



Influência do Aquecimento Global nas Trajetórias e Intensidades dos Ciclones Extratropicais no Hemisfério Sul
Influence of Global Warming on The Trajectories and Intensities of Extratropical Cyclones in the Southern Hemisphere

Rose Ane Freitas¹; Douglas Lindemann²; Flávio Justino³ & Jéferson Machado⁴

¹Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais, (CRS-INPE);
Av. Roraima 1000, Bairro Camobi, 97105-900 Santa Maria, RS, Brasil

²Universidade Federal do Rio Grande, Instituto de Oceanografia, Av. Itália km 8, Rio Grande, RS, Brasil

³Universidade Federal de Viçosa, Departamento de Engenharia Agrícola, P. H. Holfs S/N, 36570-000, Viçosa, MG, Brasil.

⁴ Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências, Centro de Meteorologia de Bauru

Av. Eng. Luiz Edmundo Carrijo Coube, 14-01, Bauru – SP

E-mails: rosefreitas78@gmail.com; douglasdasilva.lindemann@gmail.com; fjustino@ufv.br; & jeferson@fc.unesp.br

Recebido em: 02/04/2018 Aprovado em: 13/07/2018

DOI: http://dx.doi.org/10.11137/2018_2_297_304

Resumo

Ciclones extratropicais e sua faixa preferida de operação “trilhos de tempestade - ST” desempenham um papel fundamental no sistema energético global, especialmente em regiões de altas latitudes. Desta forma, a climatologia atual destes sistemas é avaliada e suas mudanças potenciais sob condições de aumento da temperatura global e CO₂ as concentrações são analisadas com base no modelo climático global acoplado European Centre / Hamburg Model versão 5 / Instituto Max Planck - Modelo do Oceano (ECHAM5-MPI-OM). Nossa avaliação foca-se no transporte térmico transiente e nos padrões dominantes de energia cinética. Para condições futuras, os resultados obtidos mostram que as trajetórias de ST podem ser afetadas por modificações na distribuição espacial, movendo-se para Sul em direção ao polo. Os resultados também indicam que variações na cobertura de gelo marinho e temperatura da superfície do mar são fundamentais na distribuição da atividade ciclônica em condições climáticas futuras.

Palavras-chave: Ciclones extratropicais; aquecimento global; faixas de tempestade

Abstract

Extratropical cyclones and your preferred range of operation “storm tracks” play a key role in the global energy system, especially in regions of high latitudes. In this way, the current climatology of these systems are evaluated and its possible changes under situations of increased global temperature and CO₂ concentrations are analysed from the global coupled climate model European Centre/Hamburg Model versão 5 / Max Planck Institute - Ocean Model (ECHAM-5-MPI-OM). So, with the intention of obtaining greater precision of intensity and spatial displacement of extratropical cyclones, evaluate important variables of climate energy component, as the flow of heat sensitive and dominant patterns of kinetic energy. To future conditions, the results obtained show that the trajectories of ST may suffer modifications in the distribution, moving South towards the pole. The results also indicate that variations in sea ice cover and sea surface temperature are fundamental in the distribution of the cyclonic activity in future climate conditions.

Keywords: Extratropical cyclones; global warming; storm tracks

1 Introdução

Os ciclones extratropicais são importantes para as variações climáticas através de seus transportes latitudinais de energia, além da sua capacidade de alterar as condições de tempo influenciando na precipitação, cobertura de nuvens e radiação incidente. Dessa forma, os ciclones extratropicais exercem grande influência em regiões de latitudes médias e altas (Hoskins & Hodges, 2005; O’Kane *et al.*, 2014). Os ciclones extratropicais apresentam sua faixa de preferência de ocorrência entre os paralelos de 35° e 65° em ambos os hemisférios, e por isso são importantes componentes da circulação geral atmosférica, através do forte impacto que exercem nos processos de troca de calor, momentum e vapor d’água (Tings & Held, 1990; Justino, 2004).

O Hemisfério Norte (HN) tem sido amplamente estudado quanto aos ciclones extratropicais e suas faixas preferenciais de atuação (ST), principalmente com a inclusão dos dados de satélite e modelos climáticos globais, enquanto isso, análises sobre ST no Hemisfério Sul (HS) ainda necessitam de maiores investigações. Estudos pioneiros como os descritos por Gan & Rao (1991) e Seluchi (1995), descrevem a ocorrência dos ciclones extratropicais e sua significativa influência na região sul da América do Sul, induzindo a alterações nos padrões de temperatura do ar e de precipitação sobre a região.

Os ST são determinados por diferentes fatores, principalmente pelos gradientes horizontais de temperatura, além da localização e sentido das zonas baroclínicas. Simmonds & Keay (2000) indicaram que a frequência média anual de ciclones entre 30° e 70° S decresceu cerca de 10% desde o início da década de 1970 até o final da década de 1990, o que pode estar associado ao aquecimento anômalo reportado no HS nesse período. Além disso, essa redução no número de sistemas é acompanhada por ciclones mais intensos e com maior dimensão horizontal. Esses resultados obtidos por Simmonds & Keay (2000) estão de acordo com Pezza & Ambrizzi (2004) que também observaram uma redução do número de sistemas no final da década de 1970 durante o período de inverno austral.

Qualquer possível alteração nas trajetórias dos ciclones é um processo complexo por envolver dife-

rentes variáveis meteorológicas e em diferentes escalas espaciais e temporais (Bengtsson *et al.*, 2006). Anomalias regionais de Temperatura da Superfície do Mar (TSM) são suficientes para influenciar de forma sistemática a região de domínio de uma determinada tempestade (Nakamura & Shimpo, 2004). Utilizando simulações de mesoescala, Giordani & Caniaux (2001) estudaram o papel da TSM e dos fluxos entre o mar e o ar na dinâmica dos ciclones oceânicos, e observaram que os ciclones possuem desenvolvimento mais rápido em condições de TSM superiores a 15°C. Inatsu & Hoskins (2004) também utilizando experimentos numéricos, mas com um modelo climático global atmosférico, confirmaram que a assimetria zonal da TSM é fundamental para a estrutura e deslocamento dos ciclones.

Tendências de aumento da TSM previstas no Oceano Atlântico Sul em cenários de aquecimento global podem contribuir para a intensificação dos ciclones. Lambert & Fyfe (2006) analisaram a frequência e intensidade dos ciclones projetada através dos diferentes modelos do *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC). Os pesquisadores concluíram que de forma geral, os modelos utilizados exibem uma redução no número de ciclogêneses e aumento de suas intensidades. Esse padrão foi mantido para diferentes cenários analisados, ou seja, quanto maior o incremento dos gases de efeito estufa maior o número de eventos.

Diante do exposto, o presente trabalho visa analisar a climatologia atual do comportamento sazonal das trajetórias dos ciclones extratropicais no HS em níveis médios da atmosfera (500 hPa) e suas possíveis variações em condições futuras. Além disso, o trabalho também analisa os mecanismos de intensificação dos ciclones extratropicais e suas trajetórias, relacionando-as com alterações na TSM e no gelo marinho.

2 Material e Métodos

A região de estudo está compreendida entre as latitudes 40° S e 90° S. O modelo climático utilizado é o ECHAM5-MPI-OM desenvolvido pelo European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF). Para o cenário atual (*Present Days*, PD)

e de Aquecimento Global (*Global Warming*, GW), utilizou-se simulações da sexta geração do modelo ECHAM5-MPI-OM (Roeckner *et al.*, 2003). Os componentes atmosféricos (ECHAM5) e oceânico (MPI-OM) do modelo estão bem documentados por Jungclaus *et al.* (2006) e Marsland *et al.* (2003). Porém, vale ressaltar que o componente atmosférico do modelo apresenta 31 níveis verticais e uma resolução espacial de T63, com espaçamento de grade de $1,875^\circ \times 1,875^\circ$. Enquanto que o componente oceânico contém 40 níveis verticais, sendo os 20 primeiros níveis confinados entre a superfície e 600 m de profundidade (Bengtsson *et al.* 2006).

O cenário A1B do *Fourth Assessment Report* (AR4) do IPCC foi utilizado como condição para as projeções climáticas futuras, onde utiliza-se uma concentração de dióxido de carbono (CO_2) de aproximadamente 600 partes por milhão (ppm) em relação ao presente (IPCC, 2007).

As análises desenvolvidas no presente trabalho são baseadas na climatologia para os dois períodos distintos: i) a climatologia atual que compreende o período de 1980 a 2000 (PD); e ii) o período futuro estabelecido entre 2080 e 2100 (GW). O intervalo mais distante da atualidade é determinado pela necessidade de se investigar os ST em condições extremamente diferentes dos padrões atuais. Os ST são extraídos a partir de dados diários do modelo ECHAM5-MPI-OM e classificados usando um filtro passa-alta para incluir apenas sistemas com o crescimento e decaimento, em intervalos menores do que seis dias.

Os ST são definidos em dois níveis distintos da atmosfera (superfície e 500 hPa) e também através de duas variáveis: o fluxo de calor sensível e a energia cinética.

2.1 Fluxo de Calor Sensível em Baixos Níveis

As variáveis u , v e T representam as circulações zonal e meridional na atmosfera e temperatura do ar respectivamente, além disso, de acordo com Kaspi & Schneider (2011), $[\cdot]$ representa a média zonal, (\dots) o tempo médio, $(\cdot)'$ flutuação sobre o tempo médio e $(\cdot)^*$ uma flutuação sobre a média zonal.

Utilizando estas definições de médias zonais e temporais, o transporte para a direção norte de calor sensível medida em torno do círculo de latitude sobre um determinado período, pode ser descrito através dos termos da Equação 1. Termo 1: $[\overline{v'T}']$ = Transporte latitudinal e temporal de calor sensível médio em sentido norte; Termo 2: $[\overline{v} \overline{T}']$ = Contribuições da circulação meridional média; Termo 3: $\overline{v^* T^*}$ = Contribuições dos vórtices estacionários; Termo 4: $[\overline{v'T'}]$ = Contribuições dos vórtices transientes. É importante notar que a maior contribuição para o “Termo 1” é dada pelos vórtices transientes (Termo 4), termo este aqui investigado ($v'T'$).

$$[\overline{v'T}'] = [\overline{v} \overline{T}'] + \overline{v^* T^*} + [\overline{v'T'}] \quad (1)$$

2.2 Energia Cinética

A energia cinética por unidade de massa (EKE), ao longo de uma determinada latitude, embora represente uma pequena fração da energia total, ainda é muito importante para entender a gênese e manutenção dos ST, sendo obtido segundo Haltiner & Williams (1980) através da Equação 2:

$$[EKE] = \frac{1}{2} (\overline{u^2} + \overline{v^2}) \quad (2)$$

Onde $\frac{1}{2} \overline{u^2}$ corresponde à energia cinética do escoamento zonal e $\frac{1}{2} \overline{v^2}$ corresponde à energia cinética do escoamento meridional e a barra é a média temporal.

2.3 Funções Ortogonais Empíricas

O método estatístico das Funções Ortogonais Empíricas (EOF – *Empirical Orthogonal Functions*) é utilizado para obter-se os principais padrões espaciais de variabilidade, sua variação no tempo, e a quantificação da importância relativa desses padrões, por meio da variância explicada. A descrição matemática dessa técnica pode ser encontrada em Monahan *et al.* (2009).

3 Resultados e Discussão

O desempenho do modelo climático ECHAM5-MPI-OM em representar as principais variações climáticas são bem documentadas pela literatura ao comparar com os dados de reanálises, incluindo resultados envolvendo os ST (Yin, 2005; Bengtsson *et al.* 2006; Pinto *et al.* 2007; Lehmann & Coumou, 2015). Tomando como base os resultados desses trabalhos prévios, optou-se no presente trabalho por apresentar apenas as diferenças entre o cenário futuro (GW) e o clima presente (PD), considerando-se as estações de verão austral (dezembro, janeiro e fevereiro, DJF) e inverno austral (junho, julho e agosto, JJA).

3.1 Transporte Meridional de Calor Sensível

Na Figura 1 é apresentada a diferença do transporte meridional de calor sensível entre o futuro e o presente, onde trocas de energia potencial do estado básico e a energia potencial disponível para os distúrbios são analisados através do termo 4 da Equação 1: $[\nu'T']$.

Durante DJF (Figura 1A), pode-se observar que em condições de GW, o transporte meridional de calor sensível se apresenta distribuído em uma faixa mais estreita de latitudes (concentrado entre 60°S e 40°S), se comparado às condições de PD, indicando dessa forma uma característica mais zonal, enquanto que durante JJA (Figura 1B) a atividade dos sistemas distribui-se por uma faixa maior de latitudes em direção ao equador. De acordo com Trenberth (1991), altos valores de transporte meridional de calor sensível durante JJA podem estar relacionados com as correntes de jato.

Bengtsson *et al.* (2006) ao utilizarem simulações do ECHAM5-MPI-OM indicaram apenas algumas dificuldades que o modelo tem de representar fortes gradientes de TSM, escoamento sobre montanhas e cobertura de gelo, porém, os valores obtidos pelo modelo não são discrepantes quando comparados com o ERA-40. Em níveis médios (500 hPa), as características do escoamento apresentadas pelo modelo foram satisfatórias quando também comparadas com o ERA-40. Com base nesses resultados

obtidos por Bengtsson *et al.* (2006), o ECHAM5-MPI-OM pode ser considerado como uma ferramenta de análise para cenários futuros com um certo grau de confiabilidade.

As atividades dos transportes se mantêm persistentes e convergem em torno de 5° em direção ao polo durante JJA, principalmente sobre as latitudes médias, com maior destaque sobre a região compreendida entre o litoral sul da Austrália e o sul da Nova Zelândia e no Oceano Pacífico Sul. Já o Oceano Atlântico apresenta uma maior intensificação dos ST em torno de 50° S, estendendo-se de 50° W até 0°, onde os máximos de transporte meridional de calor sensível coincidem com regiões de ST.

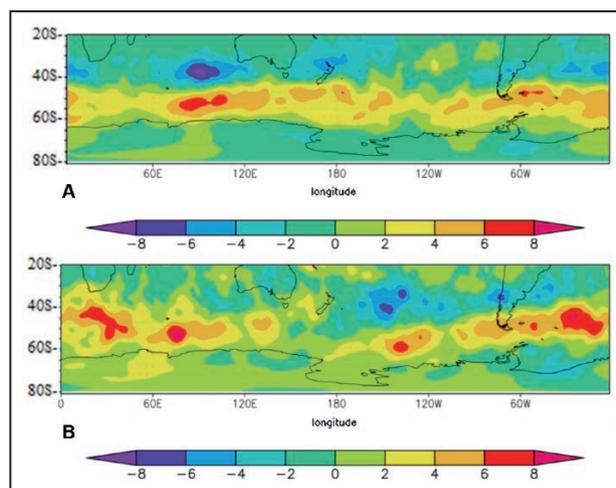


Figura 1 Diferença (GW-PD) do transporte meridional de calor sensível ($^{\circ}\text{C}\cdot\text{m/s}$) em 500 hPa: Dados do ECHAM5-MPI-ON em (A) DJF e (B) JJA.

Ressalta-se que durante JJA, $\nu'T'$ é mais intenso quando comparado com os meses DJF (Figura não apresentada), onde um nota-se um padrão semelhante aos resultados obtidos anteriormente por Yin (2005). O autor também demonstrou o deslocamento dos ST para sul e a diminuição da atividade ciclônica durante os meses de DJF, podendo esse comportamento estar relacionado com a redução e deslocamento da região de baroclinia em direção ao polo.

Para as condições de GW, ocorre uma intensificação dos transportes principalmente no sentido polar da posição média dos ST, quando comparado ao PD. Para DJF pequenas alterações são observadas

com sinais mais relevantes ao sul da África, Austrália e Pacífico Sul. Durante JJA a região entre 120° e 20° W apresenta máximo transporte para sul. Por outro lado, no Pacífico Sul esses transportes aparecem mais intensos em ambas as estações com destaque para JJA onde os valores são ainda maiores. Dessa forma, com base nas análises sazonais anteriores, pode-se afirmar que durante GW, o transporte de calor em direção as altas latitudes será mantido persistente durante todo o ano e alcançará seus maiores valores durante JJA, com deslocamento meridional dos ST em direção ao polo.

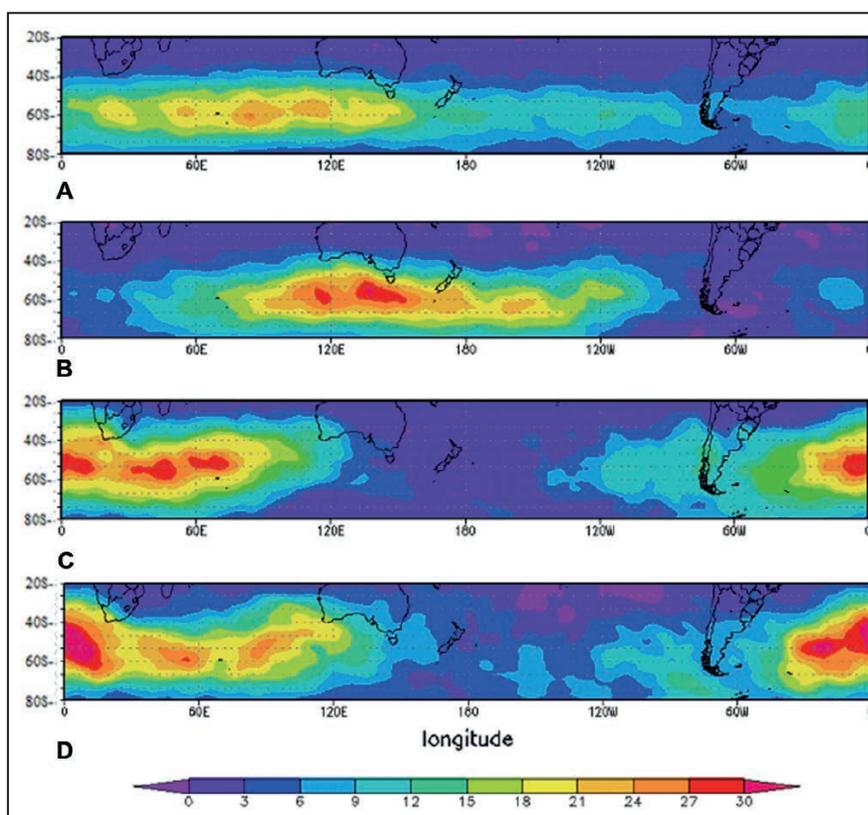
3.2 Energia Cinética em 500 hPa

A posição e intensidade dos ventos em altos níveis da atmosfera (jato de altos níveis) no HS acabam influenciando o comportamento da energia cinética (EKE), o que explica o deslocamento máximo de EKE das latitudes médias durante JJA, para as latitudes mais baixas durante DJF (Trenberth, 1991; Rao *et al.*, 2002).

Com o cálculo da EOF, os resultados de EKE para DJF são apresentados nas Figuras 2A e 2B. Para PD (Figura 2A), as maiores variações de EKE estão concentradas entre as latitudes de 30° a 65°S, com maior ênfase na região compreendida entre 90°E e 120°E, com valores máximos de amplitude entre 20 e 22 $m^2 s^{-2}$. Em condições de GW (Figura 2B) o padrão dominante apresenta-se entre as mesmas latitudes que o período PD, porém, com um pequeno deslocamento para o sul da Austrália, onde ocorre uma intensificação dos seus máximos aproximando-se de 27 $m^2 s^{-2}$.

Para JJA (Figura 2C), verifica-se que as maiores variações de EKE (valores máximos em torno de 22 $m^2 s^{-2}$) estão situadas entre os Oceanos Atlântico e Índico, o que indica um aumento nas variações em relação à DJF, com maior destaque para região a leste do Oceano Atlântico e Oceano Índico. Para GW (Figura 2D) o padrão dominante aumenta a sua área de atuação, estende-se por uma faixa de latitudes entre 35°S e 55°S, principalmente ao sul do Oceano Índico, sul da Austrália e Oceano Atlântico.

Figura 2 Padrão especial da EKE (m^2s^{-2}) a partir do cálculo de EOF em 500 hPa, com dados do ECHAM-5-MPI-ON para: DJF (A) durante o PD; (B) durante o GW; JJA (C) durante o PD e (D) durante o GW.



As condições de GW demonstram que padrões dominantes de EKE apontam para maiores tempestades distribuídas no período DJF, na região de 60°E até 120°W, o que poderá causar um maior impacto sobre o sul da Austrália e Nova Zelândia. Já durante JJA as maiores tempestades apresentam-se entre o sul da África, Oceano Índico e sul da Austrália e Oceano Atlântico, com maior destaque para essa última região.

Esse resultado de maior possibilidade de tempestades ocorrerem no Oceano Atlântico também são encontrados em estudos anteriores, como Pezza & Siammonds (2005), que atribuem à Oscilação Antártica no seu modo/índice positivo, acima dos valores médios um aquecimento do litoral sul brasileiro, reforçando a convecção. Além disso, em condições de aquecimento global, altos valores de TSM podem contribuir para a intensificação dos ST, aumentando a probabilidade de ocorrência dos ciclones extratropicais no Atlântico Sul.

3.3 Temperatura da Superfície do Mar (TSM)

Um significativo gradiente meridional da TSM é observado para as condições de PD (Figura

3A) para as altas latitudes do HS, e esse mesmo gradiente é mantido em condições de GW (Figura 3B).

Ao comparar os dois cenários descritos anteriores (PD e GW) através de campos de diferenças de TSM (Figura 3C) as variações ficam mais ressaltadas. Valores positivos de TSM são observados em altas latitudes em torno do Oceano Austral. Os maiores valores são verificados principalmente em duas regiões, sobre o setor do Oceano Pacífico Sudeste (60° W – 150° W) e entre as longitudes de 0° e 60° W.

De acordo com Nakamura & Shimpo (2004), a TSM em latitudes médias exerce um papel fundamental para a determinação da distribuição assimétrica dos ST, bem como a sua intensificação em baixos níveis da troposfera. E com a intensificação do gradiente de TSM em condições de GW (Figura 3C), esse fator pode ser relevante para uma maior assimetria e intensificação dos ST evidenciado pelo fluxo de calor associado.

3.4 Gelo Marinho

O gelo marinho (GM) é um componente importante da criosfera e dessa forma desempenha um

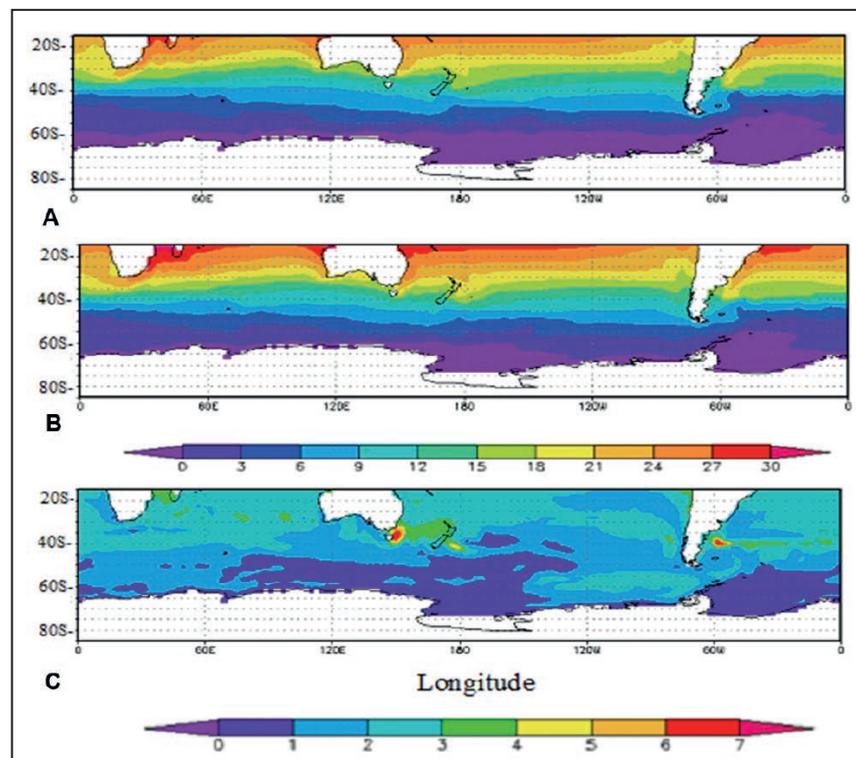


Figura 3 TSM (°C): (A) PD, (B) GW e (C) Diferenças (GW – PD)

papel fundamental no clima das regiões polares, principalmente porque o GM exerce uma função de contribuir nas variações dos processos radiativos, momentum e troca de massa (Justino & Peltier, 2006).

Dessa forma, avaliar as alterações ocasionadas na espessura do GM no entorno da Antártica e sua contribuição nos ST torna-se muito relevante. Para as condições de PD (Figura 4A) as variações na espessura do GM indicam que os maiores valores (~3 metros) da espessura média anual do GM são verificados na região do Mar de Weddell, enquanto que nas regiões do Mar de Amundsen e Mar de Ross, a espessura do GM é ~1,5m. Esse padrão encontrado da espessura do GM é concordante com os resultados obtidos por Parkinson (2002) que utilizou dados de satélite. Maiores reduções de GM são observadas nas condições de GW (Figura 4B), principalmente na região oeste da Antártica, estendendo-se para a região da Península Antártica.

Quando comparado às diferenças do GM entre as condições de PD e GW (Figura 4C), verifica-se uma significativa redução na espessura do GM chegando próximo de 2 metros ao norte da Península Antártica. Enquanto que nas regiões do Mar de Weddell e Mar de Amundsen essa diferença é um pouco menor (~0,5 m). Essas diferenças (GW-PD) no GM em torno da Antártica são ocasionadas principalmente por um significativo aumento na quantidade de calor oceânico transportado para a região Antártica (Justino *et al.*, 2011). Ainda de acordo com os autores citados anteriormente, atribuem-se essas alterações ao aumento na disponibilidade de calor, em parte devido a uma possível intensificação do

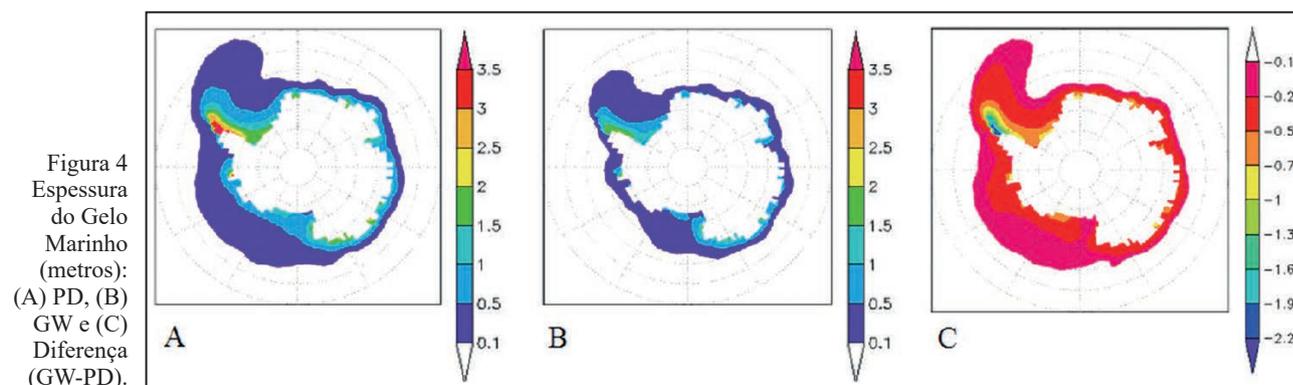
transporte de calor junto à Corrente do Brasil, podendo estar associado ao enfraquecimento dos ventos de oeste em torno da Antártica.

Através da Figura 4C verifica-se que a retração do GM nas condições de GW é um fator fundamental para o deslocamento dos ST em direção ao sul, sugerindo uma forte influência do ponto de vista da baroclinidade zonal induzido pelo contraste térmico entre GM e oceano. Ao verificar a climatologia das variações interanuais do GM em torno da Antártica durante o período 1979-2000, Pezza & Ambrizzi (2004) analisaram as possíveis influencias do GM nos ST, e verificaram que o GM apresenta um ciclo sazonal muito bem definido e as diferenças (GW-PD) na extensão do GM indicaram uma boa concordância com o posicionamento anômalo dos ST.

4 Conclusões

Os resultados apresentados no presente trabalho indicam que os ST no HS permanecem confinados próximos a 50° S, apresentando maior (menor) intensidade ao sul do Oceano Índico (Pacífico Sul). O comportamento dos ST é mais simétrico (ao sul) durante DJF (JJA).

Alterações do transporte meridional de calor sensível para as condições de GW indicam que mudanças no comportamento espacial dos ST poderão estar relacionadas às alterações no gradiente da TSM em latitudes médias, que será importante para a assimetria e intensificação dos ST. Ressalta-se também o papel fundamental desenvolvido pelo GM, que devido a sua redução em condições de GW, ocasiona



o deslocamento dos ST para o sul. Dessa forma, é razoável sugerir a forte influência da baroclinidade gerada pelo contraste entre gelo e oceano.

Análises zonais sugerem que sistemas mais intensos provavelmente atuarão em latitudes mais altas sob um cenário de aquecimento global, enquanto que a norte dos valores máximos o perfil demonstra que as variações de EKE são mais baixas ou não variam num cenário GW. Essas variações indicam um aumento na intensidade das tempestades extratropicais em latitudes mais altas e diminuição em latitudes médias os quais sugere-se estar relacionado ao deslocamento dos ST em direção ao polo.

Importante ressaltar que os resultados apresentados são limitados a um modelo e uma condição de cenário futuro do IPCC. Futuros trabalhos com abordagens distintas, considerando diferentes modelos e cenários se fazem necessários, para que se tenha uma análise ainda mais detalhada dos ST sob condições de alterações climáticas.

5 Agradecimentos

Os autores agradecem a Universidade Federal de Viçosa (UFV) e a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG).

6 Referências

- Bengtsson, L.; Hodges K. & Roeckner, E. 2006. Storm tracks and Climate Change. *Journal of Climate*, 19(15): 3518-3543.
- Gan, M.A. & Rao, B. 1991. Surface cyclogenesis over South America. *Monthly Weather Review*, 119: 1293-1302.
- Giordani, H. & Caniaux, G. 2001. Sensitivity of cyclogenesis to sea surface temperature in the North western Atlantic. *Monthly Weather Review*, 129(6): 1273-1295.
- Haltiner, G.J. & Williams, R.T. 1980. Numerical Prediction and Dynamics Meteorology. Wiley, 477 p.
- Hoskins, B. & Hodges, K. 2005. A New Perspective on Southern Hemisphere Storm Tracks. *Journal of Climate*, 18: 4108-4129.
- Inatsu, M. & Hoskins, B. 2004. The Zonal Asymmetry of the Southern Hemisphere Winter Storm Track. *Journal of Climate*, 17: 4882-4892.
- Intergovernmental Panel on Climate Change – IPCC, 2007: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. Cambridge Univ. Press, 989 p.
- Jungclauss, J.H.; Keenlyside, N.; Botzet, M.; Haak, H.; Luo, J.-J.; Latif, M.; Marotzke, J.; Mikołajewicz, U. & Roeckner, E. 2006. Ocean circulation and tropical variability in the coupled model ECHAM5/MPI-OM. *Journal of Climate*, 19: 3952-3972.
- Justino, F. 2004. *The influence of boundary conditions on the last glacial maximum*. Thesis. Leibniz-Institute of Marine Research - CAU – Germany. 107p.
- Justino, F. & Peltier, W.R. 2006. Influence of present day and glacial surface conditions on the Antarctic Oscillation/Southern Annular Mode. *Geophysical Research Letters*, 33(22): L22702.
- Justino, F.; Setzer, A.; Bracegirdle, T.J.; Mendes, D.; Grimm, A.; Dechiche, G. & Schaefer, C. E. 2011. Harmonic analysis of climatological temperature over Antarctica: present day and greenhouse warming perspectives. *International Journal of Climatology*, 31(4): 514-530.
- Kaspi, Y. & Schneider, T. 2011. Downstream Self-Destruction of Storm Tracks. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 68: 2459-2464.
- Lambert, S.J. & Fyfe, J.C. 2006. Changes in winter cyclone frequencies and strengths simulated in enhanced greenhouse-warming experiments: results from the models participating in the IPCC diagnostic exercise. *Climate Dynamics*, 26: 713-728.
- Lehmann, J. & Coumou, D. 2015. The influence of mid-latitude storm tracks on hot, cold, dry and wet extremes. *Scientific Reports*, 5: 1-9.
- Marsland, S.; Haak, H.; Jungclauss, J.; Latif, M. & Röske, F. 2003. The Max-Planck-Institute global ocean/sea ice model with orthogonal curvilinear coordinates. *Ocean Modelling*, 5: 91-127.
- Monahan, A.; Fyfe, J.; Ambaum, M.; Stephenson, D. & North, G. 2009. Empirical Orthogonal Functions: The Medium is the Message. *Journal of Climate*, 22: 6501-6514.
- Nakamura, H. & Shimpou, A. 2004. Seasonal Variations in the Southern Hemisphere Storm Tracks and Jet Streams as Revealed in a Reanalysis Dataset. *Journal of Climate*, 17: 1828-1844.
- O’Kane, T.; Matear, R.; Chamberlain, M.; Olivier, E. & Holbrook, N. 2014. Storm tracks in Southern Hemisphere subtropical oceans. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 119: 6078-6100.
- Parkinson, C. L. 2002. Trends in the length of the Southern Ocean sea-ice season, 1979-99. *Annals of Glaciology*, 34(1): 435-440.
- Pezza, A.B. & Ambrizzi T. 2004. Variability of southern hemisphere cyclone and anticyclone behavior: Further Analyses. *Journal of Climate*, 16(7): 1075-1083.
- Pezza, A.B. & Simmonds I. 2005. The first South Atlantic hurricane: Unprecedented blocking, low shear and climate change. *Geophysical Research Letters*, 32: L15712.
- Pinto, J.G.; Ulbrich, U.; Leckebusch, G.C.; Spanghel, T.; Reyers, M. & Zacharias, S. 2007. Changes in storm track and cyclone activity in three SRES ensemble experiments with the ECHAM5/MPI-OM1 GCM. *Climate Dynamics*, 29: 195-210.
- Rao, V.B.; Do Carmo, A.M.C. & Franchito, S.H. 2002. Seasonal variations in the southern hemisphere storm tracks and associated wave propagation. *Journal of the Atmospheric Science*, 59(6): 1029-1040.
- Roeckner, E.; Bäuml, G.; Bonaventura, L.; Brokopf, R.; Esch, M.; Giorgetta, M.; Hagemann, S.; Kirchner, I.; Kornbluh, L.; Manzini, E.; Rhodin, A.; Scheele, U.; Schulzweida, U. & Tompkins, A. 2003. The atmospheric general circulation model ECHAM 5. Part I: Model description. *Technical Report 349*, Max-Planck-Institut für Meteorologie, Hamburg, Germany, edoc.mpg.de/175329.
- Seluchi, M.E. 1995. Diagnóstico y pronóstico de situaciones sinópticas conducentes a ciclogénesis sobre El este de Sudamérica. *Geofísica Internacional*, 34(2): 171-186.
- Simmonds, I. & Keay, K. 2000. Mean Southern Hemisphere extratropical cyclone behavior in the 40-Year NCEP–NCAR Reanalysis. *Journal of Climate*, 13: 873–885.
- Tings, M.F. & Held, I.M. 1990. The stationary wave response to a tropical SST anomaly in an idealized GCM. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 47: 2546-2566.
- Trenberth, K. 1991. Storm Tracks in the Southern Hemisphere. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 48: 2159-2178.
- Yin, J.H. 2005. A consistent poleward shift of the storm tracks in simulations of 21st century climate. *Geophysical Research Letters*, 32: L18701.