

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
FACULDADE DE FILOSOFIA, LETRAS E CIÊNCIAS HUMANAS
DEPARTAMENTO DE GEOGRAFIA

BRUNA SIMÕES LIMA

PRECIPITAÇÃO E CIRCULAÇÃO ATMOSFÉRICA NA AMÉRICA DO
SUL EM FASES DISTINTAS DA OSCILAÇÃO DECADAL DO PACÍFICO
ENTRE 1970 E 2003

SÃO PAULO
2017

BRUNA SIMÕES LIMA

Precipitação e circulação atmosférica na América do Sul em fases distintas da Oscilação Decadal do Pacífico entre 1970 e 2003

Trabalho de Graduação Individual apresentado ao Departamento de Geografia da Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas da Universidade de São Paulo, para a obtenção do título de Bacharel em Geografia.

Orientação: Prof^a. Dr^a. Maria Elisa Siqueira Silva

SÃO PAULO

2017

Agradecimentos

Aos meus pais, pelo apoio e motivação aos estudos, pelo carinho e suporte que nunca deixaram de me dar em toda minha trajetória acadêmica.

À minha orientadora, Maria Elisa Siqueira Silva, que despertou em mim o grande interesse pela Climatologia através do projeto “Atlas Climático da América do Sul”. Como sua orientanda de Iniciação Científica e deste trabalho, cresci como aluna e pesquisadora. Agradeço pelo apoio no processo de intercâmbio e por todas as oportunidades acadêmicas e pessoais sem tamanho.

Ao Carlos, um grande mestre (quase doutor) e professor a quem eu chamo de meu “co-orientador”, pelos conselhos, pela amizade e pela incomensurável paciência e ajuda com o GrADS em todos meus projetos desenvolvidos com a Prof.^a Maria Elisa ao longo da graduação.

Aos meus colegas de pesquisa do Laboratório de Climatologia: Júlio, Leila e Thiago, pela paciência, pelo companheirismo e por estarem sempre dispostos a ensinar e ajudar. À Carol, pela parceria e alegria contagiante. E ao Rogério, técnico do laboratório, que também faz parte dessa equipe incrível que tive o privilégio de conviver e aprender.

Ao César e à Tuanny, amigos desde o dia da matrícula na universidade, companheiros de trabalhos e viagens de campo, amigos para a vida toda. Vocês são os meus melhores presentes da graduação. E ao Ivan, “superclimático” que se uniu ao trio e aumentou nossa alegria.

À Laísa, minha irmã de coração, que fez muita falta nesses últimos três anos da graduação.

Ao Giovane, por me fazer acreditar em mim mesma, me incentivar sempre a buscar novos desafios, pela compreensão, dedicação e amor.

RESUMO

Recentes estudos apontam que os padrões da temperatura da superfície do mar (TSM) sobre os oceanos Pacífico e Atlântico contribuem para modular os padrões atmosféricos da América do Sul. Dado que há uma relação entre as distintas fases da Oscilação Decadal do Pacífico (ODP) e a variabilidade da temperatura média global, o presente trabalho tem como objetivo caracterizar os padrões climáticos das estações seca e chuvosa da circulação atmosférica e precipitação sobre a América do Sul durante as fases negativa e positiva da ODP, entre 1970 e 2003. Os resultados mostram uma conformidade nos campos médios traçados com dados da reanálise I do NCEP-NCAR e do ERA-40. Os dados do ERA-20C apresentam menor concordância no sinal em relação às demais fontes analisadas. Apesar dos dados do NCEP-NCAR apresentarem um sinal mais intenso que os dados do ERA-40C, ambos indicaram anomalias positivas e negativas na altura geopotencial, em altos níveis, nas fases negativa e positiva da ODP. Durante a fase negativa da ODP, ocorre a intensificação dos alíseos sobre o nordeste da América do Sul e do escoamento de norte, na região central do continente, sendo estes processos mais intensos durante a estação chuvosa (outubro a março) do que na estação seca (abril a setembro). Durante a fase positiva da ODP, ocorre o enfraquecimento dos alíseos no nordeste da América do Sul e do escoamento de norte, mas, ainda assim, o impacto climático durante a estação chuvosa é mais intenso do que na estação seca. Os dados de precipitação do GPCC indicam que, durante a fase negativa da ODP, ocorrem anomalias negativas de precipitação sobre o centro-leste da América do Sul e anomalias positivas sobre a região sudeste. Durante a fase positiva da ODP, o padrão de anomalias de precipitação se inverte.

Palavras-chave: precipitação, circulação atmosférica, Oscilação Decadal do Pacífico, América do Sul.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Média da componente zonal do vento ($m s^{-1}$), em 850 hPa, para os períodos (a) 1970-1976, (b) 1977-1996 e (c) 1997-2003, para os conjuntos de reanálise do ERA-20C e do NCEP-NCAR.	6
Figura 2 - Média da componente meridional do vento ($m s^{-1}$), em 850 hPa, para os períodos (a) 1970-1976, (b) 1977-1996 e (c) 1997-2003, para os conjuntos de reanálise do ERA-20C e do NCEP-NCAR.	7
Figura 3 - Média do vento ($m s^{-1}$), em 850 hPa, para os períodos (a) 1970-1976, (b) 1977-1996 e (c) 1997-2003, para os conjuntos de reanálise do ERA-20C e do NCEP-NCAR.....	8
Figura 4 – Média da altura geopotencial (m), em 250 hPa, para os períodos (a) 1970-1976, (b) 1977-1996 e (c) 1997-2003, para os conjuntos de reanálise do ERA-20C e do NCEP-NCAR.....	19
Figura 5 – Média da componente zonal do vento ($m s^{-1}$), em 850 hPa, sobre a AS, para os períodos 1970-1976, 1977-1996 e 1997-2003, para os conjuntos de reanálise do NCEP-NCAR, ERA-20C e ERA-40.	21
Figura 6 – Média da componente meridional do vento ($m s^{-1}$), em 850 hPa, sobre a AS, para os períodos 1970-1976, 1977-1996 e 1997-2003, para os conjuntos de reanálise do NCEP-NCAR, ERA-20C e ERA-40.	22
Figura 7 – Anomalia média da componente zonal do vento ($m s^{-1}$), em 850 hPa, para os subperíodos 1970-1976, 1977-1996 e 1997-2003, para dados do NCEP-NCAR, ERA-20C e ERA-40.....	24
Figura 8 – Anomalia média da componente meridional do vento ($m s^{-1}$), em 850 hPa, para os períodos 1970-1976, 1977-1996 e 1997-2003, para dados do NCEP-NCAR, ERA-20C e ERA-40.....	25
Figura 9 – Anomalia média da altura geopotencial (m), em 250 hPa, (a) sem e (b) com filtragem de Lanczos, para os períodos (a) 1970-1976, (b) 1977-1996 e (c) 1997-2003, para os dados da reanálise I do NCEP-NCAR.....	27
Figura 10 – Anomalia média da altura geopotencial (m), em 250 hPa, sobre a AS, para os períodos (a) 1970-1976, (b) 1977-1996 e (c) 1997-2003, para os dados da reanálise I do NCEP-NCAR e ERA-40.....	29
Figura 11 – Anomalia média da altura geopotencial (m), em 500 hPa, para os períodos (a) 1970-1976, (b) 1977-1996 e (c) 1997-2003, para os dados da reanálise do NCEP-NCAR e ERA-40.....	30

Figura 12 – Anomalia anual da componente zonal do vento ($m s^{-1}$), em 850 hPa, para os anos do 1º subperíodo (1970-1976), para os dados da reanálise I do NCEP-NCAR.....	31
Figura 13 – Anomalia anual da componente zonal do vento ($m s^{-1}$), em 850 hPa, para os anos do 2º subperíodo (1977-1996), para os dados da reanálise I do NCEP-NCAR.....	32
Figura 14 – Anomalia anual da componente zonal do vento ($m s^{-1}$), em 850 hPa, para os anos do 3º subperíodo (1997-2003), para os dados da reanálise I do NCEP-NCAR.....	33
Figura 15 – Anomalia anual da componente meridional do vento ($m s^{-1}$), em 850 hPa, para os anos do 1º subperíodo (1970-1976), para os dados da reanálise I do NCEP-NCAR.	34
Figura 16 – Anomalia anual da componente meridional do vento ($m s^{-1}$), em 850 hPa, para os anos do 2º subperíodo (1977-1996), para os dados da reanálise I do NCEP-NCAR.	35
Figura 17 – Anomalia anual da componente meridional do vento ($m s^{-1}$), em 850 hPa, para os anos do 3º subperíodo (1997-2003), para os dados da reanálise I do NCEP-NCAR.	36
Figura 18 – Anomalia média anual da componente zonal do vento ($m s^{-1}$) (1ª coluna), em 850 hPa, para a estação chuvosa (2ª coluna) e seca (3ª coluna), para os subperíodos (a) 1970-1976, (b) 1977-1996 e (c) 1997-2003, para a reanálise I do NCEP-NCAR.	38
Figura 19 – Anomalia média anual da componente meridional do vento ($m s^{-1}$) (1ª coluna), em 850 hPa, para a estação chuvosa (2ª coluna) e seca (3ª coluna), para os subperíodos (a) 1970-1976, (b) 1977-1996 e (c) 1997-2003, para a reanálise I do NCEP-NCAR.	39
Figura 20 – Anomalia média anual da componente zonal do vento ($m s^{-1}$) (1ª coluna), em 850 hPa, e a diferença entre a estação chuvosa (2ª coluna) e a seca (3ª coluna) em relação anomalia média, para os subperíodos (a) 1970-1976, (b) 1977-1996 e (c) 1997-2003, para os dados do NCEP-NCAR.	41
Figura 21 – Anomalia média anual da componente meridional do vento ($m s^{-1}$) (1ª coluna), em 850 hPa, e a diferença entre a estação chuvosa (2ª coluna) e a seca (3ª coluna) em relação a anomalia média, para os subperíodos (a) 1970-1976, (b) 1977-1996 e (c) 1997-2003, para os dados do NCEP-NCAR.	42
Figura 22 – Anomalia anual da precipitação ($mm dia^{-1}$), para os períodos 1970-1976, 1977-1996 e 1997-2003, a partir de dados do GPCC. As áreas delimitadas com um retângulo preto (B1) e com um círculo vermelho (B2) compõem aproximadamente o dipolo do padrão da anomalia de precipitação proposto para a escala decadal.....	43
Figura 23 – Anomalia média da precipitação ($mm dia^{-1}$) (1ª coluna), para a estação chuvosa (2ª coluna) e seca (3ª coluna), para os subperíodos (a) 1970-1976, (b) 1977-1996 e (c) 1997-2003, a partir de dados do GPCC.	44

Figura 24 – Anomalia do vento ($m s^{-1}$) em 850 hPa para os três subperíodos considerados, 1970-1976, 1977-1996, 1997-2003, para dados da reanálise I do NCEP/NCAR.....	46
Figura 25 – Áreas definidas pelos maiores valores de anomalia da componente (a) zonal e (b) meridional do vento e de (c) altura geopotencial. A área identificada pelos retângulos preto e amarelo nos quadros (a) e (b) são denominadas “Área 1” e “Área 2”, respectivamente.	47
Figura 26 – Anomalia mensal da componente zonal do vento em 850 hPa em relação à série temporal 1970-2003, para a (a) Área 1 e (b) Área 2, para dados da reanálise I do NCEP/NCAR. A curva rosa indica a suavização dos dados originais por média móvel com janela de 9 meses.....	49
Figura 27 – Anomalia anual da componente zonal do vento em 850 hPa, em relação à série temporal 1970-2003, para a (a) Área 1 e (b) Área 2, para dados da reanálise I do NCEP/NCAR. A curva rosa indica a suavização dos dados originais por média móvel com janela de 9 anos.	50
Figura 28 – Anomalia mensal da componente meridional do vento em 850 hPa, em relação à série temporal 1970-2003, para a (a) Área 1 e (b) Área 2, para dados da reanálise I do NCEP/NCAR. A curva rosa indica a suavização dos dados originais por média móvel com janela de 9 meses.....	52
Figura 29 – Anomalia anual da componente meridional do vento em 850 hPa, em relação à série temporal 1970-2003, para a (a) Área 1 e (b) Área 2, para dados da reanálise I do NCEP/NCAR. A curva rosa indica a suavização dos dados originais por média móvel com janela de 9 anos.	53
Figura 30 – Anomalia anual de altura geopotencial em 250 hPa, em relação à série temporal 1970-2003, para a área identificada na Fig. 25c, para dados da reanálise I do NCEP/NCAR. A curva rosa indica a suavização dos dados originais por média móvel com janela de 9 anos.	54
Figura 31 – Áreas com anomalias significativas de precipitação durante as fases distintas de ODP. A área identificada pelo retângulo preto é denominada “Área B1” enquanto a área com círculo vermelho, “Área B2”. O sombreado refere-se à anomalia de precipitação para o 1º subperíodo, 1970-1977.	55
Figura 32 – Anomalia anual de precipitação em relação à série temporal 1970-2003, para a (a) Área B1 e (b) Área B2, para dados da reanálise I do NCEP/NCAR. A curva rosa indica a suavização dos dados originais por média móvel com janela de 9 anos.....	56

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Taxa de ocorrência (%) de fenômenos EN e LN durante os três subperíodos de ODP, entre 1970 e 2003..	48
--	----

LISTA DE SIGLAS

ACP	Análise de Componentes Principais
AS	América do Sul
CDO	Climate Data Operator
ECMWF	European Centre for Medium-Range Weather Forecasts
EN	El Niño
ENOS	El Niño-Oscilação Sul
GPCC	Global Precipitation Climatology Center
GrADS	Grid Analysis and Display System
hPa	Hectopascal
LN	La Niña
Mgp	Metro geopotencial
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
ODP	Oscilação Decadal do Pacífico
TSM	Temperatura da superfície do mar

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	10
2. DADOS E MÉTODOS	12
3. RESULTADOS E DISCUSSÕES	15
3.1. <i>CIRCULAÇÃO ATMOSFÉRICA GLOBAL E NA AMÉRICA DO SUL</i>	15
3.1.1. <i>Análise dos subperíodos.....</i>	15
3.1.2. <i>Variabilidade anual da circulação sobre a América do Sul.....</i>	30
3.1.3. <i>Variabilidade sazonal da circulação sobre a América do Sul.....</i>	36
3.1.4. <i>Padrões de precipitação na AS nas fases da ODP.....</i>	42
3.2. <i>PADRÃO CLIMÁTICO DA AMÉRICA DO SUL ASSOCIADO À ODP</i>	45
3.2.1. <i>Variação mensal do vento, altura geopotencial e precipitação.....</i>	47
4. CONCLUSÃO	57
5. REFERÊNCIAS.....	59

1. INTRODUÇÃO

Os movimentos atmosféricos – causados pelo aquecimento solar diferencial – atuam na redistribuição de energia e umidade. Na região tropical do globo observa-se o excesso de energia, enquanto que nas regiões polares há um déficit energético. Dessa forma, a circulação atmosférica tem o papel de redistribuir o excesso de energia dos trópicos para as demais regiões do globo e a forma como a atmosfera realiza essa redistribuição energética é por meio dos movimentos horizontais e verticais (ventos). Segundo Barry & Chorley (2013), a principal causa do movimento do ar é o desenvolvimento de um gradiente de pressão horizontal por meio das diferenças espaciais do aquecimento superficial e das mudanças consequentes na densidade e pressão do ar. E este processo ocorre em todas as escalas atmosféricas. Além disso, a circulação atmosférica também define condições propícias para a precipitação, uma vez que os gradientes térmicos e de umidade contribuem para o movimento de ascendência do ar e sua consequente condensação. O regime de chuvas de um determinado local é fator determinante na definição do clima local, sendo as chuvas o resultado final de uma série de processos físicos com escalas de tempo e espaço bastante diversas (Cavalcanti et al., 2009).

Dada a complexidade dos fenômenos e do sistema atmosférico global, o presente trabalho abrange uma série temporal de 33 anos (1970 a 2003) e analisa apenas uma porção do globo como área de estudo dos eventos de precipitação e circulação atmosférica, a América do Sul (AS). Nessa região do globo, observa-se uma forte interação entre o espaço, o oceano e atmosfera. De acordo com REBOITA et al. (2010),

Como a América do Sul se estende por diferentes latitudes e possui formas de relevo variadas, proporciona a atuação e o desenvolvimento de diferentes sistemas atmosféricos, os quais contribuem para a não homogeneidade climática da região.

A América do Sul situa-se entre 12°N e 55°S, possuindo uma geografia diversificada em toda sua extensão uma vez que abrange tanto as baixas

quanto as médias latitudes. Tal localização – circundada pelos oceanos Pacífico e Atlântico – confere ao continente sulamericano uma significativa dinâmica climática devido ao desenvolvimento e atuação de diferentes sistemas atmosféricos. De acordo com REBOITA et al. (2012), a precipitação da AS não é distribuída regularmente no tempo e no espaço. A precipitação pluviométrica é uma variável climática largamente estudada em razão de recordes meteorológicos e hidrológicos observados em algumas áreas (Cavalcanti et al., 2009). No decorrer das últimas décadas, tem-se observado o aumento de precipitações mais intensas em áreas específicas da América do Sul (REBOITA et al., 2010; IPCC, 2014), o que é explicado, em parte, pelo aumento gradual da temperatura troposférica no mesmo intervalo temporal.

Considerando-se a variabilidade da precipitação em baixa frequência, vários estudos têm indicado uma associação entre o clima da América do Sul e a Oscilação Decadal do Pacífico. A ODP é caracterizada pela oscilação decadal da anomalia da TSM na bacia do Oceano Pacífico (Latif e Barnett, 1994 apud Silva e Silva, 2016) e é caracterizada por fases negativas e positivas. Molion (2005) mostrou que existe uma coincidência entre as fases da ODP e a variabilidade da temperatura média global. Mo e Nogués-Paegle (2001) mostram padrões característicos de circulação atmosférica sobre o Pacífico Sul e a América do Sul sem se ater a escala da ODP. Silva e Silva (2016) indicam a associação entre oscilações de baixa frequência sobre o Pacífico e padrões característicos de circulação sobre a AS. Segundo Molion (2005),

Não se sabe ainda qual é a causa da ODP, tampouco seus impactos sobre o clima. Porém, considerando que a atmosfera terrestre é aquecida por debaixo, os oceanos são a condição de contorno inferior mais importante para o clima e, certamente, o Pacífico, por ocupar um terço da superfície terrestre, deve ter um papel preponderante na variabilidade climática interdecadal.

Os resultados apresentados por Silva et al. (2016) apresentam as diferenças climáticas médias na América do Sul decorrentes da atuação da ODP em períodos de tempo relativamente longos 1970-1976, 1977-1996 e

1997-2003, abrangendo três fases da ODP: negativa, positiva e negativa, respectivamente. Na presente pesquisa, propõe-se a análise das características climáticas durante as mesmas fases da ODP consideradas em Silva et al. (2016), porém, nas escalas anual e sazonal. Ou seja, o objetivo é verificar como a climatologia de cada ano e de cada estação do ano se relaciona como a média de cada fase da ODP.

Em um primeiro nível de abordagem, a América do Sul será analisada em um contexto geral e, posteriormente, dar-se-á ênfase aos estudos da evolução da precipitação e circulação atmosférica no setor leste da AS. Adicionalmente à análise das características médias climáticas de cada subperíodo pré-definido, nas escalas anual e sazonal, será feita uma análise comparativa de dados oriundos de diferentes conjuntos de reanálises: ECMWF e NCEP/NCAR, europeia e norte-americana, respectivamente.

A análise da atmosfera no decorrer de um longo período de tempo permite verificar questões relacionadas às alterações climáticas e a seus impactos diretos e indiretos no estrato geográfico em que habitam os homens. O estudo comparativo permite verificar a confiabilidade dos resultados a partir das análises dos dados. Além disso, este trabalho apresenta uma análise adicional aos resultados obtidos por Silva et al. (2016) e Mo e Nogués-Paegle (2001), ao buscar a caracterização e o aumento da compreensão dos processos de transporte de umidade durante as distintas fases da ODP na América do Sul.

A seguinte seção do trabalho consiste na descrição dos dados utilizados para dar suporte à pesquisa e aos métodos adotados. Os resultados e discussões estão presentes na seção 3, seguidos das conclusões e considerações finais do trabalho.

2. DADOS E MÉTODOS

A caracterização climática da circulação atmosférica da América do Sul e Oceano Pacífico foi realizada com base nos dados mensais de vento em 850 hPa e altura geopotencial em 250 hPa, na escala mensal, dos conjuntos de

dados da reanálise I do NCEP-NCAR (Kalnay et al., 1996) (<http://www.esrl.noaa.gov/psd/cgibin/data/composites/printpage.pl>) e da reanálise ERA-40 do ECMWF (Upalla et al., 2004) (<http://apps.ecmwf.int/datasets/data/era40-mnth/levtype=sfc/>). Os dados da reanálise ERA-20C do ECMWF (Poli et al. 2013) (<http://apps.ecmwf.int/datasets/data/era20c-moda/levtype=sfc/type=an/>) também foram adquiridos inicialmente, porém, descartados dos resultados finais devido à baixa concordância dos resultados com as demais reanálises aqui consideradas.

Para a caracterização climática da precipitação, foram adquiridos os dados mensais compilados pelo *Global Precipitation Climatology Center* – GPCC (Schneider et al., 2011) (<http://kunden.dwd.de/GPCC/Visualizer>). Segundo Negrón-Juaréz et al. (2009), os dados do GPCC e os do *Climate Prediction Center* apresentam concordância significativa para a América do Sul. Através da NOAA foi obtido o índice mensal de Oscilação Decadal do Pacífico (Zhang et al., 1997).

Os conjuntos de dados analisados possuem as seguintes resoluções espaciais: NCEP-NCAR, 2,5 graus; ERA-20C e ERA-40, 1,0 grau; GPCC, 1,0 grau (Adler et al., 2003). Em se tratando da extensão temporal dos dados, o NCEP-NCAR disponibiliza dados de 1948 até o presente; já os dados do ERA-20C e ERA-40 possuem uma temporalidade delimitada para cada reanálise, sendo os dados do ERA-20C, de 1900 a 2010, e os do ERA-40, de 1958 a 2001. Os dados do GPCC compreendem o período de janeiro de 1901 a dezembro de 2010.

A análise da evolução temporal, entre 1970 e 2003, das variáveis atmosféricas sobre a América do Sul foi realizada com base no cálculo dos valores médios e anomalias para os subperíodos 1970-1976, 1977-1996 e 1997-2003. Os dados avaliados foram: componentes zonal e meridional do vento ($m s^{-1}$) em 850 hPa, altura geopotencial (m_{gp}) em 250 e 500 hPa e precipitação ($mm dia^{-1}$). Os períodos pré-selecionados referem-se a fases distintas da Oscilação Decadal do Pacífico tal como indicado em Silva et al. (2016). Primeiramente, foram considerados os dados de vento e altura geopotencial para todo o globo. Estes dados foram lidos e tratados

estatisticamente com o auxílio do software Grid Analysis and Display System (GrADS), de forma a definir a climatologia de análise referente ao período total, 1970-2003, e os desvios em relação a esta climatologia para os subperíodos considerados. Os cálculos de média e anomalia de cada subperíodo foram realizados com o auxílio do programa *Climate Data Operator* (CDO), também instalado no servidor Linux. O recorte da série temporal para cada fonte de dado também foi realizado com o CDO. A tendência linear de longo prazo e a sazonalidade de todos os dados aqui considerados foram retiradas. A remoção da tendência linear permite, de certa forma, analisar a variabilidade climática natural do clima. Para que os dados de altura geopotencial do NCEP-NCAR pudessem ser comparados aos do ECMWF, foram divididos pela constante gravitacional multiplicada por 10. Os dados de altura geopotencial foram suavizados com o filtro de Lanczos (Duchon, 1979) de forma a permitir a visualização de ondas de baixa frequência, como as ondas de Rossby (Holton, 2004, *An Introduction to Dynamic Meteorology*, p.213). Qualquer série temporal de dados pode ser filtrada com o filtro de Lanczos para reter a oscilação desejada, em particular a de baixa frequência. Uma série temporal pode ser escrita matematicamente como uma série de Fourier (Wilks, *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences*, 2006), como uma soma de funções senos e cossenos, com frequências distintas. Desta forma, funções específicas, ou frequências específicas, podem ser retiradas da representação da série original de dados, permitindo que seja mantida apenas a frequência de interesse. A suavização de séries temporais a partir da média móvel, com janela de 9 anos, foi utilizada na elaboração de gráficos de evolução mensal e anual de anomalias.

Os dados foram analisados através de mapas e gráficos de anomalias médias nas escalas anual e sazonal, a fim de se verificar a variabilidade climática existente nas três fases consideradas da ODP. A análise da variabilidade sazonal foi feita com base na divisão do ano em períodos chuvosos (ONDJFM) e secos (AMJJAS), para os mesmos subperíodos. A taxa de ocorrência de eventos EN e LN (Climate Prediction Center, NOAA) foi calculada pela razão entre o número de meses com anomalias de TSM acima de $|0,5|$ °C e o número de meses em cada fase da ODP.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A apresentação dos resultados subdivide-se em duas seções. A primeira, seção 3.1, aborda a circulação atmosférica na América do Sul enquanto a segunda, seção 3.2, apresenta a anomalia referente ao padrão climático da América do Sul entre 1970 e 2003 identificado em cada fase distinta da ODP.

3.1. Circulação atmosférica global e na América do Sul

Em uma análise aprofundada da circulação atmosférica da AS, em altos e baixos níveis, foram observados comportamentos diferentes nos três subperíodos analisados, 1970-1976, 1977-1996 e 1997-2003, tanto para vento em 850 hPa como para altura geopotencial em 250 hPa, sobre o Pacífico Sul e América do Sul. Foram elaborados mapas da média e da anomalia de vento, na América do Sul, e da altura geopotencial, para o globo todo. Os mapas com dados oriundos das reanálises do NCEP/NCAR e ERA-20C foram comparados. Adicionalmente, foram analisados os dados do ERA-40. Os resultados dos dados não filtrados e aqueles filtrados a partir da técnica de Lanczos também foram comparados.

3.1.1. Análise dos subperíodos

Os valores médios das componentes zonal e meridional do vento em 850 hPa, para a reanálise I do NCEP-NCAR e ERA-20C, mostrados nas Figuras 1 e 2, são bastante semelhantes entre si, para os três subperíodos considerados. Em geral, evidenciam o escoamento de oeste em latitudes médias e o escoamento de leste em latitudes tropicais e polares. A média da componente meridional do vento (Figura 2) mostra principalmente o caráter ondulatório da atmosfera em latitudes médias e altas, e o fato da circulação meridional ser bem mais fraca do que a zonal. O caráter ondulatório da atmosfera pode ser identificado pelos valores positivos e negativos da componente meridional na

direção zonal. Observa-se o escoamento médio de norte sobre a América do Sul em níveis baixos, 850 hPa, formado pelos alíseos e convergência do ar, principalmente durante o verão. A Figura 3 exibe o vetor vento para os mesmos subperíodos, para dados do ERA-20C e reanálise I do NCEP-NCAR.

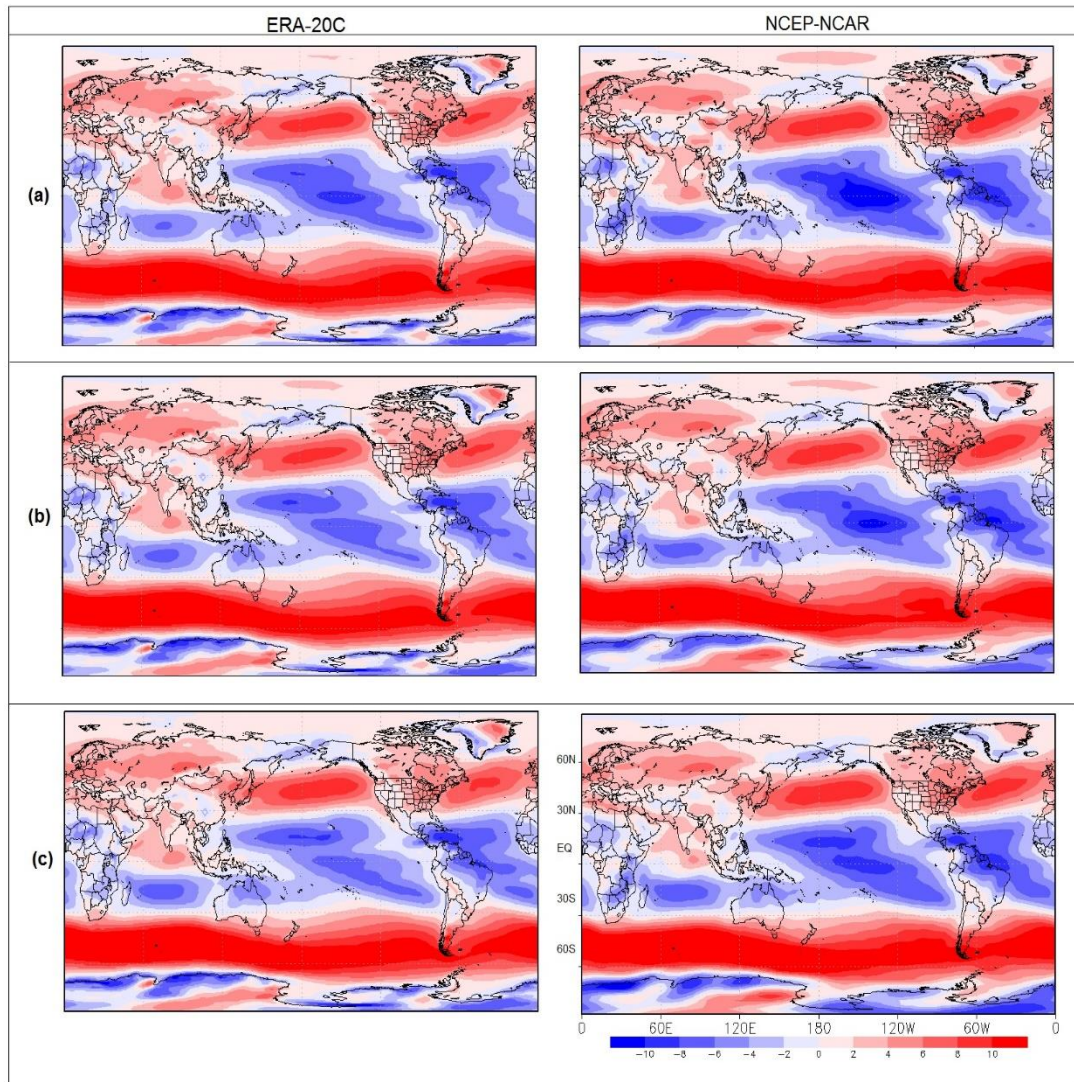


Figura 1. Média da componente zonal do vento (m s^{-1}), em 850 hPa, para os períodos (a) 1970-1976, (b) 1977-1996 e (c) 1997-2003, para os conjuntos de reanálise do ERA-20C (à esquerda) e do NCEP-NCAR (à direita).

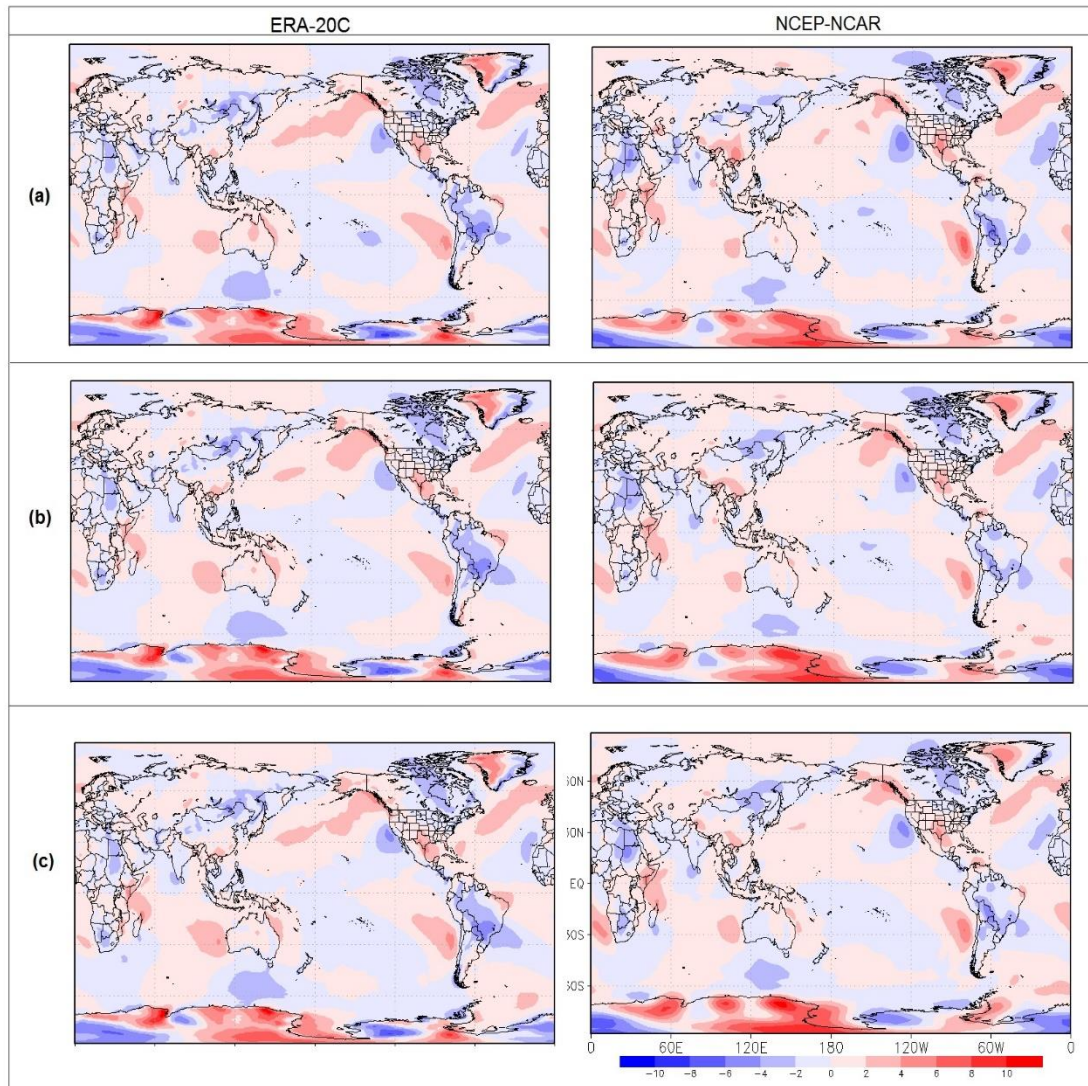


Figura 2. Média da componente meridional do vento ($m s^{-1}$), em 850 hPa, para os períodos (a) 1970-1976, (b) 1977-1996 e (c) 1997-2003, para os conjuntos de reanálise do ERA-20C (à esquerda) e do NCEP-NCAR (à direita).

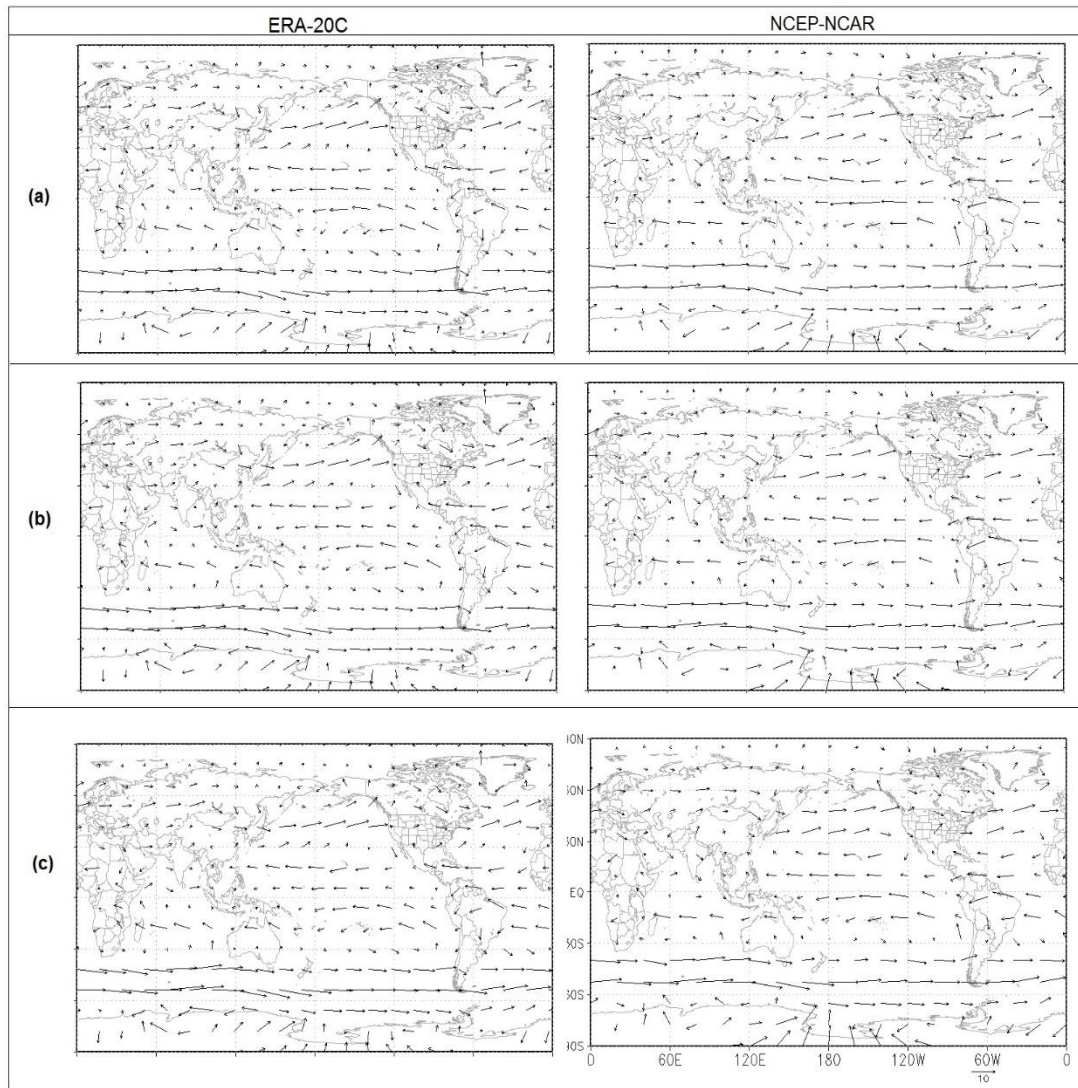


Figura 3. Média do vento (m s^{-1}), em 850 hPa, para os períodos (a) 1970-1976, (b) 1977-1996 e (c) 1997-2003, para os conjuntos de reanálise do ERA-20C (à esquerda) e do NCEP-NCAR (à direita).

De forma geral, os padrões médios de circulação atmosférica são semelhantes entre as duas fontes de dados comparadas, contudo, os dados do NCEP-NCAR apresentam valores mais intensos da componente zonal do vento nas latitudes tropicais e subtropicais e mais fracos nas latitudes polares em relação aos dados do ERA-20C. A Figura 4 indica a média de altura geopotencial em altos níveis com destaque para a intensidade do sinal entre as duas fontes comparadas. Observa-se que os valores médios da altura geopotencial em 250 hPa da reanálise I do NCEP-NCAR na faixa tropical é maior do que os valores do ERA-20C. Enquanto valores entre 1450 e 1500

mgp cobrem grande parte da área tropical com os dados da reanálise I do NCEP-NCAR, esta mesma área tropical apresenta valores máximos entre 1400 e 1450 mgp, de acordo com o conjunto de dados do ERA-20C. Assim, aparentemente, os dados da reanálise I estão associados a uma troposfera mais quente do que a indicada pelos dados do ERA-20C. Pelas duas fontes de dados é possível observar que a região Antártica é mais fria do que a região Ártica, apresentando valores menores da altura geopotencial. Nos três subperíodos considerados, os dados de altura geopotencial do ERA-20C na região Antártica são, em geral, menores do que os dados do NCEP-NCAR.

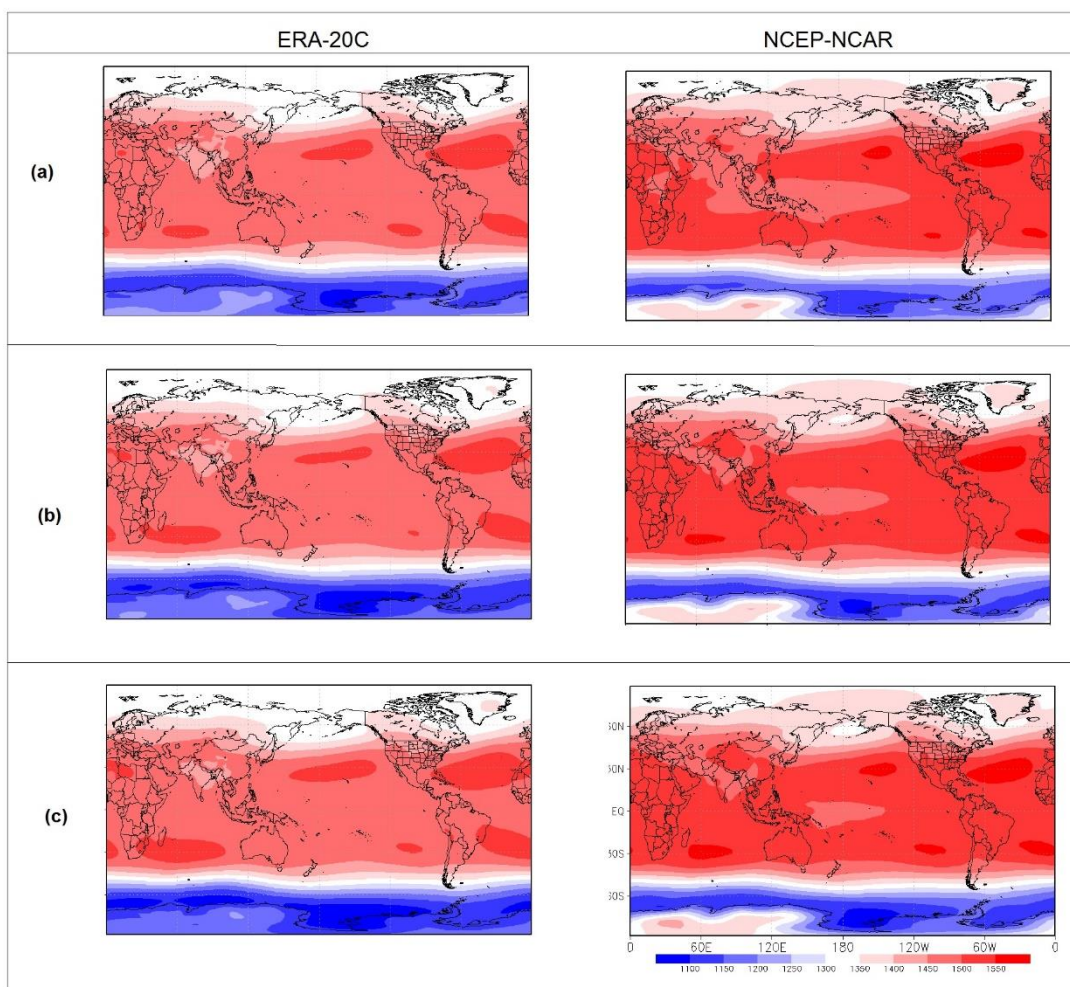


Figura 4. Média da altura geopotencial (mgp), em 250 hPa, para os períodos (a) 1970-1976, (b) 1977-1996 e (c) 1997-2003, para os conjuntos de reanálise do ERA-20C (à esquerda) e do NCEP-NCAR (à direita).

As Figuras 5 e 6 destacam, respectivamente, a média da componente zonal e meridional do vento, em 850 hPa, apenas sobre a América do Sul, permitindo a comparação adicional com os dados do ERA-40. Observando o comportamento da componente zonal (Figura 5) nos três subperíodos, nota-se uma concordância geral entre as três reanálises, embora o sinal do ERA-40 seja mais fraco do que o sinal do NCEP-NCAR e ERA-20C, em especial sobre o continente. Ainda, o escoamento médio de leste do ERA-40 atinge a região central da Argentina, Paraguai, Uruguai e sul do Brasil enquanto que os dados do NCEP-NCAR e ERA-20C apresentam escoamento de oeste nestas latitudes. Por outro lado, o padrão espacial da componente meridional do NCEP-NCAR aproxima-se mais do padrão do ERA-40 (Figura 6). Enquanto os valores máximos do escoamento meridional de norte ($|v| > 4 \text{ m s}^{-1}$) dos dados do NCEP-NCAR e ERA-40 restringem-se sobre a Bolívia e Paraguai, os valores máximos dos dados do ERA-20C abrangem uma área maior, alcançando adicionalmente o centro-sul do Brasil. As diferenças identificadas devem ser avaliadas posteriormente em relação a dados observados em estações meteorológicas de forma a identificar as fontes de dados que melhor representam o comportamento real da atmosfera.

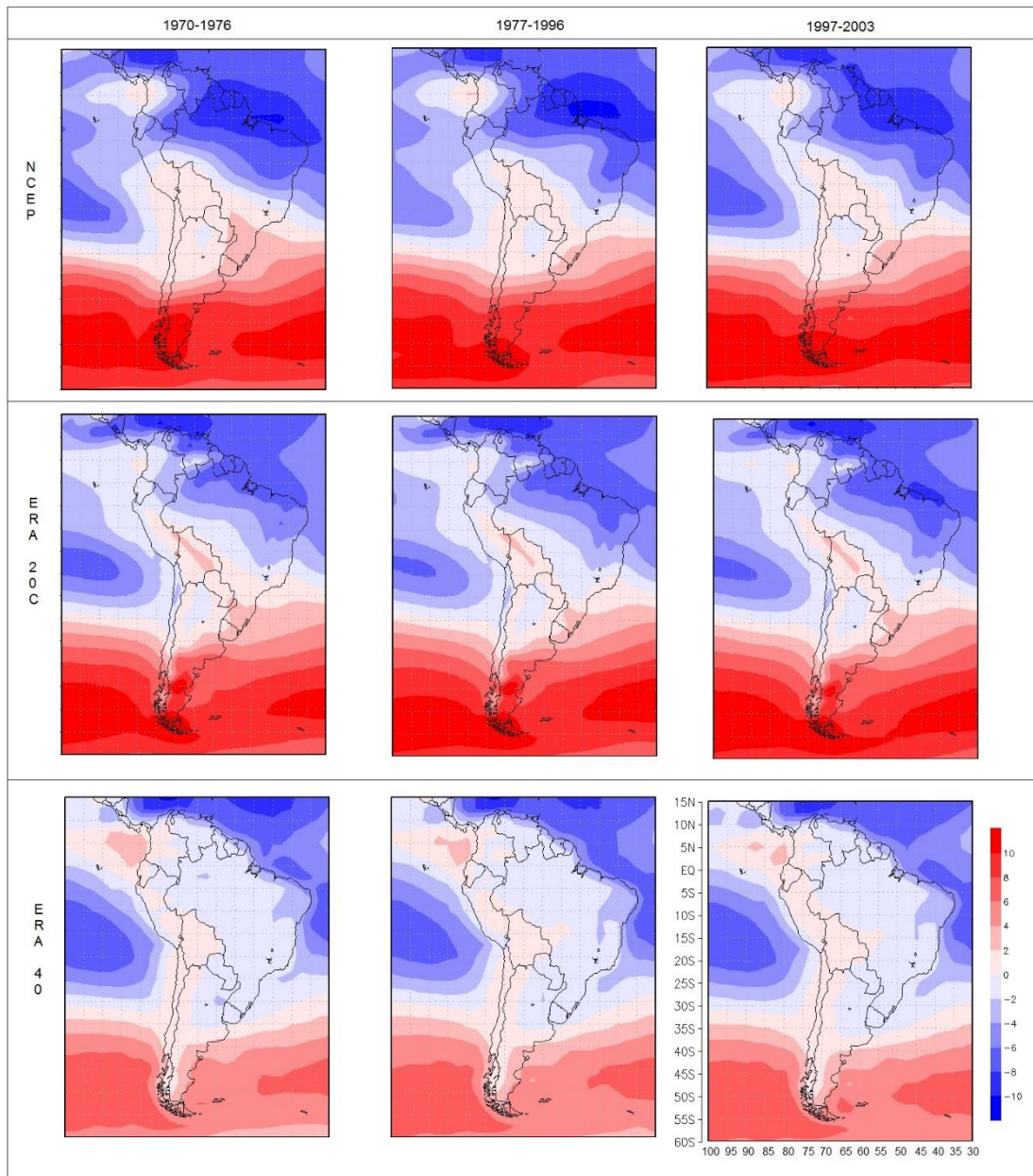


Figura 5. Média da componente zonal do vento (m s^{-1}), em 850 hPa, sobre a América do Sul, para os períodos 1970-1976, 1977-1996 e 1997-2003, para os conjuntos de reanálise do NCEP-NCAR, ERA-20C e ERA-40.

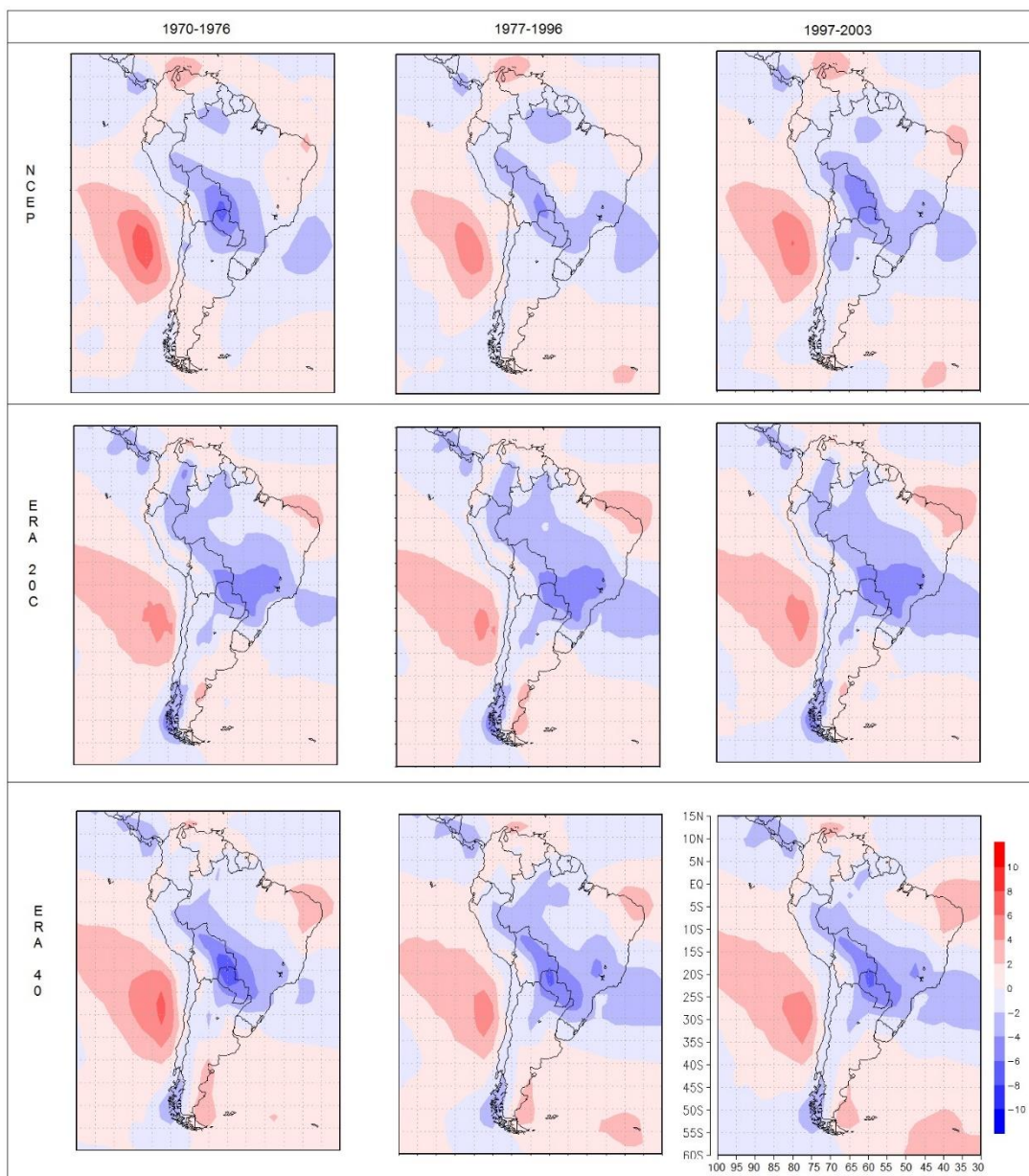


Figura 6. Média da componente meridional do vento (m s^{-1}), em 850 hPa, sobre a América do Sul, para os períodos 1970-1976, 1977-1996 e 1997-2003, para os conjuntos de reanálise do NCEP-NCAR, ERA-20C e ERA-40.

As Figuras 7 e 8 representam, respectivamente, a anomalia das componentes zonal e meridional do vento em 850 hPa, em relação ao período 1970-2003. Através dos mapas, verifica-se que os dados oriundos do NCEP-NCAR têm sinal mais intenso das anomalias de vento em comparação com os dados do ECMWF (ERA-20C e ERA-40). Vale ressaltar que a explicação das divergências nos resultados do ERA-40 deve considerar a diferença de

tamanho de suas séries temporais em relação aos dados do NCEP-NCAR e ERA-20C, delimitadas entre os anos de 1970 e 2001 – havendo, portanto, uma pequena diferença de dois anos entre as séries.

Para os três subperíodos analisados, observou-se comportamentos diferentes das anomalias do vento dentre as fontes de dados consideradas, como o caso identificado no primeiro período (Figura 7). Os dados do ERA-20C não exibem o dipolo com anomalias negativas e positivas da componente zonal do vento sobre o nordeste e sudeste do Brasil (região central e sudeste no caso do ERA-40), tal como verificado nos dados do NCEP-NCAR e ERA-40. No 2º e 3º subperíodos, o padrão médio da anomalia da componente zonal do vento obtido com os dados do ERA-20C também é distinto daquele associado aos dados do NCEP-NCAR e ERA-40. Por outro lado, os padrões de anomalia da componente zonal observados sobre o Pacífico tropical e subtropical sul são mais similares entre si, com sinais trocados entre o setor tropical e latitudes médias ($\sim 50^\circ$ S), para o 2º e 3º subperíodos. É necessário analisar os campos de vento médio em níveis troposféricos mais altos para poder identificar até que altitude as três fontes de dados são similares, o que não foi realizado neste estudo.

Os campos médios da componente meridional do vento (Figura 8) analisados a partir dos dados da reanálise I do NCEP-NCAR apresentam, para os três subperíodos considerados, um padrão de dipolo sobre o centro-leste da AS, com anomalias negativas (positivas), a oeste, e positivas (negativas), a leste, nas fases negativas (positivas) da ODP. Tais padrões são também identificados a partir dos dados do ERA-40 apesar de ser identificada uma pequena variação na posição dos valores máximos e mínimos em relação aos dados do NCEP-NCAR. Os campos de anomalia média da componente meridional analisada a partir dos dados do ERA-20C são mais distintos do que os campos dos outros dois conjuntos de reanálises considerados, sendo que as diferenças mais importantes ocorrem no 1º subperíodo.

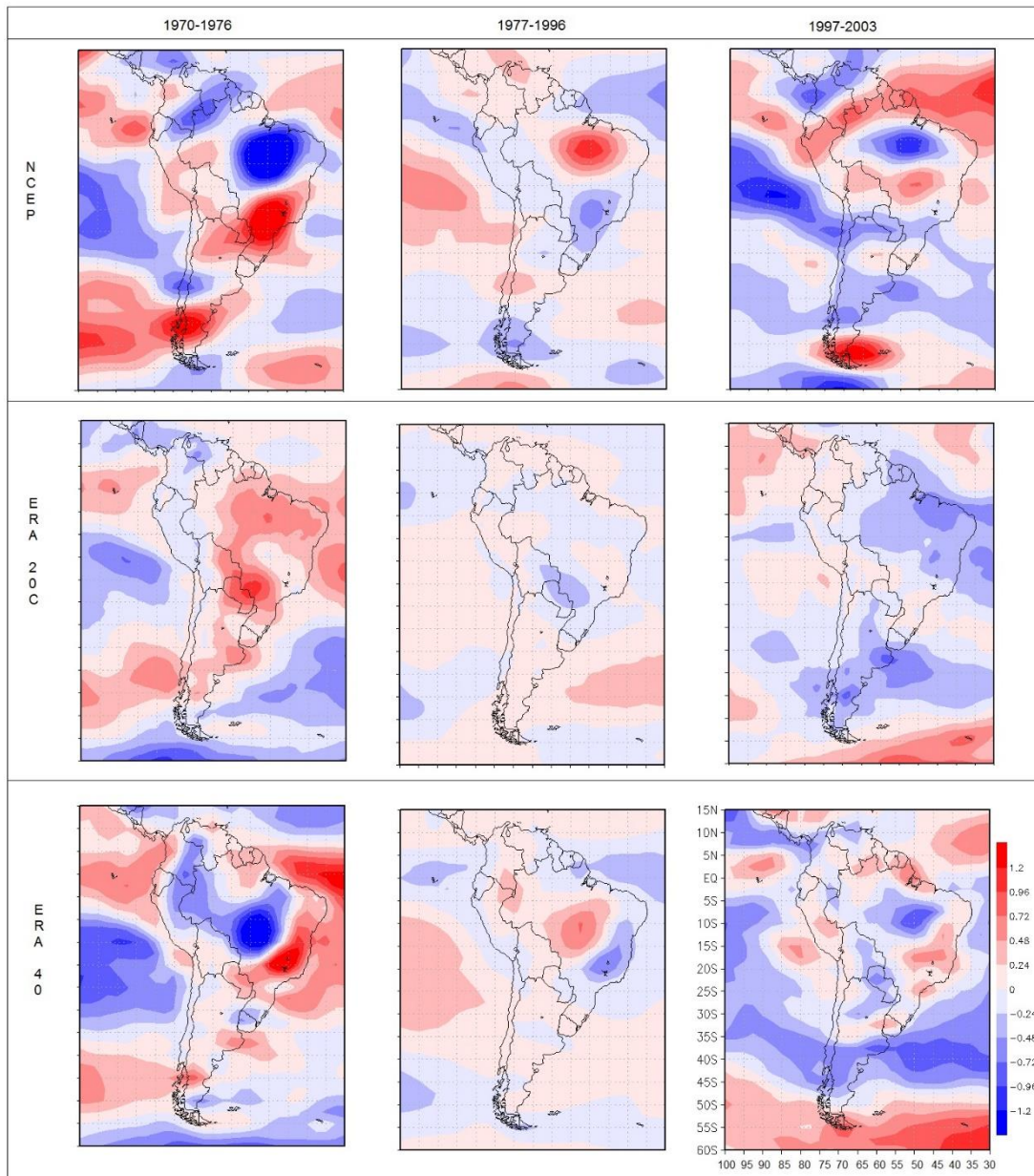


Figura 7. Anomalia média da componente zonal do vento (m s^{-1}), em 850 hPa, para os subperíodos 1970-1976, 1977-1996 e 1997-2003, para dados do NCEP-NCAR, ERA-20C e ERA-40.

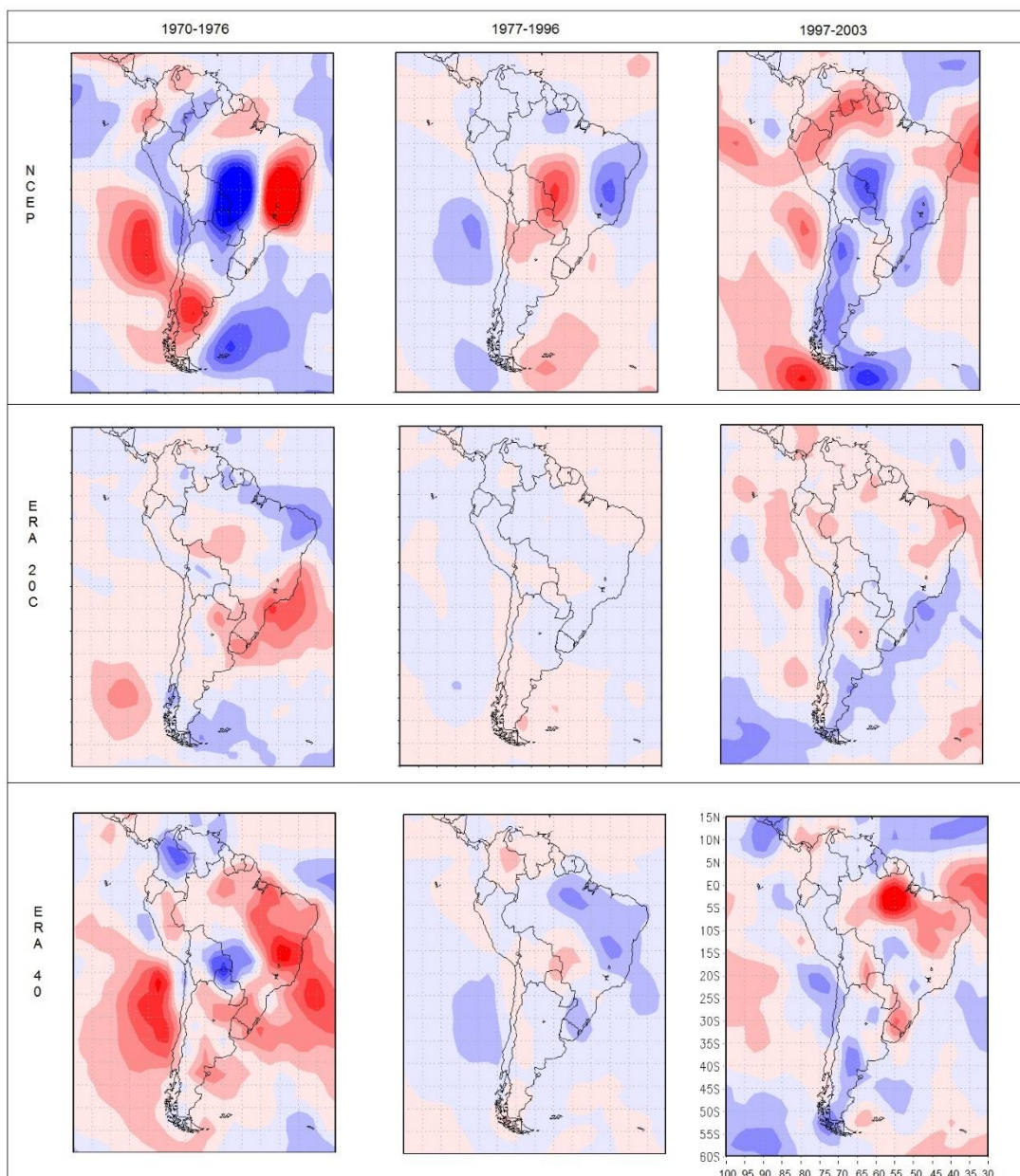


Figura 8. Anomalia média da componente meridional do vento (m s^{-1}), em 850 hPa, para os períodos 1970-1976, 1977-1996 e 1997-2003, para dados do NCEP-NCAR, ERA-20C e ERA-40.

Constata-se, portanto, que os dados do ERA-20C sobre a AS, para os três subperíodos considerados, apresentam menor concordância com os dados do NCEP-NCAR e ERA-40, os quais apresentam mais similaridades entre si. Em uma análise de comparação da qualidade dos dados obtidos a partir de conjuntos de reanálises, reanálise I do NCEP-NCAR, JRA-55 e ERA-40, Silva et al. (2017, no prelo) concluem que os três conjuntos de dados considerados

apresentam padrões espaciais semelhantes e resultados convergentes, porém, identificam mais semelhanças entre os dados do NCEP-NCAR e do ERA-40 que apresentam resoluções espaciais de ~ 206 km e 125 km, respectivamente.

Dados de reanálise constituem produtos de modelos numéricos, os quais apresentam diferenças de procedimentos na assimilação dos dados e em parametrizações (Sterl, 2004). Sterl (2004) considera que:

Assumindo que diferentes modelos têm uma variabilidade intrínseca diferente torna-se possível determinar aquelas partes do domínio espaço-temporal em que pelo menos uma das reanálises não exibe a variabilidade correta. Isto é feito comparando os resultados das duas reanálises. Se eles concordarem, a restrição observacional é suficientemente grande para forçar os modelos a seguir a variabilidade "real" da atmosfera. Se eles não concordam, a restrição é muito fraca e pelo menos uma das duas reanálises não reproduz a variabilidade real. Pode ser que um dos modelos seja muito melhor do que o outro, de modo que a restrição observacional seja suficientemente forte para este modelo, mas não para o outro. (p. 3866, traduzido)

Dessa forma, para o presente trabalho, os dados do ERA-20C serão desconsiderados nas análises seguintes visto que apresentam diferenças significativas em relação aos outros dois conjuntos de dados.

Ainda analisando os subperíodos, o mapa de altura geopotencial para os níveis altos da troposfera, 250 hPa, Figura 9, indica, em média, a propagação de ondas atmosféricas de baixa frequência através do Oceano Pacífico em direção à América do Sul. A propagação das ondas ocorre tanto no hemisfério sul quanto no norte, como se pode observar através da troca de sinais positivos e negativos da anomalia de altura geopotencial sobre latitudes tropicais e extratropicais. Sobre a América do Sul é possível enxergar anomalias positivas (negativas) sobre a região sudeste do Brasil e, negativas (positivas) sobre o sul da América do Sul, durante a fase negativa (positiva) da ODP, caracterizada no 1º e 3º subperíodos (2º subperíodo). Este padrão de propagação preferencial de ondas sobre o Pacífico Sul está associado a anomalias negativas (positivas) de temperatura da superfície do mar no Pacífico Equatorial, o que é indicado

pelos valores negativos (positivos) da anomalia de altura geopotencial nesta área, na fase negativa (positiva) da ODP. Dados de altura geopotencial filtrados com a técnica de Lanczos permitem identificar anomalias mais intensas (Figura 9, coluna à direita) sobre o sudeste do Brasil, nas fases positiva e negativa da ODP.

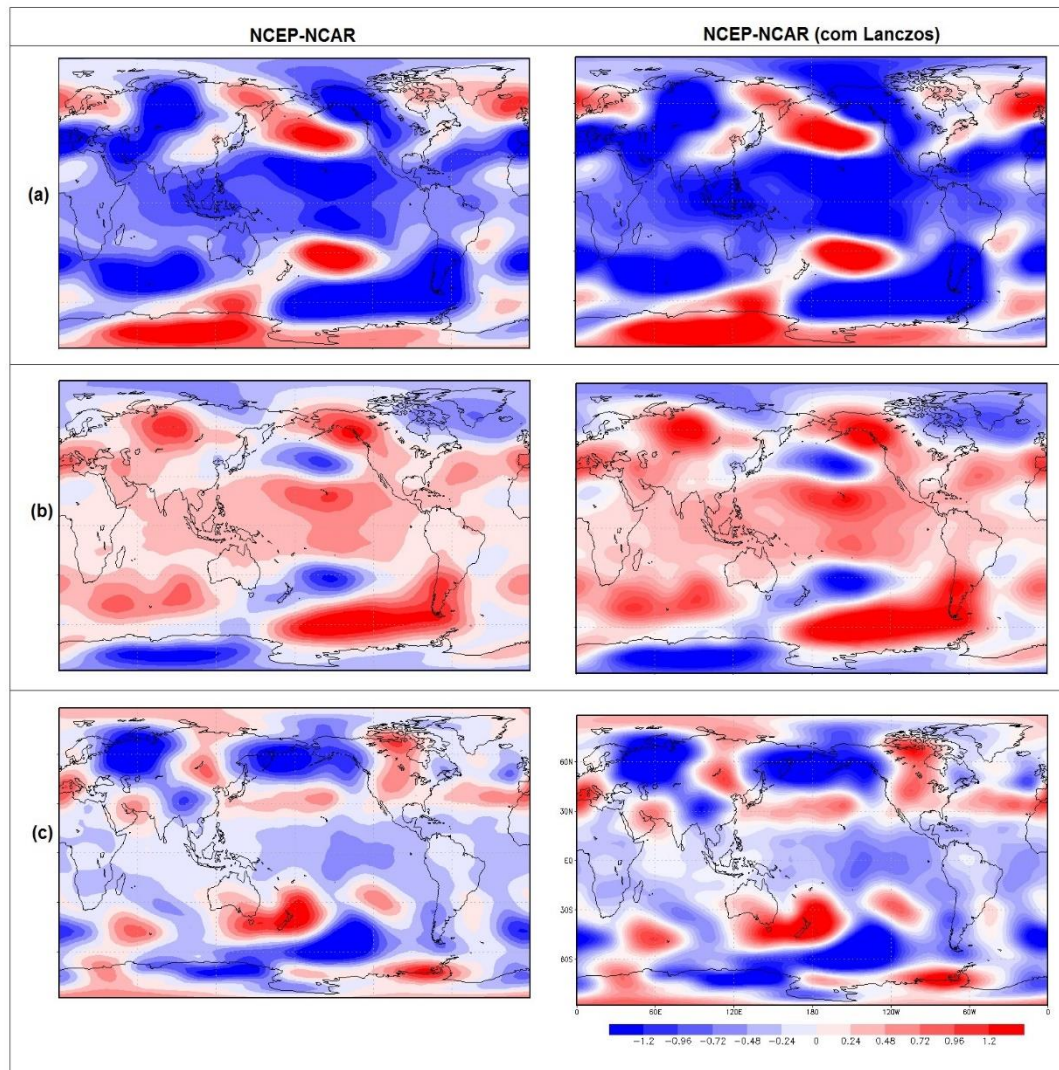


Figura 9. Anomalia média da altura geopotencial (mgp), em 250 hPa, (a) sem e (b) com filtragem de Lanczos, para os períodos (a) 1970-1976, (b) 1977-1996 e (c) 1997-2003, para os dados da reanálise I do NCEP-NCAR.

As Figuras 10 e 11, assim como a Figura 9, mostram a anomalia média da altura geopotencial para 250 e 500 hPa, para os três subperíodos, para os dados do NCEP-NCAR e ERA-40, porém, com foco sobre a América do Sul.

Nos dois níveis atmosféricos é possível verificar o padrão de dipolo entre a região nordeste e sudeste da AS, com valores negativos e positivos, respectivamente nas duas áreas, na fase negativa da ODP (1º e 3º subperíodos). O padrão inverso de sinais é observado na fase positiva da ODP (2º subperíodo). Apesar de ser possível verificar o padrão dipolo nas anomalias de altura geopotencial entre o sudeste e nordeste da América do Sul a partir das duas fontes de dados, verifica-se também que os dados da reanálise do NCEP-NCAR apresentam anomalias negativas e positivas (de acordo com a fase da ODP) mais intensas no sul da América do Sul mais na direção meridional do que as anomalias observadas com os dados do ERA-40, que apresentam valores mais intensos na direção zonal.

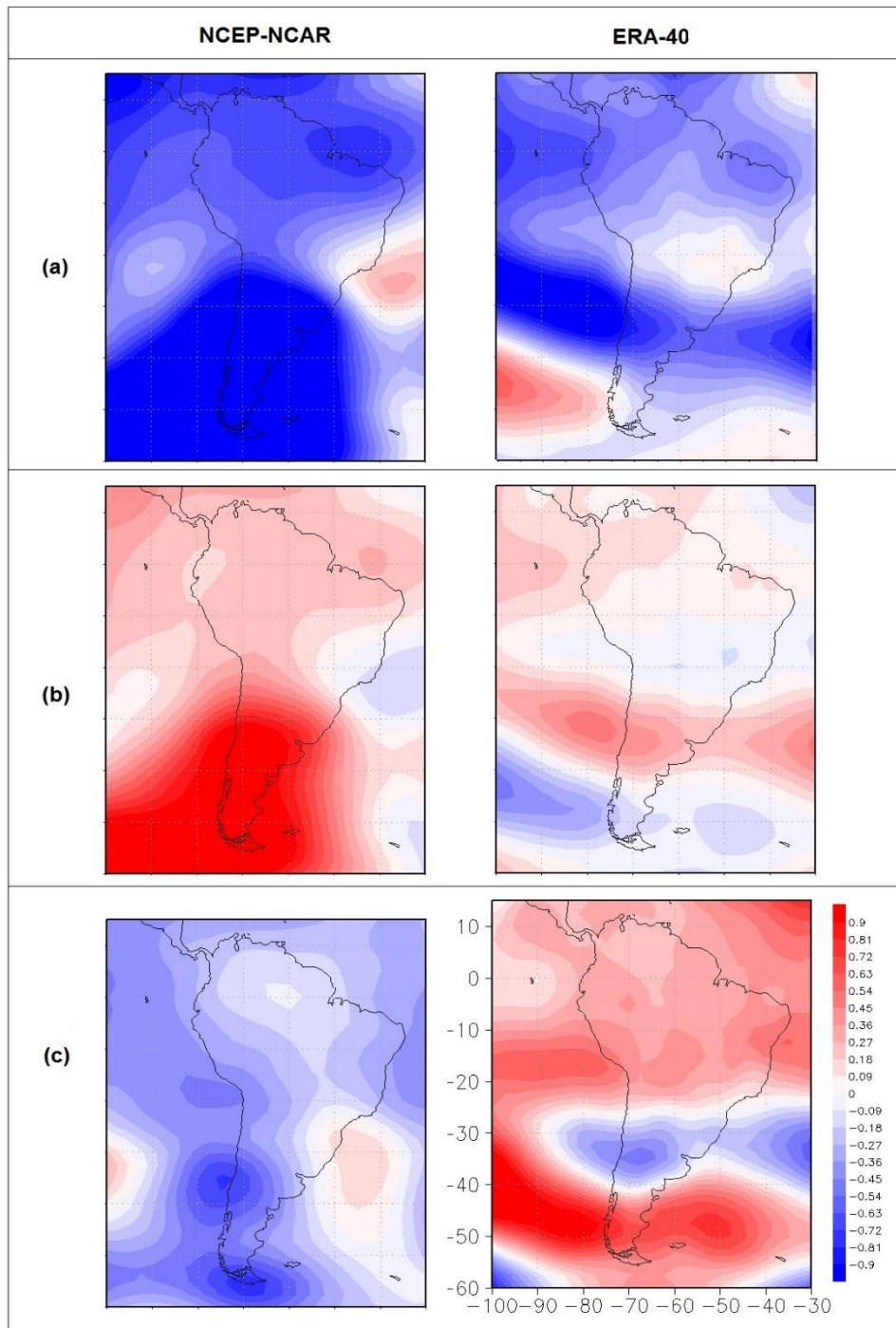


Figura 10. Anomalia média da altura geopotencial (m), em 250 hPa, sobre a AS, com filtragem de Lanczos, para os períodos (a) 1970-1976, (b) 1977-1996 e (c) 1997-2003, para os dados da reanálise I do NCEP-NCAR e ERA-40.

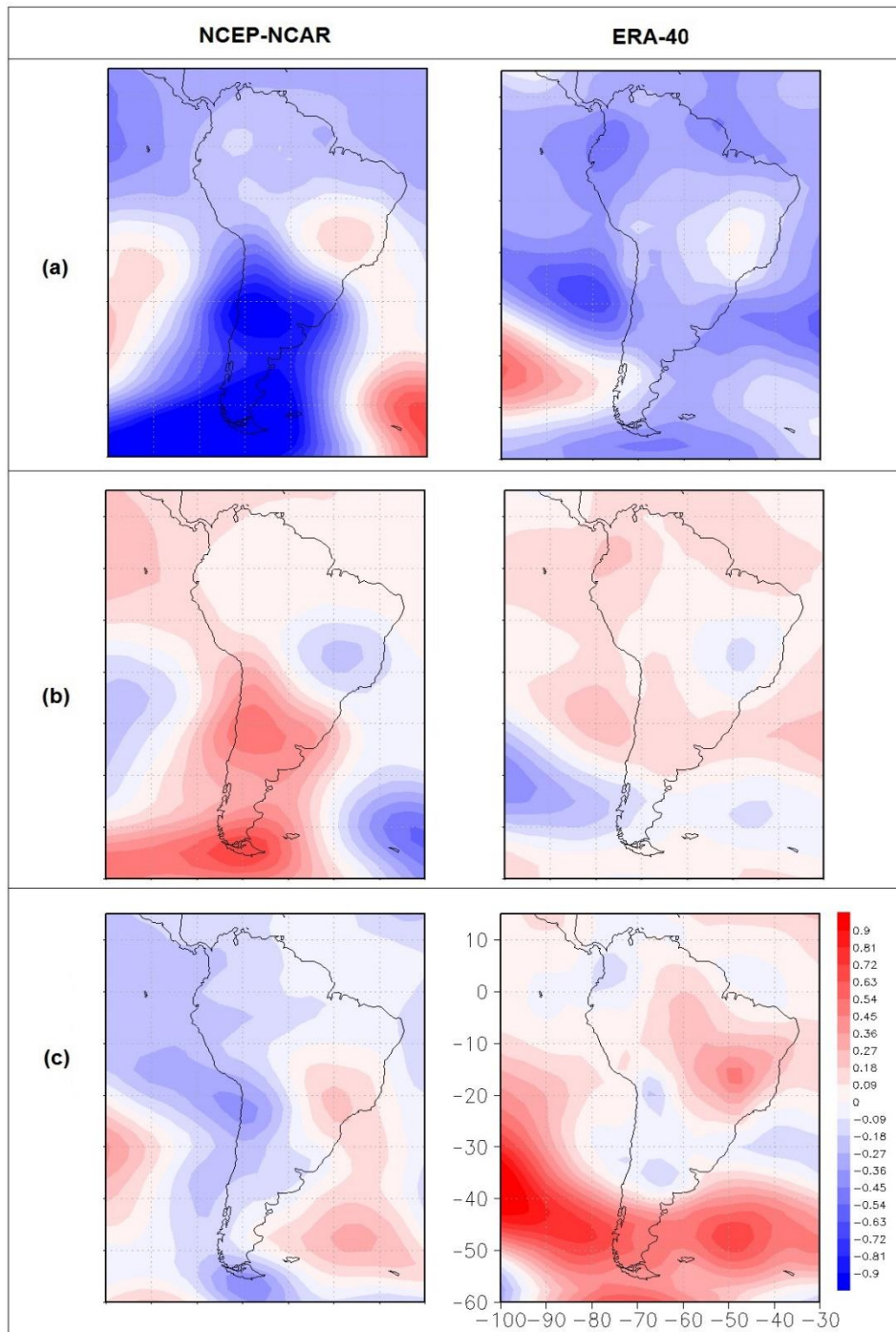


Figura 11. Anomalia média da altura geopotencial (mgs), em 500 hPa, para os períodos (a) 1970-1976, (b) 1977-1996 e (c) 1997-2003, para os dados da reanálise do NCEP-NCAR e ERA-40.

3.1.2. Variabilidade anual da circulação sobre a América do Sul

A análise detalhada do comportamento anual da circulação dos ventos

(zonal e meridional) permite verificar os anos que mais contribuíram para determinar o padrão médio dos subperíodos 1970-1976, 1977-1996 e 1997-2003. Nesta parte, serão analisados apenas os dados da reanálise I do NCEP-NCAR. As Figuras 12, 13 e 14 indicam a anomalia média anual para a componente zonal do vento em 850 hPa, enquanto as Figuras 15, 16 e 17, referem-se à componente meridional em 850 hPa. Tanto para a componente zonal quanto para a meridional, todos os anos de 1970 a 1976 seguem o padrão médio do 1º subperíodo. No 2º subperíodo, observa-se que para as duas componentes do vento analisadas, os anos de 1977 a 1984, exceto o ano de 1978, são os que mais se afastam do padrão espacial médio. Para o 3º subperíodo, os anos de 1997, 2002 e 2003 são os que mais se afastam da média. É preciso identificar os anos que fogem do padrão pois assim é possível fazer estudos futuros para estes anos.

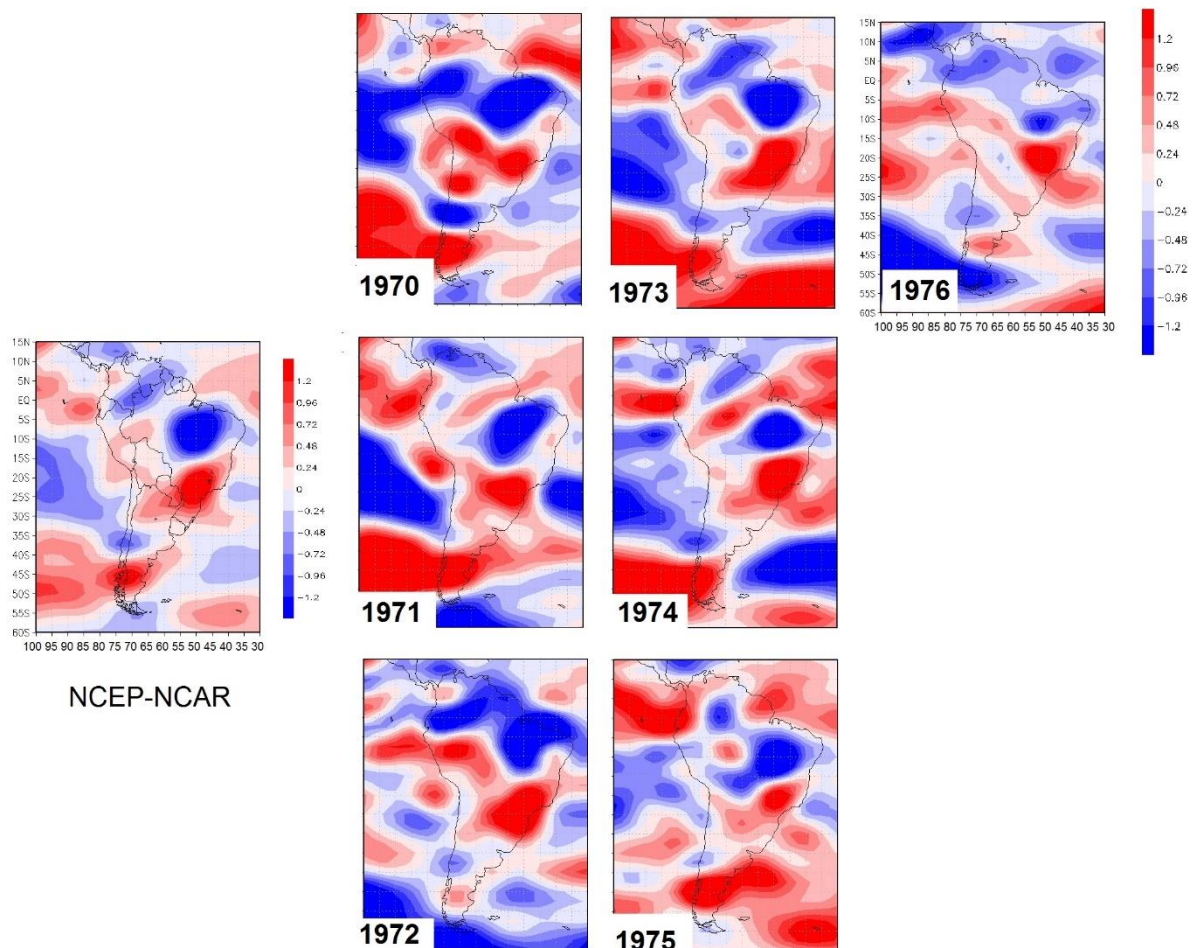


Figura 12. Anomalia anual da componente zonal do vento (m s^{-1}), em 850 hPa, para os anos do 1º subperíodo (1970-1976), para os dados da reanálise I do NCEP-NCAR.

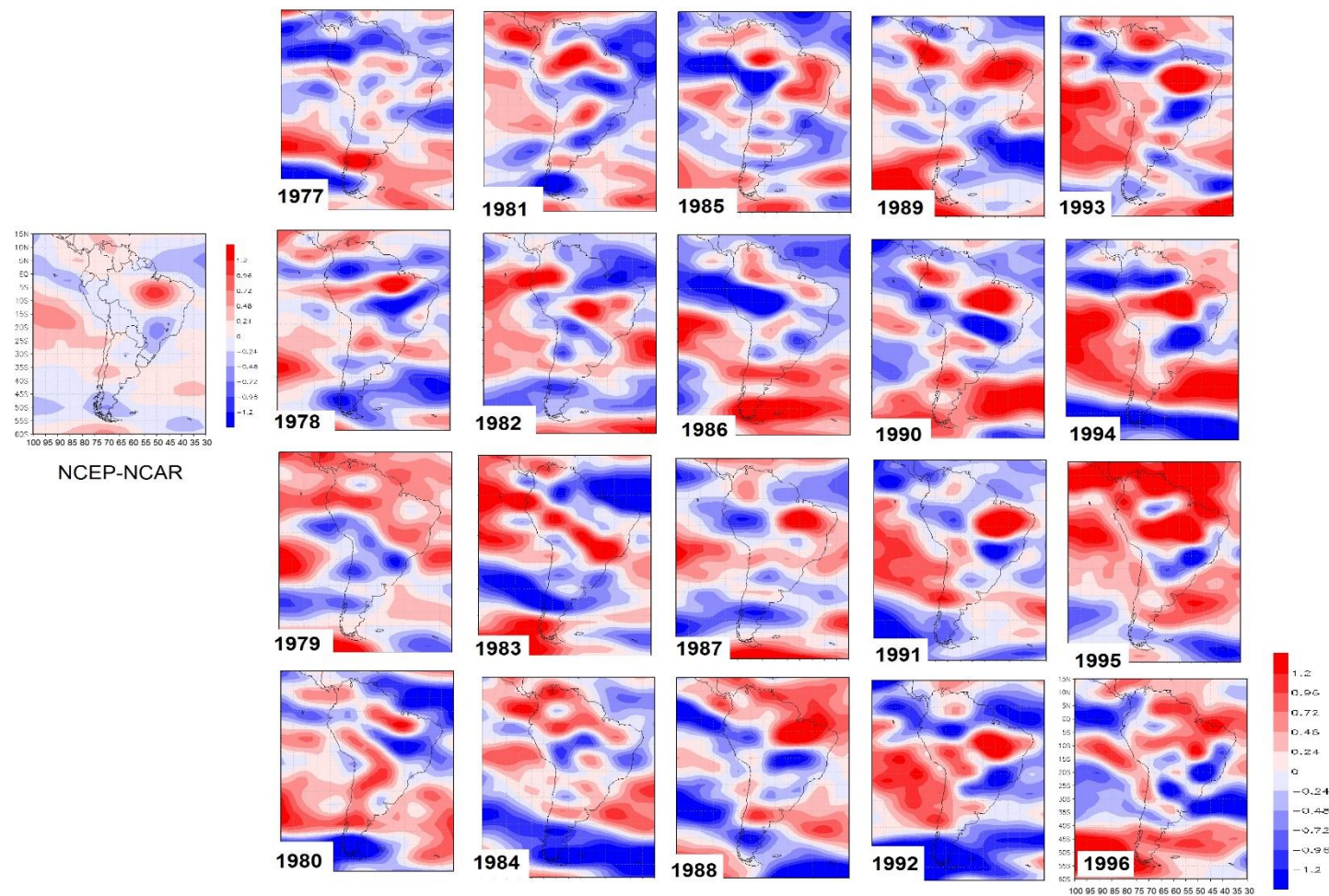


Figura 13. Anomalia anual da componente zonal do vento ($m s^{-1}$), em 850 hPa, para os anos do 2º período (1977-1996), para os dados da reanálise I do NCEP-NCAR.

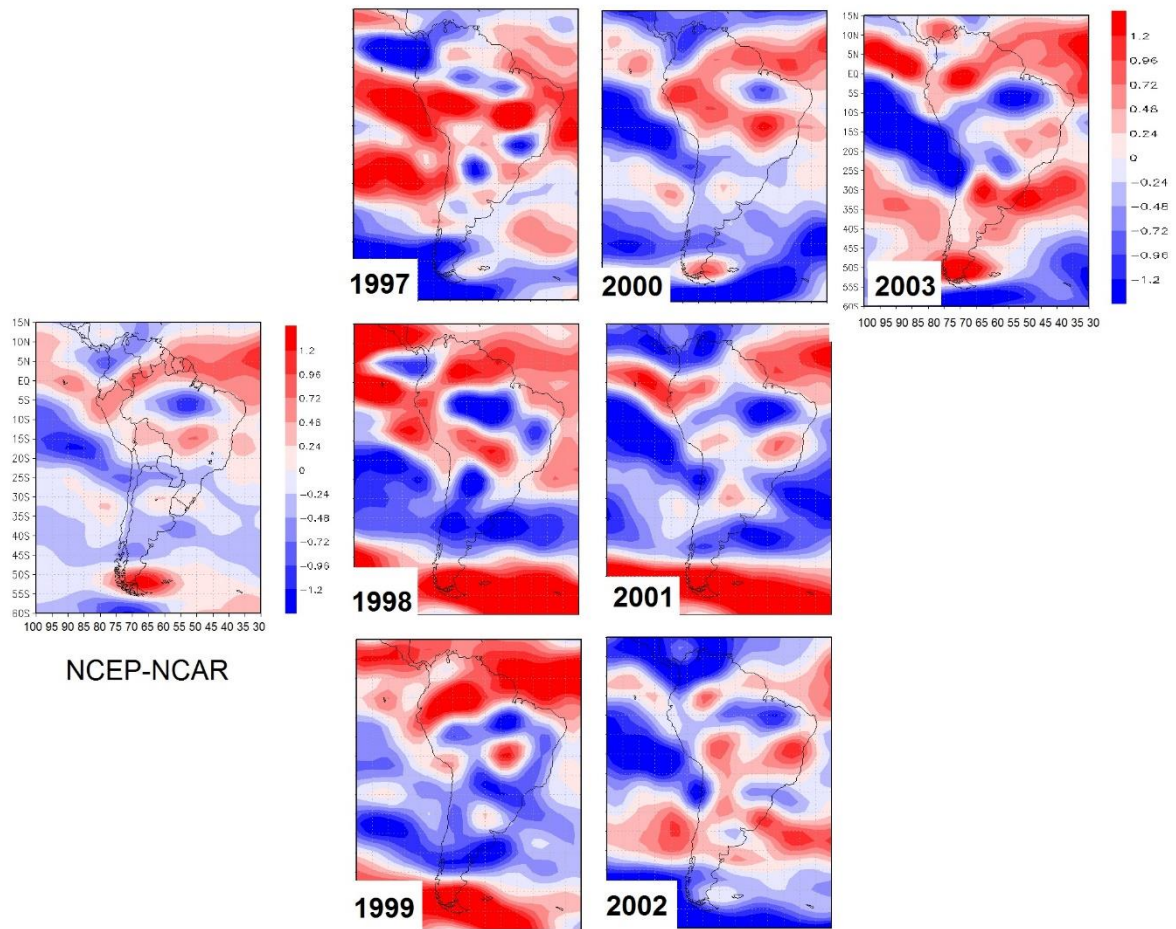


Figura 14. Anomalia anual da componente zonal do vento (m s^{-1}), em 850 hPa, para os anos do 3º período (1997-2003), para os dados da reanálise I do NCEP-NCAR.

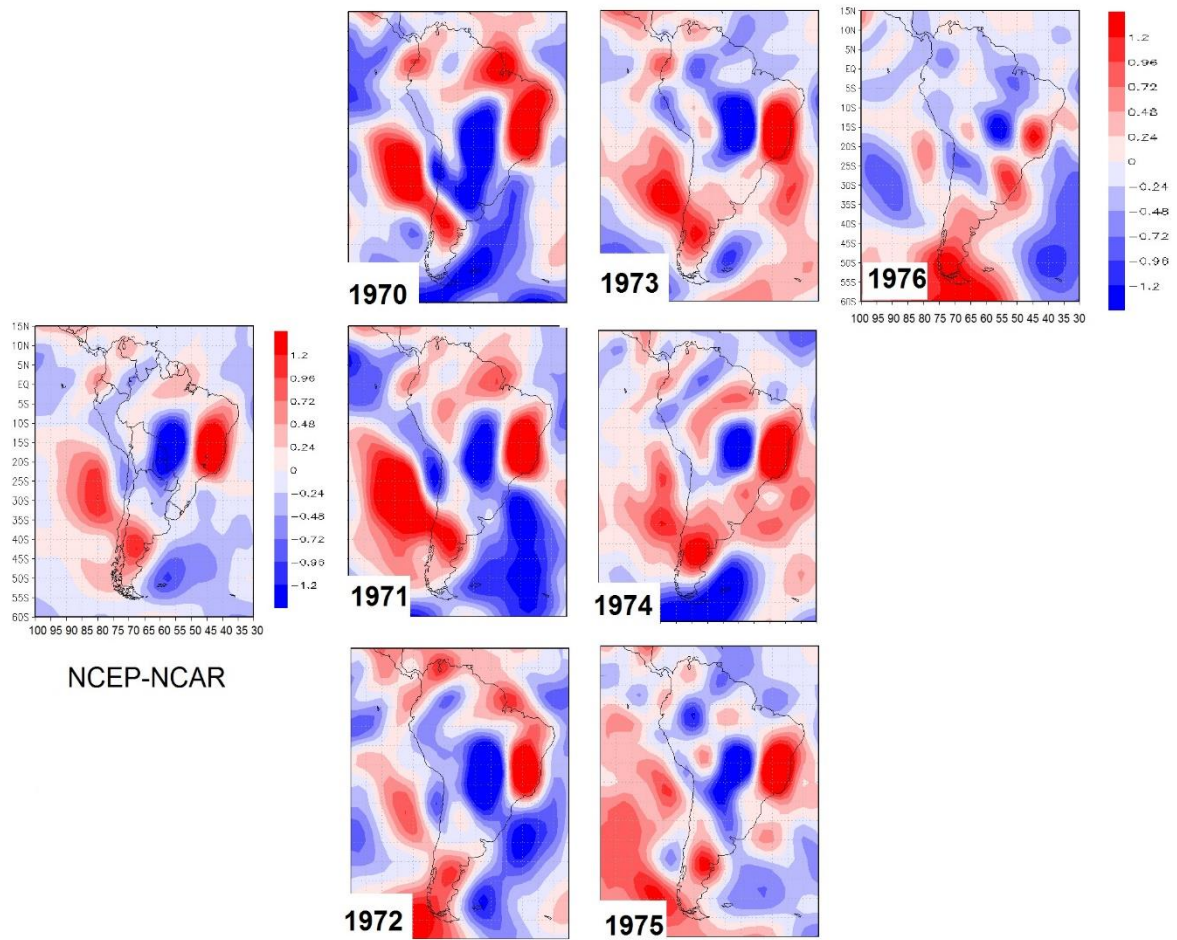


Figura 15. Anomalia anual da componente meridional do vento (m s^{-1}), em 850 hPa, para os anos do 1º subperíodo (1970-1976), para os dados da reanálise I do NCEP-NCAR.

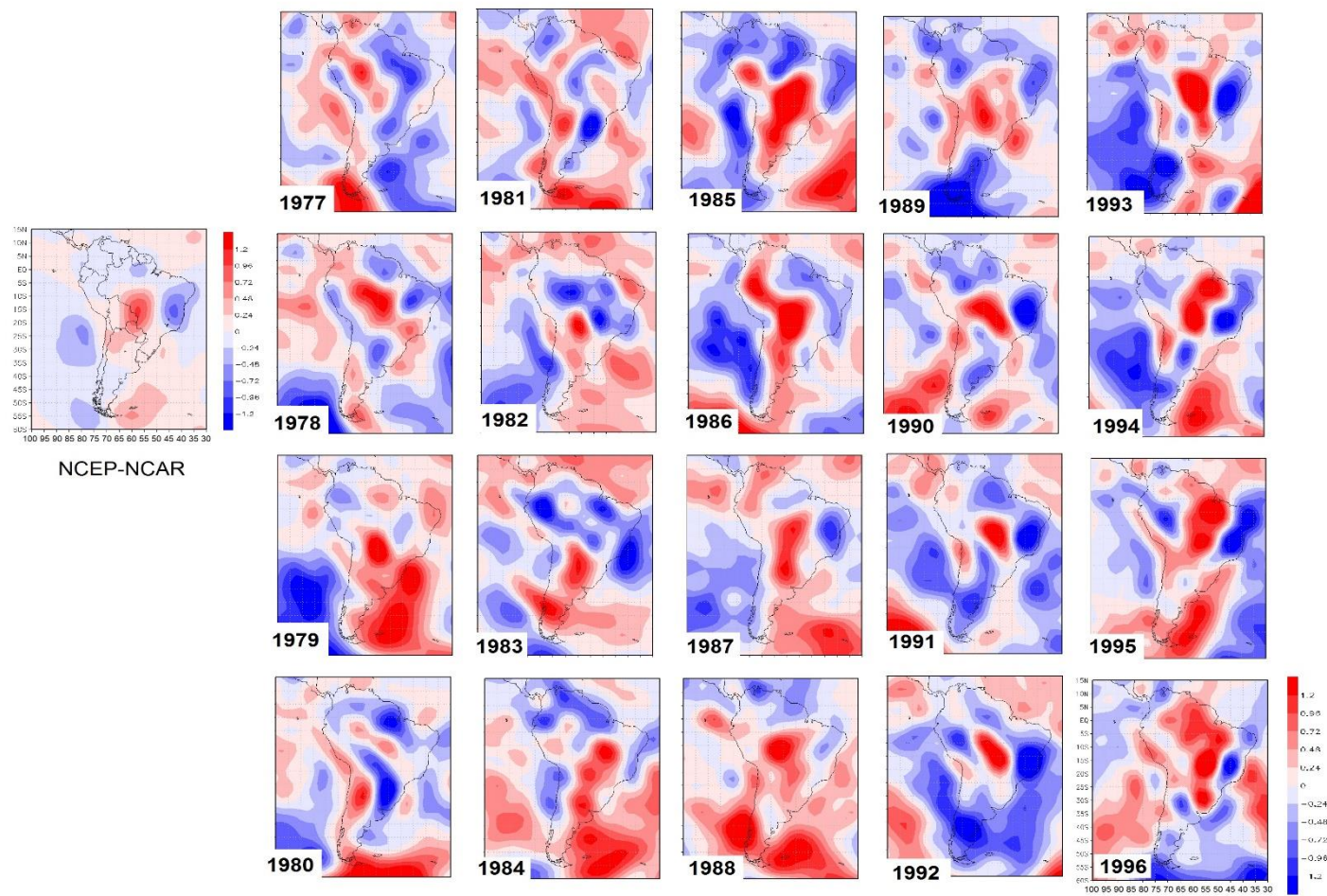


Figura 16. Anomalia anual da componente meridional do vento (m s^{-1}), em 850 hPa, para os anos do 2º período (1977-1996), para os dados da reanálise I do NCEP-NCAR.

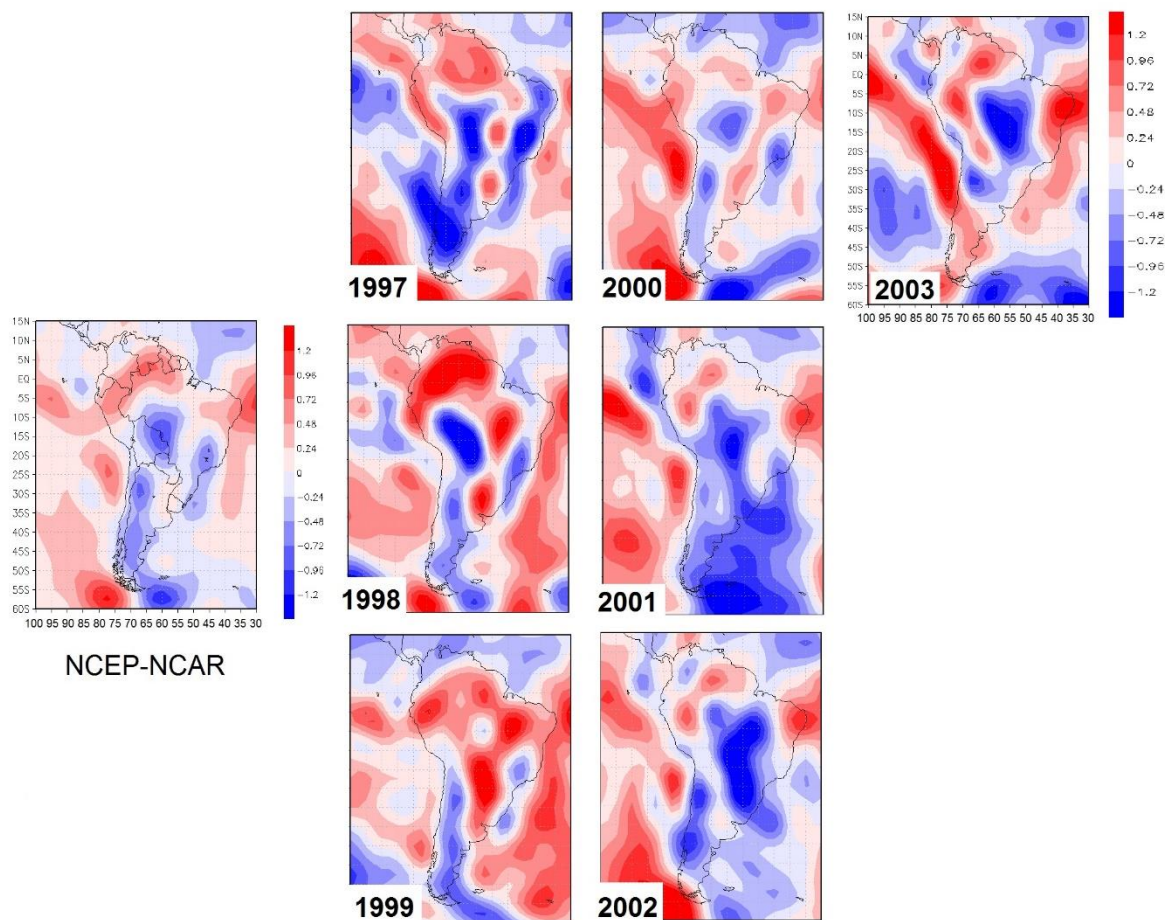


Figura 17. Anomalia anual da componente meridional do vento (m s^{-1}), em 850 hPa, para os anos do 3º período (1997-2003), para os dados da reanálise I do NCEP-NCAR.

3.1.3. Variabilidade sazonal da circulação sobre a América do Sul

Grande parte da América do Sul apresenta sua estação seca entre os meses de abril a setembro e a estação chuvosa entre os meses de outubro a março. Com o objetivo de se determinar se alguma das estações do ano sofre maior influência da ODP, procedeu-se à análise dos campos anômalos para períodos secos e úmidos. De forma a simplificar a análise, adotou-se os meses de abril a setembro (AMJJAS) como estação seca e os meses de outubro a março (ONDJFM) como estação chuvosa. Dado que anomalias positivas (negativa) de altura geopotencial estão associadas à maior frequência ou

intensidade de anomalias anticiclônicas (ciclônicas), estando estas condições mais associadas a movimentos anômalos subsidentes (ascendentes) do ar e a períodos mais secos (chuvosos), a análise da anomalia de altura geopotencial pode indicar a preponderância de condições climáticas secas (chuvosas) em determinadas condições atmosféricas. Esta associação requer a consideração de condições barotrópicas na troposfera, o que é comumente encontrado em regiões tropicais. Os resultados da anomalia média sazonal das componentes zonal e meridional do vento, para cada subperíodo considerado, estão ilustrados nas Figuras 18 e 19.

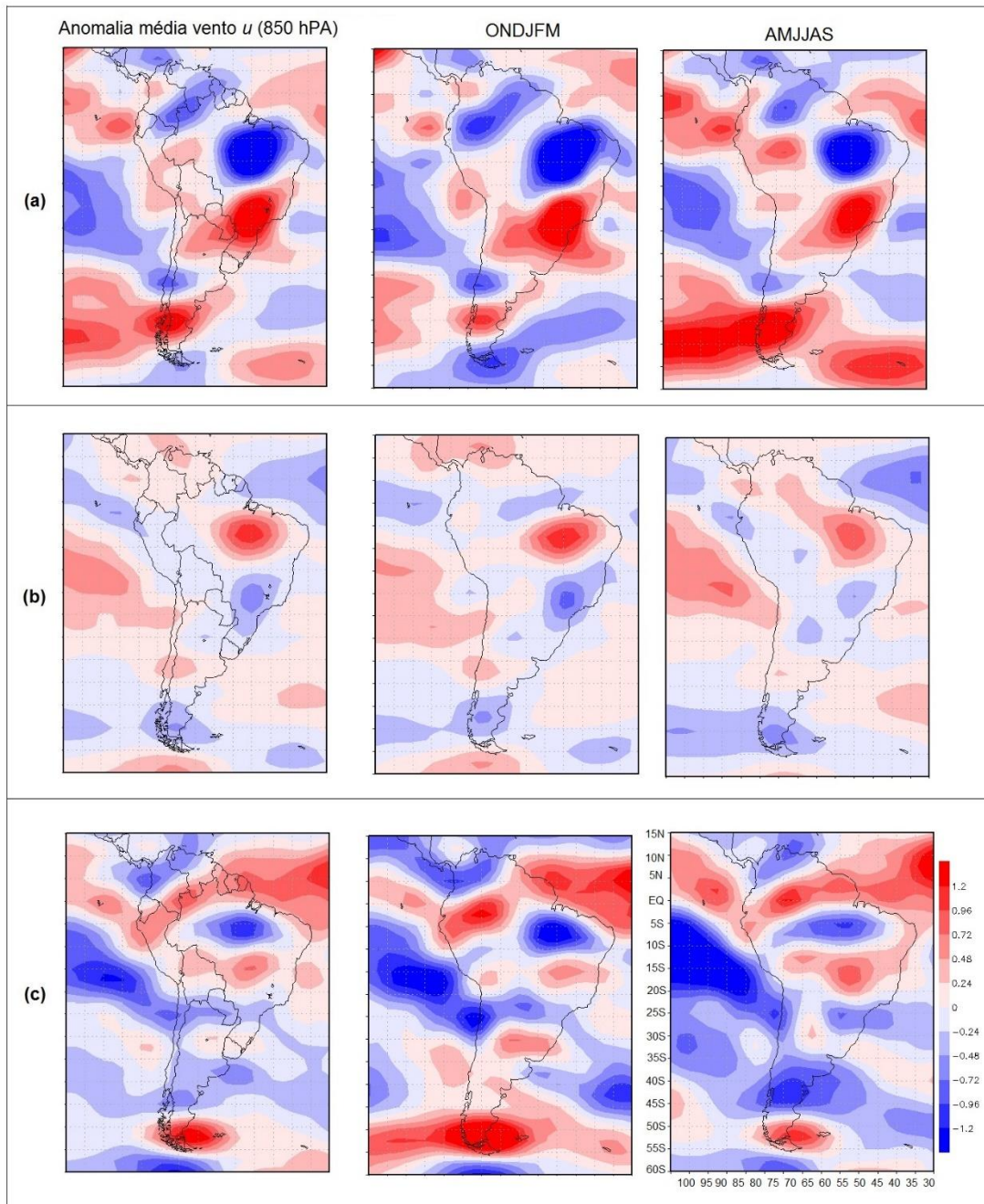


Figura 18. Anomalia média anual da componente zonal do vento (m s^{-1}) (1ª coluna), em 850 hPa, para as estações chuvosa (2ª coluna) e seca (3ª coluna), para os subperíodos (a) 1970-1976, (b) 1977-1996 e (c) 1997-2003, para a reanálise I do NCEP-NCAR.

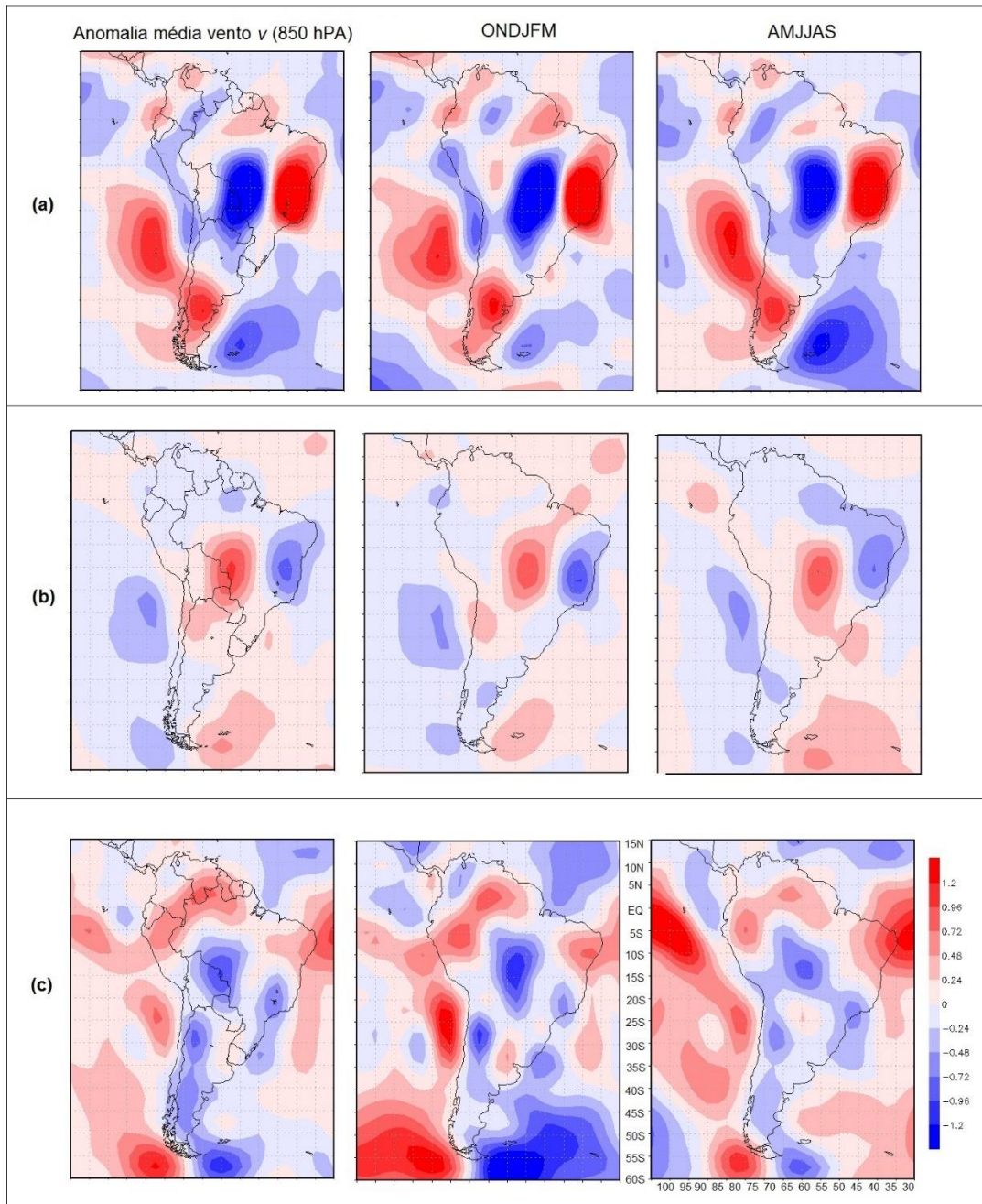


Figura 19. Anomalia média anual da componente meridional do vento (m s^{-1}) (1^a coluna), em 850 hPa, para a estação chuvosa (2^a coluna) e seca (3^a coluna), para os subperíodos (a) 1970-1976, (b) 1977-1996 e (c) 1997-2003, para a reanálise I do NCEP-NCAR.

Embora o valor médio da anomalia sazonal das componentes zonal e meridional do vento seja constituída por contribuições com o mesmo sinal referente às duas estações do ano (seca e chuvosa), a análise sazonal permite verificar que os períodos chuvosos (ONDJFM) contribuem mais para a média

anual do que os períodos secos (AMJJAS), nos três subperíodos analisados. Mapas da diferença entre a anomalia do período chuvoso e seco em relação à anomalia média de cada subperíodo (Figuras 20 e 21) mostram que, de fato, são sempre os meses chuvosos (ONDJFM) os mais importantes para determinar o padrão da anomalia média anual dos subperíodos. A análise da variação mensal das anomalias das componentes zonal e meridional do vento, para os períodos chuvosos e secos, para as áreas do nordeste e sudeste do Brasil, onde são identificados os valores máximos de anomalia do vento, permite identificar quais os meses mais associados ao padrão médio anual em cada um dos subperíodos considerados, o que será visto adiante. Assim, nas três fases consideradas da ODP, verificou-se a intensificação do escoamento de norte, em 850 hPa, no centro da América do Sul, durante a estação chuvosa e seu enfraquecimento durante a estação seca. Este aspecto certamente interfere na intensidade do jato de baixos níveis nas estações secas e chuvosas do ano.

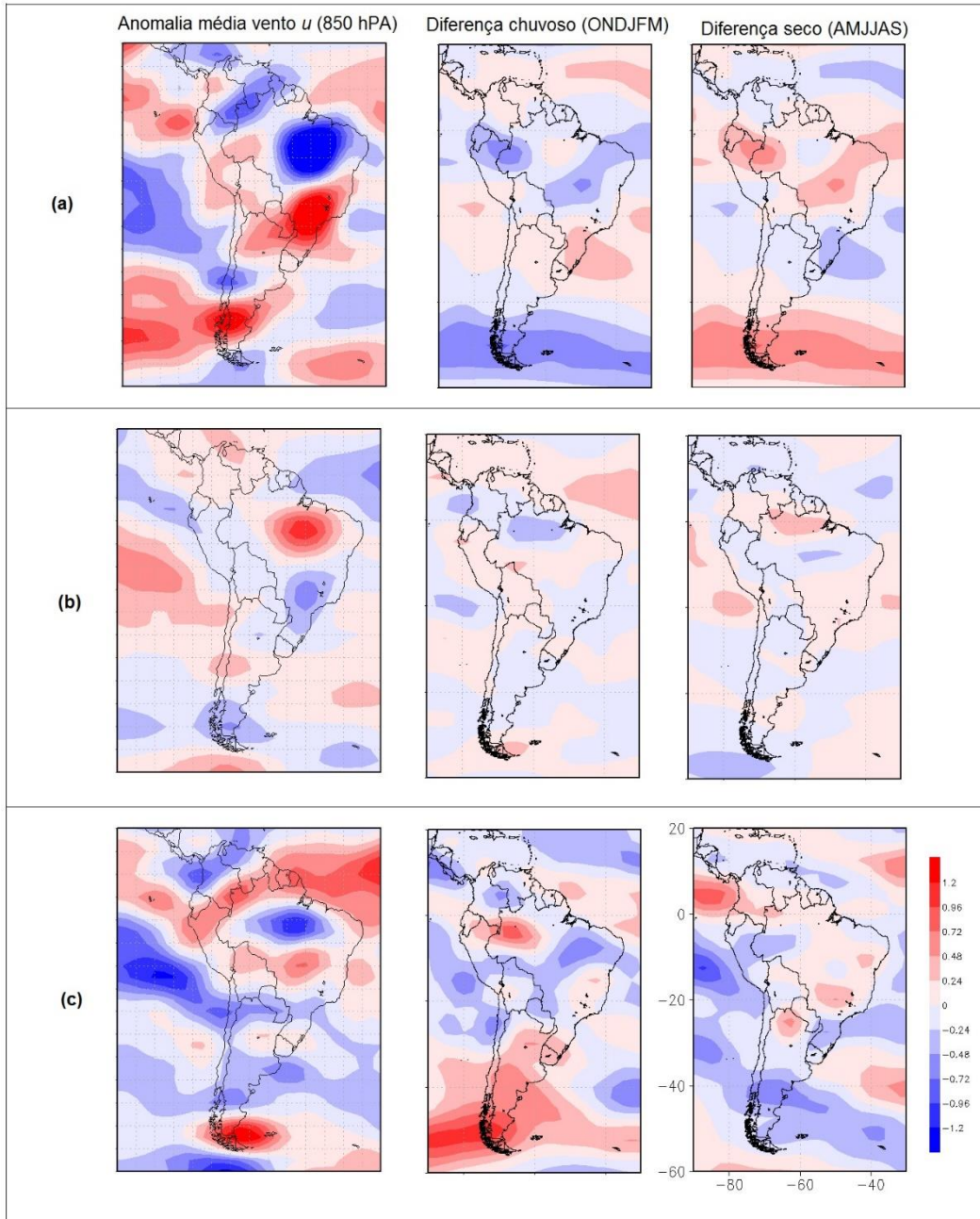


Figura 20. Anomalia média anual da componente zonal do vento (m s^{-1}) (1ª coluna), em 850 hPa, e a diferença entre a estação chuvosa (2ª coluna) e seca (3ª coluna) em relação anomalia média anual, para os subperíodos (a) 1970-1976, (b) 1977-1996 e (c) 1997-2003, para os dados do NCEP-NCAR.

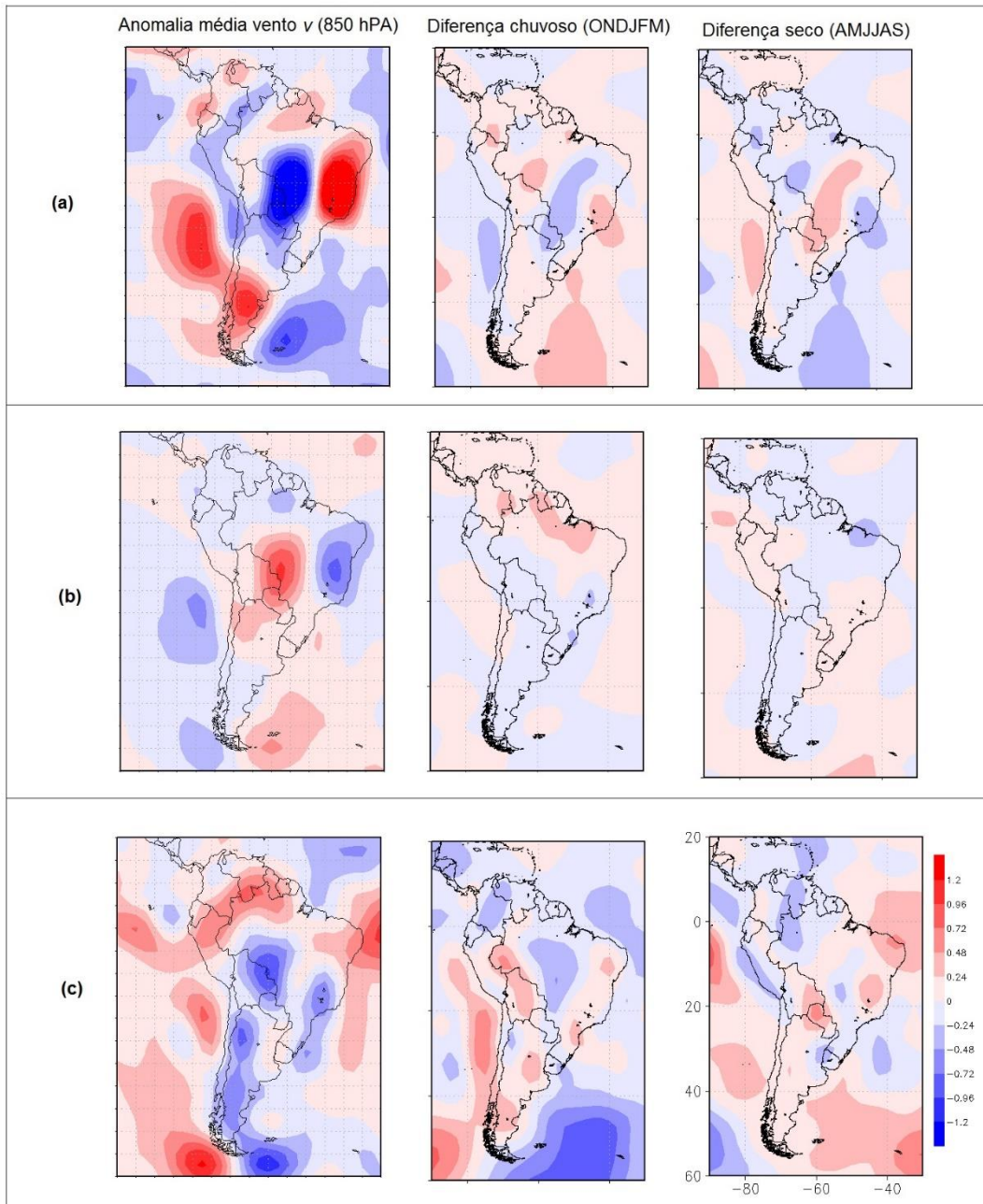


Figura 21. Anomalia média anual da componente meridional do vento (m s^{-1}) (1^a coluna), em 850 hPa, e a diferença entre a estação chuvosa (2^a coluna) e a seca (3^a coluna) em relação a anomalia média, para os subperíodos (a) 1970-1976, (b) 1977-1996 e (c) 1997-2003, para os dados do NCEP-NCAR.

3.1.4 Padrões de precipitação na América do Sul nas fases da ODP

A anomalia média da precipitação em cada subperíodo considerado indica padrões espaciais importantes nas fases positiva e negativa da ODP,

mais significativos no setor leste da América do Sul (Figura 22). Este padrão é caracterizado por anomalias de precipitação com sinais contrários entre o centro-leste e o sudeste da AS, nas fases positiva e negativa da ODP. A fase negativa (1^o e 3^o subperíodos) é caracterizada por anomalias negativas de precipitação no setor centro-leste e anomalias positivas no sudeste da AS, enquanto que a fase positiva (2^o subperíodo) é caracterizada pelo padrão inverso. A variação da anomalia da precipitação entre os períodos secos e chuvosos, tal como mostrado na Figura 23, indica que os períodos chuvosos contribuem mais que os períodos secos para determinar o valor médio anual. Da mesma forma que para o vento, a análise da série temporal da anomalia da precipitação média anual e as relativas aos períodos secos e chuvosos devem contribuir para a definição mais precisa dos períodos em que a ODP influencia o clima do setor leste da AS.

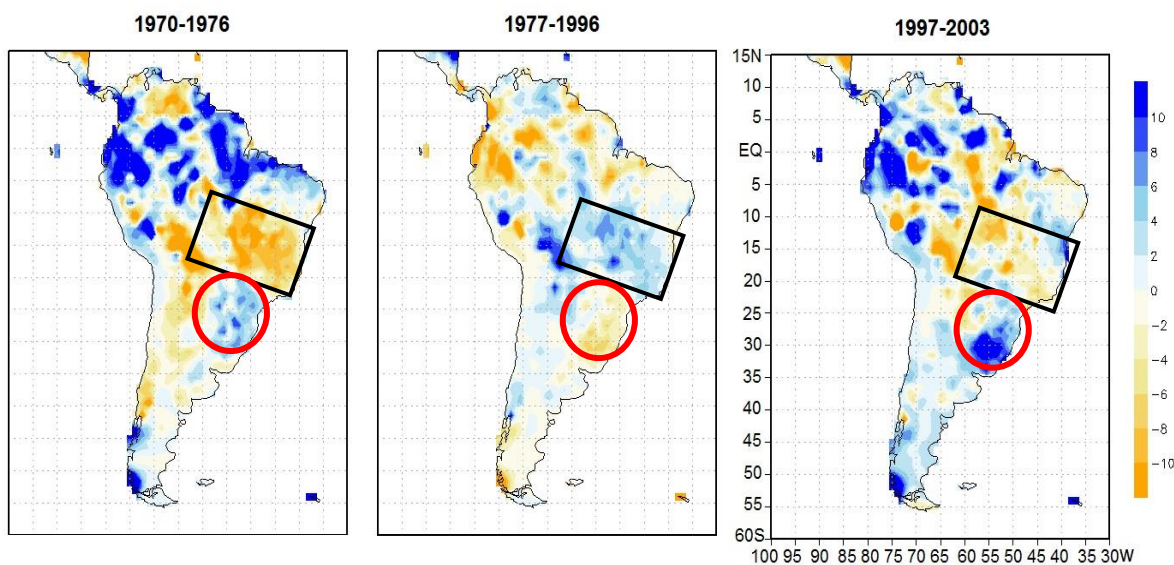


Figura 22. Anomalia anual da precipitação (mm dia^{-1}), para os períodos 1970-1976, 1977-1996 e 1997-2003, a partir de dados do GPCC. As áreas delimitadas com um retângulo preto (B1) e com um círculo vermelho (B2) compõem aproximadamente o dipolo do padrão da anomalia de precipitação proposto para a escala decadal.

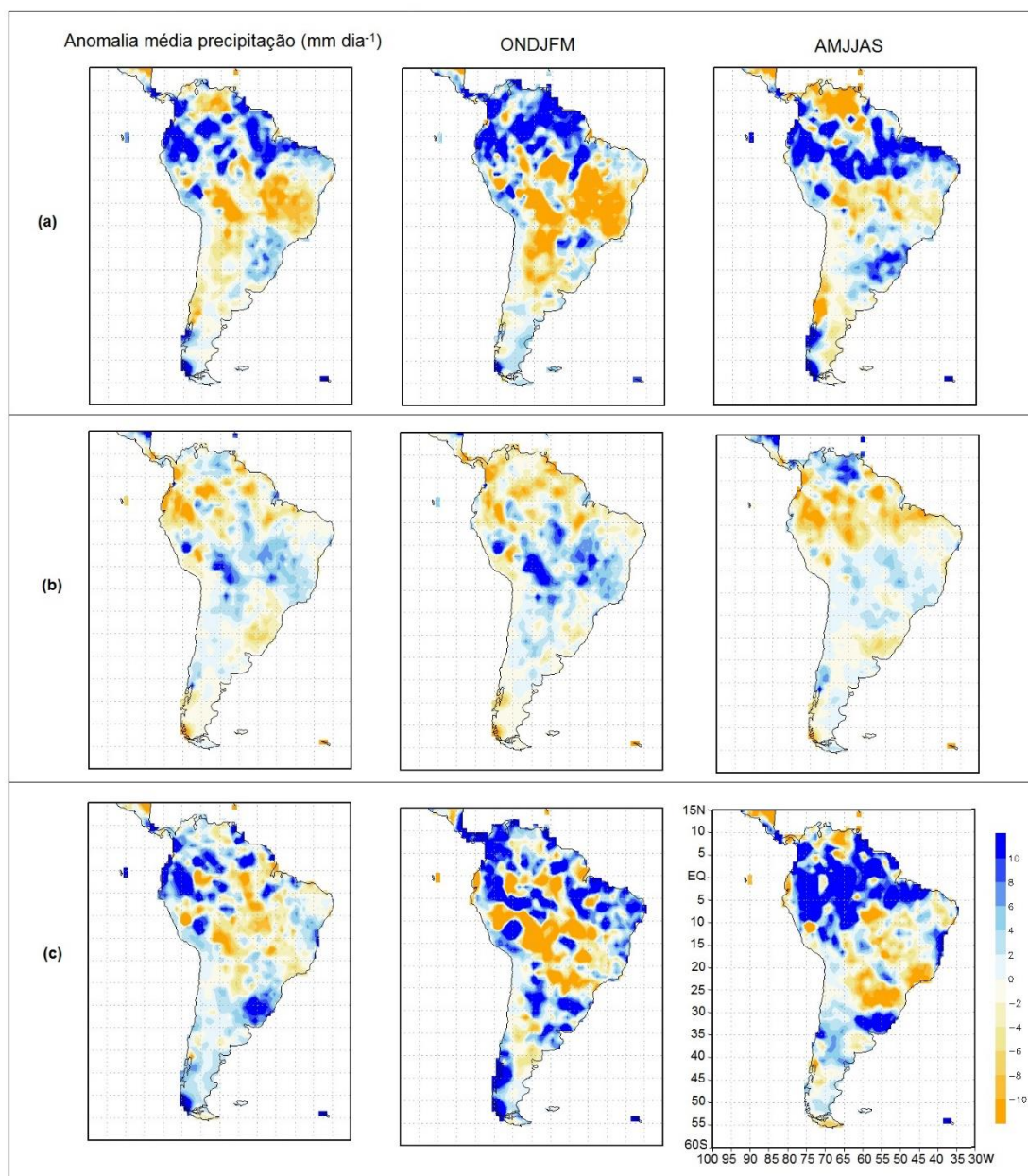


Figura 23. Anomalia média da precipitação (mm dia^{-1}) (1^a coluna), para a estação chuvosa (2^a coluna) e seca (3^a coluna), para os subperíodos (a) 1970-1976, (b) 1977-1996 e (c) 1997-2003, a partir de dados do GPCC.

Para a área centro-leste da AS (B1), a anomalia mais intensa de precipitação ocorre nos meses chuvosos em relação aos meses secos. Para a área sudeste da AS (B2), as anomalias mais intensas parecem ocorrer nos meses secos. Interpretações mais conclusivas sobre os períodos do ano mais influenciados pela ODP podem ser obtidas com a análise de um conjunto de dados de precipitação adicional além da variabilidade mensal da

precipitação.

3.2. *Padrão climático da América do Sul associado à ODP*

Variações oceânicas no Oceano Pacífico têm grande potencial de induzir o clima global (Walker e Bliss, 1932; Bjerknes, 1969; Hoskins e Karoly, 1981; Horel e Wallace, 1981; Karoly, 1989; Mo e Nógues-Paegle, 2001). Mo e Ghil (1987) mostram perturbações climáticas na América do Sul associadas à propagação de ondas de Rossby no Pacífico Sul. Minobe (1997), Mantua (1999) e Mantua e Hare (2002) associaram os períodos 1970-1977 e 1997-2003 à fase negativa da ODP, e 1978-1996 à fase positiva.

Analisando o padrão climático da América do Sul associado à ODP, foi possível identificar, através das análises feitas, determinados padrões condizentes com os padrões verificados em outros estudos. Os resultados mostrados na Figura 24, a seguir, ilustram o mesmo padrão de circulação indicado por SILVA et al. (2016), em que se verifica anomalia anticiclônica durante as fases negativas da ODP (1^o e 3^o subperíodos) e anomalia ciclônica (2^o subperíodo) durante a fase positiva da ODP. Este padrão é também encontrado por Mo e Nogués-Peagle (2001), Mechoso (2000), Zamboni et al. (2010) e Silva et al. (2016) em que os resultados mostram anomalias anticiclônicas e ciclônicas na região centro-leste da América do Sul, durante as fases negativa e positiva da ODP em níveis troposféricos baixos e altos, embora tenham considerado períodos ligeiramente distintos dos aqui considerados.

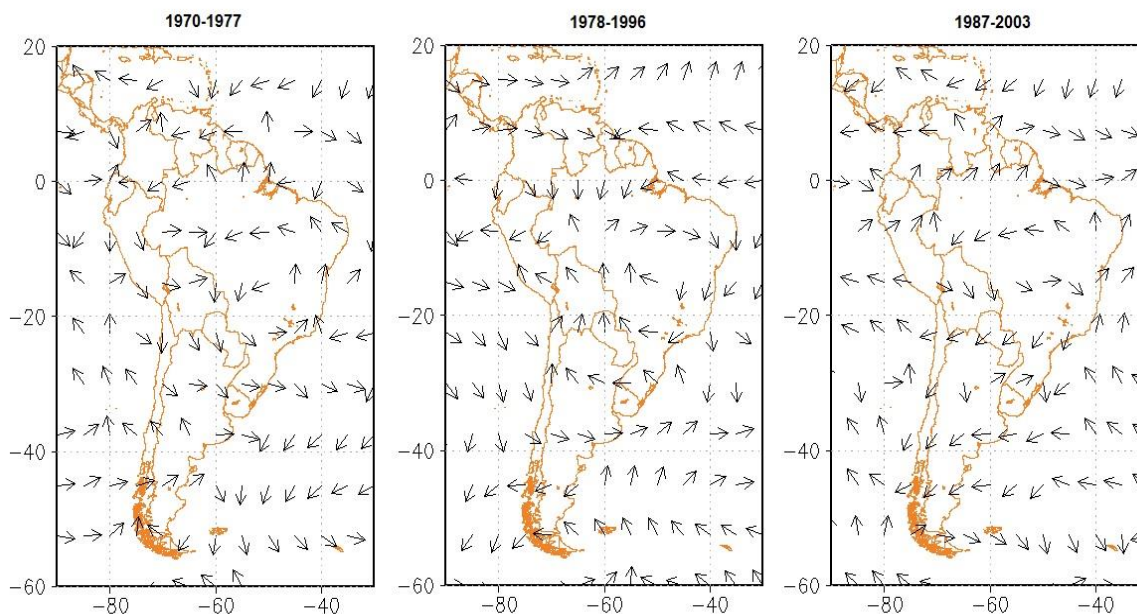


Figura 24. Anomalia do vento (m s^{-1}) em 850 hPa para os três subperíodos considerados, 1970-1976, 1977-1996, 1997-2003, para dados da reanálise I do NCEP/NCAR.

Como analisado no item 3.1.3, a diferença entre os períodos secos (chuvosos) e a anomalia média anual de cada subperíodo para as componentes zonal e meridional do vento em baixos níveis indica que, para todos os subperíodos, são os meses de verão os que mais contribuem para determinar o padrão médio.

Todo o setor leste da América do Sul sofre a influência dos alíseos de sudeste e de nordeste, de acordo com o padrão climático predominante (Cavalcanti et al., 2009). A intensificação e o enfraquecimento dos ventos de leste sobre o nordeste da América do Sul durante as fases negativa e positiva da ODP, respectivamente, contribuem para a modulação do padrão de chuvas na América do Sul na escala decenal. A variação decadal de intensidade dos ventos de norte da região Amazônica, que carrega ar úmido para o centro e sul da América do Sul, também contribui para a definição do padrão de chuvas nesta escala temporal (Marengo, 1991).

3.2.1. *Variação mensal do vento, altura geopotencial e precipitação*

A evolução mensal da anomalia mensal de vento, altura geopotencial e

precipitação para áreas em que são identificadas as anomalias mais significativas permite definir com maior precisão os períodos em que a América do Sul apresenta a influência da ODP no período de 1970 a 2003. As áreas relativas aos valores mais intensos da anomalia das componentes zonal e meridional do vento e da altura geopotencial estão indicadas na Figura 25.

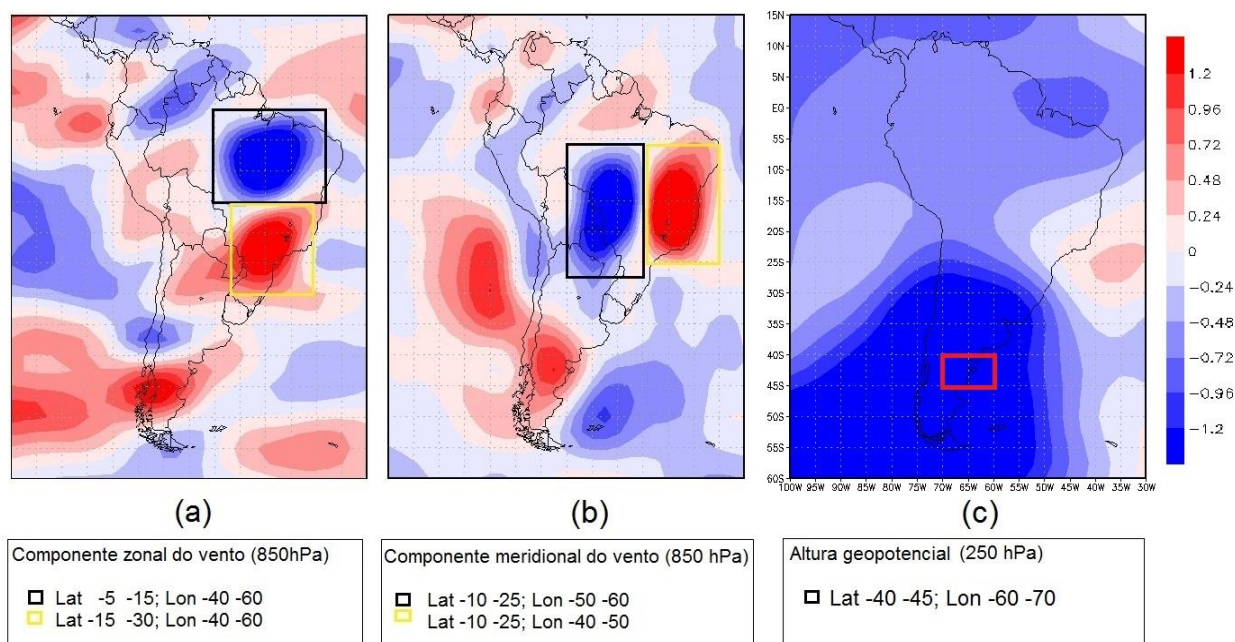


Figura 25. Áreas definidas pelos maiores valores de anomalia da componente (a) zonal e (b) meridional do vento e de (c) altura geopotencial. A área identificada pelos retângulos preto e amarelo nos quadros (a) e (b) são denominadas “Área 1” e “Área 2”, respectivamente.

A evolução mensal da anomalia da componente zonal do vento em 850 hPa na Área 1, tal como identificado na Figura 26, mostra que entre 1975 e 1980 o sinal passa gradativamente de negativo para positivo, significando um enfraquecimento dos ventos de leste no norte da AS. Ao mesmo tempo, na Área 2, Figura 26b, o sinal da componente zonal passa de positivo para negativo, significando a intensificação do escoamento de leste no sudeste do Brasil. Durante o período positivo da ODP, 1977-1996, a maior parte da anomalia da componente zonal do vento tem sinal positivo na Área 1, indicando o enfraquecimento do escoamento de leste nesta área.

É possível verificar nos anos de 1983 e 1997, anos de eventos fortes de EN (NOAA/ National Weather Service) valores positivos da anomalia da

componente zonal do vento na Área 2, enquanto a média de seu valor durante a fase positiva da ODP é negativa. Ou seja, durante a fase positiva da ODP, os ventos de leste na Área 2 estão, em média, intensificados. Como os dois eventos fortes de EN, de 1983 e 1997, indicam anomalias no sentido contrário médio da fase positiva da ODP, no sentido de enfraquecer os ventos de leste na Área 2, sugere-se o estudo mais aprofundado destes períodos, de forma a identificar com mais propriedade a circulação atmosférica característica de cada período climático. Foi calculada, para cada fase da ODP, a taxa de ocorrência de fenômenos EN e LN durante os três subperíodos de ODP, entre 1970 e 2003 (Tabela 1). Os resultados indicaram cinco eventos de LN e dois eventos de EN durante 1970-1976 na fase negativa da ODP. Para o 2º subperíodo, fase positiva da ODP, 1977-1996, identificou-se seis eventos de EN e quatro de LN. No período de 1997-2003, fase negativa da ODP), foram observados dois eventos de EN e três de LN. A ocorrência de eventos frios e quentes de ENOS associam-se às fases da ODP. A fase positiva da ODP foi determinada por mais eventos quentes de ENOS. Analogamente, as fases negativas da ODP estão mais associadas a eventos frios de ENOS. Sugere-se estudar as diferenças de circulação atmosférica entre os padrões positivos e negativos da ODP e ENOS.

Tabela 1. Taxa de ocorrência (%) de fenômenos EN e LN durante os três subperíodos de ODP, entre 1970 e 2003.

TAXA de eventos ENOS (%)	1970-1976	1977-1996	1997-2003
<i>El Niño</i>	0,2	0,3	0,3
<i>La Niña</i>	0,6	0,1	0,4

O sinal dos valores anuais da componente zonal do vento em 850 hPa, Figura 27, também indica o comportamento bipolar da anomalia do vento nas fases distintas da ODP.

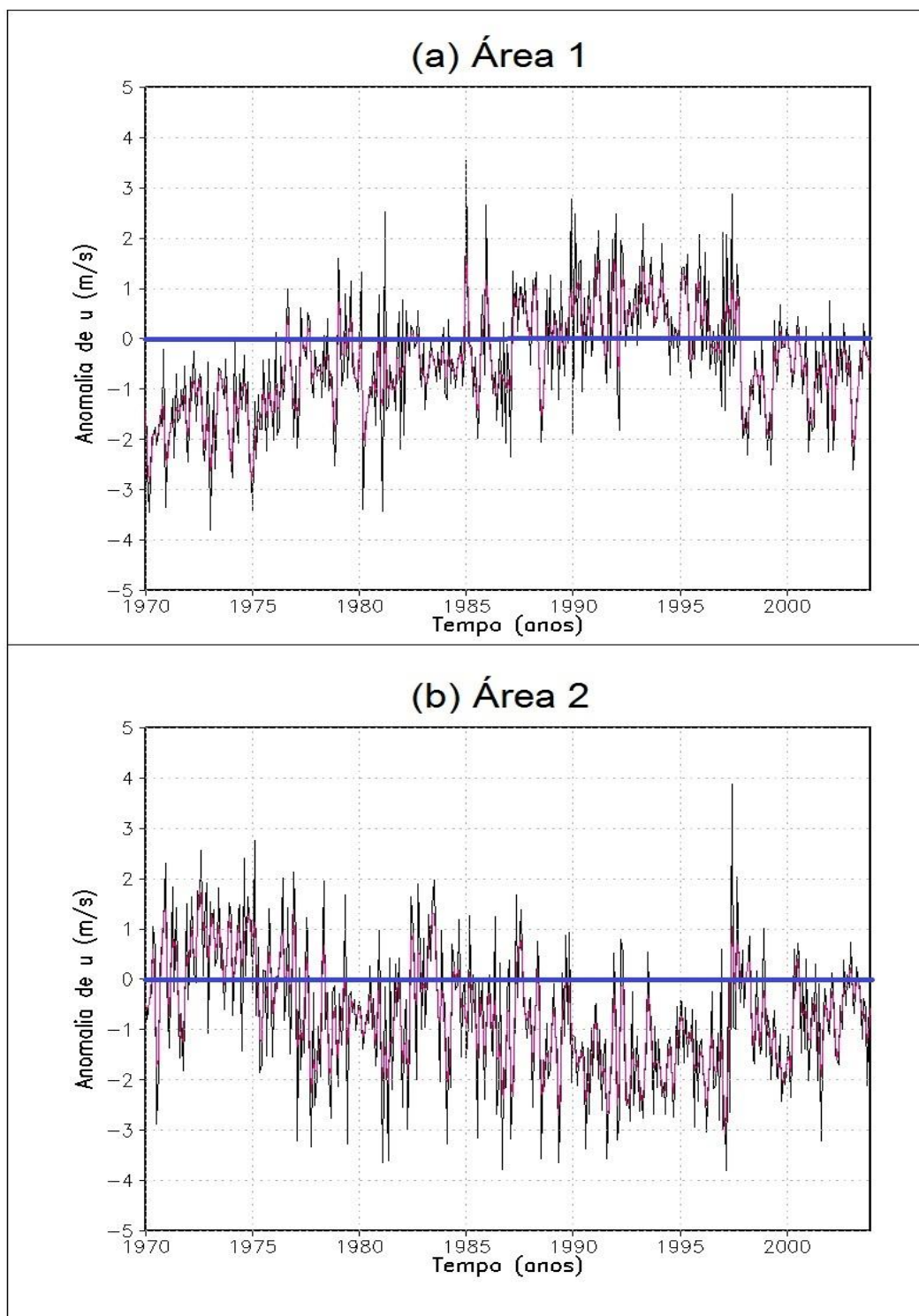


Figura 26. Anomalia mensal da componente zonal do vento em 850 hPa em relação à série temporal 1970-2003, para a (a) Área 1 e (b) Área 2, para dados da reanálise I do NCEP/NCAR. A curva rosa indica a suavização dos dados originais por média móvel com janela de 9 meses.

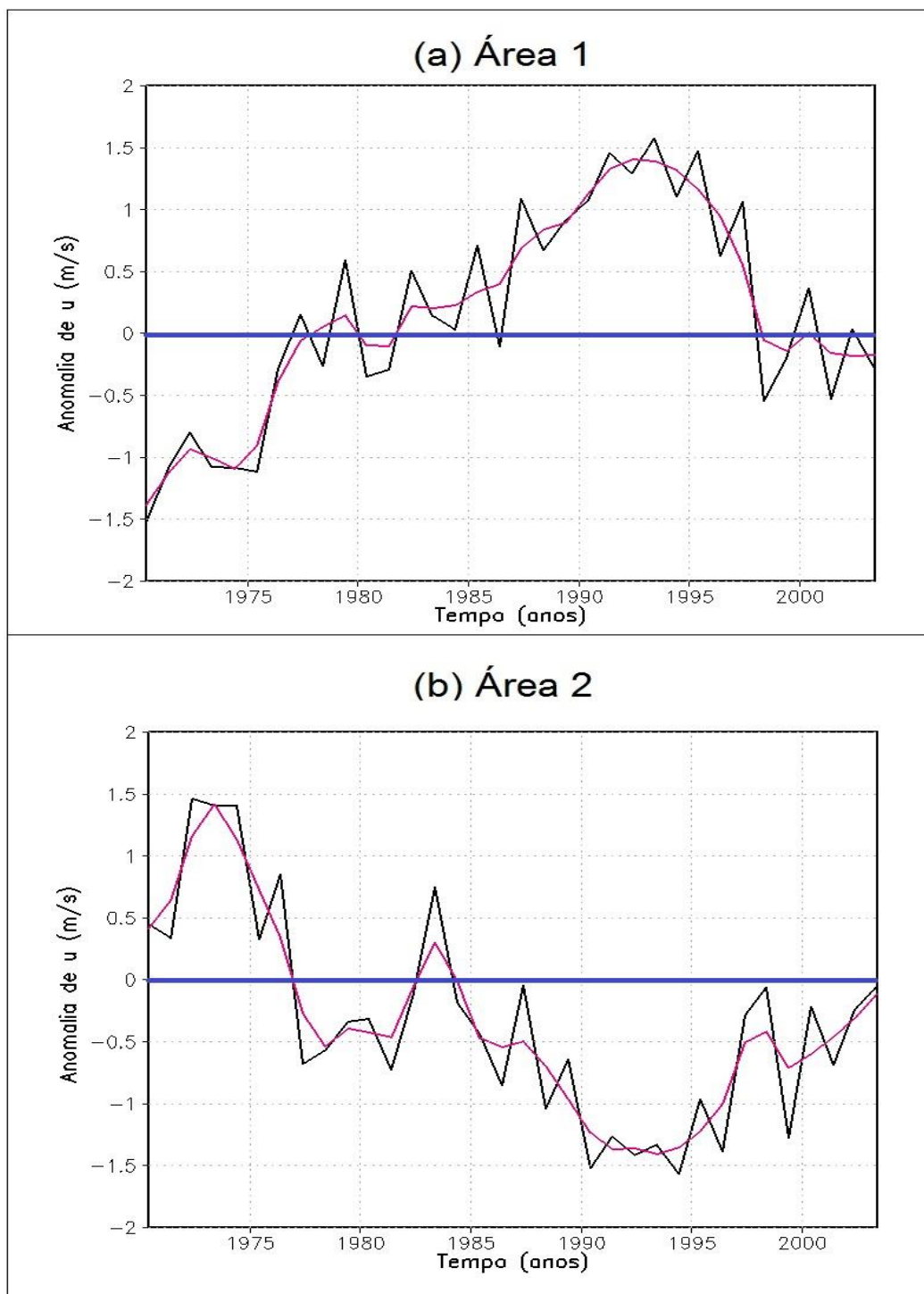


Figura 27. Anomalia anual da componente zonal do vento em 850 hPa, em relação à série temporal 1970-2003, para a (a) Área 1 e (b) Área 2, para dados da reanálise I do NCEP/NCAR. A curva rosa indica a suavização dos dados originais por média móvel com janela de 9 anos.

A Figura 28 indica a evolução mensal da anomalia da componente

meridional do vento em 850 hPa. Observa-se que, na Área 1, próximo a 1977, o sinal médio passa do valor negativo para positivo, enquanto que na Área 2 é verificado o padrão inverso. Dessa forma, conclui-se que para os três subperíodos considerados (1970-1976, 1977-1996, 1997-2003), há um padrão de dipolo sobre o centro-leste da América do Sul, com anomalias negativas (positivas) a oeste, e, positivas (negativas) a leste, nas fases negativas (positivas) da ODP. Este padrão de dipolo também é visto nos dados anuais, Figura 29.

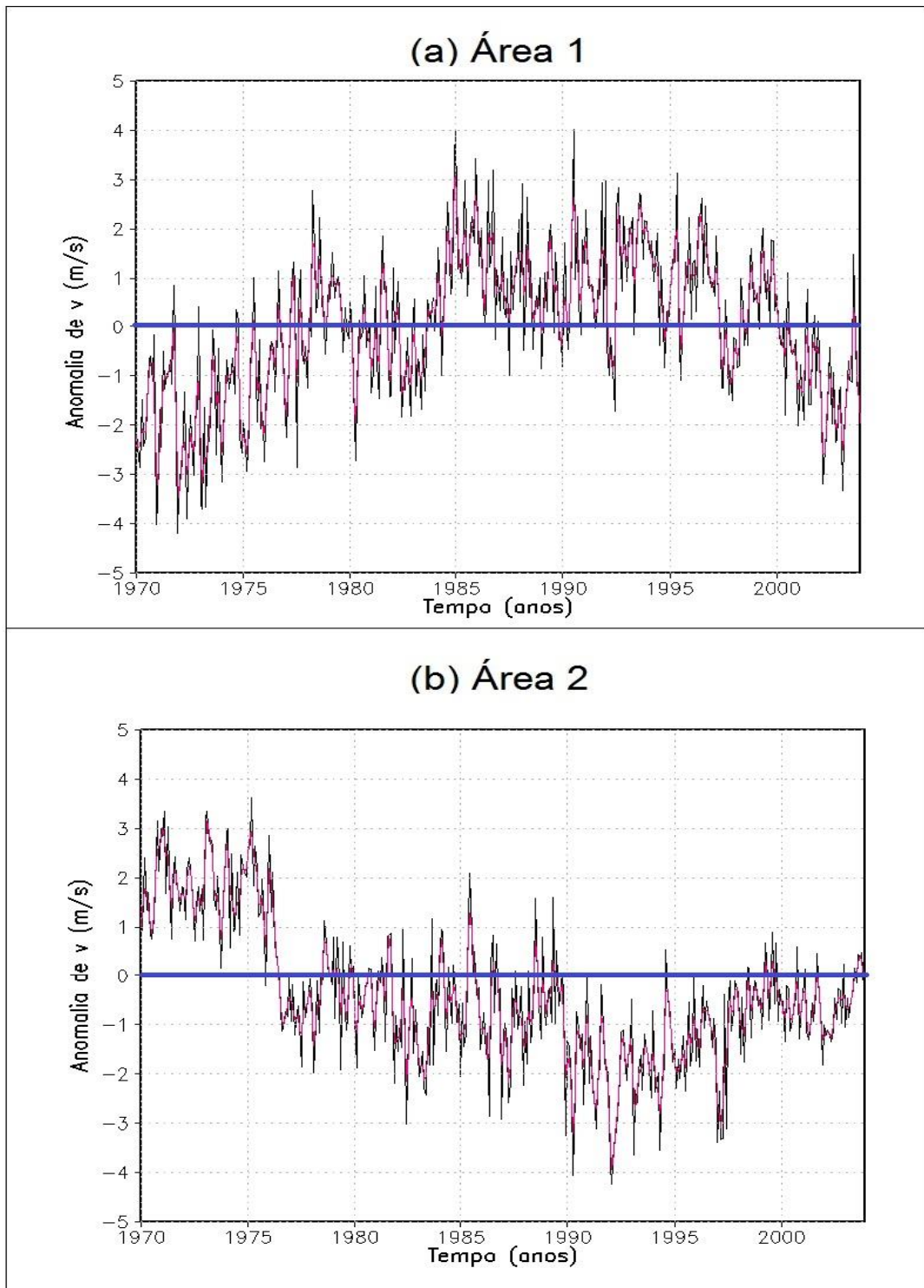


Figura 28. Anomalia mensal da componente meridional do vento em 850 hPa, em relação à série temporal 1970-2003, para a (a) Área 1 e (b) Área 2, para dados da reanálise I do NCEP/NCAR. A curva rosa indica a suavização dos dados originais por média móvel com janela de 9 meses.

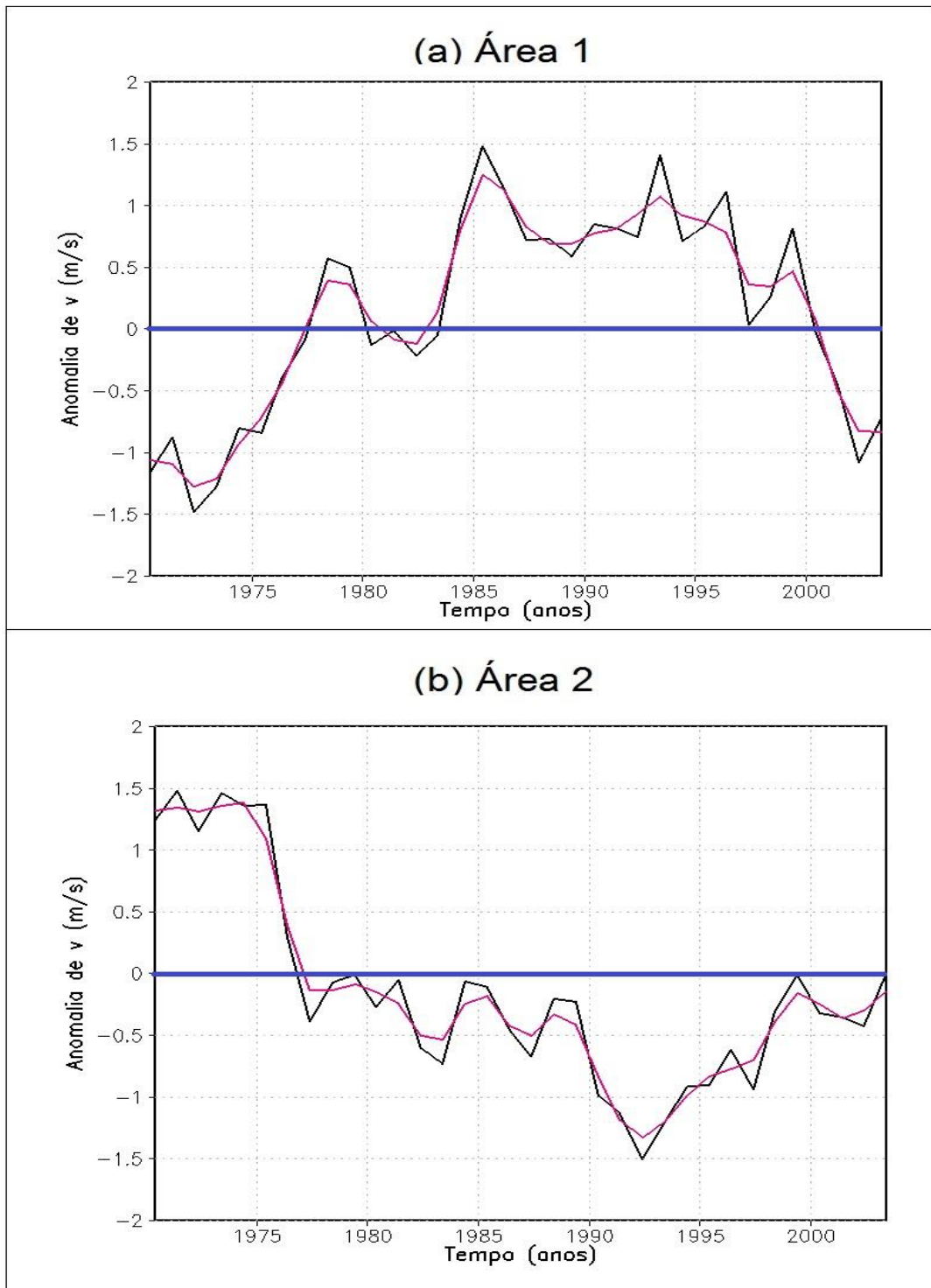


Figura 29. Anomalia anual da componente meridional do vento em 850 hPa, em relação à série temporal 1970-2003, para a (a) Área 1 e (b) Área 2, para dados da reanálise I do NCEP/NCAR. A curva rosa indica a suavização dos dados originais por média móvel com janela de 9 anos.

A Figura 30 indica a evolução anual da anomalia média de altura geopotencial, em 250 hPa, no sul da América do Sul, área delimitada pelas coordenadas (40S-45S; 60W-70W), na Figura 25c. Observa-se aumento e diminuição da da altura geopotencial em 250 hPa durante as fases positiva e negativa da ODP, respectivamente, o que está associado ao respectivo aquecimento e resfriamento da camada troposférica abaixo da superfície de 250 hPa. Este padrão de altura geopotencial caracteriza as três fases da ODP nos subperíodos considerados (1970-1976, 1977-1996, 1997-2003).

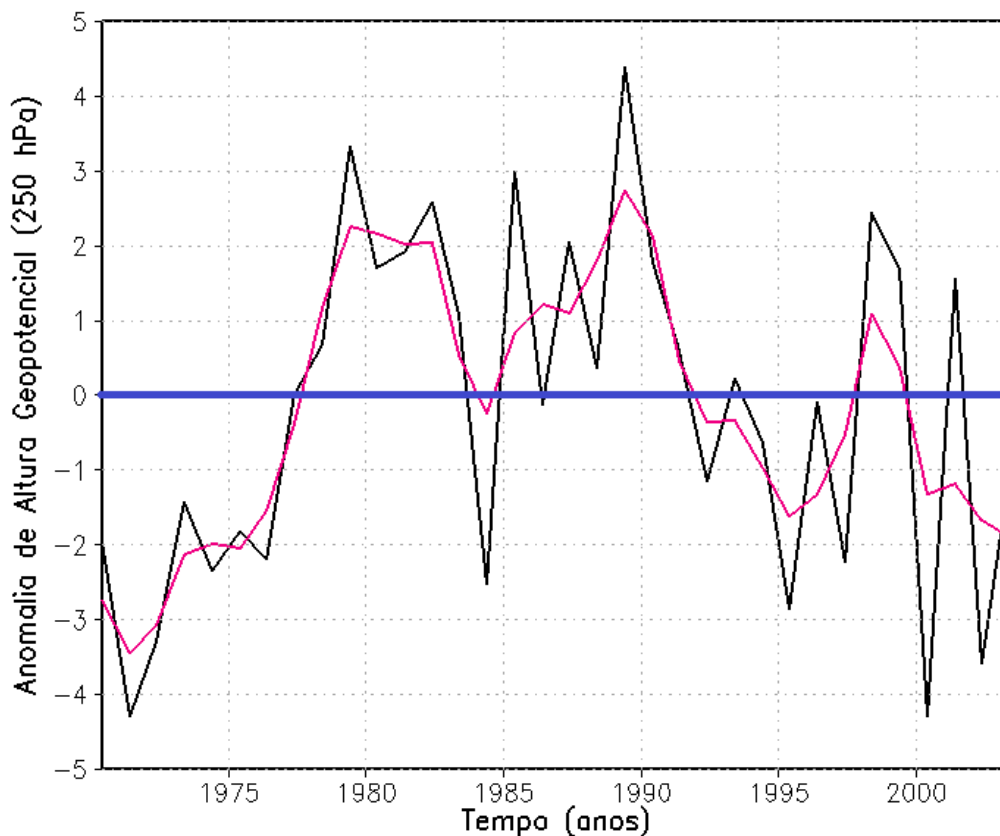


Figura 30. Anomalia anual de altura geopotencial em 250 hPa, em relação à série temporal 1970-2003, para a área identificada na Fig. 25c, para dados da reanálise I do NCEP/NCAR. A curva rosa indica a suavização dos dados originais por média móvel com janela de 9 anos.

A anomalia média da precipitação nas áreas B1 e B2 da Figura 31 foi usada para se verificar a associação da precipitação com a ODP. Observa-se,

na Figura 32, que a variabilidade temporal da anomalia da precipitação na área B1 aproxima-se da variabilidade da ODP, com valores negativos no 1º e 3º subperíodos e valores positivos no 2º subperíodo, enquanto que na área B2, é observado o padrão contrário, contudo, com menores valores de anomalia. Ou seja, aparentemente, a ODP apresenta um impacto maior na área B1 do que na área B2.

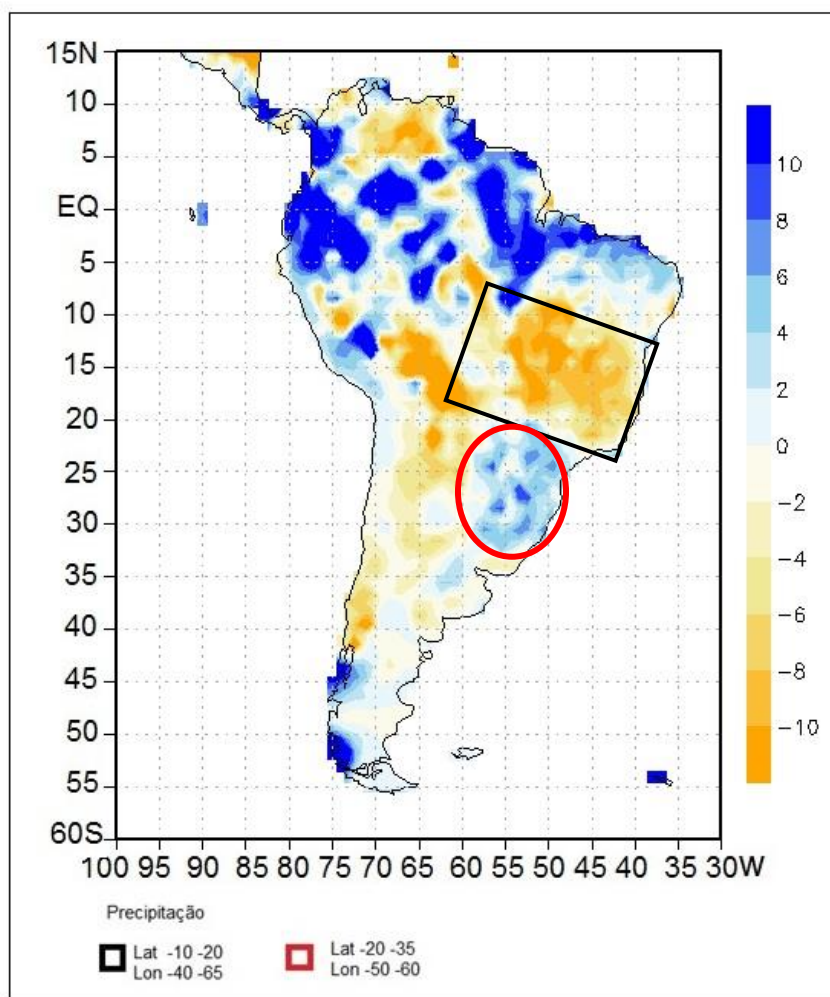


Figura 31. Áreas com anomalias significativas de precipitação durante as fases distintas de ODP. A área identificada pelo retângulo preto é denominada “Área B1” enquanto a área com círculo vermelho, “Área B2”. O sombreado refere-se à anomalia de precipitação para o 1º subperíodo, 1970-1977.

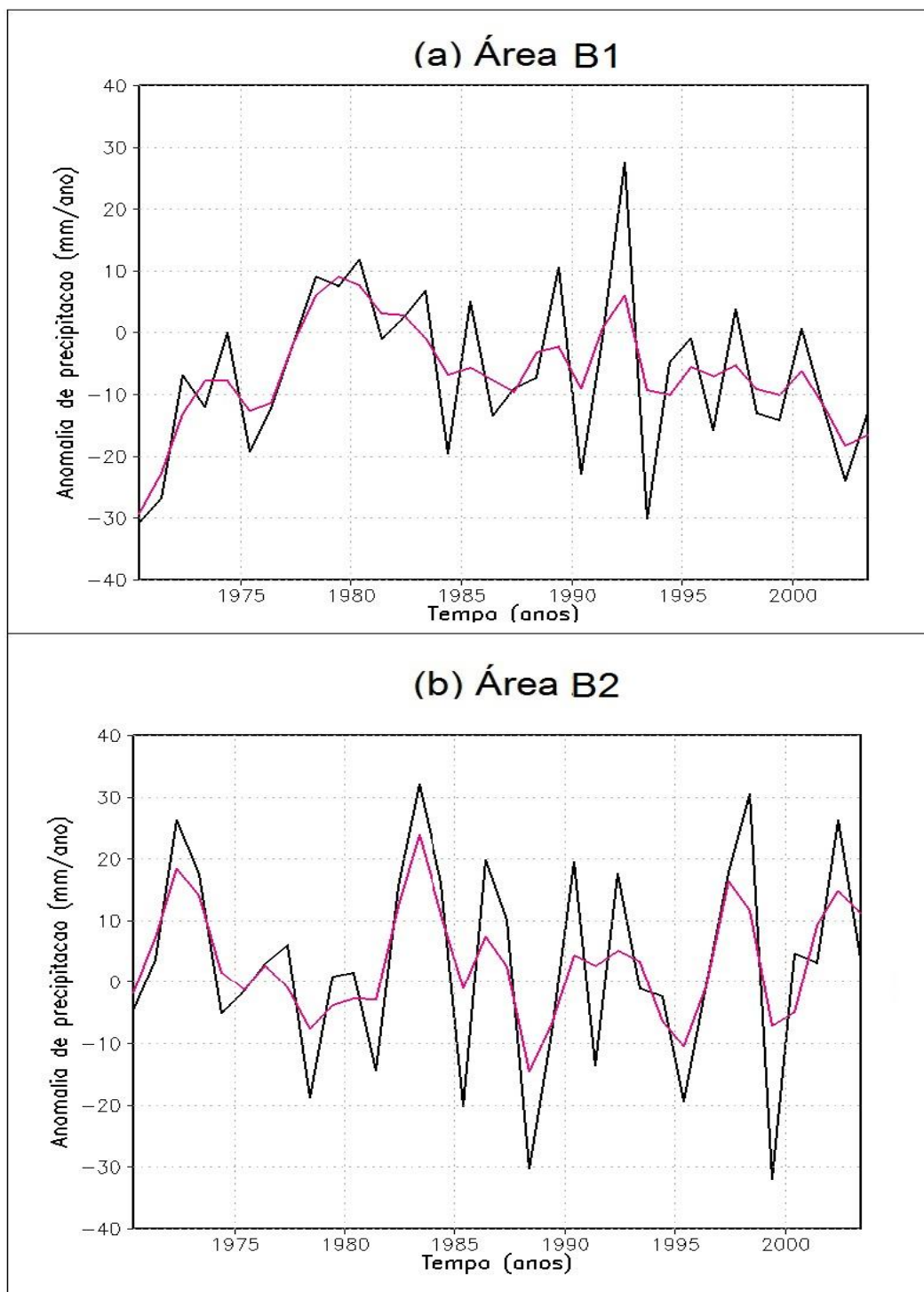


Figura 32. Anomalia anual de precipitação em relação à série temporal 1970-2003, para a (a) Área B1 e (b) Área B2, para dados da reanálise I do NCEP/NCAR. A curva rosa indica a suavização dos dados originais por média móvel com janela de 9 anos.

4. CONCLUSÃO

Este trabalho busca investigar com mais profundidade a associação entre padrões climáticos sobre a América do Sul, em especial sobre seu setor leste, e as condições climáticas do Pacífico em escala decadal de análise, a ODP. Os padrões da circulação atmosférica foram considerados a fim de compreender as condições dinâmicas que propiciaram a ocorrência de períodos secos e chuvosos no setor centro-leste da América do Sul. Embora os resultados de correlação linear entre ODP e precipitação mensal na AS produzam um padrão com sinais contrários no norte e centro-sul do continente, com valores relativamente baixos, resultados da aplicação de ACP aos dados de precipitação (Mo e Peagle, 2001; Zamboni et al., 2011) mostram que há um padrão de dipolo no setor centro-leste da AS com inversão de sinais em fases contrárias da ODP. Este é o padrão analisado aqui.

Foram identificados padrões contrários de circulação atmosférica sobre o oceano Pacífico e sobre a América do Sul nas fases negativa e positiva da ODP, entre 1970 e 2003. Os conjuntos de dados do NCEP/NCAR e ERA-40 apresentam comportamentos distintos nas fases negativa e positiva da ODP. Durante as fases negativas (positiva) da ODP, observou-se anomalias positivas (negativas) de altura geopotencial em 250 hPa sobre o sudeste da América do Sul. As anomalias do vento apresentam sinais opostos ao observado nas fases negativas e positivas da ODP, no centro-leste da América do Sul. Durante a fase positiva da ODP, observa-se anomalia média ciclônica em baixos níveis na região central da AS, indicando enfraquecimento e intensificação dos alíseos no nordeste e sudeste da América do Sul, área A1 e A2, respectivamente. Este padrão está associado a anomalias positivas e negativas da precipitação no nordeste e sudeste da AS, respectivamente. Durante as fases negativas da ODP, há uma intensificação dos alíseos no nordeste da América do Sul e do escoamento de norte no centro do continente. Este escoamento de norte para as regiões sul e sudeste, contribui, em alguma medida, para a remoção de umidade da faixa noroeste-sudeste (delimitada pelo retângulo na Fig. 31), localizada na região centro-leste da AS. A região a sudeste na AS, por outro lado, apresenta anomalias positivas de precipitação nas fases negativas da

ODP. A anomalia média de precipitação a nordeste e sudeste da AS (nas áreas B1 e B2, Fig. 31), formam um padrão de dipolo no setor leste da AS durante fases contrárias da ODP. Os resultados obtidos neste estudo estão em concordância com os obtidos por Silva et al. (2016), que usaram apenas dados da reanálise I do NCEP-NCAR.

A maior compreensão da influência da ODP no clima da América do Sul deu-se a partir da análise na escala sazonal, em que se verificou o impacto médio da ODP nos períodos secos e úmidos. A análise dos dados de vento do NCEP-NCAR e ERA-40 permite concluir que o período chuvoso (outubro a março) exerce maior influência no impacto médio anual se comparado ao período seco (abril a setembro), havendo maior intensidade dos alíseos na região nordeste e do escoamento atmosférico de norte para sul no centro do continente, durante as fases negativas da ODP. Durante a fase positiva da ODP, é observado o impacto climático contrário, menor intensidade dos alíseos no nordeste da AS e do escoamento de norte.

As anomalias referentes aos dados do GPCC também indicam valores maiores de precipitação nos períodos chuvosos. Considerando o impacto climático bipolar da precipitação no centro-leste da América do Sul, é possível identificar maior influência da ODP na região nordeste em relação à região sudeste da América do Sul, indicando que o impacto climático durante a estação chuvosa é mais intenso do que na estação seca.

Foram observados cinco eventos de LN e dois eventos de EN durante 1970-1976, fase negativa da ODP. Para o 2º subperíodo, fase positiva da ODP, 1977-1996, identificou-se seis eventos de EN e quatro de LN. No período de 1997-2003, fase negativa da ODP, foram observados dois eventos de EN e três de LN. A ocorrência de eventos frios e quentes de ENOS associam-se às fases da ODP. A fase positiva da ODP foi determinada por mais eventos quentes de ENOS. Analogamente, as fases negativas da ODP estão mais associadas a eventos frios de ENOS.

Em estudos futuros há a necessidade de identificação dos eventos ENOS ocorridos em cada fase da ODP, os padrões atmosféricos característicos e a sugestão de como estes eventos influenciam o sinal médio da ODP na América do Sul. É necessário analisar os campos de vento médio em níveis

troposféricos mais altos para poder identificar até que altitude as três fontes de dados usadas são similares. Da mesma forma que para o vento, a análise da série temporal da anomalia da precipitação média anual e as relativas aos períodos secos e chuvosos deve contribuir para a definição mais precisa dos períodos em que a ODP influenciou o clima do setor leste da América do Sul.

5. REFERÊNCIAS

ADLER, R. F. et al. **The version-2 global precipitation climatology project (GPCP) monthly precipitation analysis (1979-present)**. Journal of Hydrometeorology, v. 4, 1147-1167, 2003.

BARRY, Roger G.; CHORLEY, Richard J. **Atmosfera, Tempo e Clima**. Tradução Ronaldo Cataldo Costa. Porto Alegre: Bookman, 9. ed., 2013.

BJERKNES, J. **Atmospheric teleconnections from the Equatorial Pacific**. Mon Weather Rev 97:163–172, 1969.

CAVALCANTI, I.F.A.; FERREIRA, N.J.; SILVA, M.G.A.J.; DIAS, M.A.F.S. **Tempo e Clima no Brasil**. São Paulo: Oficina de Textos, 2009.

DANIEL S. WILKS. **Statistical Methods in the Atmospheric Sciences**, 2nd Ed. v. 91 p. 463-507, 2006.

DUCHON, C.E. **Lanczos Filtering in One and Two Dimensions**. Journal of Applied Meteorology. V. 18, pp. 1016-1022, 1979.

IPCC, 2014: **Climate Change 2014: Synthesis Report**. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.

KAROLY, D. **Southern Hemisphere Circulation Features Associated with El**

Niño- Southern Oscillation Events. American Meteorology Society. Volume 2. 1239-1252, 1989.

LATIF, M., & BARNETT, T. P. **Causes of decadal climate variability over the North Pacific and North America.** Science, 266(5185), 634-637, 1994.

MANTUA, N. J., HARE, S. R., ZHANG, Y., WALLACE, J. M., & Francis, R. C. **A Pacific interdecadal climate oscillation with impacts on salmon production.** Bulletin of the American Meteorological Society, 78(6), 1069-1079, 1997.

MECHOSO, C. R., ZAMBONI, L., KUCHARSKI, F. **Relationships between Upper Level Circulation over South America and Rainfall over South Eastern South America: A Physical Base for Seasonal Predictions.** Journal of Climate, 2010.

HOLTON, J.R. **An Introduction to Dynamic Meteorology.** Estados Unidos, Elsevier. Fourth Edition, 2004.

HOREL, J.D, WALLACE, J.M. **Planetary-Scale Atmospheric Phenomena Associated with the Southern Oscillation.** Monthly Weather Review. V. 109, pp. 813-828, 1981.

HOSKINS, B.J., KAROLY, D.L. **The steady linear response of a spherical atmosphere to thermal and orographic forcing.** Journal of Atmospheric Science 38: 1179–1196, 1981.

MANTUA, N.J. **The Pacific decadal oscillation and climate forecasting for North America.** Climate Risk Solutions, 1(1):10–13, 1999.

MANTUA, N.J., HARE, S.R. **The Pacific Decadal Oscillation.** JOceanogr 58:35–44, 2002.

MARENGO, J. **Extreme climatic events in the Amazon Basin and their associations with the circulation of the global tropics.** Ph. D. Thesis, Department of Meteorology, University of Wisconsin-Madison, 147 pp., 1991.

MECHOSO, C.R., ROBERTSON, A.W. **Interannual and Interdecadal Variability of the South Atlantic Convergence Zone.** American Meteorological Society, v. 128, pp. 2947-2957, 2000.

MINOBE, S. **A50-70 year climatic oscillation over the North Pacific and North America.** Geophys Res Lett 24:683–686, 1997.

MO, K.C., GHIL, M. **Statistics and dynamics of persistent anomalies.** Journal of Atmospheric Sciences 144:808–823, 1987.

MO, K. C., & PAEGLE, J. N. (2001). **The Pacific–South American modes and their downstream effects.** International Journal of Climatology, 21(10), 1211-1229.

MOLION, L.C.B. **Aquecimento Global, El Niños, Manchas Solares, Vulcões e Oscilação Decadal do Pacífico.** Revista Climanálise, 2005.

NEGRON-JUARÉZ, R.I., et al. **Comparison of precipitation datasets over the tropical South American and African continents.** Journal of Hydrometeorology 10 (1), 289-299, 2009.

REBOITA, M.S.; GAN, M.A.; ROCHA, R.P; AMBRIZZI, T. **Regimes de precipitação na América do Sul: uma revisão bibliográfica.** Revista Brasileira de Meteorologia, v.25, n.2, 185 - 204, 2010.

REBOITA, M.S. et al. **Effects of RegCM3 parameterizations on simulated rainy season over South America.** Climate Research, 52: 253–265, 2012.

SILVA, M.E.S.; SILVA, C.B. **Influência da Oscilação Decadal do Pacífico e**

do padrão Pacific South America no clima da América do Sul para o período de 1970-2003. Revista Brasileira de Climatologia, Ano 12 – Vol. 19 – Jul/Dez 2016.

SILVA, C.B.; SILVA, M.E.S.; AMBRIZZI, T. **Climatic variability of river outflow in the Pantanal region and the influence of sea surface temperature.** Springer. Publicado online, março/2016.

SILVA, M.E.S. et al. 2017, no prelo.

STERL, A. **On the (in)homogeneity of reanalysis products.** J. Clim., 17, 3866 – 3873, 2004.

WALKER, G.T., BLISS, E.M. **World Weather.** V Mem RoyMeteorSoc 4: 53–84, 1932.

ZHANG, Y.; WALLACE, J.M; BATTISTI, D.S. **ENSO-like Interdecadal Variability: 1900-93.** Journal of Climate, v. 10, pp. 1004-1020, 1997.