-8.

Referências

- Braganza, K. D. (2004). Diurnal temperature range as an index of global climate change during the twentieth century. *Geophysical Research Letters* 31.13.
- 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(6), 2251-2267.
- Easterling, D. R. (1997). Maximum and minimum temperature trends for the globe. *Science* 277 (5324), 364–367.
- Ekaykin, A. A., Vladimirova, D. O., Lipenkov, V. Y., & Masson-Delmotte, V. (2017). Climatic variability in Princess Elizabeth Land (East Antarctica) over the last 350 years. *Climate of the Past*, 13(1), 61-71.
- Fischer, E. M., & Knutti, R. (2015). Anthropogenic contribution to global occurrence of heavy-precipitation and high-temperature extremes. *Nature Climate Change*, 5(6), 560.
- Gonzalez, S., & Fortuny., D. (2018). How robust are the temperature trends on the Antarctic Peninsula?. *Antarctic Science* 30.5, 322-328.
- Hazel, J. E., & Stewart, A. L. (2019). Are the Near-Antarctic Easterly Winds Weakening in Response to Enhancement of the Southern Annular Mode?. *Journal of Climate*, 32(6), 1895-1918.
- Holland, P. W., & Welsch, R. E. (1977). Robust regression using iteratively reweighted least-squares. *Communications in Statistics-theory and Methods* 6 (9), 813–827.
- IPCC, M. C. (2014). *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Geneva, Switzerland: IPCC.
- IPCC, M.-D., Zhai, P., Pörtner, H., Roberts, D., Skea, J., Shukla, P., . . . Waterfield, T. (2018). Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change. *IPCC*.
- Jones, P. D. (1995). "Recent variations in mean temperature and the diurnal temperature range in the Antarctic. *Geophysical Research Letters* 22.11, 1345-1348.
- Jones, P. D. (2001). *A databank of Antarctic surface temperature and pressure data*. Carbon Dioxide Information Analysis Center., Oak Ridge National Laboratory: U.S. Department of Energy Rep. ORNL/CDIAC-27, NDP-032.
- Kwok, R., & Comiso, J. C. (2002). Spatial patterns of variability in Antarctic surface temperature: Connections to the Southern Hemisphere Annular Mode and the Southern Oscillation. *Geophysical Research Letters* 29.14, 50-1.
- Lachlan-Cope, T. (2005). Role of sea ice in forcing the winter climate of antarctica in a global climate model. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 110 (D3).
- Lindemann, D. d., & Justino, F. B. (2015). The influence of the modes of climate variability in antarctic surface temperature. *Revista Brasileira de Meteorologia* 30, 214–222.
- Marshall, G. J. (2003). Trends in the southern annular mode from observations and reanalyses. *Journal of Climate* 16 (24), 4134–4143.
- Marshall, G. J. (2007). Half-century seasonal relationships between the southern annular mode and antarctic temperatures. *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society* 27 (3), 373–383.
- Nicolas, J. P., & Bromwich, D. H. (2014). New reconstruction of Antarctic near-surface temperatures: Multidecadal trends and reliability of global reanalyses. *Journal of Climate*, 27(21), 8070-8093.
- Randel, W. J., Polvani, L., Wu, F., Kinnison, D. E., Zou, C. Z., & Mears, C. (2017). Troposphere-stratosphere temperature trends derived from satellite data compared with ensemble simulations from WACCM. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 122(18), 9651-9667.

- Raphael, M. (2003). Impact of observed sea-ice concentration on the southern hemisphere extratropical atmospheric circulation in summer. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 108 (D22).
- Raphael, M. N., Marshall, G. J., Turner, J., Fogt, R. L., Schneider, D., Dixon, D. A., & Hobbs, W. R. (2016). The Amundsen sea low: variability, change, and impact on Antarctic climate. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 97(1), 111-121.
- SCAR. (n.d.). *READER Database*. Retrieved Julho 10, 2019, from SCAR: <https://legacy.bas.ac.uk/met/READER/data.html>
- Schlosser, E., Haumann, F. A., & Raphael, M. N. (2018). Atmospheric influences on the anomalous 2016 Antarctic sea ice decay. *The Cryosphere*, 12(3), 1103-1119.
- Schwerdtfeger, W. (1984). Weather and Climate of the Antarctic. *El-sevier*, 261.
- Smith, K. L., & Polvani, L. M. (2017). Spatial patterns of recent Antarctic surface temperature trends and the importance of natural variability: lessons from multiple reconstructions and the CMIP5 models. *Climate dynamics*, 48(7-8), 2653-2670.
- Turner, J. e. (2004). The SCAR READER project: Toward a high-quality database of mean Antarctic meteorological observations. *Journal of Climate* 17.14, 2890-2898.
- Turner, J., Barrand, N. E., Bracegirdle, T. J., Convey, P., Hodgson, D. A., Jarvis, M., . . . Jacobs, S. (2014). Antarctic climate change and the environment: an update. *Polar Record* 50 (254), 237–259.
- Turner, J., Bindschadler, R., Convey, P., Di Prisco, G., Fahrbach, E., Gutt, J., . . . Summerhayes, C. (2009). *Antarctic climate change and the environment*. Cambridge, UK: Scientific Committee on Antarctic Research.
- Turner, J., Colwell, S. R., Marshall, G. J., Lachlan-Cope, T. A., Carleton, A. M., Jones, . . . P. A., I. (2005). Antarctic climate change during the last 50 years. *International journal of Climatology* 25 (3), 279–294.
- Turner-a, J., Summerhayes, C., Sparrow, M., Mayewski, P., Convey, P., di Prisco, G., & Bo, S. (2016). Antarctic Climate Change and the Environment 2016 Update. *Scientific Committee on Antarctic Research*.
- Turner-b, J., Lu, H., White, I., King, C. J., Phillips, T., Hosking, J. S., . . . Deb, P. (2016). Absence of 21st century warming on Antarctica Peninsula consistent with natural variability. *Nature*, 411.
- Van Den Broeke, M. R. (1998). The semi-annual oscillation and Antarctic climate. Part 2: recent changes. *Antarctic Science*, 10(2), 184-191.
- Waters, C. N., Zalasiewicz, J., ummerhayes, C., Barnosky, A. D., Poirier, C., Gałuszka, A., & Jeandel, C. (2016). The Anthropocene is functionally and stratigraphically distinct from the Holocene. *Science*, 351(6269), aad2622.