

VARIABILIDADE CLIMÁTICA DO OCEANO AUSTRAL USANDO UM MODELO ACOPLADO DO NCAR

JANINI PEREIRA, ILANA WAINER, EDMO J. D. CAMPOS E REINDERT J. HAARSMAN
Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo - Departamento de Oceanografia Física
Praça do Oceanográfico, 191 - Cidade Universitária, CEP 05508-120 - São Paulo - SP, Brasil
E-mail: janini@usp.br

Recebido Abril 2003 - Aceito Abril 2004

RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo analisar a variabilidade climática do oceano Austral e investigar a ocorrência da Onda Circumpolar Antártica (OCA). Foram usados os resultados de uma simulação do modelo numérico acoplado do National Center for Atmospheric Research/ Community System Model – NCAR CCSM de um experimento com integração de 150 anos. Com o intuito de estudar o comportamento sazonal e anual foram analisadas as climatologias das variáveis temperatura da superfície do mar (TSM), pressão atmosférica ao nível do mar (PNM) e componente zonal do vento (Vx). Para analisar o comportamento interanual dessas variáveis e da temperatura de subsuperfície na profundidade de 250m (T250) são utilizados diagramas Hovmoeller e espectros de potência. Os resultados mostram para a média anual da PNM que o modelo simulou bem as feições de larga escala nos extra-tropicais, como a pressão decrescendo monotonicamente em direção as altas latitudes. Através dos diagramas Hovmoeller podemos observar um padrão de propagação para leste das anomalias de PNM, TSM e T250. A análise espectral da série de anomalia de T250 apresenta um pico de energia, significativo a 95%, associado ao período de 5,5 anos. Nas simulações do modelo a manifestação da OCA apresenta acoplamento entre o oceano e a atmosfera

Palavras-chave: Oceano Austral, Variabilidade Climática, Onda Circumpolar Antártica

ABSTRACT: CLIMATIC VARIABILITY IN THE SOUTHERN OCEAN USING NCAR COUPLED MODEL

The purpose of this study is to analyze the climatic variability of the Southern ocean and investigate the Antarctic Circumpolar Wave (ACW). Data from a simulation of 150 years with the National Center for Atmospheric Research/ Community System Model – NCAR CCSM coupled model are used. Annual and seasonal climatology are obtained from the following variables: sea surface temperature (SST), sea level pressure (SLP) and zonal wind. Hovmoeller diagrams and power spectra are used to analyze changes in interannual behavior of these variables and of the subsurface temperature at 250m depth (T250). The model shows for the SLP annual mean good representation of the large scale features in the extra-tropics like pressure decreasing monotonic toward high latitudes. Hovmoeller diagrams show an eastward propagation pattern of the SLP, SST and T250 anomalies. The spectral analyzes of T250 anomalies presents an energy peak at the 95% significant were associated to a 5,5 year period. Model simulations of the ACW demonstrate that exist coupling between ocean and atmosphere

Key words: Southern Ocean, Climatic Variability, Antarctic Circumpolar Wave

1. INTRODUÇÃO

As alterações climáticas são constantemente consideradas uma das mais sérias ameaças ambientais do globo, com fortes impactos nos ecossistemas, na qualidade da água, na saúde humana e nas atividades econômicas. Atualmente, existe uma considerável atenção aos estudos que observam e prevêm as modificações do clima.

Segundo relatório do IPCC (2001), a média global da temperatura de superfície (do mar e do ar), bem como a temperatura sobre os continentes aumentou aproximadamente 0,6°C no século XX.

O estudo da interação entre o oceano e a atmosfera é essencial para o entendimento dos processos físicos responsáveis pelas variações climáticas em latitudes altas.

Alguns estudos mostram evidências de variabilidade climática na região austral, tais como, a Oscilação Semi-Anual (Van Loon, 1967), a Oscilação Antártica (Wang, 1992) e a Onda Circumpolar Antártica (White & Peterson, 1996). Contudo, a dinâmica que rege tais processos ainda não é bem conhecida. Ainda, pouco se conhece do impacto dos extra-tropicais sobre o clima ou de sua sensibilidade à mudanças globais. A falta de dados observacionais dificulta ainda mais o entendimento dos fenômenos que ocorrem nas latitudes mais altas, fazendo com que os modelos numéricos possam ser importantes para a compreensão dos mecanismos físicos que ocorrem na região.

O oceano Austral é de fundamental importância para o estudo climático (Stone et al., 1996; Peterson & White, 1998 e White, 2000), pois é o principal meio pelo qual ocorrem as trocas de energia, calor e massa entre as três bacias oceânicas.

Essas trocas podem representar um papel significativo no controle do clima mundial.

A Antártica é parte integral do sistema ambiental global e um dos principais controladores da circulação atmosférica e oceânica do planeta. O limite desse continente, em aproximadamente 70°S, é a parte do planeta que tem se mostrado mais sensível às mudanças ambientais globais (Wainer, 2003).

A radiação incidente nas altas latitudes e as particularidades orográficas do continente Antártico tem impacto direto sobre as temperaturas da atmosfera, sendo portanto, o aquecimento da atmosfera o controlador do gelo marinho (Bromwich & Parish, 1998), da temperatura e do campo de ventos próximo a superfície do mar durante o ano.

A pressão atmosférica ao nível do mar (PNM) apresenta valores decrescentes na direção polar a partir das Altas Subtropicais de cada oceano até atingir uma banda de baixa pressão ao redor do continente Antártico. Em março e setembro esta banda de baixa pressão é mais intensa e está localizada mais ao sul. Em junho e dezembro posiciona-se mais ao norte com menor intensidade. Esse comportamento sazonal da PNM é a principal componente da variabilidade climática do Oceano Austral (Van Loon, 1967) e é denominada Oscilação Semi-Anual.

Outro importante modo de variabilidade no Oceano Austral é a Oscilação Antártica. Esta oscilação representa em larga escala as variações de massa da atmosfera entre médias e altas latitudes na PNM, encontrada por Wang, (1992).

White & Peterson, (1996) identificaram um possível modo de variabilidade interanual nas altas latitudes do Hemisfério Sul. Eles mostraram a existência de um padrão acoplado de anomalias do oceano, atmosfera e gelo do mar sobre o Oceano Austral. Esse sistema de anomalias acoplado foi denominado Onda Circumpolar Antártica (OCA). Esta onda apresenta um padrão de propagação para leste com período de quatro a cinco anos ou metade de um ciclo completo de 2 ondas, e foi observado nos dados de temperatura da superfície do mar (TSM), pressão ao nível do mar (PNM), tensão de cisalhamento do vento meridional e extensão do gelo do mar. Os autores descrevem as anomalias da temperatura da superfície do mar como sendo originada no oeste subtropical do Pacífico Sul, onde a subsequente propagação para leste é devido principalmente à advecção do fluxo da Corrente Circumpolar Antártica (CCA). Esse sistema de anomalias acoplado tem um importante papel na regulagem e dinâmica do clima tanto na região do Oceano Austral como fora dos seus limites.

A OCA foi também encontrada na variação da altura da superfície do mar (ASM) com medições de satélites altimétricos (Jacobs & Mitchell, 1996). A análise dos dados altimétricos indicou a persistência de anomalias da ASM se propagando para leste sobre o oceano Austral com período dominante de 4 anos, comprimento de onda de 180° de longitude e velocidade de propagação de 10 cm.s⁻¹.

Uma das hipóteses para a OCA inclui a forçante por teleconexões atmosféricas relacionada ao El Niño – Oscilação

Sul (ENOS) e a retro-alimentação entre a quantidade de calor oceânico e as anomalias da tensão de cisalhamento do vento associadas ao transporte de Ekman (White & Cayan, 2000; Carleton, 2003).

Venegas, (2003) observou, em 32 anos de dados observacionais de TSM e PNM, o sinal de variabilidade interanual da OCA com período variando de 3 - 5 anos. Os picos significativos, encontrados pela autora, representam dois sinais da OCA, ou seja, um sinal da OCA com padrão de onda 3 representado pelo período de 3.3 anos e outro sinal da OCA com padrão de onda 2 e periodicidade de 5 anos.

A variabilidade da OCA também foi observada em uma simulação de 100 anos do modelo acoplado, entre a atmosfera e a dinâmica do gelo marinho, utilizado por Garric et al. (2003). Os autores identificaram a OCA, nas anomalias do gelo marinho, com padrão de onda 2 e período de 3 - 6 anos.

Neste artigo, nós iremos apresentar a variabilidade climática do oceano Austral e uma investigação da existência do sinal da OCA, na simulação do modelo acoplado NCAR. Na seção 2 será descrito o modelo numérico e a metodologia utilizada. Na seção 3, os resultados do comportamento climatológico anual e sazonal, bem como a variabilidade interanual do oceano Austral será apresentado. Finalmente, concluímos o trabalho proposto na seção 4.

2. MATERIAL E MÉTODOS

Para se estudar a variabilidade climática do Oceano Austral foram utilizados resultados de simulação do modelo numérico acoplado National Center for Atmospheric Research – Community Climate System Mode (NCAR CCSM) de um experimento gerado continuamente por um período de 150 anos.

2.1. O modelo numérico

O NCAR CCSM é um modelo numérico acoplado de circulação global oceano-atmosfera, composto por 4 componentes: atmosférica, oceânica, da biosfera e hidrosfera, e da criosfera (Boville & Gent, 1998).

A componente atmosférica é a versão 3 do modelo atmosférico de circulação geral Community Climate Model (CCM3), com resolução espectral de T42, isto é, aproximadamente 2,8° na latitude e longitude, e 18 níveis verticais, sendo a camada superior em 2,9hPa.

O CCM3 é a quarta geração nas séries do NCAR CCM. O CCM3 incorpora a versão 1 do modelo de superfície terrestre Land Surface Model (LSM) desenvolvido por Bonan (1996), que proporciona o amplo tratamento dos processos de superfície de terra. É um modelo unidimensional de trocas de energia, momentum, água e de CO₂ entre a atmosfera e o solo. O LSM considera as diferenças ecológicas das vegetações, as diferenças térmicas e de umidade dos solos, levando em conta vários tipos de superfície (como lagos e mangues) dentro de uma mesma célula de grade.

O modelo de circulação oceânica é o NCAR Climate

System Ocean Model (NCOM), desenvolvido no Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (GFDL), a partir do Modular Ocean Model (MOM). Esse modelo é constituído de equações primitivas do momentum, hidrostática e continuidade, resolvidas em coordenadas esféricas, que são formuladas usando um esquema de diferenças finitas de segunda ordem na grade B de Arakawa, conservando massa e energia na ausência de dissipação por forçantes explícitas. A configuração do NCOM apresenta 2,4° de resolução na longitude e resolução variável da latitude, sendo o espaçamento mínimo da grade de 1,2° próximo ao equador e pólos (acima de 60°), e máximo de 2,3° nas latitudes médias (em 20°N e 20°S). Na vertical, a componente oceânica possui 45 níveis, com espessura variável aumentando monotonicamente de 12,5m a 250m. Existem 4 níveis de profundidade nos primeiros 50m, com espessuras iguais de 12,5m. A profundidade máxima do oceano é de 6km. Detalhes do NCOM são descritos em Gent et al. (1998).

Acoplado ao modelo oceânico está um modelo de gelo do mar Climate Sea-Ice Model (CSIM), calculado na mesma grade. Essa componente inclui dinâmica e termodinâmica de gelo, baseada no modelo de três camadas de Semtner (1976).

As componentes do modelo são ligadas através de um programa denominado Flux Coupler. Esse acoplador é responsável pela integração das componentes e pela interpolação entre as diferentes grades das componentes do modelo enquanto conserva as propriedades locais e globais, não necessitando, portanto, de correções nos fluxos de momentum, calor e água doce.

Alguns trabalhos como Boville & Gent, (1998); Kiehl, et al. (1998); Hack, et al. (1998); Hurrell, et al. (1998), utilizando dados climatológicos, validaram o modelo NCAR CCSM. Eles verificaram uma grande concordância com as observações.

2.2. Metodologia

A região de estudo compreende o Oceano Austral, latitudes de 30°S a 90°S e toda a extensão longitudinal, e foi caracterizada através das climatologias anual e sazonal dos dados simulados no experimento. A climatologia sazonal foi calculada através da média dos meses referentes a cada estação do ano. Assim, para o Hemisfério Sul, a climatologia de verão contou com os meses de dezembro, janeiro e fevereiro (DJF); a climatologia de outono, com março, abril e maio (MAM); a de inverno, a partir de junho, julho e agosto (JJA); e, a de primavera, com setembro, outubro e novembro (SON). A climatologia anual foi calculada através da média de todos os meses.

As anomalias mensais também foram calculadas e visualizadas nos diagramas Hovmoeller com média latitudinal da região de 50°S - 60°S.

Análise espectral foi usada para separar a variância de uma série temporal em função da frequência. O espectro de energia foi calculado pelo Método Multi-Taper (MTM). Este método de análise espectral visa diminuir a variância do espectro de potência através da aplicação de um conjunto

de filtros ortogonais na série temporal inicial, descritos em Percival & Walden, (1993). O espectro final é produzido por uma média ponderada dos espectros anteriores.

As variáveis usadas nesse estudo foram: temperatura da superfície do mar (TSM), temperatura de subsuperfície na profundidade de 250m (T250), pressão atmosférica ao nível do mar (PNM) e componente zonal do vento (V_x). A profundidade de 250m foi escolhida para representar a camada de mistura.

3. RESULTADOS

3.1. O Comportamento Climatológico

Nesta seção serão descritos e analisados os resultados obtidos das climatologias anual e sazonal.

3.1.1. Temperatura da Superfície do Mar (TSM)

A climatologia anual da TSM na região de estudo pode ser vista na figura 1, onde se verifica um gradiente meridional de temperatura entre o continente Antártico e as latitudes subtropicais, e ainda, um padrão zonal das isotermas ao sul de 30°S. Pickard & Emery, (1982) descrevem essa média da TSM aumentando devagar desde as altas latitudes até aproximadamente 55°S, quando a TSM aumenta relativamente rápido. Pode-se observar ainda nesta figura, a presença de uma região de águas mais frias ao sul da borda leste da América do Sul em aproximadamente 40°S – 50°W, com inclinação das isotermas evidenciando a penetração da corrente das Malvinas. A retroflexão da corrente das agulhas está presente ao sul do continente africano marcada pela isoterma de 18°C. A extensão do gelo, representada pela isoterma de zero graus estende-se aproximadamente até 65°S, associado a inércia térmica do oceano. Esse padrão característico da TSM é concordante com o comportamento médio anual proveniente dos dados observacionais de Reynolds et al., (2001).

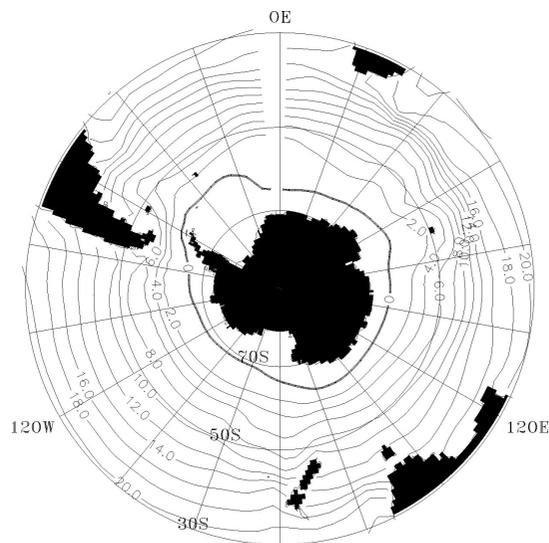


Figura 1: Comportamento médio anual da temperatura da superfície do mar (TSM) do modelo NCAR. Intervalos de contorno de 2°C. Unidade em graus Celsius.

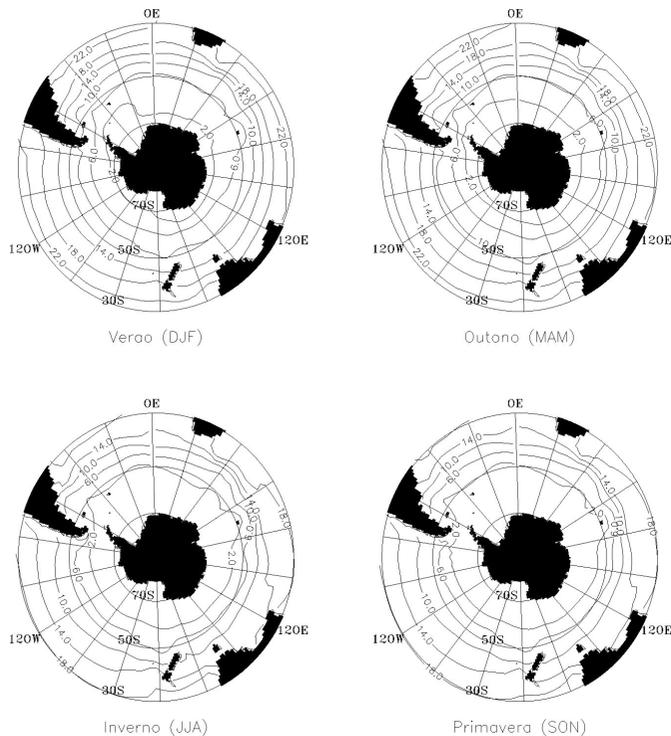


Figura 2: Comportamento sazonal da temperatura da superfície do mar (TSM) do modelo NCAR. Intervalos de contorno de 4°C. Unidade em graus Celsius.

O ciclo climatológico da TSM esta representado na figura 2. Nesta podemos observar a maior extensão do gelo na primavera, onde a isoterma de zero graus desloca-se para 60°S. A temperatura máxima da superfície do mar atinge 24°C no verão e no outono, nos subtrópicos, enquanto no inverno, nesta região, a temperatura não ultrapassa 18°C. Ao longo do ano as isotermas sofrem deslocamento meridional, aquecendo as águas superficiais no verão e resfriando-as no inverno.

A TSM no inverno, quando comparada às isotermas no verão mostra maiores gradientes térmicos na região da Confluência Brasil-Malvinas, acentuando o padrão de inclinação das isotermas apresentado na figura 1. Essa zona frontal, formada pelo encontro das águas quentes e salinas da Corrente do Brasil e das águas frias da Corrente das Malvinas, é uma das regiões mais energéticas do mundo, sendo caracterizada por altos gradientes térmicos e intensa atividade de mesoescala (Gordon, 1989). A confluência mostra forte variação sazonal, as águas frias alcançam menores latitudes na costa da América do Sul durante o inverno (Wainer et al., 2000). Portanto, o intenso gradiente de TSM durante o inverno, observado na figura 2, deve-se ao deslocamento dessa zona de confluência para norte e conseqüente penetração de águas mais frias vindas do sul (Campos et al., 1999).

3.1.2. Pressão atmosférica ao nível do mar (PNM)

O comportamento médio anual da PNM, mostrada na figura 3, apresenta a pressão decrescendo monotonicamente com o aumento da latitude chegando a um mínimo de 985mbar

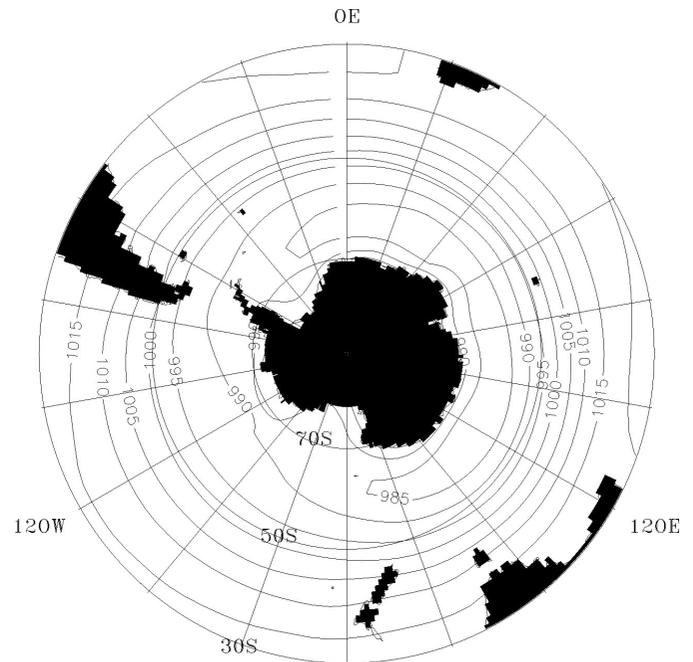


Figura 3: Comportamento médio anual da pressão ao nível do mar (PNM) do modelo NCAR. Intervalos de contorno de 5mbar. Unidade em mbar.

em aproximadamente 70°S. As bandas de baixa pressão sobre o Oceano Austral encontram-se até aproximadamente 60°S. As isóbaras com valor máximo de 1020mbar, caracterizando a alta subtropical, aparecem apenas nas bacias oceânicas do Atlântico e Índico. Esse padrão anual é compatível com os dados da re-análise do NCEP/NCAR (Kistler et al., 2001).

A figura 4 mostra o ciclo climatológico da PNM. No verão (DJF) climatológico a PNM mostra valores máximos de 1015mbar entre as latitudes de 30°S-40°S nas bacias oceânicas do Pacífico, Índico e Atlântico. O valor mínimo de 995mbar circunda a porção leste do continente antártico. Para o outono (MAM), a ocorrência da alta subtropical (isóbara de 1020mbar), é vista nas bacias do oceano Atlântico e Índico. Já no inverno (JJA), o comportamento da PNM, visto pela isóbara de 1020mbar, apresenta continuidade zonal em aproximadamente 40°S e estende-se de 40°W até 110°E, cobrindo as bacias oceânicas do Atlântico até o Índico. A alta subtropical dos oceanos Atlântico Sul e Índico é mais intensa no inverno do que no verão. Este comportamento sazonal concorda com os dados do ECMWF (Van Heerden & Taljaard, 1998).

3.1.3. Componente Zonal do vento (Vx)

A Vx média (figura 5) acompanha as isóbaras apresentadas na figura 3. O valor máximo de 16m/s da componente zonal do vento ocorre na banda latitudinal de 40°S-55°S da bacia do oceano Índico. Na média climatológica os ventos são mais intensos e predominantemente de oeste entre as latitudes 30°S e 65°S enquanto que mais ao sul, entre 65°S e 70°S, os ventos são de leste. Valores negativos, relacionados

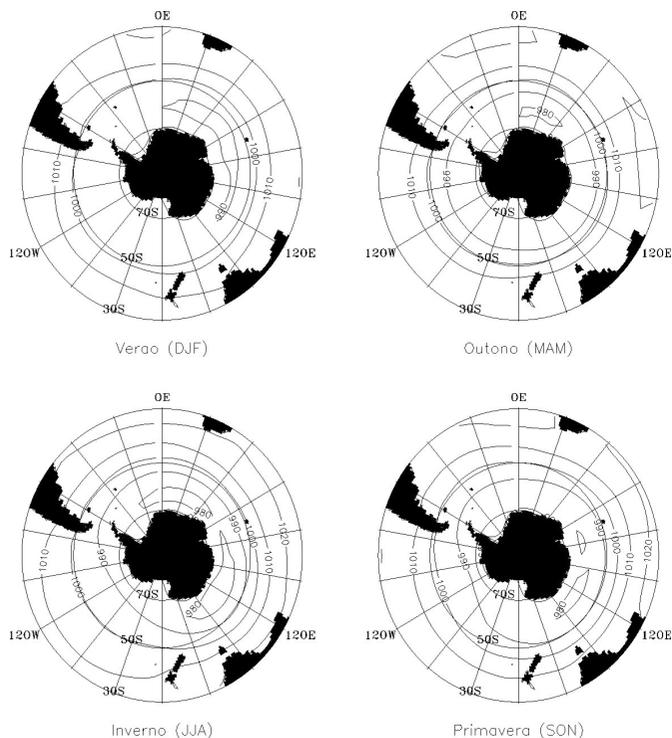


Figura 4: Comportamento sazonal da pressão ao nível do mar (PNM) do modelo NCAR. Intervalos de contorno de 10mbar. Unidade em mbar.

aos ventos de leste são observados na componente zonal em torno da latitude de 70°S. No comportamento sazonal de V_x (figura 6) sua máxima intensidade (16m/s) pode ser encontrada praticamente o ano inteiro, atingindo uma região aproximada de 50°E-170°E em torno de 50°S, exceto no verão. Apenas no outono a isolinha de vento com menor intensidade encontra-se mais ao sul, coincidente com o deslocamento para o sul da alta subtropical nesta época do ano (figura 4).

3.2. Variabilidade Interanual

Nesta seção serão estudados as variações relativas aos desvios da climatologia, com o intuito de investigar a variabilidade interanual de cada variável. Ainda, com maior concentração nesta seção, será apresentado o modo de variabilidade dominante do Oceano Austral, a Onda Circumpolar Antártica (OCA) como descrita na introdução. A OCA mostra-se presente nos dados analisados e será observada através dos diagramas Hovmoeller.

3.2.1. Diagramas Hovmoeller

Os Diagramas Hovmoeller das séries de anomalias das variáveis estudadas representam a média latitudinal da região de 50°S-60°S para toda a extensão longitudinal. Os 40 anos iniciais do experimento foram eliminados a fim de evitar possível contaminação devido a instabilidade do modelo acoplado de circulação geral.

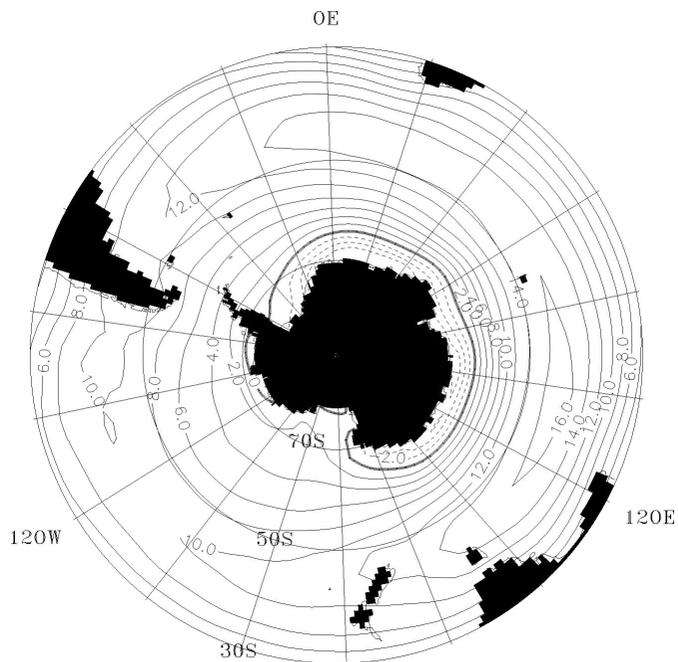


Figura 5: Comportamento médio anual da componente meridional do vento (V_x) do modelo NCAR. Intervalos de contorno de 2m/s. Unidade em m/s.

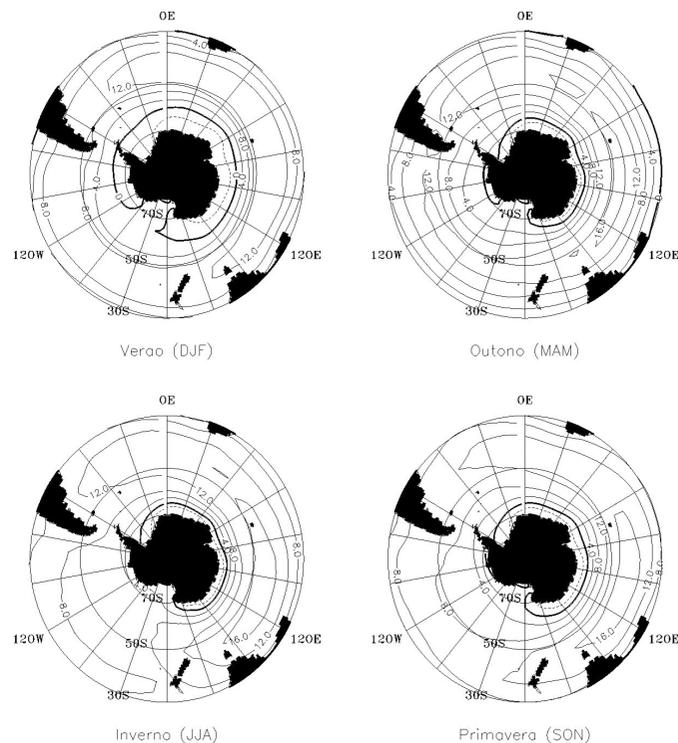


Figura 6: Comportamento sazonal da componente meridional do vento (V_x) do modelo NCAR. Intervalos de contorno de 4m/s. Unidade em m/s.

No Diagrama Hovmoeller da TSM (figura 7), podemos perceber um padrão de propagação para leste das anomalias nos anos 70 a 85 do experimento. As anomalias apresentam uma seqüência de propagação positiva e negativa com uma velocidade de propagação aproximadamente de 360° em 8 anos. Isto mostra evidências que o modelo está reproduzindo o modo de variabilidade da OCA, encontrado por White & Peterson (1996).

A mesma análise foi realizada para a temperatura de subsuperfície na profundidade de 250 metros, com o intuito de verificar mais facilmente a propagação da OCA na camada de mistura, sem a influência de possíveis ruídos na superfície. A temperatura de subsuperfície também apresenta a propagação desse sinal durante o mesmo período com um padrão de onda número 2, conforme mostra a figura 8. Marsland et al., (2002), observaram as anomalias de salinidade e temperatura de subsuperfície das camadas 225-275m do modelo GCM ECHO-G, descrito em Legutke e Voss, (1999). O estudo mostra que há uma similaridade na propagação para leste tanto nas anomalias de salinidade quanto nas anomalias de temperatura de subsuperfície nas camadas profundas do modelo com maior intensidade no sudeste do oceano Índico próximo 90°E e no sudeste do Pacífico próximo 270°E .

Bonekamp et al., (1999), também observaram um padrão de propagação para leste das anomalias de temperatura de subsuperfície e salinidade nas camadas de 25, 75, 150, 250 e 450m de profundidade entre a banda zonal de $46^\circ\text{S} - 61^\circ\text{S}$, com o modelo Hamburg de circulação geral oceânica geostrofica de larga escala. As anomalias de maior amplitude foram encontradas no leste do oceano Pacífico em $130^\circ\text{W} - 100^\circ\text{W}$.

O diagrama Hovmoeller da PNM (figura 9), sugere uma propagação com menor definição das suas anomalias nas médias e altas latitudes, quando comparado com estudos observacionais, tais como White & Peterson (1996) e Venegas, (2003), que mostram uma propagação bem definida para esta variável. Apesar disso, no período dos anos de 71 a 83 podemos observar um início de uma seqüência de propagação de anomalias de PNM positiva e negativa, indicando a presença da OCA na atmosfera.

A figura 10 mostra o diagrama Hovmoeller para V_x simulado no modelo acoplado. Neste diagrama não é possível observar a propagação para leste da anomalia de V_x com período de 8 anos. Porém, encontra-se uma estrutura zonal bem definida intercalando-se positivamente e negativamente, associado ao modo anular do Hemisfério Sul (Hall & Visbeck, 2002; Garric et al., 2003). Flutuações zonais simétricas dos ventos de oeste nas latitudes médias caracterizam o primeiro modo de variabilidade atmosférica no Hemisfério Sul durante as estações do ano. Desta forma, há uma indicação que no modelo acoplado NCAR a manifestação da OCA é mais forte na dinâmica do oceano, sendo o oceano excitado pela variabilidade atmosférica. De maneira consistente, Haarsma et al., (2000) analisando os resultados de 1.000 anos de integração do modelo acoplado oceano-atmosfera-gelo marinho (ECBilt) mostra que o modo de variabilidade da OCA simulada é basicamente uma oscilação da dinâmica interna do oceano, segundo a hipótese de Saravanan & McWilliams (1998). De acordo com esta hipótese, a OCA é um mecanismo de ressonância advectiva, ou seja, a oscilação é dominada pelo modo de variabilidade da atmosfera, onde a escala de

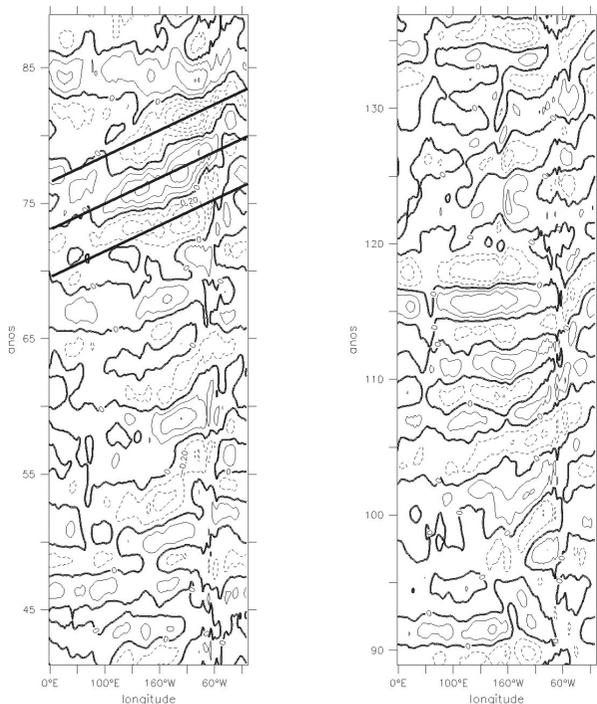


Figura 7: Diagrama Hovmoeller das anomalias de TSM do modelo NCAR com filtro passa banda (10 anos) para o período de 40 – 140 anos. Intervalos de contorno de $0,2^\circ\text{C}$.

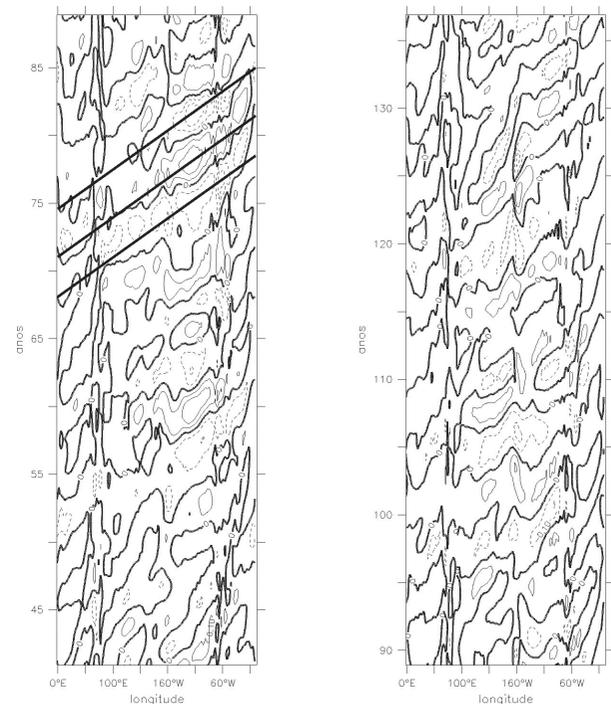


Figura 8: Diagrama Hovmoeller das anomalias de T250 do modelo NCAR com filtro passa banda (10 anos) para o período de 40 – 140 anos. Intervalos de contorno de $0,1^\circ\text{C}$.

tempo é ajustada pela razão da escala horizontal do modo atmosférico e da velocidade de advecção da corrente média oceânica. A principal resposta atmosférica consiste no ajuste da temperatura local para a anomalia de TSM.

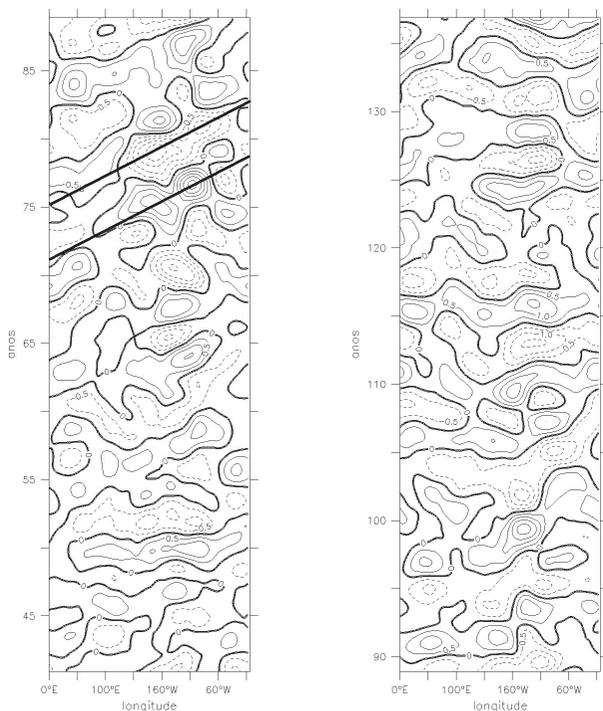


Figura 9: Diagrama Hovmoeller das anomalias de PNM do modelo NCAR com filtro passa banda (10 anos) para o período de 40 – 140 anos. Intervalos de contorno de 0,5mbar.

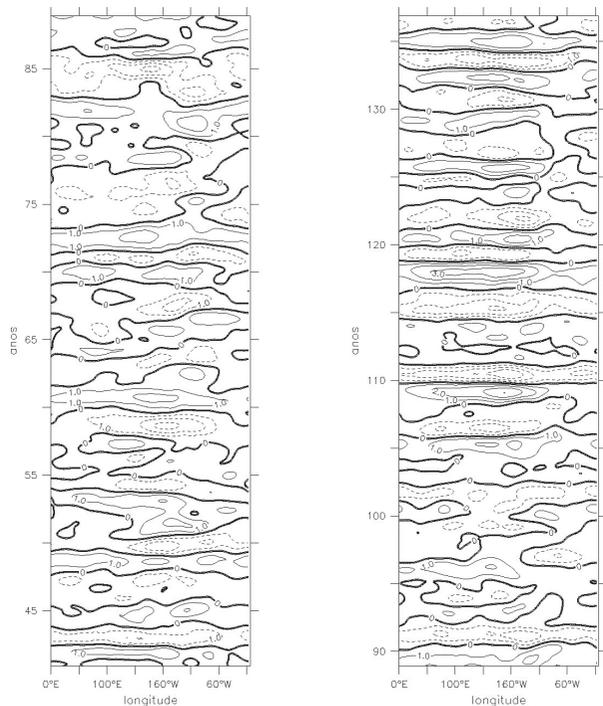


Figura 10: Diagrama Hovmoeller das anomalias de Vx do modelo NCAR com filtro passa banda (10 anos) para o período de 40 – 140 anos. Intervalos de contorno de 1m/s.

3.2.2. Espectros de Potência

As séries de anomalias das variáveis foram calculadas para a média da região do Pacífico sudeste entre as longitudes de 120°W-100°W e latitude de 50°S-60°S. Esta região foi escolhida por apresentar as maiores amplitudes das anomalias.

A figura 11 mostra o espectro de potência da série de anomalia da TSM. Esse espectro mostra picos de energia nas frequências de 0,0109 ciclos/mês, 0,028 ciclos/mês, 0,038 ciclos/mês e 0,057 ciclos/mês, representando energias concentradas em 8 anos, 3 anos, 2,2 anos e em torno de 1,5 anos, dentro do limite de confiança de 95%. O pico de energia em torno de 8 anos está relacionado a um ciclo completo da OCA, igualmente observado na figura 7. Conforme descrito em White & Peterson, (1996), esta onda apresenta um padrão de propagação para leste com um período de quatro a cinco anos ou metade de um ciclo completo de 2 ondas. O período encontrado de 3 anos está associado a energia do fenômeno El-Niño, conforme descrito em Otto-Bliesner & Brandy, (2001) que analisaram esta variabilidade no modelo CCSM NCAR.

O espectro da figura 12 mostra a variabilidade interanual de T250. Podemos observar um pico de energia em 5,5 anos associado à frequência de 0,0153 ciclos/mês. Outros picos importantes de maior frequência são encontrados em 0,0249 ciclos/mês, 0,0340 ciclos/mês, que representam aproximadamente 3,4 e 2,3 anos, respectivamente. A variabilidade de 5,5 anos representa meio ciclo da OCA, de acordo com o estudo de Venegas, (2003) temos o padrão de onda 2 mostrado na figura 8. A dominância do número de onda 2 foi confirmado com a análise de EOF (não mostrada).

A análise espectral da série de anomalias da PNM (figura 13), mostra as maiores frequências (0,028 ciclos/mês e 0,0518 ciclos/mês) aparecendo em aproximadamente 2,7 anos e 1,6 anos, dentro do limite de confiança de 90%. O pico de energia, dentro do limite de confiança de 95%, localiza-

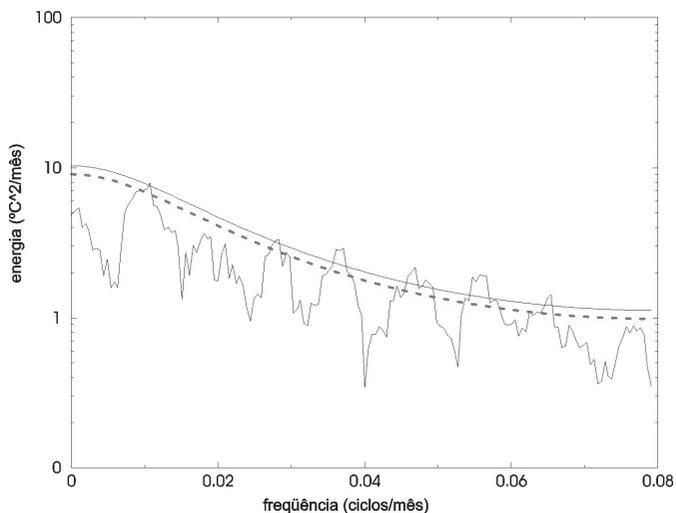


Figura 11: Espectro de Potência da TSM do modelo NCAR. A linha contínua indica o teste de ruído vermelho de 95% de significância e a linha tracejada de 90%.

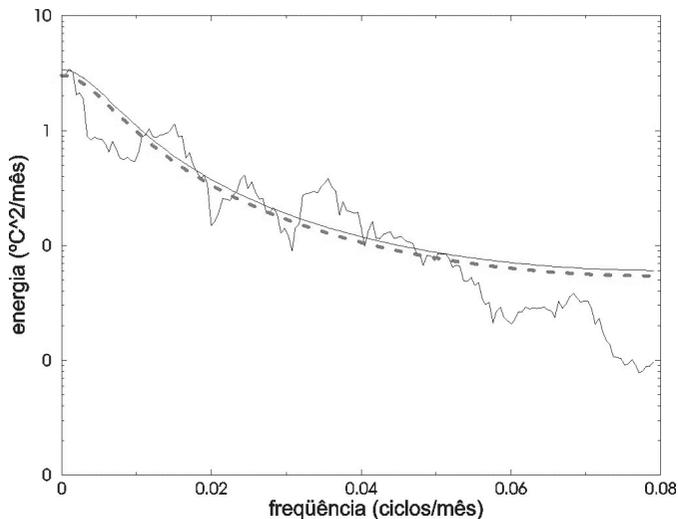


Figura 12: Espectro de Potência da T250 do modelo NCAR. A linha contínua indica o teste de ruído vermelho de 95% de significância e a linha tracejada de 90%.

se na frequência de 0,0185 ciclos/mês, representando uma variabilidade interanual de 4,5 anos. Observa-se também uma variabilidade em 9,5 anos (0,0088 ciclos/mês). Os picos energéticos de 4,5 anos e 9,5 anos estão relacionados a meio ciclo e a um ciclo completo da OCA, sugerindo uma relação de representatividade da OCA na componente atmosférica do modelo. Segundo White, (2003), que observa na análise espectral da PNM, o principal modo de variabilidade interanual do Oceano Austral com período de uma onda completa de aproximadamente 5 anos.

O espectro de potência da série de anomalias de V_x simulado no modelo acoplado (figura 14) é caracterizado por variabilidade de 8,3 anos (0,0099 ciclos/mês), 4,2 anos (0,0199 ciclos/mês) e 2,9 anos (0,0271 ciclos/mês); significativos a um nível de 95%. Outro pico de menor energia, com nível de significância de 90%, aparece na frequência de 0,0136 ciclos/mês com período de 6 anos. O pico de energético, significativo a um nível de 95%, em torno de 4 anos coincide com o pico energético da PNM (figura 13).

4. CONCLUSÕES

No presente trabalho foi realizado um estudo sobre a variabilidade climática do oceano Austral, observando o comportamento sazonal, anual e interanual de algumas variáveis de superfície marinha. Para isso, foram utilizadas as seguintes variáveis: temperatura da superfície do mar (TSM), temperatura de subsuperfície na profundidade de 250m (T250), pressão ao nível do mar (PNM) e componente zonal do vento (V_x), resultantes de uma simulação do modelo acoplado NCAR CCSM com integração de 150 anos. Este trabalho também consistiu na investigação da Onda Circumpolar Antártica (OCA) no modelo acoplado.

Os resultados do comportamento climatológico do oceano Austral mostram para a TSM um ciclo anual bem representado de acordo com os dados de Reynolds et al.,

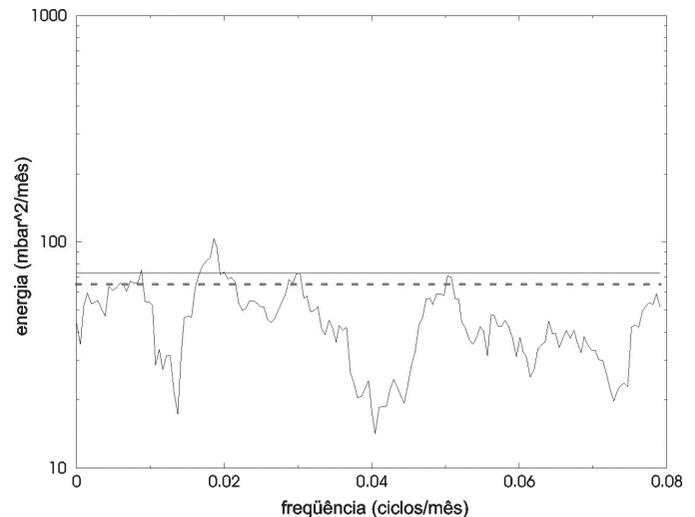


Figura 13: Espectro de Potência da PNM do modelo NCAR. A linha contínua indica o teste de ruído branco de 95% de significância e a linha tracejada de 90%.

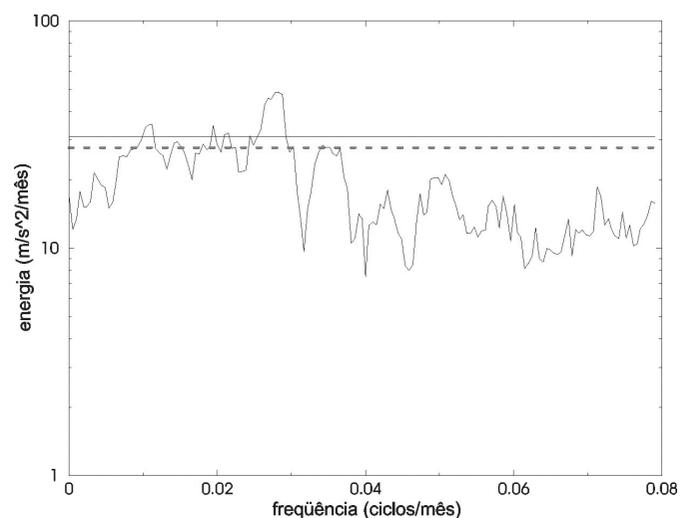


Figura 14: Espectro de Potência de V_x do modelo NCAR. A linha contínua indica o teste de ruído branco de 95% de significância e a linha tracejada de 90%.

(2001). O que indica que o modelo caracterizou bem as feições de larga escala nos extra-trópicos, como o gradiente meridional de temperatura entre o continente antártico e as latitudes subtropicais. Para a PNM, temos um comportamento anual com a pressão decrescendo monotonicamente com o aumento da latitude e as altas subtropicais nas latitudes mais baixas, conforme (Kistler et al., 2001). E sazonalmente, observou-se as migrações das isóbaras consistentemente com (Van Heerden & Taljaard, 1998). A componente V_x mostra na média climatológica que os ventos são mais intensos e predominantemente de oeste entre as latitudes 30°S e 65°S enquanto que mais ao sul, entre 65°S e 70°S, os ventos são de leste. Segundo Tomczak & Godofrey, (1994), o regime de ventos no Oceano Austral é caracterizado pela banda de baixa pressão, dominado pelos ventos de oeste. Somente muito

próximo às bordas do continente antártico observam-se ventos de leste polares.

Através dos diagramas Hovmoeller podemos observar um padrão de propagação para leste das anomalias de TSM, T250 e PNM para alguns anos do período simulado. Esta propagação foi primeiro encontrada por White & Peterson, (1996), indicando a existência da OCA. O padrão de onda número 2 mostrado na figura 8 é consistente com Venegas, (2003) que também apresenta esta onda 2 nos diagramas Hovmoeller de TSM e PNM. Garric et al. (2003), identifica o mesmo padrão nas anomalias da concentração do gelo marinho. Já para Vx não é possível observar a propagação para leste de sua anomalia com período de 8 anos, entretanto, podemos observar uma estrutura zonal associado ao modo anular do Hemisfério Sul (Hall & Visbeck, 2002).

A análise espectral das séries de anomalias da TSM e PNM apresentaram picos de energia, significativos a 95%, associados ao período de aproximadamente 8 e 9,5 anos respectivamente. Esta variabilidade interanual pode estar relacionado a um ciclo completo da OCA. A variável de Vx, no seu espectro de potência, apresenta o pico de energia em 4 anos coincidente a variabilidade encontrada na PNM. Esta periodicidade, em torno de 4 anos, já foi identificada no oceano, na atmosfera e no gelo em torno da Antártica por vários investigadores (e.g. White & Peterson 1996; Yuan & Martinson 2000; Venegas & Drinkwater 2001; Cai & Baines 2001; Venegas 2003; Garric et al. 2003).

Nesse modelo a OCA apresenta um sinal mais forte na dinâmica do oceano, isto porque as anomalias de T250 apresentaram maior amplitude e melhor propagação do sinal. No entanto, também foi possível observar a manifestação da OCA na PNM, indicando que há acoplamento entre o oceano e a atmosfera. Este acoplamento é consistente com outros estudos, tais como White & Peterson, (1996), Qiu & Jin, (1997), Christoph et al. (1998), Cai et al. (1999), Venegas, (2003).

Com esse estudo foi possível caracterizar o comportamento climatológico do oceano Austral, mas os mecanismos físicos da OCA ainda são objeto de estudo, devido à complexidade dos processos acoplados.

5. AGRADECIMENTOS

Agradeço a ajuda financeira da CAPES e dos projetos FAPESP nº 99/07202-9 e FAPESP nº 00/2958-7 e CNPq nº 453523/01-3. Agradecimentos especiais aos revisores anônimos pelos comentários e críticas construtivas que ajudaram a melhorar este trabalho.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BONAN, G. B. A land surface model (LSM version 1.0) for ecological, hydrological, and atmospheric studies: technical description and user's guide. **Technical Note NCAR/TN-417**, 150 pp., 1996.

BONEKAMP, H.; STERL, A.; KOMEN, G. J. Interannual variability in the Southern Ocean from an ocean model forced by European Center for Medium-Range Weather Forecast reanalysis fluxes. **J. Geophys. Res.**, 104: 13317 – 13331, 1999.

BOVILLE, B.º; GENT, P. R. The NCAR Climate System Model, version one. **J. Climate**, 11: 1115 – 1130, 1998.

BROMWICH, D. H.; PARISH, T. R. Meteorological Monographs. **Meteor. Antarct.**, vol 27, N. 49 – Chapter 4: 175 – 200, 1998.

CAI, W.; BAINES, P. G.; GORDON, H. B. Southern mid- to high-latitude variability, a zonal wavenumber-3 pattern, and the Antarctic Circumpolar Wave in the CSIRO coupled model. **J. Climate**, 12, 3087 – 3104, 1999.

CAI, W.; BAINES, P. G. Forcing the Antarctic Circumpolar Wave by El Niño-Southern Oscillation teleconnections. **J. Geophys. Res.** 106: (C5), 9019 - 9038, 2001.

CAMPOS, E.J.D., LENTINI, C.A.D., MILLER, J.L., PIOLA, A.R. Interannual variability of the sea surface temperature in the South Brazil Bight. **Geophys. Res. Lett.**, 26:(14) 2061-2064, 1999.

CARLETON, A. M. Atmospheric teleconnections involving the Southern Ocean. **J. Geophys. Res. – Oceans**, 108: (C4), No 8080, 2003.

CHRISTOPH, M.; BARNETT, T. P.; ROECKNER, E. The Antarctic Circumpolar Wave in a coupled ocean-atmosphere GCM. **J. Climate**, 11, 1659 – 1672, 1998.

GARRIC, G.; VENEGAS, S. A.; TANSLEY, C. E.; JAMES, I. N. Atmosphere-sea-ice low-frequency variability with a simple model of the southern hemisphere. **Q. J. R. Meteorol. Soc.** 129 (592): 2347 – 2366, 2003.

GENT, P. R.; BRYAN, F. O.º; DANABASOGLU, G.º; DONEY, S. C.º; HOLLAND, W. R.; LARGE, W. G.; McWILLIAMS, J. C. The NCAR Climate System Model global ocean component. **J Climate**, 11: 1287 – 1306, 1998.

GORDON, A.L. Brazil-Malvinas Confluence – 1984. **Deep Sea Res.**, Part A, 36, p. 359-384, 1989.

HAARSMA, R. J.; SELTEN, F.M.; OPSTEEGH, J. D. On the mechanism of the Antarctic Circumpolar Wave. **J Climate**, 13: 1461 – 1480, 2000.

HACK, J. J.; KIEHL, J. T. & HURRELL, J. W. The hydrologic and thermodynamic characteristics of the NCAR CCM3. **J Climate**, 11: 1179 – 1206, 1998.

- HALL, A.; VISBECK, M. Synchronous Variability in the Southern Hemisphere Atmosphere, Sea Ice and Ocean Resulting from the Annular Mode. **J Climate**, 15:3043 – 3057, 2002.
- HURRELL, J. W.; HACK, J. J.; BOVILLE, B. A.; WILLIAMSON, D. L. & KIEHL, J. T. The dynamical simulation of the NCAR Community Climate Model version 3. **J Climate**, 11: 1207 – 1236, 1998.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) Climate Change 2001: Impacts, Adaptation and Vulnerability. J. M. McCarthy et al., editors. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 1032 pp., 2001a.
- JACOBS, G. A.; MITCHELL, J. L. Ocean circulation variations associated with the Antarctic Circumpolar Wave. **Geophys. Res. Lett.**, 23, 2947-2950, 1996.
- KIEHL, J. T.; HACK, J. J.; BONAN, G.; BOVILLE, B. A.; WILLIAMSON, D. L. & RASCH, P. The National Center for Atmospheric Research Community Climate Model : CCM3. **J Climate**, 11: 1131 – 1149, 1998.
- KISTLER, R.; COAUTHORS. The NCEP-NCAR 50 Year Reanalysis. **Bull. Amer. Meteor. Soc.**, V.82, n°2, 247 – 267, 2001.
- LEGUTKE, S.; VOSS, R. The Hamburg atmosphere-ocean coupled circulation model ECHO-G. **Technical Report**, 18: German Climate Computer Center, 1999.
- MARSLAND, S. J.; LATIF, M.; LEGUTKE, S. Variability of the Antarctic Circumpolar Wave in a Coupled ocean-Atmosphere Model. **Ocean Dynam.**, manuscript N° OD 035, 2002.
- OTTO-BLIESNER, B. L.; BRADY, E. C. Tropical Pacific Variability in the NCAR Climate System Model. **J Climate**, 14(17): 3587 – 3607, 2001.
- PERCIVAL, D. B.; WALDEN, A. T. Spectral analysis for physical applications – Multitaper and conventional univariate techniques. **Cambridge Univers. Press**, 702pp., 1993.
- PETERSON, R. G., WHITE, W. B. Slow oceanic teleconnections linking the Antarctic Circumpolar Wave with tropical ENSO. **J. Geophys. Res.** 103: 24573 – 24583, 1998.
- PICKARD, G. L.; EMERY, W. L. Descriptive Physical Oceanography: An Introduction. **Pergamon**, 4 (SI) Edition, 130 – 139 pp., 1982.
- QIU, B.; JIN, F. F. Antarctic circumpolar waves: An indication of ocean-atmospheric coupling in the extratropics. **Geophys. Res. Lett.**, 24, 2585 - 2588, 1997.
- REYNOLDS, R. W.; RAYNER, N. A.; SMITH, T. M.; STONES, D. C.; WANG, W. An Improved in Situ and Satellite SST Analysis for Climate. **J. Climate**, submitted, 2001.
- SARAVANAN, R.; McWILLIAMS, J. C. Advective ocean atmosphere interaction: An analytical stochastic model with implications for decadal variability. **J Climate**, 11: 165 – 188, 1998.
- SEMTNER, A. J. Jr. A model for the thermodynamic growth of sea ice in numerical investigations of climate. **J. Phys. Oceanogr.**, 9: 1273 – 1276, 1976.
- STONE, R. C.; HAMMER, G.L., MARCUSSEN, T. Prediction of global precipitation probabilities using phases of the Southern Oscillation index. **Nature**, 354, 252 – 255, 1996.
- TOMCZAK, M.; GODOFREY, J.S. **Regional Oceanography: An Introduction**. Pergamon Press., 1994.
- VAN HEERDEN, J.; TALJAARD, J. J. Meteorological Monographs. **Meteor. Antarct.**, vol 27, N. 49 – Chapter 3D: 141 – 174, 1998.
- VAN LOON, H. The half-yearly oscillations in middle and high southern latitudes and the coreless winter. **J. Atmos. Sci.**, 24: 472 – 486, 1967.
- VENEGAS, S. A.; DRINKWATER, M. R. Sea ice, atmosphere and upper ocean variability in the Weddell Sea, Antarctic. **J. Geophys. Res.** 106: (C8) 16474-16766, 2001.
- VENEGAS, S.A. The Antarctic Circumpolar Wave: A combination of two signals. **J. Climate**, 16(15):2509-2525, 2003.
- WAINER, I. **Aquecimento Global e Variabilidade Climática na Região do Oceano Atlântico Tropical e Sul**. 94f. Tese (Livro-Docência), Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.
- WAINER, I.; GENT, P.; GONI, G. Annual cycle of the Brazil-Malvinas confluence region in the National Center for Atmospheric Research Climate System Model. **J. Geophys. Res. – Oceans**, 105: (C11) 26167-26177, 2000.
- WANG, S. W. Studies on the Atmospheric Centers of Action. **Report Stat. Univers. New York**. 32 pp, 1992.
- WHITE, W. B.; PETERSON, R. An Antarctic circumpolar wave in surface pressure, wind, temperature, and sea ice extent. **Nature**, 380: 699 – 702, 1996.
- WHITE, W. B. Influence of the Antarctic Circumpolar Wave on Australian precipitation from 1958 to 1997. **Amer. Meteor. Soc.**, 13: 2125 – 2441, 2000.

WHITE, W. B.; CAYAN, D. R. A global ENSO wave in surface temperature and pressure and its interdecadal modulation from 1900 to 1996. **J. Geophys. Res.**, 105, 11.223-11.242, 2000.

WHITE, W. B. Comments on “Synchronous Variability in the Southern Hemisphere Atmosphere, Sea Ice, and Ocean Resulting from the Annular Mode”. **J. Climate**, in press, 2003.

YUAN, X.; MARTINSON, D. G. Antarctic sea-ice variability and its global connectivity. **J. Climate**, 13, 1697 - 1717, 2000.