Revista Brasileira de Climatologia
ISSN: 1980-055x (Impressa) 2237-8642 (Eletrônica)

A INFLUÊNCIA DO MODO ANULAR SUL SOBRE O CICLO DO CARBONO NO OCEANO SUL: UMA BREVE REVISÃO DO CONHECIMENTO ATUAL[1]

AÍMOLA, Luis – luis.aimola@itv.org
Doutor – Instituto Tecnológico Vale

ALBUQUERQUE, Monik – monik-albuquerque@hotmail.com
Bolsista do ITV no Programa Inova Talentos do Instituto Euvaldo Lodi

RESUMO: Descrevemos resumidamente o estado atual do conhecimento sobre a influência do Modo Anular Sul (SAM) sobre o Ciclo do Carbono Global no Oceano Sul. Mostramos que estudos recentes indicam que o SAM está tornando mais positivo o que provavelmente alterará a produção biológica no Oceano Sul bem como os processos físicos que determinam as trocas ar-mar de dióxido de carbono e o sequestro e armazenamento do CO_2 antrópico nessa bacia oceânica. Dessa forma o Oceano Sul poderá ter sua eficiência de modulador do clima global reduzida, acelerando o aquecimento global.

Palavras-chave: Modo Anular Sul, Oceano Sul, Ciclo do Carbono, Mudanças do Clima

THE INFLUENCE MODE OF VOID SOUTH ON CARBON CYCLE IN THE OCEAN SOUTH A BRIEF CURRENT KNOWLEDGE REVIEW

ABSTRACT: We briefly describe the current state of knowledge about the influence of South Annular Mode (SAM) on the Global Carbon Cycle in the Southern Ocean. We show that recent studies indicate that the SAM is becoming more positive which is likely to alter the organic production in the Southern Ocean as well as the physical processes that determine the carbon dioxide air-sea exchanges and the sequestration and storage of the man-made CO_2 in this ocean basin. Thus the Southern Ocean may have its efficiency of global climate modulator reduced, accelerating global warming.

Keywords: Southern Ocean, South Annular Mode, Carbon Cycle, Climate Change

1. INTRODUÇÃO

A previsão da mudança antrópica do clima depende do nosso conhecimento dos fatores que influenciam o ciclo global do carbono. O fluxo de dióxido de carbono antrópico (CO_2) para dentro do oceano e a biosfera terrestre são os dois fatores que controlam o aquecimento global. Existem ainda importantes incertezas na quantificação desses fluxos que afetam enormemente nossas previsões da mudança de clima. Por isso são necessários estudos adicionais observacionais e de modelagem para aprimorarmos nosso conhecimento sobre esses dois subsistemas.

A interação dinâmica entre a atmosfera e o oceano é um processo complexo que determina as trocas ar-mar de CO_2 e é sensivelmente afetado pela temperatura da superfície do mar, bem como pela concentração de CO_2 na atmosfera (WEISS et al., 2007). Todos estes fatores têm sido extensivamente estudados para a redução de nossas incertezas sobre o fluxo ar-mar de CO_2 e o acúmulo desse gás no interior do oceano, já que são estes processos que determinam sensivelmente a concentração atmosférica desse gás e por consequência a magnitude do aquecimento global.

O Oceano Sul é uma vasta bacia no Hemisfério Sul cobrindo desde o círculo de latitude 30° S até a costa da Antártica, circulando-a, e comunica-se

[1] NOTA DE PESQUISA

ISSN: 1980-055x (Impressa) 2237-8642 (Eletrônica)

com os três grandes oceanos, Pacífico, Atlântico e Índico, e por isso tem importância significativa para a compreensão dos processos associados à determinação do clima atual e as mudanças climáticas de longo prazo (BROECKER, 1991). O Oceano Austral (ao sul de 50° S) é responsável por aproximadamente 4% da retirada total de CO_2 atmosférico global, ou seja, -0,05 x 10^{15} gramas de carbono por ano, estimado para o ano de 2000 (TAKAHASHI et al., 2009). No Hemisfério Sul um dos principais fenômenos atmosféricos que compõe a dinâmica de trocas de CO_2 entre o Oceano Sul (OS), ao sul de 30° S, e a atmosfera é o Modo Anular Sul (South Annular Mode – SAM) ou, também denominado Oscilação Antártica (AAO) (GONG E WANG, 1999).

O SAM é o modo mais importante de variabilidade atmosférica nas médias e altas latitudes do Hemisfério Sul (HS). É um fenômeno marcado por uma estrutura espacial anular de anomalias de pressão zonalmente simétricas e cuja variabilidade temporal pode ser caracterizada como sendo uma oscilação de baixa frequência do campo de pressão superficial entre as altas e médias latitudes (L'ECUYER e THOMPSON, 2015). O SAM influencia variáveis atmosféricas e indicadores climáticos em todo o Hemisfério Sul, como oscilações de temperatura sobre a Antártica (KWOK e COMISO, 2002), precipitação e temperatura nas latitudes médias (GILLETT et al., 2006), variações na extensão do gelo marinho e a circulação oceânica (HALL E VISBECK, 2002). Por isso o SAM afeta indiretamente a todos os processos físico-químicos e biológicos do ciclo do carbono no Oceano Sul.

Alguns estudos recentes, a partir de observações e modelagem, sugerem que o SAM apresenta uma tendência de mudança de sua estrutura espacial e temporal em escalas decadal e multidecadal devido tanto ao aquecimento global quanto ao aumento da concentração de ozônio na estratosfera do HS. Se esta mudança for confirmada a eficiência de sequestro e armazenagem de carbono antrópico no oceano Sul será também afetada. O que isso representará para a magnitude da mudança antrópica do clima? A descrição e quantificação detalhada da influência do SAM e de suas possíveis mudanças no ciclo do carbono no Oceano Sul e consequentemente no clima global é atualmente uma área de intensa pesquisa oferecendo inúmeras oportunidades de pesquisas que contribuam ao aumento de nossa capacidade de previsão da mudança antrópica do clima.

O presente artigo visa rever o que trabalhos recentes têm mostrado sobre a influência do SAM no ciclo do carbono no Oceano Sul e indicar as lacunas mais importantes ainda existentes em nosso conhecimento dessa influência. O artigo está estruturado como segue. Na seção 1 descrevemos resumidamente o papel do Oceano Sul no clima global por meio da sua captura e transporte de calor e CO_2 para o fundo oceânico e daí para as outras bacias com as quais se comunica. Na seção 2 descrevemos o fenômeno do SAM, suas principais características. Na seção 3 revemos os principais trabalhos que investigam como o SAM influencia a interação do ciclo do carbono com o Oceano Sul através das trocas ar-mar de CO_2 e como esta interação está mudando. Na conclusão indicamos as principais questões ainda em aberto sobre o papel do SAM no clima global e apontamos algumas linhas de pesquisa que provavelmente prevalecerão sobre esse tema na próxima década.

ISSN: 1980-055x (Impressa) 2237-8642 (Eletrônica)

Seção 1: Oceano Sul e seu papel no clima

O Oceano Sul (OS) é uma região chave na captação global das emissões antrópicas de CO_2 (MIKALOFF-FLETCHER et al, 2006), pois é responsável por cerca de um terço da absorção daquelas emissões (cerca de 0,7 Pg C ano-1), feita pelo oceano global, embora represente apenas cerca de 20% da área de superfície global dos oceanos (RINTOUL et al, 2001; SARMIENTO et al, 2004a). Isso demostra a grande eficiência no sequestro e armazenamento de CO_2 e seu importante papel na modulação do clima global.

A principal componente do Oceano Sul que determina as suas características físicas fundamentais é a Corrente Circumpolar Antártica (CCA) que constitui o mais intenso e longo sistema de correntes oceânicas do globo, chegando a transportar até 134 Sv (134×10^6 m^3 s^{-1}) (CUNNINGHAM et al., 2003). Essa circulação circunda a terra entre aproximadamente as latitudes de 50° e 60° Sul e é gerada pela tensão dos ventos de oeste, fluindo por isso mesmo de oeste para leste. Tais características não são observadas em nenhum outro local do planeta (OLBERS et al., 2004).

Devido à existência da ACC o Oceano Sul tem um papel chave na modulação do clima global através do sequestro e redistribuição de calor e dióxido de carbono, esta realizada por meio do transporte de Ekman em direção ao Equador, atingindo latitudes mais altas no Hemisfério Norte. No transporte de Ekman oriundo da ACC no ramo que entra no Atlântico constitui a parte mais rasa da Circulação de Revolvimento Meridional do Atlântico, onde nas latitudes mais altas do hemisfério norte as águas atingem maiores densidades de sal e temperaturas mais baixas, afundando e retornando em profundidades médias e altas dessa bacia às regiões do Oceano Sul, chegando até à costa da Antártica, para ai ressurgirem novamente na superfície. Esse processo circular tem um importante papel na determinação do clima global por sequestrar e redistribuir o calor e o dióxido de carbono (MARSHALL e SPERRY, 2012) tanto no Atlântico Norte quanto na região da Antártica.

Segundo Olbers et al. (2004) à estrutura horizontal da CCA corresponde um sistema fragmentado de jatos de intensidades variáveis, cada um correspondente a fronteiras de massas de águas superficiais que acompanham as frentes oceânicas ao longo da CCA. As principais características que diferenciam estas frentes são a temperatura e a salinidade (SOKOLOV & RINTOUL, 2009). Tradicionalmente são identificadas três frentes no Oceano Sul: a Frente Subantártica (FSA), a Frente Polar (FP) e a Frente Sul da Corrente Circumpolar Antártica (FSCCA). Duas dessas frentes estão associadas a fortes correntes superficiais, sendo assim consideradas as principais frentes; são elas: Frente Subantártica (FSA) e a Frente Polar (FP) (ORSI et al., 1995).

A região do Oceano Sul também é dividida em Zonas (Figura 1). A região que vai do continente Antártico até a Frente Polar é conhecida como a Zona Antártica, e a região entre a Frente Polar e a Frente Subtropical é a Zona Subantártica. Segundo Pickard (1974), na Zona Antártica, encontraremos água superficial Antártica ocupando uma camada rasa de até aproximadamente 100 m a 250 m de profundidade com valores de temperatura variando entre –1,9 °C a 4

ISSN: 1980-055x (Impressa) 2237-8642 (Eletrônica)

°C (mínima de inverno e máxima de verão) e abaixo, água Antártica circumpolar com um máximo de temperatura de 1,5 °C a 2,5 °C de 300 m a 600 m e depois declinando a 0 °C ou 0,5 °C até os 4000 m. Na Zona Subantártica encontraremos a água superior Subantártica nos primeiros 400 metros, com temperatura variando de 4°C a 14°C (mínima de inverno e máxima de verão).

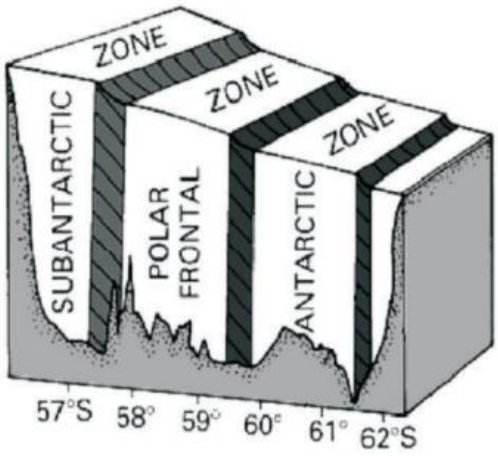


Figura 1. Esquematização das posições aproximadas das zonas na região da Passagem de Drake. Fonte: Steward (2005) e adaptação de Tomzack e Godfrey, 2001).

Seção 2: O Modo Anular Sul - SAM

Thompson et al. (2000) mostraram que existem fenômenos atmosféricos denominados Modos Anulares, que determinam os principais modos de variabilidade atmosférica. Eles envolvem trocas de massas atmosféricas entre as latitudes altas e médias em cada hemisfério e existem o ano todo. São marcados espacialmente por uma estrutura zonalmente simétrica (anular – daí seus nomes) da anomalia de pressão na superfície ou do campo da altura geopotencial (Figura 2). No hemisfério norte o modo anular é denominado Modo Anular Norte (North Annular Mode – NAM) e no hemisfério Sul, Modo Anular Sul (South Anular Mode – SAM).

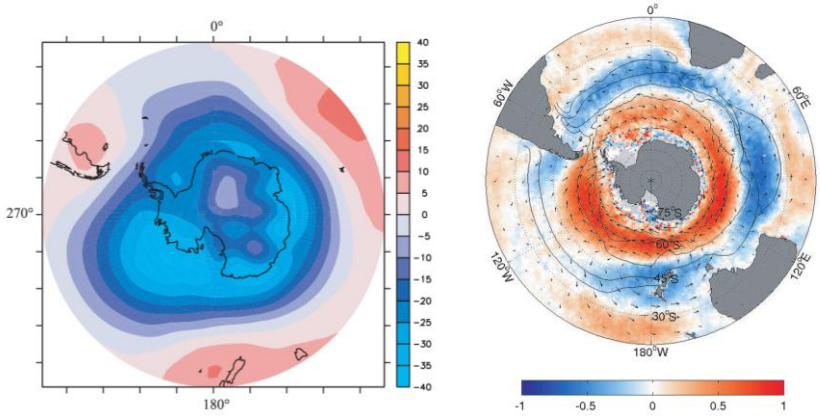


Figura 2. (a) Estrutura espacial do SAM. Fonte: Lenton & Matear (2007). (b) Mapa de Regressão entre o índice SAM e a velocidade e direção do vento. Fonte: Lovenduski & Gruber (2005).

ISSN: 1980-055x (Impressa) 2237-8642 (Eletrônica)

Os modos anulares e em particular o SAM, apresentam duas fases distintas e alternadas: a chamada fase positiva, na qual o campo de pressão sobre o polo sul é mais fraco e em latitudes médias mais fortes do que a média anual. Nesta fase a corrente de jato polar se contrai alcançando latitude mais altas e se intensifica e é acompanhada da intensificação dos ventos de oeste (Figura 2(b)); e na outra fase, a negativa, se invertem os efeitos, com alta pressão sobre o polo Sul, enfraquecimento dos ventos de oeste e uma expansão do jato polar em direção às latitudes médias enquanto nestas há uma intensificação dos ventos de oeste e pressões mais baixas ao nível do mar. Ao longo do ano ocorrem várias vezes oscilações entre estas duas fases, como uma 'gangorra', induzindo variabilidades alternadas em vários campos atmosféricos na região do HS.

Os modos anulares podem ser estudados por meio de índices que medem sua estrutura espacial e variabilidade temporal. No hemisfério Sul o Modo Anular Sul (SAM) é caracterizado pelo índice SAMI (SAM Index – SAMI), que pode ser calculado como o primeiro modo da função empírica ortogonal (Empirical Orthogonal Function - EOF) da pressão ao nível do mar ou do campo de altura geopotencial (THOMPSON et al., 2000).

A primeira definição do índice SAM foi proposta numericamente por Gong e Wang (1999) da seguinte forma: SAMI= $P^*_{40°S} - P^*_{65°S}$, onde $P^*_{40°S}$ e $P^*_{65°S}$ são as pressões mensais ao nível médio do mar e normalizadas nas latitudes de 40°S e 65ºS, respectivamente; essas latitudes foram escolhidas por representarem correlações estatisticamente significativas entre elas.

O índice do SAM tem exibido uma tendência para a fase positiva nas últimas décadas (Figura 3) (TURNER et al., 2005). Segundo Thompson et al. (2000), a tendência positiva do SAM nas ultimas décadas está relacionada ao aumento dos ventos de leste em latitudes médias e às condições frias sobre a maior parte da Antártica. Esse aumento dos ventos de leste que são resultado de tendências positivas do SAM tem contribuído para a variabilidade espacial da temperatura na Antártica (THOMPSON & SOLOMON, 2002).

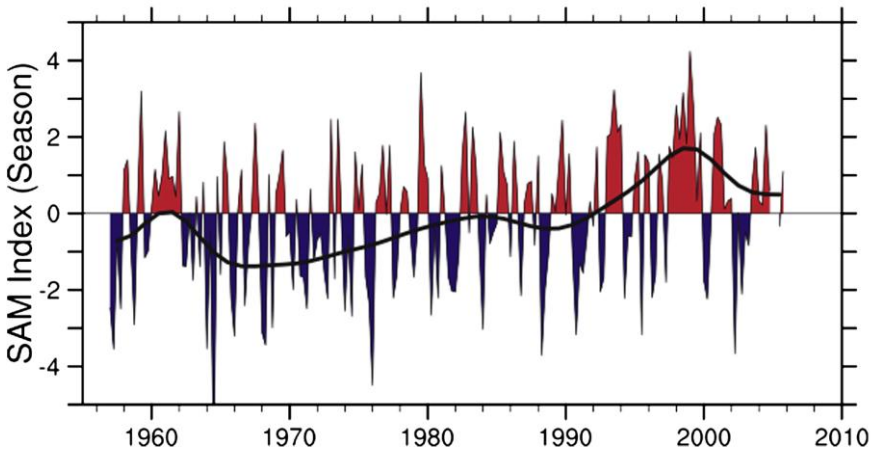


Figura 3. Série temporal do índice SAM. Onde a linha preta mostra as variações decadais. Curvas em cor vermelha indicam as fases positivas e em azul as negativas. Fonte: (IPCC, 2007)

ISSN: 1980-055x (Impressa) 2237-8642 (Eletrônica)

Seção 3: Impactos do SAM sobre o ciclo do carbono

Os oceanos vem passando por significativas alterações no seu ciclo bio-geoquímico natural dada a rapidez com a qual têm absorvido o CO_2 antrópico e elevada a sua temperatura média. Em especial o Oceano Antártico, que se estende desde a Costa Antártica até a latitude de 60°S, tem demonstrado ser particularmente sensível à adição de CO_2 (MCNEIL & MATEAR, 2008).

As concentrações de CO_2 tanto na camada superficial do oceano quanto na atmosfera podem ser explicadas pela combinação de processos físicos e biológicos, que promovem a circulação de parte do CO_2 da superfície para o fundo dos oceanos. Estes processos podem ser descritos como bomba física (ou bomba de solubilidade) e bomba biológica, ambas eficazes na transferência de CO_2 da atmosfera para o interior dos oceanos (TURNER et al., 2007). Esses mecanismos de troca na interface ar-mar são de fundamental importância para o entendimento dos processos que determinam o ciclo do carbono e de que forma o oceano pode responder ao aumento do CO_2 atmosférico devido às emissões antrópicas (LIBES et al., 2009).

A partir do exposto até aqui que qualquer alteração do padrão do ventos de oeste no Oceano Sul devido à variações no SAM terá impactos diretos sobre a ACC e consequentemente sobre o transporte de Ekman, afetando o transporte para latitudes mais baixas de CO_2 e calor sequestrados nesta bacia.

a) A Influência do SAM nos processos físico-quimicos

Nos processos físico-químicos da bomba física a solubilidade do CO_2 é em função da temperatura e salinidade da água do mar. Sabe-se que os gases têm maior solubilidade em baixas temperaturas. Como consequência disto, o CO_2 é mais solúvel nas águas geladas dos polos do que nas quentes do equador. No caso dos polos a água mais fria e mais densa chega a níveis até abaixo da termoclina, logo o CO_2 é injetado em níveis profundos do oceano nessas regiões (LIBES et al., 2009; SABINE et al., 2004).

Lenton & Matear (2007) mostraram que o SAM pode alterar o fluxo ar-mar de CO_2 no oceano sul por meio de mudanças no coeficiente de troca gasosa (K) e na pressão parcial de CO_2 (ΔpCO_2) na água do mar. A resposta de cada um destes fatores a alterações no SAM foram avaliadas pela regressão destas variáveis e os resultados demonstraram que o SAM afeta tanto K como também o ΔpCO2, porém as principais mudanças na resposta dos fluxos de ar-mar no oceano antártico foram observadas na ΔpCO_2 (67%), que é uma função de quatro variáveis: temperatura da superfície do mar, salinidade, TALK (alcalinidade total) e DIC (carbono inorgânico dissolvido). Uma análise mais detalhada mostrou que as mudanças no ΔpCO_2 foram impulsionadas principalmente por mudanças na concentração do DIC em águas superficiais do Oceano Sul. A concentração do DIC é por sua vez uma função da física do oceano, isto é, da circulação oceânica, do fluxo de CO_2 ar-mar, dos fluxos de diluição de água doce no mar e da exportação de produção biológica via circulação para outras regiões. Por fim

ISSN: 1980-055x (Impressa) 2237-8642 (Eletrônica)

concluíram que a resposta zonal integrada do DIC associada às mudanças no SAM tem como fator dominante a física do oceano.

Ainda segundo Lenton & Matear (2007) a estratificação vertical pode ter uma influência significativa sobre os fluxos futuros de CO_2 se o DIC ofertado pela ressurgência for, de fato, o mecanismo dominante de variabilidade interanual. Uma vez que se espera que o SAM se torne mais forte e mais positivo em resposta às mudanças climáticas, haveria uma diminuição na absorção de CO_2 no Oceano Antártico por 0.1 PgC / ano por unidade de mudança no SAM (LENTON & MATEAR, 2007).

b) As Influências do SAM nos processos biológicos

Fatores físicos como incidência de luz, temperatura e turbulência da água podem influenciar os padrões de produtividade biológica nas camadas superficiais do oceano. Todavia, a capacidade de armazenamento de CO_2 pelo oceano é fortemente afetada pelos processos biológicos (HONJO et al., 2008). A sua eficiência pode ser reforçada pela ressurgência de águas profundas que levam nutrientes para as águas superficiais, que são consumidos pelo fitoplâncton e transportados como matéria orgânica para o oceano profundo (DUCKLOW et al., 2001).

A partir de um estudo estatístico de observações de satélite da distribuição de clorofila A, Lovenduski & Gruber (2005) investigaram como a circulação oceânica deverá mudar em resposta às mudanças dos ventos durante a fase positiva do SAM e seus impactos sobre a bomba biológica. A Figura 5 sintetiza as principais respostas do oceano a essa intensificação da fase positiva do SAM segundo a distribuição geográfica das frentes e zonas oceânicas. Esses autores concluíram a partir de suas análises que as mudanças induzidas pelo SAM na direção dos ventos de superfície criam anomalias no transporte de Ekman havendo com isso um fortalecimento dos ventos de oeste em 55° S e enfraquecimento dos ventos em 35° S (anomalias de leste) (HALL & VISBECK. 2002; LOVENDUSKI E GRUBER, 2005).

Notou-se que a alta concentração de clorofila na Zona Antártica é impulsionada pela alta oferta de ferro trazida pela ressurgência anômala, enquanto que na Zona Subantártica há uma baixa concentração de clorofila, causada pelo aumento da estratificação que leva a uma redução da oferta de macronutrientes na região (Figura 4). Observaram ainda que ao Sul da Frente Polar Antártica (APF) as anomalias de concentração de clorofila são positivamente correlacionadas com o SAM, porém essa correlação é negativa no norte da frente (LOVENDUSKI & GRUBER, 2005). Ainda segundo esses autores a correlação negativa no norte da Frente Polar Antártica é causada por forte limitação de luz como consequência da maior profundidade da camada de mistura. Desta maneira, esses autores concluem que haverá uma quase compensação total entre os efeitos e por isso apenas um moderado nível de variabilidade do fluxo ar-mar de CO_2 no Oceano Sul (LOVENDUSKI & GRUBER, 2005).

ISSN: 1980-055x (Impressa) 2237-8642 (Eletrônica)

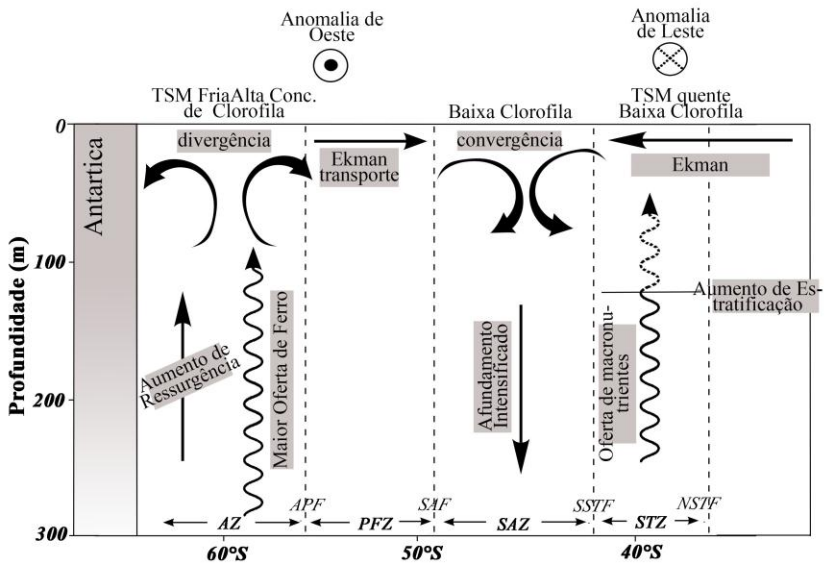


Figura 4. Representação esquemática do oceano em resposta a uma fase positiva de SAM para cada zona no Oceano Sul. Vide para definição das frentes e zonas a Figura 1. Modificado de Lovenduski & Gruber (2005).

2. CONCLUSÃO

Estudos recentes sobre o papel do SAM no ciclo do carbono no Oceano Sul indicam que grande parte da variabilidade do fluxo ar-mar de CO_2 natural e antrópico em todo hemisfério Sul, de 30° S em direção aos polos, está ligada diretamente ao SAM (HALL e VISBECK, 2002). A fase positiva está associada com a liberação anômala de CO_2 do Oceano Sul (LOVENDUSKI & GRUBER, 2005) e uma intensificação da mesma pode acarretar em diminuição da eficiência do sequestro do CO_2 antrópico o que poderá contribuir para acelerar o aquecimento global.

Os estudos citados nesta revisão ainda não são conclusivos por se carecer de maior quantidade de dados observacionais e modelos que representem com maior fidelidade processos em pequena escala como os vórtices. Recentemente se iniciou um programa internacional de pesquisa, o South Ocean Carbon and Climate Observations and Modeling (SOCCOM) (SOCCOM, 2015), que ampliará nosso conhecimento sobre o ciclo do carbono no Oceano Sul. Esse programa envolverá extensivas observações do fluxo de carbono no OS através do lançamento de flutuadores robóticos do tipo ARGO além de trabalhos de modelagem em escala de vórtices que revelará muitos aspectos ainda desconhecidos incluindo o papel do SAM nesse ciclo. O que se espera para a próxima década é que estes estudos reduzam enormemente as incertezas sobre o clima futuro.

3. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BROECKER, W. S. "The Great Conveyor Belt". **Oceanography**, vol. 4, nº 2, p. 79-89, 1991.

CUNNINGHAM, S. A., ALDERSON, S. B., KING, B. A., BRANDON, M.A. Transport and variability of the Antarctic Circumpolar Current in Drake Passage. **Journal of Geophysical Research**, v. 108, p. 1-17, 2003.

DUCKLOW, H.W., STEINBERG D.K., and BUESSELER K.O. Upper ocean carbon export and the biological pump. **Oceanography** 14(4) p. 50-58, 2001.

GILLETT, N. P., KELL, T. D., and JONES, P. D. Regional climate impacts of the Southern Annular Mode. **Geophysical Research Letters**, 33, L23704, 2006.

GONG, D., WANG, S. Definition of Antarctic Oscillation Index. **Geophysical Research Letters**, v. 26, p. 459-462, 1999.

HALL, A. and VISBECK, M. Synchronous variability in the Southern Hemisphere Atmosphere, Sea Ice, and Ocean Resulting from the Annular Mode. **Journal of Climate**, v. 15, p. 3043-3057, 2002.

HONJO, S., EGLINTON, T. I., TAYLOR, C. D., ULMER, K. M., SIEVERT, S. M., BRACHER, A., GERMAN, C. R., EDGCOMB, V., FRANCOIS, R., INGLESIAS-RODRIGUEZ, M. D., VAN MOOY, B. and REPETA, D. J. Understanding the role of the Biological Pump in the Global Carbon Cycle: An imperative for Ocean Science. **Oceanography**, 27 (3), pp. 10-16, 2014.

IPCC. Climate Change 2007: the physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. **Cambridge:** Cambridge University Press, p. 996, 2007.

KWOK, R. and COMISO J. C. Southern Ocean Climate and Sea Ice Anomalies Associated with the Southern Oscillation**. Journal of Climate**, v. 15, p.487–501, 2002.

LENTON, A., MATEAR, R. J. Role of the Southern Annular Mode (SAM) in Southern Ocean CO2 uptake. **Global Biogeochemical Cycles**, 21, 2007.

L'ECUYER, J.; THOMPSON, D. W. J. **Annular Modes Website**. Disponível em: http://www.atmos.colostate.edu/ao/introduction.html. Acesso em: 04 de março de 2015.

LIBES, S. M. Introduction to marine biogeochemistry**. Academic Press**, 928 p. 2009

LOVENDUSKI, N. S., and GRUBER N. Impact of the Southern Annular Mode on Southern Ocean circulation and biology. **Geophysical Research Letters**, v. 32, L11603, 2005.

MARSHALL, J., SPEER, K. Closure of the meridional overturning circulation through southern ocean upwelling. **Nature Geoscience**, v. 5, pp. 171-180, 2012.

MCNEIL, B. I., and MATEAR, R. J. Southern Ocean acidification: A tipping point at 450-ppm atmospheric CO_2, Proceedings of the National Academy of Sciences USA, **105**(48), v.18, p. 860-18, 2008.

MIKALOFF-FLETCHER, S. E., GRUBER, N., JACOBSON, A. R., DONEY, S. C. DUTKIEWICZ, S., GERBER, M., FOLLOWS, M., JOOS, F., LINDSAY, K., MENEMENLIS, D., MOUCHET, A., MULLER, S. A., and SARMIENTO, J. L. Inverse estimates of anthropogenic CO_2 uptake, transport, and storage by the ocean. **Global Biogeochemical Cycles**, 20, GB2002, 2006.

OLBERS, D., BOROWSKI, D., VÖLKER, C. and WOLFF, J-O. The dynamical balance, transport and circulation of the Antarctic Circumpolar Current. **Antarctic Science** 16 (4): 439–470, 2004.

ORSI, A. H., WHITWORTH, T. and NOWLIN, W. D. On the meridional extent and fronts of the Antarctic Circumpolar Current, **Deep Sea Res**., Part I, v. 42, p. 641–673. 1995.

PICKARD, G. L. **Oceanografia Física Descritiva**, 2° ed., Rio de Janeiro: Fundação de Estudos do Mar. p. 180, 1974.

ISSN: 1980-055x (Impressa) 2237-8642 (Eletrônica)

RINTOUL, S. R., HUGHES, C. W. & OLBERS, D. The Antarctic Circumpolar Current System. **Ocean Circulation and Climate**. Cap. 4.6. Academic Press. p. 271-302, 2001.

SABINE, C. L., HEIMANN, M.; ARTAXO, P.; Bakker, D. C. E.; Chen, C. A.; Field, C. B.; GRUBER, N.; LEE QUÉRÉ, C. et al. Current status and 88 past trends of the global carbon cycle. **Scope-Scientific committee on problems of the environment international council of scientific unions**, v. 62, p. 17-44, 2004.

SARMIENTO, J. L., GRUBER, N. Ocean Biogeochemical Dynamics. Princeton University Press, Princeton, NJ. p. 526, 2006.

SARMIENTO, J. L., GRUBER, N., BRZEZINSKI, M. A. and DUNNE, J. P. Highlatitude controls of thermocline nutrients and low latitude biological productivity. **Nature,** 427(6969), p. 56–60, 2004.

SOKOLOV, S. & RINTOUL, S. Circumpolar structure and distribution of the Antarctic Circumpolar Current fronts: 1. Mean circumpolar paths. **Journal of Geophysical Research**, 114: p.1-19, 2009.

TAKAHASHI, T., SUTHERLAND, S.C. e WANNINKHOF. R. Climatological mean and decadal change in surface ocean pCO(2), and net sea-air CO_2 flux over the global oceans. **Deep Sea Research**, v.56, p. 554-557, 2009.

THOMPSON, D. W. J e SOLOMON, S. Interpretation of recent Southern Hemisphere climate change. **Science**, 296 (5569), p. 895-899, 2002.

THOMPSON, D. W. J., WALLACE, J. M. and HEGERL, G. C. Annular Modes in the Extratropical Circulation. Part II: Trends, Journal of Climate, v.13 (5), p.1018–1036, 2000.

TOMCZAK M., e GODFREY, J. S., **Regional Oceanography** – An Introduction, 2001.

TURNER, J., OVERLAND J.E. and WALSH, J.E. An Arctic and Antarctic perspective on recent climate change. **International Journal of Climatology**, v. 27, p.277-293, 2007.

WEISS, A., KUSS, J., PETERS, G., SCHNEIDER, B. Evaluating transfer velocity-wind speed relationship using a long-term series of direct eddy correlation co2 flux measurements. **Journal of Marine Systems**, v. 66, p. 130-139, 2007.

Texto submetido à RBClima em 30/10/2015