UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
FACULDADE DE FILOSOFIA, LETRAS E CIÊNCIAS HUMANAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA FÍSICA

BRUNA SIMÕES LIMA

OSCILAÇÃO DECADEAL DO PACÍFICO E SUA INFLUÊNCIA NOS
PADRÕES CLIMÁTICOS SAZONAIS DA AMÉRICA DO SUL

SÃO PAULO

2020

Versão Corrigida

BRUNA SIMÕES LIMA

**Oscilação Decadal do Pacífico e sua influência nos padrões
climáticos sazonais da América do Sul**

Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação de Geografia Física da Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas da Universidade de São Paulo, para a obtenção do título de Mestre em Geografia Física, área de concentração em Climatologia.

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

SÃO PAULO

2020

Versão Corrigida

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Catálogo na Publicação
Serviço de Biblioteca e Documentação
Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas da Universidade de São Paulo

L732o Lima, Bruna Simões
 OSCILAÇÃO DECADEAL DO PACÍFICO E SUA INFLUÊNCIA NOS
 PADRÕES CLIMÁTICOS SAZONAIS DA AMÉRICA DO SUL / Bruna
 Simões Lima; orientador Maria Elisa Siqueira Silva -
 São Paulo, 2020.
 145 f.

Dissertação (Mestrado)- Faculdade de Filosofia,
Letras e Ciências Humanas da Universidade de São
Paulo. Departamento de Geografia. Área de
concentração: Geografia Física.

1. VARIABILIDADE CLIMÁTICA. 2. OSCILAÇÃO DECADEAL
DO PACÍFICO. 3. AMÉRICA DO SUL . I. Silva, Maria
Elisa Siqueira, orient. II. Título.

ENTREGA DO EXEMPLAR CORRIGIDO DA DISSERTAÇÃO/TESE

Termo de Ciência e Concordância do (a) orientador (a)

Nome do (a) aluno (a): Bruna Simões Lima

Data da defesa: 16/12/2020

Nome do Prof. (a) orientador (a): Maria Elisa Siqueira Silva

Nos termos da legislação vigente, declaro **ESTAR CIENTE** do conteúdo deste **EXEMPLAR CORRIGIDO** elaborado em atenção às sugestões dos membros da comissão Julgadora na sessão de defesa do trabalho, manifestando-me **plenamente favorável** ao seu encaminhamento e publicação no **Portal Digital de Teses da USP**.

São Paulo, 16 de fevereiro de 2020.

(Assinatura do (a) orientador (a))

FOLHA DE APROVAÇÃO

LIMA, Bruna Simões (2020). **Oscilação Decadal do Pacífico e sua influência nos padrões climáticos sazonais da América do Sul**. Dissertação apresentada à Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas da Universidade de São Paulo para a obtenção do título de mestre em Geografia Física.

Aprovada em: 16/12/2020

Banca Examinadora

Profª Drª Maria Elisa Siqueira Silva (orientadora)

Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas (FFLCH/USP)
Universidade de São Paulo

Profª Drª Rosmeri Porfírio da Rocha

Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas (IAG/USP)
Universidade de São Paulo

Profª Drª Leila Limberger

Universidade Estadual do Oeste do Paraná (Unioeste)

Profª Drª Camila Carpenedo

Universidade Federal de Uberlândia (UFU)

Agradecimentos

À Prof^a. Dr^a. Maria Elisa Siqueira Silva, minha orientadora sempre muito atenciosa, paciente e comprometida com o ensino e com a pesquisa. Meu sincero agradecimento a essa professora que acompanhou minha trajetória acadêmica desde a Iniciação Científica e sempre me incentivou a alçar voos mais altos. Obrigada por todos esses anos de trabalho em conjunto, por ter me ensinado tanto sobre a Climatologia e por todo esforço para me ajudar a superar as minhas dificuldades com as ferramentas e as análises meteorológicas. Obrigada por todo conhecimento aprofundado sobre o clima que adquiri ao longo de todos esses anos, que certamente foi um grande diferencial para mim, geógrafa.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de Mestrado.

Aos colegas que fiz no Laboratório de Climatologia e Biogeografia (LCB-USP), que foram responsáveis por momentos de descompressão, alegria e de muita ajuda. Em especial, ao Carlos, meu grande amigo e professor que nunca hesitou em me ajudar nos meus momentos de desespero com o GrADS e com a pesquisa. Com muita paciência, didática e tranquilidade me ajudou a chegar até aqui. Obrigada, Carlos! E à Tuanny, minha eterna amiga parceira de clima.

Aos meus pais e à minha avó Lyntha, que sempre me ajudaram na minha trajetória acadêmica. A todos meus amigos que aguentaram meus momentos de nervoso, stress e ausência. Ao Giovanne, que me apoiou diariamente ao lado do computador e foi o responsável pelo melhor abraço nos momentos mais difíceis.

LIMA, Bruna Simões (2020). **Oscilação Decadal do Pacífico e sua influência sobre os padrões climáticos sazonais da América do Sul.** (2020) Dissertação (Mestrado). Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas da Universidade de São Paulo. Universidade de São Paulo (145p.)

RESUMO: Neste estudo buscamos avaliar a variabilidade sazonal da circulação atmosférica e precipitação da América do Sul em fases distintas da Oscilação Decadal do Pacífico (ODP) entre 1970 e 2003. As análises basearam-se na comparação entre os padrões espaciais médios de cada uma das fases da ODP: 1970-1976, 1977-1996 e 1997-2003. Os dados analisados foram as componentes horizontais do vento, altura geopotencial e precipitação da reanálise I do NCEP-NCAR e da reanálise JRA-55, além dos dados de precipitação do GPCC. Padrões contrários da anomalia da circulação atmosférica foram identificados sobre o Oceano Pacífico e América do Sul nas fases negativa e positiva da ODP entre 1970 e 2003. A análise feita a partir dos dados da reanálise I NCEP-NCAR e da reanálise do JRA-55 mostrou que a estação chuvosa (outubro a março) exerce maior influência no impacto médio anual quando comparada à estação seca (abril a setembro), com maior intensidade dos ventos alíseos na região nordeste e do escoamento atmosférico de norte a sul no centro do continente durante o período negativo fases da ODP. Durante a fase positiva da ODP, observa-se o impacto climático oposto, menor intensidade dos ventos alíseos no nordeste da AS e no escoamento de norte a sul. Para os dados de precipitação, as anomalias do GPCC na fase negativa da ODP também indicaram valores mais intensos de precipitação durante as estações chuvosas do nordeste da AS. A variação da anomalia da precipitação entre os períodos secos e chuvosos indica que os períodos chuvosos contribuem mais que os períodos secos para determinar o valor médio anual, para todas as fontes de dados consideradas (GPCC, reanálise I do NCEP-NCAR e JRA-55). Considerando-se o impacto climático bipolar da precipitação no centro-leste da América do Sul, foi possível identificar maior associação do sinal da ODP com a precipitação na região nordeste em relação à precipitação observada na região sudeste da América do Sul. Em relação ao dipolo da anomalia da precipitação no centro-leste da América do Sul, observado em fases opostas da ODP, identificou-se que os eventos El Niño apresentam maior associação com as anomalias de precipitação ocorridas na região nordeste. Eventos de La Niña estão associados a padrões de anomalia de precipitação na América do Sul semelhantes à média observada nas fases frias da ODP.

Palavras-chave: precipitação, variabilidade climática sazonal, Oscilação Decadal do Pacífico, América do Sul.

LIMA, Bruna Simões (2020). **Pacific Decadal Oscillation influence on the South America seasonal climate patterns.** (2020) (master degree). University of Sao Paulo. University of Sao Paulo (145p).

ABSTRACT: In this study we seek to evaluate the seasonal variability of atmospheric circulation and precipitation in South America (SA) at different stages of the Pacific Decadal Oscillation (PDO) between 1970 and 2003. The analyzes were based on the comparison between the average spatial patterns of each of the phases of the PDO: 1970-1976, 1977-1996 and 1997-2003. The data analyzed were the horizontal components of the wind, geopotential height and precipitation of the NCEP-NCAR reanalysis I and the JRA-55 reanalysis, in addition to the GPCC precipitation data. Opposite patterns of atmospheric circulation anomaly were identified over the Pacific Ocean and South America in the negative and positive phases of the ODP between 1970 and 2003. Analysis based on data from I NCEP-NCAR reanalysis and JRA-55 reanalysis showed that the rainy season (October to March) has a greater influence on the average annual impact when compared to the dry season (April to September), with greater intensity of the trade winds in the northeast region and the atmospheric flow from north to south in the center of the continent during the negative period of the PDO. During the positive phase of the PDO, the opposite climatic impact is observed, less intensity of the trade winds in the northeast of the AS and in the flow from north to south. For precipitation data, GPCC anomalies in the negative PDO phase also indicated more intense precipitation values during the rainy seasons in northeastern SA. The variation in precipitation anomaly between dry and rainy periods indicates that rainy periods contribute more than dry periods to determine the average annual value, for all data sources considered (GPCC, NCEP-NCAR and JRA-55 reanalysis I). Considering the bipolar climatic impact of precipitation in central-eastern South America, it was possible to identify a greater association of the PDO signal with precipitation in the northeastern region in relation to the precipitation observed in the southeastern region of South America. For the precipitation anomaly in central-eastern South America, observed in opposite phases of the PDO, it was found that the El Niño events have a greater association with the precipitation anomalies that occurred in the northeast region. La Niña events are associated with precipitation anomaly patterns in South America similar to the average observed in the cold phases of the PDO.

Keywords: precipitação, seasonal climatic variability, Oscilação Decadal do Pacífico, América do Sul.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Correlação linear entre a precipitação média mensal (mm dia^{-1}) do GPCC e da reanálise I do NCEP-NCAR, durante o período de 1970 a 2003.....	40
Figura 2 - Correlação linear entre a precipitação média mensal (mm dia^{-1}) da reanálise do JRA-55 e do GPCC, durante o período de 1970 a 2003.....	40
Figura 3 - Anomalia de linha de corrente ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$) em 850 hPa, em relação ao período de 1970 a 2003, para os três subperíodos considerados, 1970-1976, 1977-1996, 1997-2003, para dados da reanálise I do NCEP/NCAR.....	41
Figura - 4 Anomalia de linha de corrente ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$) em 850 hPa, em relação ao período de 1970 a 2003, para os três subperíodos considerados, 1970-1976, 1977-1996, 1997-2003, para dados da reanálise do JRA-55.....	42
Figura 5 - Correlação linear entre os dados de precipitação mensal do GPCC e da reanálise do JRA-55 (a,b) e reanálise I do NCEP-NCAR (c,d) durante os períodos (a,c) secos (abril a setembro) e (b,d) úmidos (outubro a março) de 1970 a 2003.....	44
Figura 6 - 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 JRA-55 (à esquerda) e do NCEP-NCAR (à direita).....	46
Figura 7 - Média da componente meridional do vento ($\times 0.2 \text{ m s}^{-1}$), em 850 hPa, para os períodos (a) 1970-1976, (b) 1977-1996 e (c) 1997-2003, para os conjuntos de reanálise do JRA-55 (à esquerda) e do NCEP-NCAR (à direita).....	47
Figura 8(a-f) - Média do vento (m s^{-1}), em 850 hPa, para o período de 1997-2003 para o conjunto de reanálise I do NCEP-NCAR.....	48
Figura 9 - Média anual da altura geopotencial (mcp), em 850 hPa, para os períodos (a) 1970-1976, (b) 1977-1996 e (c) 1997-2003, para os conjuntos de reanálise do JRA-55 (à esquerda) e da reanálise I do NCEP-NCAR (à direita).....	51

Figura 10 - 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 JRA-55 e da reanálise I do NCEP-NCAR.....53

Figura 11 - Média anual da componente meridional do vento ($\times 0,2 \text{ m s}^{-1}$), em 850 hPa, sobre a América do Sul, para os períodos 1970-1976, 1977-1996 e 1997-2003, para os conjuntos de reanálise do JRA-55 e da reanálise I do NCEP-NCAR.....54

Figura 12 - Anomalia média da componente zonal do vento ($\times 0,5 \text{ m s}^{-1}$), em 850 hPa, para os subperíodos 1970-1976, 1977-1996 e 1997-2003, para dados do JRA-55 e NCEP-NCAR.....56

Figura 13 - Anomalia média da componente meridional do vento ($\times 0,5 \text{ m s}^{-1}$), em 850 hPa, para os períodos 1970-1976, 1977-1996 e 1997-2003, para dados do JRA-55 e NCEP-NCAR.....57

Figura 14 - Anomalia média da altura geopotencial (mcp), em 250 hPa, para os períodos (a) 1970-1976, (b) 1977-1996 e (c) 1997-2003, para os dados da reanálise I do NCEP-NCAR.....59

Figura 15 - Anomalia média da altura geopotencial (mcp), em 250 hPa, para os períodos (a) 1970-1976, (b) 1977-1996 e (c) 1997-2003, para os dados da reanálise do JRA-55.....60

Figura 16 - Anomalia média da altura geopotencial (mcp), em 250 hPa, sobre a América do Sul, para os períodos (a) 1970-1976, (b) 1977-1996 e (c) 1997-2003, para os dados do JRA-55 e da reanálise I do NCEP-NCAR.....61

Figura 17 - Frequência de eventos ENOS na segunda fase da ODP, 1977-1996, computada a partir dos dados de ONI.....63

Figura 18 - Série temporal mensal da temperatura da superfície no mar de 1948 a 2020.....65

Figura 19 - Anomalia média 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. Os anos identificados em verde (laranja) representam anos de La Niña (El Niño).....66

Figura 20 - Anomalia média 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. Os anos identificados em verde (laranja) representam anos de La Niña (El Niño).....67

Figura 21 - Anomalia média 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. Os anos identificados em verde (laranja) representam anos de La Niña (El Niño).....68

Figura 22 - Anomalia média 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. Os anos identificados em verde (laranja) representam anos de La Niña (El Niño).....69

Figura 23 - Anomalia média 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. Os anos identificados em verde (laranja) representam anos de La Niña (El Niño).....70

Figura 24 - Anomalia média 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. Os anos identificados em verde (laranja) representam anos de La Niña (El Niño).....71

Figura 25 - Anomalia média anual da componente zonal do vento (m s^{-1}), em 850 hPa, para os anos do 1º período, 1970-1976, para os dados do JRA-55. Os anos identificados

em verde (laranja) representam anos de La Niña (El Niño).....72

Figura 26 - Anomalia média anual da componente zonal do vento (m s^{-1}), em 850 hPa, para os anos do 2º período (1977-1996), para os dados do JRA-55. Os anos identificados em verde (laranja) representam anos de La Niña (El Niño).....73

Figura 27 - Anomalia média anual da componente zonal do vento (m s^{-1}), em 850 hPa, para os anos do 3º período (1997-2003), para os dados do JRA-55. Os anos identificados em verde (laranja) representam anos de La Niña (El Niño).....74

Figura 28 - Anomalia média anual da componente meridional do vento (m s^{-1}), em 850 hPa, para os anos do 1º período (1970-1976), para os dados do JRA-55. Os anos identificados em verde (laranja) representam anos de La Niña (El Niño).....75

Figura 29 - Anomalia média anual da componente meridional do vento (m s^{-1}), em 850 hPa, para os anos do 2º período (1977-1996), para os dados do JRA-55. Os anos identificados em verde (laranja) representam anos de La Niña (El Niño).....76

Figura 30 - Anomalia média anual da componente meridional do vento (m s^{-1}), em 850 hPa, para os anos do 3º período (1997-2003), para os dados do JRA-55. Os anos identificados em verde (laranja) representam anos de La Niña (El Niño).....77

Figura 31 - Anomalia anual de altura geopotencial (mcp), em 250 hPa, para os anos do 1º período (1970-1976), para os dados da reanálise I do NCEP-NCAR. Os anos identificados em verde (laranja) representam anos de La Niña (El Niño).....78

Figura 32 - Anomalia anual de altura geopotencial (mcp), em 250 hPa, para os anos do 2º período (1977-1996), para os dados da reanálise I do NCEP-NCAR. Os anos

identificados em verde (laranja) representam anos de La Niña (El Niño).....79

Figura 33 - Anomalia anual de altura geopotencial (m_gp), em 250 hPa, para os anos do 3º período (1997-2003), para os dados da reanálise I do NCEP-NCAR. Os anos identificados em verde (laranja) representam anos de La Niña (El Niño).....80

Figura 34 - Anomalia anual de altura geopotencial (m_gp), em 250 hPa, para os anos do 1º período (1970-1976), para os dados do JRA-55. Os anos identificados em verde (laranja) representam anos de La Niña (El Niño).....81

Figura 35 - Anomalia anual de altura geopotencial (m_gp), em 250 hPa, para os anos do 2º período (1977-1996), para os dados do JRA-55. Os anos identificados em verde (laranja) representam anos de La Niña (El Niño).....82

Figura 36 - Anomalia anual de altura geopotencial (m_gp), em 250 hPa, para os anos do 3º período (1997-2003), para os dados do JRA-55. Os anos identificados em verde (laranja) representam anos de La Niña (El Niño).....84

Figura 37 - 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.....85

Figura 38 - 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.....86

Figura 39 - 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 do JRA-55.....87

Figura 40 - 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 do JRA-55.....88

Figura 41 - Anomalia média anual de altura geopotencial (mgp) (1ª coluna), em 250 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 do NCEP-NCAR.....88

Figura 42 - Anomalia média anual de altura geopotencial (mgp), em 250 hPa (1ª coluna), para a estação chuvosa (2ª coluna) e estação seca (3ª coluna), para os subperíodos (a) 1970-1976, (b) 1977-1996 e (c) 1997-2003, para a reanálise do JRA-55.....90

Figura 43 - Anomalia média anual da componente zonal do vento (m s^{-1}) (1ª coluna), em 850 hPa, diferença sazonal para o período chuvoso (2ª coluna) e diferença sazonal para o período seco (3ª coluna), para os subperíodos (a) 1970-1976, (b) 1977-1996 e (c) 1997-2003, para a reanálise I do NCEP-NCAR.....91

Figura 44 - Anomalia média anual da componente meridional do vento (m s^{-1}) (1ª coluna), em 850 hPa, diferença sazonal para o período chuvoso (2ª coluna) e diferença sazonal para o período seco (3ª coluna), para os subperíodos (a) 1970-1976, (b) 1977-1996 e (c) 1997-2003, para a reanálise I do NCEP-NCAR.....92

Figura 45 - Anomalia média anual da componente zonal do vento (m s^{-1}) (1ª coluna), em 850 hPa, diferença sazonal para o período chuvoso (2ª coluna) e diferença sazonal para o período seco (3ª coluna), para os subperíodos (a) 1970-1976, (b) 1977-1996 e (c) 1997-2003, para a reanálise do JRA-55.....93

Figura 46 - Anomalia média anual da componente meridional do vento (m s^{-1}) (1ª coluna), em 850 hPa, diferença sazonal para o período chuvoso (2ª coluna) e diferença sazonal para o período seco (3ª coluna), para os subperíodos (a) 1970-1976, (b) 1977-1996 e (c) 1997-2003, para a reanálise I do NCEP-NCAR.....96

Figura 47 - 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 (A1) e com um círculo vermelho (A2) compõem aproximadamente o dipolo do padrão da anomalia de precipitação proposto para a escala decenal.....97

Figura 48 - Anomalia anual da precipitação (mm dia^{-1}), para os períodos 1970-1976, 1977-1996 e 1997-2003, a partir de dados do NCEP-NCAR. As áreas delimitadas com um retângulo preto (B1) e com um círculo vermelho (B2) compõem aproximadamente a posição do dipolo do padrão da anomalia de precipitação proposto para a escala decenal.....98

Figura 49 - Anomalia anual da precipitação (mm dia^{-1}) para os períodos 1970-1976, 1977-1996 e 1997-2003, a partir de dados do JRA-55. As áreas delimitadas com um retângulo preto (C1) e com um círculo vermelho (C2) compõem aproximadamente o dipolo do padrão da anomalia de precipitação proposto para a escala decenal.....100

Figura 50 - 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.....101

Figura 51 - 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, para a reanálise I do NCEP-NCAR.....102

Figura 52 - 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, com base nos dados do JRA-55.....	105
---	-----

Figura 53 - Gráfico de dispersão da componente zonal do vento durante o inverno (eixo y) e verão (eixo x), para as áreas U1 e U2, a partir dos dados da reanálise I do NCEP-NCAR.....	106
---	-----

Figura 54 - Gráfico de dispersão da componente meridional do vento durante o inverno (eixo y) e verão (eixo x), para as áreas V1 e V2, a partir dos dados da reanálise I do NCEP-NCAR.....	107
--	-----

Figura 55 - Gráfico de dispersão da componente zonal do vento durante o inverno (eixo y) e verão (eixo x), para as áreas U1 e U2, a partir dos dados de reanálise do JRA-55.....	108
--	-----

Figura 56 - Gráfico de dispersão da componente meridional do vento durante o inverno (eixo y) e verão (eixo x), para as áreas V1 e V2, a partir dos dados de reanálise do JRA-55.....	109
---	-----

Figura 57 - Gráfico de dispersão entre a precipitação mensal (mm mês^{-1}) do GPCC observada nas estações seca (eixo das ordenadas) e úmida (eixo das abscissas), para as áreas A1 e A2.....	110
---	-----

Figura 58 - Gráfico de dispersão de precipitação durante o inverno (eixo y) e verão (eixo x), para as áreas B1 e B2, a partir dos dados de reanálise do NCEP-NCAR.....	111
--	-----

Figura 59 - Gráfico de dispersão de precipitação durante o inverno (eixo y) e verão (eixo x), para as áreas C1 e C2, a partir dos dados de reanálise do JRA-55.....	112
---	-----

Figura 60 - Localização das áreas relativas aos valores mais intensos de anomalia sazonal das componentes (a) zonal e (b) meridional do vento (m s^{-1}) para os dados	
---	--

da reanálise I do NCEP-NCAR.....	114
----------------------------------	-----

Figura 61 - Anomalia mensal da componente zonal do vento ($m s^{-1}$) para o período seco (a) e período chuvoso (b), de 1970 a 2003, para U1 e U2, a partir de dados do NCEP-NCAR.....	115
--	-----

Figura 62 - Anomalia mensal da componente zonal do vento ($m s^{-1}$) da reanálise I do NCEP-NCAR, para a áreas (a) U1 e (b) U2, para as estações secas (abril-setembro) e úmidas (outubro a março), de 1970 a 2003.....	116
--	-----

Figura 63 - Anomalia média mensal da componente meridional do vento ($m s^{-1}$) para o período seco (a) e período chuvoso (b), de 1970 a 2003, para A1 e A2, a partir de dados do NCEP-NCAR.....	117
---	-----

Figura 64 - Anomalia média mensal da componente meridional do vento ($m s^{-1}$) para a área 1 (a) e área 2 (b), de 1970 a 2003, durante os períodos secos (AMJJAS) e chuvosos (ONDJFM), a partir de dados do NCEP-NCAR.....	118
--	-----

Figura 65 - Áreas relativas aos valores mais intensos da anomalia sazonal das componentes zonal e meridional do vento ($m s^{-1}$) para os dados do JRA-55.....	119
---	-----

Figura 66 - Anomalia média mensal da componente zonal do vento ($m s^{-1}$) para o período seco (a) e período chuvoso (b), de 1970 a 2003, para A1 e A2, a partir de dados do JRA-55.....	120
---	-----

Figura 67 - Anomalia média mensal da componente zonal do vento ($m s^{-1}$) para a área 1 (a) e área 2 (b), de 1970 a 2003, durante os períodos secos (AMJJAS) e chuvosos (ONDJFM), a partir de dados do JRA-55.....	121
--	-----

Figura 68 - Anomalia média mensal da componente meridional do vento (m s ⁻¹) para o período seco (a) e período chuvoso (b), de 1970 a 2003, para A1 e A2, a partir de dados do JRA-55.....	122
Figura 69 - Anomalia média mensal da componente meridional do vento (m s ⁻¹) para a área 1 (a) e área 2 (b), de 1970 a 2003, durante os períodos secos (AMJJAS) e chuvosos (ONDJFM), a partir de dados do JRA-55.....	123
Figura 70- Áreas relativas aos valores mais intensos da anomalia sazonal de precipitação (mm) para os dados do GPCC.....	124
Figura 71- Anomalia média mensal da precipitação (mm) para o período seco (a) e período chuvoso (b), de 1970 a 2003, para A1 e A2, a partir de dados do GPCC.....	125
Figura 72 - Anomalia média mensal da precipitação (mm) para a área 1 (a) e área 2 (b), de 1970 a 2003, durante os períodos secos (AMJJAS) e chuvosos (ONDJFM), a partir de dados do GPCC.....	126
Figura 73 - Áreas relativas aos valores mais intensos da anomalia sazonal de precipitação (mm) para os dados do NCEP-NCAR.....	127
Figura 74 - Anomalia média mensal da precipitação (mm) para o período seco (a) e período chuvoso (b), de 1970 a 2003, para A1 e A2, a partir de dados do NCEP-NCAR.....	128
Figura 75 - Anomalia média mensal da precipitação (mm) para a área 1 (a) e área 2 (b), de 1970 a 2003, durante os períodos secos (AMJJAS) e chuvosos (ONDJFM), a partir de dados do NCEP-NCAR.....	129

Figura 76 - Áreas relativas aos valores mais intensos da anomalia sazonal de precipitação (mm) para os dados do JRA-55.....130

Figura 77 - Anomalia média mensal da precipitação (mm) para o período seco (a) e período chuvoso (b), de 1970 a 2003, para A1 e A2, a partir de dados do JRA-55.....131

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Funções do GrADS usadas na manipulação dos dados.....	37
Tabela 2 - Posições geográficas dos centros anômalos (ciclônicos e anticiclônicos) para as componentes do vento obtidos com a reanálise do JRA-55 e com a reanálise I do NCEP-NCAR.....	55
Tabela 3 - Ocorrência de eventos ENOS (número de meses), El Niño, La Niña e Neutro, em cada subperíodo da ODP, entre 1970 e 2003.....	62
Tabela 4 - Ocorrência de eventos ENOS fortes e muito fortes, segundo os dados de ONI. Valores de ONI maiores que 0,5 são considerados EN e menores que - 0,5, LN (<i>Climate Prediction Center/NOAA</i>).....	64
Tabela 5 - Valores de inclinação da reta de tendência linear relativa às áreas de anomalias intensas de precipitação, para os dados do GPCC, da reanálise I do NCEP-NCAR e reanálise do JRA-55.....	104
Tabela 6 - Coordenadas geográficas das áreas com valores intensos da anomalia sazonal das componentes zonal e meridional do vento para os dados da reanálise I do NCEP-NCAR.....	104
Tabela 7. Áreas relativas aos valores mais intensos da anomalia sazonal das componentes zonal e meridional do vento ($m s^{-1}$) para os dados do JRA-55.....	106
Tabela 8. Áreas relativas aos valores mais intensos da anomalia sazonal de precipitação ($mm dia^{-1}$) para os dados do GPCC.....	108
Tabela 9. Áreas relativas aos valores mais intensos da anomalia sazonal de precipitação ($mm dia^{-1}$) para os dados do NCEP-NCAR.....	110
Tabela 10. Áreas relativas aos valores mais intensos da anomalia sazonal de precipitação ($mm dia^{-1}$) para os dados do JRA-55.....	111

LISTA DE SIGLAS

AS	América do Sul
CDO	Climate Data Operator
OS	Oscilação Sul
EN	El Niño
ENOS	El Niño-Oscilação Sul
GPCC	Global Precipitation Climatology Center
GrADS	Grid Analysis and Display System
hPa	Hectopascal
HS	Hemisfério Sul
HN	Hemisfério Norte
JBN	Jatos de baixos níveis
LN	La Niña
Mgp	Metro geopotencial
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
ODP	Oscilação Decadal do Pacífico
ONI	Oceanic Niño Index

TSM	Temperatura da superfície do mar
U	Componente zonal do vento
V	Componente meridional do vento

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	22
1.1. Motivação.....	27
1.2. Objetivo.....	28
2. MATERIAIS E PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....	28
2.1. Influência da ODP sobre a América do Sul.....	28
2.2. Dados utilizados.....	30
2.3. Análise das fontes de dados.....	32
2.4. Método.....	34
3. RESULTADOS E DISCUSSÕES	37
3.1. Análise comparativa das fontes de dados.....	38
3.2. Análise de correlação linear.....	41
3.3. Circulação atmosférica da América do Sul.....	44
3.4. Frequência de eventos ENOS nas distintas fases da ODP.....	62
3.4.1. Circulação atmosférica para eventos ENOS.....	63
3.5. Variabilidade sazonal da circulação atmosférica na América do Sul	82
3.6. Análise de precipitação em escala sazonal nas fases da ODP.....	94
3.7. Variabilidade sazonal das áreas com anomalias intensas.....	102
4. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	132
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	136
6. ANEXO.....	145

1 INTRODUÇÃO

O clima global sofre grande influência dos fenômenos oceânicos e atmosféricos observados na bacia do oceano Pacífico, o que está, em parte, associado à sua extensa dimensão. O oceano tem um papel importante na modulação da variabilidade climática através das trocas de energia (processos dinâmicos e termodinâmicos) envolvidas na complexa interação com a atmosfera (Kayano e Gerólamo, 2010). As variações climáticas no oceano Pacífico e adjacências resultam da ocorrência de eventos climáticos em várias escalas, em particular, nas escalas interanual e interdecadal. A Oscilação Decadal do Pacífico (ODP) e o El Niño-Oscilação Sul (ENOS) constituem exemplos de variabilidade de grande escala associadas a condições climáticas anômalas em diferentes regiões do globo.

Estudos mostram que nas últimas duas décadas do século XX o oceano Pacífico apresentou um estado semelhante à situação de ocorrência contínua de eventos El Niño (EN). Todavia, apesar de haver, na maior parte do tempo, aquecimento das águas do Pacífico equatorial, o evento EN, tal como é caracterizado, não foi sempre observado neste período. A década de 1990 foi marcada por estudos que tentaram compreender a variabilidade interdecadal no Pacífico. Os impactos significativos de aumento na produção de salmão na costa oeste da América do Norte, no inverno anômalo de 1976 (Mantua e Hare, 2002; Francis e Hare, 1994) foi o primeiro evento associado a Oscilação Decadal do Pacífico. Esses estudos evidenciaram uma alteração climática decenal no Pacífico Norte (Trenberth, 1990; Nitta e Yamada, 1989). Além disso, documentaram importantes variações na escala de tempo decenal envolvendo tanto a atmosfera como o oceano Pacífico Norte e examinaram as ligações com outras partes do globo, tendo buscado mostrar de forma mais detalhada as ligações do Pacífico equatorial com a Oscilação Sul (Trenberth e Hurrell, 1993). Latif e Barnett (1996) compararam a variabilidade de baixa frequência no Pacífico (variações de prazos mais longos) com as saídas das simulações do modelo oceano-atmosfera (CGCM) e concluíram que uma considerável parte da variabilidade decenal pode ser atribuída a um ciclo com período de

aproximadamente 20 anos. Zhang et al. (1997) analisaram a variabilidade climática do Pacífico nas escalas interanual e interdecadal, a partir da Análise de Componentes Principais (ACP), e encontraram uma assinatura espacial similar, em muitos aspectos, àquela associada com o ciclo ENOS. O padrão de Variabilidade Decadal do Pacífico (*Pacific Decadal Variability*) com periodicidade de aproximadamente 20 anos e proposto por Latif e Barnett (1996) foi, posteriormente, denominado Oscilação *inter* (Decadal) do Pacífico por Mantua et al. (1997).

Mantua et al. (1997) encontraram assinaturas de padrões recorrentes de variabilidade climática interdecadal na bacia do oceano Pacífico. Esse padrão climático, definido como oscilação *interdecadal* do Pacífico, foi comparado com o padrão associado ao ciclo do El Niño-Oscilação Sul (Mantua et al., 1997). Trenberth (1997) definiu ENOS como um fenômeno em que a atmosfera e o oceano atuam conjuntamente, a partir do aquecimento (El Niño) e resfriamento (La Niña) na bacia do Pacífico, que se relaciona intrinsecamente com anomalias interanuais nos padrões climáticos globais. Karoly (1989) mostrou que a grande variação interanual da circulação atmosférica nos trópicos está associada aos eventos de ENOS. Para escalas temporais maiores que a interanual, o fenômeno climático dominante tem distribuição espacial semelhante ao ENOS e apresenta efeitos em ambos os hemisférios, sobretudo nas Américas (Zhang et al., 1997). De acordo com Mantua et al. (1997), o padrão de eventos ENOS e da Oscilação Decadal do Pacífico estão claramente relacionados, espacialmente e temporalmente, enquanto variabilidade interanual e interdecadal, respectivamente. Schneider (2005) define a Oscilação Decadal do Pacífico e apresenta um estudo acerca dos impactos da ODP sobre o clima das áreas continentais adjacentes e os padrões de teleconexão dos trópicos. Segundo Schneider (2005),

A Oscilação Decadal do Pacífico é definida como a principal função ortogonal empírica das anomalias da temperatura da superfície do mar do Pacífico Norte, é um índice amplamente utilizado para a variabilidade decenal (p.4355, tradução livre).

Hurrell et al. (2004) mostraram que as oscilações climáticas interdecadais caracterizam-se por alterações na circulação atmosférica em larga escala, sobretudo no Pacífico Norte e América do Norte. Zhang et al. (1997) foram os primeiros a estudar os impactos e influências da ODP no hemisfério sul. Garreaud and Battisti (1999) ampliaram os estudos de Zhang et al. (1997) e identificaram um padrão de circulação atmosférica no hemisfério sul associado às frequências mais baixas.

Vários estudos foram realizados e indicam a propagação da baixa frequência sobre o Pacífico Sul e a perturbação do clima da América do Sul em escalas distintas (Mo e White, 1985; Karoly, 1989; Mo e Higgins, 1998; Nogués-Paegle, 2001, Grimm e Ambrizzi, 2009). Garreaud e Battisti (1999) identificaram um padrão comum de anomalias de temperatura da superfície do mar (TSM) em todo o Pacífico Sul associado com o ENOS e a variabilidade decenal. Tais anomalias parecem ser forçadas por anomalias do fluxo de calor em superfície, associadas com as mudanças na circulação atmosférica.

A ODP caracteriza-se pela oscilação decenal da anomalia da temperatura da superfície do mar na bacia do oceano Pacífico e é compreendida por fases negativas e positivas. Um índice de ODP foi desenvolvido por Hare (1996) e Zhang (1996). Esse índice foi calculado a partir de uma análise de EOF da temperatura “residual” da superfície do mar do Pacífico Norte, para o período de 1900 a 1993, para 20°N ao polo, segundo Mantua e Hare (2002). Estes autores definem com “residual” como a diferença entre anomalias observadas e a anomalia de TSM média global mensal.

Faixas espectrais da TSM na bacia do Pacífico (2-4 anos, 4-8 anos e 8-12 anos) correlacionam-se melhor com a média global de TSM em detrimento das bacias do Atlântico e do Índico (Silva et al., 2018), o que está associado a dimensão da bacia. Mantua e Hare (2002) classificaram a ODP em dois regimes: frio e quente. Segundo esses autores, a fase fria (negativa) da ODP prevalece nos períodos 1880-1924 e 1947-1976; enquanto a fase quente (positiva) compreende os períodos 1925-1946 e 1977 ao meio da década de 1990. A fase

positiva da ODP é caracterizada por anomalias positivas de TSM sobre a porção centro-leste do Pacífico tropical enquanto a fase negativa é caracterizada pelo padrão contrário (Mantua et al., 1997).

Muitos estudos indicam a existência de uma relação entre a variabilidade climática na América do Sul e o fenômeno ENOS (Yeh et al., 2018; Sulca et al., 2018; Takahashi e Martínez, 2017). Porém, outro aspecto da variabilidade climática na América do Sul, destacada nos últimos anos, é sua modulação por fenômenos de mais baixa frequência como a ODP (Andreoli e Kayano, 2005). Considerando-se a variabilidade da circulação atmosférica e precipitação em baixa frequência, recentes estudos têm indicado a associação entre o clima da América do Sul e a Oscilação Decadal do Pacífico (Silva, Drumond e Ambrizzi, 2011; Andreoli e Kayano, 2005; Andreoli, Kayano e Oliveira, 2009; Silva et al., 2016). De acordo com Kayano et al. (2013), os extremos de ENOS são mais (menos) intensos quando estão (fora de fase) em fase com os extremos da ODP, devido às suas modulações construtivas (destrutivas). Segundo Newman et al. (2003), a ODP é dependente do fenômeno ENOS em todas as escalas.

Ropelewski e Halpert (1987; 1992) mostraram influência da TSM tropical do Pacífico associada a ENOS na precipitação e temperatura do ar em níveis baixos da atmosfera em muitas partes do globo. Mo e Nogués-Paegle (2001) mostraram padrões característicos de circulação atmosférica sobre o Pacífico Sul e a América do Sul em escala decenal. Silva et al. (2016) e Mo e Higgins (1998) indicaram a associação entre oscilações de baixa frequência sobre o Pacífico e padrões característicos de circulação sobre a América do Sul.

A precipitação é uma variável que define períodos secos e úmidos no globo. A variabilidade climática de uma região é determinada tanto por aspectos locais (por exemplo, por sua posição a sotavento de relevos acentuados, proximidade aos oceanos) como por teleconexões com áreas remotas. Muitos estudos sobre precipitação na América do Sul mostram a existência de uma relação entre precipitação e anomalias da temperatura da superfície do mar no oceano Pacífico (Coelho et al., 2002). As anomalias da TSM no Pacífico

equatorial estão associadas à propagação de ondas de baixa frequência no oceano Pacífico. Hoskins e Ambrizzi (1993) mostraram o desenvolvimento de trens de onda devido a fontes de calor em torno da atmosfera global. Nas décadas de 1980 e 1990, vários estudos indicaram que a convecção tropical no oceano Pacífico, e a liberação de calor latente associada, dispara um trem de ondas deste setor em direção à América do Sul e o chamaram de modo do Pacífico – América do Sul (*Pacific-South American Mode, PSA*) (Reboita e Santos, 2014). Mo e Higgins (1998) mostraram que o modo PSA apresenta dois padrões distintos: PSA 1 e PSA 2.

“O modo PSA 1 está associado à intensificação da convecção no Pacífico entre 140 °L e 170 °O e convecção suprimida sobre o Oceano Índico. O modo PSA 2 está ligado a anomalias de aquecimento tropical no Pacífico central que se estende de 160 °L a 150 °O ao sul do equador e convecção suprimida no Pacífico Ocidental com um máximo a 20 ° N.” (Mo e Higgins, 1998. p. 1581, tradução livre).

De acordo com Mechoso et al. (2010), a propagação das ondas de Rossby a partir do Pacífico equatorial central e ocidental contribui para o desenvolvimento do PSA (PSA 1). Silva et al. (2016) verificam padrões similares aos do PSA apresentados por Mo e Higgins (1998), para o hemisfério sul, para as distintas fases da ODP, entre 1970 e 2003, através de dados filtrados de altura geopotencial e vento.

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 aos processos de circulação atmosférica na América do Sul durante as distintas fases da ODP. Além disso, esse trabalho pretende avançar ainda mais nos resultados encontrados por Silva et al. (2011). Os eventos ENOS têm um comportamento relativamente complexo em relação ao seu impacto na atmosfera. Representar tal complexidade é um desafio para os atuais sistemas de previsão. O conhecimento sobre o ENOS e seus impactos ajudam a fortalecer as ferramentas de previsão climática usadas no apoio a

sistemas de aviso prévio. Portanto, melhorar nossa compreensão sobre o ENOS é fundamental para reduzir as vulnerabilidades das áreas continentais, tanto as habitadas como as usadas para a agricultura e pecuária.

Apesar do progresso obtido na compreensão da ODP e sua variabilidade, a associação de eventos ENOS com a ODP não é completamente compreendida. Levando-se em consideração estudos sobre mudanças climáticas, alguns autores sugerem que eventos EN têm se intensificado e ocorrido com maior frequência (Yeh et al., 2018) nas últimas décadas, constituindo mais um fator complicador para estabelecer a variabilidade destes fenômenos. O presente trabalho visa avançar a compreensão dos impactos climáticos na América do Sul associados à variabilidade da ODP, através da identificação dos padrões climáticos sazonais associados. Silva et al. (2016) contribuíram para a identificação dos padrões anuais do impacto climático sobre a América do Sul. O presente estudo considera o domínio espacial de toda a América do Sul, com foco em sua porção centro-leste, sendo, portanto, um avanço em relação aos resultados obtidos por Andreoli e Kayano (2005), que analisaram o impacto climático da ODP, a partir da circulação em altos níveis e séries temporais de precipitação mensal, apenas para a região nordeste no continente sulamericano, circunscrito ao período de 1948 a 1999.

1.1 MOTIVAÇÃO

É necessário avançar nos estudos sobre a Oscilação Decadal do Pacífico e sua influência climática sobre a América do Sul, garantindo resultados mais conclusivos que possam contribuir para a previsibilidade climática futura. Este trabalho pretende contribuir com os avanços obtidos por Andreoli e Kayano (2005) e Silva et al. (2016). Os estudos sobre a influência da variabilidade climática interdecadal nos padrões de circulação na América do Sul – de que modo as perturbações de grande escala, os eventos climáticos ENOS e as oscilações da TSM no Pacífico interagem entre si e modulam as variações climáticas e a ocorrência de chuvas na América do Sul, nas escalas sazonal, interanual e de mais baixa frequência, – são extremamente necessários para a

comunidade científica e para a sociedade, em geral. A partir dos resultados obtidos é possível fornecer importantes subsídios para a previsão climática na América do Sul.

1.2 OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é analisar se as diferentes fases da Oscilação Decadal do Pacífico têm influência nos padrões de circulação da América do Sul. Isto é, verificar os padrões anuais e sazonais de precipitação e circulação atmosférica sobre a América do Sul durante as distintas fases da Oscilação Decadal do Pacífico entre 1970 e 2003, para os conjuntos de dados da reanálise I do NCEP-NCAR e da reanálise do JRA-55. Dado que eventos de El Niño e La Niña ocorrem tanto nas fases positivas quanto negativas da ODP, propõe-se evidenciar adicionalmente a influência de eventos ENOS nos padrões de precipitação e circulação atmosférica na América do Sul, em cada fase da ODP.

2 MATERIAIS E PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Os padrões climáticos da América do Sul observados entre o período de 1970 e 2003, que estiveram sob a influência da Oscilação Decadal do Pacífico, são caracterizados a partir de análises da variabilidade temporal de variáveis atmosféricas, nas escalas anual e sazonal. Tanto os dados considerados neste estudo quanto as técnicas e métodos aplicados, são apresentados a seguir.

2.1 INFLUÊNCIA DA ODP SOBRE A AMÉRICA DO SUL

Grande parte dos estudos sobre os efeitos da Oscilação Decadal do Pacífico sobre o hemisfério sul preocuparam-se apenas com os impactos sobre Austrália e Pacífico Sul. Silva et al. (2011) concentraram seus estudos na América do Sul, com base na investigação das diferenças na circulação atmosférica durante o verão austral, em eventos de El Niño nas fases positiva e negativa da ODP. Os fenômenos ENOS e ODP podem possuir efeitos combinados sobre as distribuições de precipitação anômala em algumas regiões da América do Sul (Andreoli e Kayano, 2005). Os resultados de Silva et al. (2016)

mostram que as distintas fases da ODP estão associadas a padrões distintos de propagação de ondas de baixa frequência entre o Pacífico Sul e a América do Sul, propiciando padrões específicos de precipitação sobre a América do Sul. O padrão dipolo de precipitação no setor centro-leste da América do Sul é caracterizado por anomalias anticiclônicas (ciclônicas) centradas no setor sudeste, durante a fase negativa (positiva) da ODP. Por outro lado, eventos de El Niño e La Niña ocorrem tanto nas fases positivas como negativas da ODP. El Niño - Oscilação Sul é um modo natural de variabilidade do Pacífico tropical, com impactos globais na sociedade e nos ecossistemas naturais (Capotondi et al., 2015). Estudos destacam que eventos ENOS diferem em amplitude e padrão espacial e fornecem evidências de que eles mudam ao longo do tempo (Trenberth e Stephaniak, 2001; Larkin e Harrison, 2005; Ashok et al., 2007; Kao e Yu, 2009; Kug et al., 2009; Silva et al., 2020).

Dada a complexidade climática da América do Sul, os estudos das características de circulação de baixa frequência associada a eventos ENOS ocorridos em fases distintas da ODP até o presente não esgotam o tema, dado que os estudos sobre a ODP ainda são recentes na comunidade científica se comparados aos estudos sobre o fenômeno ENOS (Mantua e Hare, 2001), e que existem resultados em direções opostas. Adicionalmente, Hu et al. (2014) apontaram mudanças recentes na variabilidade ENOS no Pacífico tropical, com deslocamento da frequência da ocorrência de eventos ENOS do Pacífico leste para o Pacífico central. Segundo Collins et al. (2010),

“A variabilidade de precipitação no Pacífico equatorial associada ao ENOS é projetada para se intensificar e se mover para leste, e a área do globo com teleconexões ENOS estatisticamente significantes deverá aumentar. A variabilidade da precipitação influenciada pela variabilidade do ENOS em muitas regiões do globo tende a aumentar de 15 a 20%. Um aumento desse tamanho, embora importante, é facilmente mascarado, em nível regional, pela variabilidade multidecadal” (tradução livre).

Recentes estudos apontam que atualmente (anos 2000) a ODP encontra-se na sua fase negativa (Power et al. 1999; Meehl e Hu 2006; Meehl et al., 2009; Dai, 2013; Meehl e Arblaster, 2012), porém, com significativo aumento da temperatura troposférica e oceânica. A análise das anomalias de TSM observadas de 1900 a 1990 mostra várias mudanças no comportamento em escala decenal, com a maior mudança sendo observada nas décadas de 1970 a 1980 (Balmaseda et al., 1995). Kayano e Andreoli (2004) relacionaram a precipitação no nordeste do Brasil com a variabilidade da ODP. Estudos de séries temporais de TSM têm mostrado que os fenômenos ENOS têm mudado suas características ao longo do tempo (Silva et al., 2018). Os resultados apresentados por Silva et al. (2016) apresentam diferenças climáticas médias na América do Sul decorrentes da atuação da ODP em períodos de tempo relativamente longos, abrangendo três fases da ODP, tal como indicado previamente. Silva et al. (2016) e vários outros autores (Latif e Barnett 1994, 1996; Hare e Francis 1995; Mantua e outros, 1997; Minobe 1997; Zhang e outros, 1997; Gershunov e Barnett 1998; Mantua e Hare 2002) consideraram três fases da ODP entre 1970 e 2003 definidas pelos três subperíodos: 1970-1976 (fase negativa), 1977-1996 (fase positiva) e 1997-2003 (fase negativa). Propõe-se, neste trabalho, analisar as características climáticas sobre a América do Sul durante as mesmas fases da ODP consideradas em Silva et al. (2016), dando, porém, ênfase à escala sazonal. Os estudos da evolução da precipitação e circulação atmosférica terão foco no setor centro-leste da América do Sul. Adicionalmente à análise das características médias climáticas de cada subperíodo pré-definido, nas escalas anual e sazonal, será feita uma análise comparativa entre dados oriundos de diferentes conjuntos de reanálises: reanálise I do NCEP-NCAR (Kalnay et al., 1996) e reanálise do JRA-55 (Kobayashi et al., 2015), norte-americana e japonesa, respectivamente.

2.2 DADOS UTILIZADOS

Foram adquiridos dados mensais das condições atmosféricas – altura geopotencial e vento, em 250 e 850 hPa – e de precipitação, para o período de

janeiro de 1970 a dezembro de 2003, dos conjuntos de dados da reanálise I do NCEP-NCAR e da reanálise do JRA-55. O critério para a escolha da fonte de dados foi a abrangência da série temporal e a qualidade dos dados. A reanálise I do NCEP-NCAR foi considerada para permitir a comparação com os resultados obtidos por Silva et al. (2016) na definição de padrões climáticos anuais sobre a América do Sul associados às três fases da ODP durante o período 1970-2003. Os dados da reanálise global japonesa, JRA-55, foram escolhidos para a análise comparativa aos dados do NCEP-NCAR por serem os produtos que melhor representam a precipitação mensal sobre a América do Sul (Harada et al., 2016).

Além dos dados de precipitação da reanálise I do NCEP-NCAR e do JRA-55, foram adquiridos também dados compilados pelo GPCC Global Precipitation Data (Adler et al., 2003) para o mesmo período. Os dados do GPCC compreendem dados observados de conjuntos globais de precipitação. Segundo um estudo sobre a acurácia dos dados de precipitação mensal desenvolvido por Limberger e Silva (2018), o conjunto de dados do GPCC apresentou os maiores valores de correlação linear com a precipitação observada localmente. Verificou-se a possibilidade de considerar os dados do TRMM neste estudo, porém, como não compreendem todo o período de análise, de 1970 a 2003, foram descartados. Um estudo feito por Silva et al. (2013) indica uma concordância média de aproximadamente 97% (significante a $p < 0,05$; teste t-student) entre os dados de precipitação mensal estimada pelo TRMM e 183 estações meteorológicas espalhadas por todo o Brasil. Os conjuntos de dados analisados possuem as seguintes resoluções espaciais: NCEP-NCAR, 2,5 graus; JRA-55, 1,25 graus e GPCC, 1,0 grau.

Para a análise dos eventos ENOS, foram considerados dados do *Oceanic Niño Index* (ONI), do Climate Prediction Center (CDC/NOAA), – (https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php). O ONI é o principal indicador da NOAA para monitorar os eventos de El Niño e La Niña, que são fases opostas do padrão climático El Niño-Oscilação Sul. Este índice apresenta uma média trimestral da anomalia de TSM e indica

que o Pacífico tropical centro-leste (região Niño 3.4) está significativamente mais quente do que o normal quando os valores são +0,5 ou superior. As condições de La Niña existem quando o ONI é - 0,5 ou inferior, indicando que a região está mais fria do que o normal. Os eventos ENOS são classificados em eventos Fracos (com uma anomalia de 0,5 a 0,9 TSM), Moderados (1,0 a 1,4), Fortes (1,5 a 1,9) e Muito Fortes ($\geq 2,0$).

2.3 ANÁLISE DAS FONTES DE DADOS

Até a década de 1990, havia grande dificuldade em se garantir a precisão das previsões de tempo e dos estudos da atmosfera devido, em parte, à baixa quantidade e qualidade de informações disponíveis. Regiões remotas e pouco habitadas possuem poucas estações meteorológicas para coleta dessas informações, muitas vezes precisando de manutenção. Sabendo desses problemas, diversos centros de previsão do tempo e clima (NCEP, NCAR, ECMWF, JRA, DWD) passaram a desenvolver projetos científicos para o desenvolvimento de conjuntos compostos pelos dados de análise que permitissem o estudo mais preciso da atmosfera, cobrindo falhas de dados nas dimensões temporal e espacial. Os conjuntos de reanálises constituem-se de dados gerados por modelos numéricos para o instante mais recente, que representa com maior precisão a condição atmosférica de cada instante temporal, para todo o planeta. Executando-se o modelo numérico para uma série temporal pretérita, é possível gerar um conjunto de dados associados a cada instante temporal das condições atmosféricas mais próximas da realidade observada (Kalnay et al., 1996; Kistler et al., 2001).

Considerando os conjuntos de dados de reanálises, foram verificadas as diferenças entre dois conjuntos de reanálise: reanálise I do NCEP-NCAR (1ª geração) e reanálise do JRA-55 (3ª geração). Os dados de reanálise I do NCEP-NCAR, obtidos através do site da *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA) - <https://psl.noaa.gov/data/gridded/data.ncep.reanalysis.html> - consistem de dados de circulação atmosférica e precipitação desde 1948 até o presente. Um

grande subconjunto desses dados está disponível no site da NOAA em seu formato original, com resolução temporal de seis horas, além de médias diárias. Os dados usados no presente estudo consideraram apenas as séries temporais das médias mensais das componentes do vento, altura geopotencial e precipitação.

Os dados do NCEP-NCAR foram escolhidos por apresentarem dados globais e, também, por sua extensão temporal, permitindo a caracterização da ODP e a comparação com os resultados obtidos em Silva et al. (2016; 2020). A reanálise I do NCEP-NCAR, por ter sido o primeiro conjunto de reanálise colocado à disposição da comunidade científica, é muito citado em importantes publicações. No entanto, em comparação com os dados do JRA-55, os dados da reanálise I do NCEP-NCAR apresentaram algumas limitações, provavelmente por ser uma reanálise de 1994 (mais antiga) e apresentar resolução espacial de 2,5 graus. Os dados do JRA-55, como já mencionado, foram gerados para a resolução espacial de 1,25 graus. Em relação aos dados do GPCC, os resultados mostram que a precipitação do conjunto da reanálise I do NCEP/NCAR apresenta amplitude sazonal bastante inferior à observada em outros conjuntos de dados – CRU e GPCC (Limberger e Silva, 2018), principalmente em áreas tropicais.

Além do NCEP-NCAR, foram considerados os dados do JRA-55. Esta fonte de dados constitui uma reanálise de terceira geração, mais longa (de 1958 até o presente), que usa um sistema de observação completo em relação ao NCEP-NCAR. Comparado à análise de segunda geração, JRA-25, o JRA-55 usa um esquema de assimilação de dados mais avançado, com maior resolução espacial, uma nova correção de viés variacional para dados de satélite e várias fontes de dados observacionais adicionais, incluindo homogeneização de observações de temperatura de radiossonda e o reprocessamento de dados de satélite nos principais centros de satélites meteorológicos. Entre as melhorias do produto estão os vieses reduzidos na temperatura estratosférica e chuvas na Amazônia e maior consistência temporal na análise de temperatura. Alguns

viéses notáveis persistem, incluindo um viés seco na troposfera superior e média e um viés quente na troposfera superior (Kobayashi et al., 2015).

Diferentemente do NCEP-NCAR e do JRA-55, os dados adquiridos do Centro Global de Climatologia e Precipitação (GPCC) são constituídos por observações feitas em estações meteorológicas convencionais e automáticas, que permitem análises globais de precipitação para o monitoramento do clima global. O conjunto original de dados do GPCC apresenta dados de 1901 a 2013, com base em 67.200 estações meteorológicas espalhadas por todo o mundo, implantadas há 10 anos ou mais, com resolução temporal de 2,5 graus. Os dados usados no presente estudo contêm os totais mensais em uma grade regular com resolução espacial de 1 grau. A correlação linear entre os dados do GPCC e da reanálise I do NCEP-NCAR é alta e significativa em várias áreas do globo, o que demonstra que a utilização de dados reconstruídos e dispostos em grades regulares pode ser aplicada com alta confiabilidade.

2.4 MÉTODO

A caracterização climática da circulação atmosférica da América do Sul e do Oceano Pacífico foi realizada a partir da filtragem de dados de altura geopotencial e componentes do vento, para baixos (850 hPa) e altos níveis (250 hPa) atmosféricos. Além da circulação, foi verificada a variabilidade da precipitação sobre a América do Sul. As análises foram elaboradas a partir de anomalias calculadas para as distintas fases da ODP em relação à média para todo o período, 1970-2003, de acordo com os subperíodos propostos por Silva et al. (2016), 1970-1976, 1977-1996, 1997-2003. Os padrões climáticos associados aos períodos de EN e LN foram construídos a partir dos meses em que foram observados os respectivos eventos, de acordo com o ONI.

Os dados de circulação atmosférica e de precipitação considerados neste trabalho foram filtrados pela técnica de filtragem de Lanczos (Duchon, 1979) de forma a reter fenômenos da baixa frequência. A tendência linear foi removida de modo a analisar apenas a variabilidade climática “natural” associada à ODP. A

tendência linear indica a variação da variável no espaço de tempo, através da análise do coeficiente angular. A remoção da tendência linear, portanto, é resultado da subtração do coeficiente angular com a série temporal. A sazonalidade também foi removida, a partir da subtração da média climatológica para cada mês do ano de cada valor da série temporal, de forma a reter apenas a variabilidade interanual das séries temporais dos dados originais. Assim, pretende-se identificar os padrões climáticos anuais e sazonais associados à propagação de ondas de baixa frequência, na escala decenal, incluindo a ocorrência de padrões de eventos de EN e LN nas fases positivas e negativas da ODP. Os dados da altura geopotencial foram usados para identificar regiões atmosféricas mais ou menos favoráveis à formação de instabilidades atmosféricas. Após a sistematização dos dados, foram elaborados mapas de anomalias médias das variáveis consideradas para as fases distintas da ODP e para os padrões de EN e LN ocorridos em cada uma das fases da ODP, nas escalas anual e sazonal. Foram elaborados, também, gráficos de dispersão para verificar o quanto a estação seca se diferencia da estação úmida.

A manipulação dos dados e a elaboração dos mapas e gráficos foi realizada com o programa GrADS (Grid Analysis and Display System, Doty, 1995), CDO (Climate Data Operator, Schulzweida, 2019) e o Excel. Algumas funções estatísticas e matemáticas foram realizadas com o auxílio dos scripts do Dr. Bin Guan (cientista da NASA Jet Propulsion laboratory, <https://science.jpl.nasa.gov/people/bguan/>) disponibilizados em um acervo digital (<http://bguan.bol.ucla.edu/bGASL.html>). A construção das figuras e mapas foi realizada em várias etapas, desde a obtenção, organização e manipulação dos dados até a análise dos produtos finais. As etapas do desenvolvimento do trabalho estão listadas a seguir, sendo as principais funções usadas no GrADS, listadas na Tabela 1.

1ª- Definição do tamanho da série temporal e das fontes de dados: o período de análise deste trabalho compreende os anos de 1970 a 2003 e, a partir das séries temporais disponíveis, foram selecionados os dados do GPCC e das reanálises I do NCEP-NCAR e do JRA-55.

2ª- Cálculos matemáticos básicos: os valores absolutos das variáveis foram transformados em anomalias e a sazonalidade dos dados foi retirada (*deseason.gs*). Desta forma, a série resultante apresenta valores positivos e negativos, que mostram os meses que estão acima ou abaixo da média climatológica para cada localidade.

3ª- Remoção da tendência linear e sazonalidade dos dados: a partir das funções *ltrend.gs* e *deseason.gs* do GrADS, foi possível remover a tendência linear e a sazonalidade dos dados, respectivamente. Estas funções são usadas quando não temos interesse em estudar a tendência de longo prazo (*ltrend.gs*), retraindo apenas a variabilidade “natural”, e a variabilidade sazonal dos dados.

4ª- Filtragem dos dados: foi aplicado o filtro de Lanczos (Duchon, 1979) aos dados aqui apresentados, depois de ter sido retirada a tendência de longo prazo e a sazonalidade, de forma a reter fenômenos da baixa frequência, através do script *lanczos.gs*, colocado à disposição no acervo digital do Dr. Bin Guan (<http://bguan.bol.ucla.edu/bGASL.html>).

5ª- Transformação de dados mensais em anuais e sazonais: este trabalho apresenta uma análise detalhada de gráficos espaciais e temporais nas escalas mensal, sazonal e anual, com o objetivo de identificar padrões semelhantes. Para a transformação dos dados mensais em sazonal ou anual foi usado o CDO, através das funções “*ymomean*”, “*yearmean*” e “*seldate*”.

6ª- Cálculo da correlação linear: foram elaborados mapas de correlação linear para verificar a relação existente entre duas fontes de dados, obtendo como resultados o sinal e a intensidade do coeficiente de correlação linear. A função “*tcor*” do GrADS foi usada neste caso.

7ª- Significância estatística: foi aplicado o teste estatístico de hipótese (T-Student) para definir a significância estatística dos mapas de anomalias médias. Considerou-se significância estatística para p igual a 0.1.

8ª- Análise do comportamento da atmosfera em anos de ENOS: foram identificados os anos de extremos climáticos e influência no comportamento da atmosfera nesses períodos.

9ª- Foram elaborados gráficos de dispersão para os dados de vento e de precipitação a partir das áreas de anomalias mais intensas, definidas como U1 e U2 para dados de vento zonal (JRA-55 e reanálise I do NCEP-NCAR); V1 e V2 para dados de vento meridional (JRA-55 e reanálise I do NCEP-NCAR); A1 e A2 para dados de precipitação do GPCC; B1 e B2 para dados de precipitação da reanálise I do NCEP-NCAR e C1 e C2 para dados de precipitação da reanálise do JRA-55.

Tabela 1. Funções do GrADS usadas na manipulação dos dados.

<i>Scripts usados (Bin Guan GrADS http://bguan.bol.ucla.edu/bGASL.html)</i>	<i>Função</i>
deseason.gs	Retira a sazonalidade de uma série temporal
lanczos.gs	Filtra os dados de forma a ressaltar o comportamento do sinal em determinada frequência
ltrend.gs	Define a tendência linear de uma série temporal
rmean.gs	Calcula média móvel para uma série temporal
save.gs	Salva dados em arquivo
vector.gs	Plota vetores

3 RESULTADOS E DICUSSÕES

A apresentação dos resultados subdivide-se em sete partes. Na primeira, seção 3.1, apresentamos uma análise comparativa das fontes de dados. Na seção 3.2, é realizada uma análise de correlação linear entre as diferentes fontes de dados. Na seção 3.3 é analisada a influência da ODP na circulação atmosférica da América do Sul. A seção 3.4 analisa a frequência de eventos

ENOS nas fases da ODP entre 1970 e 2003 em escala anual; já na seção 3.5, é apresentado o estudo da variabilidade sazonal da circulação atmosférica na América do Sul enquanto a seção 3.6 mostra as análises sazonais para os dados de precipitação. A última seção, 3.7, mostra a variabilidade sazonal das áreas com anomalias mais intensas.

3.1 ANÁLISE COMPARATIVA DAS FONTES DE DADOS

A análise das características médias climáticas nas escalas anual e sazonal será feita com base em dois conjuntos de dados oriundos de diferentes reanálises: reanálise I do NCEP/NCAR e JRA-55. Projetos de intercomparação de reanálises (AMIP, CMIP) são importantes para a validação de dados gerados por modelos numéricos, para a identificação de possíveis incongruências, para o aprofundamento do conhecimento dos processos físicos associados a diferentes fenômenos atmosféricos. O projeto CMIP6 (Eyring, V., Bony, S., Meehl, G. A., Senior, C. A., Stevens, B., Stouffer, R. J., and Taylor, K. E, 2016) permite a comparação de simulações realizadas por 33 modelos numéricos, incluindo o modelo do NCEP-NCAR que gerou a reanálise I (Anexo 1).

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, tradução livre)

A análise em modelagem numérica para a previsão de tempo permite a verificação dos dados observados (tanto em superfície como em altitude, além dos obtidos por sensoriamento remoto). É feita, inicialmente, uma análise de consistência dos dados e de interpolação, para depois ajustar os dados às equações matemáticas que descrevem os processos dinâmicos e termodinâmicos da atmosfera no modelo numérico.

Nos sistemas de assimilação de dados em modelagem numérica, os produtos são criados por meio do seguinte ciclo de análise: primeiro, aos modelos de previsão são fornecidos dados de condição inicial da análise mais recente para gerar os campos de fundo e forçantes atmosféricas necessárias; em seguida, com base nesses campos e observações, os campos de análise são gerados para formar o estado recente mais plausível da atmosfera. Esses campos são usados como condição inicial para a primeira previsão. Devido à prática de correção observacional para previsões (também conhecida como incremento de análise), o balanço de energia não é exatamente preservado na reanálise. A introdução do incremento de análise também cria um sumidouro ou fonte artificial no balanço hídrico o que, por sua vez, leva a problemas de *spin-up* (em que a precipitação é insuficiente imediatamente após o início das previsões e, em seguida, aumenta gradualmente) ou problemas de *spin-down* (o reverso) com o ciclo hidrológico. É necessário muito cuidado quando as variáveis hidrológicas de reanálises são usadas, especialmente para as variáveis como precipitação e evaporação (Bosilovich et al., 2011; Trenberth et al., 2011).

A reanálise pode produzir conjuntos de dados para vários tipos de variáveis meteorológicas. Portanto, a comparação dos resultados obtidos a partir da reanálise I do NCEP-NCAR e da reanálise do JRA-55, além da comparação entre os conjuntos de dados de precipitação (GPCC, NCEP-NCAR e JRA-55) tem como objetivo aprofundar o conhecimento sobre a precisão de cada uma das fontes.

Os mapas (Figuras 1 e 2) mostram que o JRA-55 é muito mais bem correlacionado com o GPCC do que o NCEP, o que justifica seu uso para avaliar o impacto da ODP na América do Sul. No caso do JRA-55, há uma área muito maior da América do Sul mais bem correlacionada com os dados do GPCC do que os dados do NCEP-NCAR. Os dados da reanálise I do NCEP-NCAR são usados para que se possa comparar os resultados obtidos no presente estudo com aqueles obtidos por Silva et al. (2016; 2020).

Figura 1. Correlação linear entre a precipitação média mensal (mm dia^{-1}) do GPCC e da reanálise I do NCEP-NCAR, durante o período de 1970 a 2003.

Figura 2. Correlação linear entre a precipitação média mensal (mm dia^{-1}) da reanálise do JRA-55 e do GPCC, durante o período de 1970 a 2003.

3.2 ANÁLISE DE CORRELAÇÃO LINEAR

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 3, 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 (1º e 3º subperíodos) e anomalia ciclônica (2º subperíodo) durante a fase positiva da ODP. Este padrão é também encontrado para os dados do JRA-55 (Figura 4), por Mo e Nogués-Peagle (2001), Mechoso (2000), Zamboni et al. (2010) e Silva et al. (2016), embora estes tenham considerado períodos ligeiramente distintos dos aqui considerados. Os resultados mostram respectivamente anomalias anticiclônicas e ciclônicas centradas na região centro-leste da América do Sul durante as fases negativa e positiva da ODP, em níveis troposféricos baixos e altos.

Figura 3. Anomalia de linha de corrente ($m^2 s^{-1}$) em 850 hPa, em relação ao período de 1970 a 2003, para os três subperíodos considerados, 1970-1976, 1977-1996, 1997-2003, para dados da reanálise I do NCEP/NCAR.

Figura 4. Anomalia de linha de corrente ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$) em 850 hPa, em relação ao período de 1970 a 2003, para os três subperíodos considerados, 1970-1976, 1977-1996, 1997-2003, para dados da reanálise do JRA-55.

Todo o setor leste da América do Sul sofre a influência dos alísios 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 decenal 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).

A previsibilidade sazonal na América do Sul varia muito. A alta previsibilidade das chuvas sazonais do Nordeste, e em certa medida no sul do Brasil, por modelos contrastam com a baixa reprodutibilidade da chuva sazonal no sudeste Brasil, indicando que diferentes processos operam de forma a modular a variabilidade da precipitação em escalas de tempo sazonais sobre essas regiões (Marengo et al., 2006). A Figura 5 mostra a distribuição espacial do coeficiente de correlação linear calculado na escala sazonal, indicando uma boa correlação entre os dados na região sudeste da América do Sul, tanto para os dados do NCEP-NCAR como para os dados do JRA-55. Uma vez que as

anomalias diferem entre os meses, a região do sudeste da América do Sul mostra valores positivos de correlação linear durante as fases secas e úmidas. Na região nordeste da América do Sul, a correlação linear entre os dados do GPCC e reanálise I do NCEP-NCAR apresenta valores negativos. Para os cálculos feitos com os dados do JRA-55 é possível ver valores positivos baixos ou negativos do coeficiente de correlação para a região nordeste, indicando que os modelos numéricos usados para se obter as reanálises do NCEP-NCAR e as do JRA-55 apresentam maior dificuldade em representar a precipitação mensal nestas áreas. Por outro lado, observamos valores mais altos do coeficiente de correlação tanto para dados de precipitação do JRA-55 como para os dados da reanálise I do NCEP-NCAR. O Pacífico leste apresenta dados de correlação para a estação úmida maiores do que para a estação seca, para as duas reanálises comparadas sendo, contudo, o aumento mais expressivo para os dados do JRA-55.

Figura 5. Correlação linear entre os dados de precipitação mensal do GPCC e da reanálise do JRA-55 (a,b) e reanálise I do NCEP-NCAR (c,d) durante os períodos (a,c) secos (abril a setembro) e (b,d) úmidos (outubro a março) de 1970 a 2003.

3.3 CIRCULAÇÃO ATMOSFÉRICA DA AMÉRICA DO SUL

Os valores médios das componentes zonal e meridional do vento em 850 hPa, para a reanálise I do NCEP-NCAR e JRA-55, mostrados nas Figuras 6 e 7, apresentam muitas semelhanças entre si, para os três subperíodos

considerados (1970-1976, 1977-1996, 1997-2003). 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 7) 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 ($O(v) \sim 1 \text{ m s}^{-1}$; $O(u) \sim 10 \text{ m s}^{-1}$). O caráter ondulatório da atmosfera pode ser identificado pelos valores positivos e negativos da componente meridional na direção zonal. A partir da componente meridional, observa-se o escoamento médio em níveis baixos, 850 hPa, ao norte da América do Sul, formado pelos alíseos. O sinal negativo médio da componente meridional do vento sobre a América do Sul deve-se principalmente à convergência observada durante os meses de verão, devido ao aquecimento diabático do continente, o que não é observado nas Figuras 6 e 7. A componente meridional do vento permite observar diferenças maiores do que a componente zonal. Por exemplo, no setor leste do Pacífico tropical sul, é possível verificar um sinal positivo médio da componente meridional, indicando escoamento de sul, enquanto que no Pacífico central sul, o sinal médio é negativo, indicando movimentos de norte. A composição do vento com os dois sinais contrários, a leste e oeste do Pacífico está associada a presença da alta pressão subtropical do Pacífico Sul. Comportamento similar é observado no Atlântico Sul. No hemisfério norte, sobre o Pacífico e Atlântico, observamos comportamentos análogos aos observados no hemisfério sul, constituindo as áreas de alta pressão subtropical do Pacífico e do Atlântico.

Tanto no Pacífico como no Atlântico, sul e norte, observamos valores menores da componente meridional do vento nos dados da reanálise I do NCEP-NCAR em relação aos dados da reanálise do JRA-55. As diferenças observadas, entre as fontes de dados, na componente zonal não são tão intensas quanto às observadas na componente meridional. A Figura 8 (a-f) exibe a média do vetor vento, na dimensão horizontal, para os mesmos subperíodos de ODP, para dados da fonte japonesa, JRA-55, e da reanálise I do NCEP-NCAR. De forma geral, os padrões médios de circulação atmosférica são semelhantes entre as duas fontes de dados comparadas.

Figura 6. 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 JRA-55 (à esquerda) e do NCEP-NCAR (à direita).

Figura 7. Média da componente meridional do vento ($\times 0.2 \text{ m s}^{-1}$), em 850 hPa, para os períodos (a) 1970-1976, (b) 1977-1996 e (c) 1997-2003, para os conjuntos de reanálise do JRA-55 (à esquerda) e do NCEP-NCAR (à direita).

(a)

Figura 8. Média do vento horizontal (m s^{-1}), em 850 hPa, para o período de 1970-1976 para o conjunto de reanálise do JRA-55.

(b)

Figura 8. Média do vento (m s^{-1}), em 850 hPa, para o período de 1977-1996 para o conjunto de reanálise do JRA-55.

(c)

Figura 8. Média do vento (m s^{-1}), em 850 hPa, para o período de 1997-2003 para o conjunto de reanálise do JRA-55.

(d)

Figura 8. Média do vento horizontal (m s^{-1}), em 850 hPa, para o período de 1970-1976 para o conjunto de reanálise I do NCEP-NCAR.

(e)

Figura 8. Média do vento horizontal (m s^{-1}), em 850 hPa, para o período de 1977-1996 para o conjunto de reanálise I do NCEP-NCAR.

(f)

Figura 8. Média do vento (m s^{-1}), em 850 hPa, para o período de 1997-2003 para o conjunto de reanálise I do NCEP-NCAR.

A Figura 9 indica a média de altura geopotencial em baixos níveis (850 hPa) para as três fases da ODP analisadas. Em geral, observamos que os valores médios da altura geopotencial, em 850 hPa, entre as duas fontes de

dados, são semelhantes em todo o globo terrestre. Pelas duas fontes de dados é possível observar que a região Antártica é mais fria do que a região Ártica, na média anual, apresentando valores menores da altura geopotencial.

Figura 9. Média anual da altura geopotencial (m), em 850 hPa, para os períodos (a) 1970-1976, (b) 1977-1996 e (c) 1997-2003, para os conjuntos de reanálise do JRA-55 (à esquerda) e da reanálise I do NCEP-NCAR (à direita).

As Figuras 10 e 11 mostram, respectivamente, a média da componente zonal e meridional do vento, em 850 hPa, apenas para o domínio da América do Sul. Observando o comportamento da componente zonal (Figura 10), nos três subperíodos, nota-se concordância geral entre as duas reanálises. Observa-se, para ambos os dados, escoamento médio de oeste atingindo a região central da Argentina, Paraguai, Bolívia, Uruguai e sul do Brasil. O padrão espacial da

componente meridional do NCEP-NCAR aproxima-se bastante do padrão obtido com os dados do JRA-55 sendo, porém, menos intenso (Figura 11). Apesar de o padrão geral ser parecido, há diferenças. Em geral, os valores da componente meridional são maiores nos dados do JRA-55 do que nos dados do NCEP-NCAR, tanto para as áreas com componente de norte como para as áreas com componente de sul. É possível ver sobre a Bolívia ventos de oeste mais intensos, comparando os dados entre as duas reanálises. É possível observar que as diferenças mais significativas da componente meridional do vento são: as diferenças sobre os Andes e sobre a Bolívia e a intensidade dos ventos de sul no Atlântico Equatorial (sobre o Nordeste brasileiro) - que fazem parte dos alíseos de sudeste e da alta pressão do Atlântico Sul nesta região. Assim, enquanto a componente zonal dos dados do JRA-55 para o domínio da América do Sul é, em geral, menos intensa do que a da reanálise I do NCEP-NCAR, a componente meridional é mais intensa nos dados do JRA-55.

Figura 10. 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 JRA-55 e da reanálise I do NCEP-NCAR.

Figura 11. Média anual da componente meridional do vento ($\times 0,2 \text{ m s}^{-1}$), em 850 hPa, sobre a América do Sul, para os períodos 1970-1976, 1977-1996 e 1997-2003, para os conjuntos de reanálise do JRA-55 e da reanálise I do NCEP-NCAR.

As Figuras 12 e 13 representam, respectivamente, a anomalia das componentes zonal e meridional do vento em 850 hPa, em relação ao período 1970-2003. Com base nos mapas, verifica-se que os dados oriundos do NCEP-NCAR têm valores mais intensos das anomalias do vento horizontal u e v em comparação com os dados da fonte japonesa, JRA-55. Os campos médios da componente meridional do vento analisados a partir dos dados da reanálise I do NCEP-NCAR apresentam, para os três subperíodos considerados, um padrão 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. Tais padrões são também identificados a partir dos dados do JRA-55 apesar de ser identificada variação na posição dos valores máximos e mínimos em relação aos dados do NCEP-NCAR. Para os três subperíodos analisados, observou-se, portanto, que o JRA-55 exibe o padrão dipolo verificado com os dados do NCEP-NCAR, todavia, os dados do JRA-55 estão deslocados espacialmente. Na verdade, existe um tripolo, pois, mais ao norte, as anomalias tanto da componente zonal como da meridional se invertem. Tanto as anomalias do NCEP-NCAR quanto a dos dados do JRA-55, juntas, mostram uma anomalia anticiclônica (ciclônica) durante as fases negativas (positiva).

Tabela 2. Posições geográficas dos centros anômalos (ciclônicos e anticiclônicos) para as componentes do vento obtidos com a reanálise do JRA-55 e com a reanálise I do NCEP-NCAR.

	PDO < 0		PDO > 0	
	JRA-55	NCEP-NCAR	JRA-55	NCEP-NCAR
<i>comp-u</i>	Centro do estado do MS (55°O; 22°S)	NO de Goiás (50°O; 15°S)	Centro-sul do MS Inserir (55°W, 17°S)	NO de Goiás (50°O; 15°S)
<i>comp-v</i>	Extremo leste do Paraguai (55°O; 23°S)	(50°O; 15°S)	Extremo leste do Paraguai (55°O; 23°S)	(50°O; 15°S)

Figura 12. Anomalia média da componente zonal do vento ($\times 0.5 \text{ m s}^{-1}$), em 850 hPa, para os subperíodos 1970-1976, 1977-1996 e 1997-2003, para dados do JRA-55 e NCEP-NCAR.

Figura 13. Anomalia média da componente meridional do vento ($\times 0,5 \text{ m s}^{-1}$), em 850 hPa, para os períodos 1970-1976, 1977-1996 e 1997-2003, para dados do JRA-55 e NCEP-NCAR.

Ainda analisando os subperíodos, o mapa de altura geopotencial para os níveis altos da troposfera, 250 hPa, Figura 14, 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 (Figuras 14, 15). 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 (Figuras 14 e 15).

Figura 14. Anomalia média da altura geopotencial (mgp), em 250 hPa, para os períodos (a) 1970-1976, (b) 1977-1996 e (c) 1997-2003, para os dados da reanálise I do NCEP-NCAR.

Figura 15. Anomalia média da altura geopotencial (mgp), em 250 hPa, para os períodos (a) 1970-1976, (b) 1977-1996 e (c) 1997-2003, para os dados da reanálise do JRA-55.

É possível verificar o padrão de dipolo entre a região nordeste e sudeste da América do Sul (Figura 16), 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, que se estendem na direção meridional, do que as anomalias observadas com os dados do JRA-55, que apresentam valores mais intensos estendidos na direção zonal.

Figura 16. Anomalia média da altura geopotencial (mgs), em 250 hPa, sobre a América do Sul, para os períodos (a) 1970-1976, (b) 1977-1996 e (c) 1997-2003, para os dados do JRA-55 e da reanálise I do NCEP-NCAR.

3.4 FREQUÊNCIA DE EVENTOS ENOS NAS DISTINTAS FASES DA ODP

Buscamos investigar a ocorrência de eventos ENOS em cada fase da Oscilação Decadal do Pacífico, bem como caracterizar os padrões climáticos interanuais na América do Sul associados à ODP. A taxa de ocorrência dos fenômenos EN e LN foi obtida a partir dos dados de ONI durante os três subperíodos da ODP entre 1970 e 2003 (1970-1976, 1977-1996 e 1997-2003). O impacto climático sobre a AS foi definido para os dados de vento em 850 hPa e precipitação dos conjuntos de dados das reanálises NCEP-NCAR I, JRA-55 e dos dados do GPCC.

Os resultados indicam maior ocorrência de eventos LN durante as fases negativas da ODP, 1970-1976 e 1997-2003, e maior ocorrência de eventos EN na fase positiva da ODP, 1977-1996. Durante a primeira fase negativa da ODP, foram observados 56 meses com eventos LN e 16 meses com eventos EN, enquanto que na fase negativa estabelecida no período 1997-2003, foram observados 32 meses com LN e 22 meses com EN. Durante a fase positiva da ODP, 1977-1996, foram observados 65 meses com eventos EN e 37 meses com eventos LN. Os eventos neutros também foram verificados, uma vez que considerar os eventos neutros permite entender outros fatores de variabilidade que atuem mais. Estes resultados estão ilustrados na Tabela 3 e na Figura 17. Dessa forma, podemos sugerir que as fases negativas e positivas da ODP estão respectivamente associadas a ocorrência de eventos frios e quentes de ENOS.

Tabela 3. Ocorrência de eventos ENOS (número de meses), El Niño, La Niña e Neutro, em cada subperíodo da ODP, entre 1970 e 2003.

	ODP negativa	ODP positiva	ODP negativa
	1970-1976	1977-1996	1997-2003
El Niño	16 (19%)	65 (27,1%)	22 (26,2%)
La Niña	53 (63,1%)	37 (15,4%)	32 (38,1%)
Neutro	15 (17,9%)	138 (57,5%)	30 (35,7%)

Figura 17. Frequência de eventos ENOS na segunda fase da ODP, 1977-1996, computada a partir dos dados de ONI.

3.4.1 Circulação atmosférica para eventos ENOS

A análise anual do comportamento da circulação do ar (componentes zonal e meridional do vento) permite verificar os anos que mais contribuíram para determinar o padrão médio dos subperíodos 1970-1976, 1977-1996 e 1997-

2003. Nesta seção, são analisados os mapas médios anuais construídos com dados da reanálise I do NCEP-NCAR e do JRA-55 e a influência dos eventos EN e LN na circulação atmosférica. A Tabela 4 mostra os anos de ocorrência eventos ENOS fortes e muito fortes.

Tabela 4. Ocorrência de eventos ENOS fortes e muito fortes, segundo os dados de ONI. Valores de ONI maiores que 0,5 são considerados EN e menores que - 0,5, LN (*Climate Prediction Center/NOAA*).

Ano/período	Evento	Ano/período	Evento
1970-1971	La Niña	1988-1989	La Niña
1972-1973	El Niño	1991-1992	El Niño
1973-1974	La Niña	1995-1996	La Niña
1975-1976	La Niña	1997-1998	El Niño
1982-1983	El Niño	1998-1999	La Niña
1987-1988	El Niño	1999-2000	La Niña

As Figuras 18, 19 e 20 indicam a anomalia média anual para a componente zonal do vento em 850 hPa, enquanto as Figuras 21, 22 e 23 referem-se à componente meridional em 850 hPa para os dados da reanálise I do NCEP-NCAR. Já as Figuras 24, 25 e 26 indicam a anomalia média anual para a componente zonal do vento em 850 hPa, enquanto as Figuras 27, 28 e 29 referem-se à componente meridional em 850 hPa para os dados da reanálise do JRA-55.

Em geral, as fases negativas da ODP estão associadas a ventos meridionais de norte mais fortes na região central do continente sulamericano e ventos zonais de leste mais fortes na região do Nordeste. As anomalias da componente zonal e meridional do vento sobre a América do Sul nos anos de 1970 a 1976, seguem o padrão médio do primeiro subperíodo, fase negativa da ODP. No 2º subperíodo, observamos que, para as duas componentes do vento analisadas, os anos de 1977 a 1984, exceto o ano de 1979 são os que mais se afastam do padrão espacial médio, sendo, portanto, os anos posteriores a 1984

os que caracterizam o padrão da fase positiva da ODP. Para o 3º subperíodo, apesar de todos os anos apresentarem padrões com anomalias negativas ao norte e negativas ao sul da América do Sul, exceto o ano de 1997, a posição dos máximos valores de anomalias apresenta uma variabilidade maior do que no primeiro período de ODP negativa. Para os dados zonais do JRA-55, os anos de 1997 e 2000 apresentam um padrão distinto da média (Figura 26).

Figura 18. Anomalia média 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. Os anos identificados em verde (laranja) representam anos de La Niña (El Niño).

Figura 19. Anomalia média 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. Os anos identificados em verde (laranja) representam anos de La Niña (El Niño).

Figura 20. Anomalia média 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. Os anos identificados em verde (laranja) representam anos de La Niña (El Niño).

Figura 21. Anomalia média 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. Os anos identificados em verde (laranja) representam anos de La Niña (El Niño).

Figura 22. Anomalia média 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. Os anos identificados em verde (laranja) representam anos de La Niña (El Niño).

Figura 23. Anomalia média 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. Os anos identificados em verde (laranja) representam anos de La Niña (El Niño).

Figura 24. Anomalia média anual da componente zonal do vento (m s^{-1}), em 850 hPa, para os anos do 1º período, 1970-1976, para os dados do JRA-55. Os anos identificados em verde (laranja) representam anos de La Niña (El Niño).

Anomalia comp zonal u (1977-1996)

Anomalia de TSM observada na região Niño 3.4

Figura 25. Anomalia média anual da componente zonal do vento (m s^{-1}), em 850 hPa, para os anos do 2º período (1977-1996), para os dados do JRA-55. Os anos identificados em verde (laranja) representam anos de La Niña (El Niño).

Figura 26. Anomalia média anual da componente zonal do vento (m s^{-1}), em 850 hPa, para os anos do 3º período (1997-2003), para os dados do JRA-55. Os anos identificados em verde (laranja) representam anos de La Niña (El Niño).

Figura 27. Anomalia média anual da componente meridional do vento (m s^{-1}), em 850 hPa, para os anos do 1º período (1970-1976), para os dados do JRA-55. Os anos identificados em verde (laranja) representam anos de La Niña (El Niño).

Figura 28. Anomalia média anual da componente meridional do vento (m s^{-1}), em 850 hPa, para os anos do 2º período (1977-1996), para os dados do JRA-55. Os anos identificados em verde (laranja) representam anos de La Niña (El Niño).

Figura 29. Anomalia média anual da componente meridional do vento (m s^{-1}), em 850 hPa, para os anos do 3º período (1997-2003), para os dados do JRA-55. Os anos identificados em verde (laranja) representam anos de La Niña (El Niño).

As Figuras 30 a 35 mostram mapas de anomalia de altura geopotencial em altos níveis (250 hPa) para as distintas fases da ODP de forma a evidenciar a propagação de ondas.

Figura 30. Anomalia anual de altura geopotencial (mgs), em 250 hPa, para os anos do 1º período (1970-1976), para os dados da reanálise I do NCEP-NCAR. Os anos identificados em verde (laranja) representam anos de La Niña (El Niño).

Figura 31. Anomalia anual de altura geopotencial (mgp), em 250 hPa, para os anos do 2º período (1977-1996), para os dados da reanálise I do NCEP-NCAR. Os anos identificados em verde (laranja) representam anos de La Niña (El Niño).

Figura 32. Anomalia anual de altura geopotencial (mgp), em 250 hPa, para os anos do 3º período (1997-2003), para os dados da reanálise I do NCEP-NCAR. Os anos identificados em verde (laranja) representam anos de La Niña (El Niño).

Figura 33. Anomalia anual de altura geopotencial (mgp), em 250 hPa, para os anos do 1º período (1970-1976), para os dados do JRA-55. Os anos identificados em verde (laranja) representam anos de La Niña (El Niño).

Figura 34. Anomalia anual de altura geopotencial (mgs), em 250 hPa, para os anos do 2º período (1977-1996), para os dados do JRA-55. Os anos identificados em verde (laranja) representam anos de La Niña (El Niño).

Figura 35. Anomalia anual de altura geopotencial (mgp), em 250 hPa, para os anos do 3º período (1997-2003), para os dados do JRA-55. Os anos identificados em verde (laranja) representam anos de La Niña (El Niño).

3.5 VARIABILIDADE SAZONAL DA CIRCULAÇÃO ATMOSFÉRICA NA 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 a precipitação de 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 e 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 36 e 37 para dados de reanálise I do NCEP-NCAR e Figuras 38 e 39 para os dados do JRA-55. As Figuras 40 e 41 indicam a variabilidade sazonal da altura geopotencial (250 hPa).

Figura 36. 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 37. 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.

Figura 38. 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 do JRA-55.

Figura 39. 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 do JRA-55.

Figura 40. Anomalia média anual de altura geopotencial (mgp) (1ª coluna), em 250 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 do NCEP-NCAR.

Figura 41. Anomalia média anual de altura geopotencial (mgp), em 250 hPa (1ª coluna), para a estação chuvosa (2ª coluna) e estação seca (3ª coluna), para os subperíodos (a) 1970-1976, (b) 1977-1996 e (c) 1997-2003, para a reanálise do JRA-55.

Embora o valor médio da anomalia sazonal das componentes zonal e meridional do vento seja constituída por contribuições com o mesmo sinal nas 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 42 a 45) 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 foi visto na seção 3.4. 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 na estação mais chuvosa do ano.

Figura 42. Anomalia média anual da componente zonal do vento (m s^{-1}) (1ª coluna), em 850 hPa, diferença sazonal para o período chuvoso (2ª coluna) e diferença sazonal para o período seco (3ª coluna), para os subperíodos (a) 1970-1976, (b) 1977-1996 e (c) 1997-2003, para a reanálise I do NCEP-NCAR.

Figura 43. Anomalia média anual da componente meridional do vento (m s^{-1}) (1ª coluna), em 850 hPa, diferença sazonal para o período chuvoso (2ª coluna) e diferença sazonal para o período seco (3ª coluna), para os subperíodos (a) 1970-1976, (b) 1977-1996 e (c) 1997-2003, para a reanálise I do NCEP-NCAR.

Figura 44. Anomalia média anual da componente zonal do vento (m s^{-1}) (1ª coluna), em 850 hPa, diferença sazonal para o período chuvoso (2ª coluna) e diferença sazonal para o período seco (3ª coluna), para os subperíodos (a) 1970-1976, (b) 1977-1996 e (c) 1997-2003, para a reanálise do JRA-55.

Figura 45. Anomalia média anual da componente meridional do vento (m s^{-1}) (1ª coluna), em 850 hPa, diferença sazonal para o período chuvoso (2ª coluna) e diferença sazonal para o período seco (3ª coluna), para os subperíodos (a) 1970-1976, (b) 1977-1996 e (c) 1997-2003, para a reanálise I do NCEP-NCAR.

3.6 ANÁLISE DE PRECIPITAÇÃO EM ESCALA SAZONAL NAS FASES DA ODP

A circulação atmosférica, com fenômenos identificados em todas as escalas atmosféricas, define as condições para a ocorrência da precipitação uma vez que os gradientes de pressão, temperatura e umidade do ar, em qualquer escala, contribuem para o movimento ascendente do ar e o processo de condensação do vapor d'água. O regime de chuvas de um determinado local é fator determinante na definição do clima local, em particular nas regiões tropicais, sendo as chuvas o resultado final de uma série de processos atmosféricos e físico-dinâmicos em todas as escalas de tempo e espaço (Cavalcanti et al., 2009). Considerando-se a variabilidade da precipitação em baixa frequência, calculamos a anomalia média da precipitação para as três fases consideradas da ODP: 1970-1976 (fase negativa), 1977-1996 (fase positiva) e 1997-2003 (fase negativa). Os resultados obtidos estão em concordância com o padrão de dipolo da precipitação em fases opostas da ODP encontrado por Mo e Nogués-Peagle (2001) e Silva et al. (2016), no setor sudeste da América do Sul, tal como mostrado na Figura 12. Observa-se que o padrão de dipolo da precipitação não se restringe ao setor leste da América do Sul, mas abrange também áreas continentais mais centrais, incluindo o sul da região Amazônica, Bolívia e Paraguai.

Em relação ao dipolo da anomalia da precipitação no centro-leste da América do Sul, observado em fases opostas da ODP, identificamos que os eventos ENOS apresentam maior associação com as anomalias de precipitação ocorridas na região Nordeste. Eventos LN estão associados a padrões de anomalia de precipitação na América do Sul semelhantes à média observada nas fases frias da ODP.

Os resultados de Silva et al. (2016) mostram que as distintas fases da ODP estão associadas a padrões distintos de propagação de ondas de baixa frequência entre o Pacífico Sul e a América do Sul, propiciando padrões específicos de precipitação sobre o continente sulamericano e da vazão de rios no Pantanal.

A anomalia média da precipitação em cada subperíodo considerado indica padrões espaciais importantes nas fases positiva e negativa da ODP, em especial no setor leste da América do Sul. 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, em todas as fontes de dados aqui consideradas: NCEP-NCAR, JRA-55 e GPCC. A fase negativa (1º e 3º subperíodos) é caracterizada por anomalias negativas de precipitação no setor centro-leste e anomalias positivas no sudeste do Brasil, enquanto que a fase positiva da ODP (2º subperíodo) é caracterizada pelo padrão inverso (Figuras 46 a 48), sendo que as anomalias negativas de precipitação cobrem o sudeste da América do Sul.

Figura 46. 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 (A1) e com um círculo vermelho (A2) compõem aproximadamente o dipolo do padrão da anomalia de precipitação proposto para a escala decenal.

Figura 47. Anomalia anual da precipitação (mm dia^{-1}), para os períodos 1970-1976, 1977-1996 e 1997-2003, a partir de dados do NCEP-NCAR. As áreas delimitadas com um retângulo preto (B1) e com um círculo vermelho (B2) compõem aproximadamente a posição do dipolo do padrão da anomalia de precipitação proposto para a escala decenal.

Figura 48. Anomalia anual da precipitação (mm dia^{-1}) para os períodos 1970-1976, 1977-1996 e 1997-2003, a partir de dados do JRA-55. As áreas delimitadas com um retângulo preto (C1) e com um círculo vermelho (C2) compõem aproximadamente o dipolo do padrão da anomalia de precipitação proposto para a escala decenal.

A variação da anomalia da precipitação entre os períodos secos e chuvosos, tal como mostrado nas Figuras 49 a 51, indica que os períodos chuvosos contribuem mais que os períodos secos para determinar o valor médio anual, para todas as fontes de dados consideradas (GPCC, reanálise I do NCEP-NCAR e JRA-55). 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 contribui para a definição mais precisa dos períodos em que a ODP influencia o clima da América do Sul, em especial em seu setor leste, o que é mostrado nos gráficos da seção 3.7.

Para a área centro-leste da América do Sul, Área 1, a anomalia mais intensa de precipitação ocorre nos meses chuvosos em relação aos meses secos. Para a área sudeste da América do Sul, Área 2, as anomalias mais intensas parecem ocorrer nos meses mais secos. A anomalia média de precipitação do JRA-55, no período chuvoso, mostra-se distinta dos resultados obtidos com os dados do GPCC e NCEP-NCAR. Interpretações mais conclusivas sobre os períodos do ano mais influenciados pela ODP podem ser obtidas com a análise da variabilidade mensal da precipitação, na seção 3.6 deste trabalho.

Figura 49. 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.

Figura 50. 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, para a reanálise I do NCEP-NCAR.

Figura 51. 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, com base nos dados do JRA-55.

3.7 VARIABILIDADE SAZONAL DAS ÁREAS COM ANOMALIAS INTENSAS

A evolução mensal da anomalia de vento e de precipitação para áreas onde são identificadas as anomalias médias mais significativas permite definir com maior precisão os períodos em que a América do Sul apresenta influência da ODP no período de 1970 a 2003, para cada conjunto de dados usado (GPCC,

reanálise I do NCEP-NCAR e reanálise do JRA-55). Os gráficos de dispersão (Figuras 52 a 58) entre valores sazonais mostram que as anomalias de vento (zonal e meridional) e de precipitação da estação úmida são mais intensas, em média, do que os da estação seca. As tabelas que antecedem cada gráfico de dispersão indicam as coordenadas geográficas das áreas com as anomalias mais significativas para cada variável e fonte de dados.

A Tabela 5 mostra o valor da inclinação da reta de tendência linear relativo a cada gráfico de dispersão. Para obtenção deste valor foi feito o cálculo " $\Delta y/\Delta x$ ", responsável por identificar o quanto a precipitação de estação seca é maior ou menor, em média, que a precipitação da estação úmida. Exemplificando, se a inclinação da reta é igual a 0,40 (sendo os valores da estação seca indicados no eixo das ordenadas e os valores da estação úmida indicados no eixo das abscissas), a precipitação da estação seca será, em média, 60% menor do que a precipitação da estação úmida. Para valores da inclinação da reta igual a 1, a precipitação das duas estações do ano deve ser, em média, igual. Se o valor da inclinação da reta é positivo, os valores observados nas estações secas e úmidas apresentam correlação positiva, aumentando e diminuindo concomitantemente com o decorrer do tempo. Caso contrário, se o valor da inclinação da reta é negativo, o coeficiente de correlação entre os valores observados nas duas estações do ano é negativo, indicando que as anomalias apresentam comportamentos contrários no decorrer do tempo.

Tabela 5. Valores de inclinação da reta do ajuste linear obtidos entre os valores de anomalias intensas de precipitação observados nas áreas A1, A2, B1, B2, C1 e C2, para os dados do GPCC, da reanálise I do NCEP-NCAR e reanálise do JRA-55.

	Inclinação da reta de tendência linear ($\Delta y/\Delta x$)	(Chuva na estação seca)/(Chuva na estação úmida) (em %)
A1-GPCC	1,269	26,6%
A2-GPCC	-0,159	15,9%
B1-NCEP/NCAR	0,416	41,6%
B2-NCEP/NCAR	-0,037	3,7%
C1-JRA-55	-0,285	28,5%
C2-JRA-55	0,268	26,8%

Tabela 6. Coordenadas geográficas das áreas com valores intensos da anomalia sazonal das componentes zonal e meridional do vento para os dados da reanálise I do NCEP-NCAR.

NCEP-NCAR (comp zonal u)	Latitude	Longitude
Área U1-NCEP	0° – 13°S	60°S – 40°S
Área U2-NCEP	17°S – 30°S	58°S – 45°S
NCEP-NCAR (comp merid v)	Latitude	Longitude
Área V1-NCEP	8°S – 25°S	68°S – 50°S
Área V2-NCEP	6°S – 25°S	50°S – 37°S

Figura 52. Dispersão entre os valores de inverno (eixo y) e verão (eixo x) da componente zonal do vento obtida dos dados da reanálise I do NCEP-NCAR, para as áreas (a) U1 e (b) U2.

Figura 53. Dispersão entre os valores de inverno (eixo y) e verão (eixo x) da componente meridional do vento obtida dos dados da reanálise I do NCEP-NCAR, para as áreas (a) U1 e (b) U2.

Tabela 7. Áreas com os valores mais intensos da anomalia sazonal das componentes zonal e meridional do vento (m s^{-1}) para os dados do JRA-55.

JRA-55 (<i>comp zonal u</i>)	Latitude	Longitude
Área U1 - JRA-55	10°S – 19°S	60°S – 50°S
Área U2 - JRA-55	22°S – 32°S	60°S – 48°S
JRA-55 (<i>comp merid v</i>)	Latitude	Longitude
Área V1 - JRA-55	15°S – 28°S	65°S – 58°S
Área V2 - JRA-55	7°S – 20°S	57°S – 40°S

Figura 54. Dispersão entre os valores de inverno (eixo y) e verão (eixo x) da componente zonal do vento obtida dos dados da reanálise do JRA-55, para as áreas (a) U1 e (b) U2.

Figura 55. Dispersão entre os valores de inverno (eixo y) e verão (eixo x) da componente meridional do vento obtida dos dados da reanálise do JRA-55, para as áreas (a) U1 e (b) U2.

Tabela 8. Áreas relativas aos valores mais intensos da anomalia sazonal de precipitação (mm dia^{-1}) para os dados do GPCC.

GPCC (precipitação)	Latitude	Longitude
Área A1	10°S – 20°S	53°S – 41°S
Área A2	23°S – 31°S	58°S – 50°S

Figura 56. Gráfico de dispersão entre a precipitação mensal (mm mês^{-1}) do GPCC observada nas estações seca (eixo das ordenadas) e úmida (eixo das abscissas), para as áreas A1 e A2.

Tabela 9. Áreas relativas aos valores mais intensos da anomalia sazonal de precipitação (mm dia^{-1}) para os dados do NCEP-NCAR.

NCEP-NCAR (precipitação)	Latitude	Longitude
Área B1	5°S – 13°S	55°S – 40°S
Área B2	22°S – 30°S	67°S – 60°S

Figura 57. Gráfico de dispersão entre a precipitação mensal (mm mês^{-1}) da reanálise I do NCEP-NCAR nas estações seca (eixo das ordenadas) e úmida (eixo das abscissas), para as áreas A1 e A2.

Tabela 10. Áreas relativas aos valores mais intensos da anomalia sazonal de precipitação (mm dia^{-1}) para os dados do JRA-55.

JRA-55 (precipitação)	Latitude	Longitude
Área C1	10°S – 20°S	57°S – 45°S
Área C2	22°S – 33°S	50°S – 40°S

Figura 58. Gráfico de dispersão entre a precipitação mensal (mm mês^{-1}) da reanálise do JRA-55 nas estações seca (eixo das ordenadas) e úmida (eixo das abscissas), para as áreas A1 e A2.

A Figura 52a apresenta a dispersão entre os valores sazonais da anomalia da componente zonal do vento para a área U1; já a Figura 52b apresenta a dispersão entre os valores sazonais para a anomalia da componente zonal na área U2. A partir da Figura 52 foi possível verificar que os valores da componente zonal do vento são, em média, maiores nas estações úmidas (ONDJFM).

As áreas de maior intensidade das anomalias das componentes de vento e de precipitação são diferentes entre si. A componente zonal do vento no período seco do ano, na área U1 (Lat 0°, 13°S; Lon 40°S, 60°S; Pará, Maranhão, Tocantins e Piauí), apresenta, em média, anomalias negativas durante as fases negativas da ODP e, anomalias positivas durante a fase positiva da ODP, coincidindo com o centro-leste do Brasil. A área U2 apresenta anomalias mais intensas da componente zonal do vento no sudeste da América do Sul, com valores positivos e negativos nas fases negativas e positivas da ODP, respectivamente. Os gráficos mostrados nas Figuras 59 a 63 mostram inversão do sinal da anomalia da componente zonal do vento entre as fases positiva e negativa da ODP.

Enquanto a média do valor da anomalia da componente zonal na área U2 (reanálise I do NCEP-NCAR), durante a fase positiva da ODP, é negativa, é possível observar 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 U2. Ou seja, durante a fase positiva da ODP, os ventos de oeste da área U2 (NCEP-NCAR) estão, em média, intensificados. O sinal dos valores médios anuais da componente zonal do vento em 850 hPa, nas Figuras 18,19 e 20, também indicam o comportamento dipolar da anomalia do vento entre as fases distintas da ODP.

Figura 59. Localização das áreas relativas aos valores mais intensos de anomalia das componentes (a) zonal e (b) meridional do vento (m s^{-1}) para os dados da reanálise I do NCEP-NCAR.

A comparação entre as séries temporais das componentes do vento, para cada região selecionada (U1, U2, V1 e V2), para as duas fontes de dados consideradas e a comparação entre os valores obtidos para as estações de inverno e verão são importantes para a análise pois fornecem informações diferentes. No primeiro caso, as Fig. 60, 62, 65 e 67 mostram o dipolo espacial e, no segundo caso, as Fig. 61, 63, 66 e 68 mostram as diferenças entre estação seca e úmida.

A evolução mensal da anomalia da componente zonal do vento em 850 hPa na área U1 (área definida na Figura 64), para dados da reanálise I do NCEP-NCAR, tal como mostrado na Figura 60, indica que entre 1975 e 1980, período de transição entre as fases negativa e positiva da ODP, o sinal da anomalia passa gradativamente de negativo para positivo, tanto na estação seca quanto na úmida, indicando o enfraquecimento dos ventos de leste no nordeste da América do Sul. Ao mesmo tempo, na área U2, o sinal médio da anomalia da componente zonal passa de positivo para negativo, no mesmo período,

indicando a intensificação do escoamento de leste no sudeste do Brasil e América do Sul. Durante o período positivo da ODP, 1977-1996, a maior parte da anomalia da componente zonal do vento tem sinal positivo na área U1, indicando o enfraquecimento do escoamento de leste nesta área. Entre a fase positiva e a negativa da ODP, de 1996 a 2000, verificamos novamente a intensificação dos ventos de leste na área U1.

Figura 60. Anomalia mensal da componente zonal do vento (m s^{-1}) para o período (a) seco e (b) chuvoso, de 1970 a 2003, para as áreas U1 e U2, a partir de dados da reanálise I do NCEP-NCAR.

Figura 61. Anomalia mensal da componente zonal do vento ($m s^{-1}$) da reanálise I do NCEP-NCAR, para a áreas (a) U1 e (b) U2, para as estações secas (abril-setembro) e úmidas (outubro a março), de 1970 a 2003.

A análise da evolução mensal da anomalia da componente meridional do vento, em 850 hPa, na Área V1 (Figura 62), para os dados da reanálise I do NCEP-NCAR, indica que, em torno do ano de 1977, período de transição entre a fase negativa e a positiva da ODP, o sinal médio passa do valor negativo para o positivo, enquanto que, na Área V2, é verificado o padrão inverso. No período

de transição entre a fase positiva e negativa da ODP, por volta de 1997-1998, os valores positivos (negativos) de anomalia passam a negativos (positivos) na área V1 (V2). A análise das figuras 62 e 63 permite verificar a existência do padrão dipolo na anomalia da componente meridional do vento entre os três subperíodos considerados de ODP (1970-1976, 1977-1996, 1997-2003), sobre o centro-leste da América do Sul.

Figura 62. Anomalia mensal da componente meridional do vento (m s^{-1}) para o período (a) seco e (b) chuvoso, de 1970 a 2003, para as áreas U1 e U2, a partir de dados da reanálise I do NCEP-NCAR.

Figura 63. Anomalia média mensal da componente meridional do vento (m s^{-1}) para a área 1 (a) e área 2 (b), de 1970 a 2003, durante os períodos secos (AMJJAS) e chuvosos (ONDJFM), a partir de dados do NCEP-NCAR.

Com os dados do JRA-55, observou-se um padrão sazonal sensivelmente diferente dos obtidos com os dados da reanálise I do NCEP-NCAR. Os resultados da evolução mensal da componente zonal do vento em 850 hPa na Área U1 (Tabela 7), para os dados do JRA-55, Figura 65, mostram que, entre

1975 e 1980, período de transição entre fase negativa e positiva da ODP, assim como para os dados do NCEP-NCAR, o sinal passa gradativamente de negativo para positivo, tanto no período seco quanto no período úmido. Ao mesmo tempo, na Área U2, o sinal da componente zonal do vento do JRA-55 passa de positivo para negativo, com diferenças entre as fases seca e chuvosa. Durante o período positivo da ODP, 1977-1996, a maior parte da anomalia da componente zonal do vento tem sinal positivo na área U1, sobretudo na fase úmida.

Figura 64. Áreas relativas aos valores mais intensos da anomalia das componentes zonal e meridional do vento (m s^{-1}) para os dados do JRA-55.

Figura 65. Anomalia mensal da componente zonal do vento (m s^{-1}) para o período (a) seco e (b) chuvoso, de 1970 a 2003, para as áreas U1 e U2, a partir de dados da reanálise do JRA-55.

Figura 66. Anomalia média mensal da componente zonal do vento ($m s^{-1}$) para a área 1 (a) e área 2 (b), de 1970 a 2003, durante os períodos secos (AMJJAS) e chuvosos (ONDJFM), a partir de dados do JRA-55.

A análise da componente meridional do vento em 850 hPa, para dados do JRA-55 (Figura 67), indica sinais opostos entre a fase seca e a fase úmida na área V1. Para a área V2, próximo a 1977, o sinal médio passa do valor negativo para positivo. Verificou-se, para os três subperíodos considerados (1970-1976, 1977-1996, 1997-2003), a existência do padrão dipolo no centro-leste da

América do Sul nas componentes zonal e meridional do vento, nos dados do JRA-55. Este padrão de dipolo também é visto nos dados médios, Figuras 24, 25, 26, com o dipolo deslocado espacialmente em relação aos dados do NCEP-NCAR.

Figura 67. Anomalia mensal da componente meridional do vento (m s^{-1}) para o período (a) seco e (b) chuvoso, de 1970 a 2003, para as áreas U1 e U2, a partir de dados da reanálise do JRA-55.

Figura 68. Anomalia média mensal da componente meridional do vento (m s^{-1}) para a área 1 (a) e área 2 (b), de 1970 a 2003, durante os períodos secos (AMJJAS) e chuvosos (ONDJFM), a partir de dados do JRA-55.

A anomalia média sazonal da precipitação nas áreas A1 e A2 foi usada para se verificar a associação da precipitação sazonal com a ODP, para os dados do NCEP-NCAR, JRA-55 e GPCC. Observa-se, na Figura 69, que a variabilidade temporal da anomalia da precipitação na área A1 aproxima-se da variabilidade média da ODP, com valores negativos nas fases negativas da ODP e valores positivos na fase positiva da ODP. Na área A2, é observado o padrão contrário.

Figura 69. Áreas relativas aos valores mais intensos da anomalia sazonal de precipitação (mm dia^{-1}) para os dados do GPCC.

Figura 70. Anomalia média mensal da precipitação (mm) para o período seco (a) e período chuvoso (b), de 1970 a 2003, para A1 e A2, a partir de dados do GPCC.

Figura 71. Anomalia média mensal da precipitação (mm mês⁻¹) para a área A1 (a) e área 2 (b), de 1970 a 2003, durante os períodos secos (AMJJAS) e chuvosos (ONDJFM), a partir de dados do GPCC.

Figura 72. Áreas relativas aos valores mais intensos da anomalia sazonal de precipitação (mm) para os dados do NCEP-NCAR.

Figura 73. Anomalia média mensal da precipitação (mm) para o período seco (a) e período chuvoso (b), de 1970 a 2003, para A1 e A2, a partir de dados do NCEP-NCAR.

Figura 74. Anomalia média mensal da precipitação (mm) para a área 1 (a) e área 2 (b), de 1970 a 2003, durante os períodos secos (AMJJAS) e chuvosos (ONDJFM), a partir de dados do NCEP-NCAR.

Figura 75. Áreas relativas aos valores mais intensos da anomalia sazonal de precipitação (mm) para os dados do JRA-55.

Figura 76. Anomalia média mensal da precipitação (mm) para o período seco (a) e período chuvoso (b), de 1970 a 2003, para A1 e A2, a partir de dados do JRA-55.

Figura 77. Anomalia média mensal da precipitação (mm) para a área 1 (a) e área 2 (b), de 1970 a 2003, durante os períodos secos (AMJJAS) e chuvosos (ONDJFM), a partir de dados do JRA-55.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste estudo buscamos avaliar a variabilidade sazonal da circulação atmosférica e precipitação da América do Sul em fases distintas da Oscilação Decadal do Pacífico entre 1970 e 2003. As análises basearam-se na comparação entre os padrões espaciais médios de cada uma das fases da ODP: 1970-1976, 1977-1996 e 1997-2003. Foram analisados dados de vento, altura geopotencial e precipitação da reanálise I do NCEP-NCAR e da reanálise JRA-55, além dos dados de precipitação do GPCC. Foram identificados padrões contrários da anomalia da circulação atmosférica sobre o Oceano Pacífico e América do Sul nas fases negativa e positiva da ODP entre 1970 e 2003. A análise feita a partir dos dados da reanálise I NCEP-NCAR e da reanálise do JRA-55 mostrou que a estação chuvosa (outubro a março) exerce maior influência no impacto médio anual quando comparada à estação seca (abril a setembro).

Analizando o padrão climático da América do Sul associado à Oscilação Decadal do Pacífico, foi possível identificar neste estudo determinados padrões condizentes com os padrões observados por outros autores. Os resultados mostraram anomalias anticiclônicas e ciclônicas centradas na região centro-leste da América do Sul durante as fases negativa e positiva da ODP, em níveis troposféricos baixos e altos, tanto na escala anual como na escala sazonal.

Os padrões de circulação atmosférica foram considerados para entender as condições dinâmicas que levaram à ocorrência de períodos de seca e chuva no setor centro-leste da América do Sul. Como analisado, a diferença entre os períodos secos e chuvosos da anomalia média anual de cada subperíodo para as componentes zonal e meridional do vento em baixos níveis, indicou que, para todos os subperíodos, são os meses mais chuvosos (outubro a março) os que mais contribuem para determinar o padrão médio. O Pacífico leste apresentou valores de correlação linear entre a precipitação do GPCC, os dados da reanálise I do NCEP-NCAR e da reanálise do JRA-55, para a estação úmida, maiores do que para a estação seca.

Padrões contrários de circulação atmosférica foram identificados sobre o Oceano Pacífico e a América do Sul nas fases negativa e positiva da ODP entre 1970 e 2003. Os conjuntos de dados NCEP-NCAR e JRA-55 mostraram comportamentos médios semelhantes nas fases negativa e positiva da ODP. As anomalias do vento apresentam sinais opostos nas fases negativa e positiva da ODP. Durante a fase positiva da ODP, uma anomalia média ciclônica é observada em níveis baixos sobre a região central da América do Sul, indicando enfraquecimento e intensificação dos ventos alíseos no nordeste e sudeste da América do Sul, respectivamente. Este padrão está associado a anomalias positivas de precipitação no nordeste da América do Sul e, negativas no sudeste. Durante as fases negativas da ODP, há uma intensificação dos ventos alíseos no nordeste da América do Sul e do escoamento de norte no centro do continente. Esse escoamento da região norte para sul e sudeste contribui para o transporte de umidade e calor de uma região (norte) a outra (sul-sudeste).

A região sudeste da América do Sul, por outro lado, apresenta anomalias positivas de precipitação nas fases negativas da ODP, enquanto a região nordeste apresenta anomalias negativas. Os sinais contrários das anomalias de precipitação média no nordeste e sudeste da América do Sul, em fases opostas da ODP, formam um padrão de dipolo no setor oriental do continente sulamericano, o que é observado nos dados da reanálise I do NCEP-NCAR, nos dados do JRA-55 e do GPCC. Os resultados obtidos neste estudo estão de acordo com os obtidos por Silva et al. (2016), que utilizou apenas dados da reanálise I do NCEP-NCAR. Em relação ao dipolo da anomalia da precipitação no centro-leste da América do Sul, observado em fases opostas da ODP, identificamos que os eventos ENOS apresentam maior associação com as anomalias de precipitação ocorridas na região Nordeste. Eventos LN estão associados a padrões de anomalia de precipitação na América do Sul semelhantes à média observada nas fases frias da ODP. Os resultados indicam maior ocorrência de eventos LN durante as fases negativas da ODP, 1970-1976 e 1997-2003, e maior ocorrência de eventos EN na fase positiva da ODP, 1977-1996.

O maior entendimento da associação entre ODP e o clima da América do Sul ocorreu a partir da análise na escala sazonal, em que foram verificados os um possível impacto nas estações seca e úmida. A análise dos dados de vento do NCEP-NCAR e JRA-55 mostra que o período chuvoso (outubro a março) exerce maior influência no impacto médio anual quando comparado ao período seco (abril a setembro), com maior intensidade dos ventos alísios na região nordeste e o escoamento atmosférico de norte a sul no centro do continente durante as fases negativas da ODP. Durante a fase positiva da ODP, observa-se o impacto climático oposto, menor intensidade dos ventos alísios no nordeste da América do Sul e no escoamento de norte. A variabilidade do escoamento de norte entre as fases negativas e positivas da ODP deve impactar diretamente o JBN.

O cálculo da inclinação da reta de tendência linear possibilitou entender o quanto a precipitação de estação seca é diferente da precipitação úmida. Isto é, para a A1-GPCC observamos uma precipitação, em média, igual. Diferente do observado para A2-GPCC, em que o período seco (abril a setembro) foi 84,1% menor que o período úmido (outubro a março). Já para B1-NCEP/NCAR e B2-NCEP/NCAR, os períodos secos representaram, respectivamente, 58,4% e 96,3% menos que o chuvoso, enquanto para C1 e C2-JRA-55, os valores encontrados foram 71,5% e 73,2%, respectivamente.

As anomalias do GPCC também indicam valores mais elevados de precipitação nas estações chuvosas. 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.

Estudos sobre a influência da variabilidade climática interdecadal nos padrões de circulação na América do Sul - como oscilações de distúrbios naturais em grande escala no Pacífico interagem entre si e modulam variações em escalas anuais, sazonais e padrões de precipitação de frequência mais baixa

na América do Sul - são extremamente necessários para a comunidade científica e sociedade, em geral.

O desenvolvimento deste estudo permitiu verificar algumas dúvidas não sanadas. Um exemplo poderia ser a comparação de forma mais criteriosa dos impactos climáticos na América do Sul associados ao ENOS e à ODP. Seria importante, também, analisar os dados mensais para verificar o que acontece nos períodos entre os eventos de ENOS. Em se tratando da análise comparativa de dados, um estudo futuro poderia avaliar as diferenças entre os dados para uma posterior de comparação de reanálises.

5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDREOLI, R. V.; KAYANO, M. T.; GUEDES, R. L.; OYAMA, M. D.; ALVES, M. A. S. **A influência da temperatura da superfície do mar dos oceanos Pacífico e Atlântico na variabilidade de precipitação em Fortaleza.** Revista Brasileira de Meteorologia, São Paulo, v. 19, n.3, p. 337-344, 2004.

ANDREOLI, R. V.; KAYANO, Mary Toshie. **ENSO-related rainfall anomalies in South America and associated circulation features during warm and cold Pacific Decadal Oscillation regimes.** International Journal of Climatology, v. 25, n.12, p. 2017-2030, 2005.

ASHOK.; BEHERA, S.; RAO, S.; WENG, H. YAMAGATA, T. **El Niño Modoki and its possible teleconnection.** J. Geophysical Research, v. 112, p.1-27, 2007.

BALMASEDA, M.A.; DAVEY, M. K.; ANDERSON, L.T. **Decadal and Seasonal Dependence of ENSO Prediction Skill.** Journal of Climate, 8 (11): 2705–2715, 1995.

CAPOTONDI, A.; WITTENBERG, A.; NEWMAN, M.; DI LORENZO, E.; YU, J.; BRACONNOT, P.; COLE, J.; DEWITTE, B.; GIESE, B.; GUILYARD, E. **Understanding ENSO Diversity.** *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 96 (6): 921–938, 2015.

COELHO, C.A.S.; UVO, C.B.; AMBRIZZI, T. **Exploring the impacts of the tropical Pacific SST on the precipitation patterns over South America during ENSO periods.** Theoretical and Applied Climatology, 71, pages185–197, 2002.

COLLINS, M.; AN. S.; CAI, W.; GANACHAUD, A.; GUILYARDI, E.; JIN, F.; JOCHUM, M.; LENGAGNE, M.; POWER, S.; TIMMERMAN, A.; VECCHI, G.; WITTERNBERG, A. **The impact of global warming on the tropical Pacific Ocean and El Niño.** Nature Geoscience, 3, p.391–397, 2010.

FRANCIS, R.C.; HARE, S. R. **Decadal-scale regime shifts in the large marine ecosystems of the North-east Pacific: a case for historical science.** Fisheries Oceanography, 1994.

GARREAU, R. D.; BATTISTI, D. S. **Interannual (ENSO) and interdecadal (ENSO-like) variability in the Southern Hemispheric tropospheric circulation.** J. Climate, 12, p. 2113-2123, 1999.

GEROLAMO, R. O. P.; KAYANO, M. T. **Variações do ciclo anual da temperatura da superfície do mar no Pacífico tropical.** Revista Brasileira de Meteorologia (Impresso) , v. 25, p. 237-247, 2010.

GERSHUNOV, A.; BARNETT, T.P. **Interdecadal Modulation of ENSO Teleconnections.** Bulletin of the American Meteorology Society. 79 (12): 2715–2726, 1998.

GRIMM, A.; AMBRIZZI, T. **Teleconnections into South America from the Tropics and Extratropics on Interannual and Intraseasonal Timescales.** Part of the Developments in Paleoenvironmental Research book series (DPER, volume 14), 2009.

HARADA, Y.; KAMAHORI, H.; KOBAYASHI, C.; ENDO, H.; KOBAYASHI, S.; OTA, Y.; ONODA, H.; MYAOKA, K.; TAKAHASHI, K. **The JRA-55 Reanalysis: Representation of Atmospheric Circulation and Climate Variability.** Journal of the Meteorological Society of Japan, Volume 94 , n3, p. 269-302, 2016

HOSKINS, B. J.; AMBRIZZI, T. **Rossby Wave Propagation on a Realistic Longitudinally Varying Flow**. Journal of the Atmospheric Sciences, 50 (12): 1661–1671, 1993.

HU, A.; HAN, W.; ALEXANDER, M.A; YAMAGATA, T.; YUAN, D.; ISHII, M.; PEGION, P.; ZHENG, J.; HAMLINGTON, B.D.; QUAN, X.; LEBEN, R. Intensification of decadal and multi-decadal sea level variability in the western tropical Pacific during recent decades. Climate Dynamics, 43, p.1357–1379, 2014.

HURRELL, J.W; DESER, C.; PHILLIPS, A.S. **Pacific Interdecadal Climate Variability: Linkages between the Tropics and the North Pacific during Boreal Winter since 1900**. Journal of Climate, v.17. p. 3109-3124, 2004.

KAYANO, Mary Toshie ; ANDREOLI, R. V. **Relationships between rainfall anomalies over northeastern Brazil and the El Niño Southern Oscillation**. Journal of Geophysical Research, doi:10.1029/2005JD006142, v. 111, p. D13101, 2006.

KAYANO, M. T ; OLIVEIRA, C. P. ; ANDREOLI, R. V. **Interannual relations between South America rainfall and tropical sea surface temperature anomalies before and after 1976**. International Journal of Climatology , v. 29, p. 1439-1448, 2009.

KAYANO, MT.; GONZALEZ, R.A.; ANDREOLI, R.V.; CANDIDO, L.A.; SOUZA, R.A.F. **A influência do evento El Niño - Oscilação Sul e Atlântico Equatorial na precipitação sobre as regiões norte e nordeste da América do Sul**. Acta Amaz. vol.43 no.4 Manaus, Dec. 2013

KAYANO, MARY TOSHIE; ANDREOLI, R. V.; Souza, R. A. F.; GARCIA, SÂMIA R.; CALHEIROS, ALAN J. P. **El Niño e La Niña nos Últimos 30 Anos: Diferentes Tipos**. Climanalise (São José dos Campos), v. 4, p. 7-12, 2016.

KAO, H.; YU, J. **Contrasting Eastern-Pacific and Central-Pacific Types of ENSO**. Journal of Climate, 22 (3): 615–632, 2009.

KAROLY, David. **Southern Hemisphere Circulation Features Associated with El Niño- Southern Oscillation Events**. American Meteorology Society. Volume 2. 1239-1252, 1989.

KUG, J.; YEH, S.; DEWITTE, B.; KWON, M.; KIRTMAN, B.P.; JIN. F. **El Niño in a changing climate**. Nature, 461, p. 511–514, 2009.

LARKIN, N.K.; HARRISON, D.E. **Global seasonal temperature and precipitation anomalies during El Niño autumn and winter**. Geophysical Research Letters, v.32, 2005.

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

LATIF, M.; T. P. BARNETT. **Decadal climate variability over the North Pacific and North America: dynamics and predictability**. J. Climate, 9, 2407–2423, 1996.

LIMBERGER, L.; SILVA, M.E.S. **Precipitação observada na Amazônia brasileira: comparação entre os dados das redes convencionais e dados da reanálise I do NCEP/NCAR, CRU e GPCC**. Revista Brasileira de Climatologia, v. 22, ano 14, p.20-37, 2018.

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.

MANTUA, N. J.; HARE, S R. **The Pacific Decadal Oscillation**. J. Oceanog, 58, p. 35-44, 2002.

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.

MEEHL, G.A; HU, A. **Megadroughts in the Indian Monsoon Region and Southwest North America and a Mechanism for Associated Multidecadal Pacific Sea Surface Temperature Anomalies.** Journal of Climate, 19 (9): 1605–1623, 2006.

MEEHL, G.A.; HU,A.; SANTER, B.D. **The Mid-1970s Climate Shift in the Pacific and the Relative Roles of Forced versus Inherent Decadal Variability.** Journal of Climate, 22 (3): 780–792, 2009.

MEEHL, G.A.; ARBLASTER, J.M. **Relating the strength of the tropospheric biennial oscillation (TBO) to the phase of the Interdecadal Pacific Oscillation (IPO).** Geophysical Research Letters, v. 39, 2012.

MINOBE, S. **A 50–70 year climatic oscillation over the North Pacific and North America.** Geophysical Research Letters, v. 4, n. 6, 1997.

MO, K.C.; WHITE, G.H.; **Teleconnections in the Southern Hemisphere.** Monthly Weather Review, 113 (1): 22–37, 1985.

MO, K.C.; HIGGINS, R. W. **The Pacific–South American Modes and Tropical Convection during the Southern Hemisphere Winter.** American Meteorological Society, v.126 p. 1581-1596, 1998.

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

NEWMAN, M.; COMPO, P.G.; ALEXANDER, M.A. **ENSO-Forced Variability of the Pacific Decadal Oscillation**. Journal of Climate, 16 (23): 3853–385, 2003.

NITTA, K.; YAMADA, S. **Recent warming of tropical sea surface temperature and its relationship to the Northern Hemisphere circulation**

Journal of Meteorological Society of Japan. 1989 Vol. 67, No. 3 p. 375-383

NOBRE, P.; MARENGO, J.A.; CAVALCANTI, I.F.A.; OBREGON, G.; BARROS, V.; CAMILLONI, I.; CAMPOS, N.; FERREIRA, A.G. **Seasonal-to-decadal predictability and prediction of South American Climate**. Journal of Climate 19: 5988–6004, 2006.

PEREIRA, G.; SILVA, M.E.; MORAES, E.C.; CARDOZZO, F. **Avaliação dos Dados de Precipitação Estimados pelo Satélite TRMM para o Brasil**. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 18, n. 3, Jan, 2013.

REBOITA, M.S.; KRUSCHE, N.; AMBRIZZI, T.; ROCHA, R. P. **Entendendo o Tempo e Clima na América do Sul**. Terra Didática, v.8, p. 34-50, 2012.

REBOITA, M.S.; SANTOS, I. **Influência de alguns padrões de teleconexão na precipitação no norte e nordeste do Brasil**. Revista Brasileira de Climatologia, ano 10, v. 15, p. 28-48, 2014.

ROPELEWSKI, C. F.; HALPERT, M. S. **Global and Regional Scale Precipitation Patterns Associated with the El Niño/Southern Oscillation**. American Meteorological Society, v. 115, p.1606-1626, 1987.

ROPELEWSKI, C. F.; HALPERT, M. S. **Surface Temperature Patterns Associated with the Southern Oscillation**. American Meteorological Society, v. 577, p.578-593, 1992.

ROSSO, F.V.; BOIASKI, N.T.; FERRAZ, S.E.T.; ROBLES, T.C. **Influence of the Antarctic Oscillation on the South Atlantic Convergence Zone**. Atmosphere. 9(11), 2018.

SCHNEIDER, N. **The forcing of Pacific Decadal Oscillation**. J. Climate, v. 18, p. 4355-4373, 2005.

SCOTT, B. P.; BRAGANZA, K.; GERGIS, J.L.; RISBEY, J.S.; FOWLER, A.M. **A multiproxy index of the El Niño–Southern Oscillation, A.D. 1525–1982**. Journal of Geophysical Researches Atmospheres. V. 114, 2009.

SILVA, Gyrlene Aparecida Mendes da; Drumond, Anita; Ambrizzi, Tércio. **The impact of El Niño on South American summer climate during different phases of the Pacific Decadal Oscillation**. Theoretical and Applied Climatology , v. 36, p. 100-120, 2011.

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**. Theoretical and Applied Climatology. Publicado online, março/2016.

SILVA, C.B.; SILVA, M.E.S.; KRUSCHE, N.; AMBRIZZI, T.; FERREIRA, N.J.; DIAS, P.L.S. **The analysis of global surface temperature wavelets from 1884 to 2014**. Theoretical and Applied Climatology. Publicado online, 2018.

SILVA, M.E.S.; SILVA, C.B.; AMBRIZZI, T.; DRUMOND, A.; PATUCCI, N.N.; **South America Climate During the 1970–2001 Pacific Decadal Oscillation Phases Based on Different Reanalysis Datasets.** *Frontiers in Earth Science*, fev/2020.

SULCA, J.; TAKAHASHI, K.; ESPINOZA, J.; VUILE, M.; CASIMIRO, W. **Impacts of different ENSO flavors and tropical Pacific convection variability (ITCZ, SPCZ) on austral summer rainfall in South America, with a focus on Peru.** *Royal Meteorological Society*, v. 38, p. 420-435, 2017.

TAKAHASHI, K.; MARTÍNEZ, A. G. **The very strong coastal El Niño in 1925 in the far-eastern Pacific.** *Climate Dynamics*, p. 1-27, 2017.

TRENBERTH, K. E.; HURRELL, J. W. **Decadal atmosphere-ocean variations in the Pacific.** *Climate Dynamics*, v.9, p. 303-319, 1993.

TRENBERTH, K. E. **The definition of El Niño.** *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, v. 78, n. 12, p. 2771-2777, 1997.

TRENBERTH, K.E. **Recent Observed Interdecadal Climate Changes in the Northern Hemisphere.** *Bulletin of the American Meteorological Society*, 71 (7): 988–993, 1990.

TRENBERTH, K. E.; STEPANIAK, D. P. **Indices of El Niño Evolution.** *Journal of Climate*, 14 (8): 1697–1701, 2001.

YEH, S.; CAI, W.; MIN, S.; MCPAHDEN, M.; DOMMENGET, D.; DEWITTE, B.; COLLINS, M.; ASHOK, K.; AN, S.; YIM, B.; KUG, J. **ENSO Atmospheric Teleconnections and Their Response to Greenhouse Gas Forcing.** *American Meteorological Society*, v. 56, p. 185-206, 2018.

ZHANG, Y.; WALLACE, J. M.; BATTISTI, D. **ENSO-like interdecadal variability: 1900-93**. J. Climate, v.10, p. 1004-1020, 1997.

ANEXO I

CMIP6: Participating Model Groups

	Institution	Country		Institution	Country		Institution	Country
1	AWI	Germany	12	DOE	USA	23	MRI	Japan
2	BCC	China	13	EC-Earth-Cons	Europe	24	NASA-GISS	USA
3	BNU	China	14	FGOALS	China	25	NCAR	USA
4	CAMS	China	15	FIO-RONM	China	26	NCC	Norway
5	CasESM	China	16	INM	Russia	27	NERC	UK
6	CCCma	Canada	17	INPE	Brazil	28	NIMS-KMA	Republic of Korea
7	CCCR-IITM	India	18	IPSL	France	29	NOAA-GFDL	USA
8	CMCC	Italy	19	MESSY-Cons	Germany	30	NUIST	China
9	CNRM	France	20	MIROC	Japan	31	TaiESM	Taiwan, China
10	CSIR-CSIRO	South Africa	21	MOHC	UK	32	THU	China
11	CSIRO-BOM	Australia	22	MPI-M	Germany	33	Seoul Nat.Uni	Republic of Korea

Fonte:

https://www.wcrpclimate.org/images/modelling/WGCM/CMIP/CMIP6FinalDesign_GMD_180329.pdf