

Gelo marinho antártico: tendências de 1978 a 2006

Juliana Marini Marson^{‡1}
Mauricio Magalhães Mata^{‡2}
Carlos Alberto Eiras Garcia^{‡3}

[‡]Universidade Federal do Rio Grande – FURG
Laboratório de Estudos dos Oceanos e Clima, Instituto de Oceanografia
Av. Itália, km 08 - 96201-900 - Rio Grande - RS, Brasil
¹jumarson@gmail.com; ²mauricio.mata@furg.br; ³dfsgar@furg.br

Abstract. Sea ice plays an important role on Earth's climate. Besides its high albedo, sea ice isolates ocean from atmosphere reducing the heat flux between them and is in part responsible for deep water formation through brine expulsion. However, these processes can be affected by the recent global temperature increase. The objectives of this work are to calculate the long term trends of sea ice concentration and extension and try to make the relation, even preliminarily, between these trends and climate change. For this, analyses such as linear regression and correlation were made with SMMR and SSMI data for the 1978-2006 period. The results show that almost all Antarctica's regions have a positive trend except the Bellingshausen/Amundsen Seas. The reasons for this are not well established, but processes like increase of air and water temperature, El Niño events, and positive trends for SAM index are pointed as being critical factors influencing this area. For the whole Southern Ocean, the trend was significant and positive, in opposition to the Arctic's sea ice extension trend. To find the possible causes for these trends, we need to take into account the several processes that happen in these areas and their behavior over time and not consider just one factor to be responsible. We have to remember that the time series is relatively short and that these trends can just be the ascending part of a major cycle.

Palavras-chave: SMMR, SSMI, climate change, mudanças climáticas

1. Introdução

O gelo marinho é responsável por parte da manutenção do clima nas regiões polares e na Terra. Além de apresentar um alto albedo, o que permite que grande parte da radiação recebida seja refletida, ele reduz a transferência de calor entre oceano e atmosfera [e.g., *Strass e Fahrbach*, 1998]. Possui grande importância na formação de águas profundas envolvidas na circulação termohalina global, já que provoca aumento da densidade das águas através da rejeição de sal durante sua formação [e.g., *Spreen et al.*, 2007]. A cobertura de gelo marinho Antártico foi ainda citada por *Stephens e Keeling* [2000] como possível responsável pela menor concentração de CO₂ atmosférico durante períodos glaciais, limitando o fluxo de CO₂ do mar para o ar em regiões de ventilação de águas profundas.

No entanto, estes processos que envolvem ou dependem do gelo marinho podem ser alterados caso haja uma mudança significativa na cobertura do mesmo. Esta é uma preocupação que vem crescendo nos últimos anos, visto que o gelo marinho é considerado um dos indicadores precoces do aquecimento global [*Bjørge et al.*, 1997].

Estudos do gelo marinho Antártico e Ártico começaram a ser realizados desde a década de 70, quando sensores de microondas passivos passaram a monitorar as regiões polares. A partir destes dados, *Parkinson e Cavalieri* [2008] mostraram que a cobertura de gelo perene do Ártico diminuiu numa taxa de $45.1 \pm 4.6 \times 10^3 \text{ km}^2/\text{ano}$ de 1979 a 2006. No entanto, diversos estudos mostram que a resposta do gelo marinho ao aumento de temperatura global não é a mesma para ambos os hemisférios, apresentando uma assimetria [e.g., *Cavalieri et al.*, 1997; *Cavalieri et al.*, 2003]: a tendência neste mesmo período (1979-2006) para o gelo marinho antártico foi de $+11.5 \pm 4.6 \times 10^3 \text{ km}^2/\text{ano}$ [*Cavalieri e Parkinson*, 2008]. Ainda assim, esta tendência não é homogênea para todo entorno do continente Antártico, havendo uma variabilidade regional muito grande [*Zwally et al.*, 1983; *Stammerjohn e Smith*, 1997].

A região que tem apresentado a única tendência negativa para extensão de gelo marinho é o oeste da Península Antártica (PA), que teve o maior aquecimento nos últimos 50 anos, com

taxas de aumento de temperatura do ar da ordem de $0.56^{\circ}\text{C}/\text{década}$ [Turner et al., 2005]. A PA foi considerada como uma das três regiões de altas latitudes que tiveram um aquecimento regional recente substancialmente mais rápido que a média global [Vaughan et al., 2003]. Este aquecimento parece estar se refletindo na cobertura de gelo marinho. Já em 1997, Jacobs e Comiso mostraram uma diminuição de 20% na extensão em Amundsen e Bellingshausen nas duas décadas seguintes a 1973.

As tendências para o gelo marinho antártico ainda não são bem explicadas, tanto quanto suas relações com as recentes evidências de aquecimento global, e devem ser melhor investigadas. Por isto, o presente trabalho tem como objetivo analisar tendências de longo período da variação do gelo marinho antártico no período de 1978 a 2006, calculando as tendências lineares de concentração e extensão a partir de médias anuais para toda Antártica e para cada um dos cinco setores definidos posteriormente.

2. Metodologia de Trabalho

Os dados de concentração de gelo marinho foram obtidos a partir do banco de imagens do National Snow and Ice Data Center dos Estados Unidos (NSIDC, <ftp://sidacs.colorado.edu>). Eles foram originalmente gerados a partir da medição da temperatura de brilho feita pelos sensores SMMR e SSM/I. Os instrumentos SMMR e SSM/I são radiômetros de microondas de multi-freqüências e bi-polarizados, que capturam radiação de microondas a uma altitude de $\sim 800\text{km}$. Nas freqüências das microondas, a radiância observada varia linearmente com a temperatura do material emissor, de acordo com a lei de Rayleigh-Jeans, e é geralmente expressada em termos de temperatura de brilho. Dependendo da freqüência e polarização, a temperatura de brilho é afetada por mudanças nas condições superficiais, subsuperficiais e atmosféricas. A capacidade multi-canal permite a discriminação de diferentes efeitos superficiais e atmosféricos e permite o desenvolvimento de algoritmos que provém uma gama de informações geofísicas sobre a superfície [Comiso, 1999]. A conversão da temperatura de brilho para concentração de gelo foi feita através de um algoritmo. Neste trabalho, o algoritmo escolhido foi o Bootstrap, que utiliza os canais de 19- e 37-GHz na polarização vertical [Comiso, 1995; Comiso, 1999; Comiso e Nishio, 2008]. O próprio algoritmo já compensa os efeitos da atmosfera e as discrepâncias que os dados apresentam na mudança de um sensor para outro [Comiso, 1999].

As imagens são médias mensais feitas a partir de imagens diárias, e referem-se ao período de Novembro de 1978 a Dezembro de 2006, sendo os dados de Novembro de 1978 a Julho de 1987 registrados pelo sensor SMMR e de Agosto de 1987 a Dezembro de 2006 pelo SSM/I. Houve apenas uma pequena lacuna nos dados (Dezembro de 1987 a Janeiro de 1988), que foi preenchida linearmente. Para o cálculo das tendências lineares anuais, o período utilizado foi de 1979-2006. As imagens têm resolução espacial de 25×25 km em projeção polar estereográfica, totalizando 332×316 pixels. Com o objetivo de se observar a tendência do gelo marinho em diferentes regiões no entorno da Antártica separadamente, o domínio espacial foi dividido conforme indica a Figura 1. Essa divisão foi feita segundo a bibliografia mais recente [Cavalieri e Parkinson, 2008], para que os resultados pudessem ser igualmente comparados.

A concentração de gelo é definida como a porcentagem de uma dada área coberta por gelo marinho. A extensão de gelo marinho é obtida pela multiplicação entre o número de pixels com concentração acima de 15% e a área dos mesmos (neste caso, 625 km^2) [e.g., Zwally et al., 2002].

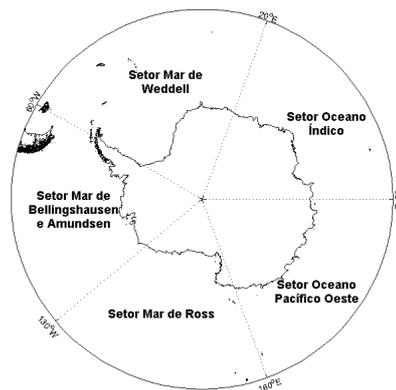


Figura 1. Divisões propostas do Oceano Austral para a análise do gelo marinho

Para atender os objetivos propostos para este trabalho, algumas técnicas estatísticas foram aplicadas na série de imagens de cobertura de gelo disponível, através do programa MatLab. A primeira foi a estimativa da tendência linear do gelo marinho ao longo dos 28 anos através do método de regressão linear, que se baseia no Método de Mínimos Quadrados descrito por *Emery e Thomson* [1997] para o caso mais simples. Neste método, encontramos os coeficientes linear (a) e angular (b) da reta que melhor se ajusta a distribuição do conjunto de dados. O coeficiente angular indica qual a inclinação da reta, que representará a taxa de aumento /diminuição de gelo marinho. Para o cálculo da margem de erro da tendência, foi calculado o erro-padrão do coeficiente angular, que é a medida aproximada da distância entre a estimativa b e o coeficiente angular populacional B [Peixoto, 2007].

Com o objetivo de verificar o ajuste dos dados à reta, o cálculo da correlação foi conduzido. A correlação (r) entre duas variáveis (x e y) é função do número de pares de dados presentes (N), e determina o quão bem elas co-variam no tempo e/ou espaço [Emery e Thomson, 1997]. Em geral, se o valor de r está próximo de 0, concluímos que não há correlação linear significativa entre x e y , mas se r está próximo de -1 ou +1, concluímos pela existência de correlação linear significativa entre x e y . Porém, esses valores críticos "próximos a" 0, -1 ou +1 são dependentes de N . Assim, a melhor maneira de verificarmos se há correlação linear significativa entre as variáveis é através de um teste de hipóteses.

O teste de hipóteses [e.g., Triola, 1999] foi feito utilizando, como estatística de teste, foi usada a distribuição t de Student. O N utilizado foi de 28, já que as tendências calculadas basearam-se na regressão de médias anuais. Nestes cálculos foram desconsiderados os meses de Novembro e Dezembro de 1978, já que a média anual para este ano ficaria subestimada. Se t for, em módulo, maior que o valor crítico estabelecido a certo nível de confiança, então rejeitamos a hipótese nula e dizemos que há evidência suficiente para apoiar a existência de uma correlação linear entre as variáveis.

3. Resultados

A regressão linear foi aplicada para as séries temporais anuais de concentração e extensão de gelo marinho. Na Figura 2, cada pixel mostra o b da reta ajustada a sua série temporal, ou seja, qual a inclinação da reta, que por sua vez está associada à taxa de variação linear da propriedade. Desta forma, quanto mais positivo o valor do pixel, mais rapidamente a concentração de gelo tende a aumentar ao longo do tempo; quanto mais negativo, mais rapidamente tende a decair. Observa-se uma diminuição do gelo marinho nas proximidades da Península Antártica, no setor do Mar de Bellingshausen e Amundsen, e um aumento no setor do Mar de Ross. As outras regiões apresentam tendências relativamente pequenas.

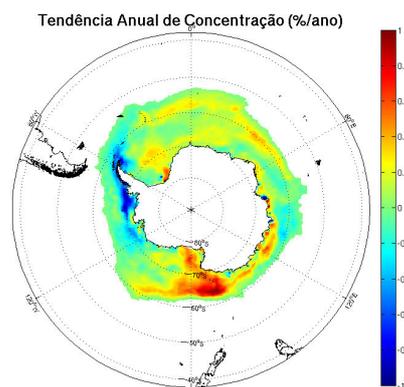


Figura 2. Coeficiente angular da equação da reta para cada pixel, a partir das médias anuais de concentração de gelo marinho.

Os coeficientes de correlação (r) variaram entre aproximadamente $+0.7$ e -0.7 (Figura 3a), sendo maiores onde as tendências foram também maiores. Para o teste de hipóteses, tomando $N = 28$, usamos o valor crítico de 2.056 com $\alpha = 0.05$ (teste bilateral). Assim, para valores de t maiores que 2.056, com 95% de confiança, podemos dizer que há evidência suficiente para apoiar a existência de uma correlação linear entre as concentrações de gelo e o tempo. As tendências com t maior que 2.056 são apresentadas na Figura 3b.

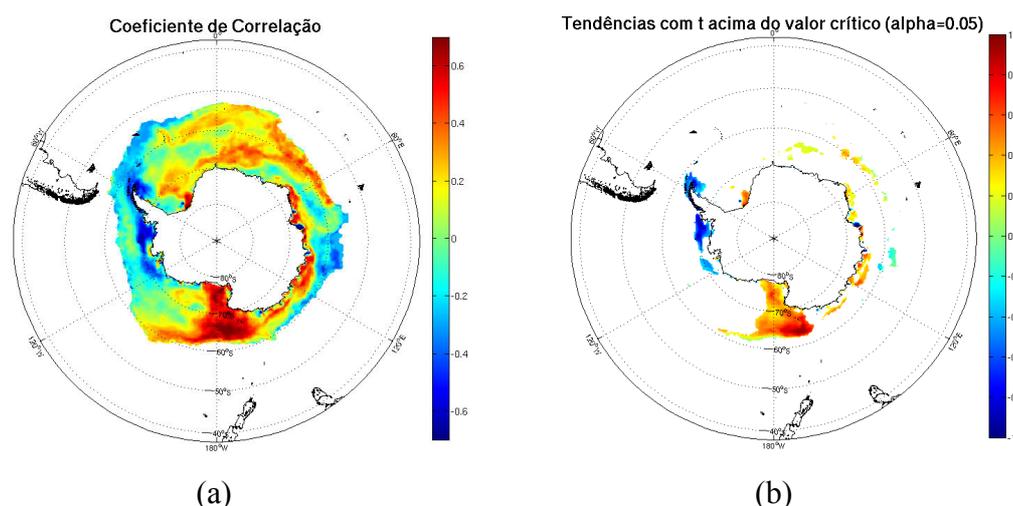


Figura 3. Correlação linear (a) e tendências anuais significativas (95% de confiança) (b).

Considerando que cada região apresenta um padrão de variação de gelo marinho diferenciado, foi conduzida uma análise de regressão linear para a extensão de gelo em cada setor da Antártica. Nas Figuras 4a, 4b, 4c, 4d e 4e são apresentadas as séries temporais de médias anuais com suas respectivas retas de regressão. A tendência anual e seu erro-padrão estão indicados no canto inferior direito de cada figura.

As Figuras 4a, 4b, 4c e 4d mostram uma tendência de aumento na extensão de gelo marinho ao longo dos 28 anos, sendo a maior taxa no setor do Mar de Ross e a menor no setor do Pacífico Oeste. Em contrapartida, a Figura 4e mostra que o único setor com uma tendência negativa e relativamente grande é o do Mar de Bellingshausen e Amundsen. Os valores de t de Student para cada setor foram de 0.491, 1.492, 0.398, 2.588 e 2.595, respectivamente para Weddell, Oc. Índico, Pacífico Oeste, Ross e Bellingshausen/Amundsen. A extensão de gelo marinho do Oceano Austral como um todo apresentou uma tendência positiva de 12.8×10^3 km² por ano (Figura 4f), com $t = 2.619$. As tendências aqui encontradas corroboram com os resultados apresentados por *Cavaliere e Parkinson* [2008], como mostra a Tabela 1.

Sector	Resultados	<i>Cavalieri e Parkinson [2008]</i>
Oceano Austral	12.8±1.0	11.5±4.6
Weddell	3.1±1.2	3.3±5.6
Índico	4.1±0.5	3.5±2.6
Pacífico Oeste	1.0±0.5	1.6±2.2
Ross	12.5±0.9	11.4±4.6
Belling./Amundsen	-7.8±0.6	-8.3±2.9

Tabela 1. Tendências lineares anuais (em $\times 10^3 \text{ km}^2/\text{ano}$) encontradas neste trabalho e em *Cavalieri e Parkinson [2008]*.

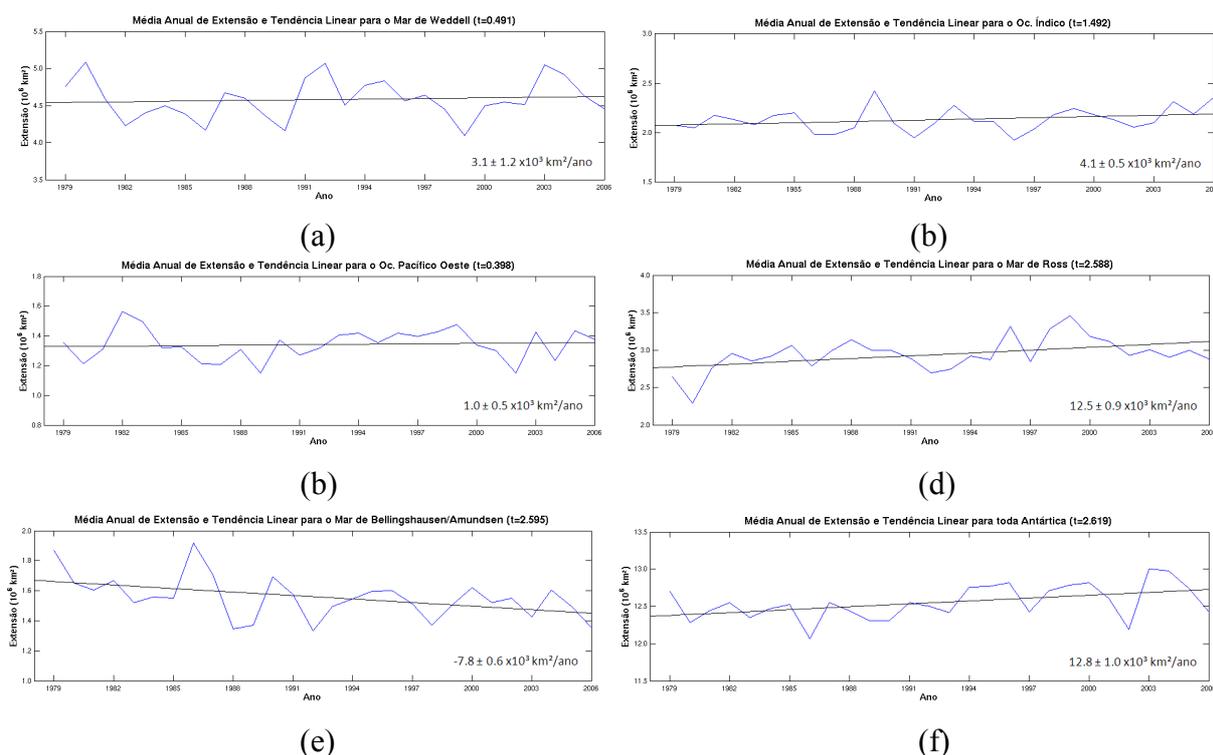


Figura 4. Médias anuais de extensão de gelo e tendência para os setores de (a) Weddell; (b) Oc. Índico; (c) Oc. Pacífico Oeste; (d) Ross; (e) Bellingshausen/Amundsen e (f) Oc. Austral.

4. Discussão e Conclusões

Alguns dos fatores responsáveis pelas recentes tendências do gelo marinho nos setores onde as mesmas foram significativas serão sugeridos. Para o setor de Mar de Bellingshausen e Amundsen, os fatores a serem considerados na diminuição da extensão de gelo são enumerados abaixo.

1. Aumento da temperatura do ar registrado nas últimas décadas em estações localizadas a oeste da Península Antártica, como *Faraday* e *Rothera* [Jacobs e Comiso, 1997]. Estas temperaturas começaram a ser registradas na metade da década de 1940 e mostraram um aumento de $0.05^\circ\text{C}/\text{ano}$, que progressivamente pode dificultar a formação do gelo marinho. *Vaughan et al.* [2003] mostraram que a Península Antártica teve um aquecimento muito mais rápido que o resto da Antártica e sem precedentes nos últimos 1800 anos. Sugerem ainda que os mecanismos que podem estar causando este aquecimento são (1) a mudança na circulação oceânica, como a intrusão da água circumpolar profunda (CWD) na plataforma continental; (2) mudança na circulação atmosférica, talvez ligada ao fenômeno ENSO; e (3) aquecimento estufa amplificado por processos que envolvem o gelo marinho.

2. Aumento da temperatura da Corrente Circumpolar Antártica (CCA) [Gille, 2002]. Como esta corrente entra em contato direto e interage com o gelo marinho da região, a maior temperatura da água também pode influenciar na não formação de gelo.
3. Tendência nos últimos 20 anos de aumento do índice SAM (*Southern Annular Mode*), que é o primeiro componente principal das anomalias de altura geopotencial (i.e., função da pressão atmosférica) a 850-hPa ao sul de 20°S [Thompson e Wallace, 2000]. Lefebvre et al. [2004] indicam que a ocorrência de SAM positivo está associada à presença de pressões atmosféricas mais baixas ao nível do mar em altas latitudes e mais elevadas em baixas latitudes. Devido à existência de uma anomalia de baixa pressão no setor Bellingshausen/Amundsen em anos de SAM positivo, os Mares de Weddell e Bellingshausen ficam sujeitos a ventos predominantemente do quadrante norte. Isso faz com que haja transporte de Ekman em direção à costa oeste da Península Antártica, o que poderia estar causando uma compactação do gelo junto ao continente, resultando na tendência de diminuição significativa da extensão do gelo marinho nessa região.
4. Maior ocorrência de eventos quentes ENSO nos últimos anos [Kwok e Comiso, 2002]. A Península Antártica é a região do continente onde há mais forte influência do ENSO [Turner, 2004]. Nas décadas recentes, os eventos de El Niño têm sido mais frequentes e de maior intensidade, o que pode indicar que esta forçante tropical tenha um papel nas mudanças climáticas da Península [Turner et al., 2005]. Stammerjohn et al. [2003] também indicam que a tendência de decaimento na extensão anual do gelo marinho no oeste da Península Antártica nos anos 80 e 90 foi devido à tendência de decaimento da extensão do gelo marinho no inverno, causada pelas interações gelo-atmosfera que respondem a mudanças nas anomalias de circulação atmosférica trópico-polar no Pacífico.
5. Elevação da temperatura (1°C) e salinidade na camada superior do oceano adjacente ao oeste da Península Antártica, registrada por Meredith e King [2005], que também indicam que estas elevações atuarão na redução da futura produção de gelo marinho.

No setor do Mar de Ross, a explicação para o aumento na concentração de gelo ao longo dos anos pode ser encontrada na tendência de aumento do índice SAM e na forte atuação de ventos catabáticos, que são dirigidos pela topografia regional e transportam ar frio pelo Mar de Ross [Liu et al., 2004].

Quanto à tendência linear para toda a Antártica, que também foi significativa ($t = 2.619$), esta foi discutida por Zhang [2007] num estudo utilizando modelagem, que sugere uma redução na circulação convectiva no oceano por baixo do gelo e reduzido fluxo de calor disponível para derreter o gelo (ou inibir sua formação), resultando num aumento geral na extensão de gelo. Isto, no entanto, não explica as diferenças regionais de tendência, e assim a resposta para o que pode estar dirigindo as mudanças observadas permanece incógnita.

É importante ressaltar que possivelmente nenhum dos fatores citados acima seja responsável, isoladamente, pelas tendências de longo período encontradas. Ao tentar explicar tais tendências, precisamos considerar o somatório dos diversos processos atuantes em cada setor em estudo e como estes processos vêm se comportando nos últimos anos.

Devemos ter em mente que as séries temporais obtidas pelos sensores remotos orbitais ainda são relativamente curtas e, portanto, essa tendência não retrata totalmente a variação linear do gelo marinho. Trabalhos realizados a partir de dados históricos de baleeiros [e.g., de la Mare, 1997; Cotté e Guinet, 2007] apontam para um grande declínio na extensão de gelo marinho no período anterior à década de 1970, quando ainda não existiam observações de satélites. Curran et al. [2003], num trabalho onde registros de ácido metanosulfônico (MSA) de 1841 a 1995 indicam a redução da extensão de gelo marinho a partir dos anos 50, completam:

"O registro completo do MSA mostra que o aparente aumento de gelo marinho nos últimos anos é devido a uma ciclicidade. O registro mais longo revela uma tendência de diminuição de larga escala temporal sobreposta"

Outro exemplo de como uma análise baseada em pequenas séries temporais pode ser tendenciosa é o trabalho de Zwally *et al.* [1983], que num período de 3 anos (1973-1976) encontraram uma tendência de diminuição na cobertura de gelo marinho para os Mares de Weddell e Ross e um aumento para o Mar de Bellingshausen, justamente o contrário das tendências aqui apresentadas. Logicamente, a escala temporal aqui considerada é bem maior que aquela, porém para um estudo de variabilidade e tendências a longo prazo ainda é cedo tomar estes resultados como definitivos. Essa tendência de aumento na extensão do gelo marinho antártico pode estar dentro de um ciclo maior, em sua fase ascendente.

Percebemos então que estamos olhando todo um horizonte apenas por uma pequena janela. Além disso, talvez as variações lineares não expliquem boa parte da variabilidade, portanto estudos posteriores abrangendo a não linearidade das variações devem ser realizados.

Agradecimentos

Aos Órgãos financiadores: CNPq/PIBIC-FURG; PROANTAR (CNPq-55.0189/2006-0), CAPES, MCT, MMA, SeCIRM, Marinha do Brasil, que possibilitaram a execução deste trabalho.

Referências Bibliográficas

Björge, E.; Johannessen, O. M.; Miles, M. W. Analysis of merged SMMR-SSM/I time series of Arctic and Antarctic sea ice parameters 1978-1995, **Geophysical Research Letters**, vol. 24, no. 4, 413-416, 1997.

Cavalieri, D. J.; Gloersen, P.; Parkinson, C. L.; Comiso, J. C.; Zwally, H. J. Observed hemispheric asymmetry in global sea ice changes. **Science**, vol. 278, 1104-1106, 1997.

Cavalieri, D. J.; Parkinson, C. L.; Vinnikov, K. Y. 30-Year satellite record reveals contrasting Arctic and Antarctic decadal sea ice variability. **Geophysical Research Letters**, vol. 30, no. 18, 1970, 2003.

Cavalieri, D. J.; Parkinson, C. L. Antarctic sea ice variability and trends, 1979-2006. **Journal of Geophysical Research**, vol. 113, C07007, 2008.

Comiso, J. C. SSM/I sea ice concentrations using the Bootstrap Algorithm. **NASA RP**, 1380, 1995.

Comiso, J. C. Bootstrap sea ice concentrations from Nimbus-7 SMMR and DMSP SSM/I. Boulder, Colorado USA: **National Snow and Ice Data Center**, 1999, updated 2007.

Comiso, J. C.; Nishio, F. Trends in the sea ice cover using enhanced and compatible AMSR-E, SSM/I, and SMMR data. **Journal of Geophysical Research**, vol. 113, C02S07, 2008.

Cotté, C.; Guinet, C. Historical whaling records reveal major regional retreat of Antarctic sea ice. **Deep-Sea Research I**, vol. 54, 243-252, 2007.

Curran, M. A. J.; Van Ommen, T. D.; Morgan, V. I.; Phillips, K. L.; Palmer, A. S. Ice core evidence for Antarctic sea ice decline since the 1950s. **Science**, vol. 302, 1203-1206, 2003.

De La Mare, W. K. Abrupt mid-twentieth-century decline in Antarctic sea-ice extent from whaling records. **Nature**, vol. 389, 57-60, 1997.

Emery, W. J.; Thomson, R. E. **Data analysis methods in physical oceanography**. Pergamon, 1997.

Gille, S. T. Warming of the southern ocean since the 1950s. **Science**, vol. 295, 1275-1277, 2002.

Jacobs, S. S.; Comiso, J. C. Climate Variability in the Amundsen and Bellingshausen Seas. **Journal of Climate**, vol. 10, 697-709, 1997.

Kwok, R.; Comiso, J. C. Southern Ocean climate and sea ice anomalies associated with the Southern Oscillation. **Journal of Climate**, vol. 15, 487-501, 2002.

Lefebvre, W.; Goosse, H.; Timmermann, R.; Fichefet, T. Influence of the Southern Annular Mode on the sea ice-ocean system. **Journal of Geophysical Research**, vol. 109, C09005, 2004.

Liu, J.; Curry, J. A.; Martinson, D. G. Interpretation of recent Antarctic sea ice variability. **Geophysical Research Letters**, vol. 31, L02205, 2004.

Meredith, M. P.; King, J. C. Rapid climate change in the ocean west of the Antarctic Peninsula during the second half of the 20th century. **Geophysical Research Letters**, vol. 32, L19604, 2005.

Parkinson, C. L.; Cavalieri, D. J. Arctic sea ice variability and trends, 1979-2006. **Journal of Geophysical Research**, vol. 113, C07003, 2008.

Peixoto, A. P. N. **Regressão linear simples**. Departamento de Informática em Saúde, UNIFESP, SP, 2007.

Spreen, G.; Kaleschke, L.; Heygster, G. Sea ice remote sensing using AMSR-E 89 GHz Channels. **Journal of Geophysical Research**, vol. 113, C02S03, 2007.

Stammerjohn, S. E.; Smith, R. C. Opposing Southern Ocean climate patterns as revealed by trends in regional sea ice coverage. **Climatic Change**, vol. 37, 617-639, 1997.

Stammerjohn, S. E.; Drinkwater, M. R.; Smith, R. C.; Liu, X. Ice-atmosphere interactions during sea-ice advance and retreat in the western Antarctic Peninsula region. **Journal of Geophysical Research**, vol. 108, 27-1 - 27-15, 2003.

Stephens, B. B.; Keeling, R. F. The influence of Antarctic sea ice on glacial-interglacial CO₂ variations. **Nature**, vol. 404, 171-174, 2000.

Strass, V. H.; Fahrbach, E. Temporal and regional variation of sea ice draft and coverage in the Weddell Sea obtained from upward looking sonars. **Antarctic Sea Ice: Physical Processes, Interactions, and Variability**, **Antarctic Research Series**, AGU, Washington DC, vol. 74, 123-139, 1998.

Thompson, D. W. J.; Wallace, J. M. Annular modes in the extratropical circulation: I. Month-to-month variability. **Journal of Climate**, vol. 13, 1000-1016, 2000.

Triola, M. F. **Introdução à Estatística**. JC editora, Sétima Edição, 1999.

Turner, J. The El Niño-Southern Oscillation and Antarctica. **International Journal of Climatology**, vol. 24, 1-31, 2004.

Turner, J.; Colwell, S. R.; Marshall, G. J.; Lachlan-Cope, T. A.; Carleton, A. M.; Jones, P. D.; Lagun, V.; Reid, P. A.; Iagovkina, S. Antarctic climate change during the last 50 years. **International Journal of Climatology**, vol. 25, 279-294, 2005.

Vaughan, D. G.; Marshall, G. J.; Connolley, W. M.; Parkinson, C. L.; Mulvaney, R.; Hodgson, D. A.; King, J. C.; Pudsey, C. J.; Turner, J. Recent rapid regional climate warming on the Antarctic Peninsula. **Climate Change**, vol. 60, 243-274, 2003.

Zhang, J. Increasing Antarctic sea ice under warming atmospheric and oceanic conditions. **Journal of Climate**, vol. 20, 2515-2529, 2007.

Zwally, H. J.; Comiso, J. C.; Parkinson, C. L.; Campbell, W. J.; Carsey, F. D.; Gloersen, P. Antarctic sea ice, 1973-1976: Satellite passive-microwave observations. **NASA Spec. Publ.**, 459, 206pp, 1983b.

Zwally, H. J.; Comiso, J. C.; Parkinson, C. L.; Cavalieri, D. J.; Gloersen, P. Variability of Antarctic sea ice 1979-1998. **Journal of Geophysical Research**, vol. 107, 9-1 - 9-19, 2002