

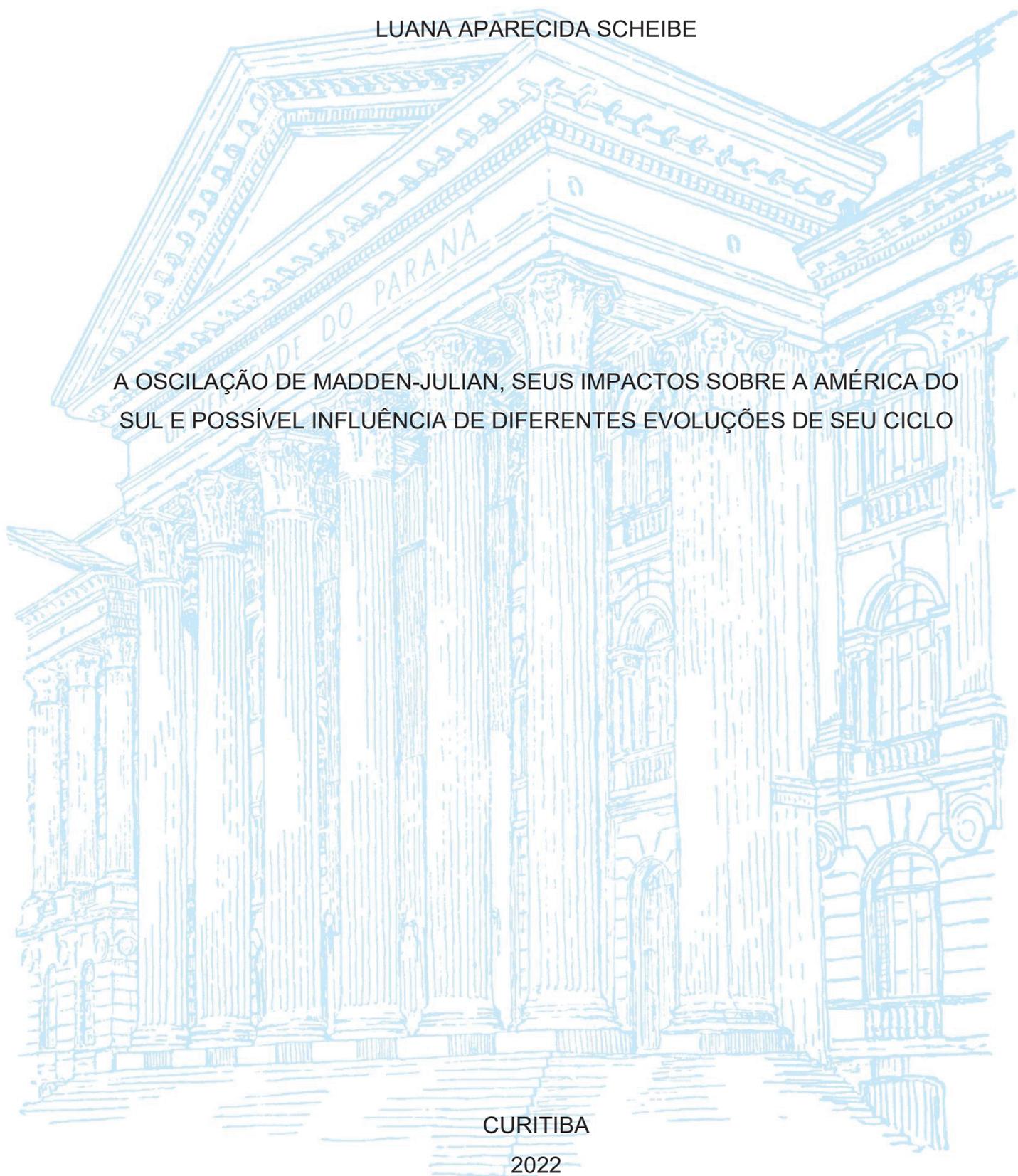
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

LUANA APARECIDA SCHEIBE

A OSCILAÇÃO DE MADDEN-JULIAN, SEUS IMPACTOS SOBRE A AMÉRICA DO SUL E POSSÍVEL INFLUÊNCIA DE DIFERENTES EVOLUÇÕES DE SEU CICLO

CURITIBA

2022



LUANA APARECIDA SCHEIBE

A OSCILAÇÃO DE MADDEN-JULIAN, SEUS IMPACTOS SOBRE A AMÉRICA DO  
SUL E POSSÍVEL INFLUÊNCIA DE DIFERENTES EVOLUÇÕES DE SEU CICLO

Dissertação apresentada ao curso de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Ambiental.

Orientadora: Profa. Dra. Alice Marlene Grimm

CURITIBA

2022

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO (CIP)  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ  
SISTEMA DE BIBLIOTECAS – BIBLIOTECA CIÊNCIA E TECNOLOGIA

Scheibe, Luana Aparecida

A oscilação de Madden-Julian, seus impactos sobre a América do Sul e possível influência de diferentes evoluções de seu ciclo. / Luana Aparecida Scheibe. – Curitiba, 2022.

I recurso on-line : PDF.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação Engenharia Ambiental.

Orientadora: Profª. Dra. Alice Marlene Grimm.

1. Climatologia (Oscilação de Madden-Julian). 2. Clima (Variabilidade intrassazonal). I. Grimm, Alice Marlene. II. Universidade Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental. III. Título.

Bibliotecária: Roseny Rivelini Morciani CRB-9/1585



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
SETOR DE TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ  
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO ENGENHARIA  
AMBIENTAL - 40001016075P3

## TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação ENGENHARIA AMBIENTAL da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da dissertação de Mestrado de **LUANA APARECIDA SCHEIBE** intitulada: **A Oscilação de Madden-Julian, seus impactos sobre a América do Sul e possível influência de diferentes evoluções de seu ciclo**, sob orientação da Profa. Dra. ALICE MARLENE GRIMM, que após terem inquirido a aluna e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de mestra está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

Curitiba, 06 de Dezembro de 2022.

Assinatura Eletrônica

06/12/2022 14:03:56.0

ALICE MARLENE GRIMM

Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica

06/12/2022 14:26:05.0

RENATO RAMOS DA SILVA

Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA)

Assinatura Eletrônica

06/12/2022 14:06:23.0

MICHAEL MANNICH

Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço aos meus pais, Angela I. Scheibe e Lidio E. Scheibe, minha irmã Elisangela de F. Scheibe e sobrinho Bernardo J. S. da Silva, por sempre estarem ao meu lado, apoiando minha carreira acadêmica e dando suporte emocional.

À Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Alice Marlene Grimm, obrigada por sua dedicação, ensinamentos e principalmente por despertar a minha paixão pelo maravilhoso mundo da Meteorologia. Por acreditar e confiar em mim ao longo dos seis anos que estou no laboratório. Continue sendo essa profissional incrível. Obrigada por compartilhar seus conhecimentos e histórias de superação e desafios, principalmente o de ser mulher na área de Meteorologia dentro do Departamento de Física da UFPR.

Aos pesquisadores Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Camila Bertoletti Carpenedo, Prof.<sup>o</sup> Dr.<sup>o</sup> Michael Mannich e Prof.<sup>o</sup> Dr.<sup>o</sup> Renato Ramos da Silva, que aceitaram o convite de compor a minha banca de Qualificação e Defesa de Mestrado, dedicando tempo e atenção.

Aos professores do Departamento de Engenharia Ambiental da UFPR que me apoiaram, aconselharam e enriqueceram meus conhecimentos durante o mestrado.

Aos meus colegas do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental da UFPR, em especial a Maria F. Dames e Andrei Chadanowicz.

Aos meus colegas do Laboratório de Meteorologia da UFPR, tanto os que me acompanham com amizade desde 2017, como aos mais novos que recentemente me ajudaram, tornando os dias de trabalho mais leves e divertidos, em especial ao Paulo V. Alves, Nicole C. Laureanti, Dayane Padoan, Kenedy C. Silvério, Laís G. Fernandes, Leonardo R. Hakoyama, Rildo G. Moura, Lucas F. Nogueira e Wellington de A. Silva.

Aos meus colegas e professores do Departamento de Física da UFPR, em especial a Alexandra Turmina.

Obrigada a todos (as) pela amizade, pelas aventuras, os conselhos, pelo companheirismo e suporte técnico.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

“O que, então, devemos escolher acreditar—que tudo foi determinado ou que somos livres para tomar decisões? Acredito que a resposta apropriada é óbvia se, como os matemáticos, introduzirmos certas premissas antes de tentar chegar a conclusões. Que nossa premissa seja a de que devemos acreditar no que é verdade, mesmo que doa, e não o que é falso, mesmo que nos faça felizes.”  
(Edward N. Lorenz, *The Essence of Chaos*, 1995, p. 159)

“What, then, should we choose to believe—that everything has been determined, or that we are free to make decisions? I believe that the appropriate answer is obvious if, like mathematicians, we introduce certain premises before attempting to reach conclusions.

Let our premise be that we should believe what is true even if it hurts, rather than what is false, even if it makes us happy.”

(Edward N. Lorenz, *The Essence of Chaos*, 1995, p. 159)

## RESUMO

A oscilação de Madden-Julian (OMJ) é o modo dominante de variabilidade climática intrassazonal nos trópicos na banda de 30 a 90 dias, caracterizada pela oscilação de anomalias de convecção tropical e circulação atmosférica que se deslocam para leste sobre todo o globo. No ciclo completo das anomalias de convecção tropical da OMJ, elas se iniciam sobre o Oceano Índico, deslocam-se até o Oceano Pacífico central e reaparecem através de teleconexões na América e África. Esse ciclo é dividido em oito fases, com duração média de aproximadamente seis dias cada. Os eventos mais intensos da OMJ e seus maiores impactos sobre a América do Sul (AS) ocorrem durante o verão austral (dezembro a março), mas acontecem também impactos relevantes nas demais estações do ano. Verificou-se a contribuição de cada fase da OMJ à precipitação diária média observada e à frequência dos eventos extremos de precipitação durante todas as estações do ano, o que constitui contribuição inédita. Além disto, buscou-se diagnosticar a influência das anomalias resultantes na AS sobre o reinício do ciclo desta oscilação no Oceano Índico e a propagação do impacto da OMJ para outras regiões. Para isso, foram calculadas anomalias de dados diários de algumas variáveis e estas foram filtradas para reter a banda de 20 a 90 dias. Foram feitas composições de anomalias filtradas de radiação de onda longa emergente (OLR) e função corrente zonalmente assimétrica (PSIZA) em 200 hPa e 850 hPa, no período de 1979 a 2009 para as diversas fases da OMJ. Os impactos mais fortes da OMJ na AS ocorrem no verão austral, mas há impactos relevantes em outras estações do ano, em regiões nas quais estas estações são chuvosas. Influência significativa foi também detectada na frequência de eventos extremos, notadamente sobre regiões populosas. Foram ainda analisados diferentes casos de evolução do ciclo da OMJ, decompondo as oito fases em quatro categorias (A à D) e em oito fases, de forma a caracterizar eventos primários (NABCD) e eventos sucessivos (DABCD). Eventos primários tem impactos mais fracos no início do ciclo, enquanto os eventos sucessivos apresentam impactos mais fortes e duradouros.

Palavras-chave: Oscilação de Madden-Julian. Variabilidade Intrassazonal. Eventos primários e sucessivos.

## ABSTRACT

The Madden-Julian Oscillation (MJO) is the dominant mode of tropical intraseasonal climate variability in the 30 to 90 day band, characterized by the oscillation of eastward moving tropical convection and atmospheric circulation anomalies. In the complete cycle of the MJO tropical convection anomalies, they start over the Indian Ocean, move to the central Pacific Ocean and reappear through teleconnections in America and Africa. This cycle is divided into eight phases, with an average duration of approximately six days each. The most intense MJO events and their greatest impacts on South America (SA) occur during the austral summer (December through March), but relevant impacts also occur in the other seasons of the year. The contribution of each phase of the MJO to the observed average daily precipitation and the frequency of extreme precipitation events during all seasons of the year was verified, which constitutes an unprecedented contribution. In addition, we sought to diagnose the influence of the resulting anomalies in the SA on the restart of the cycle of this oscillation in the Indian Ocean and the propagation of the impact of the MJO to other regions. For this, anomalies of daily data of some variables were calculated and filtered to retain the variability band from 20 to 90 days. Composites were made of filtered anomalies of outgoing longwave radiation and zonally asymmetric streamfunction at 200 hPa and 850 hPa, in the period from 1979 to 2009 for the different phases of the MJO. The strongest impacts of the MJO on SA occur in the austral summer, but there are relevant impacts in other seasons of the year, in regions where these seasons are rainy. Significant influence was also detected in the frequency of extreme events, notably over populated regions. Different cases of evolution of the MJO cycle were also analyzed, decomposing the eight phases into four categories (A to D) and into eight phases, in order to characterize primary events (NABCD) and successive events (DABCD). Primary events have weaker impacts at the beginning of the cycle, while successive events have stronger and longer-lasting impacts.

Keywords: Madden-Julian Oscillation. Intraseasonal variability. Primary and successive events.

## LISTA DE FIGURAS

- FIGURA 1: Ciclos anuais de precipitação na AS, no período 1950-2005. .... 19
- FIGURA 2: Precipitação média diária ( $\text{mmdia}^{-1}$ ) em SON, DJF, JJA, MAM, no período de 1979-2009, para dados de estações pluviométricas. .... 20
- FIGURA 3: Deslocamento da convecção tropical associada à OMJ desde o Oceano Índico até o Oceano Pacífico central, durante as 8 fases da OMJ; a partir de teleconexões, reaparece sobre a América e África..... 21
- FIGURA 4: Anomalias de OLR e de potencial de velocidade durante as 8 fases da OMJ, para os meses de verão, com padrão dipolar, se propagando para leste desde o Oceano Índico até o Oceano Pacífico e reaparecendo através de teleconexões sobre a América e África. As anomalias de convecção são representadas por anomalias de OLR (em  $\text{Wm}^{-2}$ ): negativas para convecção acentuada (mais chuva) e positivas para convecção suprimida (menos chuva). .... 23
- FIGURA 5: Diagrama das fases da OMJ, conforme os valores dos índices RMM, no período de janeiro a março de 1999. Cada ponto está relacionado a um dia. Só se considera que há OMJ em pontos fora do círculo interno, que corresponde à amplitude 1. .... 25
- FIGURA 6: Agrupamento das fases da OMJ em categorias A, B, C e D. .... 29
- FIGURA 7: Esquema do método de definição dos eventos primários..... 31
- FIGURA 8: Esquema do método de definição dos eventos sucessivos..... 31
- FIGURA 9: Composições de anomalias de OLR em cada fase da OMJ para SON, DJF, MAM e JJA. Intervalo de contorno de  $5 \text{ Wm}^{-2}$ , barra de cores indicando o nível de confiança das anomalias de OLR, com sinais indicando anomalias positivas ou negativas..... 40
- FIGURA 10: Composições de anomalias de PSIZA em 200 hPa em cada fase da OMJ para SON, DJF, MAM e JJA. Intervalo de contorno de  $1,2 \times 10^6 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ , barra de cores indicando o nível de confiança das anomalias de PSIZA em 200 hPa, com sinais indicando anomalias positivas ou negativas. .... 41
- FIGURA 11: Composições de anomalias de PSIZA em 850 hPa em cada fase da OMJ para SON, DJF, MAM e JJA. Intervalo de contorno de  $6 \times 10^5 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ , barra de cores indicando o nível de confiança das

anomalias de PSIZA em 850 hPa, com sinais indicando anomalias positivas ou negativas. ....	42
FIGURA 12: Composição de anomalias diária de precipitação (barra de cores, mm dia <sup>-1</sup> ) na primavera (SON, colunas da esquerda) e verão austral (DJF, colunas da direita), filtradas na banda de 20-90 dias, para cada fase da OMJ. Regiões hachuradas tem anomalias com nível de confiança maiores que 90%. ....	43
FIGURA 13: Composição de anomalias diária de precipitação (barra de cores, mm dia <sup>-1</sup> ) no outono (MAM, colunas da esquerda) e inverno austral (JJA, colunas da direita), filtradas na banda de 20-90 dias, para cada fase da OMJ. Regiões hachuradas tem anomalias com nível de confiança maiores que 90%. ....	44
FIGURA 14: Composições de anomalias de OLR (painel da esquerda), PSIZA em 200 hPa (painel central) e PSIZA em 850 hPa (painel da direita), para os dias que ocorreram em cada categoria dos eventos primários da OMJ durante o verão austral (DJF). Intervalo de contorno de 5 Wm <sup>-2</sup> , 1,2×10 <sup>6</sup> m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> e 6×10 <sup>5</sup> m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> , respectivamente, barra de cores indicando o nível de confiança das anomalias das variáveis, com sinais indicando anomalias positivas ou negativas.....	48
FIGURA 15: Composições de anomalias de OLR (painel da esquerda), PSIZA em 200 hPa (painel central) e PSIZA em 850 hPa (painel da direita), para os dias que ocorreram em cada fase dos eventos primários da OMJ durante o verão austral (DJF). Intervalo de contorno de 5 Wm <sup>-2</sup> , 1,2×10 <sup>6</sup> m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> e 6×10 <sup>5</sup> m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> , respectivamente, barra de cores indicando o nível de confiança das anomalias das variáveis, com sinais indicando anomalias positivas ou negativas.....	49
FIGURA 16: Composições de anomalias de OLR (painel da esquerda), PSIZA em 200 hPa (painel central) e PSIZA em 850 hPa (painel da direita), para os dias que ocorreram em cada categoria dos eventos sucessivos da OMJ durante o verão austral (DJF). Intervalo de contorno de 5 Wm <sup>-2</sup> , 1,2×10 <sup>6</sup> m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> e 6×10 <sup>5</sup> m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> , respectivamente, barra de cores indicando o nível de confiança das anomalias das variáveis, com sinais indicando anomalias positivas ou negativas.....	50

- FIGURA 17: Composições de anomalias de OLR (painel da esquerda), PSIZA em 200 hPa (painel central) e PSIZA em 850 hPa (painel da direita), para os dias que ocorreram em cada fase dos eventos sucessivos da OMJ durante o verão austral (DJF). Intervalo de contorno de  $5 \text{ Wm}^{-2}$ ,  $1,2 \times 10^6 \text{ m}^2\text{s}^{-1}$  e  $6 \times 10^5 \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ , respectivamente, barra de cores indicando o nível de confiança das anomalias das variáveis, com sinais indicando anomalias positivas ou negativas.....51
- FIGURA 18: Composições de anomalias de OLR (painel da esquerda), PSIZA em 200 hPa (painel central) e PSIZA em 850 hPa (painel da direita), para os dias que ocorreram em cada categoria do ciclo completo (ABCD) da OMJ durante o verão austral (DJF). Intervalo de contorno de  $5 \text{ Wm}^{-2}$ ,  $1,2 \times 10^6 \text{ m}^2\text{s}^{-1}$  e  $6 \times 10^5 \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ , respectivamente, barra de cores indicando o nível de confiança das anomalias das variáveis, com sinais indicando anomalias positivas ou negativas.....52
- FIGURA 19: Composições de anomalias de OLR (painel da esquerda), PSIZA em 200 hPa (painel central) e PSIZA em 850 hPa (painel da direita), para os dias que ocorreram em cada fase do ciclo completo (ABCD) da OMJ durante o verão austral (DJF). Intervalo de contorno de  $5 \text{ Wm}^{-2}$ ,  $1,2 \times 10^6 \text{ m}^2\text{s}^{-1}$  e  $6 \times 10^5 \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ , respectivamente, barra de cores indicando o nível de confiança das anomalias das variáveis, com sinais indicando anomalias positivas ou negativas.....53
- FIGURA 20: Razão entre a probabilidade de eventos extremos de precipitação em cada uma das fases da OMJ e a probabilidade média, durante a primavera (colunas da esquerda) e verão austral (colunas da direita). São mostradas em cores apenas as razões correspondentes à diferença significativa entre a probabilidade de ocorrência para cada fase da OMJ e a probabilidade média, com níveis de significância maiores que 85%.....55
- FIGURA 21: Razão entre a probabilidade de eventos extremos de precipitação em cada uma das fases da OMJ e a probabilidade média, durante o outono (colunas da esquerda) e inverno austral (colunas da direita). São mostradas em cores apenas as razões correspondentes à diferença significativa entre a probabilidade de ocorrência para cada

fase da OMJ e a probabilidade média, com níveis de significância maiores que 85%.....56

FIGURA 22: Factor loadings dos EOF's rotacionados da precipitação diária da primavera (SON, colunas da esquerda) e verão austral (DJF, colunas da direita), na faixa de 20 a 90 dias.....58

FIGURA 23: Factor loadings dos EOF's rotacionados da precipitação diária do outono (MAM, colunas da esquerda) e inverno austral (JJA, colunas da direita), na faixa de 20 a 90 dias.....59

## LISTA DE ABREVIATURAS OU SIGLAS

ACP	Análise de Componentes Principais
ANA	Agência Nacional de Águas e Saneamento
AS	América do Sul
BoM	<i>Bureau of Meteorology</i>
CESA	<i>Central-east South America</i> : Centro-Leste da América do Sul
DJF	Dezembro, janeiro e fevereiro
ENOS	El Niño - Oscilação Sul
EOF	<i>Empirical Orthogonal Functions</i> : Funções Empíricas Ortogonais
HN	Hemisfério Norte
HS	Hemisfério Sul
JJA	Junho, julho e agosto
MAM	Março, abril e maio
NOAA	<i>National Oceanic and Atmospheric Administration</i>
OIP	Oscilação Interdecadal do Pacífico
OLR	<i>Outgoing longwave radiation</i> : Radiação de onda longa emergente
OMA	Oscilação Multidecadal do Atlântico
OMJ	Oscilação de Madden-Julian
PPT	Precipitação
PSIZA	Função corrente zonalmente assimétrica
REOF	EOF Rotacionadas
RMM	<i>Real-Time Multivariate MJO Index</i>
S2S	<i>Subseasonal to Seasonal</i>
SESA	<i>Southeastern South America</i> : Sudeste da América do Sul
SON	Setembro, outubro e novembro
U200	Vento zonal em 200 hPa
U850	Vento zonal em 850 hPa
ZCAS	Zona de Convergência do Atlântico Sul

## SUMÁRIO

<b>1.</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>15</b>
1.1	JUSTIFICATIVA.....	17
1.2	OBJETIVOS .....	17
1.2.1	Objetivo geral .....	17
1.2.2	Objetivos específicos.....	17
<b>2.</b>	<b>REVISÃO DE LITERATURA.....</b>	<b>19</b>
2.1	CLIMATOLOGIA ANUAL E SAZONAL NA AMÉRICA DO SUL .....	19
2.2	OSCILAÇÃO DE MADDEN-JULIAN.....	20
2.2.1	Evolução da OMJ .....	22
2.2.2	OMJ e seus efeitos na AS .....	24
<b>3.</b>	<b>DADOS E METODOLOGIA .....</b>	<b>27</b>
3.1	DADOS.....	27
3.2	METODOLOGIA.....	27
3.2.1	Determinação das 8 fases da OMJ.....	28
3.2.2	Eventos Primários e Sucessivos.....	30
3.2.3	Anomalias diárias filtradas.....	30
3.2.4	Composições de Anomalias .....	32
3.2.5	Eventos Extremos.....	33
3.2.6	Teste de significância T de <i>Student</i> .....	34
3.2.7	Análise de Componentes Principais .....	35
<b>4.</b>	<b>RESULTADOS .....</b>	<b>37</b>
4.1	CARACTERÍSTICAS GERAIS DAS FASES DA OMJ .....	37
4.2	EVENTOS OMJ PRIMÁRIOS, SUCESSIVOS E COM CICLO COMPLETO	45
4.3	EVENTOS EXTREMOS .....	54
4.4	ANÁLISE DE COMPONENTES PRINCIPAIS .....	57
<b>5.</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>60</b>
5.1	RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	61
<b>6.</b>	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>62</b>

## 1. INTRODUÇÃO

Em 2021, o número de ocorrências de eventos desastrosos relacionados a desastres naturais em todo o mundo (432 eventos), superou a média anual de 357 eventos catastróficos entre os anos 2001 e 2020, sendo os de maior impacto principalmente sobre a América do Sul (AS), causando secas, enchentes e tempestades (CENTRE FOR RESEARCH ON THE EPIDEMIOLOGY OF DISASTERS, 2022). Além disso, o Brasil se encontra entre os 10 primeiros países onde os desastres na grande maioria decorrem de eventos extremos meteorológicos. Estes são geralmente associados com a variabilidade climática em diversas escalas de tempo como, por exemplo, a crise hídrica devida a uma seca severa no Sul do Brasil, causada pela sobreposição da fase positiva da Oscilação Multidecadal do Atlântico (OMA) e a fase negativa da Oscilação Interdecadal do Pacífico (OIP), aliadas a um episódio de El Niño Central no início de 2020 (GRIMM et al., 2020), seguido depois por um episódio La Niña.

Oscilações climáticas naturais, são variações quase-periódicas nos processos físicos da atmosfera e suas interações com o oceano, que podem modular as variações do tempo e clima ao redor do globo, em diversas escalas espaciais e temporais (intrassazonal, interanual e interdecadal). Essas oscilações influenciam os sistemas meteorológicos em todo o globo, podendo produzir extremos de precipitação intensa ou secas persistentes (GRIMM e TEDESCHI, 2009).

Além disso, pode haver a combinação das fases dessas oscilações climáticas em diferentes escalas de tempo, resultando em impactos ainda mais significativos sobre a precipitação na AS. A oscilação de maior impacto em escala interanual é a chamada El Niño - Oscilação Sul (ENOS) (GRIMM, 2011), enquanto as oscilações OMA e OIP produzem impactos na variabilidade decadal/interdecadal (GRIMM e SABOIA, 2015). Oscilações em escala de tempo mais rápidas, intrassazonais, também impactam significativamente a precipitação e seus eventos extremos na AS, por exemplo, a Oscilação de Madden-Julian (OMJ) (GRIMM, 2019).

A OMJ é o principal modo de variabilidade climática de escala intrassazonal dominante sobre regiões tropicais, caracterizado por oscilações de convecção tropical e circulação atmosférica, que se desloca para leste, tem período médio entre 30-90 dias e afeta a precipitação e a circulação atmosférica em todo o globo

(ZHANG, 2005). Geralmente considera-se que o ciclo da OMJ se inicia sobre o Oceano Índico, através do desenvolvimento de anomalias de baixa pressão em superfície, aumento na convecção e aquecimento da troposfera. A convecção anômala tropical intensa se move para leste até o Pacífico central, desaparece no Pacífico leste, onde as águas são mais frias, e reaparece na América e África, a partir da propagação das perturbações de circulação tropical (HOLTON, 2004) e de teleconexões extratropicais (GRIMM, 2019).

Segundo Grimm (2019), os eventos mais intensos da OMJ ocorrem no verão austral (dezembro a março), produzindo fortes impactos na precipitação e frequência de seus eventos extremos sobre a AS, especialmente no Brasil tropical e subtropical, incluindo as regiões sob influência da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), que se estende sobre o Sudeste do Brasil, a região mais populosa do país.

Em relação às outras oscilações intrassazonais, a OMJ possui maior intensidade, previsibilidade e impacto no tempo e clima ao redor do globo, o que tem aumentado o interesse científico em estudar sua propagação, geração, evolução, impactos, teleconexões e previsibilidade do seu ciclo. Um ciclo de OMJ pode ser dividido em oito fases (1 a 8), com duração média de seis dias em cada fase. Os impactos da OMJ nas anomalias de precipitação sobre a AS e sua propagação para outras regiões e o reinício do seu ciclo no Oceano Índico, tornam-se importantes para compreender os processos físicos envolvendo a dinâmica de teleconexões atmosféricas trópicos-trópicos e trópicos-extratrópicos.

O projeto global *Subseasonal to Seasonal (S2S) Prediction Project* (<http://s2sprediction.net>), coordenado pela Organização Meteorológica Mundial (VITART, 2017), tem como objetivo preencher a lacuna entre as previsões de tempo (1 a 10 dias) e as previsões climáticas sazonais (acima de 1 mês). Esta lacuna é chamada de previsão subssazonal (7 a 30 dias) (GRIMM, HAKOYAMA e SCHEIBE, 2021). A previsibilidade nesta escala é influenciada pelas oscilações climáticas intrassazonais, como a OMJ. É, portanto, essencial o estudo acurado desta oscilação, suas diferentes evoluções e seus efeitos no tempo e clima da AS, fornecendo conhecimento para melhorias nos modelos atmosféricos e na previsão subssazonal.

## 1.1 JUSTIFICATIVA

Devido ao aumento significativo de eventos extremos meteorológicos no Brasil, tanto de precipitação como de seca, e à influência da OMJ sobre a chuva de verão e seus extremos em regiões extensas e populosas no Brasil e AS (GRIMM, 2019) há interesse em verificar esta influência também nas outras estações do ano, além do verão, tanto sobre a precipitação diária como sobre eventos extremos acima do percentil 90. Também é relevante verificar o papel das anomalias produzidas pela OMJ na AS sobre o reinício do ciclo desta oscilação no Oceano Índico e na propagação do impacto da OMJ para outras regiões. Estudos recentes já mostraram o grande impacto da OMJ sobre a precipitação diária e os eventos extremos de verão na AS (GRIMM, 2019), e sua influência nas previsões subssazonais (GRIMM, HAKOYAMA e SCHEIBE, 2021), escala de tempo de grande importância para gerenciamento de recursos hídricos e planejamento da defesa civil.

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 Objetivo geral

Determinar o impacto da OMJ na precipitação da AS e seus eventos extremos, para cada estação do ano, de forma geral e para diferentes tipos de evolução do seu ciclo, procurando verificar a sua possível influência sobre o reinício do ciclo desta oscilação no Oceano Índico e a propagação do impacto da OMJ para outras regiões. Verificar também as condições de ocorrência dos maiores impactos da OMJ sobre a AS nestes casos distintos, para aperfeiçoar sua previsão.

### 1.2.2 Objetivos específicos

- Caracterizar as anomalias médias gerais em cada fase da OMJ;
- Separar ciclos da OMJ que evoluíram como eventos primários (sem evento imediatamente anterior) ou como eventos sucessivos (como continuação de evento anterior), para verificar suas características;
- Identificar impactos na convecção e circulação atmosférica sobre a AS em cada fase e tipo de evolução, durante o verão;

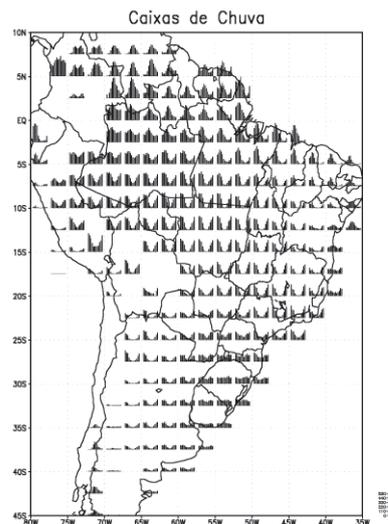
- Diagnosticar quais anomalias de convecção no ciclo da OMJ são importantes para produzir impactos na AS e garantir a continuidade do ciclo da OMJ.

## 2. REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 CLIMATOLOGIA ANUAL E SAZONAL NA AMÉRICA DO SUL

A precipitação da AS apresenta variabilidade climática natural em várias escalas de tempo: subssazonal, interanual e interdecadal, influenciada por oscilações climáticas em diversas escalas temporais. O ciclo anual de precipitação na AS possui características de monção de verão (estação quente chuvosa e estação fria seca) em grande parte de seu território, exceto a Região Sul do Brasil, que possui baixa sazonalidade. No nordeste e norte da AS a maior parte da precipitação anual se concentra nos meses de abril a agosto (FIGURA 1).

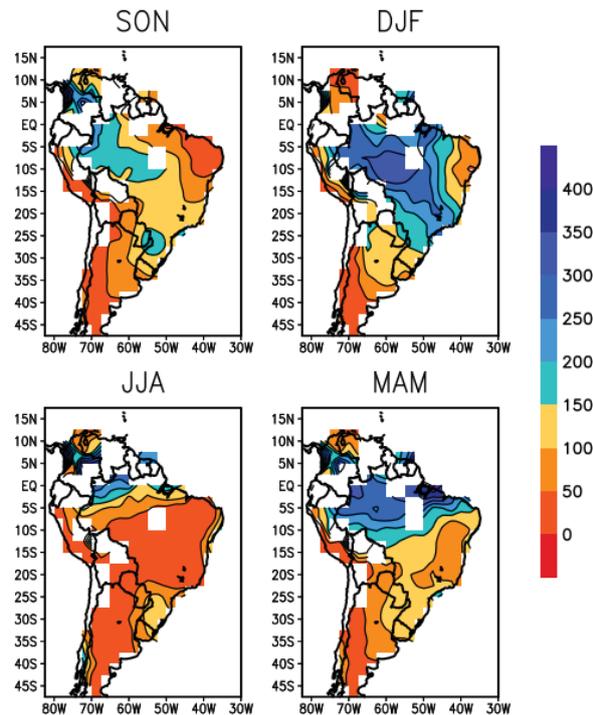
FIGURA 1: Ciclos anuais de precipitação na AS, no período 1950-2005.



FONTE: Grimm (2011).

Analisando a climatologia da precipitação sazonal (FIGURA 2) entre os anos 1979-2009, nota-se também que o verão austral (dezembro, janeiro e fevereiro, DJF) é a estação mais chuvosa da AS, em associação com o sistema de monção da AS. Na primavera (setembro, outubro e novembro, SON), a precipitação é mais intensa no noroeste da AS e no Sul do Brasil, embora significativa também no Centro-Oeste e Sudeste. No outono (março, abril, maio, MAM), a chuva se concentra nas regiões noroeste e nordeste da AS, assim como no sudeste da AS e Centro-Oeste do Brasil. Já no inverno (junho, julho, agosto, JJA) há pouca chuva na maior parte da AS, com exceção do norte do continente e Sul do Brasil.

FIGURA 2: Precipitação média diária ( $\text{mmdia}^{-1}$ ) em SON, DJF, JJA, MAM, no período de 1979-2009, para dados de estações pluviométricas.

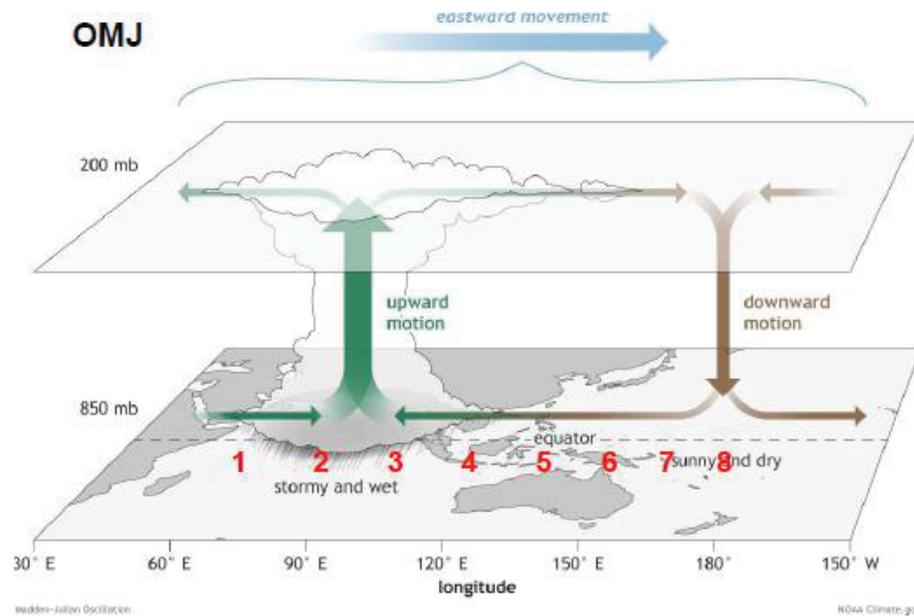


## 2.2 OSCILAÇÃO DE MADDEN-JULIAN

Madden e Julian (1971) verificaram, através de análises espectrais utilizando transformadas de Fourier em séries temporais, oscilações fortemente relacionadas entre os campos de vento zonal, pressão e temperatura do ar em vários níveis da troposfera. Concluíram que esta oscilação de larga escala na circulação é orientada na direção zonal, deslocando-se para leste na faixa equatorial, em escala de tempo intrassazonal.

A OMJ é caracterizada por oscilação da convecção tropical e circulação atmosférica com período de 30 a 90 dias, que se propaga para o leste, desde o Oceano Índico até o Oceano Pacífico central, regiões de mais elevada temperatura da superfície do mar, e desaparece no leste do Oceano Pacífico, onde a superfície do mar é mais fria. Reaparece na AS e na África através de teleconexões atmosféricas. A resposta atmosférica ao aquecimento diabático anômalo em regiões tropicais, produzido por esta convecção, afeta anomalias de circulação atmosférica nos trópicos e extratropicais, resultando em variações naturais e quase periódicas de convecção associada com a OMJ (GRIMM, 2019) (FIGURA 1).

FIGURA 3: Deslocamento da convecção tropical associada à OMJ desde o Oceano Índico até o Oceano Pacífico central, durante as 8 fases da OMJ; a partir de teleconexões, reaparece sobre a América e África.



FONTE: Zhang (2020).

A OMJ apresenta as mais intensas anomalias de convecção sobre o Oceano Índico e a Indonésia (FIGURA 3). Na região de convecção ativa, as parcelas de ar possuem movimento ascendente (*upward motion*), com ar convergindo para uma baixa pressão em superfície (850 hPa), subindo e sofrendo expansão adiabática até atingir o nível de condensação por levantamento, produzindo precipitação e tempestades. Já em altos níveis (200 hPa) sobre a mesma região o ar diverge, produzindo circulação anticiclônica. À convecção ativa em uma região está associado movimento descendente em outra, onde ocorre convergência em altos níveis e divergência em baixos níveis (850 hPa), ou seja, as parcelas de ar possuem movimento subsidente (*downward motion*), sofrem aquecimento adiabático, se tornam mais secas e não há formação de nuvens (“céu limpo”). Sobre esta região, em altos níveis (200 hPa) o ar converge formando uma circulação ciclônica dos ventos. A convecção reaparece sobre a América e África, a partir de teleconexões.

Oscilações intrassazonais, como a OMJ, estão associadas com as ondas equatoriais de Rossby (propagando-se para oeste) e de Kelvin (propagando-se para o leste) (HOLTON, 2004). A interação entre essas ondas produzidas pela convecção anômala da OMJ, do tipo dipolo leste-oeste, intensifica as circulações tropicais climatológicas em certas regiões e as enfraquece em outras, modulando a velocidade de propagação da oscilação (SEO e SON, 2012).

O Hemisfério Leste do globo possui convecção mais profunda associada à OMJ, resultando em uma velocidade de propagação de  $\approx 5$  m/s, velocidade de fase mais baixa se comparada a do Hemisfério Oeste ( $\approx 30-35$  m/s), onde a convecção e a temperatura da superfície do mar são menores e, portanto, anomalias de vento e pressão se propagam como ondas desacopladas da convecção (MATTHEWS, 2006; MILLIFF e MADDEN, 1996; WEICKMANN et al., 1985; ZHANG, 2005).

A OMJ é uma das oscilações moduladoras dos movimentos atmosféricos nos trópicos. Tal região possui baixa previsibilidade nos modelos numéricos de previsão do tempo. Uma das razões é devido às condições de equilíbrio não dominarem sobre esses movimentos, por exemplo, o equilíbrio geostrófico. A identificação de sinais ou condições de equilíbrio reguladores dos movimentos atmosféricos tropicais pode aprimorar as previsões atmosféricas diárias em diversas escalas temporais e espaciais (LAING e EVANS, 2011).

### 2.2.1 Evolução da OMJ

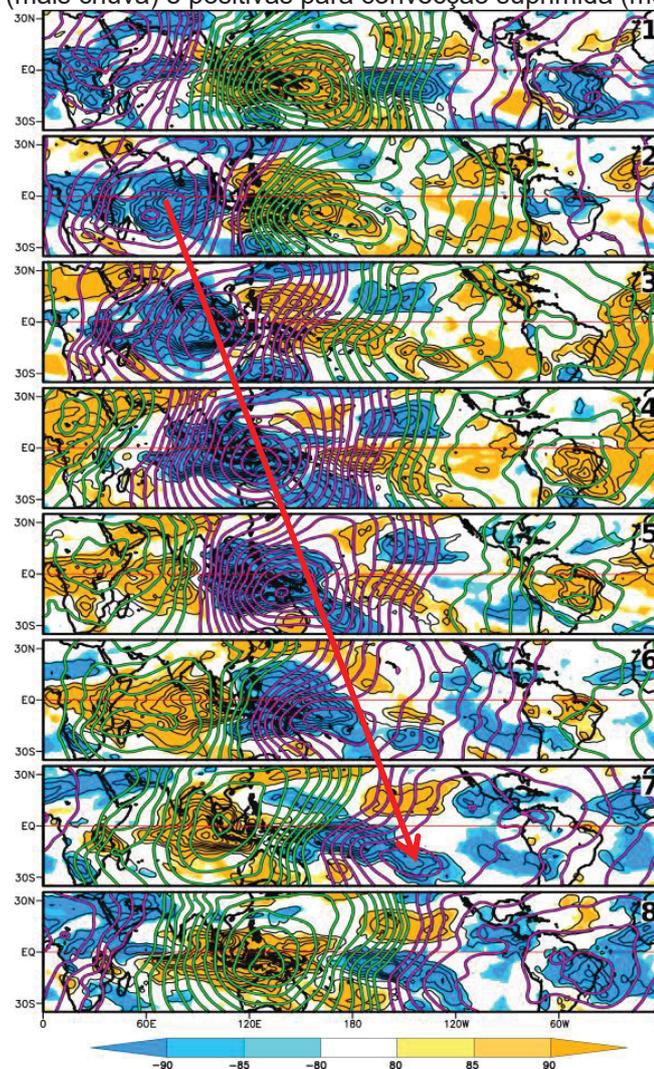
A OMJ se propaga ao longo da faixa tropical do globo com um ciclo completo médio durando cerca de 48 dias. Wheeler e Hendon (2004) dividiram esse ciclo em oito fases, cada uma com duração média de aproximadamente seis dias, através do índice *Real-Time Multivariate MJO Index* (RMM) (FIGURA 4). Este índice é definido a partir de modos de variabilidade das anomalias de radiação de onda longa emergente (*outgoing longwave radiation*, OLR, em inglês) e das anomalias de vento zonal em altos e baixos níveis ( $u_{200}$  e  $u_{850}$ , nos níveis de 200 hPa e 850 hPa). Os autores consideram períodos inativos da OMJ aqueles nos quais a amplitude da oscilação, definida a partir desse índice, é menor do que 1 (FIGURA 5).

Um ciclo completo da OMJ tem início na fase 1, quando há convecção acentuada sobre o Oceano Índico e diminuída sobre o Oceano Pacífico oeste, evoluindo sobre todo o globo até reiniciar o ciclo (FIGURA 3 e FIGURA 4). Como essa propagação nem sempre ocorre com velocidade constante ou de forma contínua, havendo períodos ativos e inativos (dias neutros), existem casos de evolução contínua (ciclos que se iniciam como continuação de ciclos anteriores) e descontínua (se iniciam a partir de situações neutras, sem eventos de OMJ antecedentes), que envolvem a formação da oscilação, desenvolvimento e dissipação. As forças responsáveis pelo desenvolvimento desta convecção

acentuada sobre o Oceano Índico ainda são desconhecidas, há apenas algumas teorias na literatura (ZHANG et al., 2020).

Matthews (2008) estudou casos de evoluções sucessivas e primárias, agrupando as oito fases da OMJ duas a duas. No entanto, as análises englobaram todas as estações do ano nos ciclos da OMJ, o que não permite analisar os mecanismos das evoluções contínuas e descontínuas da OMJ, pois as teleconexões dependem do estado básico da atmosfera em cada estação.

FIGURA 4: Anomalias de OLR e de potencial de velocidade durante as 8 fases da OMJ, para os meses de verão, com padrão dipolar, se propagando para leste desde o Oceano Índico até o Oceano Pacífico e reaparecendo através de teleconexões sobre a América e África. As anomalias de convecção são representadas por anomalias de OLR (em  $Wm^{-2}$ ): negativas para convecção acentuada (mais chuva) e positivas para convecção suprimida (menos chuva).



FONTE: Grimm (2019).

Straub (2012) definiu os eventos primários, como sequências de quatro fases de dias ativos de OMJ (amplitude  $\geq 1$ ), precedidas por pelo menos 7 dias inativos, exemplo: a sequência 12345 precedida por 7 dias inativos. No caso de eventos sucessivos, Straub (2012) avaliou sequências de 5 fases, nas quais a fase central foi precedida por duas fases anteriores, e sucedida por duas fases seguintes. Por exemplo, na sequência das fases 78123, a fase 1 foi precedida pelas fases 7 e 8 e sucedida pelas fases 2 e 3.

No entanto, os resultados de Straub (2012) foram avaliados por diagramas de Hovmöller, no quais é mostrada a evolução temporal das anomalias médias entre as latitudes 7.5 N e 7.5 S, utilizando as longitudes no eixo x e no eixo y os 20 dias anteriores e posteriores ao primeiro dia ativo de OMJ na fase 1, nos casos de eventos primário e sucessivos. Como mostrado no exemplo acima, seus resultados não são sensíveis às fases da OMJ, definidas por Wheeler e Hendon (2004), dificultando a verificação das características destas evoluções e os impactos de convecção e circulação atmosférica sobre o globo, em cada fase.

### 2.2.2 OMJ e seus efeitos na AS

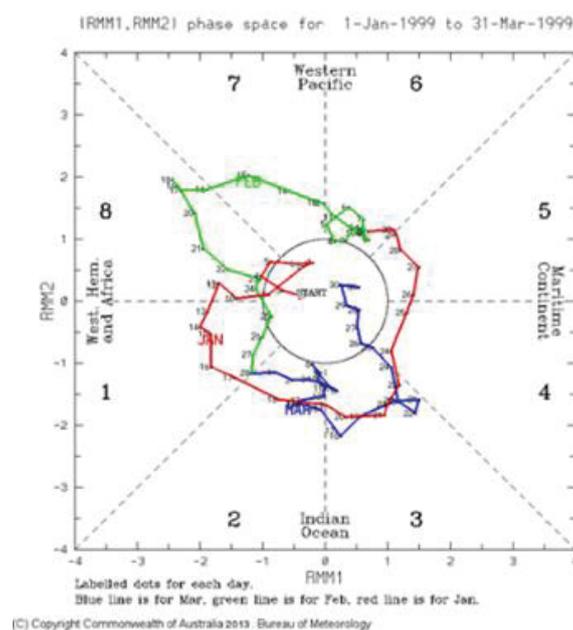
A OMJ apresenta sinal mais intenso sobre os oceanos Índico e Pacífico durante o verão austral (dezembro a março) (ZHANG, 2005), mas produz impactos significativos sobre a precipitação diária e seus eventos extremos na AS, especialmente sobre o Brasil (GRIMM, 2019). Contudo, estudos indicam existência de impactos significativos sobre a probabilidade de ocorrência de médias semanais no tercil superior em regiões relevantes na AS também durante a primavera, outono e inverno (ALVAREZ et al., 2015).

Os impactos significativos sobre a precipitação diária produzidos pela OMJ durante o verão elevam a média diária da precipitação em mais de 30% em relação a climatologia durante a fase 1, especialmente sobre a região Centro-Leste da AS (CESA). Sobre a ZCAS e a região núcleo da monção na AS, há um aumento de 2 vezes a frequência de eventos extremos, na fase 1, e mais de 1.6 vezes na fase 3 na região da Bacia do Paraná/La Plata (GRIMM, 2019). Mayta et al. (2018), Grimm (2019) e Grimm et al. (2021) mostraram que durante a estação chuvosa os episódios de fases ativas e inativas da monção da AS são moduladas pelas oscilações intrassazonais, incluindo a OMJ.

As anomalias positivas de precipitação de verão no norte de CESA, durante a fase 8, são iniciadas pelas teleconexões trópicos-trópicos, mas na fase 1 as anomalias positivas são mais intensas devida à teleconexão trópicos-extratropicos, conforme mostrado por Grimm (2019), a partir de Funções de Influência (GRIMM e SILVA DIAS, 1995). Esta teleconexão produz anomalia anticiclônica (ciclônica) sobre a região extratropical (subtropical) da AS, favorecendo a convergência (divergência) de umidade sobre a região sob influência da ZCAS (Sudeste da AS, SESA, do inglês *Southeastern South America*).

Estudo sobre a influência da OMJ na probabilidade de ocorrência de precipitação semanal no tercil superior indica impactos significativos também em outras estações do ano (ALVAREZ et al., 2015). Durante os meses de DJF houve maior aumento da probabilidade de ocorrência nas fases 8 e 1 em CESA e na fase 3 em SESA. Nos meses de MAM houve maior aumento de probabilidade na fase 2 em CESA, desde o Nordeste do Brasil até a ZCAS, seguida pelas fases 1 e 3. Já em SON precipitações semanais têm maior probabilidade de estar no tercil superior durante a fase 7 em CESA, e durante a fase 1 em SESA. Em JJA, as maiores probabilidades de ocorrência se concentram sobre SESA na fase 8.

FIGURA 5: Diagrama das fases da OMJ, conforme os valores dos índices RMM, no período de janeiro a março de 1999. Cada ponto está relacionado a um dia. Só se considera que há OMJ em pontos fora do círculo interno, que corresponde à amplitude 1.



FONTE: Site *Bureau of Meteorology* (BoM). Disponível em: <<http://www.bom.gov.au/climate/mjo/>>. Acesso em: 22 ago. 2022.

Outros estudos, como Valadão et al. (2017), avaliaram os impactos da OMJ sobre a sazonalidade da precipitação, mas os autores focaram apenas sobre a Região Nordeste do Brasil. Seus resultados mostraram que sobre essa região as anomalias positivas de precipitação durante o verão austral possuem maior impacto nas fases 1 e 2, e anomalias negativas de precipitação nas fases 5 e 6. Durante o outono, as anomalias negativas de precipitação foram significativas nas fases 2 e 3, e anomalias positivas nas fases 5 e 6. No inverno, anomalias negativas (positivas) de precipitação foram significativas na fase 1 (fase 6). Durante a primavera, nas fases 7 e 8 se notam significativas anomalias negativas de precipitação ao sul do Nordeste, e anomalias positivas nas fases 4 e 5.

Os resultados de Matthews (2008) sobre as evoluções contínuas e descontínuas da OMJ, apresentaram anomalias negativas de OLR significativas sobre a AS, 5 dias antecedentes a eventos sucessivos, invertendo o sinal após 5 dias e permanecendo 15 dias após estes eventos se iniciarem. As anomalias negativas de OLR estão associadas a anomalias positivas de precipitação, ou seja, há indícios da existência de convecção significativa sobre a AS antes dos eventos sucessivos, e indicações de anomalias negativas de precipitação persistentes até 15 dias após estes eventos se iniciarem. Seus resultados também mostraram a existência de anomalias positivas de OLR até 5 dias após o início de eventos primários.

### 3. DADOS E METODOLOGIA

#### 3.1 DADOS

Foram utilizados dados meteorológicos observados de precipitação (PPT) existentes no Laboratório de Meteorologia da UFPR, provenientes da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), do Brasil, de outras instituições hidrometeorológicas de países da AS e do conjunto de dados preparados por Liebmann and Allured (2005), totalizando mais de 10 mil estações, com resolução espacial de grade de  $1^\circ \times 1^\circ$ , no período de janeiro de 1979 a dezembro de 2009. Esses dados de PPT foram submetidos a verificações e correções de problemas detectados (GRIMM e SABOIA, 2015), como dados faltantes registrados erroneamente como zeros, séries de valores iguais entre duas estações distantes, valores altos ou fisicamente irrealistas e regimes de precipitação improváveis em certa região.

Dados de função corrente zonalmente assimétrica (PSIZA) em altos (200 hPa) e baixos (850 hPa) níveis, relacionada com o componente rotacional do vento, foram obtidos dos dados de circulação atmosférica da Reanálise NCEP/NCAR (KALNAY et al., 1996). Dados de OLR, interpolados segundo Liebmann e Smith (1996), foram obtidos no site do *Physical Sciences Laboratory*, laboratório da NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*), disponível em <http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/>. Os dados de PSIZA e OLR possuem resolução em grade de  $2,5^\circ \times 2,5^\circ$  (longitude x latitude) e abrangem o período de janeiro de 1979 a dezembro de 2009, num total de 31 anos.

Utilizou-se uma lista de dias em cada fase da OMJ, organizada por Wheeler e Hendon (2004), e disponibilizada para o público através do site do *Bureau of Meteorology* (BoM) da Austrália, para realizar as composições de anomalias médias diárias para cada fase. Esta lista é composta pelos valores da amplitude da OMJ e valores dos índices RMM que definem cada fase, disponível em <http://www.bom.gov.au/climate/mjo/graphics/rmm.74toRealttime.txt>.

#### 3.2 METODOLOGIA

Foi utilizado o método de Wheeler e Hendon (2004) para determinar as datas em que ocorreram as oito fases da OMJ (seção 3.2.1). A partir da evolução e continuidade destas fases foram classificados diferentes tipos de evolução da OMJ: eventos primários, eventos sucessivos e ciclos completos ABCD (seção 3.2.2).

Foram calculadas anomalias de dados diários das variáveis selecionadas e estas foram filtradas para reter a banda de 20 a 90 dias (seção 3.2.3), como em Grimm (2019). As composições de anomalias de precipitação foram feitas para a AS e as de anomalias de OLR e PSIZA em 200 hPa e 850 hPa em domínio global (seção 3.2.4), de forma geral para todas as fases da OMJ nas várias estações do ano e separadamente, para as fases de diferentes tipos de evolução da OMJ.

A análise das anomalias de convecção e circulação atmosférica associadas a cada caso permite diagnosticar quais anomalias de convecção no ciclo da OMJ são importantes para produzir seus impactos na AS e quais anomalias (incluindo as da AS) são importantes para garantir a continuidade do ciclo da OMJ.

### 3.2.1 Determinação das 8 fases da OMJ

A lista de dias em cada fase da OMJ foi obtida a partir do método de Wheeler e Hendon (2004). As fases são determinadas a partir dos índices de RMM, que captam a propagação para leste e a estrutura em grande escala da OMJ para convecção e vento zonal na faixa equatorial. Os índices RMM1 e RMM2, já calculados pelo BoM, são obtidos pelos seguintes passos.

- Análise de Funções Empíricas Ortogonais (EOF, do inglês *Empirical Orthogonal Functions*) para médias entre 15°S e 15°N de OLR,  $u_{200}$  e  $u_{850}$ . EOF é um método estatístico que calcula autovetores e autovalores de uma matriz de covariância das variáveis. Os autovetores fornecem a distribuição espacial dos modos de variabilidade, enquanto os autovalores dão a variância percentual dos dados explicada por cada modo.
- Cálculo dos índices RMM1 e RMM2 pela projeção das anomalias das variáveis OLR,  $u_{200}$  e  $u_{850}$  sobre o principal par das EOF's (EOF1 e EOF2); essas anomalias são calculadas com a remoção do ciclo anual e variabilidade interanual, normalizadas por desvios padrões,

além de subtrair a média dos últimos 120 dias para amenizar variações de mais longo prazo.

- Definição das 8 fases da OMJ em intervalos de 45°, de 0° a 360°, do ângulo de fase definido como  $\theta = \tan^{-1}(RMM1/RMM2)$ .

A EOF1 reproduz a convecção aumentada produzida pela OMJ sobre o Continente Marítimo e a EOF2 descreve a convecção aumentada sobre o Oceano Pacífico e AS.

Considera-se que a OMJ está ativa se a sua amplitude estiver acima ou igual a 1 ( $A = (RMM1)^2 + (RMM2)^2 \geq 1$ ). Caso contrário, o dia é considerado de fase neutra (N) (WHEELER e HENDON, 2004). A evolução da OMJ pode ser representada graficamente por um vetor de duas dimensões de fase definido por  $Z(t) = [RMM1(t), RMM2(t)]$  (FIGURA 5).

A partir das 8 fases da OMJ, Hall et al. (2001) e Matthews (2008) criaram as categorias A, B, C e D que correspondem às médias das fases 2+3, 4+5, 6+7, 8+1, respectivamente (FIGURA 6).



Analisando o padrão de convecção pode-se observar o início do desenvolvimento de convecção sobre o Oceano Índico oeste, assim como uma convecção aumentada sobre a AS e África (FIGURA 4), nas fases 8 e 1, ou seja, na categoria D, fases que mais afetam as chuvas na AS (GRIMM, 2019). Contudo, Matthews (2008) assume que um ciclo MJO se inicia com máxima convecção no Oceano Índico nas fases 2 e 3 (FIGURA 4). Com isso, os dias ativos de OMJ das fases 2 e 3 foram incluídos na sua categoria A, os das fases 4 e 5 na B, os das fases 6 e 7 na C e os das fases 8 e 1 na categoria D.

Foram criadas listas de dias nos quais ocorreram eventos primários (NABCD), ou eventos sucessivos (DABCD), segundo Matthews (2008). Analisando também ciclos completos de OMJ (ABCD), definidos pela ocorrência das quatro categorias de Matthews (2008), em sequência e sem separar os diferentes eventos, ou seja, englobam tanto os eventos primários quanto os eventos sucessivos.

### 3.2.2 Eventos Primários e Sucessivos

Um evento é primário quando o primeiro dia ativo de OMJ da categoria A foi precedido por mais que 3 dias inativos (N) entre os 6 dias que o antecedem, sendo o dia imediatamente anterior de fase neutra. Caso isso ocorra, verifica-se se essa categoria A faz parte de um ciclo completo da OMJ (ABCD). Neste caso, os dias deste ciclo são incluídos numa lista de eventos primários e são montadas as listas de dias das categorias A, B, C, D destes eventos primários. Dias de OMJ inativa (fase neutra, N) que os antecedem, são classificados como de categoria N, na qual são incluídos até 6 dias que antecederam a fase A (FIGURA 7).

Um evento é sucessivo quando a categoria D precedeu um ciclo completo (DABCD). Caso ocorram eventos sucessivos repetidos (DABCDABCD) os dias na categoria D são classificados como  $D_i$  antes do início de um ciclo e como  $D_f$  no final de um ciclo. Então são criadas listas de dias para as fases  $D_i$ , A, B, C,  $D_f$  para eventos sucessivos. Nos eventos sucessivos repetidos os dias na categoria D entre eles são incluídos como  $D_f$  no final do primeiro ciclo e como  $D_i$  no início do segundo (FIGURA 8).

Contudo, há desvantagens em agrupar as oito fases duas a duas, pois diminui a resolução temporal da análise. Portanto, avalia-se também a evolução destes tipos de ciclos usando as oito fases de Wheeler e Hendon (2004).

### 3.2.3 Anomalias diárias filtradas

São calculadas as anomalias diárias de PPT, OLR e PSIZA (200 hPa e 850 hPa), a partir da diferença entre os valores observados e a média climatológica de cada variável para cada dia do ano, no período de 1979-2009. O ciclo anual de valores climatológicos diários é calculado para cada ponto da grade, suavizando as médias diárias obtidas sobre todos os anos com uma média móvel de 31 dias, pois há variação espúria no ciclo anual das médias diárias devida à amostra relativamente curta. O ciclo anual climatológico suavizado é então subtraído dos valores diários em cada ponto da grade, para obter a série de anomalias. Estas anomalias são submetidas ao Filtro de Lanczos (DUCHON, 1979), para reter apenas a variabilidade na banda de 20-90 dias.

FIGURA 7: Esquema do método de definição dos eventos primários.

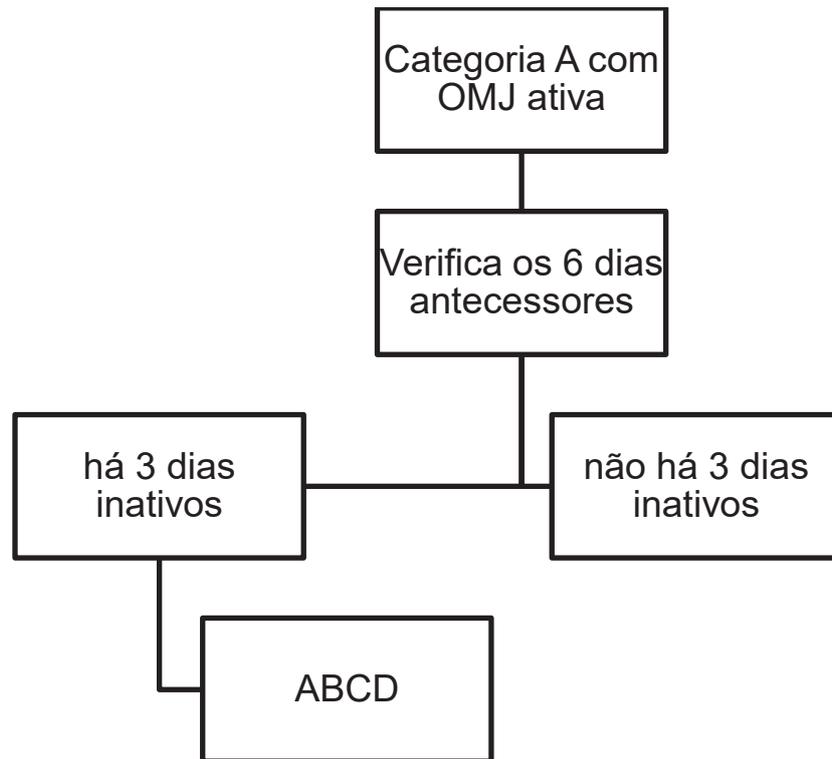
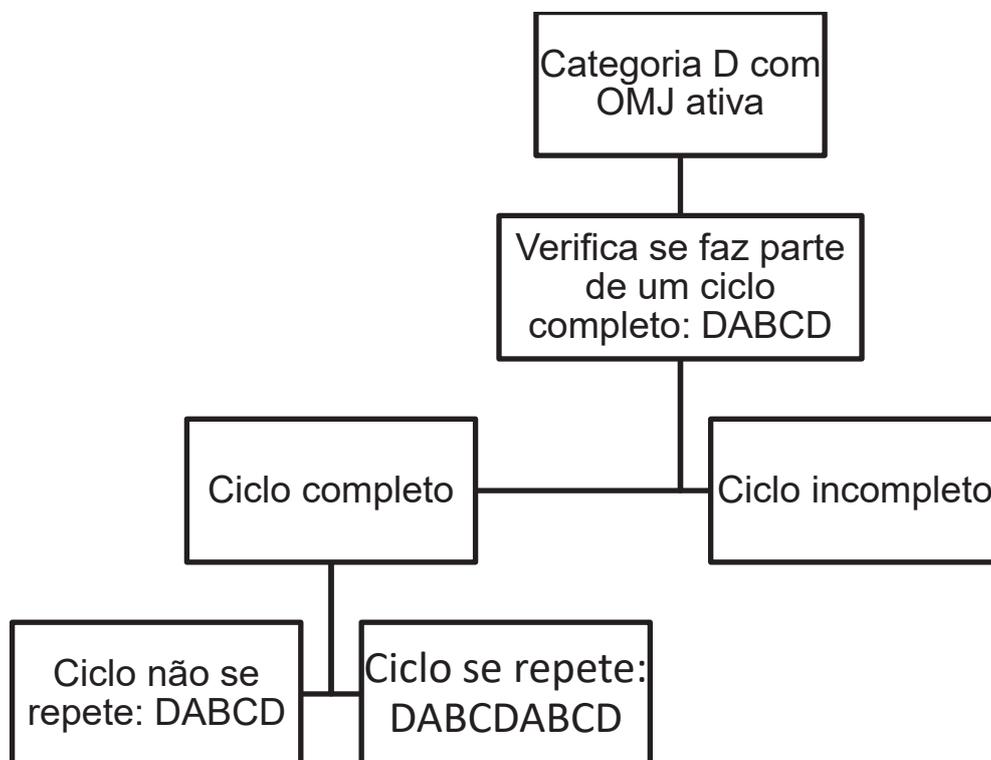


FIGURA 8: Esquema do método de definição dos eventos sucessivos.



Este filtro transforma os dados originais de entrada no domínio do tempo, ressaltando o comportamento da oscilação em determinada banda de frequências (ou períodos). A partir de uma fórmula matemática de relação linear, aplicando uma média móvel com pesos e com o uso do fator sigma ( $\sigma$ ) de Lanczos, mantém nos dados apenas a variabilidade intrassazonal na banda de 20 a 90 dias:

$$y_i = \sum_{k=-\infty}^{\infty} w_k x_{i-k}$$

onde  $i$  é tempo,  $y_i$  é a sequência de dados de saída,  $x_{i-k}$  a sequência de dados de entrada e  $w_k$  os pesos.

Os pesos do filtro passa-banda são dados por:

$$w_k = \left( \frac{\sin 2\pi f_{c2}k}{\pi k} - \frac{\sin 2\pi f_{c1}k}{\pi k} \right) \sigma$$

Nesta equação  $f_{c1} = 1/90$  e  $f_{c2} = 1/20$  são as frequências de corte,  $n = 211$  é o número de pesos, que satisfaz a condição  $n \geq 1,3/(f_{c2} - f_{c1})$ , essa condição deve ser satisfeita para que o filtro não deixe frequências indesejadas passarem,  $k = -n, \dots, 0, \dots, n$  e  $\sigma = (\sin \pi k/n)/(\pi k/n)$  é o fator sigma (DUCHON, 1979).

O  $\sigma$  de Lanczos é utilizado para reduzir o fenômeno de Gibbs, ou seja, atenuar a oscilação da soma parcial de  $n$  termos da série de Fourier perto de descontinuidades de salto. Ao aplicar esse filtro, o número de membros independentes da amostra (tamanho efetivo da amostra) é reduzido, porque os membros da série deixam de ser independentes.

### 3.2.4 Composições de Anomalias

São geradas composições de anomalias diárias para as variáveis PPT, OLR e PSIZA, nas quais se mostram as anomalias médias em cada fase e seu respectivo nível de confiança, para compreender o comportamento de cada variável em cada uma das oito fases da OMJ e outras fases de diferentes casos de evolução da OMJ. Por exemplo, a composição de anomalias diárias de PPT para a fase 1, durante os meses DJF, mostra a anomalia média de precipitação para todos os dias de DJF na fase 1 da OMJ.

A avaliação da significância estatística das anomalias de uma variável para cada fase da OMJ é feita aplicando um teste de significância utilizando a distribuição

t de *Student*, com tamanho efetivo da amostra. Neste teste é calculado o valor médio da variável para cada ponto de grade e seu desvio padrão, em cada uma das listas das fases da OMJ e para toda a amostra, e verificada se é estatisticamente significativa a diferença entre as médias.

As composições são geradas com as anomalias filtradas (seção 3.2.3), ou seja, a amostra foi reduzida de 11315 dias para 11105 dias. Assim, como os membros da amostra já não são independentes, foi utilizado o método de autocorrelação para estimar o número efetivo de membros independentes ( $N'$ ):

$$N' = n \frac{1 - \rho_1}{1 + \rho_1}$$

onde  $n$  é o número total de membros da série e  $\rho_1$  é o coeficiente de autocorrelação com lag-1 da série (WILKS, 2011).

### 3.2.5 Eventos Extremos

A influência da OMJ na frequência de eventos extremos foi avaliada através do método proposto por Grimm e Tedeschi (2009), no qual se definem os eventos extremos com critérios de intensidade e persistência, nas séries de precipitação diária, segundo os passos a seguir:

- i. Cálculo da média móvel de 3 dias de precipitação, atribuindo a média resultante no dia central; esses dados de precipitação são brutos, ou seja, sem cálculo de anomalias ou filtragem;
- ii. Ajuste da distribuição gama para os dados de cada dia do ano (ex.: todos os dias 01 de janeiro, etc.), utilizando o método da máxima verossimilhança, e então o cálculo da precipitação correspondente ao percentil 90, ou seja, há um valor de precipitação diferente correspondente ao percentil 90 para cada dia do ano (365 limiares), para cada ponto de grade;
- iii. Identificação de eventos extremos diários, que são os valores de precipitação que superarem este limiar naquele dia, independente do ano, considerando apenas valores acima de 0.1 mm.

A média móvel de 3 dias é utilizada para garantir que os eventos de precipitação considerados extremos mostrem os impactos mais fortes, devidos à persistência da precipitação.

O número médio de eventos extremos diários (ou probabilidade de ocorrência de eventos extremos) é calculado para cada fase da OMJ ( $R_{fase X}$ ) e para todos os outros dias ( $R_{outros dias}$ ) em cada estação do ano (DJF, MAM, JJA e SON). A diferença ( $R_{diferença}$ ) entre esses valores é calculada para cada ponto de grade e sua significância avaliada através do teste estatístico t de *Student*, estimando o número efetivo de membros ( $N'$ ). No entanto, representou-se nos mapas os valores da razão ( $R$ ) entre essas probabilidades, cálculo explicitado abaixo:

Número médio de eventos em cada fase da OMJ:

$$R_{fase X} = \frac{n^{\circ} \text{ eventos extremos na fase } X}{n^{\circ} \text{ de dias na fase } X}$$

Número médio de eventos nos dias restantes da estação do ano:

$$R_{outros dias} = \frac{n^{\circ} \text{ eventos extremos nos outros dias}}{n^{\circ} \text{ de outros dias}}$$

A diferença entre os valores é:

$$R_{diferença} = R_{fase X} - R_{outros dias}$$

A razão entre eles é:

$$R = \frac{R_{fase X}}{R_{outros dias}}$$

Escolheu-se representar a razão entre as probabilidades de ocorrência de eventos extremos, pois a razão informa por qual fator a probabilidade climatológica de ocorrência de eventos extremos muda em cada fase da OMJ, ou seja, no mapa será mostrado de qual fator é alterada a chance de ocorrer um evento extremo na fase  $X$  da OMJ, durante certa estação do ano em certa região da AS. Por exemplo, se o valor representado num certo ponto do mapa for 1,6 na fase 1 a probabilidade de ocorrência de evento extremo naquele ponto e naquela estação será 1,6 maior durante a fase 1 da OMJ.

### 3.2.6 Teste de significância T de *Student*

O teste estatístico paramétrico t de *Student* é utilizado para determinar a confiabilidade dos resultados, com estatística do teste ( $t$ ) para variâncias desiguais, dada por (WILKS, 2011):

$$t = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{\sqrt{\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2}}}$$

onde  $\bar{x}_i$  é a média de cada uma das duas séries comparadas,  $s_i^2$  representa a variância de cada série e  $n_i$  o tamanho das amostras ou o número de membros efetivos independentes das séries.

Considera-se como hipótese nula ( $H_0$ ) que a diferença entre as médias de amostras independentes é nula, assumindo que são da mesma população. O teste rejeita a  $H_0$  se a média das amostras são diferentes.

A significância estatística das anomalias em cada estação do ano (DJF, MAM, JJA ou SON), durante as fases da OMJ ( $X = 1, 2, \dots, 8$ ), na seção das composições de anomalias (3.2.4), é avaliada utilizando: - amostra 1: a série de valores diários durante a fase  $X$ ; - amostra 2: série de valores diários para todos os dias da estação do ano em análise. Já na seção dos eventos extremos (3.2.5), temos como amostra 1: série dos números médios de eventos extremos em cada fase da OMJ, e como amostra 2: série dos números médios de eventos extremos para todos os dias da estação do ano.

### 3.2.7 Análise de Componentes Principais

A Análise de Componentes Principais (ACP) é uma técnica estatística que transforma linearmente variáveis originais correlacionadas entre si em componentes principais ortogonais, ou seja, não correlacionadas entre si. No caso de variáveis originais pouco correlacionadas entre si, as componentes principais serão as próprias variáveis (HONGYU, SANDANIELO e JUNIOR, 2016). São também encontradas sob o nome de Funções Empíricas Ortogonais (EOF's) (WILKS, 2011).

Essa é uma das técnicas estatísticas multivariadas mais utilizada em ciências atmosféricas, com objetivos principais de explicar a variabilidade dos dados, resolver o problema de multicolinearidade e reduzir a dimensão das variáveis, permitindo explicar os dados a partir de um conjunto menor de variáveis, sem perder informações relevantes sobre os dados originais.

A ACP é realizada a partir de uma matriz  $X$  do conjunto de dados, com  $n$  observações e  $p$  variáveis. Calcula-se a matriz  $u$  de correlação entre as variáveis e determinam-se os autovalores e os autovetores desta matriz. Cada componente principal é o produto de um autovetor pela matriz  $X$ . Assim, um conjunto  $X$  é transformado por combinações lineares das observações  $x$ , em um conjunto de  $k$

componentes principais com  $n$  elementos. Estes componentes principais explicam grande parte da variabilidade contida nos dados originais.

A ACP procura pela direção dos dados que apresenta maior variabilidade e esta será chamada de “primeiro modo de variabilidade dos dados”, ou primeira componente principal. O segundo modo de variabilidade será a segunda direção de maior variabilidade, mas será obrigatoriamente ortogonal ao primeiro modo, e assim por diante.

As relações entre as observações e os componentes principais podem ser observadas através do gráfico dos *factor scores* e de mapas (*factor loadings*). Os *factor loadings* definem a distribuição espacial da variabilidade associada com cada componente principal, mostrando nos mapas onde estão localizadas as variações mais fortes. Os *factor scores* são as projeções das observações sobre cada modo de variabilidade, mostrando a distribuição temporal da variabilidade.

A ACP rotacionada (REOF) é obtida pela rotação de eixos, utilizando o método Varimax ortogonal, e sua função é isolar padrões que apresentem variações mais regionalizadas e de mesmo mecanismo físico.

Esta análise foi aplicada aos dados de anomalias filtradas de PPT, para determinar os principais padrões de variabilidade intrassazonal da precipitação, e assim comparar com as maiores anomalias nas fases da OMJ.

## 4. RESULTADOS

### 4.1 CARACTERÍSTICAS GERAIS DAS FASES DA OMJ

A variável OLR é o fluxo de energia radiante emitida pela atmosfera e a superfície terrestre, com máxima radiação localizada na faixa do infravermelho no espectro eletromagnético ( $\lambda_{\text{máx.}} \approx 10 \mu$ ). Anomalias negativas de OLR nas regiões tropical e subtropical são frequentemente associadas à convecção aumentada, pois as temperaturas dos topos de nuvens são tanto menores quanto mais altos eles forem, e as anomalias positivas de OLR são associadas com céu limpo, pois indicam radiação emitida pela superfície da Terra, que é mais aquecida.

No Hemisfério Sul (HS), a força de Coriolis desvia o movimento das parcelas de ar para a esquerda, produzindo circulação em sentido horário (anti-horário) em direção a um centro de baixa (a partir de um centro de alta) pressão, a chamada circulação atmosférica ciclônica (anticiclônica), associada com anomalias positivas (negativas) da variável PSIZA. O movimento vertical de parcelas de ar tende a ser ascendente (descendente) sobre um sistema de baixa (alta) pressão em superfície, pois o ar tende a convergir (divergir) sobre este sistema. Ao subirem (descerem), as parcelas sofrem expansão e resfriamento (compressão e aquecimento) adiabático e, portanto, tem sua umidade relativa aumentada (diminuída), produzindo condensação e nebulosidade (evaporação e céu limpo), o que resulta em anomalias negativas (positivas) de OLR, que indicam a formação de nuvens e precipitação (ou “céu limpo”).

Por outro lado, no Hemisfério Norte (HN) a força de Coriolis desvia o movimento das parcelas de ar para a direita, produzindo circulação em sentido anti-horário (horário) em direção a um centro de baixa (a partir de um centro de alta) pressão, a chamada circulação atmosférica ciclônica (anticiclônica), associada com anomalias negativas (positivas) da variável PSIZA. Em resumo, anomalias positivas (negativas) de PSIZA sobre o HS (HN) estão associados a ciclones, enquanto anomalias negativas (positivas) de PSIZA sobre o HS (HN) estão associados a anticiclones.

A FIGURA 9 mostra anomalias de convecção, representadas pelas anomalias de OLR, propagando-se para leste em cada estação do ano. Durante o verão austral (DJF) a convecção mais intensa está próxima ao Continente Marítimo

nas fases 4 e 5, enquanto a subsidência mais forte está na mesma região nas fases 8 e 1. Sobre a AS há convecção mais intensa durante as fases 8 e 1, e subsidência nas fases 4 e 5, assim como em Grimm (2019). Estas características, embora mais fortes no verão, são comuns a todas as estações do ano.

Em todas as estações, embora também com maior intensidade no verão, nota-se que as anomalias negativas de OLR (convecção mais intensa) nas regiões CESA e norte da AS tendem a ocorrer nas fases 7, 8, 1, 2, com maior prevalência nas fases 8 e 1. Por outro lado, anomalias positivas de OLR (convecção enfraquecida) nestas regiões tendem a ocorrer nas fases 3, 4, 5, 6, com maior intensidade nas fases 4 e 5.

Contudo, há diferenças notáveis de intensidade e distribuição espacial das anomalias em cada fase em diferentes estações. A título de exemplo, pode-se destacar que em SON as anomalias negativas de OLR em CESA são mais fortes nas fases 7 e 8 e mais fracas na fase 1, enquanto em DJF e MAM ocorre o contrário. A razão pode estar nas teleconexões que carregam o sinal da OMJ para a AS. Os resultados das anomalias de PSIZA em 200 hPa (FIGURA 10) mostram que já há na fase 7 da OMJ na primavera um trem de ondas do Pacífico Central subtropical sul em direção à AS, onde estabelece uma anomalia ciclônica nos subtrópicos, enquanto no verão e outono ele só fica mais bem configurado na fase 8. Em 850 hPa, as anomalias de PSIZA (FIGURA 11) indicam que ainda há anomalia anticiclônica na fase 7 em DJF e MAM sobre CESA (que só muda para ciclônica na fase 8), dificultando o transporte de umidade da Amazônia para esta região e movimento ascendente, enquanto em SON já há início de anomalia ciclônica na fase 7. A importância destas anomalias ciclônicas em baixos e altos níveis nos subtrópicos da AS para o aumento da convecção em CESA está explicada em Grimm (2019). Condições locais também poderiam favorecer o aumento na convecção da OMJ sobre CESA na primavera mais rapidamente do que no verão, por condições médias de menor umidade do solo e maior temperatura na superfície do que no verão e outono, por mecanismo semelhante ao proposto por Grimm et al. (2007).

Os dipolos de anomalias de convecção tropical opostas, como o dipolo da OMJ, em geral produzem uma circulação rotacional quadrupolar em torno do equador, resultante das ondas equatoriais de Rossby-Kelvin. Observadas mais claramente nos painéis da PSIZA em baixos níveis (850 hPa) (FIGURA 11). Em altos

níveis (200 hPa), embora presente, este sinal pode ser perturbado pelas teleconexões trópicos-extratrópicos (FIGURA 10). Este quadrupolo é bem notável sobre os oceanos Índico e Pacífico nas fases 4-5 e 8-1 em todas as estações.

Em geral, o padrão de convecção da OMJ durante as estações de verão (DJF) e outono (MAM), sobre grande parte da AS, incluindo as regiões mais atingidas pela monção, tende a intensificar a precipitação durante as fases 8 e 1, e favorecer subsidência nas fases 4 e 5. Já durante o inverno (JJA) e primavera (SON) durante a fase 1 a convecção anômala se concentra mais no norte da AS, enquanto na fase 8 se mantém mais próxima a regiões sob influência da ZCAS. No outono, estação chuvosa do Nordeste, há anomalias de convecção naquela região em várias fases da OMJ, como as fases 1, 2, 5, 6. Estes padrões de comportamento da convecção anômala, indicados pelas anomalias de OLR (FIGURA 9) estão bem consistentes com as anomalias de precipitação usando dados observados (FIGURA 12 e FIGURA 13).

Grimm (2019) mostrou que durante DJF as anomalias positivas de precipitação mais significativas na região CESA (e negativas na região SESA) ocorrem na fase 1, e anomalias de sinal oposto na fase 4, como mostrado na FIGURA 12. Notam-se anomalias de precipitação de MAM com padrões parecidos aos de DJF, mas as anomalias negativas são mais abrangentes sobre o Nordeste do Brasil na fase 6. No entanto, durante os meses de SON essa convecção acentuada ocorre na fase 1 no Norte do Brasil e na fase 8 sobre CESA, com subsidência significativa na fase 5. Já durante JJA as anomalias negativas mais fortes estão localizadas na região SESA na fase 4 e anomalias de sinal oposto na mesma região na fase 8, o que tem relevância prática, pois em grande parte de SESA chove muito no inverno.

Portanto, analisar a OMJ sazonalmente é importante, pois durante cada estação do ano os impactos podem ser reduzidos ou acentuados em determinadas regiões, e estas informações são de grande importância para que os modelos numéricos de previsão atmosférica melhorem suas previsões em escala intrassazonal.

Até agora, foram analisadas as características de cada fase da OMJ, usando todos os dias de OMJ ativa, em todas as estações do ano, sem considerar se estas fases fizeram parte de ciclos completos da OMJ ou o tipo de evolução do seu ciclo. A seguir, serão discriminados dois tipos de evolução da OMJ.

FIGURA 9: Composições de anomalias de OLR em cada fase da OMJ para SON, DJF, MAM e JJA. Intervalo de contorno de  $5 \text{ Wm}^{-2}$ , barra de cores indicando o nível de confiança das anomalias de OLR, com sinais indicando anomalias positivas ou negativas.

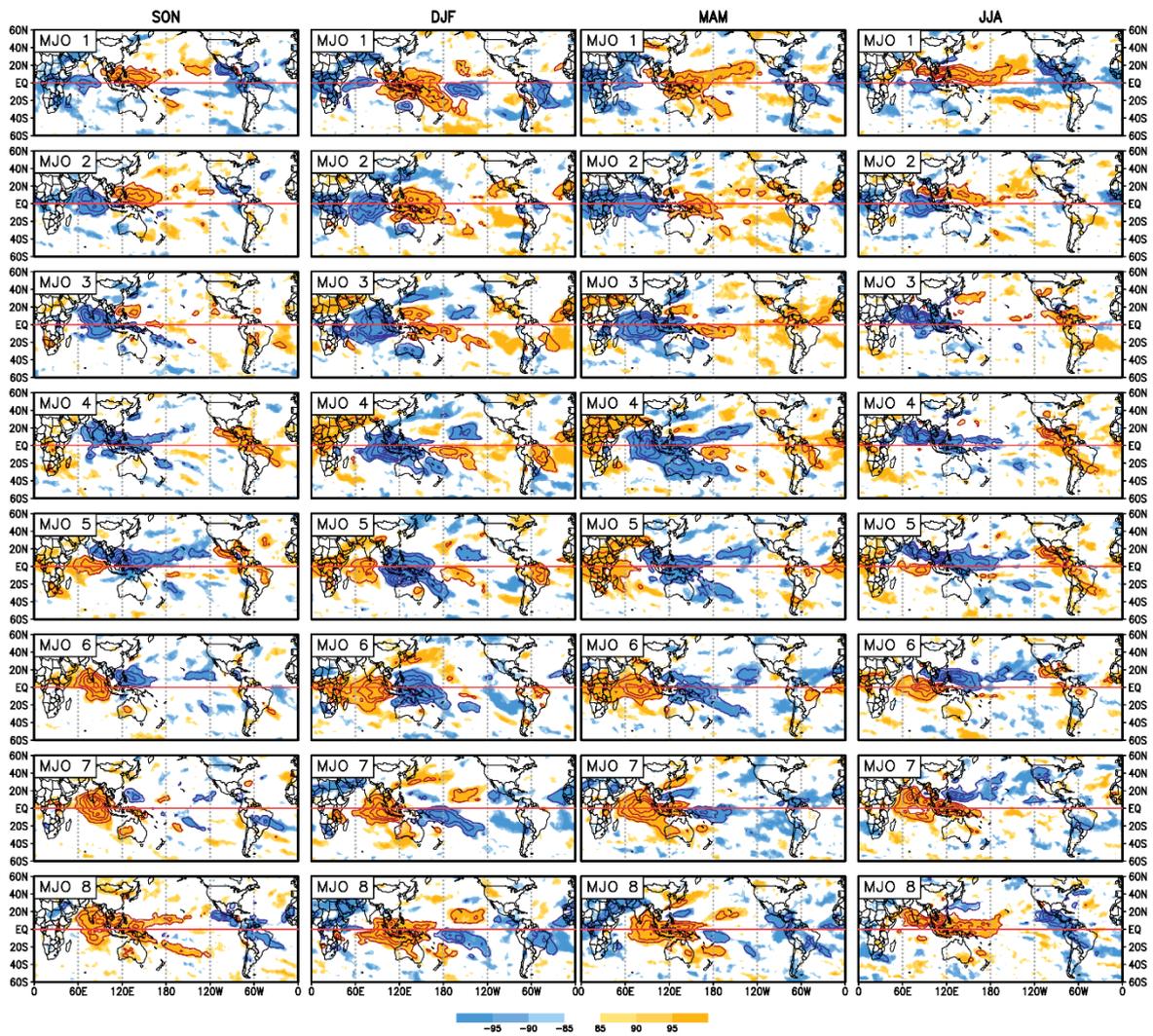


FIGURA 10: Composições de anomalias de PSIZA em 200 hPa em cada fase da OMJ para SON, DJF, MAM e JJA. Intervalo de contorno de  $1,2 \times 10^6 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ , barra de cores indicando o nível de confiança das anomalias de PSIZA em 200 hPa, com sinais indicando anomalias positivas ou negativas.

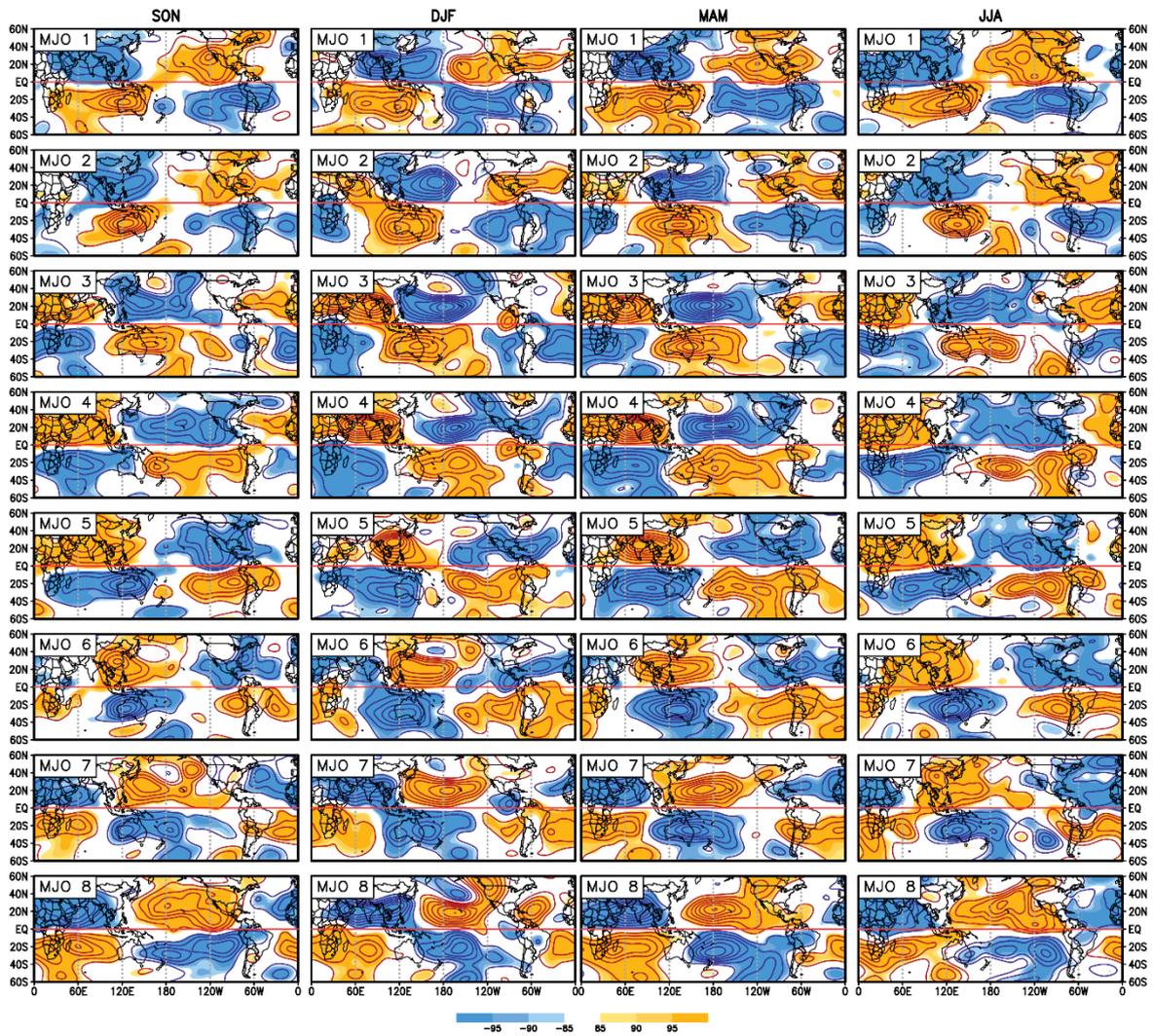


FIGURA 11: Composições de anomalias de PSZA em 850 hPa em cada fase da OMJ para SON, DJF, MAM e JJA. Intervalo de contorno de  $6 \times 10^5 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ , barra de cores indicando o nível de confiança das anomalias de PSZA em 850 hPa, com sinais indicando anomalias positivas ou negativas.

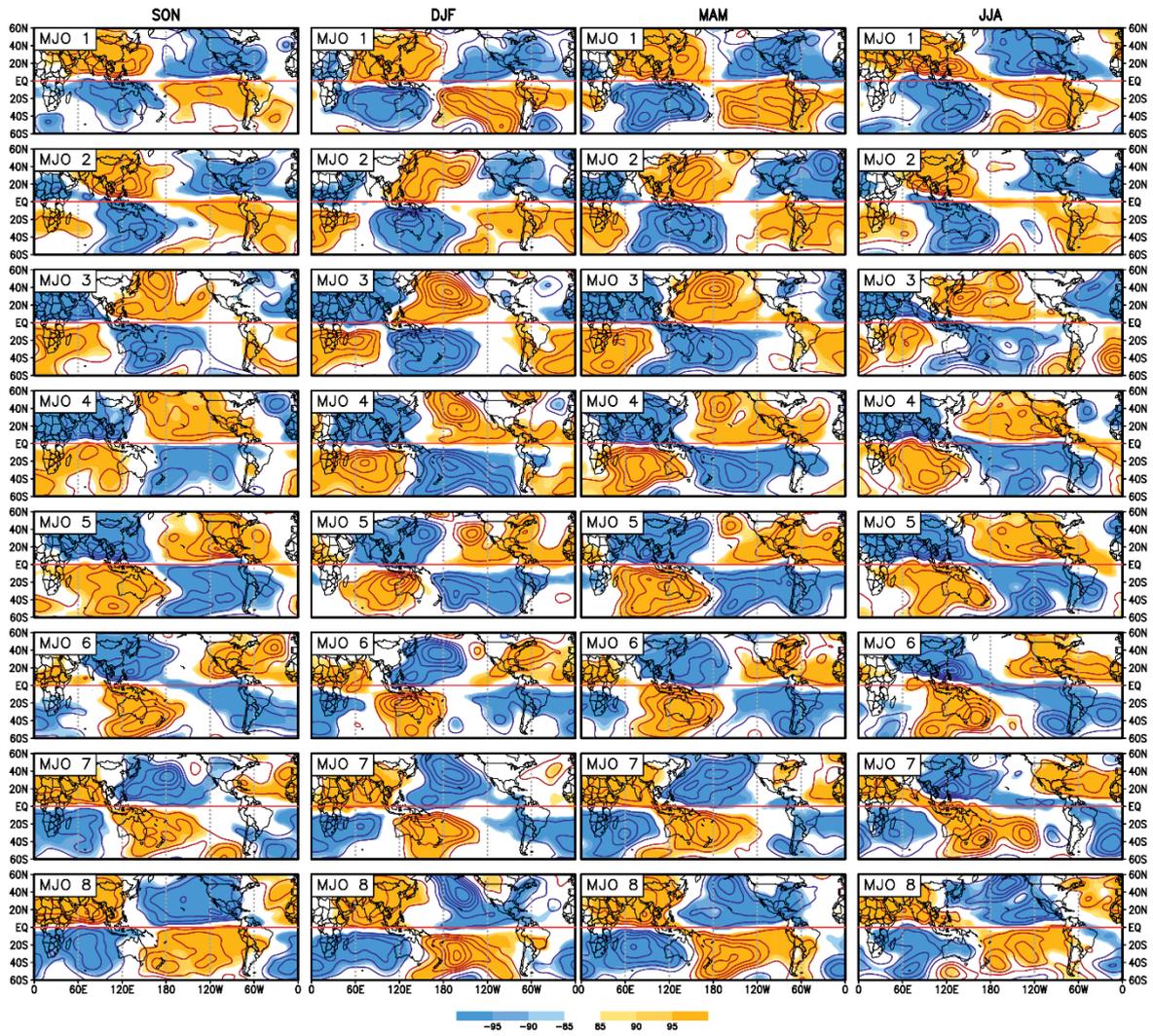


FIGURA 12: Composição de anomalias diárias de precipitação (barra de cores, mm dia<sup>-1</sup>) na primavera (SON, colunas da esquerda) e verão austral (DJF, colunas da direita), filtradas na banda de 20-90 dias, para cada fase da OMJ. Regiões hachuradas tem anomalias com nível de confiança maiores que 90%.

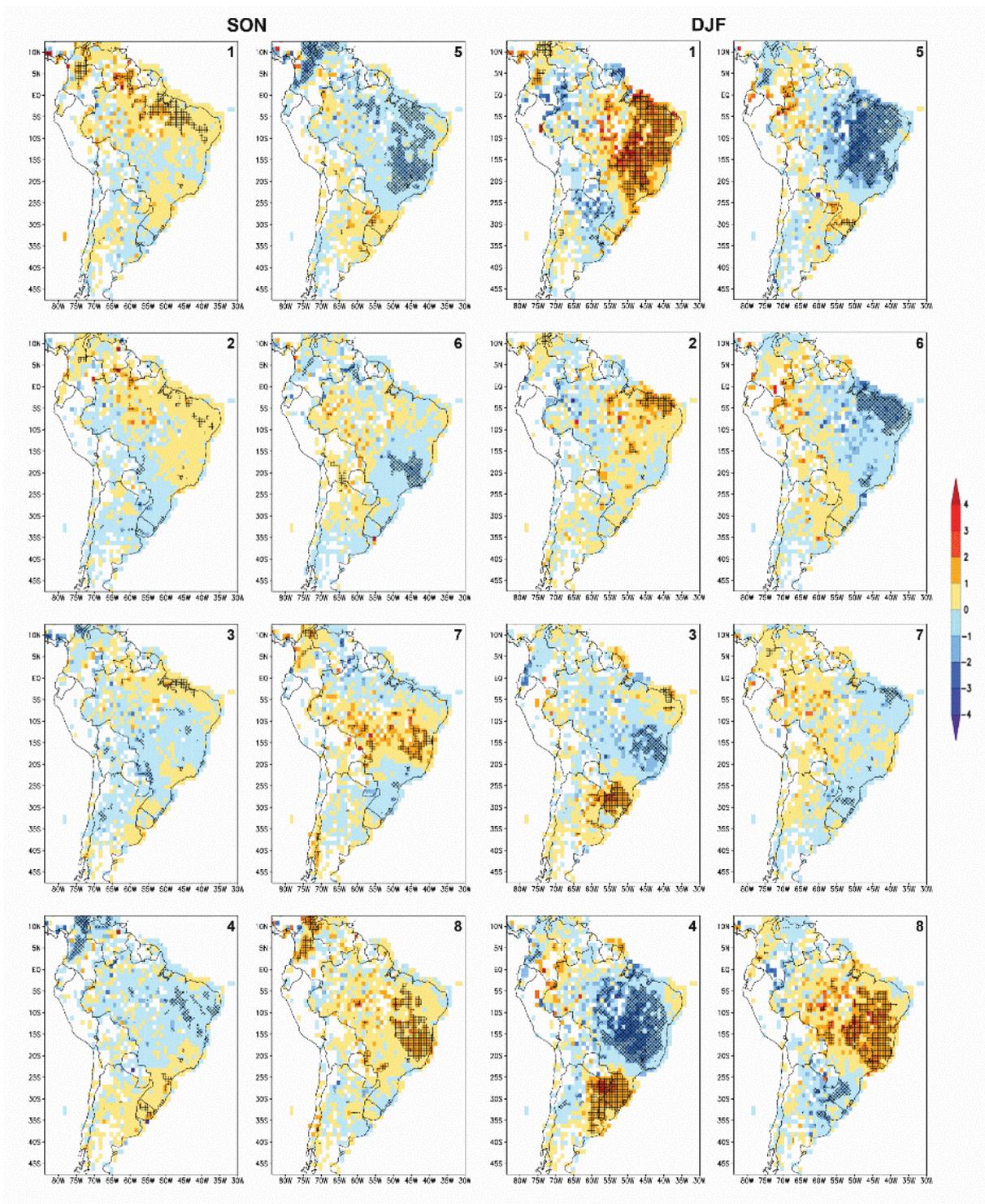
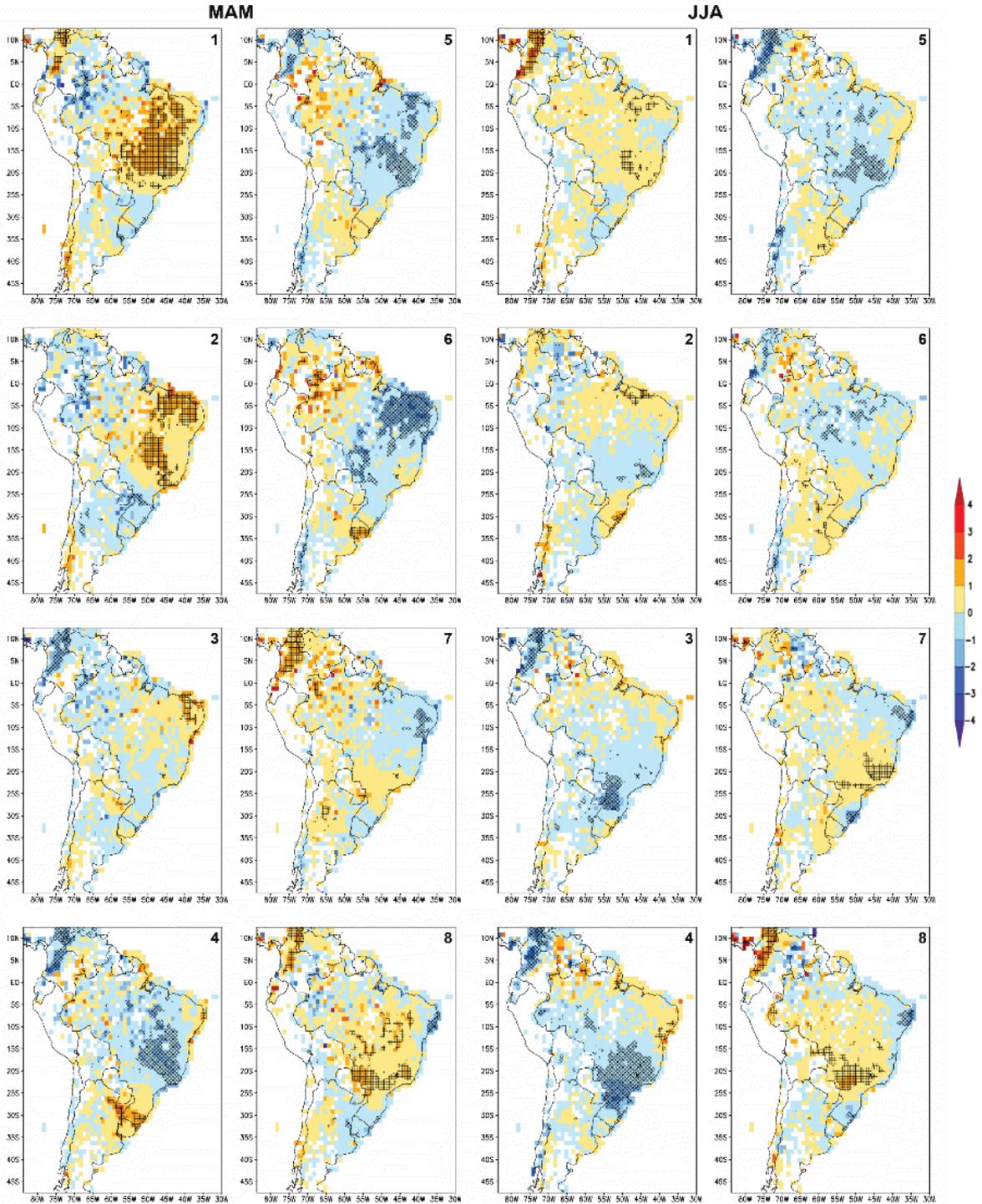


FIGURA 13: Composição de anomalias diárias de precipitação (barra de cores, mm dia<sup>-1</sup>) no outono (MAM, colunas da esquerda) e inverno austral (JJA, colunas da direita), filtradas na banda de 20-90 dias, para cada fase da OMJ. Regiões hachuradas tem anomalias com nível de confiança maiores que 90%.



## 4.2 EVENTOS OMJ PRIMÁRIOS, SUCESSIVOS E COM CICLO COMPLETO

Agora, são analisadas, para a estação de verão, ciclos completos de eventos primários ou sucessivos, usando as categorias A, B, C e D de Matthews (2008) e, com maior detalhamento temporal, usando as fases 1 a 8 de Wheeler e Hendon (2004).

Eventos primários são ciclos da OMJ que necessariamente foram precedidos por dias neutros. Na FIGURA 14 (painel da esquerda) observa-se que na fase neutra precedendo um evento primário há anomalias de OLR prenunciando as anomalias na categoria A. Já há convecção acentuada sobre a faixa tropical no Brasil, Oceano Atlântico e África, e subsidência sobre o Continente Marítimo e Pacífico oeste, que são condições usuais precursoras de convecção acentuada no Oceano Índico, que caracteriza a categoria A de Matthews (2008). Por alguma razão, aparecem estas anomalias de convecção antes dos eventos primários, que podem desencadear um evento OMJ no Oceano Índico, mas que provavelmente não atingem o limiar de amplitude para que haja dias ativos de OMJ antes dos eventos primários. Quanto ao restante da evolução dos eventos primários na FIGURA 14, não há diferença fundamental em relação às FIGURAS 9, 10, 11, para DJF, lembrando das correspondências entre as categorias e as fases. Por exemplo, a maior anomalia de convecção (subsidência) em CESA ocorre na categoria D (B) (FIGURA 14), que corresponde à junção das fases 8 e 1 (fases 4 e 5) na FIGURA 9. Além disto, na circulação há nos subtropicais da AS circulação ciclônica (anticiclônica) correspondente ao aumento (diminuição) de convecção em CESA na categoria D (B) (FIGURA 14), que corresponde à junção das fases 8 e 1 (fases 4 e 5) na FIGURA 9. Estas anomalias de circulação fazem parte de trens de ondas originados de convecção anômala no Pacífico central subtropical sul, conforme mostrado em Grimm (2019). Nota-se anomalias de convecção tropical opostas sobre o Oceano Pacífico, nas categorias B e D que em geral produzem uma circulação rotacional quadrupolar em torno do equador, bem definida na variável PSIZA em 850 hPa (FIGURA 14, painel da direita). Isto também está coerente com as características observadas nas FIGURAS 9, 10, 11, para DJF, desde que observadas as correspondências entre as categorias e as fases, mencionadas anteriormente.

Analisando os eventos primários usando as fases definidas por Wheeler e Hendon (2004) (FIGURA 15), nota-se melhor a evolução entre a fase neutra anterior ao evento e a fase 2 (início da categoria A). Ainda persiste convecção acentuada no norte da AS e na África equatorial, sendo que a convecção se acentua ao sul do equador no Oceano Índico, sendo deslocada para o equador na fase 3 (final da categoria A. Portanto, entre a fase neutra e a fase 2 se desenvolve a convecção no Oceano Índico, a partir de condições já favoráveis na fase neutra prévia e na fase 3 em diante os padrões já seguem de forma geral as características gerais de um evento OMJ (comparar FIGURA 15 com FIGURA 9). Anomalias de convecção sobre a AS são importantes para o desenvolvimento da OMJ e aumento da convecção sobre o Oceano Índico, embora sejam necessários mais estudos sobre o assunto, utilizando Funções de Influência (GRIMM e SILVA DIAS, 1995).

Ao separar as fases de Wheeler e Hendon (2004) a partir das categorias de Matthews (2008), acabou-se tendo dificuldade em avaliar eventos primários que começam com a fase 1, pois ela está agrupada na categoria D (e não na categoria A), ou seja, usando como referência as categorias de Matthews (2008), a fase 1 estará sempre ao final dos ciclos de eventos primários, o que resulta na perda de eventos primários que se iniciaram na fase 1 com amplitude acima de 1. Portanto, para análises futuras, recomenda-se ampliar as condições para considerar os eventos primários.

Eventos sucessivos são caracterizados por ciclos de OMJ que são continuação de eventos anteriores. Na FIGURA 16, painel da esquerda, durante a categoria D inicial, verificando as anomalias negativas significativas sobre a AS, que se estendem pelo Oceano Atlântico até a África, e anomalias positivas sobre o Continente Marítimo e Pacífico oeste. As principais diferenças entre a FIGURA 14 (OLR eventos primários) e a FIGURA 16 (OLR eventos sucessivos) residem nos dois primeiros painéis, que no segundo caso mostram anomalias mais fortes e extensivas, o que é esperado. Também é notável que, no caso dos eventos sucessivos (FIGURA 16), por haver na categoria Di uma forte anomalia de convecção no Pacífico central subtropical sul, que é conectada por teleconexão com a anomalia em CESA (GRIMM, 2019), as anomalias em CESA se estendem para a categoria A, o que não ocorre nos eventos primários (FIGURA 14). Portanto, nos eventos sucessivos as anomalias de convecção sobre a AS são mais fortes e duradouras. Este aspecto é até mais notável ao se comparar a evolução em fases,

na FIGURA 15 e FIGURA 17. Nos eventos sucessivos, as anomalias no Pacífico central subtropical sul são geralmente mais fortes e extensas, o que reflete sobre as teleconexões para a AS. Por exemplo, nos eventos sucessivos ainda há convecção aumentada em CESA nas fases 2 e 3 (OLR negativo), além de 1i, e ainda perdura a anomalia ciclônica nos subtrópicos da AS (FIGURA 17), enquanto nos eventos primários, as anomalias são de subsidência (OLR positivo) nestas fases 2 e 3 em CESA (FIGURA 15). Além disto, nos eventos sucessivos perduram em CESA anomalias de subsidência nas fases 4, 5, 6 (FIGURA 17), enquanto nos eventos primários, as anomalias são de subsidência apenas até a fase 5 em CESA (FIGURA 15). Em suma, há sinais mais fortes e duradouros nos eventos sucessivos sobre a AS, havendo uma defasagem destes sinais em relação aos eventos primários. Na categoria D (inicial e final) nota-se que a região núcleo da monção tem comportamento consistente com Grimm (2019), sendo as fases 1 e 8 (que compõem a categoria D) as mais chuvosas durante o verão sobre CESA, como se pode ver na FIGURA 17, painel da esquerda, embora na fase 8 inicial há convecção enfraquecida sobre CESA, e sobre as fases 8 e 1 finais a convecção é mais acentuada em relação às iniciais.

As categorias Di e Df ocupam 113 e 112 dias de OMJ ativa, respectivamente. No entanto, ao analisar pelas fases, nota-se que as fases 1 iniciais predominam em relação as fases 8 iniciais (73 e 40 dias, respectivamente), já as fases 8 finais ocupam mais dias de OMJ ativa do que a fase 1 final (66 e 46 dias, respectivamente), ou seja, num ciclo de eventos sucessivos, a quantidade de dias de fase 1 é mais predominante no início destes eventos do que no final, em relação aos dias de fase 8.

Comparando as categorias A e as fases 2 e 3 nos eventos primários (FIGURA 14 e FIGURA 15) em relação aos eventos sucessivos (FIGURA 16 e FIGURA 17) observa-se que as anomalias de OLR, PSIZA200 e PSIZA850 nos eventos sucessivos são mais intensas e extensas. Talvez esta seja a razão por se estenderem em ciclos sucessivos, o que sugere que as anomalias de um ciclo sejam capazes de ajudar a estabelecer as anomalias do ciclo seguinte, como sugerido em Grimm (2019). O número de dias incluídos nos eventos analisados foi 685 dias nos eventos sucessivos e 564 dias nos eventos primários.

Ao analisar os ciclos completos de OMJ (FIGURA 18 e FIGURA 19), sem discriminar entre eventos primários ou sucessivos, ou seja, incluindo os dois tipos de

eventos, nota-se padrões de anomalias semelhantes aos obtidos nas composições de anomalias de OLR, PSIZA200 e PSIZA850 dos eventos primários (FIGURA 14), embora as anomalias no verão austral em eventos sucessivos sejam maiores que em eventos primários. Contudo, o fato de elas estarem um pouco defasadas em relação às anomalias em eventos primários, pode ter produzido suavização nas médias sobre os dois tipos quando as anomalias são de sinais opostos.

FIGURA 14: Composições de anomalias de OLR (painel da esquerda), PSIZA em 200 hPa (painel central) e PSIZA em 850 hPa (painel da direita), para os dias que ocorreram em cada categoria dos eventos primários da OMJ durante o verão austral (DJF). Intervalo de contorno de  $5 \text{ Wm}^{-2}$ ,  $1,2 \times 10^6 \text{ m}^2\text{s}^{-1}$  e  $6 \times 10^5 \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ , respectivamente, barra de cores indicando o nível de confiança das anomalias das variáveis, com sinais indicando anomalias positivas ou negativas.

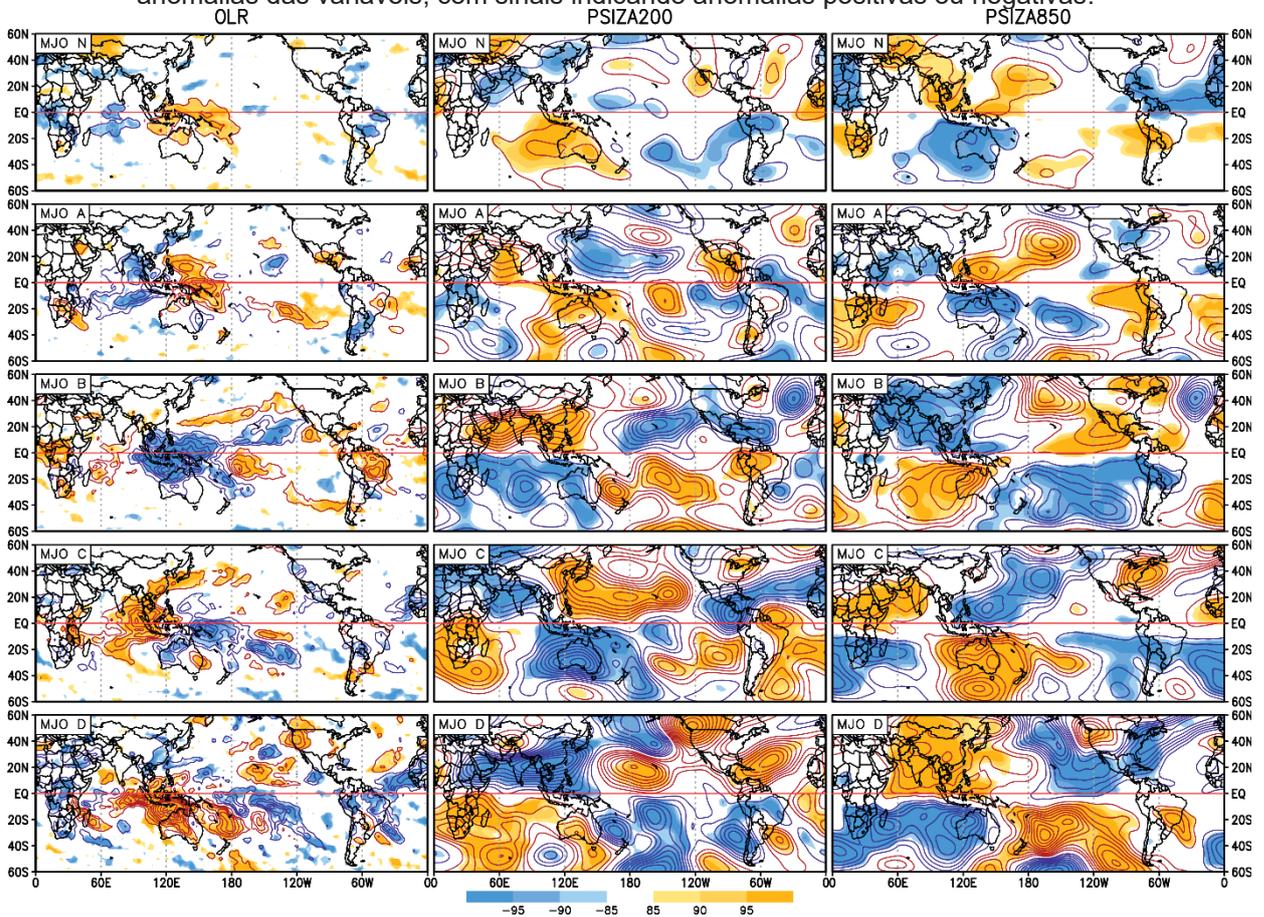


FIGURA 15: Composições de anomalias de OLR (painel da esquerda), PSIZA em 200 hPa (painel central) e PSIZA em 850 hPa (painel da direita), para os dias que ocorreram em cada fase dos eventos primários da OMJ durante o verão austral (DJF). Intervalo de contorno de  $5 \text{ Wm}^{-2}$ ,  $1,2 \times 10^6 \text{ m}^2\text{s}^{-1}$  e  $6 \times 10^5 \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ , respectivamente, barra de cores indicando o nível de confiança das anomalias das variáveis, com sinais indicando anomalias positivas ou negativas.

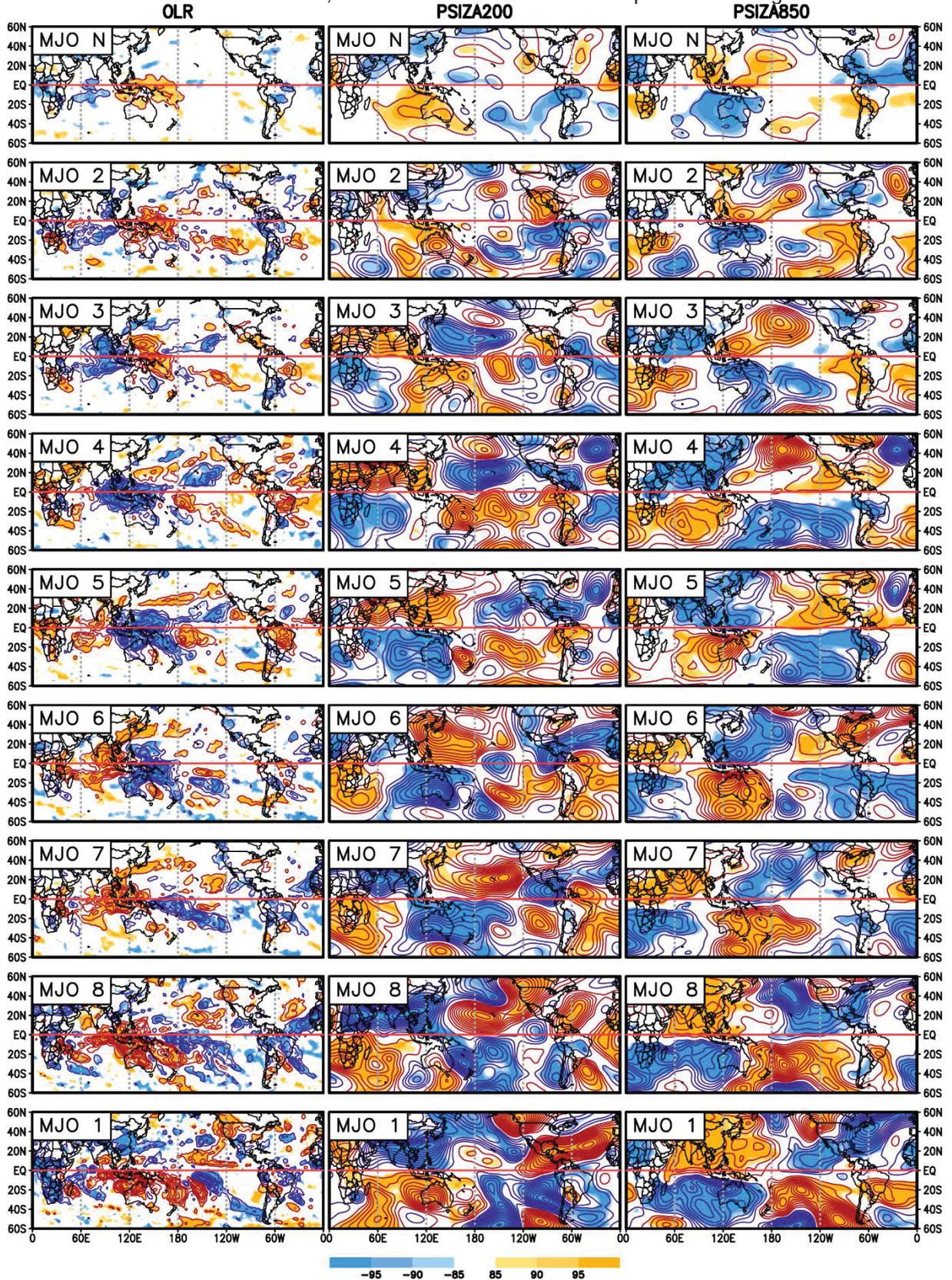


FIGURA 16: Composições de anomalias de OLR (painel da esquerda), PSIZA em 200 hPa (painel central) e PSIZA em 850 hPa (painel da direita), para os dias que ocorreram em cada categoria dos eventos sucessivos da OMJ durante o verão austral (DJF). Intervalo de contorno de  $5 \text{ Wm}^{-2}$ ,  $1,2 \times 10^6 \text{ m}^2\text{s}^{-1}$  e  $6 \times 10^5 \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ , respectivamente, barra de cores indicando o nível de confiança das anomalias das variáveis, com sinais indicando anomalias positivas ou negativas.

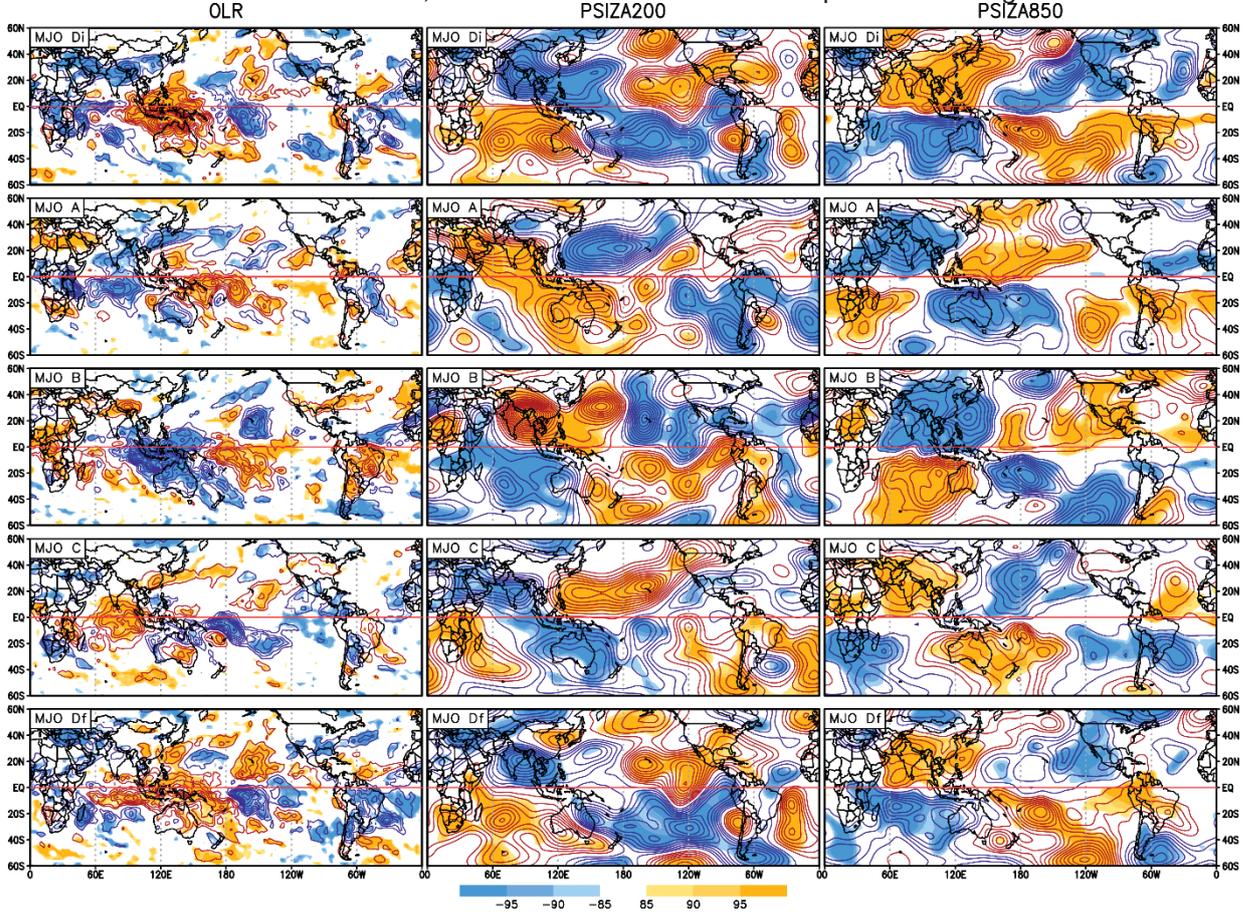


FIGURA 17: Composições de anomalias de OLR (painel da esquerda), PSIZA em 200 hPa (painel central) e PSIZA em 850 hPa (painel da direita), para os dias que ocorreram em cada fase dos eventos sucessivos da OMJ durante o verão austral (DJF). Intervalo de contorno de  $5 \text{ Wm}^{-2}$ ,  $1,2 \times 10^6 \text{ m}^2\text{s}^{-1}$  e  $6 \times 10^5 \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ , respectivamente, barra de cores indicando o nível de confiança das anomalias das variáveis, com sinais indicando anomalias positivas ou negativas.

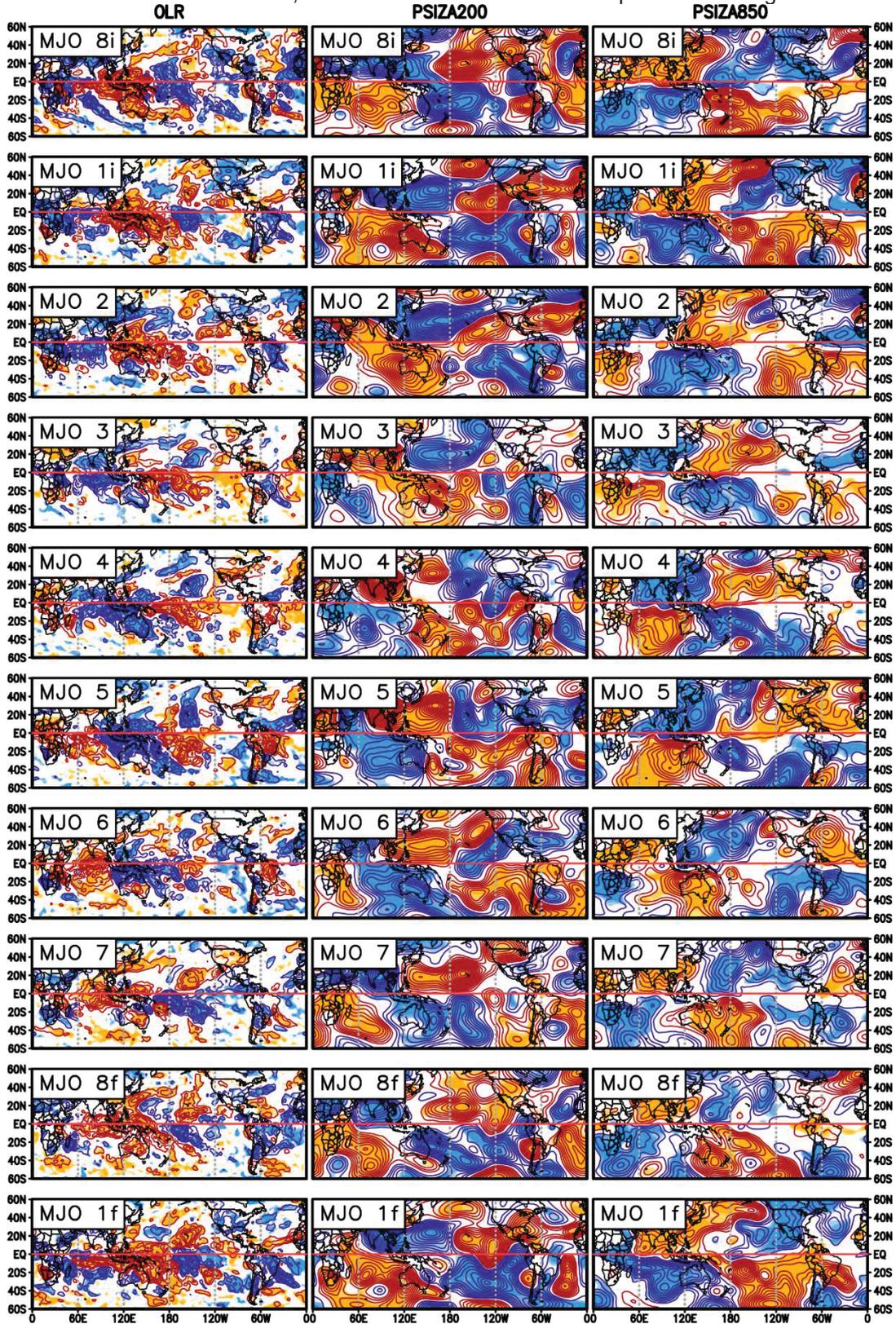


FIGURA 18: Composições de anomalias de OLR (painel da esquerda), PSIZA em 200 hPa (painel central) e PSIZA em 850 hPa (painel da direita), para os dias que ocorreram em cada categoria do ciclo completo (ABCD) da OMJ durante o verão austral (DJF). Intervalo de contorno de  $5 \text{ Wm}^{-2}$ ,  $1,2 \times 10^6 \text{ m}^2\text{s}^{-1}$  e  $6 \times 10^5 \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ , respectivamente, barra de cores indicando o nível de confiança das anomalias das variáveis, com sinais indicando anomalias positivas ou negativas.

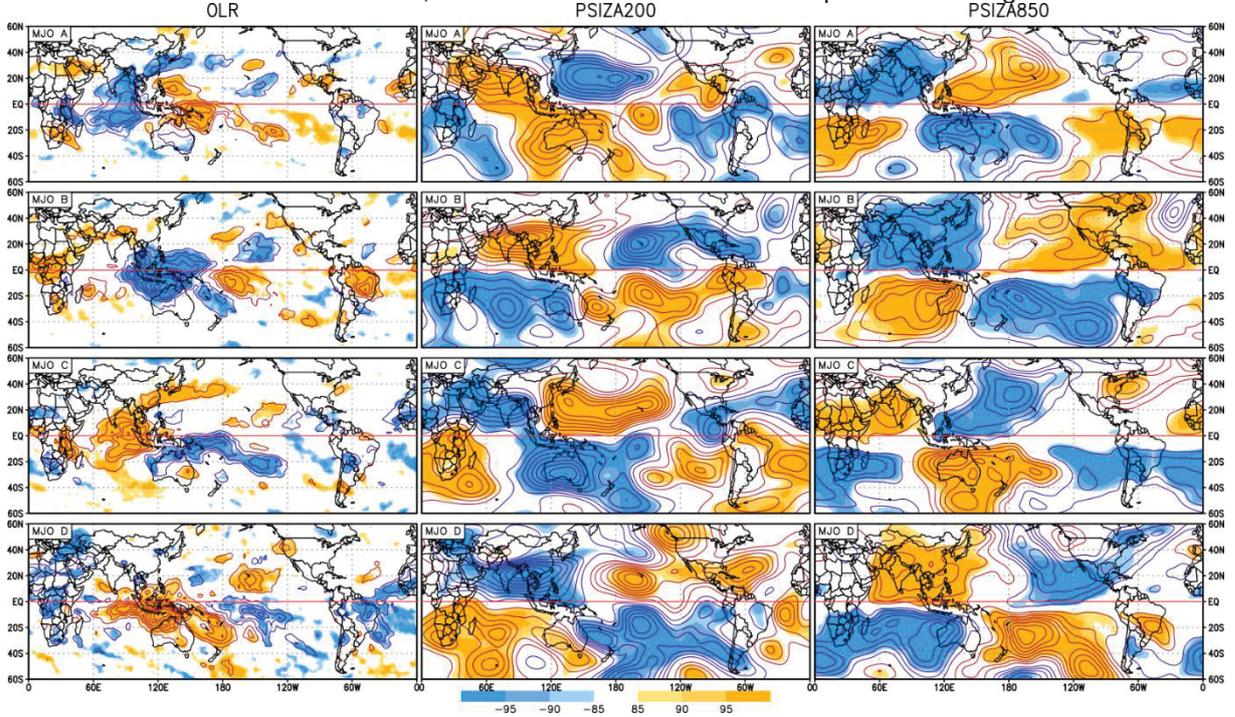
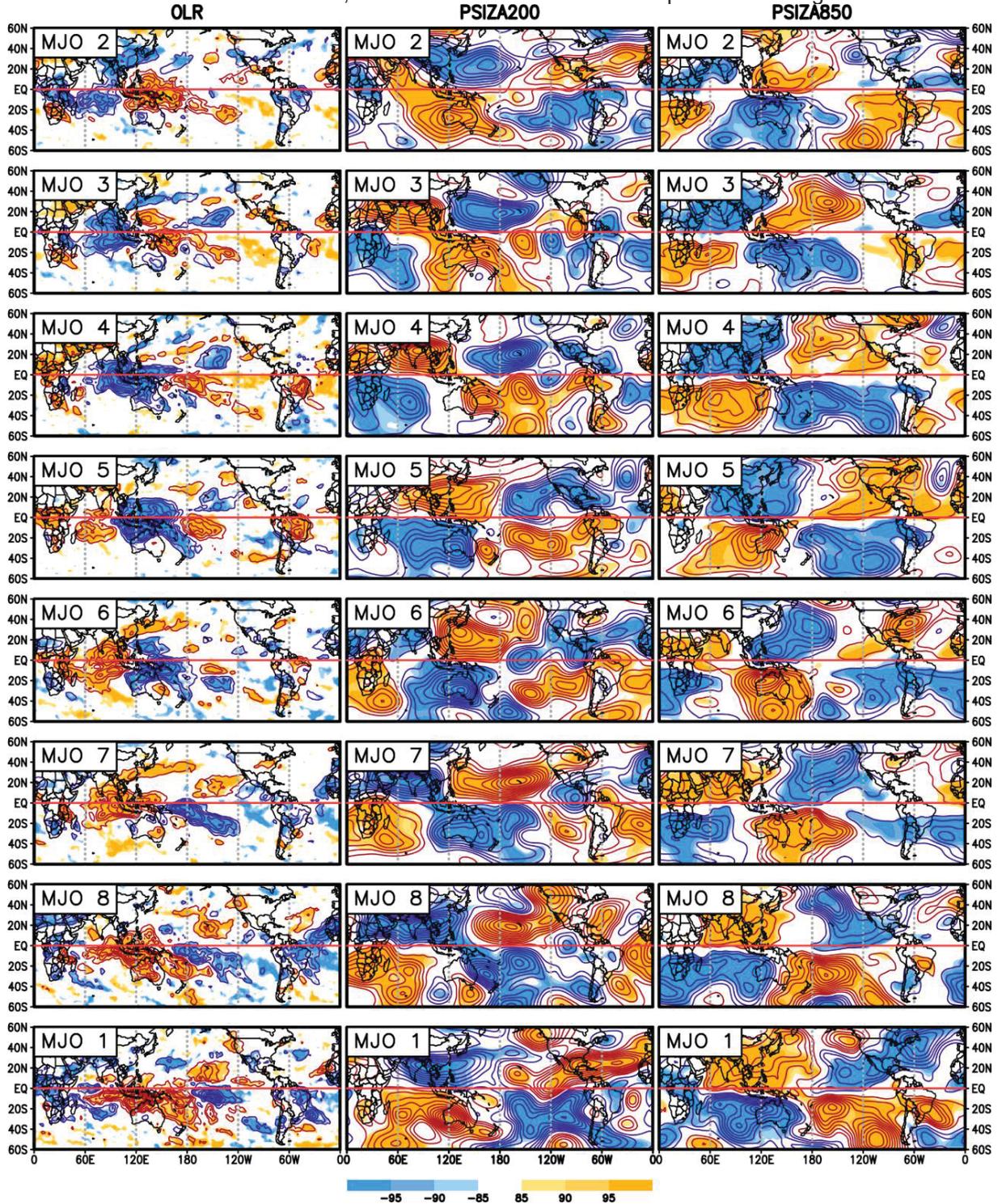


FIGURA 19: Composições de anomalias de OLR (painel da esquerda), PSIZA em 200 hPa (painel central) e PSIZA em 850 hPa (painel da direita), para os dias que ocorreram em cada fase do ciclo completo (ABCD) da OMJ durante o verão austral (DJF). Intervalo de contorno de  $5 \text{ Wm}^{-2}$ ,  $1,2 \times 10^6 \text{ m}^2\text{s}^{-1}$  e  $6 \times 10^5 \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ , respectivamente, barra de cores indicando o nível de confiança das anomalias das variáveis, com sinais indicando anomalias positivas ou negativas.



### 4.3 EVENTOS EXTREMOS

Observa-se na FIGURA 20 (colunas da direita) um aumento na frequência de eventos extremos por um fator maior do que 2,0 sobre CESA (incluindo a região da ZCAS) na fase 1 durante DJF, como também observado por Grimm (2019). Em Alvarez et al. (2015) o aumento da frequência do tercil superior está concentrado na região central do Brasil, com fator de 1,5, nesta mesma fase e estação do ano. O impacto pode ter sido suavizado em Alvarez et al. (2015) devido à utilização do percentil 66,6 e média móvel de 7 dias (GRIMM, 2019). Em SESA, o maior impacto sobre os eventos extremos ocorre na fase 3 (FIGURA 12, colunas da direita), quando a chance de ocorrência de eventos extremos aumenta por fator superior a 1,7.

Na primavera (FIGURA 20, colunas da esquerda) há mais de 2,0 vezes mais chance de ocorrer um evento extremo na fase 8 sobre CESA e o Nordeste do Brasil, e aumento significativo de ocorrência sobre SESA na fase 1. Alvarez et al. (2015) indicaram impactos nos eventos extremos na fase 1 em SESA, mas os impactos sobre CESA, região de extrema importância no Brasil, foram significativamente suavizados na fase 8.

No outono (FIGURA 21, colunas da esquerda) as significativas mudanças na frequência de eventos extremos nas fases 2 e 1, impactaram grande parte da região CESA e Nordeste do Brasil, enquanto na região SESA esses impactos na precipitação extrema ocorrem na fase 6, com fator 2,0 de aumento da probabilidade de ocorrência na fase 1 sobre a CESA. Os impactos sobre os eventos extremos na fase 1 em Alvarez et al. (2015) foram qualitativamente suavizados.

No inverno (FIGURA 21, colunas da direita) os impactos são de menor importância prática, pois chove pouco na maior parte do continente e, portanto, o percentil 90 geralmente não significa grande quantidade de chuva (FIGURA 1 e FIGURA 2). Mudanças significativas na frequência dos eventos extremos só tem relevância no Sul do Brasil e SESA (como nas fases 6 e 7) e no extremo norte da AS, como nas fases 1 e 2.

FIGURA 20: Razão entre a probabilidade de eventos extremos de precipitação em cada uma das fases da OMJ e a probabilidade média, durante a primavera (colunas da esquerda) e verão austral (colunas da direita). São mostradas em cores apenas as razões correspondentes à diferença significativa entre a probabilidade de ocorrência para cada fase da OMJ e a probabilidade média, com níveis de significância maiores que 85%.

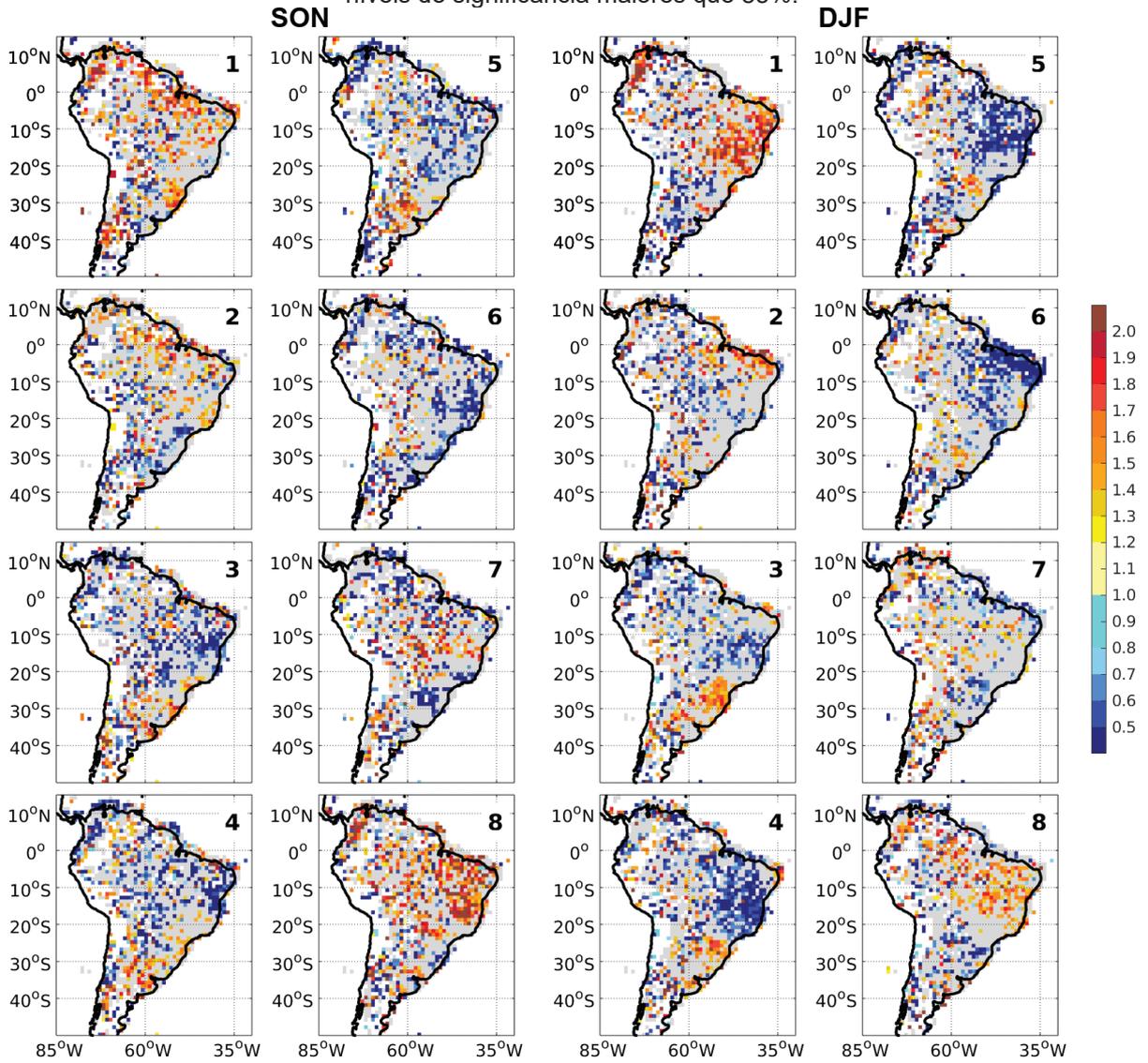
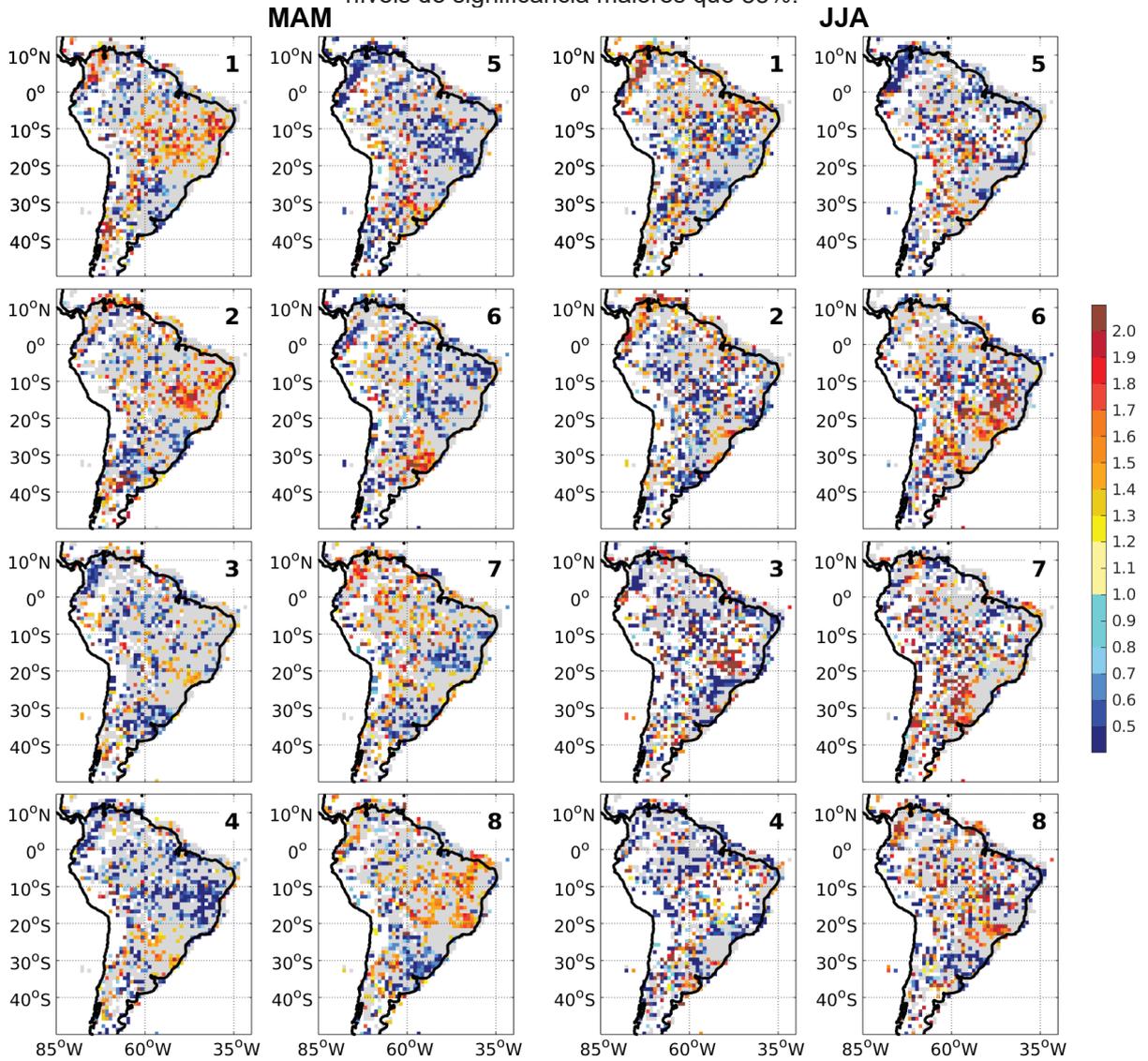


FIGURA 21: Razão entre a probabilidade de eventos extremos de precipitação em cada uma das fases da OMJ e a probabilidade média, durante o outono (colunas da esquerda) e inverno austral (colunas da direita). São mostradas em cores apenas as razões correspondentes à diferença significativa entre a probabilidade de ocorrência para cada fase da OMJ e a probabilidade média, com níveis de significância maiores que 85%.



#### 4.4 ANÁLISE DE COMPONENTES PRINCIPAIS

Os primeiros modos de variabilidade das anomalias de precipitação da AS, filtradas em 20-90 dias de DJF (FIGURA 22, colunas da direita), apresentam como regiões de grande variabilidade algumas das regiões mais afetadas pela OMJ, como CESA, a parte central do continente, sudeste da Amazônia, regiões sob influência da ZCAS e nordeste da AS (GRIMM, 2019). As anomalias observadas na fase 1 (FIGURA 12, colunas da direita) aparecem sobre essas regiões no primeiro, segundo e terceiro modo. Grimm (2019) sugere que estas anomalias não ocorrem simultaneamente e tem origens diferentes, provavelmente não estão presentes em todos os dias desta fase.

Durante a primavera o primeiro modo de variabilidade apresentou sinal positivo mais forte sobre a CESA e regiões sob influência da ZCAS. Este padrão apareceu nesta estação do ano na fase 8 (FIGURA 12, colunas da esquerda), assim como no aumento da frequência de eventos extremos sobre estas regiões (FIGURA 20, colunas da esquerda). O padrão observado nas anomalias de precipitação na fase 1 se concentrou na região norte da AS, o que é consistente com o quinto modo de variabilidade.

Os principais modos de variabilidade no outono (FIGURA 23, colunas da esquerda) apresentaram padrões parecidos aos do verão, embora o modo com mais forte componente no norte da AS esteja mais concentrado sobre o Nordeste do Brasil, enquanto o de verão está concentrado no leste da Amazônia (FIGURA 13, colunas da esquerda).

No inverno (FIGURA 23, colunas da direita), os centros de maior variabilidade que tem mais importância prática estão sobre o Sul do Brasil e noroeste da AS, onde a OMJ tem impacto nas fases 8, 1, 4, 5.

FIGURA 22: Factor loadings dos EOF's rotacionados da precipitação diária da primavera (SON, colunas da esquerda) e verão austral (DJF, colunas da direita), na faixa de 20 a 90 dias.

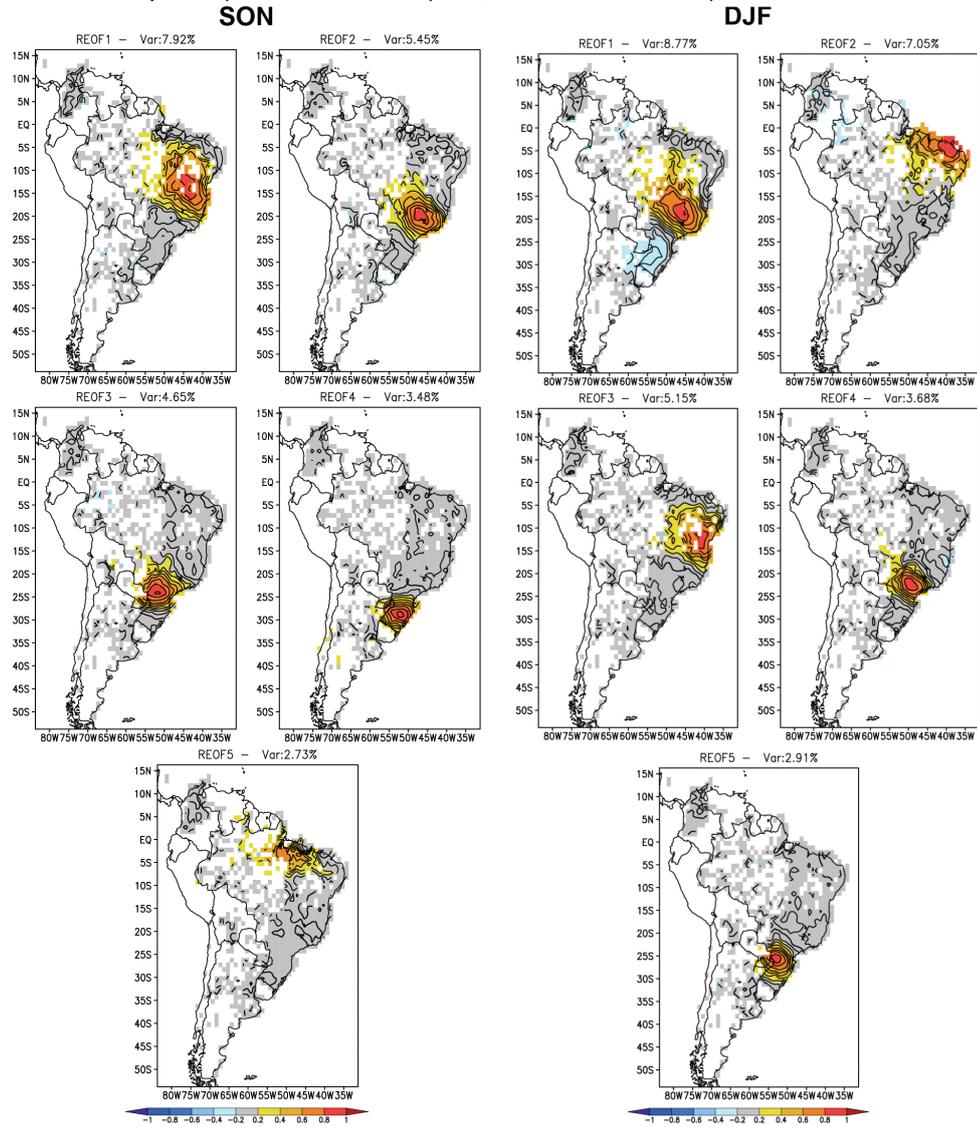
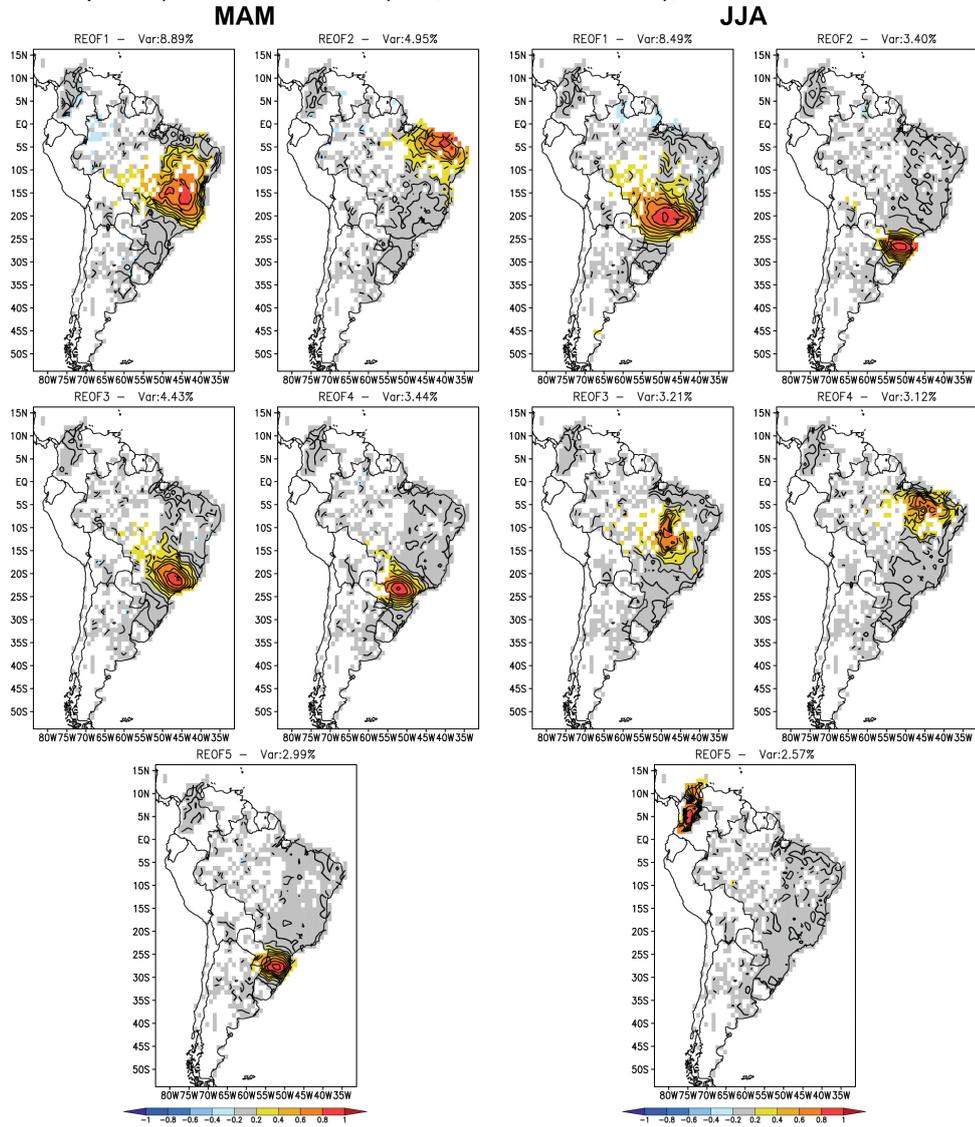


FIGURA 23: Factor loadings dos EOF's rotacionados da precipitação diária do outono (MAM, colunas da esquerda) e inverno austral (JJA, colunas da direita), na faixa de 20 a 90 dias.



## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os efeitos da OMJ sobre a América do Sul são muito significativos, podendo aumentar em mais de 1/3 a média de chuva diária durante a estação chuvosa e mais do que dobrar a frequência de eventos extremos e regiões muito populosas. Além disto, os impactos da OMJ sobre a precipitação afetam os principais modos de variabilidade intrassazonal da precipitação na banda de 20 a 90 dias.

Os efeitos da OMJ sobre a frequência de eventos extremos em cada fase são consistentes com a precipitação diária média em cada fase em todas as estações do ano, com exceção na fase 6 no inverno austral (JJA), quando não há anomalias de precipitação positiva sobre CESA, mas houve significativo aumento nas chances de ocorrer eventos extremos. Contudo, há que lembrar que nesta região tais eventos extremos não possuem importância prática no inverno, pois chove muito pouco nesta estação.

Embora haja características comuns das anomalias de convecção da OMJ em certas fases em todas as estações do ano, como a convecção mais intensa sobre o Continente Marítimo nas fases 4 e 5, enquanto a subsidência mais forte nesta região ocorre nas fases 8 e 1, ou a convecção mais intensa sobre a AS durante as fases 8 e 1, e subsidência mais forte nas fases 4 e 5, há diferenças notáveis de intensidade e distribuição espacial das anomalias sobre a AS em cada fase em diferentes estações. A razão pode estar nas teleconexões que carregam o sinal da OMJ para a AS e/ou em condições locais que podem favorecer o aumento/diminuição na convecção da OMJ em fases diferentes em estações diferentes.

A evolução do ciclo da OMJ pode ter influência sobre as características de suas fases ou do impacto que causa sobre a AS. Eventos primários, apesar de serem precedidos por dias neutros, exibem anomalias precursoras que favorecem o desenvolvimento do início da OMJ no Oceano Índico, entre elas anomalias sobre a AS, Atlântico tropical, África e o próprio Oceano Índico. Contudo, não há anomalias negativas significativas no Pacífico Central, ao contrário do que ocorre na categoria Di para os eventos sucessivos. Isto faz com que não haja no início do ciclo fortes anomalias sobre a AS, que dependem de teleconexões a partir do Pacífico. Quanto ao restante da evolução dos eventos primários não há diferença fundamental em relação às características gerais descritas anteriormente.

Nos eventos sucessivos durante as categorias Di e A há anomalias negativas significativas de OLR sobre a AS, Atlântico tropical e África, mais fortes que as anomalias precursoras de eventos primários, indicando que os eventos sucessivos se iniciam de forma mais intensa, forçados por anomalias de convecção do evento anterior. Há, também, fortes anomalias no Pacífico central subtropical sul, que produzem já no início do ciclo anomalias sobre a AS, através de teleconexões. Portanto, nos eventos sucessivos as anomalias de convecção sobre a AS são mais fortes e duradouras, produzindo uma defasagem destes sinais em relação aos eventos primários. Comparando as anomalias de convecção e circulação nos eventos primários em relação aos eventos sucessivos, observa-se que as anomalias nos eventos sucessivos são mais intensas e extensas. Talvez esta seja a razão por se estenderem em ciclos sucessivos, o que sugere que as anomalias de um ciclo sejam capazes de ajudar a estabelecer as anomalias do ciclo seguinte.

## 5.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Ao resultados obtidos sugerem vários caminhos para estudos futuros.

- i) Analisar as anomalias de convecção e circulação associadas ao ciclo completo da OMJ e suas diversas evoluções, com a ajuda de outros instrumentos, como as Funções de Influência de Grimm e Silva Dias (1995).
- ii) Identificar as condições anteriores ao início dos eventos de OMJ no Oceano Índico, para melhorar o sistema de previsões intrassazonais.
- iii) Identificar as condições no final de eventos OMJ que não foram seguidos por outro evento.
- iv) Avaliar os efeitos da combinação da OMJ com outras oscilações climáticas sobre os impactos das diferentes fases da OMJ na precipitação e seus eventos extremos na AS, em todas as estações do ano.

## 6. REFERÊNCIAS

- ALVAREZ, M. S. et al. Influence of the Madden Julian Oscillation on precipitation and surface air temperature in South America. **Climate Dynamics**, v. 46, p. 245-262, 2015.
- CENTRE FOR RESEARCH ON THE EPIDEMIOLOGY OF DISASTERS. 2021 Disasters in numbers. **Centre for Research on the Epidemiology of Disasters**, 2022. Disponível em: <[https://cred.be/sites/default/files/2021\\_EMDAT\\_report.pdf](https://cred.be/sites/default/files/2021_EMDAT_report.pdf)>. Acesso em: 05 Setembro 2022.
- DUCHON, C. E. Lanczos filtering in one and two dimensions. **Journal of Applied Meteorology**, v. 18, p. 1016-1022, 1979.
- GRIMM, A. M. Interannual climate variability in South America: impacts on seasonal precipitation, extreme events, and possible effects of climate change. **Stochastic Environmental Research and Risk Assessment (Print)**, v. 25, p. 537-554, 2011.
- GRIMM, A. M. Madden-Julian Oscillation impacts on South American summer monsoon season: precipitation anomalies, extreme events, teleconnections, and role in the MJO cycle. **Climate Dynamics**, v. 53, p. 907-932, 2019.
- GRIMM, A. M. et al. The combined effect of climate oscillations in producing extremes: the 2020 drought in southern Brazil. **Brazilian Journal of Water Resources**, v. 25, p. 1-12, 2020.
- GRIMM, A. M.; HAKOYAMA, L. R.; SCHEIBE, L. A. Active and break phases of the South American summer monsoon: MJO influence and subseasonal prediction. **Climate Dynamics**, v. 56, p. 3603-3624, 2021.
- GRIMM, A. M.; PAL, J. S.; GIORGI, F. Connection between Spring Conditions and Peak Summer Monsoon Rainfall in South America: Role of Soil Moisture, Surface Temperature, and Topography in Eastern Brazil. **Journal of Climate**, v. 20, p. 5929-5945, 2007.
- GRIMM, A. M.; SABOIA, J. P. J. Interdecadal Variability of the South American Precipitation in the Monsoon Season. **Journal of Climate**, v. 28, p. 755-775, 2015.
- GRIMM, A. M.; SILVA DIAS, P. L. Analysis of tropical-extratropical interactions with influence functions of a barotropic model. **Journal of Atmospheric Science**, v. 52, p. 3538-3555, 1995.
- GRIMM, A. M.; TEDESCHI, R. G. ENSO and Extreme Rainfall Events in South America. **Journal of Climate**, v. 22, p. 1589-1609, 2009.
- HALL, J. D.; MATTHEWS, A. J.; KAROLY, D. J. The modulation of tropical cyclone. **Monthly Weather Review**, v. 126, p. 2970-2982, 2001.
- HOLTON, J. R. **An Introduction to Dynamic Meteorology**. 4. ed. California: Elsevier Academic Press, v. 88, p. 385-386, 2004.
- HONGYU, K.; SANDANIELO, V. L. M.; JUNIOR, G. J. O. Análise de Componentes Principais: resumo teórico, aplicação e interpretação. **Engineering and Science**, v. 5, p. 83-90, 2016.

- KALNAY, E. et al. The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 77, p. 437-471, 1996.
- LAING, A.; EVANS, J. **Introduction to Tropical Meteorology**. 2<sup>a</sup>. ed. [S.l.]: COMET Program, 2011. Disponível em: <[https://ftp.comet.ucar.edu/memory-stick/tropical/textbook\\_2nd\\_edition/index.htm](https://ftp.comet.ucar.edu/memory-stick/tropical/textbook_2nd_edition/index.htm)>. Acesso em: 05 Novembro 2022.
- LIEBMANN, B.; ALLURED, D. Daily Precipitation Grids for South America. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 86, p. 1567-1570, 2005.
- LIEBMANN, B.; SMITH, C. Description of a Complete (Interpolated) Outgoing Longwave Radiation Dataset. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 77, p. 1275-1277, 1996.
- MADDEN, R. A.; JULIAN, P. R. Detection of a 40-50 day oscillation in the zonal wind in the tropical Pacific. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 28, p. 702-708, 1971.
- MATTHEWS, A. J. Propagation mechanisms for the Madden-Julian Oscillation. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 126, p. 2637-2651, 2006.
- MATTHEWS, A. J. Primary and successive events in the Madden-Julian Oscillation. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 134, p. 439-453, 2008.
- MAYTA, V. C.; AMBRIZZI, T.; ESPINOZA, J. C.; SILVA DIAS, P. L. The role of the Madden-Julian oscillation on the Amazon Basin intraseasonal rainfall variability. **International Journal of Climatology**, v. 39, p. 343-360, 2018.
- MILLIFF, R. F.; MADDEN, R. A. The existence and vertical structure of fast, eastward-moving disturbances in the equatorial troposphere. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 53, p. 586-597, 1996.
- SEO, K. H.; SON, S. W. The Global Atmospheric Circulation Response to Tropical Diabatic Heating Associated with the Madden-Julian Oscillation during Northern Winter. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 69, p. 79-96, 2012.
- STRAUB, K. H. MJO Initiation in the Real-Time Multivariate MJO Index. **Journal of Climate**, v. 26, p. 1130-1151, 2012.
- VALADÃO, C. E. A. et al. Impacts of the Madden-Julian oscillation on intraseasonal precipitation over Northeast Brazil. **INTERNATIONAL JOURNAL OF CLIMATOLOGY**, v. 37, p. 1859-1884, 2017.
- VITART, F. E. A. The sub-seasonal to seasonal prediction (S2S) project database. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 98, p. 163-173, 2017.
- WEICKMANN, K. M.; LUSSKY, G. R.; KUTZBACH, J. E. Intraseasonal (30-60 Day) Fluctuations of Outgoing Longwave Radiation and 250mb Streamfunction during Northern Winter. **American Meteorological Society**, v.51, p. 941-961, 1985.
- WHEELER, M. C.; HENDON, H. H. An All-Season Real-Time Multivariate MJO Index: Development of an Index for Monitoring and Prediction. **American Meteorological Society**, v. 132, p. 1917-1932, 2004.
- WILKS, D. S. **Statistical Methods in the Atmospheric Sciences**. 3<sup>a</sup>. ed. Londres: Academic Press, 2011.

ZHANG, C. Madden-Julian Oscillation. **Reviews of Geophysics**, v. 43, p. 1-36, 2005.

ZHANG, C. et al. Four Theories of the Madden-Julian Oscillation. **Reviews of Geophysics**, v. 58, p. 1-55, 2020.