



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÕES
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

sid.inpe.br/mtc-m21d/2022/10.27.23.45-TDI

O IMPACTO DAS ONDAS DE ROSSBY E KELVIN NA AMAZÔNIA

André Luiz Leturiondo Segundo

Dissertação de Mestrado do
Curso de Pós-Graduação em
Meteorologia, orientada pelo Dr.
Manoel Alonso Gan, aprovada em
09 de setembro de 2022.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34T/47SK82L>>

INPE
São José dos Campos
2022

PUBLICADO POR:

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Coordenação de Ensino, Pesquisa e Extensão (COEPE)
Divisão de Biblioteca (DIBIB)
CEP 12.227-010
São José dos Campos - SP - Brasil
Tel.:(012) 3208-6923/7348
E-mail: pubtc@inpe.br

CONSELHO DE EDITORAÇÃO E PRESERVAÇÃO DA PRODUÇÃO INTELLECTUAL DO INPE - CEPPII (PORTARIA Nº 176/2018/SEI-INPE):**Presidente:**

Dra. Marley Cavalcante de Lima Moscati - Coordenação-Geral de Ciências da Terra (CGCT)

Membros:

Dra. Ieda Del Arco Sanches - Conselho de Pós-Graduação (CPG)
Dr. Evandro Marconi Rocco - Coordenação-Geral de Engenharia, Tecnologia e Ciência Espaciais (CGCE)
Dr. Rafael Duarte Coelho dos Santos - Coordenação-Geral de Infraestrutura e Pesquisas Aplicadas (CGIP)
Simone Angélica Del Ducca Barbedo - Divisão de Biblioteca (DIBIB)

BIBLIOTECA DIGITAL:

Dr. Gerald Jean Francis Banon
Clayton Martins Pereira - Divisão de Biblioteca (DIBIB)

REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:

Simone Angélica Del Ducca Barbedo - Divisão de Biblioteca (DIBIB)
André Luis Dias Fernandes - Divisão de Biblioteca (DIBIB)

EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:

Ivone Martins - Divisão de Biblioteca (DIBIB)
André Luis Dias Fernandes - Divisão de Biblioteca (DIBIB)



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÕES
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

sid.inpe.br/mtc-m21d/2022/10.27.23.45-TDI

O IMPACTO DAS ONDAS DE ROSSBY E KELVIN NA AMAZÔNIA

André Luiz Leturiondo Segundo

Dissertação de Mestrado do
Curso de Pós-Graduação em
Meteorologia, orientada pelo Dr.
Manoel Alonso Gan, aprovada em
09 de setembro de 2022.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34T/47SK82L>>

INPE
São José dos Campos
2022

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Segundo, André Luiz Leturiondo.
Se39i O impacto das ondas de Rossby e Kelvin na Amazônia / André
Luiz Leturiondo Segundo. – São José dos Campos : INPE, 2022.
xxviii + 177 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m21d/2022/10.27.23.45-TDI)

Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Instituto Nacional
de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2022.

Orientador : Dr. Manoel Alonso Gan.

1. Ondas atmosféricas. 2. Onda de Rossby. 3. Onda de Kelvin.
4. Amazônia. 5. Previsão de nuvens. I. Título.

CDU 551.513.11



Esta obra foi licenciada sob uma Licença [Creative Commons Atribuição-NãoComercial 3.0 Não Adaptada](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 3.0 Unported License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

MINISTÉRIO DA
CIÊNCIA, TECNOLOGIA
E INOVAÇÕES**INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS****DEFESA FINAL DE DISSERTAÇÃO DA ANDRÉ LUIZ LETURIONDO SEGUNDO
BANCA Nº265/2022 , REGISTRO 242202/2020.**

No dia 09 de setembro de 2022, as 10h00, Videoconferência, o(a) aluno(a) mencionado(a) acima defendeu seu trabalho final (apresentação oral seguida de arguição) perante uma Banca Examinadora, cujos membros estão listados abaixo. O(A) aluno(a) foi **APROVADO(A)** pela Banca Examinadora, por unanimidade, em cumprimento ao requisito exigido para obtenção do Título de Mestre em Meteorologia. O trabalho precisa da incorporação das correções sugeridas pela Banca e revisão final pelo(s) orientador(es).

Observações da banca: O aluno deverá incluir mais explicações para os resultados obtidos, além das outras sugestões apresentadas pelos membros da banca examinadora. O orientador será o responsável pela revisão da versão final da dissertação.

Novo título: “O Impacto das Ondas de Rossby e Kelvin na Amazônia”.

Observações da banca: O aluno deverá incluir mais explicações para os resultados obtidos, além das outras sugestões apresentadas pelos membros da banca examinadora. O orientador será o responsável pela revisão da versão final da dissertação.

Membros da Banca

Dr. Manoel Alonso Gan – Presidente/ Orientador (a) – INPE

Dr. Julio Pablo Reyes Fernandes – Membro Interno – INPE

Dra. Jaci Maria Bilhalva Saraiva – Membro Externo – FURG



Documento assinado eletronicamente por **Manoel Alonso Gan, Pesquisador**, em 28/09/2022, às 16:43 (horário oficial de Brasília), com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Julio Pablo Reyes Fernandez, Tecnologista**, em 03/10/2022, às 11:01 (horário oficial de Brasília), com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Jaci Maria Bilhalva Saraiva (E), Usuário Externo**, em 14/10/2022, às 09:37 (horário oficial de Brasília), com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site <https://sei.mcti.gov.br/verifica.html>, informando o código verificador **10389572** e o código CRC **2C9AFC5B**.

Referência: Processo nº 01340.007416/2022-84

SEI nº 10389572

“Um céu sem nuvens é um campo sem flores, um mar sem barcos.”

HENRY THOREAU
em *“The Writings of Henry Thoreau”*, 1853

*Dedico esta dissertação a todos aqueles aplicados em
aprimorar a previsão meteorológica para a Amazônia.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus pelo dom da vida e por me dar forças e a capacidade de concluir essa pesquisa.

Aos meus pais, Elieci e André, por serem fontes constantes de força e encorajamento, mesmo com toda a distância física entre nós.

À Muryel, minha companheira, pelo apoio diário, críticas, elogios, paciência e por não me deixar perder a cabeça. Te amo!

Um agradecimento especial à meteorologista Jaci Saraiva, grande exemplo pessoal e profissional e grande incentivadora para que eu seguisse o caminho da pós graduação.

Aos amigos adquiridos ao longo do caminho, pelas boas risadas, momentos de descontração e boas ideias em geral. Em especial à Wanda Isabella, pelas conversas e apoio mútuo nestes anos dedicados ao mestrado.

Aos professores do corpo docente de Meteorologia da Universidade do Estado do Amazonas e aos professores do Programa de Pós-Graduação do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais por todos os ensinamentos passados. Todos foram de grande importância para o meu crescimento acadêmico. Em especial agradeço ao meu orientador, professor Manoel Alonso Gan, pelo direcionamento e contribuição nesta dissertação.

Ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais pela estrutura e ao apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa de pesquisa concedida, Número de Processo 88887.479517/2020-00 do Programa de Excelência Acadêmica (PROEX).

RESUMO

Devido a sua localização geográfica, a Amazônia está sujeita à atuação de diversos sistemas meteorológicos de diferentes escalas espaço-temporais. Além disso, forçantes externas como as ondas equatoriais podem influenciar nos sistemas de tempo da região, em especial as ondas de Rossby e Kelvin, que dependendo da sua fase atuam desintensificando a convecção local ou intensificando sistemas convectivos existentes e contribuindo para eventos de precipitação intensa. Para identificação das ondas se propagando na atmosfera, foi aplicado um filtro em dados de Radiação de Onda Longa, obtidos pela plataforma online da NOAA, por meio de Transformada Rápida de Fourier em longitude e no tempo para adquirir o espectro "número de onda - frequência". Com auxílio das anomalias das variáveis meteorológicas obtidas pela reanálise ERA-Interim, é descrita a estrutura horizontal e vertical das ondas para eventos selecionados, onde, na fase negativa com intensificação da convecção, foi observado em ambas ondas o aumento de temperatura em toda a coluna troposférica (mais intensa em médios e altos níveis para as ondas de Kelvin), aumento da umidade específica, convergência de massa em baixos níveis e divergência em altos níveis. Nas ondas de Rossby, os ventos foram anormalmente de leste e norte em baixos níveis e de oeste e sul em altos níveis, enquanto nas ondas de Kelvin estas anomalias são de oeste e norte em superfície e leste e norte em altos níveis. Nos dez anos estudados, notou-se que as ondas de Rossby possuem atuação semelhante em todas as estações do ano, porém com ondas mais intensas sendo vistas com mais frequência na primavera do Hemisfério Sul, exceto para a região mais à leste da Amazônia, onde as ondas mais intensas possuem maior frequência no outono. Para as ondas de Kelvin, as ondas mais intensas ocorrem no outono e secundariamente na primavera, exceto na região centro-sul da Amazônia, onde isto se inverte. Nos meses de inverno as ondas de Kelvin são mínimas e estas ficam restritas ao norte da Linha do Equador.

Palavras-chave: Ondas Atmosféricas. Onda de Rossby. Onda de Kelvin. Amazônia. Previsão de Nuvens.

THE IMPACT OF ROSSBY AND KELVIN WAVES ON AMAZON

ABSTRACT

Due to its geographic location, the Amazon is subject to the action of several meteorological systems of different spatio-temporal scales. In addition, external forcings such as equatorial waves can influence the weather systems in the region, especially Rossby and Kelvin waves, which act by de-intensifying local convection or intensifying existing convective systems and contributing to extreme precipitation events. To identify the waves propagating in the atmosphere, a filter was applied to Outgoing Longwave Radiation data, obtained by the NOAA online platform, through Fast Fourier Transform in longitude and in time to acquire the spectrum "wave number - frequency". With the aid of the anomalies of meteorological variables obtained by the ERA-Interim reanalysis, the horizontal and vertical structure of the waves for selected events are described, where, in the negative phase with intensification of convection, an increase in temperature was observed in both waves throughout the tropospheric column (more intense at medium and high levels for Kelvin waves), increase in specific humidity, convergence in low levels and divergence in high levels. In Rossby waves, the winds were anomalously from east and north in low levels and west and south in high levels, while in Kelvin waves these anomalies are from west and north in surface and east and north in high levels. In the ten years studied, it was noticed that the Rossby waves have a similar performance in all seasons of the year, but with more intense waves being seen more frequently in the spring of the Southern Hemisphere, except for the easternmost region of the Amazon, where the most intense waves are more frequent in autumn. For Kelvin waves, the most intense waves occur in autumn and secondarily in spring, except in the south-central region of Amazonia, where this is reversed. In the winter months the Kelvin waves are minimal and these are restricted to the north of the equator.

Keywords: Atmospheric waves. Rossby wave. Kelvin wave. Amazon. Cloud prediction.

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
2.1 Estruturas teóricas para as ondas a) Rossby e b) Kelvin.	11
4.1 Variação mensal do índice do MMA para a década 2010 – 2019. As linhas vermelhas indicam valores positivos em meses cuja temperatura do Atlântico Norte é anormalmente maior, enquanto as linhas azuis são valores negativos em meses com a temperatura do Atlântico Norte anormalmente menor.	19
4.2 Passagem de uma Onda de Rossby com fase positiva pela Amazônia no outono de 2010 entre os dias 15/03 e 24/03. Linhas vermelhas são Ondas de Rossby e linhas azuis Ondas de Kelvin.	22
4.3 Onda de Rossby (linhas vermelhas contínuas) e Onda de Kelvin (linhas azuis contínuas) na Amazônia e anomalias no nível 850 hPa de a) temperatura (°C), b) umidade específica (g/g), c) vorticidade relativa e vento horizontal e d) divergência e vento horizontal no dia 18 de março de 2010.	24
4.4 Onda de Rossby (linhas vermelhas contínuas) e Onda de Kelvin (linhas azuis contínuas) na Amazônia e anomalias no nível 500 hPa de a) temperatura (°C), b) umidade específica (g/g), c) vorticidade relativa e vento horizontal e d) divergência e vento horizontal no dia 18 de março de 2010.	25
4.5 Onda de Rossby (linhas vermelhas contínuas) e Onda de Kelvin (linhas azuis contínuas) na Amazônia e anomalias no nível 200 hPa de a) temperatura (°C), b) umidade específica (g/g), c) vorticidade relativa e vento horizontal e d) divergência e vento horizontal no dia 18 de março de 2010.	26
4.6 Variação de intensidade da Onda de Rossby para o centro de maior passagem da onda ao sul dos dias 13/03 (-5) até 23/03 (+5) de 2010 entre 1000 hPa e 100 hPa com as anomalias de a) temperatura (°C), b) umidade específica (g/g), c) vento zonal (m/s), d) vento meridional (m/s), e) vorticidade relativa e f) divergência.	28
4.7 Variação de intensidade da Onda de Rossby para o centro de maior passagem da onda ao norte dos dias 13/03 (-5) até 23/03 (+5) de 2010 entre 1000 hPa e 100 hPa com as anomalias de a) temperatura (°C), b) umidade específica (g/g), c) vento zonal (m/s), d) vento meridional (m/s), e) vorticidade relativa e f) divergência.	30

4.8	Passagem de uma Onda de Rossby com fase negativa pela Amazônia no outono de 2010 entre os dias 26/03 e 31/03. Linhas vermelhas são Ondas de Rossby e linhas azuis Ondas de Kelvin.	33
4.9	Onda de Rossby (linhas vermelhas contínuas) e Onda de Kelvin (linhas azuis contínuas) na Amazônia e anomalias no nível 850 hPa de a) temperatura (°C), b) umidade específica (g/g), c) vorticidade relativa e vento horizontal e d) divergência e vento horizontal no dia 28 de março de 2010.	34
4.10	Onda de Rossby (linhas vermelhas contínuas) e Onda de Kelvin (linhas azuis contínuas) na Amazônia e anomalias no nível 500 hPa de a) temperatura (°C), b) umidade específica (g/g), c) vorticidade relativa e vento horizontal e d) divergência e vento horizontal no dia 28 de março de 2010.	35
4.11	Onda de Rossby (linhas vermelhas contínuas) e Onda de Kelvin (linhas azuis contínuas) na Amazônia e anomalias no nível 200 hPa de a) temperatura (°C), b) umidade específica (g/g), c) vorticidade relativa e vento horizontal e d) divergência e vento horizontal no dia 28 de março de 2010.	36
4.12	Variação de intensidade da Onda de Rossby para o centro de maior passagem da onda ao sul dos dias 23/03 (-5) até 02/04 (+5) de 2010 entre 1000 hPa e 100 hPa com as anomalias de a) temperatura (°C), b) umidade específica (g/g), c) vento zonal (m/s), d) vento meridional (m/s), e) vorticidade relativa e f) divergência.	38
4.13	Variação de intensidade da Onda de Rossby para o centro de maior passagem da onda ao norte dos dias 23/03 (-5) até 02/04 (+5) de 2010 entre 1000 hPa e 100 hPa com as anomalias de a) temperatura (°C), b) umidade específica (g/g), c) vento zonal (m/s), d) vento meridional (m/s), e) vorticidade relativa e f) divergência.	40
4.14	Passagem de uma Onda de Rossby com fase positiva pela Amazônia no outono de 2015 entre os dias 27/04 e 04/05. Linhas vermelhas são Ondas de Rossby e linhas azuis Ondas de Kelvin.	43
4.15	Onda de Rossby (linhas vermelhas contínuas) e Onda de Kelvin (linhas azuis contínuas) na Amazônia e anomalias no nível 850 hPa de a) temperatura (°C), b) umidade específica (g/g), c) vorticidade relativa e vento horizontal e d) divergência e vento horizontal no dia 02 de maio de 2015.	45
4.16	Onda de Rossby (linhas vermelhas contínuas) e Onda de Kelvin (linhas azuis contínuas) na Amazônia e anomalias no nível 500 hPa de a) temperatura (°C), b) umidade específica (g/g), c) vorticidade relativa e vento horizontal e d) divergência e vento horizontal no dia 02 de maio de 2015.	46

4.17	Onda de Rossby (linhas vermelhas contínuas) e Onda de Kelvin (linhas azuis contínuas) na Amazônia e anomalias no nível 200 hPa de a) temperatura (°C), b) umidade específica (g/g), c) vorticidade relativa e vento horizontal e d) divergência e vento horizontal no dia 02 de maio de 2015.	47
4.18	Variação de intensidade da Onda de Rossby para o centro de maior passagem da onda ao sul dos dias 27/04 (-5) até 07/05 (+5) de 2015 entre 1000 hPa e 100 hPa com as anomalias de a) temperatura (°C), b) umidade específica (g/g), c) vento zonal (m/s), d) vento meridional (m/s), e) vorticidade relativa e f) divergência.	50
4.19	Variação de intensidade da Onda de Rossby para o centro de maior passagem da onda ao norte dos dias 27/04 (-5) até 07/05 (+5) de 2015 entre 1000 hPa e 100 hPa com as anomalias de a) temperatura (°C), b) umidade específica (g/g), c) vento zonal (m/s), d) vento meridional (m/s), e) vorticidade relativa e f) divergência.	53
4.20	Passagem de uma Onda de Rossby com fase negativa pela Amazônia no outono de 2015 entre os dias 08/05 e 15/05. Linhas vermelhas são Ondas de Rossby e linhas azuis Ondas de Kelvin.	56
4.21	Onda de Rossby (linhas vermelhas contínuas) e Onda de Kelvin (linhas azuis contínuas) na Amazônia e anomalias no nível 850 hPa de a) temperatura (°C), b) umidade específica (g/g), c) vorticidade relativa e vento horizontal e d) divergência e vento horizontal no dia 11 de maio de 2015.	57
4.22	Onda de Rossby (linhas vermelhas contínuas) e Onda de Kelvin (linhas azuis contínuas) na Amazônia e anomalias no nível 500 hPa de a) temperatura (°C), b) umidade específica (g/g), c) vorticidade relativa e vento horizontal e d) divergência e vento horizontal no dia 11 de maio de 2015.	58
4.23	Onda de Rossby (linhas vermelhas contínuas) e Onda de Kelvin (linhas azuis contínuas) na Amazônia e anomalias no nível 200 hPa de a) temperatura (°C), b) umidade específica (g/g), c) vorticidade relativa e vento horizontal e d) divergência e vento horizontal no dia 11 de maio de 2015.	59
4.24	Variação de intensidade da Onda de Rossby para o centro de maior passagem da onda dos dias 06/05 (-5) até 16/05 (+5) de 2015 entre 1000 hPa e 100 hPa com as anomalias de a) temperatura (°C), b) umidade específica (g/g), c) vento zonal (m/s), d) vento meridional (m/s), e) vorticidade relativa e f) divergência.	62
4.25	Passagem de uma Onda de Rossby com fase positiva pela Amazônia no outono de 2017 entre os dias 28/03 e 06/04. Linhas vermelhas são Ondas de Rossby e linhas azuis Ondas de Kelvin.	66

4.26	Onda de Rossby (linhas vermelhas contínuas) e Onda de Kelvin (linhas azuis contínuas) na Amazônia e anomalias no nível 850 hPa de a) temperatura (°C), b) umidade específica (g/g), c) vorticidade relativa e vento horizontal e d) divergência e vento horizontal no dia 02 de abril de 2017.	68
4.27	Onda de Rossby (linhas vermelhas contínuas) e Onda de Kelvin (linhas azuis contínuas) na Amazônia e anomalias no nível 500 hPa de a) temperatura (°C), b) umidade específica (g/g), c) vorticidade relativa e vento horizontal e d) divergência e vento horizontal no dia 02 de abril de 2017.	69
4.28	Onda de Rossby (linhas vermelhas contínuas) e Onda de Kelvin (linhas azuis contínuas) na Amazônia e anomalias no nível 200 hPa de a) temperatura (°C), b) umidade específica (g/g), c) vorticidade relativa e vento horizontal e d) divergência e vento horizontal no dia 02 de abril de 2017.	70
4.29	Variação de intensidade da Onda de Rossby para o centro de maior passagem da onda dos dias 28/03 (-5) até 07/04 (+5) de 2017 entre 1000 hPa e 100 hPa com as anomalias de a) temperatura (°C), b) umidade específica (g/g), c) vento zonal (m/s), d) vento meridional (m/s), e) vorticidade relativa e f) divergência.	72
4.30	Passagem de uma Onda de Rossby com fase negativa pela Amazônia no outono de 2017 entre os dias 07/04 e 18/04. Linhas vermelhas são Ondas de Rossby e linhas azuis Ondas de Kelvin.	75
4.31	Onda de Rossby (linhas vermelhas contínuas) e Onda de Kelvin (linhas azuis contínuas) na Amazônia e anomalias no nível 850 hPa de a) temperatura (°C), b) umidade específica (g/g), c) vorticidade relativa e vento horizontal e d) divergência e vento horizontal no dia 13 de abril de 2017.	77
4.32	Onda de Rossby (linhas vermelhas contínuas) e Onda de Kelvin (linhas azuis contínuas) na Amazônia e anomalias no nível 500 hPa de a) temperatura (°C), b) umidade específica (g/g), c) vorticidade relativa e vento horizontal e d) divergência e vento horizontal no dia 13 de abril de 2017.	78
4.33	Onda de Rossby (linhas vermelhas contínuas) e Onda de Kelvin (linhas azuis contínuas) na Amazônia e anomalias no nível 200 hPa de a) temperatura (°C), b) umidade específica (g/g), c) vorticidade relativa e vento horizontal e d) divergência e vento horizontal no dia 13 de abril de 2017.	79
4.34	Variação de intensidade da Onda de Rossby para o centro de maior passagem da onda dos dias 08/04 (-5) até 18/04 (+5) de 2017 entre 1000 hPa e 100 hPa com as anomalias de a) temperatura (°C), b) umidade específica (g/g), c) vento zonal (m/s), d) vento meridional (m/s), e) vorticidade relativa e f) divergência.	81

4.35	Passagem de uma Onda de Kelvin pela Amazônia no outono de 2013 entre os dias 23/03 e 02/04. Linhas vermelhas são Ondas de Rossby e linhas azuis Ondas de Kelvin.	86
4.36	Onda de Rossby (linhas vermelhas contínuas) e Onda de Kelvin (linhas azuis contínuas) na Amazônia e anomalias no nível 850 hPa de a) temperatura (°C), b) umidade específica (g/g), c) vorticidade relativa e vento horizontal e d) divergência e vento horizontal no dia 27 de março de 2013.	87
4.37	Onda de Rossby (linhas vermelhas contínuas) e Onda de Kelvin (linhas azuis contínuas) na Amazônia e anomalias no nível 500 hPa de a) temperatura (°C), b) umidade específica (g/g), c) vorticidade relativa e vento horizontal e d) divergência e vento horizontal no dia 27 de março de 2013.	88
4.38	Onda de Rossby (linhas vermelhas contínuas) e Onda de Kelvin (linhas azuis contínuas) na Amazônia e anomalias no nível 200 hPa de a) temperatura (°C), b) umidade específica (g/g), c) vorticidade relativa e vento horizontal e d) divergência e vento horizontal no dia 27 de março de 2013.	89
4.39	Onda de Rossby (linhas vermelhas contínuas) e Onda de Kelvin (linhas azuis contínuas) na Amazônia e anomalias no nível 850 hPa de a) temperatura (°C), b) umidade específica (g/g), c) vorticidade relativa e vento horizontal e d) divergência e vento horizontal no dia 29 de março de 2013.	90
4.40	Onda de Rossby (linhas vermelhas contínuas) e Onda de Kelvin (linhas azuis contínuas) na Amazônia e anomalias no nível 500 hPa de a) temperatura (°C), b) umidade específica (g/g), c) vorticidade relativa e vento horizontal e d) divergência e vento horizontal no dia 29 de março de 2013.	91
4.41	Onda de Rossby (linhas vermelhas contínuas) e Onda de Kelvin (linhas azuis contínuas) na Amazônia e anomalias no nível 200 hPa de a) temperatura (°C), b) umidade específica (g/g), c) vorticidade relativa e vento horizontal e d) divergência e vento horizontal no dia 29 de março de 2013.	92
4.42	Variação de intensidade da Onda de Kelvin para o centro de maior passagem da onda nos dias 25/03 (-3) até 31/03 (+3) de 2013 entre 1000 hPa e 100 hPa com as anomalias de a) temperatura (°C), b) umidade específica (g/g), c) vento zonal (m/s), d) vento meridional (m/s), e) vorticidade relativa e f) divergência.	94
4.43	Passagem de uma Onda de Kelvin pela Amazônia no outono de 2011 entre os dias 07/03 e 19/03. Linhas vermelhas são Ondas de Rossby e linhas azuis Ondas de Kelvin.	97

4.44	Onda de Rossby (linhas vermelhas contínuas) e Onda de Kelvin (linhas azuis contínuas) na Amazônia e anomalias no nível 850 hPa de a) temperatura (°C), b) umidade específica (g/g), c) vorticidade relativa e vento horizontal e d) divergência e vento horizontal no dia 11 de março de 2011.	98
4.45	Onda de Rossby (linhas vermelhas contínuas) e Onda de Kelvin (linhas azuis contínuas) na Amazônia e anomalias no nível 500 hPa de a) temperatura (°C), b) umidade específica (g/g), c) vorticidade relativa e vento horizontal e d) divergência e vento horizontal no dia 11 de março de 2011.	99
4.46	Onda de Rossby (linhas vermelhas contínuas) e Onda de Kelvin (linhas azuis contínuas) na Amazônia e anomalias no nível 2000 hPa de a) temperatura (°C), b) umidade específica (g/g), c) vorticidade relativa e vento horizontal e d) divergência e vento horizontal no dia 11 de março de 2011.	100
4.47	Variação de intensidade da Onda de Kelvin para o centro de maior passagem da onda nos dias 09/03 (-2) até 13/03 (+2) de 2011 entre 1000 hPa e 100 hPa com as anomalias de a) temperatura (°C), b) umidade específica (g/g), c) vento zonal (m/s), d) vento meridional (m/s), e) vorticidade relativa e f) divergência.	102
4.48	Onda de Rossby (linhas vermelhas contínuas) e Onda de Kelvin (linhas azuis contínuas) na Amazônia e anomalias no nível 850 hPa de a) temperatura (°C), b) umidade específica (g/g), c) vorticidade relativa e vento horizontal e d) divergência e vento horizontal no dia 18 de março de 2011.	104
4.49	Onda de Rossby (linhas vermelhas contínuas) e Onda de Kelvin (linhas azuis contínuas) na Amazônia e anomalias no nível 500 hPa de a) temperatura (°C), b) umidade específica (g/g), c) vorticidade relativa e vento horizontal e d) divergência e vento horizontal no dia 18 de março de 2011.	105
4.50	Onda de Rossby (linhas vermelhas contínuas) e Onda de Kelvin (linhas azuis contínuas) na Amazônia e anomalias no nível 200 hPa de a) temperatura (°C), b) umidade específica (g/g), c) vorticidade relativa e vento horizontal e d) divergência e vento horizontal no dia 18 de março de 2011.	106
4.51	Variação de intensidade da Onda de Kelvin para o centro de maior passagem da onda nos dias 16/03 (-2) até 20/03 (+2) de 2011 entre 1000 hPa e 100 hPa com as anomalias de a) temperatura (°C), b) umidade específica (g/g), c) vento zonal (m/s), d) vento meridional (m/s), e) vorticidade relativa e f) divergência.	108
4.52	Passagem de uma Onda de Kelvin pela Amazônia no outono de 2016 entre os dias 27/02 e 07/03. Linhas vermelhas são Ondas de Rossby e linhas azuis Ondas de Kelvin.	111

4.53	Onda de Rossby (linhas vermelhas contínuas) e Onda de Kelvin (linhas azuis contínuas) na Amazônia e anomalias no nível 850 hPa de a) temperatura (°C), b) umidade específica (g/g), c) vorticidade relativa e vento horizontal e d) divergência e vento horizontal no dia 02 de março de 2016.	112
4.54	Onda de Rossby (linhas vermelhas contínuas) e Onda de Kelvin (linhas azuis contínuas) na Amazônia e anomalias no nível 500 hPa de a) temperatura (°C), b) umidade específica (g/g), c) vorticidade relativa e vento horizontal e d) divergência e vento horizontal no dia 02 de março de 2016.	113
4.55	Onda de Rossby (linhas vermelhas contínuas) e Onda de Kelvin (linhas azuis contínuas) na Amazônia e anomalias no nível 200 hPa de a) temperatura (°C), b) umidade específica (g/g), c) vorticidade relativa e vento horizontal e d) divergência e vento horizontal no dia 02 de março de 2016.	114
4.56	Onda de Rossby (linhas vermelhas contínuas) e Onda de Kelvin (linhas azuis contínuas) na Amazônia e anomalias no nível 850 hPa de a) temperatura (°C), b) umidade específica (g/g), c) vorticidade relativa e vento horizontal e d) divergência e vento horizontal no dia 04 de março de 2016.	115
4.57	Onda de Rossby (linhas vermelhas contínuas) e Onda de Kelvin (linhas azuis contínuas) na Amazônia e anomalias no nível 500 hPa de a) temperatura (°C), b) umidade específica (g/g), c) vorticidade relativa e vento horizontal e d) divergência e vento horizontal no dia 04 de março de 2016.	116
4.58	Onda de Rossby (linhas vermelhas contínuas) e Onda de Kelvin (linhas azuis contínuas) na Amazônia e anomalias no nível 200 hPa de a) temperatura (°C), b) umidade específica (g/g), c) vorticidade relativa e vento horizontal e d) divergência e vento horizontal no dia 04 de março de 2016.	117
4.59	Variação de intensidade da Onda de Kelvin para o centro de maior passagem da onda nos dias 29/02 (-3) até 06/03 (+3) de 2016 entre 1000 hPa e 100 hPa com as anomalias de a) temperatura (°C), b) umidade específica (g/g), c) vento zonal (m/s), d) vento meridional(m/s), e) vorticidade relativa e f) divergência.	119
4.60	Posição das 5 regiões geográficas escolhidas.	122
4.61	Comportamento das ondas de Rossby no Centro-Norte da Amazônia para os anos de 2010 - 2014.	124
4.62	Comportamento das ondas de Kelvin no Centro-Norte da Amazônia para os anos de 2010 - 2014.	127
4.63	Comportamento das ondas de Rossby no Centro da Amazônia para os anos de 2010 - 2014.	130
4.64	Comportamento das ondas de Kelvin no Centro da Amazônia para os anos de 2010 - 2014.	133

4.65	Comportamento das ondas de Rossby no Centro-Sul da Amazônia para os anos de 2010 - 2014.	136
4.66	Comportamento das ondas de Kelvin no Centro-Sul da Amazônia para os anos de 2010 - 2014.	139
4.67	Comportamento das ondas de Rossby no Oeste-Centro da Amazônia para os anos de 2010 - 2014.	142
4.68	Comportamento das ondas de Kelvin no Oeste-Centro da Amazônia para os anos de 2010 - 2014.	145
4.69	Comportamento das ondas de Rossby no Leste-Centro da Amazônia para os anos de 2010 - 2014.	148
4.70	Comportamento das ondas de Kelvin no Leste-Centro da Amazônia para os anos de 2010 - 2014.	151

LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
2.1 As ondas equatoriais estudadas e suas características correspondentes de período e número de onda.	10
A.1 Posição, distância percorrida em 1 dia, velocidade meridional e intensidade dos núcleos positivos da Onda de Rossby para a fase positiva do Primeiro Evento descrito neste capítulo.	169
A.2 Posição, distância percorrida em 1 dia, velocidade meridional e intensidade dos núcleos positivos da Onda de Rossby para a fase negativa do Primeiro Evento descrito neste capítulo.	169
A.3 Posição, distância percorrida em 1 dia, velocidade meridional e intensidade dos núcleos positivos da Onda de Rossby para a fase positiva do Segundo Evento descrito neste capítulo.	170
A.4 Posição, distância percorrida em 1 dia, velocidade meridional e intensidade do núcleo negativo da Onda de Rossby para a fase negativa do Segundo Evento descrito neste capítulo.	170
A.5 Posição, distância percorrida em 1 dia, velocidade meridional e intensidade do núcleo positivo da Onda de Rossby para a fase positiva do Terceiro Evento descrito neste capítulo.	171
A.6 Posição, distância percorrida em 1 dia, velocidade meridional e intensidade do núcleo negativo da Onda de Rossby para a fase negativa do Terceiro Evento descrito neste capítulo.	171
A.7 Síntese das principais características das anomalias meteorológicas encontradas durante os dias de maior atividade das Ondas de Rossby de fase positiva.	172
A.8 Síntese das principais características das anomalias meteorológicas encontradas durante os dias de maior atividade das Ondas de Rossby de fase negativa.	173
A.9 Posição, distância percorrida em 1 dia, velocidade meridional e intensidade do núcleo positivo da Onda de Kelvin para a fase positiva do Primeiro Evento descrito neste capítulo.	174
A.10 Posição, distância percorrida em 1 dia, velocidade meridional e intensidade do núcleo negativo da Onda de Kelvin para a fase negativa do Primeiro Evento descrito neste capítulo.	174

A.11 Posição, distância percorrida em 1 dia, velocidade meridional e intensidade do núcleo negativo da Onda de Kelvin para a fase negativa do Segundo Evento descrito neste capítulo.	174
A.12 Posição, distância percorrida em 1 dia, velocidade meridional e intensidade do núcleo positivo da Onda de Kelvin para a fase positiva do Segundo Evento descrito neste capítulo.	175
A.13 Posição, distância percorrida em 1 dia, velocidade meridional e intensidade do núcleo negativo da Onda de Kelvin para a fase negativa do Terceiro Evento descrito neste capítulo.	175
A.14 Posição, distância percorrida em 1 dia, velocidade meridional e intensidade do núcleo positivo da Onda de Kelvin para a fase positiva do Terceiro Evento descrito neste capítulo.	175
A.15 Síntese das principais características das anomalias meteorológicas encontradas durante os dias de maior atividade das Ondas de Kelvin de fase positiva.	176
A.16 Síntese das principais características das anomalias meteorológicas encontradas durante os dias de maior atividade das Ondas de Kelvin de fase negativa.	177

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AMS	– American Meteorological Society
CISK	– Conditional Instability of the Second Kind
CPC	– Climate Prediction Center
ECMWF	– European Centre for Medium-Range Weather Forecasts
ERA	– ECMWF Re-Analysis
EOF	– Empirical Orthogonal Functions
IMERG	– Integrated Multi-satellitE Retrievals for GPM
IRD	– Institut de Recherches pour le Développement
GPM	– Global Precipitation Measuremen
MSU	– Microwave Sounding Unit
NASA	– National Aeronautics and Space Administration
NCEP	– National Center for Environmental Prediction
NMC	– National Meteorological Center
NOAA	– National Oceanic and Atmospheric Administration
NWS	– National Weather Service
PSL	– Physical Sciences Laboratory
OMJ	– Oscilação de Madden-Julian
QuikSCAT	– Quick Scatterometer
ROL	– Radiação de Onda Longa
TRMM	– Tropical Rainfall Measuring Mission
TRF	– Transformada Rápida de Fourier
TSM	– Temperatura da Superfície do Mar
WIG	– Westward Inertio-Gravity
WISHE	– Wind-Induced Surface Heat Change
ZCAS	– Zona de Convergência do Atlântico Sul
ZCIT	– Zona de Convergência Intertropical

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Objetivos	3
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1 Ondas equatoriais	5
2.1.1 Ondas de Rossby	6
2.1.2 Ondas de Kelvin	8
2.2 Síntese	10
3 DADOS E METODOLOGIA	13
3.1 Dados	13
3.2 Metodologia	13
4 RESULTADOS	19
4.1 Estrutura horizontal e vertical das Ondas de Rossby	19
4.1.1 Primeiro evento	20
4.1.2 Segundo evento	41
4.1.3 Terceiro evento	63
4.1.4 Síntese e discussão	82
4.2 Estrutura horizontal e vertical das Ondas de Kelvin	84
4.2.1 Primeiro evento	84
4.2.2 Segundo evento	95
4.2.3 Terceiro evento	109
4.2.4 Síntese e discussão	120
4.3 Quantificação das Ondas de Rossby e Kelvin no período de 10 anos . . .	122
4.3.1 Centro-Norte	123
4.3.2 Centro	129
4.3.3 Centro-Sul	135
4.3.4 Oeste-Centro	141
4.3.5 Leste-Centro	147
4.3.6 Síntese e discussão	153
5 CONCLUSÕES	159

5.1 Ondas de Rossby	159
5.2 Ondas de Kelvin	159
5.3 Quantificação das Ondas de Rossby e Kelvin no período de 10 anos . . .	160
5.4 Modelos conceituais	160
5.5 Sugestões para trabalhos futuros	161
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	163
APÊNDICE A - TABELAS	169

1 INTRODUÇÃO

A Floresta Amazônica é localizada na América do Sul e se trata da maior floresta tropical do mundo, cuja maior extensão territorial encontra-se ao sul da Linha do Equador, compreendendo tanto clima equatorial quanto clima tropical (MACHADO et al., 2018). Ela é delimitada ao norte-nordeste pelo Oceano Atlântico e ao sul-oeste pela Cordilheira dos Andes, fatores geográficos que são determinantes para o clima local. Cavalcanti (2016) destacou que a Amazônia não tem grandes gradientes de temperatura e nem sistemas de tempo baroclínicos, mas, apesar destas características, isto não exclui a organização de sistemas convectivos na região.

O regime de precipitação pluviométrica na Amazônia é resultado da atuação de sistemas meteorológicos de diferentes escalas espaciais e temporais (MOLION, 1987) dentre os quais podem ser citados como principais: I) Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), um sistema de escala global definido pela confluência dos ventos alísios em superfície e que atua durante todo o ano provocando chuvas abundantes na região, principalmente nos meses de verão do hemisfério em questão (MOURA; VITORINO, 2012); II) Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), um sistema de larga escala, definida após 4 dias de convergência de umidade orientada do sul da Amazônia ao sudeste ou sul do Brasil e que atua nos meses de verão austral (CARVALHO et al., 2002); em relação aos sistemas de mesoescala tem-se: III) Linhas de Instabilidade tropicais, que possuem escala temporal de vários dias e são responsáveis por chuvas elevadas principalmente entre os meses de abril e agosto (COHEN et al., 1989) e IV) Aglomerados Convectivos associados com a passagem dos sistemas frontais nas regiões sul e sudeste do Brasil (MOLION, 1987); e em menor escala: V) convecção diurna, que apesar de durar poucas horas pode resultar em convecção intensa (ADAMS et al., 2009). A convecção amazônica possui sua importância para o aquecimento atmosférico e por conta disso impacta a determinação do tempo e clima da própria região (FIGUEROA; NOBRE, 1990).

Além destes sistemas, a Oscilação de Madden-Julian (OMJ) e as ondas equatoriais também impactam na dinâmica atmosférica da região. A OMJ em específico é o deslocamento zonal de uma célula convectiva em larga escala que causa variações na convecção tropical na escala intrasazonal (MADDEN; JULIAN, 1971; MADDEN; JULIAN, 1972; MADDEN; JULIAN, 1994). As ondas equatoriais, em especial as ondas Rossby e Kelvin, podem influenciar nos sistemas de tempo da região amazônica, em especial intensificando os sistemas convectivos existentes e contribuindo assim para eventos de precipitação extrema (WANG; FU, 2007; LIEBMANN et al., 2009; SERRA et

al., 2020).

A atmosfera se comporta como um fluido e, sendo assim, muito de seus movimentos ocorrem em forma de distúrbios ondulatórios. De acordo com a definição do glossário da meteorologia da *American Meteorological Society* (AMS), ondas equatoriais são compostas por ondas de gravidade, ondas de Rossby, ondas mistas de Rossby-gravidade e ondas de Kelvin. Possuem um movimento linearizado em modos verticais, centradas no equador, resultando em estruturas meridionais de propagação zonal.

As ondas de gravidade são distúrbios de onda nas quais o empuxo age como uma força restauradora para parcelas de ar deslocadas do equilíbrio hidrostático (balanço entre as forças do gradiente de pressão e da gravidade na vertical). As fontes de geração de ondas de gravidade mais comuns são nuvens de convecção profunda e encostas de montanhas, de acordo com informação da *National Weather Service/National Oceanic and Atmospheric Administration* (NWS/NOAA).

Uma onda de Rossby é um caso de distúrbio barotrópico, onde se conserva a vorticidade absoluta, de acordo com Holton (2004). A velocidade de onda c é dada pela fórmula:

$$c = \bar{u} - \frac{\beta}{K^2}$$

onde β é o parâmetro de Rossby e K^2 o número total de ondas elevado ao quadrado. Essa fórmula é conhecida como fórmula de Rossby ou fórmula da onda planetária. As ondas de Rossby Equatoriais se movem para oeste, tendo como consequência a redução da velocidade do fluxo para leste.

As ondas de Kelvin são ondas onde a força de Coriolis está em equilíbrio com um limite topográfico ou com uma guia de ondas, como é o caso da Linha do Equador. Estas ondas são não-dispersivas, o que resulta na velocidade de fase ser igual à velocidade de grupo para todas as frequências.

A teoria linear das ondas equatoriais utiliza a aproximação do plano beta. Na região equatorial a força de Coriolis f tende a 0, assim, nesta aproximação f varia da seguinte forma:

$$f = \beta * y$$

Onde nesse caso β se torna a variação linear do parâmetro de Coriolis com a latitude (df/dy) e y a distância meridional entre o equator e determinado ponto. Ao assumir o plano beta equatorial, é reconhecido o equilíbrio geostrófico entre a velocidade de leste e o gradiente de pressão norte-sul.

As ondas de Rossby e Kelvin podem impactar nos sistemas de tempo da região Equatorial e Tropical. Porém, os artigos que abordam essa temática tendem a mostrar os impactos que essas ondas têm no continente africano, com quase nenhuma pesquisa focada no continente sul-americano.

1.1 Objetivos

O objetivo principal desta dissertação é estudar a passagem ou formação das Ondas de Kelvin e Ondas de Rossby equatoriais na região equatorial da América do Sul e avaliar os impactos na precipitação em especial na região amazônica.

Para alcançar o objetivo principal, alguns objetivos específicos precisam ser cumpridos:

- a) Quantificar as ondas de Rossby e Kelvin na Amazônia para o período de 10 anos;
- b) Descrever a variabilidade sazonal e interanual das ondas de Rossby e Kelvin;
- c) Analisar a estrutura horizontal e vertical das ondas de Rossby e Kelvin;
- d) Correlacionar o impacto das ondas de Rossby e Kelvin na precipitação, através dos campos de Radiação de Onda Longa.

No Capítulo 2 é apresentada a Revisão Bibliográfica, sem seguida, os Dados e Metodologia são descritos no Capítulo 3, no Capítulo 4 os Resultados e no Capítulo 5 as Conclusões.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Ondas equatoriais

Em 1966, Matsuno realizou um estudo sobre movimentos quase-horizontais na atmosfera, avaliando os tipos de ondas atmosféricas existentes na região equatorial. Para tanto, ele utilizou o sistema de equações da água rasa em um plano beta equatorial. Como resultados das análises matemáticas obteve que na região equatorial existem pelo menos dois tipos de movimento de onda: uma é do tipo gravidade-inercial e a outra de Rossby, que se distinguem uma da outra pela diferença de frequência, sendo que a frequência das ondas de gravidade-inercial é muito maior que as de Rossby. Entretanto, segundo Matsuno (1966), perto do equador não fica muito clara a distinção entre as ondas de Rossby e as de gravidade-inercial. No experimento dele, centros de alta e baixa pressão alternadamente surgem no Equador com regiões de fontes e sumidouros de massa. Uma forte corrente de leste para oeste surge na região, de fonte para sumidouro de massa. O autor também sugere que pela primeira vez que a Linha do Equador atua como uma guia de ondas para manutenção dos distúrbios atmosféricos e oceânicos na região equatorial.

Yanai e Maruyama (1966) e Maruyama e Yanai (1967) exploraram as características das ondas equatoriais no Oceano Pacífico na baixa estratosfera. No primeiro estudo, foram identificadas mudanças na direção do vento em períodos de 5 dias, propagação do vento para níveis mais baixos com velocidade de 1 km/dia e propagação para leste com velocidade de 2.000 km/dia. No segundo, encontraram um padrão de alternância entre ventos de norte e de sul para duas estações meteorológicas, uma ao norte do equador e outra ao sul.

Wallace e Kousky (1968), utilizando seis meses de dados de três estações de radiossondagens localizadas em regiões tropicais, os autores identificaram flutuações no vento zonal em um período de 15 dias com amplitudes na ordem de 8 - 12 m/s e variações de temperatura entre 3 - 5 °C, sem variações no vento meridional. Além disso, havia movimento ascendente de momentum de oeste, assim possuindo características o bastante para qualificar este padrão como Ondas de Kelvin. Este foi o primeiro estudo a identificar Ondas de Kelvin na atmosfera.

Com base no fato de que a maior parte do aquecimento superficial na região tropical ocorre sobre os continentes, discutido por Ramage (1968), Gill (1980) incluiu uma fonte de calor sob a Indonésia em um modelo simples e analítico (o mesmo utilizado por Matsuno em 1966), com o objetivo de elucidar, de maneira simples, a resposta

da atmosfera tropical ao aquecimento diabático. Por meio de sua fonte de calor sob a Indonésia, os autores encontraram um fluxo de ventos em baixos níveis para leste com a propagação de ondas de Kelvin para o Oceano Pacífico e de oeste para o Oceano Índico por meio de ondas planetárias (Rossby) com 1/3 da velocidade das ondas de Kelvin.

Os satélites meteorológicos são uma das principais ferramentas nos estudos de identificação da atividade das ondas atmosféricas. Por exemplo, no trabalho de Wallace e Chang (1972), ao analisar subjetivamente a temperatura de brilho média entre 5 N e 5 S para o globo inteiro, no trimestre junho-julho-agosto de 1967 e 1970, puderam identificar a propagação de ondas de Rossby para oeste e de ondas de Kelvin para leste, ambas com velocidade de fase entre 5° e 10° de longitude por dia. Zangvil (1975) observaram a nebulosidade tropical no verão de 1967 e inverno de 1968, encontrando distúrbios ondulatórios para leste na região equatorial do Oceano Índico e distúrbios para oeste em ambos os trópicos com maior intensidade no Hemisfério Norte durante o verão deste hemisfério.

Mais tarde, com Nakazawa (1986) e Nakazawa (1988), foram observados "*super clusters*" de células convectivas em escala sinótica fazendo parte da convecção associada à OMJ, surgindo sempre à leste da convecção pré-existente e se movendo mais rapidamente do que esta. Os *super clusters* encontrados nas pesquisas de Nakazawa tinham escala horizontal entre 3.300 e 6.600 km, escala de tempo de até 10 dias e velocidade de propagação entre 15 e 20 m/s para leste sobre o Oceano Pacífico.

Takayabu (1994) elaborou uma análise espectral espaço-temporal com o uso de dados de infravermelho provenientes de satélites geoestacionários. Este autor detectou picos espectrais que correspondem às ondas de Kelvin, Rossy, ondas mistas de Rossby-gravidade e ondas de gravidade-inerciais de propagação para oeste (Westward Inertio-Gravity; WIG).

2.1.1 Ondas de Rossby

Na pesquisa de Kiladis e Wheeler (1995) foram analisadas a presença das ondas de Rossby equatoriais usando 8 anos de análises numéricas feitas pela *National Meteorological Center* (NMC) e dados de Radiação de Onda Longa (ROL) provenientes da NOAA. As ondas que se propagam para oeste possuem circulações simétricas dos dois lados do equador e dispersão de energia para leste, com perturbações máximas do vento zonal ao longo do equador e vento meridional máximo ocorrendo entre 10° e 15° do equador. É notado nesta pesquisa a presença de características de ondas

aprisionadas no equador ($n = 1$) similares à de Matsuno (1966). Numaguti (1995) mostrou evidências de que cavados de geopotencial em altos níveis da atmosfera que se estendem de latitudes médias para os trópicos podem gerar ondas de Rossby equatoriais.

Wang e Xie (1996) encontraram que forte cisalhamento de leste, como encontrado em "piscinas quentes", favorecem estruturas baroclínicas na baixa troposfera intensificando ondas de Rossby e ondas mistas de Rossby-gravidade. Enquanto isso, o cisalhamento do vento de oeste favorece o aprisionamento das ondas de Rossby na alta troposfera. Este efeito é muito menos pronunciado para as ondas de Kelvin.

Com o objetivo de determinar onde, quando e como as ondas afetam o tempo na região tropical, uma climatologia foi feita por Roundy e Frank (2004). Utilizando o mesmo método de filtragem de Wheeler e Kiladis (1999), para o período de 10 anos, puderam identificar que as ondas de Rossby e a OMJ são responsáveis pela variância de 15% da OLR na região tropical.

Kiladis et al. (2009) avaliaram a atividade das ondas equatoriais ao redor do globo. Para o caso das ondas de Rossby equatoriais, a sua atuação se mostrou mais marcante para o incremento da convecção sobre a região da monção asiática, monção da Austrália-Indonésia e Oceano Índico.

Em um estudo detalhado sobre a atuação das ondas de Rossby equatoriais no oeste da África, Janicot et al. (2010) encontraram dois tipos distintos de ondas. O primeiro atua na escala de 30 a 100 dias e modula a precipitação oeste e central da África. O segundo tipo atua na escala de 10 a 30 dias e também afeta a região do Sahel (aproximadamente entre 10° e 15° N). Este segundo tipo apresentou leve inclinação meridional em direção ao polo, sugerindo um link com a circulação extratropical.

Matthews (2004) sugeriu que haveria uma ligação entre a fase da OMJ no Oceano Índico com a convecção sobre o continente africano. Essa ligação se dá de maneira indireta, por meio da geração de ondas propagantes para oeste (ondas de Rossby) geradas pela própria OMJ. Os efeitos das ondas de Rossby sobre a África foram o surgimento de pares de ciclones em superfície nas latitudes de 10° N e 10° S, movimentos ascendentes e o esfriamento da média troposfera para a África central e leste nessas latitudes. Estas ondas se propagam com 19 m/s de velocidade para oeste. Os autores não identificaram características das ondas de Rossby em altos níveis, afirmando que efeitos não-lineares puderam mascarar estas ondas. Além da OMJ, os gradientes anômalos de TSM entre Oceanos Índico e Pacífico forçam o

surgimento de convecção profunda na região equatorial e por consequência gera ondas de Rossby que se propagam para o continente africano. Evidências destes efeitos foram encontradas posteriormente em Janicot et al. (2011).

2.1.2 Ondas de Kelvin

Os estudos de Takayabu (1994), Wheeler e Kiladis (1999) e Wheeler et al. (2000) evidenciaram vários modos de ondas tropicais fortemente associadas com convecção profunda. Eles encontraram que as ondas de Kelvin se acoplam à convecção e isso representa a maior parte da variância de ROL para a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), o que é mais do que qualquer outra onda tropical originada na América do Sul, Atlântico e África.

Serra e Jr (2002) e Straub e Kiladis (2002) observaram, em um estudo de caso, que a propagação para leste das ondas de Kelvin exerce forte controle na convecção e precipitação na parte leste da ZCIT do Pacífico. Essas ondas têm maior intensidade (DUNKERTON; CRUM, 1995) e possuem maior variabilidade (ROUNDY; FRANK, 2004) na primavera boreal.

A estrutura horizontal e vertical de uma onda de Kelvin convectivamente acoplada foi estudada por Straub e Kiladis (2003). Neste estudo, comparou-se a onda de Kelvin com três modelos de instabilidade de onda: I) instabilidade condicional de segundo tipo (Conditional Instability of the Second Kind; CISK); II) troca de calor com a superfície induzida pelo vento (Wind-Induced Surface Heat Change; WISHE) e III) instabilidade estratiforme. Os autores indicaram que características de ondas de Kelvin puderam ser vistas em todos os três modelos de instabilidade, porém, as teorias de CISK e instabilidade estratiforme conseguiram prever mais características importantes para as ondas de Kelvin do que o de instabilidade estratiforme. Vale ressaltar que esses modelos de instabilidade não foram criados para explicar as ondas de Kelvin, mas sim formuladas para explicar os mecanismos fundamentais da dinâmica de instabilidade convectivo-dinâmica.

Utilizando dados diários de ROL obtidos de reanálises e estimativas de precipitação por satélites *Tropical Rainfores Measuring Mission* (TRMM) e *Quick Scatterometer* (QuikSCAT) e aplicando análises de Funções Ortogonais Empíricas (EOF, sigla em inglês) e regressões lineares, Wang e Fu (2007) detectaram que a convecção profunda, originada na Amazônia Equatorial, pode modular a convecção e precipitação na ZCIT do Atlântico. Também mostraram que as ondas de Kelvin são a ponte para entender a interação entre convecção da América do Sul, ZCIT e África durante a

primavera boreal.

Ao estudar as ondas de leste sobre a África Tropical Norte, [Mekonnen et al. \(2006\)](#) encontraram características de ondas que se propagavam de oeste para leste, impactando a convecção principalmente da África Central e Leste. Neste artigo, que utiliza dados de temperatura de brilho obtidas por satélites ambientais e 40 anos de reanálises do modelo do *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF), são examinadas a interação destas propagações com as ondas de leste africanas. [Mekonnen et al. \(2008\)](#) expande a área do estudo anterior, utilizando o mesmo método de análise espectral de [Wheeler e Kiladis \(1999\)](#) e focando nestas ondas que se deslocam de oeste para leste, contendo os mesmos dados do trabalho anterior, porém adiciona os dados de Temperatura da Superfície do Mar (TSM), precipitação registrada por oito estações meteorológicas e precipitação estimada pelo *Climate Prediction Center (CPC) Merged Analysis Project* (CMPA), que compila dados de pluviômetros, estimativas de satélite e previsões de modelos numéricos. Os resultados mostraram que as ondas de Kelvin se propagam mais rápido sobre os Oceanos Pacífico e Atlântico (25 m/s) e mais devagar na África (14 m/s), além disso a escala zonal das ondas diminui sobre o continente. Os autores também puderam identificar que os anos com valores mais elevados de TSMs, na região do Oceano Pacífico leste, são anos de maior atividade das ondas de Kelvin e anos mais secos sobre a África, enquanto anos de menor atividade se relaciona aos anos mais úmidos.

A passagem das ondas de Kelvin está associada a locais de favorecimento à convecção e inibição da convecção, alternadamente. [Ventrice et al. \(2012\)](#) discutiu o papel de uma onda de Kelvin na formação do ciclone tropical Debby por meio de reanálises do modelo ECMWF. Neste caso, o aviso quanto à formação do Debby foi emitido apenas 3 horas antes da sua gênese, pois aparentemente não se tinha condições para formação de ciclone tropical. O fator determinante para a formação do furacão Debby foi a interação entre uma onda de Kelvin no Oceano Atlântico e uma onda de leste (fraca) proveniente da África tropical. Dessa forma, os autores recomendam que uma análise das ondas de Kelvin seja feita diariamente para a previsão do tempo, visto seu possível impacto na formação de eventos extremos de precipitação.

[Ventrice e Thorncroft \(2013\)](#) se basearam numa das hipóteses geradas por [Mekonnen et al. \(2008\)](#) de que as ondas de Kelvin podem funcionar como gatilhos para ondas de leste. Portanto, este estudo deu mais detalhes na forma em que as ondas de Kelvin afetam a gênese e o crescimento das ondas de leste. Os resultados comprovaram que a passagem da fase convectivamente ativa das ondas de Kelvin criam um ambiente

convectivo e dinâmico favorável à intensificação das ondas de leste. Além disso, encontraram que a atividade das ondas de Kelvin impacta os sistemas de tempo durante o verão boreal e não apenas na primavera, como se acreditava anteriormente.

Um dos únicos trabalhos a abordar a questão das ondas de Kelvin convectivamente acopladas sobre o continente sul americano foi o de Liebmann et al. (2009). Utilizando um conjunto de dados filtrados de reanálise, satélite e precipitação, encontraram dois tipos de ondas de Kelvin: aquelas vindas do Oceano Pacífico e se propagam para o continente e aquelas que se originam sobre a Amazônia. Os casos originados no Pacífico estão associados com distúrbios em altos níveis que se propagam ao longo da linha do equador. Os eventos originados sobre a América do Sul surgem de "trens" de onda em escala sinótica que passam pelo continente de maneira muito similar às "cold surges" que foram documentadas por Garreaud e Wallace (1998). Casos de anomalias convectivas sobre a América do Sul equatorial, aparentemente sem precursores sobre o Pacífico e a América do Sul, foram identificados, com propagação para o Oceano Atlântico em forma de onda de Kelvin.

2.2 Síntese

Como visto ao longo desta revisão, as ondas equatoriais afetam sistemas meteorológicos em diversas escalas de tempo. De acordo com Schlueter et al. (2019), as ondas de Rossby e Kelvin explicam boa parte da variabilidade da precipitação ao norte da África, junto com as ondas de leste e a OMJ. As principais características de propagação destas ondas estão na Tabela 2.1.

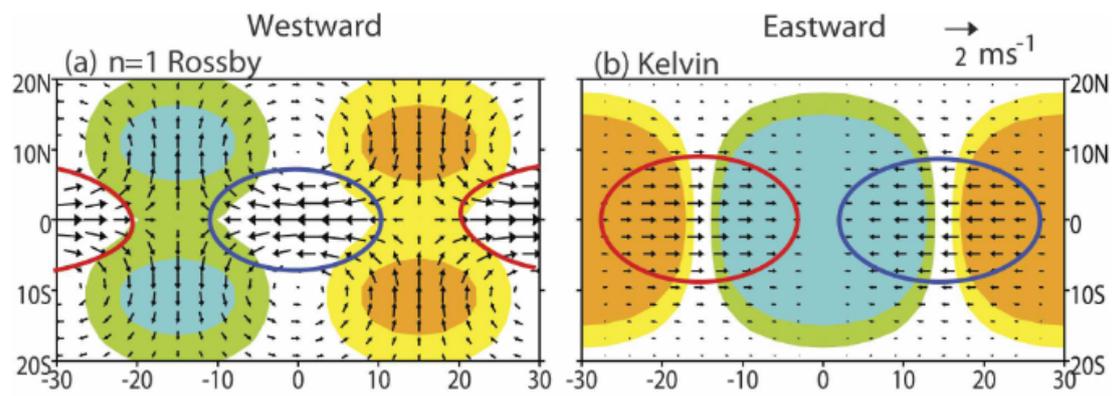
Tabela 2.1 - As ondas equatoriais estudadas e suas características correspondentes de período e número de onda.

Tipo de Onda	Propagação	Período (dias)	Número de Ondas	Referência
Rossby	Para Oeste	9 - 72	1 - 10	Kiladis et al. (2009)
Kelvin	Para Leste	2.5 - 20	1 - 14	Straub e Kiladis (2002)

Fonte: Adaptada de Schlueter et al. (2019).

A estrutura horizontal dos principais modos de ondas equatoriais foi descrito em Yang et al. (2007), com base no modelo de água rasa de Matsuno (1966), como vistos na Figura 2.1.

Figura 2.1 - Estruturas teóricas para as ondas a) Rossby e b) Kelvin.



Fonte: Adaptado de Yang et al. (2007).

3 DADOS E METODOLOGIA

3.1 Dados

Esta dissertação se baseia nos métodos aplicados em [Mekonnen et al. \(2008\)](#), que por sua vez foi adaptado de [Wheeler e Kiladis \(1999\)](#). A mesma metodologia também foi usada em trabalhos como [Wheeler et al. \(2000\)](#) e [Straub e Kiladis \(2002\)](#).

Para alcançar os objetivos propostos, diversas fontes de dados serão utilizadas. De forma a se avaliar a característica da convecção associada às ondas equatoriais, alguns estudos, como o de [Mekonnen et al. \(2008\)](#), utilizaram dados de temperatura de brilho médio provenientes de dados de satélites. Outros, como o de [Wheeler e Kiladis \(1999\)](#), utilizaram dados de ROL dos satélites de órbita polar da NOAA). Nesta dissertação, escolheu-se utilizar dados de ROL interpolados pela NOAA (obtido pelo endereço online: <https://psl.noaa.gov/data/gridded/data.interpOLR.html>). Esta variável está disponível como médias diárias e médias mensais desde junho de 1974 à dezembro de 2020. A grade horizontal é de 2.5° lat x 2.5° lon e cobre todo o globo. A escolha desta variável se dá por ela ser representativa de convecção tropical ([ARKIN; ARDANUY, 1989](#); [WHEELER; KILADIS, 1999](#); [ROUNDY; JANIGA, 2012](#)).

Para análise dos campos das variáveis meteorológicas, foi utilizadas a reanálise ERA-Interim elaborada pelo ECMWF, a mesma utilizada por [Mekonnen et al. \(2008\)](#) para calcular os campos dinâmicos e cinéticos associados às ondas de Kelvin. Para análise dos campos das variáveis meteorológicas, foi utilizado como fonte de dados a reanálise ERA-Interim elaborada pelo ECMWF, a mesma utilizada por [Mekonnen et al. \(2008\)](#) para calcular os campos dinâmicos e cinéticos associados às ondas de Kelvin.

Esta reanálise está disponível de 1950 até o tempo presente, resolução temporal de 1 hora, resolução horizontal de 31 km, até 137 níveis na vertical e 240 parâmetros. Para maior convergência de dados e facilidade computacional foi utilizado uma grade de inferior resolução espacial: 2.5° lat x 2.5° lon assim como para os dados de ROL.

3.2 Metodologia

O principal método utilizado nesses estudos é a análise espectral no espaço-tempo. Essa técnica é útil para se estudar ondas que se propagam zonalmente, decompondo o campo de dados (neste estudo, ROL) dependente de tempo e longitude para ondas que se propagam para leste ou para oeste. A filtragem espectral será feita nos dados de ROL por meio da Transformada Rápida de Fourier (TRF) aplicadas na

longitude e posteriormente no tempo, adquirindo assim o espectro "número de onda - frequência" para o período desejado. Como o objetivo deste estudo é investigar os fenômenos ondulatórios desde a escala sinótica até a intrasazonal, os dados serão filtrados em segmentos de até 96 dias. Para cada segmento a média e a tendência linear serão removidas e as extremidades da série serão reduzidas a zero. A filtragem será feita através de programação em python.

A TRF é alcançada através da Transformada Discreta de Fourier (TDF). A partir de N número de amostras igualmente espaçadas no intervalo de amostragem T , um algoritmo de TRF permite calcular $N/2$ componentes do espectro contido no intervalo entre $0 \leq \omega \leq \pi/T$ com ω sendo a resolução em frequência de onda e $\pi/T = \omega_{max}$.

Sendo:

$$\Delta\omega = \frac{\omega_{max}}{N/2} \quad (3.1)$$

portanto:

$$\Delta\omega = \frac{2\pi}{N * T} \quad (3.2)$$

A frequência de harmônicas h corresponde a: $\omega h k = \frac{2\pi h}{N * T}$ com $h = 0, 1, 2, \dots, N - 1$.

Considerando a transformada de Fourier de sinal $x(t)$ como sendo:

$$F(\omega) = X(\omega) = x_0 + x_1 * e^{-j\omega T} + x_2 * e^{-j2\omega T} + \dots + x_{N-1} * e^{-j(N-1)\omega T} \quad (3.3)$$

a harmônica h pode ser representada por:

$$x_h(n) = x_0 + x_1 * e^{-j\frac{2\pi h}{N}} + x_2 * e^{-j2\frac{2\pi h}{N}} + \dots + x_{(N-1)} * e^{-j(N-1)\frac{2\pi h}{N}} = \sum_{n=1}^{N-1} x_h(n) * e^{-j\frac{2\pi h n}{N}} \quad (3.4)$$

com $h = 0, 1, 2, \dots, N - 1$

n indica o contador de amostras temporais de sinal $x_h(n)$ e h indica a ordem harmônica. A partir de $h = N/2$ o espectro se espelha.

Para obter a TDF de sinal amostrado é necessário variar os valores de n e h . Define-se o operador complexo de rotação que aparece nas N amostras:

$$W_N = e^{-j\frac{2\pi}{N}} = \cos\left(\frac{2\pi}{N}\right) - j\sin\left(\frac{2\pi}{N}\right) \quad (3.5)$$

Quanto maior o valor de N , menor é o deslocamento W_N .

Usando uma notação compacta, a TDF nas N amostras se torna:

$$X_h(n) = \sum_{n=0}^{N-1} x_h(n) * W_N^{nh} \quad (3.6)$$

com $h = 0, 1, 2, \dots, N - 1$

Para elaborar o algoritmo em TRF deve-se quebrar a amostra em conjuntos de pares e ímpares. Estes conjuntos são transformados e subdivididos até chegar à operação entre duas amostras. Essa decomposição requer que N seja potência inteira de 2, ou seja, um número par.

Já que N precisa ser um número par, é possível expressar TRF separando X_n em duas sequências de $N/2$:

$$X(h) = \sum_{n=par}^{N-1} X_n * W_N^{nh} + \sum_{n=impar}^{N-1} X_n * W_N^{nh} \quad (3.7)$$

com $h = 0, 1, 2, \dots, N - 1$

De forma a explicitar os contadores "pares" e "ímpares" pode-se usar um novo contador "r" definido da forma que $r = 0, 1, 2, 3, \dots, (N/2 - 1)$, com $n = 2r$ para n par e $n = 2r + 1$ para n ímpar.

$$X(h) = \sum_{r=0}^{\frac{N}{2}-1} X_{2r} * W_N^{2rh} + \sum_{r=0}^{\frac{N}{2}-1} X_{2r+1} * W_N^{(2r+1)h} \quad (3.8)$$

Existe uma redundância nos operadores, o que leva à conclusão que cada somatório

cria uma TDF de $N/2$ amostras como visto em:

$$X(h) = \sum_{r=0}^{\frac{N}{2}-1} X_{2r} * W_{N/2}^{rh} + W_N^h \sum_{r=0}^{\frac{N}{2}-1} X_{2r+1} * W_{N/2}^{rh} \quad (3.9)$$

com $h = 0, 1, 2, \dots, N - 1$

onde o primeiro termo é uma TDF par e o segundo uma TDF ímpar.

Assim, as equações correspondentes para o conjunto par e ímpar (respectivamente) são a seguinte generalização:

$$X_{m+1}^h(p) = X_m^h(p) + W_N^h * X_m^h(q) \quad (3.10)$$

$$X_{m+1}^h(p) = X_m^h(p) - W_N^h * X_m^h(q) \quad (3.11)$$

Nesse estudo, foi escolhida a banda de largura 1/96 ciclos por dia (cpd) em frequência para então identificar quais os principais domínios de comprimento de onda estão presentes em todo o espectro. Aqui, escolhe-se utilizar os valores da Tabela 2.1 no capítulo anterior, entre 9 - 72 para Rossby e 2.5 - 20 para Kelvin. O grau de liberdade para Rossby e Kelvin são respectivamente 1300 e 4700.

Dessa forma, os resultados encontrados em frequência de onda mostram o quão intenso é o sinal das ondas de Rossby e Kelvin em cada ponto de latitude e longitude variando no tempo. Assim, valores próximos à 0 indicam ausência do sinal destas ondas, enquanto valores gradativamente mais intensos positivos e negativos estão associados ao fortalecimento do sinal, indicativo de ondas mais desenvolvidas.

Para melhor acompanhamento e definição das ondas de Rossby e Kelvin, é necessário relacioná-las com variáveis meteorológicas associadas à estes fenômenos. Dessa forma, será utilizado a reanálise ERA-5, conforme detalhada na subseção 3.1 - Dados. As variáveis escolhidas foram: temperatura, umidade específica, direção e intensidade do vento horizontal, divergência do vento e vorticidade relativa, todas essas variáveis indo da superfície (1000 hPa) até a alta troposfera (100 hPa).

Devido que as Ondas de Rossby se deslocam de leste para oeste, sua entrada sobre o continente sul-americano se dá por meio do Oceano Atlântico adjacente, teoriza-se

que o Modo Meridional do Atlântico (MMA) possa influenciar na geração e propagação das ondas de Rossby, visto que elas estão associadas com valores anômalos de ROL.

O MMA é caracterizado pelo gradiente interhemisférico de TSM e ventos em superfície, podendo influenciar no posicionamento da ZCIT (Nobre e Shukla, 1996). Além disso, trabalho recente de Quispe (2004) pôde mostrar, por meio de um estudo numérico, que o principal aspecto que desencadeou um período extremamente seco na Amazônia (entre 2004 e 2005) foram as anomalias positivas da TSM do Atlântico muito distantes da costa norte do Brasil. A TSM também foi fundamental para o aumento da precipitação no período extremamente chuvoso analisado neste trabalho (entre 2008 e 2009), porém com um grau de importância menor. Seguindo o método de Chiang and Vimont (2004), o MMA é calculado pela análise de covariância máxima das anomalias nas TSMs e vento horizontal sobre o Atlântico tropical (30 S - 30 N). Esta dissertação utiliza os valores calculados pelo Physical Sciences Laboratory (PSL) da NOAA com base nos dados mensais de temperatura da superfície do mar (TSM)

Diferente das ondas de Rossby, que se deslocam vindo de leste pelo Oceano Atlântico, as ondas de Kelvin se propagam de oeste para leste, atravessando a região equatorial do Oceano Pacífico antes de adentrar o continente sul-americano. Assim, teoriza-se que o fenômeno El Niño Oscilação Sul (ENOS) possa impactar a geração de ondas de Kelvin que se propaguem para a Amazônia e na intensidade das ondas originárias sobre o continente, que atingem intensidade máxima após sair do continente. Para determinação de quais anos foram neutros ou estiveram com El Niño ou La Niña ativos, utilizou-se determinação do Climate Prediction Center (CPC) da NOAA.

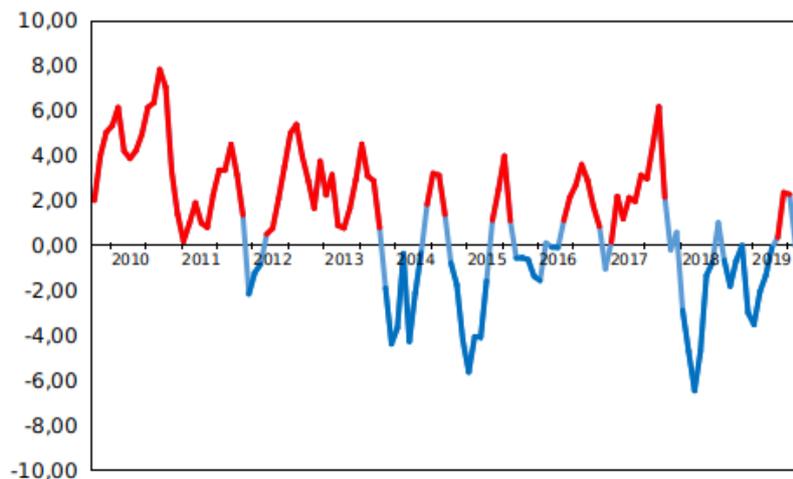
4 RESULTADOS

Como forma de descrever a estrutura das ondas de Rossby e Kelvin que adentram a América do Sul e influenciam nos sistemas de tempo da Amazônia, é necessário analisar casos distintos em busca de características semelhantes. Dessa forma, selecionou-se 3 eventos de Ondas de Rossby e 3 eventos de Ondas de Kelvin, destacando as ondas de Rossby/Kelvin com maiores amplitudes e, portanto, potencialmente mais impactantes.

4.1 Estrutura horizontal e vertical das Ondas de Rossby

Como, de maneira geral, as Onda de Rossby podem ser intensas em qualquer estação do ano (algo que será mais explorado no item 4.3), escolheu-se o outono para definição das características associadas com a passagem destas ondas pelas maiores variabilidades no índice MMA ocorrerem nesta estação do ano. Esta relação das ondas de Rossby com a fase do MMA será mais explorada nos itens seguintes. A Figura 4.1 mostra a variação do índice do MMA para a década 2010 - 2019, calculado pelo PSL.

Figura 4.1 - Variação mensal do índice do MMA para a década 2010 – 2019. As linhas vermelhas indicam valores positivos em meses cuja temperatura do Atlântico Norte é anormalmente maior, enquanto as linhas azuis são valores negativos em meses com a temperatura do Atlântico Norte anormalmente menor.



Assim, 3 anos foram selecionados para se observar características das ondas de Rossby que adentram a Amazônia. O ano de 2010, por apresentar índice de MMA positivo antes e durante o outono, 2015 por conter índice de MMA negativo antes e

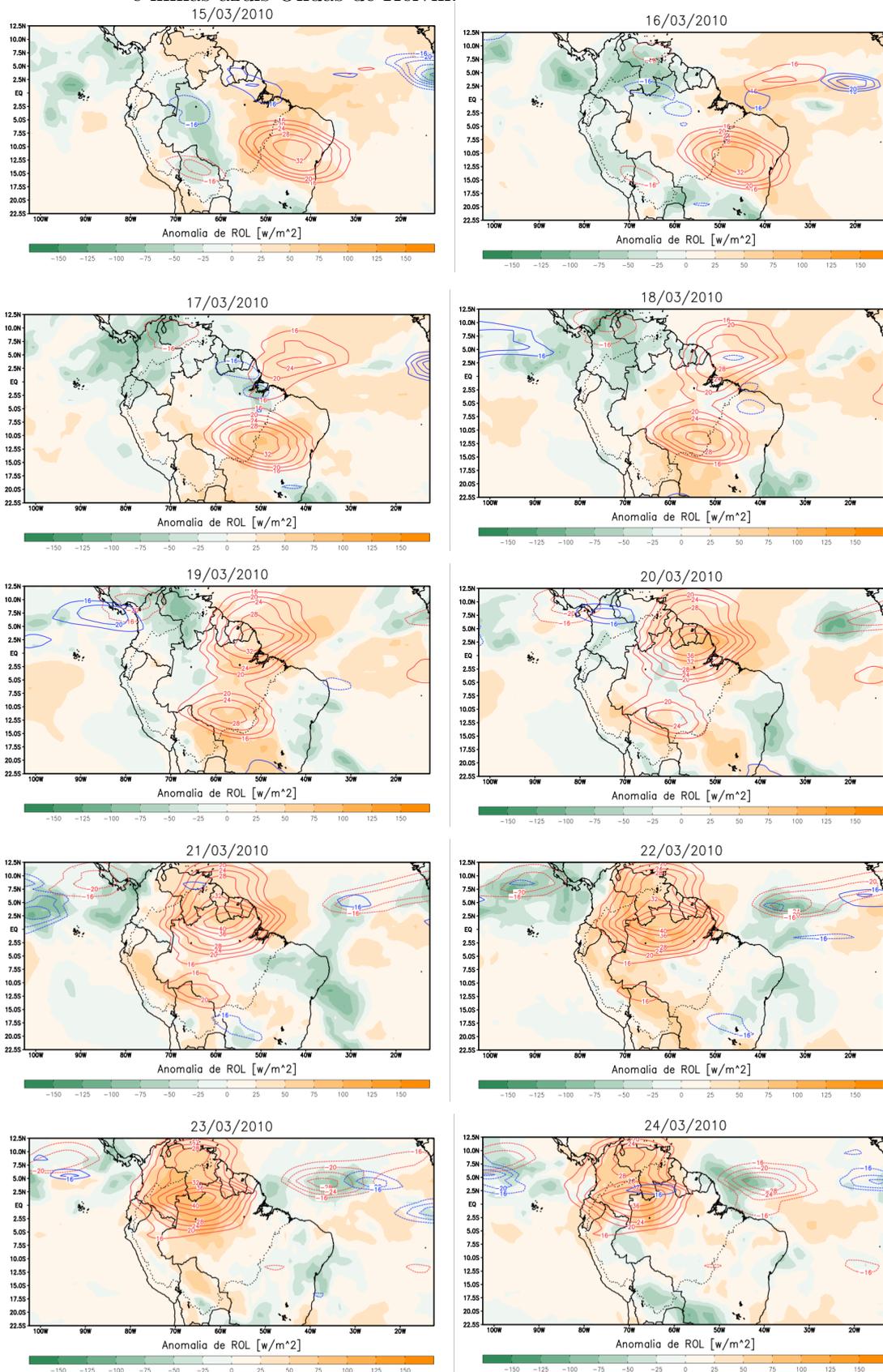
durante o outono e 2017 pelos valores próximos à neutralidade durante o outono.

4.1.1 Primeiro evento

Na Figura 4.2 e na Tabela A.1 (Apêndice A) destaca-se o avanço de uma onda de Rossby com fase positiva entre os dias 15 e 24 de março de 2010. No dia 15, esta onda se encontra com centro de 32 W/m^2 em aproximadamente 10 S e 42 W associado com anomalias positivas de ROL no nordeste brasileiro e leste da Amazônia. No dia 16, o centro desta onda desloca 4° de longitude para oeste e adentra ainda mais na Amazônia. À nordeste do continente, sobre o oceano em torno de 4 N e 36 W , um outro centro da onda de Rossby positiva surge com 18 W/m^2 (será chamado de Centro ao Norte daqui em diante). Entre o dia 16 e dia 17, o centro positivo localizado na América do Sul (o qual será chamado de Centro ao Sul daqui em diante) se desloca cerca de 4° para oeste, porém o centro ao norte se desloca mais rápido, cerca de 6° para oeste e 1° para sul, além de intensificar seu centro. As anomalias positivas de ROL para este dia se localizam principalmente na porção sul e sudeste da Amazônia. No dia 18 nota-se o avanço de 2° para oeste no Centro ao Sul e novamente de 6° no Centro ao Norte, com aumento de intensidade e um deslocamento de 1° para sul deste último centro. Neste dia são notadas anomalias positivas de ROL de maneira generalizada pela Amazônia, exceto na porção noroeste, mostrando que houve uma redução da precipitação nesse setor devido a atuação da fase positiva dessa onda. No dia 19, o centro da onda de Rossby mais ao sul se desloca cerca de 4° para oeste, 1° para sul e perde intensidade. Já o centro ao norte se desloca 2° para oeste, se torna mais intenso e adentra a Amazônia pelo estado do Amapá. As anomalias positivas de ROL se encontram na porção leste e sul da Amazônia, indicando precipitação abaixo da média nessa região. No dia 20, ambos os centros se deslocam 4° para oeste, sendo que o centro ao sul perde intensidade, enquanto ao norte a intensidade continua aumentando. As anomalias positivas de ROL se localizam nas porções sul e norte da Amazônia. No dia seguinte, o Centro ao Sul se desloca mais 4° para oeste e perde mais intensidade. O Centro ao Norte também possui um deslocamento de 4° para oeste e um aumento de intensidade para 40 W/m^2 , maior valor encontrado para o outono de 2010. Anomalias de ROL positivas são encontradas de maneira generalizada na Amazônia, exceto para a porção extremo leste. À nordeste, sobre o Oceano Atlântico Norte, pode-se observar a aproximação da fase negativa da Onda de Rossby, cujo centro se localiza em 5 N e 30 W com intensidade de -20 W/m^2 . No dia 22, o centro ao sul da Amazônia percorre mais 4° para oeste, e aproximadamente 1° para sul, além de perder ainda mais intensidade. Ao norte, o centro da onda de Rossby positiva se desloca 4° para oeste e mantém a intensidade máxima de 40

W/m^2 , porém as anomalias positivas de ROL se intensificam de forma generalizada sobre a Amazônia. A fase negativa dessa onda desloca 2° para oeste e aumenta sua intensidade para $-24 W/m^2$. No dia 23, o centro da onda de Rossby positiva ao sul desaparece conforme se aproxima de $0 W/m^2$, porém anomalias positivas de ROL ao sul da Amazônia ainda surgem. Ao norte, um deslocamento do centro de 4° , intensidade mantida e anomalias positivas de ROL no norte/noroeste da Amazônia. A fase negativa da onda se desloca 4° para oeste e cerca de 1° para o sul, continuando a se intensificar. No último dia desta série, o centro restante da fase positiva continuar a se deslocar 4° para oeste, chegando no limite ocidental da Amazônia. A intensidade do núcleo começa a cair e as anomalias negativas de ROL passam a surgir ao sul da Amazônia e à nordeste da região de estudo, no oceano Atlântico, associada com a fase negativa da onda que entrará na Amazônia nos dias seguintes. O núcleo da fase negativa se mantém sem alterações significativas desde o dia anterior, porém tem um deslocamento de 4° para oeste.

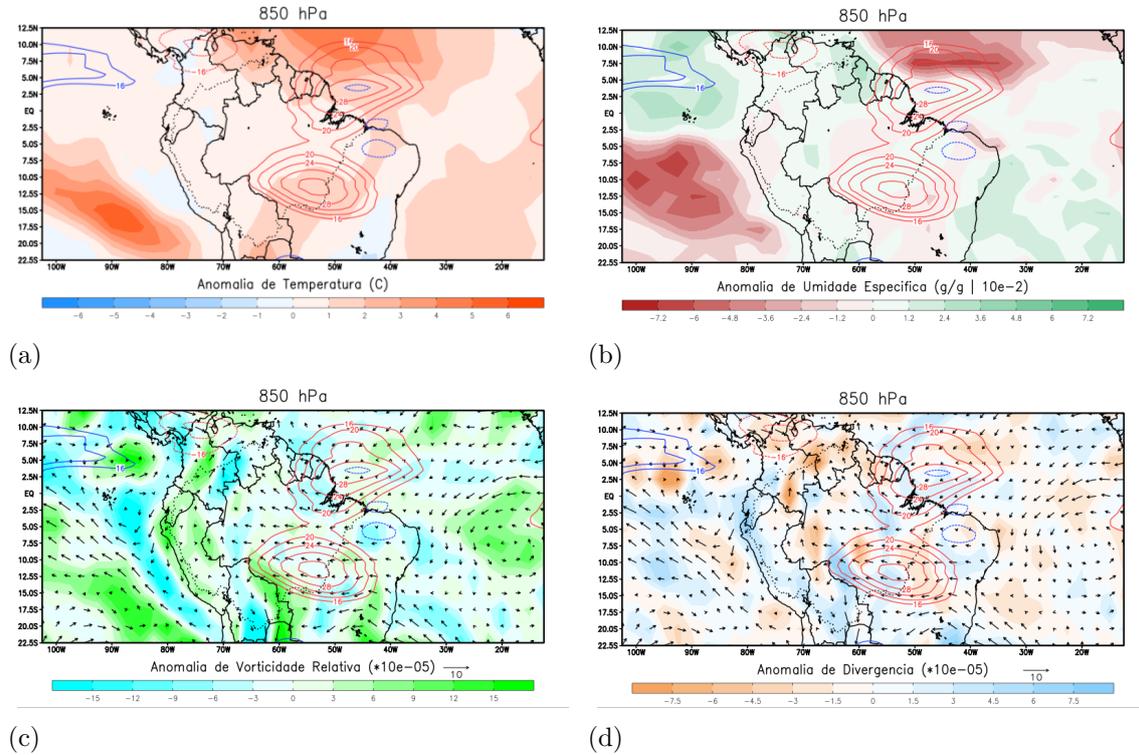
Figura 4.2 - Passagem de uma Onda de Rossby com fase positiva pela Amazônia no outono de 2010 entre os dias 15/03 e 24/03. Linhas vermelhas são Ondas de Rossby e linhas azuis Ondas de Kelvin.



Dentre os 10 dias analisados, o dia 18/03 se aproxima mais do modelo conceitual discutido em trabalhos como [Yang et al. \(2007\)](#): dois vórtices de mesma intensidade, em igual distância do Equador, centrados nas mesmas longitudes e se deslocando com mesma velocidade para oeste. Apesar de se deslocarem para oeste, neste evento selecionado, eles não possuem a mesma distância da Linha do Equador, podendo ser uma consequência da maior fonte de calor latente no oceano estar localizada no HN. Assim, um núcleo esteve em aproximadamente em 10 S e o outro a 2 N, distância de 12° entre os núcleos. A velocidade de deslocamento para oeste não é a mesma para todos os dias, podendo ser 2° ou 4° de longitude por dia, e nem sempre é a mesma para os dois núcleos. A longitude destes centros não é a mesma, estando eles separados por 4° ou 6° de longitude, com o núcleo ao sul localizado mais à oeste. À partir do dia 20, a fase negativa desta onda de Rossby surge cerca de 30° à oeste do centro positivo, o que está de acordo com o modelo conceitual de [Yang et al. \(2007\)](#), porém, não mostra a presença da sua contraparte mais ao sul, onde o oceano está mais resfriado. Ainda assim, por meio deste dia, pode-se explorar algumas características associadas com as ondas de Rossby propagantes para a Amazônia.

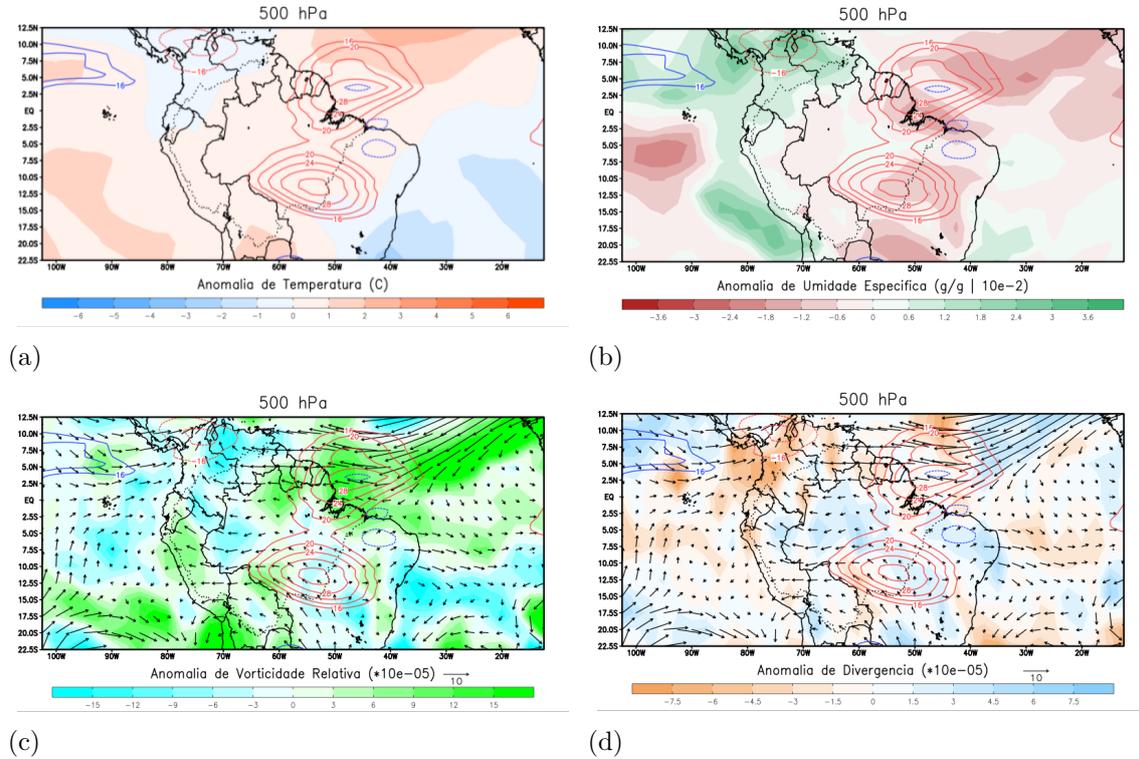
Na Figura 4.3, para o dia 18 de março de 2010, são visíveis as anomalias de temperatura, umidade específica, vorticidade relativa e divergência para 850 hPa, representando assim baixa troposfera. As maiores anomalias positivas de temperatura (Figura 4.3a) se encontram sobre o Pacífico Sul, próximas à costa norte do Chile, e sobre o Oceano Atlântico Norte, localizado ao norte do centro positivo da onda de Rossby. Com relação à umidade específica (Figura 4.3b), nota-se anomalias negativas (ar mais seco) no Oceano Pacífico e ao norte da onda de Rossby no norte da Amazônia. Valores baixos de anomalias positivas são notadas à noroeste e sudeste da atuação das ondas. Ao observar as anomalias de vento (vetores), nota-se um escoamento anômalo de ventos adentrando no setor leste da Amazônia de leste na baixa atmosfera. Neste nível, anomalias positivas de vorticidade relativa (Figura 4.3c) são observadas à sudoeste da onda ao sul e na onda ao norte notam-se anomalias negativas de vorticidade à oeste. As anomalias de divergência (Figura 4.3d) na baixa troposfera mostram predomínio de convergência nos centros da onda de Rossby. Também são visíveis pequenos centros de divergência na Amazônia, inclusive no centro sul da onda.

Figura 4.3 - Onda de Rossby (linhas vermelhas contínuas) e Onda de Kelvin (linhas azuis contínuas) na Amazônia e anomalias no nível 850 hPa de a) temperatura ($^{\circ}\text{C}$), b) umidade específica (g/g), c) vorticidade relativa e vento horizontal e d) divergência e vento horizontal no dia 18 de março de 2010.



A Figura 4.4 apresenta as mesmas variáveis da Figura 4.3, porém para 500 hPa. As anomalias de temperatura (Figura 4.4a) tem o mesmo comportamento que em baixos níveis, porém com anomalias mais próximas a zero, exceto no Oceano Atlântico Sul, onde são observadas anomalias negativas de temperatura para este nível da atmosfera. Anomalias negativas de umidade (Figura 4.4b) surgem no local de atuação das ondas de Rossby e também à sudeste do centro ao sul e nordeste do centro ao norte. Com relação aos ventos na média troposfera, o que mais chama a atenção é o escoamento associado com vorticidade relativa (Figura 4.4c) positiva a nordeste do centro da onda de Rossby localizada ao norte da Amazônia, em médios níveis as anomalias de divergência (Figura 4.4d) ainda são vistas no centro da onda de Rossby do HS, enquanto no HN há convergência anômala ao norte da onda e divergência à nordeste.

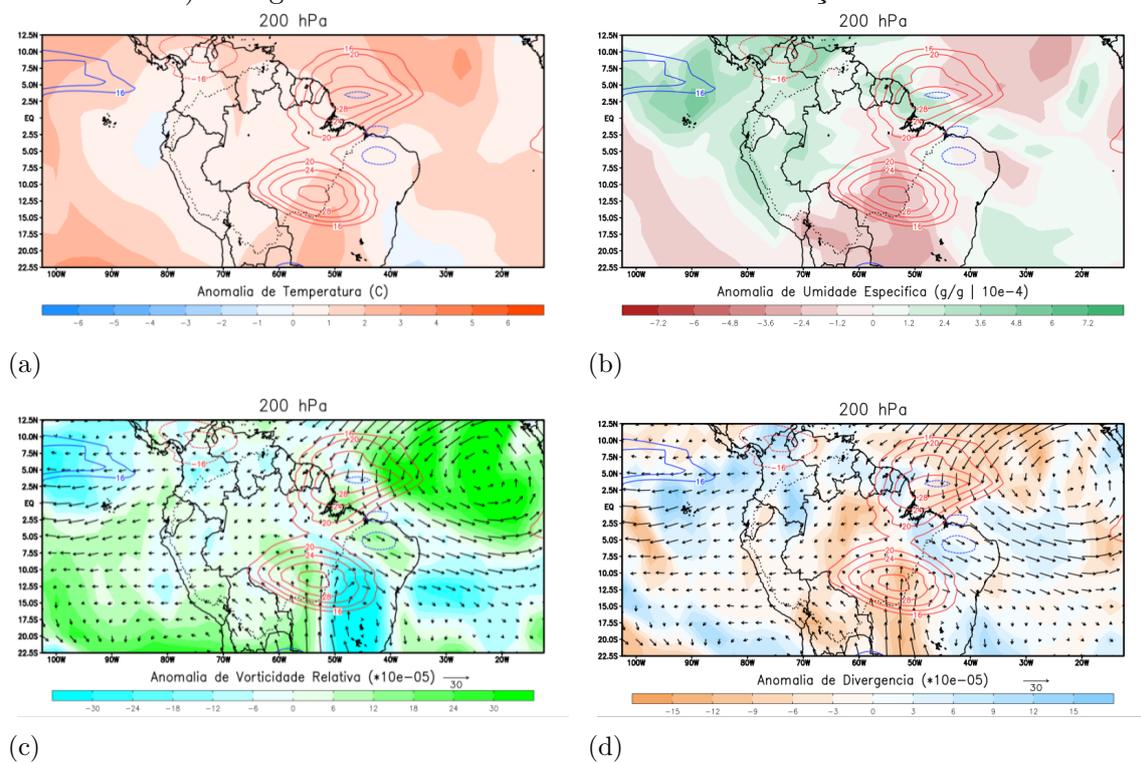
Figura 4.4 - Onda de Rossby (linhas vermelhas contínuas) e Onda de Kelvin (linhas azuis contínuas) na Amazônia e anomalias no nível 500 hPa de a) temperatura (°C), b) umidade específica (g/g), c) vorticidade relativa e vento horizontal e d) divergência e vento horizontal no dia 18 de março de 2010.



Na Figura 4.5 as variáveis são vistas para altos níveis da atmosfera, em 200 hPa. As anomalias positivas de temperatura (Figura 4.5a) voltam a aumentar, em especial à sudeste da onda ao sul e a nordeste da onda de Rossby ao norte. Como em altos níveis a umidade presente é menor, ela é multiplicada por 10^4 ao invés de 10^5 . As anomalias negativas de umidade (Figura 4.5b) associadas ao centro ao sul se intensificam, além de ser notável anomalias positivas à oeste da onda de Rossby, afetando a Amazônia Oriental. Na figura de baixos e médios níveis, a escala da vorticidade varia de -15 à 15 e na de altos níveis de -30 à 30 para ficar em escala similar, visto que em altos níveis a vorticidade relativa é consideravelmente maior, devido que normalmente os ventos são mais intensos em altos do que em baixos níveis. Nos centros de máxima atividade da onda de Rossby o vento é anormalmente de sul no centro localizado no HS e anormalmente de norte no centro do HN. Além disso, vorticidade (Figura 4.5c) negativa é vista à sudeste da onda ao sul e vorticidade positiva à nordeste da onda ao norte, em outras palavras giro ciclônico em altos níveis em ambos os hemisférios. A escala da divergência (Figura 4.5d) também é diferente, sendo de -7.5

à 7.5 em baixos e médios níveis e de -15 à 15 em altos níveis. Neste nível as maiores anomalias surgem, com convergência de maneira generalizada para a Amazônia e nos centros de máxima atividade da onda de Rossby. Existe confluência dos ventos à oeste das ondas de Rossby, associadas à convergência nos núcleos das ondas neste nível, porém ao se comparar com Figuras 4.3d e 4.4d é notável maior divergência em médios níveis e não em baixos.

Figura 4.5 - Onda de Rossby (linhas vermelhas contínuas) e Onda de Kelvin (linhas azuis contínuas) na Amazônia e anomalias no nível 200 hPa de a) temperatura (°C), b) umidade específica (g/g), c) vorticidade relativa e vento horizontal e d) divergência e vento horizontal no dia 18 de março de 2010.

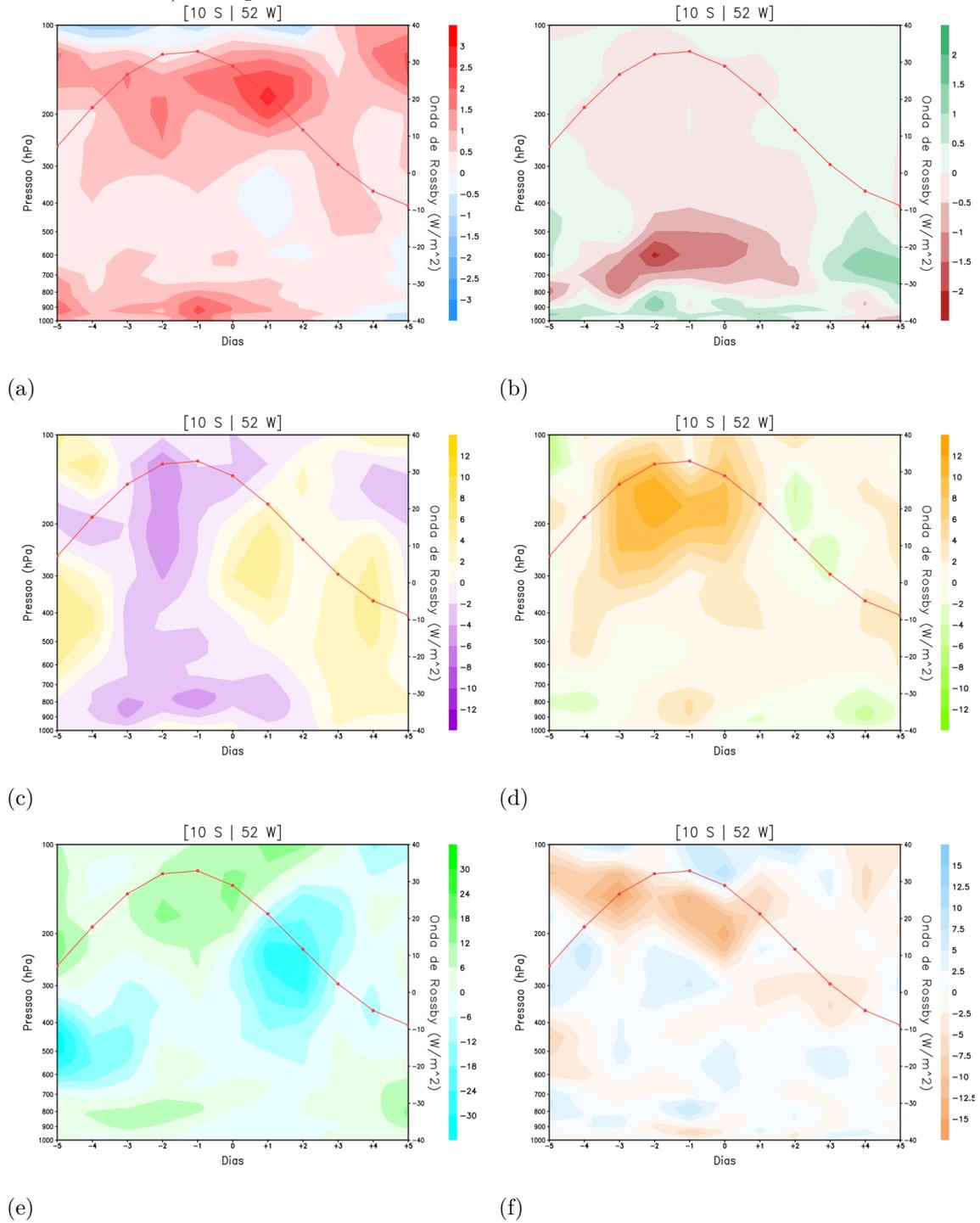


As Figuras 4.6 e Figura 4.7 mostram a evolução temporal e vertical das variáveis associadas com a passagem dos centros de máxima atividade positiva de Rossby. Assim, ainda focando no dia 18 de março (dia 0), foram centralizados os centros ao sul (10 S e 52 W) e ao norte (2 N e 48 W), desde 1000 hPa até 100 hPa para cinco dias antes até cinco dias depois do dia selecionado para melhor definir o evento. Neste dia ambos os núcleos se encontram intensos, sendo 1 dia depois do pico do núcleo sul e 1 dia antes do pico de intensidade do núcleo norte. A onda de Rossby não varia com a altura, sua variação é vista de acordo com o eixo y à direita, onde

mostra sua intensidade em W/m^2 .

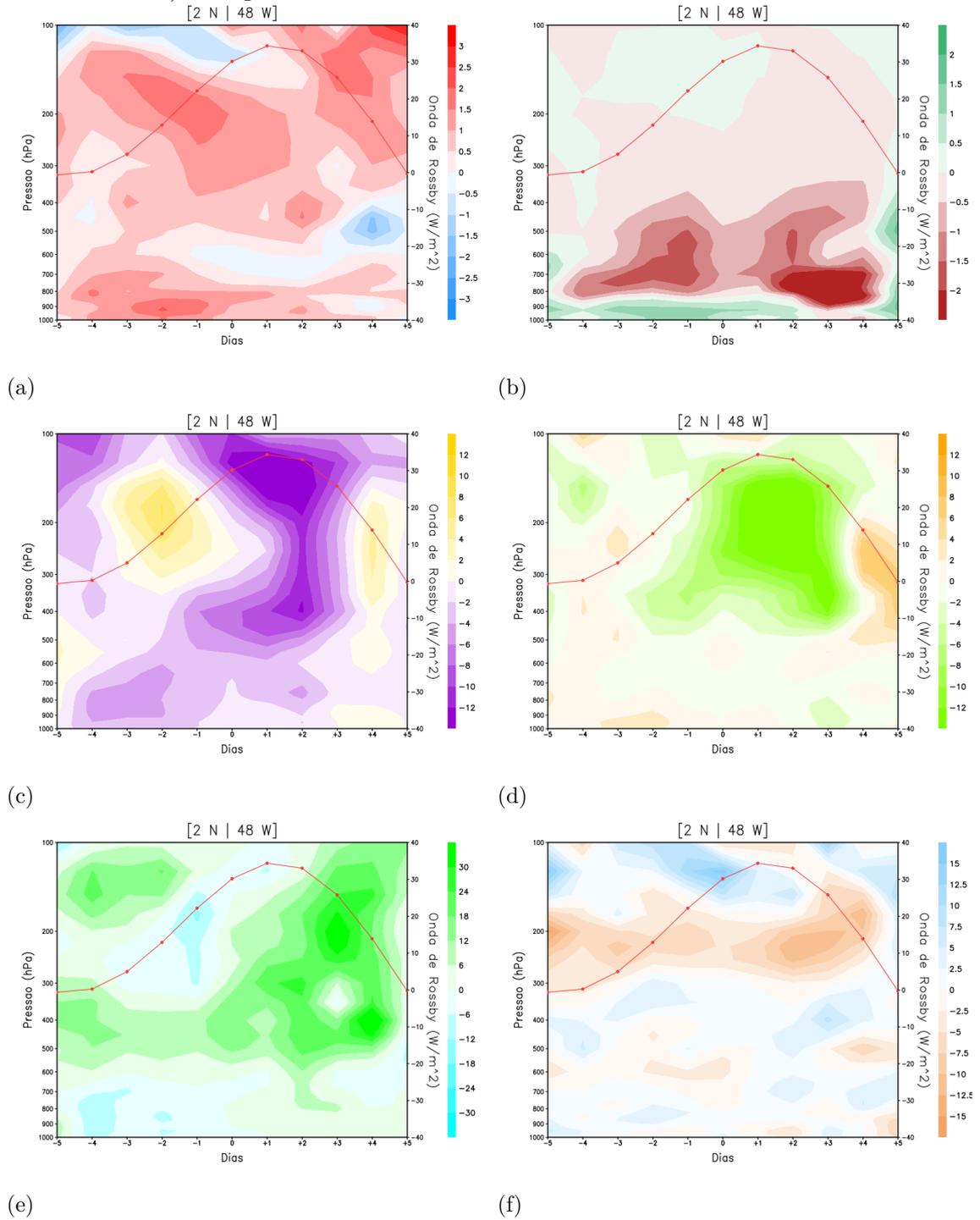
Na Figura 4.6a, é notado, em baixos níveis, um incremento máximo de temperatura no dia de máxima atividade da onda de Rossby, enquanto que em altos níveis o aumento ocorre de maneira mais pronunciada dois dias após. A Figura 4.6b mostra uma atmosfera mais seca, desde 850 hPa até altos níveis. Isto ocorre justamente nos dias de máxima atividade da onda, dia -3 ao dia +1, com anomalia mais intensa (negativamente) no dia -2 em 600 hPa. Este resultado está consistente com as anomalias positivas de ROL observadas na Figura 4.2. Em baixos níveis, as anomalias de vento zonal (Figura 4.6c) mostram anomalias de leste de baixos à altos níveis entre os dias -4 e -1, sendo substituídas por anomalias de oeste nos dias seguintes, essas que são mais intensas em 300 hPa. As anomalias de vento meridional (Figura 4.6d) mostram que nos dias de maior intensidade da onda positiva, entre dias -4 e +1, os ventos eram anormalmente de sul em altos níveis, centrados em torno de 200 hPa passando de 10 m/s. Próximo à superfície o vento era de norte, exceto nos dias -2 e -1. Com relação as anomalias de vorticidade relativa (Figura 4.6e), são notáveis maiores impactos na média e alta troposfera. Anomalia negativa de vorticidade é observada entre 700 e 300 hPa, quando a intensidade da onda de Rossby começa a aumentar na região (dia -4) e centrada entre 300 e 200 hPa nos dias +1 e +2. Entre estes dias, nos dias -3 à 0, anomalias positivas são observadas entre 200 e 100 hPa. Para a divergência (Figura 4.6f) não é possível notar valores expressivos para baixa e média troposfera, apenas para alta troposfera. Notam-se anomalias negativas de divergência (ou seja, convergência) entre 200 e 100 hPa dos dias -4 à 0, quando a onda esteve mais intensa nesta região, o que pode ter contribuído para haver movimento descendente, e assim, inibição na formação de nuvens e, por consequência, redução na precipitação.

Figura 4.6 - Variação de intensidade da Onda de Rossby para o centro de maior passagem da onda ao sul dos dias 13/03 (-5) até 23/03 (+5) de 2010 entre 1000 hPa e 100 hPa com as anomalias de a) temperatura ($^{\circ}\text{C}$), b) umidade específica (g/g), c) vento zonal (m/s), d) vento meridional (m/s), e) vorticidade relativa e f) divergência.



A Figura 4.7 mostra as mesmas anomalias centradas para o núcleo da onda de Rossby no HN. Em comparação com o núcleo ao sul, o aquecimento (Figura 4.7a) em superfície é mais pronunciado dias antes da passagem, enquanto que em altos níveis isso ocorre tanto antes quanto depois do máximo. No núcleo ao norte, também tem-se uma atmosfera mais seca (Figura 4.7b) com a passagem da onda. As anomalias negativas são mais intensas e permanecem desde o momento que a fase positiva da onda sai de 0 W/m^2 (dia -5) até o último dia que ela permanece positiva (dia +5). A atmosfera teve uma redução maior de umidade entre 900 hPa e 500 hPa, ou seja, de baixo a médios níveis, e principalmente após a passagem da porção mais intensa da onda, dias +2, +3 e +4. As anomalias de vento zonal (Figura 4.7c) mostram em superfície ventos de leste em todos os dias, porém em médios e altos níveis houve uma inversão (assim como no núcleo ao sul) de ventos de oeste para ventos de leste com a intensificação da onda e posteriormente troca de leste para oeste com o enfraquecimento da onda. A intensidade do vento de leste em altos níveis foi maior do que ao do núcleo ao sul, atingindo - 12 m/s. Com relação ao vento meridional (Figura 4.7d), as anomalias marcantes surgem entre 400 e 100 hPa entre os dias -1 e +4. Com o aumento de intensidade da Onda de Rossby local os ventos se tornaram anormalmente de norte com intensidades de até - 12 m/s. As anomalias de vorticidades (Figura 4.7e) e de divergências (Figura 4.7f) são mais intensas no núcleo do HN, e também estão em média e alta troposfera. As anomalias positivas de vorticidade relativa em altos níveis surgem com mais intensidade entre os dias 0 e +4, conforme a fase mais intensa da onda passa pela região e decai, com estas anomalias se estendendo de 500 à 100 hPa. As anomalias negativas de divergência estiveram presentes em 200 hPa e mais intensas após a passagem da intensidade máxima da onda, com anomalias positivas em níveis superiores. Convergência em altos níveis costuma estar associada com movimento descendente e inibição da formação de nuvens convectivas, assim ligando a fase positiva da onda com dias de menor nebulosidade na região de atuação.

Figura 4.7 - Variação de intensidade da Onda de Rossby para o centro de maior passagem da onda ao norte dos dias 13/03 (-5) até 23/03 (+5) de 2010 entre 1000 hPa e 100 hPa com as anomalias de a) temperatura ($^{\circ}\text{C}$), b) umidade específica (g/g), c) vento zonal (m/s), d) vento meridional (m/s), e) vorticidade relativa e f) divergência.

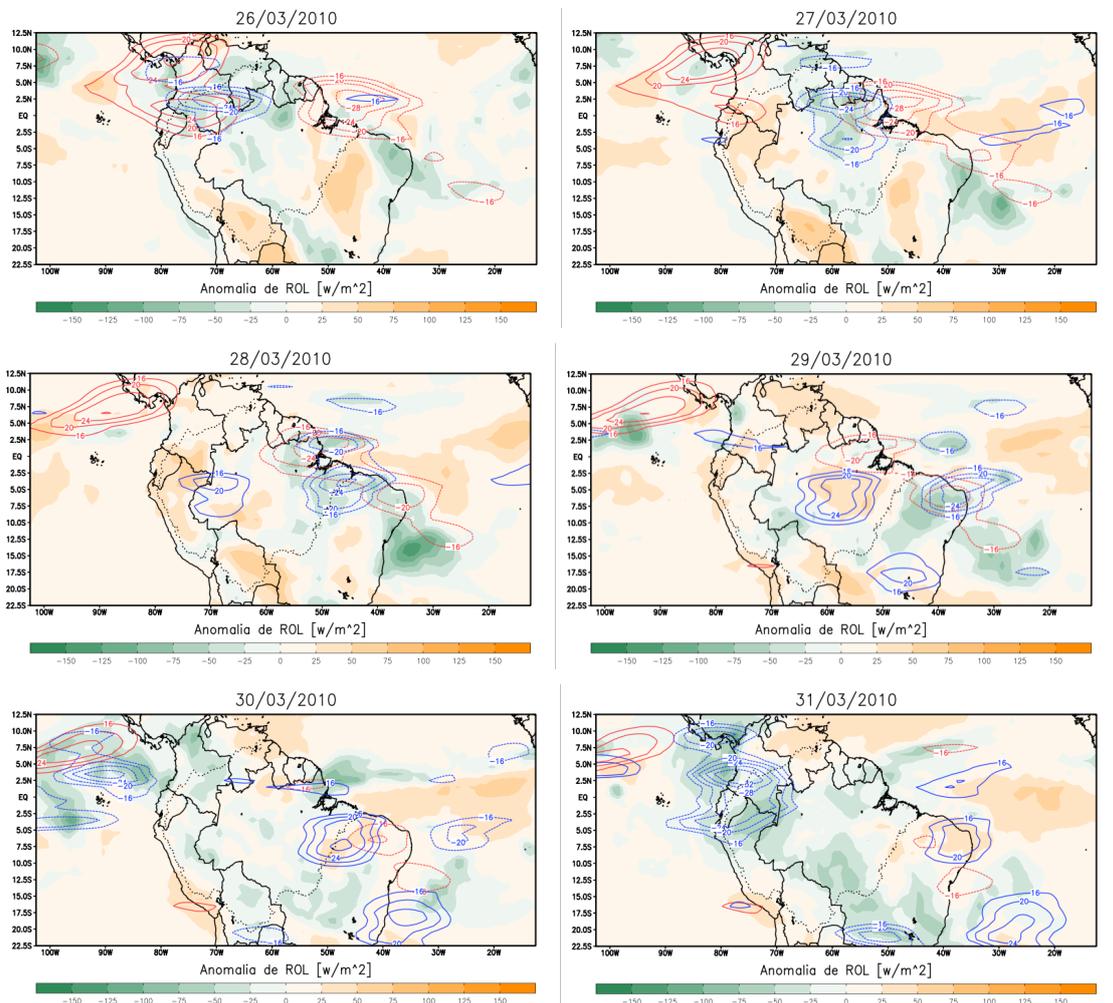


Por meio da Figura 4.8 e Tabela A.2 (Apêndice A) é avaliado o avanço da fase negativa da Onda de Rossby sobre a Amazônia entre os dias 26 e 31 de março de 2010. Esta análise segue à partir do enfraquecimento da fase positiva à medida que foi descrito nas Figuras 4.3 à 4.7. No dia 26, a fase negativa se encontrava com núcleo sobre o Oceano Atlântico adjacente ao estado do Amapá, com centro aproximadamente em 2.5 N e 42 W e intensidade de -28 W/m^2 . Uma onda de Kelvin com fase negativa também se encontra na Amazônia, aproximadamente centrada em 2.5 N e 70 W e intensidade de -24 W/m^2 . Na Amazônia, as anomalias de ROL são negativas na porção norte, podendo ser efeito da aproximação da fase negativa de Rossby vinda de leste e da fase negativa de Kelvin vinda de oeste. No dia 27 é notável um deslocamento de cerca de 4° de longitude para a onda de Rossby. Ela se estende para sudeste, cobrindo a costa norte do nordeste brasileiro neste dia e se liga a dois centros de -16 W/m^2 da fase negativa desta onda. A fase negativa da onda de Kelvin se desloca para leste e junto com a fase negativa de Rossby estão associadas com anomalias negativas de ROL no norte e nordeste da Amazônia. No dia 28, há o deslocamento de 4° de longitude da onda de Rossby, o núcleo da fase adentra a Amazônia brasileira e perde intensidade. No nordeste brasileiro, um núcleo se fortalece em cerca de 5 S e 35 W. A fase negativa da onda de Kelvin se desloca para 48 W, assim saindo do continente. Um outro núcleo da onda de Kelvin se intensifica mais ao sul desta e se desloca junto do núcleo principal. A fase positiva da onda de Kelvin surge em 3 S e 70 W com núcleo de intensidade 20 W/m^2 . As anomalias negativas de ROL neste dia se concentram na porção nordeste do continente, ou seja, presença de nuvens convectivas nesta região, enquanto no sudoeste estão anomalias positivas, representando redução na convecção. Para o dia 29, o núcleo mais ao norte da onda de Rossby se desloca mais 4° para oeste e diminui de intensidade, enquanto o núcleo mais ao sul se desloca 2° e se mantém com a mesma intensidade. A fase negativa da onda de Kelvin passa por uma aparente divisão, com o núcleo ao sul se intensificando e se separando do original ao norte. Este se posiciona também em 37 W no nordeste brasileiro. A fase positiva de Kelvin aumenta sua área de atuação, com núcleo se estendendo de 2.5 S para 10 S e se deslocando para cerca de 58W e tendo intensidade de 24 W/m^2 . Nesse instante, a onda de Kelvin parece prevalecer sobre a onda de Rossby, neutralizando as anomalias negativas de ROL. Por sua vez essa redução na convecção pode estar associada à diminuição de intensidade do núcleo da fase negativa da onda de Rossby ao norte. Em Gill (1980) é realizado um experimento onde uma fonte de calor no continente que gere convecção intensa é capaz de ocasionar o surgimento de ondas de Kelvin e Rossby para os oceanos. Neste evento, pode ter ocorrido o oposto, isto é, a diminuição

de convecção no continente ocasionou o desaparecimento de uma onda de Rossby negativa. Isso se torna mais evidente no dia 30, pois conforme a fase positiva da onda de Kelvin se desloca para leste, há o desaparecimento do núcleo negativo da onda de Rossby ao norte e um enfraquecimento do núcleo ao sul, que se deslocou para 40 W e diminuiu de intensidade para -18 W/m^2 . A Amazônia apresenta, neste dia, anomalias positivas de ROL em uma porção centro-norte da região e no restante dela baixos valores negativos, ainda que não haja a passagem de uma onda de fase negativa para este dia. No dia 31 de março, a fase positiva de Kelvin avança sobre a negativa de Rossby restante, assim eliminando os vestígios dessa onda. Na Amazônia, as anomalias negativas de ROL se intensificam com a aproximação de uma nova fase negativa da onda de Kelvin vinda pelo Oceano Pacífico.

Selecionando o dia 28 de março com a intenção de utilizar um dia com menos ondas de Kelvin atuantes, a estrutura vertical da passagem da fase negativa da Onda de Rossby pode ser vista nas Figuras 4.9 à 4.11 para baixa, média e alta troposfera, respectivamente.

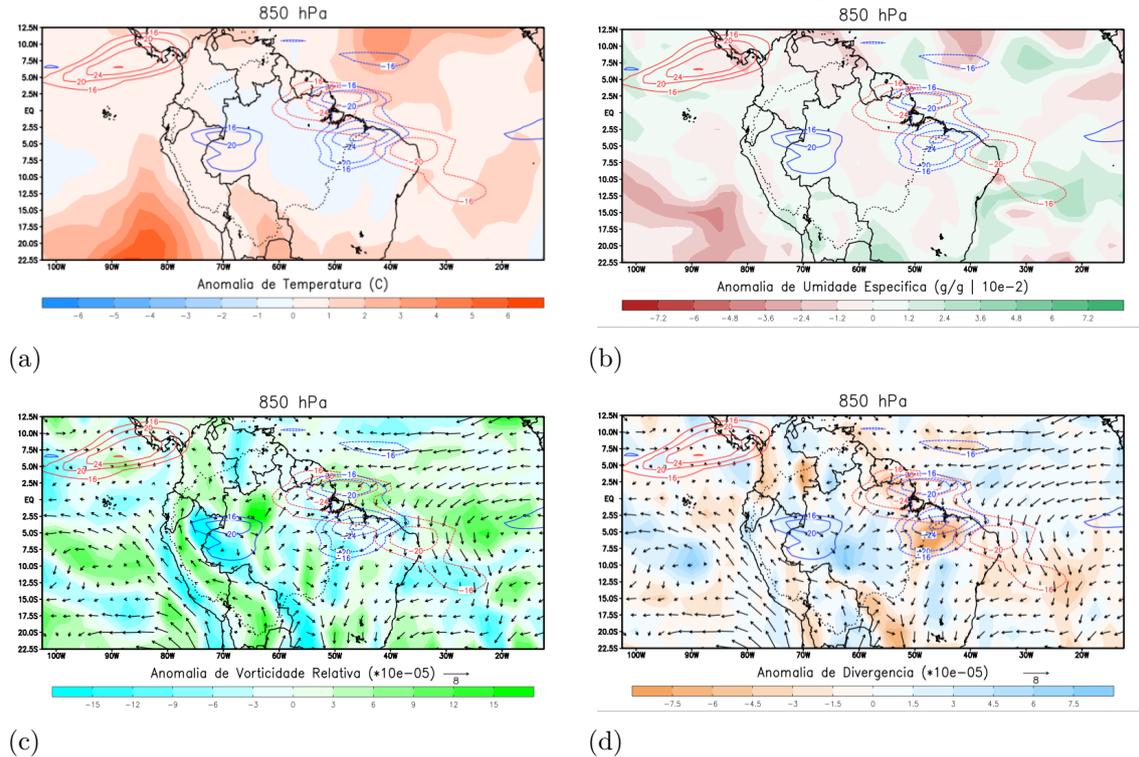
Figura 4.8 - Passagem de uma Onda de Rossby com fase negativa pela Amazônia no outono de 2010 entre os dias 26/03 e 31/03. Linhas vermelhas são Ondas de Rossby e linhas azuis Ondas de Kelvin.



Na Figura 4.9 é notável a ausência de anomalias de temperatura (Figura 4.9a) significativas na região de atuação das ondas de fase negativa para a baixa atmosfera. As anomalias positivas prevalecem nos oceanos Atlântico e Pacífico, além da América do Sul, exceto sobre grande parte da região tropical da América do Sul onde são observadas anomalias negativas. As anomalias de umidade (Figura 4.9b) mostram uma atmosfera mais úmida nas regiões com atividade da fase negativa da onda de Rossby, exceto no núcleo mais ao norte com anomalias próximas à normalidade. Pode-se notar anomalias positivas de vorticidade (Figura 4.9c) na porção nordeste da onda (oceano Atlântico) e negativas à sudeste (continente), com uma confluência dos ventos em baixos níveis na costa nordeste da Amazônia, onde se localizam as fases negativas das ondas de Rossby e Kelvin. Em baixos níveis, a convergência

(Figura 4.9d) é vista principalmente na região da fase negativa da onda de Kelvin, enquanto a divergência se mostra entre a fase negativa e a positiva de Kelvin.

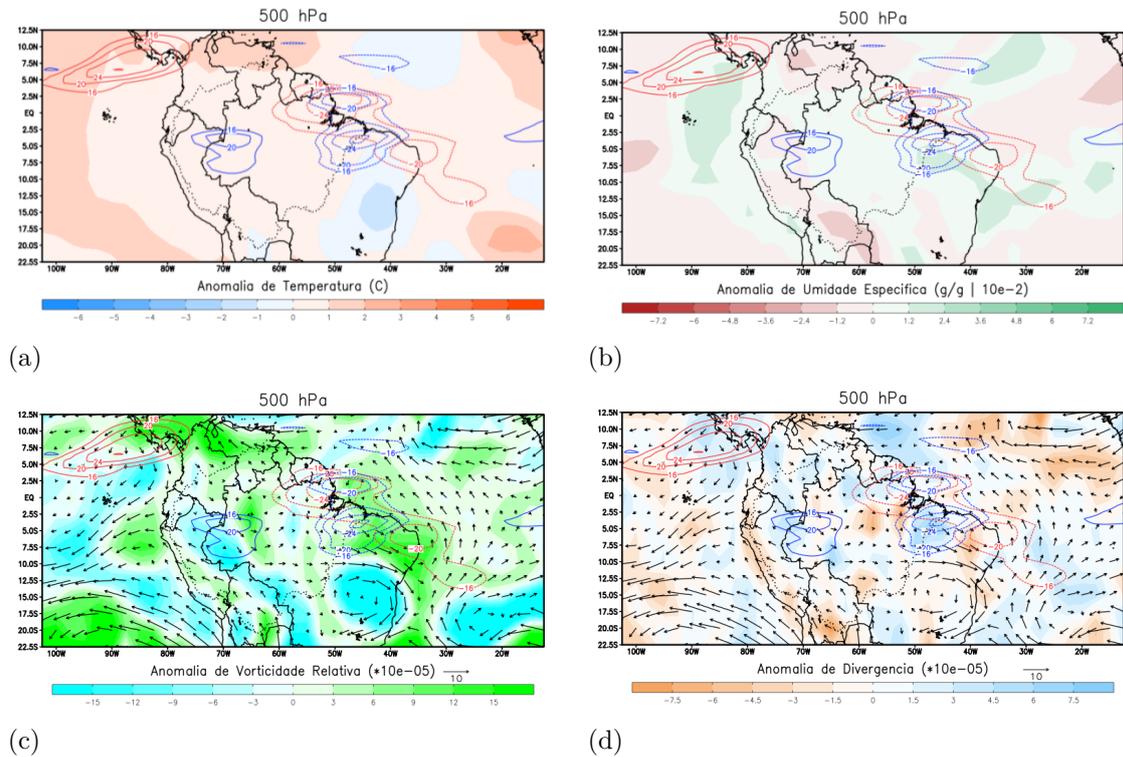
Figura 4.9 - Onda de Rossby (linhas vermelhas contínuas) e Onda de Kelvin (linhas azuis contínuas) na Amazônia e anomalias no nível 850 hPa de a) temperatura (°C), b) umidade específica (g/g), c) vorticidade relativa e vento horizontal e d) divergência e vento horizontal no dia 28 de março de 2010.



Na Figura 4.10, para a atmosfera em médios níveis, anomalias negativas de temperatura (Figura 4.10a) são observadas ao sul do centro da onda de Rossby de fase negativa no nordeste do Brasil, enquanto a Amazônia apresenta leve acréscimo de temperatura. Assim como em baixos níveis, a umidade (Figura 4.10b) aumenta na zona de atuação das ondas de Rossby negativas, exceto no núcleo mais ao norte, onde observa-se uma ligeira redução. Para os médios níveis, anomalias positivas de vorticidade surgem em toda costa norte do Brasil, na região onde estão as ondas de Rossby de fase negativa. Na mesma região onde há uma diminuição da temperatura conforme visto na Figura 4.10a, há um ciclone anômalo (Figura 4.10c) e fortes anomalias negativas de vorticidade. Para a divergência (Figura 4.10d) na região da fase negativa da onda de Kelvin há divergência, assim como na região de Rossby, ainda

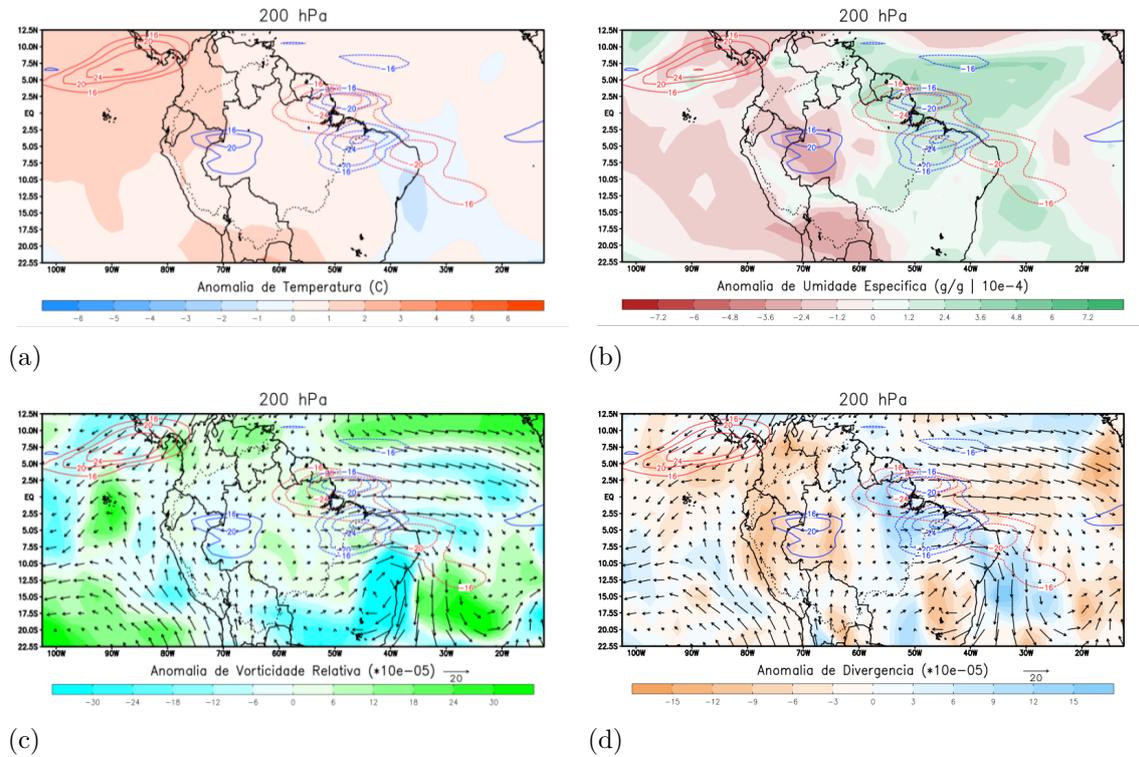
que neste caso os valores sejam próximos à 0.

Figura 4.10 - Onda de Rossby (linhas vermelhas contínuas) e Onda de Kelvin (linhas azuis contínuas) na Amazônia e anomalias no nível 500 hPa de a) temperatura ($^{\circ}\text{C}$), b) umidade específica (g/g), c) vorticidade relativa e vento horizontal e d) divergência e vento horizontal no dia 28 de março de 2010.



As anomalias negativas de temperatura (Figura 4.11a) estão deslocadas para nordeste em altos níveis, comparando com os níveis médios. A Amazônia também apresenta acréscimo de temperatura neste nível. A umidade específica (Figura 4.11b) também é anormalmente mais alta na região de atuação das ondas negativas, assim como em baixos e médios níveis. A vorticidade negativa (Figura 4.11c) e o giro ciclônico vistos em médios níveis permanecem presentes em altos níveis da atmosfera. Nota-se divergência (Figura 4.11d) na região de atuação das fases negativas das ondas e em grande parte da Amazônia oriental, enquanto a parte ocidental possui convergência de forma generalizada. Existe um centro de convergência em altos níveis no nordeste brasileiro, ao sul das ondas de Rossby e Kelvin dessa região.

Figura 4.11 - Onda de Rossby (linhas vermelhas contínuas) e Onda de Kelvin (linhas azuis contínuas) na Amazônia e anomalias no nível 200 hPa de a) temperatura (°C), b) umidade específica (g/g), c) vorticidade relativa e vento horizontal e d) divergência e vento horizontal no dia 28 de março de 2010.

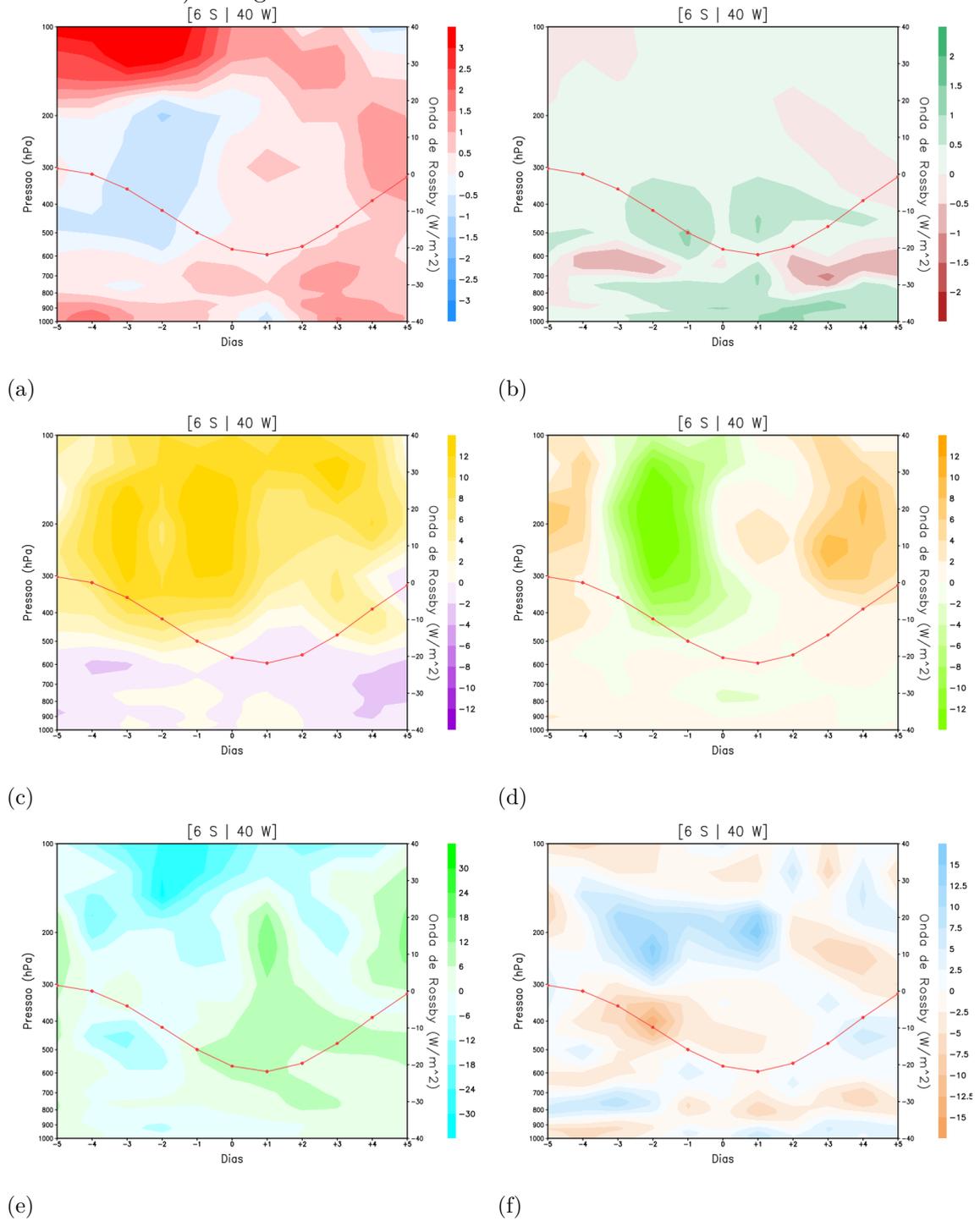


Ainda para o dia 28 de março, centralizou-se dois pontos nos núcleos da fase negativa da onda de Rossby ao norte (2 N e 52 W) e ao sul (6 S e 40 W) para verificar a variação das variáveis meteorológicas antes, durante e depois da passagem da onda nestas regiões, para todos os níveis na vertical. Diferente da fase positiva, já discutida anteriormente, aqui a fase negativa passou primeiro o centro ao norte e depois ao sul. É possível que a passagem da fase negativa da onda de Kelvin tenha modificado estas estruturas verticais.

A Figura 4.12 apresenta as anomalias para o núcleo ao sul. Para a temperatura (Figura 4.12a), notam-se anomalias negativas entre 600 e 200 hPa entre os dias -5 e -1, anomalias positivas entre 1000 e 600 hPa e mais intensas entre 200 e 100 hPa nestes mesmos dias. Nos dias seguintes, as anomalias positivas surgem em todos os níveis na vertical, com mais intensidade entre os dias +3 e +5. Com relação à umidade (Figura 4.12b), resalta-se anomalias positivas em todos os dias para baixa e média troposfera com a passagem da onda. Entre os dias -4 e -2 e entre +2 e +5

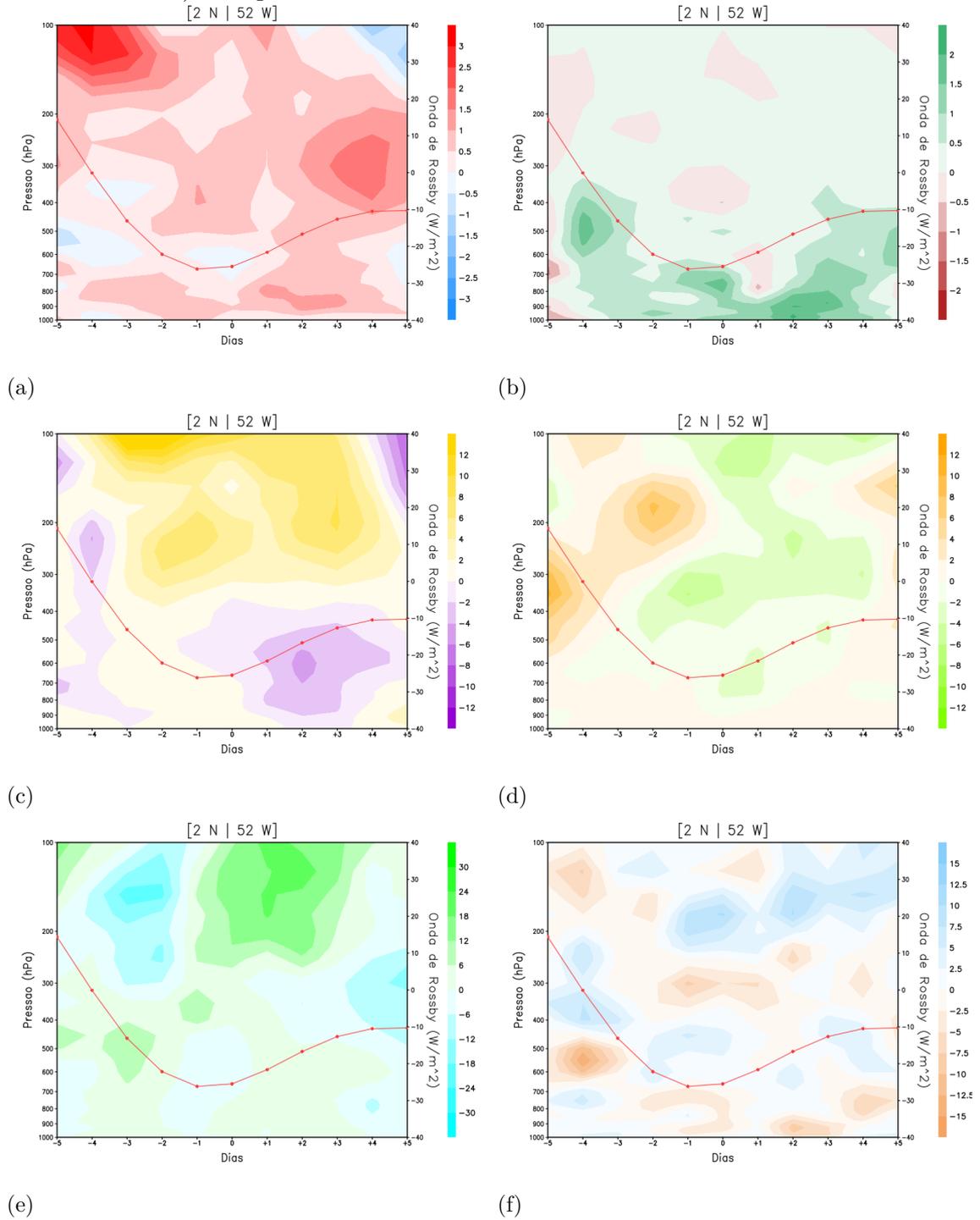
há uma área mais seca da atmosfera entre 700 e 600 hPa. No campo do vento zonal (Figura 4.12c), é notável um comportamento distinto entre a camada de 1000 à 500 hPa e entre 400 e 100 hPa. Na camada mais próxima à superfície, os ventos são todos anormalmente de leste, enquanto que na camada superior são anormalmente de oeste. Com relação ao vento meridional (Figura 4.12d), estes apresentam valores muito próximos à zero entre 1000 e 450 hPa. Entre 450 e 100 hPa, os ventos eram anormalmente de sul entre dias -5 e -4, se tornaram de norte entre -3 e 0 e voltaram a possuir componente de sul nos demais dias. Assim, a inversão das anomalias do vento meridional em altos níveis não ocorreu nos dias de máxima intensidade da onda, como na fase positiva, mas sim cerca de 3 dias antes e com outra inversão em torno do dia 0. Entre os dias -4 e -1, as vorticidades negativas (Figura 4.12e) predominam em todos os níveis na vertical, em especial entre 500 e 400 hPa e entre 200 e 100 hPa, onde as anomalias são mais negativas, mas de qualquer forma indicando um ciclone anômalo de baixos à altos níveis. Para os dias 0 a +5, anomalias positivas surgem em baixos e médios níveis, se estendendo para 200 hPa nos dias +1 e após o dia +4. Assim, conforme a passagem da onda, houve uma troca entre ciclone e anticiclone nesta região. Entre dias -5 e -4, há convergência (Figura 4.12f) entre 600 e 500 hPa, divergência entre 400 e 200 hPa e novamente convergência entre 200 e 100 hPa. Destaque também para o dia -2 onde há convergência entre 500 e 300 hPa e divergência entre 300 e 150 hPa sendo que a divergência em altos níveis continuou intensa até dia +1. Vale ressaltar que a atuação da onda de Kelvin de fase negativa de forma simultânea à de Rossby pode ter impactado nas anomalias presentes, especialmente nos padrões de vento zonal e meridional.

Figura 4.12 - Variação de intensidade da Onda de Rossby para o centro de maior passagem da onda ao sul dos dias 23/03 (-5) até 02/04 (+5) de 2010 entre 1000 hPa e 100 hPa com as anomalias de a) temperatura ($^{\circ}\text{C}$), b) umidade específica (g/g), c) vento zonal (m/s), d) vento meridional (m/s), e) vorticidade relativa e f) divergência.



Na Figura 4.13 tem-se as mesmas anomalias da figura anterior, porém para o núcleo da onda de Rossby no HN. Neste núcleo também há um forte aquecimento (Figura 4.13a) entre 200 e 100 hPa, entre os dias -5 e -3, com anomalias negativas próximas a 0 em médios níveis. As anomalias positivas também estão presentes em todos os dias e níveis, especialmente entre dias +3 e +5. A umidade (Figura 4.13b) apresenta o mesmo comportamento, com uma troposfera mais úmida, especialmente em baixos e médios níveis. As anomalias para o perfil do vento zonal (Figura 4.13c) são muito semelhantes com o núcleo ao sul, sendo ventos de leste entre 1000 e 500 hPa e de oeste entre 400 e 100 hPa. A exceção foi entre dia -5 e -4, quando os ventos de leste estiveram presentes em todos os níveis da troposfera. Já os ventos meridionais (Figura 4.13d) mostram uma troca entre os ventos de 400 à 100 hPa, sendo anômalos de sul entre dias -5 e -3 e se tornando anômalos de norte nos dias seguintes. Entre os dias -4 e -2 as anomalias positivas de vorticidade (Figura 4.13e) ficam entre 1000 hPa e cerca de 350 hPa, enquanto as anomalias são negativas de 350 à 100 hPa. Assim, antes da passagem da onda a circulação era ciclônica em médios níveis e anticiclônica em altos níveis. Com a passagem da onda, entre os dias -1 e +3, a situação quase se inverte em altos níveis, com vorticidade deixando de ser anormalmente negativa e se tornando positiva. Neste núcleo, as alternâncias entre convergência e divergência (Figura 4.13f) acontecem diversas vezes, com destaque para o dia -1, pico da atividade convectiva da onda de Rossby, onde há convergência anômala entre 1000 e 700 hPa, divergência entre 600 e 400 hPa, convergência entre 400 e 300 hPa e por fim divergência em altos níveis (200 a 150 hPa) intensa que permanece até o dia +5.

Figura 4.13 - Variação de intensidade da Onda de Rossby para o centro de maior passagem da onda ao norte dos dias 23/03 (-5) até 02/04 (+5) de 2010 entre 1000 hPa e 100 hPa com as anomalias de a) temperatura ($^{\circ}\text{C}$), b) umidade específica (g/g), c) vento zonal (m/s), d) vento meridional (m/s), e) vorticidade relativa e f) divergência.

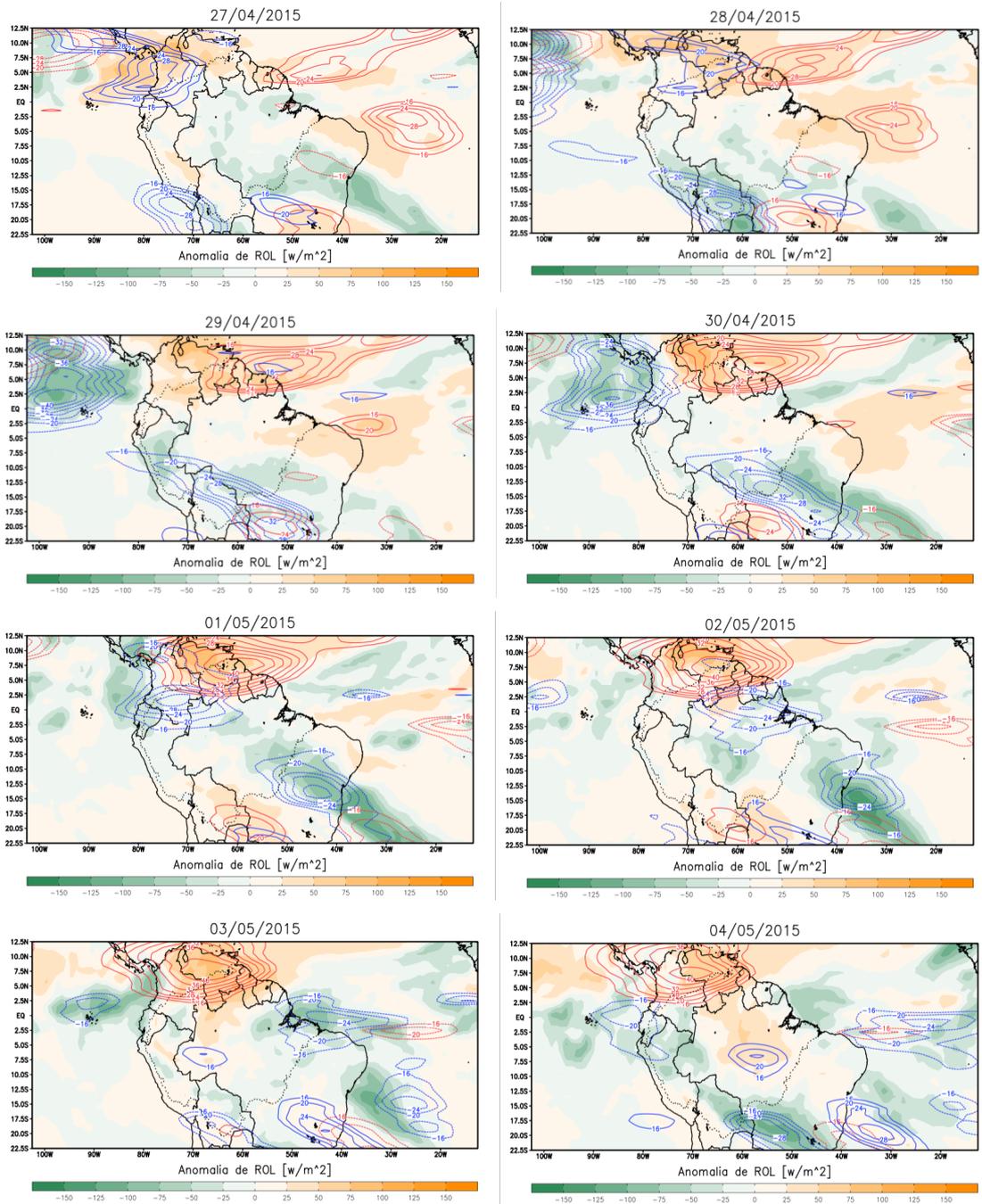


4.1.2 Segundo evento

O ano de 2015 foi escolhido por se tratar de um ano com condições próximas à neutralidade para o índice MMA antes e durante o outono. Por meio das Figura 4.14 e Tabela A.3 (Apêndice A) pode-se observar o avanço de uma onda de Rossby com fase positiva durante o período de 27 de abril à 04 de maio. No dia 27, a fase positiva da onda de Rossby é vista sobre o Oceano Atlântico a cerca de 5 N e 45 W e intensidade no centro de 24 W/m², enquanto outra se encontra na América do Sul em cerca de 20 S e 45 W e intensidade de 18 W/m². Interessantemente, uma onda de fase negativa se encontra entre elas, na latitude de 10 S e intensidade - 16 W/m². A leste destes centros (cerca de 19° de distancia, em 26 W) há uma outra fase positiva da onda de Rossby em 2.5 S e intensidade 28 W/m², onde não é possível observar o par desta onda. As fases positivas estão bem associadas com anomalias positivas de ROL em seus entornos e a fase negativa está no centro de uma larga área de anomalia negativa de ROL alinhada em sentido noroeste-sudeste, configuração estilo ZCAS. No dia 28, os centros se deslocam com mesma velocidade e se intensificam, o centro mais ao norte se divide em 2, um deles centrado em 5 N e o outro em 7.5 N, o setor oeste da onda adentra sobre o continente e contribui para o desenvolvimento de anomalias positivas de ROL na porção norte da Amazônia, em conjunto com uma onda de Kelvin vinda do Pacífico. A onda de fase negativa desloca mais devagar e diminui ligeiramente a sua área de atuação. A onda que se encontra mais a leste propaga para leste e diminui sua intensidade. Para o dia 29 a onda mais ao norte e mais ao sul continua a se propagar com mesma velocidade, sendo que o núcleo ao norte volta a ter apenas um centro em 7.5 N, que se intensifica e conforme adentra a Amazônia ocasiona mais anomalias positivas de ROL no norte da região. Ao sul, a onda de Rossby positiva se encontra com uma onda de Kelvin negativa, o que neutraliza as anomalias de ROL na região de atuação da onda de Rossby. A fase negativa de Rossby que acompanhava esses dois centros se reduz drasticamente e perde intensidade, para então desaparecer no dia seguinte. A onda de Kelvin de fase positiva continua a diminuir em intensidade. No dia 30 nota-se um deslocamento mais rápido, de 5° para oeste, das ondas de Rossby de fase positiva, com a intensificação do núcleo ao norte. A fase positiva mais a leste diminui seu centro e área de atuação para então desaparecer no dia seguinte. As anomalias positivas de ROL na Amazônia se localizam no extremo norte, associado à fase positiva da onda de Rossby, enquanto anomalias negativas de ROL se mostram em sentido noroeste-sudeste na América do Sul, intensificadas pela fase negativa da onda de Kelvin e influenciando boa parte da Amazônia. No dia 1° de maio, as ondas de Rossby se deslocam apenas 2° para oeste, a onda mais ao norte

se intensifica para 40 W/m^2 e vai de encontro à uma onda de fase negativa de Kelvin, retendo as anomalias positivas de ROL apenas no extremo norte-nordeste da América do Sul, enquanto a onda mais ao sul perde intensidade. O que prevalece na América do Sul são as anomalias negativas de ROL associadas com a fase negativa da onda de Kelvin, ainda uma organização sentido noroeste-sudeste. Para o dia 2, a onda de Rossby ao norte mantém a mesma intensidade conforme se desloca para oeste, continuando retida no extremo norte da América do Sul, enquanto a onda de Kelvin que vinha de encontro com este núcleo, se propaga ao sul deste, ocasionando anomalias negativas de ROL na região central da Amazônia. O núcleo da onda de Rossby ao sul ocasiona leves anomalias positivas de ROL no extremo sul da Amazônia e perde intensidade. Nos dois dias seguintes, a onda de Rossby com fase positiva mais ao norte se propaga ainda mais para oeste, saindo da Amazônia e adentrando o Oceano Pacífico. Uma onda de Kelvin com fase positiva adentra a região central da Amazônia nestes dias, ligando as anomalias positivas de ROL no noroeste-norte (associadas com a passagem da onda de Rossby) com as anomalias positivas de ROL no centro da Amazônia. A onda de Rossby positiva no extremo sul da Amazônia perde intensidade e desaparece com a passagem de uma onda de Kelvin com fase negativa que faz prevalecer anomalias negativas de ROL na região e mais à leste.

Figura 4.14 - Passagem de uma Onda de Rossby com fase positiva pela Amazônia no outono de 2015 entre os dias 27/04 e 04/05. Linhas vermelhas são Ondas de Rossby e linhas azuis Ondas de Kelvin.



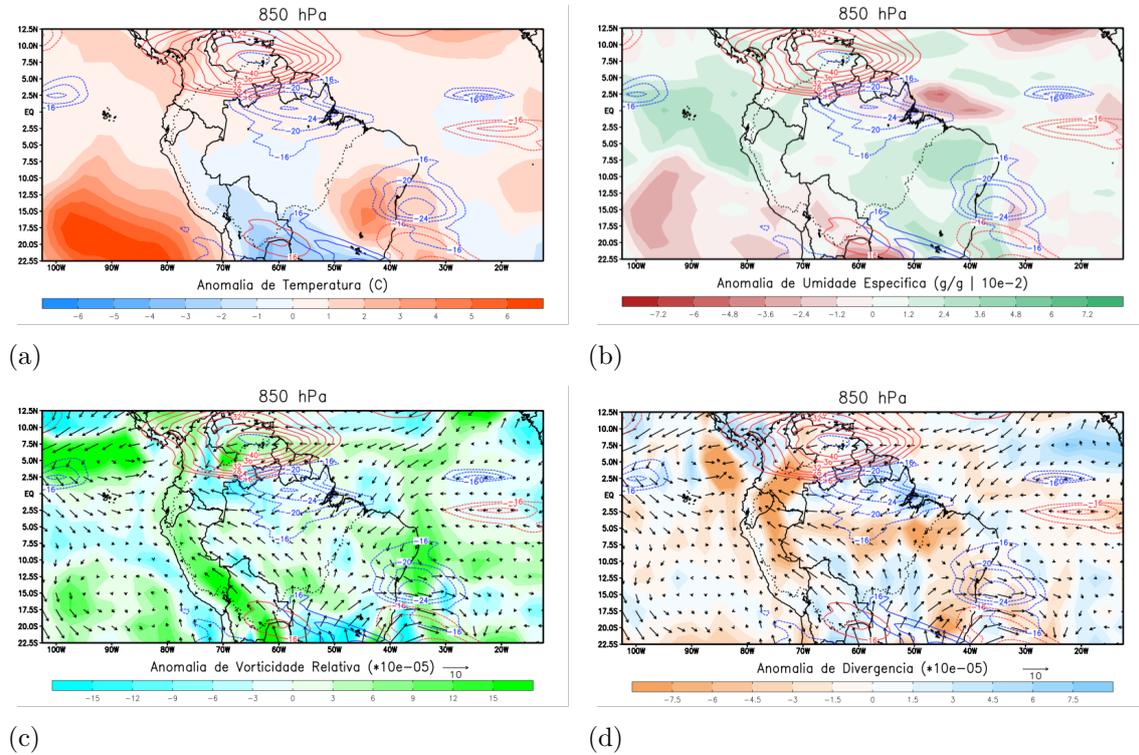
Além da fase positiva da onda de Rossby adentrar o continente consideravelmente mais ao norte do que o último evento citado, desta vez este foi acompanhado de um núcleo mais ao sul, que se deslocou com a mesma velocidade a uma distância de 25° à 27.5° de latitude. Porém, como o núcleo mais ao sul era menos intenso do que

o do norte, seu decaimento para próximo de 0 se deu de forma mais rápida. Além disso, existiu entre estes dois centros um núcleo da fase negativa da onda de Rossby, e outro núcleo da fase positiva de Rossby mais à leste, sendo que ambos perderam intensidade nos primeiros 4 dias. A partir do dia 1 de maio, a fase negativa da onda de Rossby se torna evidente no Oceano Atlântico em cerca de 2.5 S e 18 W, 40° de longitude de distância da fase positiva.

Destes dias, selecionou-se o dia 02 de maio para verificação das características meteorológicas associadas com a passagem da fase positiva da onda de Rossby. Neste dia, as ondas de Rossby impactam o extremo norte e extremo sul da Amazônia, enquanto boa parte central possui a atuação de uma onda de Kelvin com fase negativa.

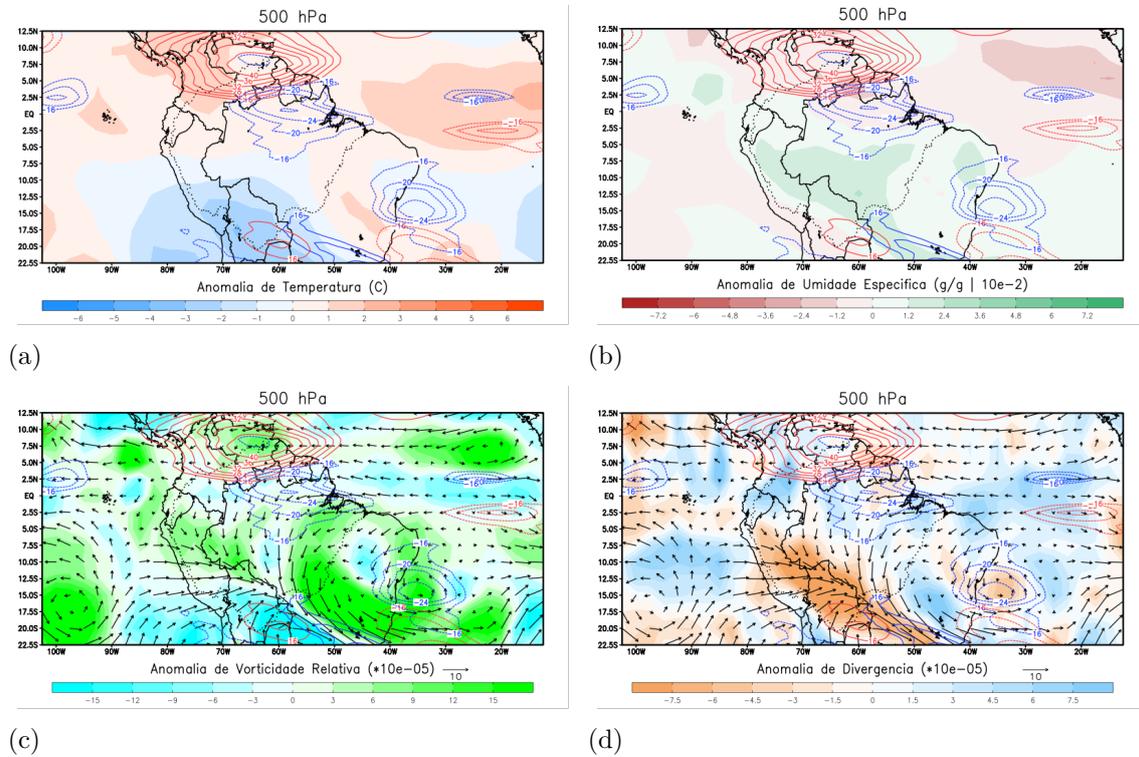
As anomalias de temperatura, umidade específica, vento zonal, vento meridional, vorticidade relativa e divergência são observadas nas Figuras 4.15, 4.16 e 4.17 para baixos, médios e altos níveis da troposfera, respectivamente. Em baixos níveis, nota-se anomalias positivas de temperatura (Figura 4.15a) levemente acima de zero no núcleo ao norte, enquanto a onda ao sul está em uma região de anomalias negativas de até - 2 °C. Com relação a umidade (Figura 4.15b), ao norte e na posição central da Amazônia, o predomínio é de anomalias positivas, mas que são muito próximas de zero, enquanto no extremo sul elas são negativas, indicando ar mais seco. Os ventos (Figura 4.15c) são anormalmente de sul na onda de Rossby mais ao sul e anormalmente de leste ao norte. Ambos os centros da onda de Rossby apresentam alternância de vorticidade (Figura 4.15c). No núcleo ao sul, há anomalia de vorticidade positiva no setor oeste e negativas no setor leste, enquanto no núcleo ao norte as anomalias positivas estão a leste e negativas a oeste. Anomalias negativas de divergência (Figura 4.15d) são vistas na região central e oeste da Amazônia, mas não na região dos centros de máxima intensidade da onda de Rossby.

Figura 4.15 - Onda de Rossby (linhas vermelhas contínuas) e Onda de Kelvin (linhas azuis contínuas) na Amazônia e anomalias no nível 850 hPa de a) temperatura ($^{\circ}\text{C}$), b) umidade específica (g/g), c) vorticidade relativa e vento horizontal e d) divergência e vento horizontal no dia 02 de maio de 2015.



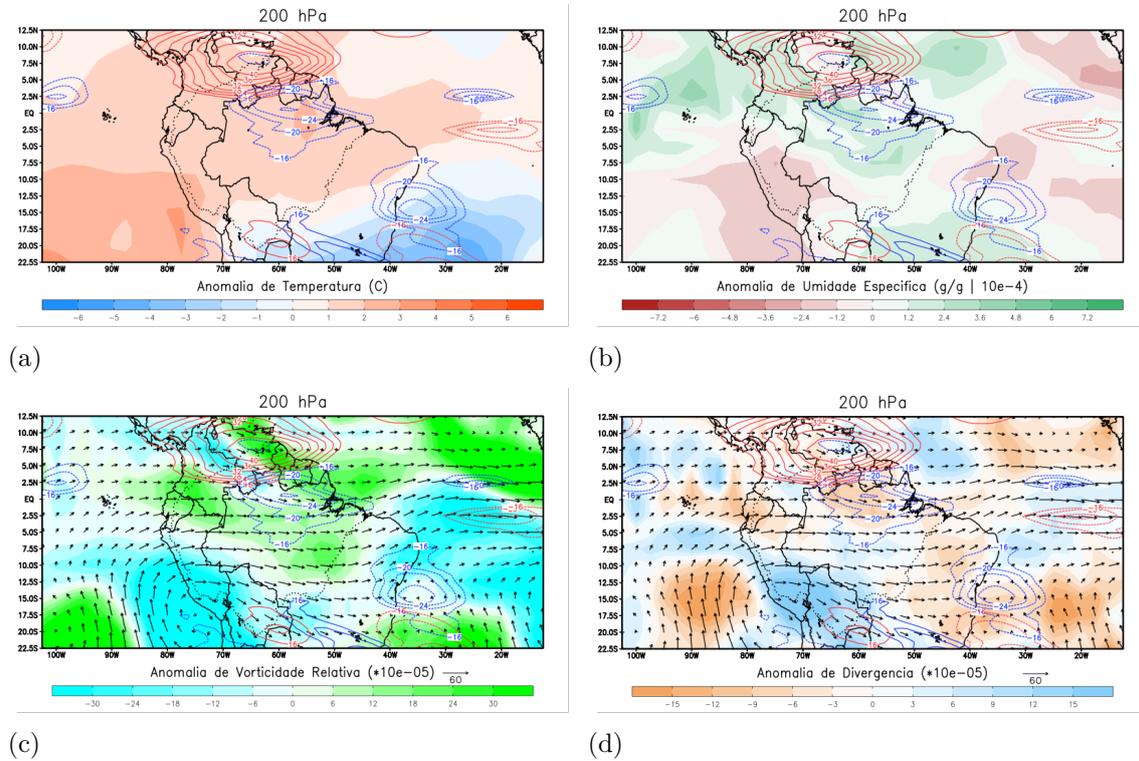
Em médios níveis, as anomalias de temperatura (Figura 4.16a) positivas ao norte e negativas ao sul se intensificam. Com relação ao padrão de umidade relativa (Figura 4.16b), as anomalias mostram uma inversão com relação aos baixos níveis, já que anomalias positivas surgem na parte central e sul da Amazônia, com anomalias positivas no extremo norte. Em quase toda a Amazônia, os ventos são de norte neste nível. As anomalias de vorticidade (Figura 4.16c) são positivas ao norte e negativas ao sul, com um giro ciclônico bem marcado na onda de Rossby ao sul, e ao leste desta há uma região de giro anticiclônico. A convergência (Figura 4.16d) é vista no núcleo ao sul e à noroeste deste, enquanto a leste há divergência. No núcleo ao norte, nota-se a presença de divergência no centro.

Figura 4.16 - Onda de Rossby (linhas vermelhas contínuas) e Onda de Kelvin (linhas azuis contínuas) na Amazônia e anomalias no nível 500 hPa de a) temperatura (°C), b) umidade específica (g/g), c) vorticidade relativa e vento horizontal e d) divergência e vento horizontal no dia 02 de maio de 2015.



Em altos níveis, enquanto as anomalias positivas de temperatura (Figura 4.17a) se intensificam e estendem sua área para abranger quase toda a Amazônia, as anomalias negativas ao sul mostram um deslocamento para leste no Oceano Atlântico. As anomalias de umidade específica (Figura 4.17b) se mostram positiva no centro, norte e extremo sul da Amazônia e negativas no sudoeste. De maneira geral, os ventos anômalo são de oeste na Amazônia neste nível da atmosfera. As anomalias positivas e negativas de vorticidade (Figura 4.17c) se intensificam no núcleo ao norte, enquanto no núcleo ao sul nota-se um deslocamento das anomalias negativas para oeste. Neste nível, há convergência (Figura 4.17d) associada ao núcleo ao norte, enquanto no núcleo ao sul tem-se divergência.

Figura 4.17 - Onda de Rossby (linhas vermelhas contínuas) e Onda de Kelvin (linhas azuis contínuas) na Amazônia e anomalias no nível 200 hPa de a) temperatura (°C), b) umidade específica (g/g), c) vorticidade relativa e vento horizontal e d) divergência e vento horizontal no dia 02 de maio de 2015.



Este evento contou com a passagem de diversas fases da onda de Kelvin na Amazônia equatorial e no extremo sul, que também foram capazes de alterar as variáveis atmosféricas do local. Dessa forma, principalmente no núcleo da onda de Rossby mais ao sul, as características associadas com a passagem desta onda foram bem distintas em relação ao primeiro evento descrito neste capítulo.

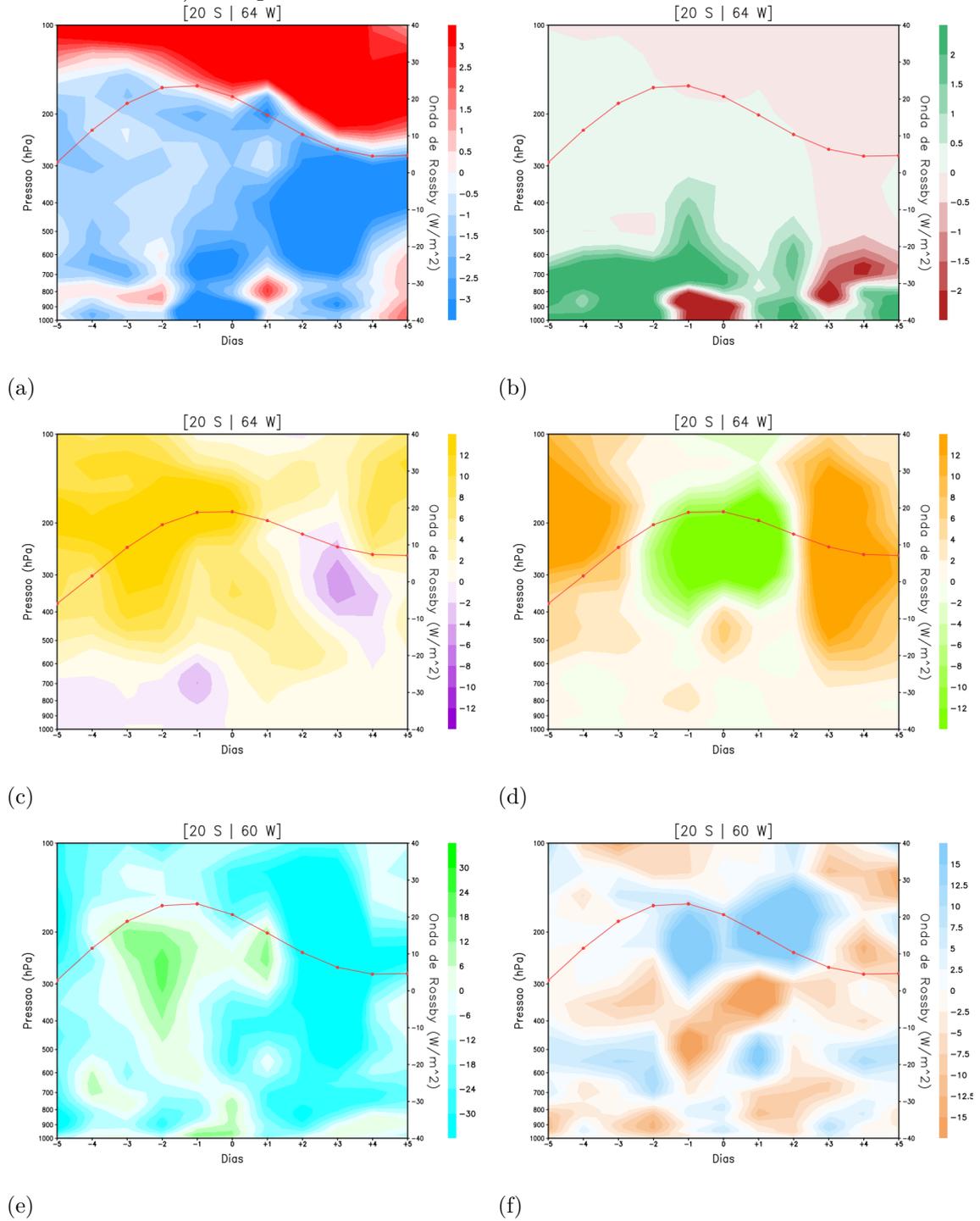
Em baixos até altos níveis, houve um aumento da temperatura sobre a Amazônia de uma forma geral no primeiro caso, enquanto no segundo evento a temperatura aumentou ao norte e diminuiu ao sul. As anomalias de umidade específica foram negativas na região das ondas para o primeiro evento, enquanto no segundo evento foram positivas de forma geral para a Amazônia. Ainda no segundo evento, no núcleo ao norte foram negativas em médios níveis e no núcleo ao sul sendo negativas em baixos e altos níveis. Ambos os eventos mostraram comportamento similar para a vorticidade em baixos e médios níveis, onde em baixos níveis tiveram vorticidades positivas à oeste no núcleo localizado no HS e negativas à oeste no núcleo do HN e

em médios e altos níveis anomalias positivas de vorticidade no HN e negativas no HS. As diferenças estão em altos níveis, com o primeiro evento possuindo anomalias positivas no núcleo do HS e negativas à leste dele, enquanto positivas à leste do núcleo no HN. No segundo evento, as anomalias de vorticidade são positivas no núcleo do HN e negativas à oeste do núcleo no HS. Com relação às anomalias de divergência, ambos os eventos apresentam baixos valores de divergência em baixos níveis. Porém, em médios níveis um dos núcleos apresentou convergência no HN e o outro divergência no HS, no primeiro evento. No segundo evento foi o oposto, isto é, convergência no HS e divergência no HN. Em altos níveis, no primeiro evento eram visíveis convergência em toda a área de atuação da onda de Rossby, enquanto no segundo evento, a convergência apenas surge no núcleo do HN e existem anomalias de divergência no núcleo do HS.

Na Figura 4.18 tem-se o perfil vertical das anomalias das variáveis meteorológicas associadas com o núcleo positivo desta onda de Rossby atuante no sul da Amazônia, desde 5 dias antes do dia 2 (27/04) até 5 dias depois (07/05), centrado no núcleo da onda de Rossby ao sul. As anomalias de temperatura (Figura 4.18a) são mais marcantes para este núcleo, onde as anomalias negativas são da superfície até 150 hPa nos dias -5 a -3, acima disso estão retidas anomalias positivas acima de 3 °C. Essas anomalias positivas se propagam gradativamente para níveis mais baixos, até que no dia +5 elas se encontram em 300 hPa. As anomalias negativas são maiores em módulo, isto é, mais negativas (abaixo de - 3 °C) em superfície nos dias -1 e 0 e depois disso se localizam entre 700 e 300 hPa até o dia +5. Entre os dias -3 e -2 e no dia +1 anomalias positivas de temperatura surgem brevemente entre 900 e 850 hPa. As anomalias de umidade (Figura 4.18b) são acima de 2 g/g do dia -5 a -2 desde a superfície até 600 hPa, sendo substituídas por negativas entre os dias -1 e 0 entre 1000 e 800 hPa, além de novamente negativas no dia +3 (em 800 hPa) e +4 (em 700 hPa). Anomalias positivas próximas a zero são vistas acima de 200 hPa a partir do dia -2 e permanecem pelos próximos dias, sendo que nos dias +3 e +4 são vistas em todos os níveis da troposfera, porém com valores maiores entre 900 e 500 hPa. Com relação ao vento zonal (Figura 4.18c), as anomalias mostram ventos de leste entre 1000 e 700 hPa nos dias -5 à -1, depois sendo substituídos por oeste. Entre 600 e 100 hPa o predomínio foi de ventos anormalmente de oeste, de até 12 m/s nos dias -3 a -1. Entre 400 e 200 hPa ventos anormalmente de leste surgem entre os dias +2 e +4. As anomalias de vento meridional (Figura 4.18d) são próximas a 0 entre 1000 e 600 hPa. Entre 600 e 100 hPa os ventos eram anormalmente de sul entre os dias -5 e -3, de norte entre -2 e +2 e novamente de sul entre +3 e +5. Para este núcleo, anomalias positivas de vorticidade (Figura 4.18e) surgem entre 700 e 600 hPa no

dia -4, entre 400 e 200 hPa no dia -2, em 1000 hPa nos dias -1 e 0 e entre 300 e 200 hPa no dia +1. Assim, nos dias -2 e +1 nota-se o giro ciclônico em superfície e anticiclônico em altos níveis, uma inversão com a altura. Após isso, o predomínio é de anomalias negativas para todos os níveis na atmosfera nos dias seguintes. Em questão de anomalias de divergência (Figura 4.18f), o destaque é observado nos dias -1 até +1, com divergência negativa (convergência) intensa entre 500 e 400 hPa, além de divergência entre 300 e 200 hPa.

Figura 4.18 - Variação de intensidade da Onda de Rossby para o centro de maior passagem da onda ao sul dos dias 27/04 (-5) até 07/05 (+5) de 2015 entre 1000 hPa e 100 hPa com as anomalias de a) temperatura ($^{\circ}\text{C}$), b) umidade específica (g/g), c) vento zonal (m/s), d) vento meridional (m/s), e) vorticidade relativa e f) divergência.



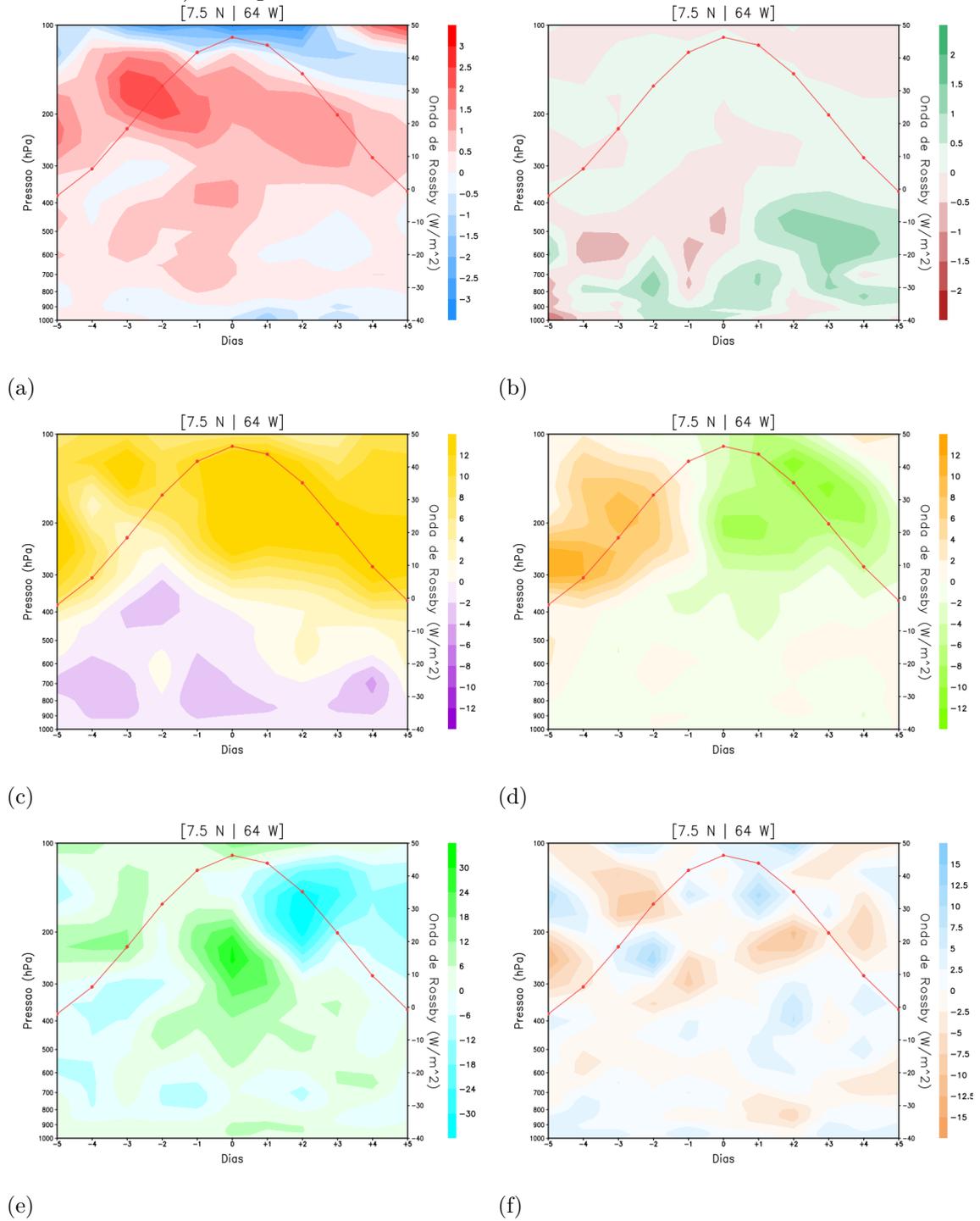
Quando se comparam as séries no tempo e na vertical dos dois eventos para o núcleo localizado no HS, nota-se uma inversão quase total entre o comportamento das variáveis meteorológicas do primeiro ao segundo evento. No primeiro evento da fase positiva da onda de Rossby, houve um aquecimento em toda a camada troposférica, enquanto no segundo evento houve resfriamento da superfície até próximo de 150 hPa. No primeiro evento houve diminuição na umidade específica, e no segundo houve aumento. Durante o pico da onda de Rossby no primeiro evento, os ventos são anormalmente de leste na vertical, enquanto no segundo evento são de oeste. O vento meridional durante o pico da onda foi fortemente de sul em altos níveis durante o primeiro evento, já no segundo foi de norte. As anomalias de vorticidade apresentaram comportamento similar para altos níveis, sendo em ambos os casos positivas durante o pico da onda e se tornando negativas com o decaimento desta. As diferenças voltam a aparecer nas anomalias de divergência, pois no primeiro evento tinha-se divergência em médios níveis e convergência em altos níveis e no segundo evento convergência em médios níveis e divergência em altos níveis.

Por meio de imagens de satélite no canal infravermelho (não mostrado), foi possível verificar a passagem de um sistema frontal pela região sudeste do Brasil entre os dias 28 de abril e 02 de maio de 2015. Este sistema, associado com a passagem de uma onda de Kelvin em mesma latitude, explicam as mudanças nas anomalias encontradas no núcleo sul da onda de Rossby em comparação com o núcleo norte.

A Figura 4.19 apresenta as anomalias das mesmas variáveis e mesmo período de tempo que na Figura 4.18, porém centradas no núcleo da onda de Rossby localizada no extremo norte da Amazônia. Para este núcleo, as anomalias de temperatura (Figura 19a) mais intensas são positivas, com máximo de 1.5 °C e observadas entre 300 e 150 hPa entre os dias -3 e -2, conforme a onda de Rossby se intensificou na região. As anomalias positivas continuaram nestes níveis para os dias restantes, porém menos intensas. Com relação as anomalias de umidade específica (Figura 19b), entre os dias -4 e +1, anomalias positivas são vistas entre 1000 hPa e 700 hPa, com anomalias negativas entre 700 e 400 hPa, exceto nos dias 0 e +1 quando as anomalias negativas eram até 300 hPa. Do dia +2 em diante, a atmosfera se mostrou anormalmente mais úmida dos baixos aos altos níveis, principalmente em 500 hPa, mostrando maior umidade presente na região após a parte mais intensa da onda. Em 200 hPa, anomalias negativas são vistas em todos os dias, sendo que estas podem chegar próximas a 100 hPa entre dias -3 e 0. Com relação às anomalias de vento zonal (Figura 19c), entre os dias -5 a 0 entre 1000 e 500 hPa o vento é anormalmente de leste, se estendendo para 300 hPa no dia -2. Dos dias +1 a +5

as anomalias de leste permanecem entre 1000 e 600 hPa. De 300 até 100 hPa os ventos são anormalmente de oeste em todos os dias, com maior intensidade após o pico da onda no dia 0. O vento meridional (Figura 19d) mostra entre 1000 e 400 hPa o predomínio de vento anormalmente de norte, porém com valores próximos a zero. Entre 400 e 100 hPa, os ventos eram anormalmente de sul entre dias -5 e -1 e de norte entre dias 0 e +5, ou seja, uma inversão com a passagem da onda. As vorticidades (Figura 19e) anormalmente negativas são predomínio em baixos níveis, entre 900 e 600 hPa, dos dias -5 a +2, com uma troca entre +3 e +4. À partir de 300 hPa essa situação é quase inversa, sendo positiva entre -5 e 0 (e mais intensa no dia 0) e negativa principalmente entre 300 e 200 hPa, depois negativas entre +1 e +5 entre 200 e 100 hPa. Isso indica um fortalecimento de uma circulação anticiclônica nos dias da passagem da onda, com pico no dia de máxima intensidade, e a troca para uma circulação ciclônica em altos níveis conforme o decaimento da onda. As anomalias de divergência (Figura 19f) mais intensas surgem em altos níveis e se alternam em positivas e negativas. Destaque para as anomalias negativas em 200 hPa entre os dias +1 e +4, indicando convergência e estando de acordo com o ciclone neste nível, conforme identificado pela Figura 4.18 anteriormente.

Figura 4.19 - Variação de intensidade da Onda de Rossby para o centro de maior passagem da onda ao norte dos dias 27/04 (-5) até 07/05 (+5) de 2015 entre 1000 hPa e 100 hPa com as anomalias de a) temperatura ($^{\circ}\text{C}$), b) umidade específica (g/g), c) vento zonal (m/s), d) vento meridional (m/s), e) vorticidade relativa e f) divergência.

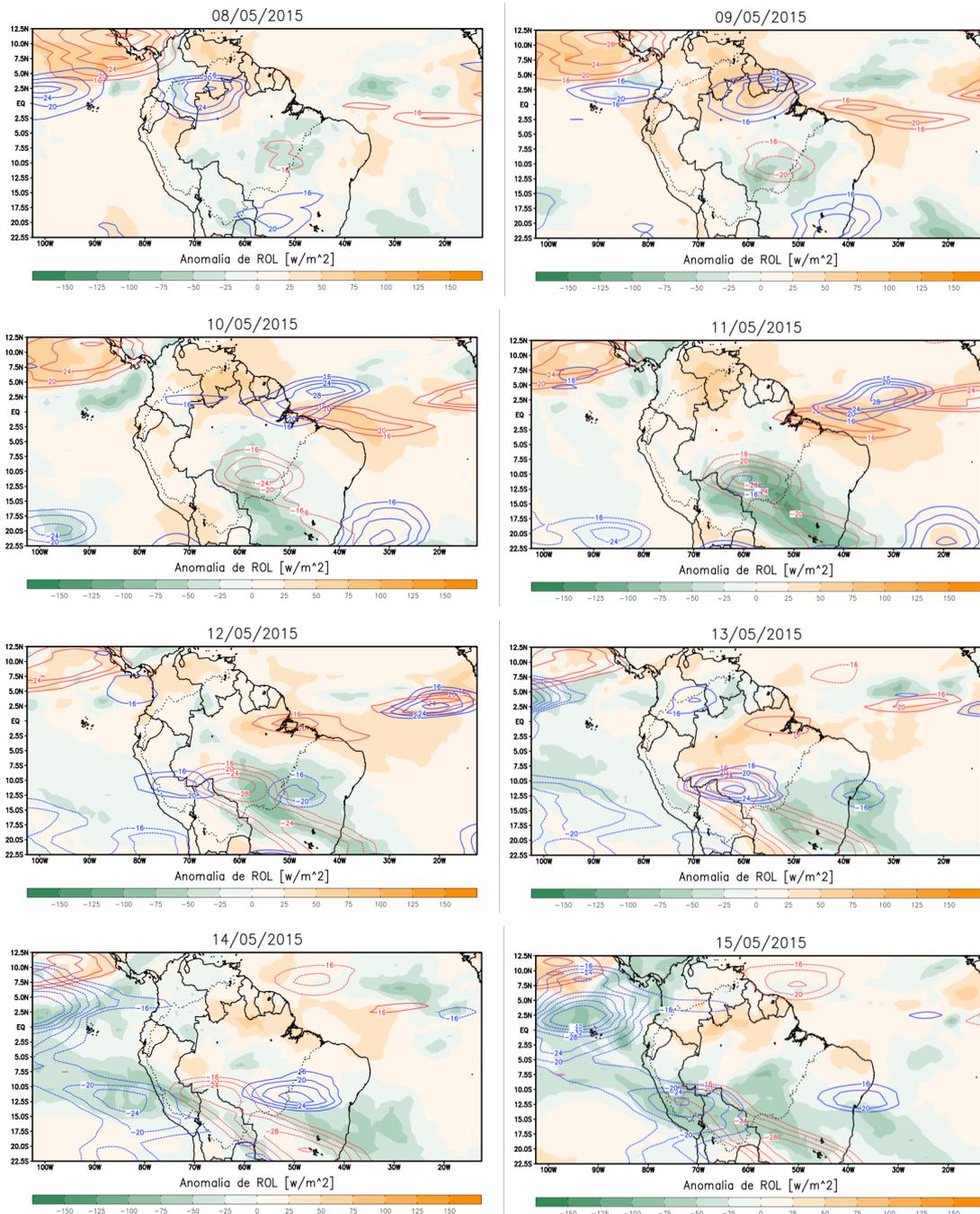


Durante o primeiro evento, as características de ambos os núcleos da onda de Rossby apresentaram comportamento similar entre si. Para o segundo evento, apenas o núcleo localizado no HN possui comportamento similar aos do primeiro evento. Houve aquecimento em quase toda a troposfera, queda na umidade específica durante o período de aumento da intensidade da onda de Rossby, giro ciclônico e convergência em altos níveis na fase de máxima intensidade da onda, com essas duas últimas anomalias possuindo menos intensidade e permanecendo durante menos dias do que no primeiro evento. As anomalias de vento zonal são as únicas que diferem em comparação com o primeiro evento, pois ventos de leste se faziam presentes em todos os níveis na vertical durante a fase de máxima intensidade da onda do primeiro evento, sendo que em altos níveis houve uma troca de ventos anormalmente de oeste para leste. Já no segundo evento, os ventos de leste ficaram retidos entre 1000 e 500 hPa, com ventos de oeste entre 500 e 100 hPa. Com relação ao vento meridional, no primeiro evento houve uma troca de ventos de sul por ventos de norte em altos níveis e essa inversão ocorre 3 dias antes da máxima intensidade da onda e continua até dois dias depois, enquanto que no segundo evento essa inversão acontece justamente no dia de maior atividade da onda de Rossby e é notável até mesmo 5 dias depois.

Na Figura 4.20 e Tabela A.4 (Apêndice A), pode-se observar o avanço da fase negativa da onda de Rossby entre os dias 08 e 17 de maio de 2015. Apesar da fase negativa da onda de Rossby que se aproximava do continente no dia 04 (Figura 4.14), perder intensidade e desaparecer entre os dias 05 e 06, um outro núcleo da fase negativa de Rossby surge sobre o continente no dia 08 com núcleo de -16 W/m^2 em cerca de $7,5$ e 10 S e 52 W , possivelmente efeito da interação com uma Onda de Kelvin negativa que atuava na região central do Brasil e foi responsável por elevar as anomalias negativas de ROL sobre o país. Neste dia, houve uma onda de Kelvin de fase positiva causando anomalias positivas de ROL na porção noroeste da Amazônia, enquanto anomalias negativas de ROL são vistas na Amazônia central, sul e leste, inclusive na região onde está no núcleo da fase negativa de Rossby. No dia 09, o centro da onda de Rossby se desloca para oeste, sua área de atuação aumenta e o centro se fortalece em 10 S com -20 W/m^2 . A fase positiva da onda de Rossby se aproxima pelo Oceano Atlântico, com centros de 20 W/m^2 , um deles centrado no equador e 38 W e outro em $2,5 \text{ S}$ e 26 W . A onda de Kelvin propaga para leste, alastrando as anomalias positivas de ROL em toda a porção norte da Amazônia, enquanto as anomalias negativas de ROL se localizam no sudeste da região, associadas à fase negativa de Rossby. Nos dias 10 e 11 de maio, a onda de Rossby continua a se deslocar com a mesma velocidade e aumenta sua intensidade. Associadas com a presença dessa onda as anomalias negativas de ROL se intensificam e um ramo da onda de

Rossby de fase negativa se estende para sudeste com centro de -20 W/m^2 . Com o deslocamento da fase positiva de Kelvin para o Oceano Atlântico e passando pela fase positiva da onda de Rossby, há um aumento das anomalias positivas de ROL no Atlântico equatorial. Nos dias 12 e 13, a onda de Rossby de fase negativa mantém a mesma velocidade de propagação e mesma intensidade. No dia 12, uma onda de Kelvin de fase positiva com 20 W/m^2 de intensidade e mesma latitude surge sobre a região centro-sul do Peru, retendo as anomalias negativas de ROL à leste da onda de Rossby. No dia 13, as ondas de Rossby de fases opostas se posicionam ambas em 10 S e 62 W , sendo a onda de Rossby com intensidade -28 W/m^2 e a onda de Kelvin com 24 W/m^2 . Nestes dois dias há o avanço da fase positiva de Rossby pela costa nordeste da região amazônica, ocasionando anomalias positivas de ROL nesta área. No dia 13, aparentemente a fase positiva da onda de Kelvin predominou sobre a fase negativa de Rossby, pois as anomalias positivas de ROL se estendem para a região central da Amazônia. Nos dias 14 e 15, a fase negativa da onda de Rossby continua seu deslocamento para oeste e começa a perder intensidade. No dia 14, as anomalias negativas são bem próximas de zero, mas no dia 15 há a rápida aproximação de uma onda de Kelvin de fase negativa, que contribui para o surgimento das anomalias negativas de ROL sobre o sul e leste da Amazônia. A onda de Rossby de fase positiva desaparece na Amazônia, deixando porém um resquício de anomalias positivas de ROL na porção nordeste da região. No oceano Atlântico, em cerca de $7,5 \text{ N}$ e 45 W surge um outro centro da onda de Rossby de fase negativa, o qual propaga para oeste com mesma velocidade e intensidade crescente. Após o dia 15 de maio, a onda de Rossby negativa sobre o continente sul-americano perde intensidade até se dissipar. Também após dia 15, a onda de Kelvin negativa adentra o continente por quase toda a região equatorial, causando anomalias negativas de ROL. A onda de Rossby negativa ao norte adentra o continente ao norte da Amazônia.

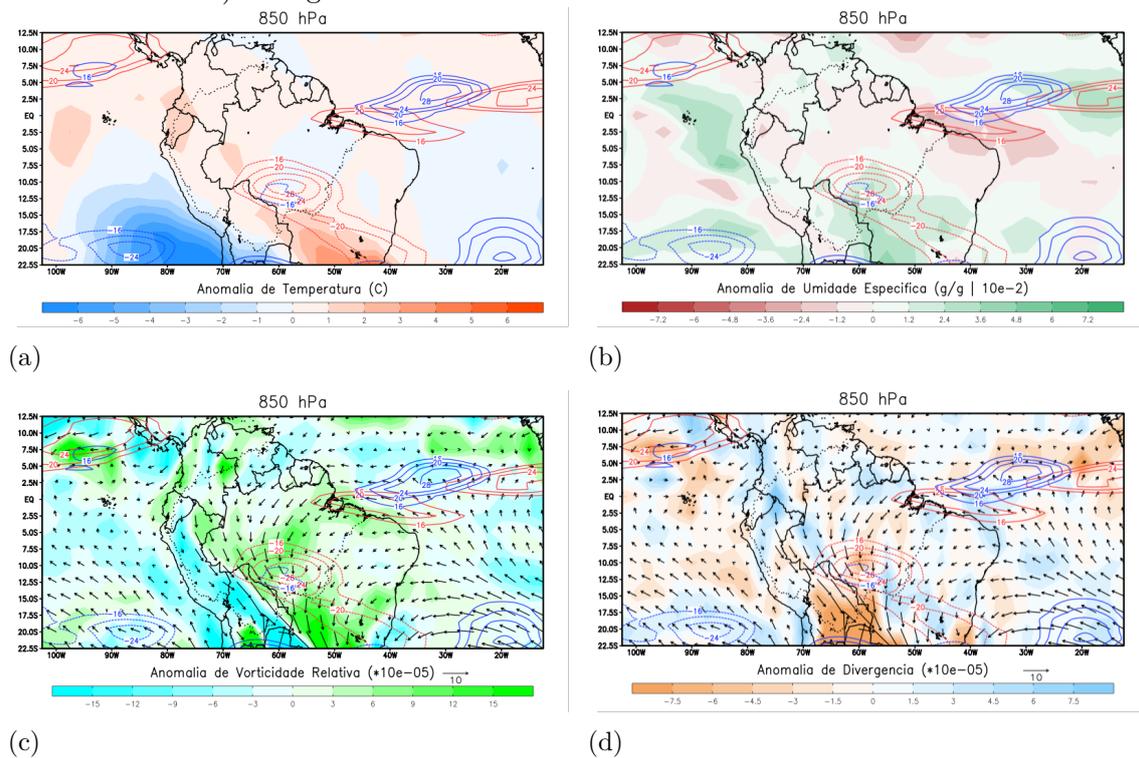
Figura 4.20 - Passagem de uma Onda de Rossby com fase negativa pela Amazônia no outono de 2015 entre os dias 08/05 e 15/05. Linhas vermelhas são Ondas de Rossby e linhas azuis Ondas de Kelvin.



As Figuras 4.21 à 4.23 mostram anomalias de variáveis meteorológicas associadas à este evento, para o dia 11 de maio de 2015, com o intuito de identificar características similares à outros eventos, separadas respectivamente entre baixos, médios

e altos níveis. Para os baixos níveis, nota-se um leve aquecimento (Figura 4.21a) em toda a Amazônia, sendo mais intenso à sudeste desta região, exceto por um esfriamento na porção leste. Um aumento da umidade (Figura 4.21b) na região da onda de Rossby e à sudeste dela, porém uma diminuição de umidade à norte da onda de Rossby também é observado nesse nível. Na Amazônia ocidental e na região da onda de Rossby, os ventos são anormalmente de nordeste e noroeste, com anomalia de vorticidade positiva (Figura 4.21c) (anticiclônica) na região da onda. Essa vorticidade positiva se estende para sudeste, enquanto ao sul existe uma região de vorticidade negativa (ciclônica). Observa-se também baixos valores anômalos de divergência (Figura 4.21d) ao norte e noroeste da onda de Rossby, porém há convergência ao sul da onda, aproximadamente mesma região de vorticidade ciclônica como vista na Figura 21c.

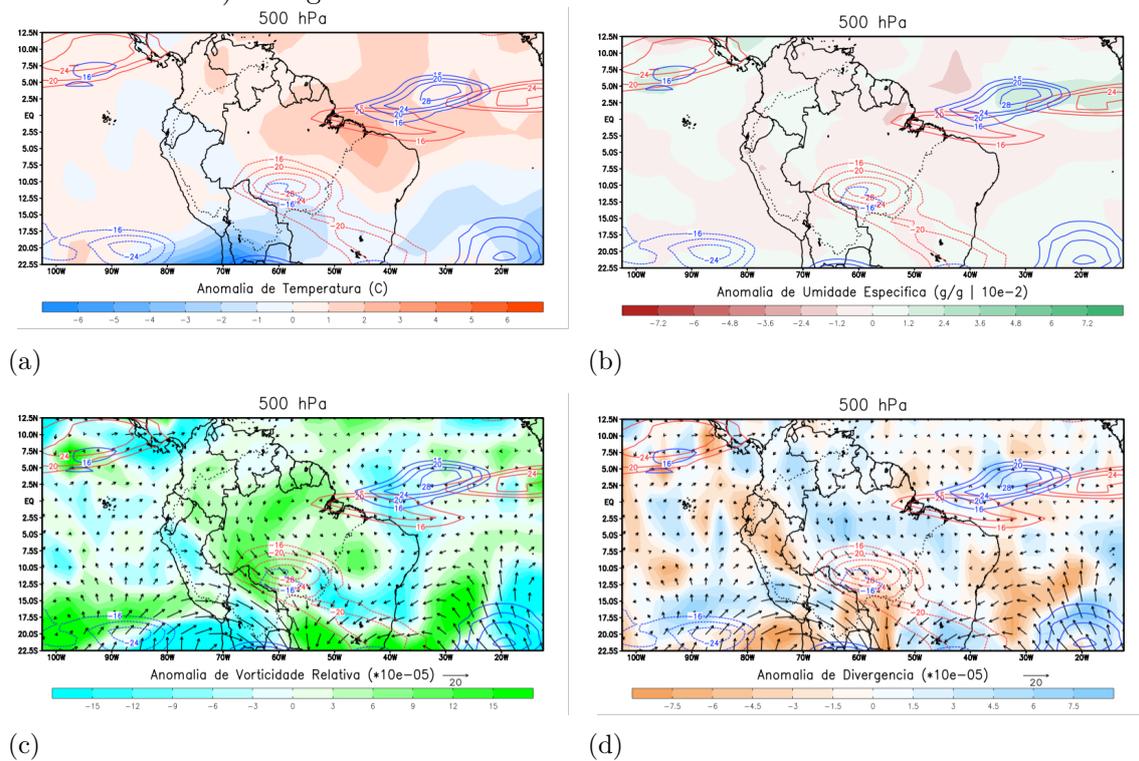
Figura 4.21 - Onda de Rossby (linhas vermelhas contínuas) e Onda de Kelvin (linhas azuis contínuas) na Amazônia e anomalias no nível 850 hPa de a) temperatura ($^{\circ}\text{C}$), b) umidade específica (g/g), c) vorticidade relativa e vento horizontal e d) divergência e vento horizontal no dia 11 de maio de 2015.



Em médios níveis, o aquecimento (Figura 4.22a) se concentra na porção nordeste da amazônia, enquanto na região sudoeste, inclusive em parte da região abrangida

pela onda de Rossby, há um esfriamento. O comportamento da umidade específica (Figura 4.22b) neste nível é o mesmo que em 850 hPa, porém com valores inferiores. Este nível apresenta ventos anômalos de noroeste na Amazônia e um fortalecimento da vorticidade ciclônica (Figura 4.22c) à sul-sudoeste. Anomalias de divergência (Figura 4.22d) persistem ao norte da onda de Rossby, com convergência ao sul.

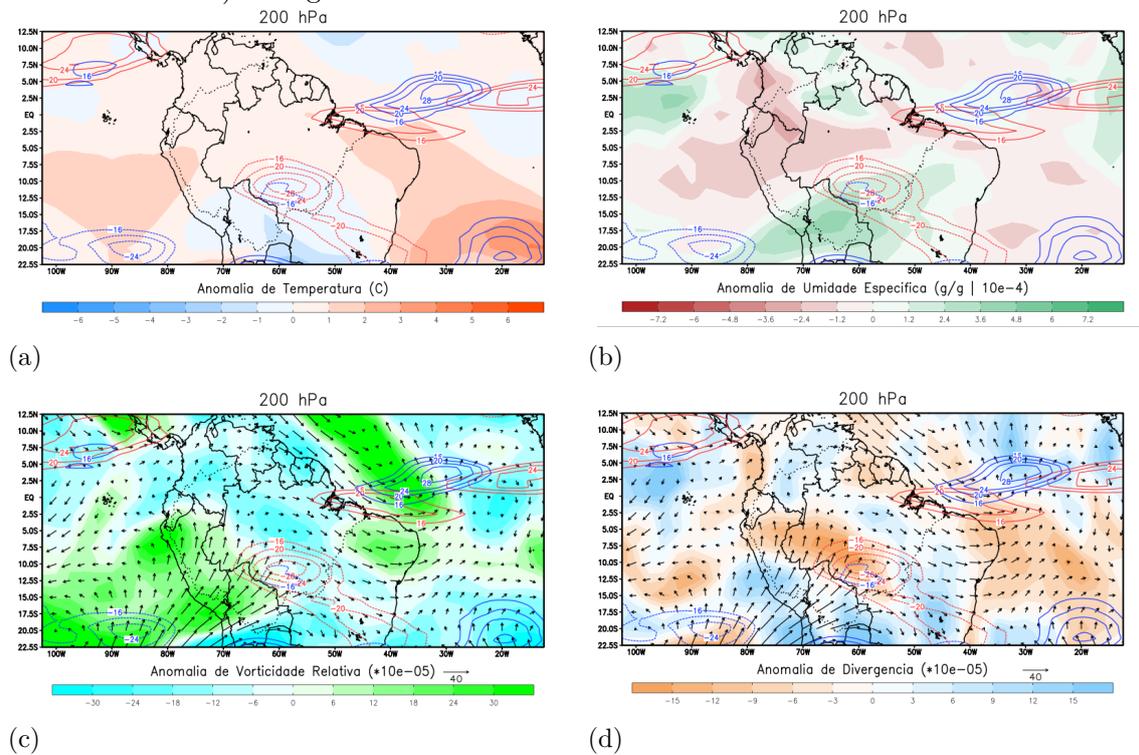
Figura 4.22 - Onda de Rossby (linhas vermelhas contínuas) e Onda de Kelvin (linhas azuis contínuas) na Amazônia e anomalias no nível 500 hPa de a) temperatura ($^{\circ}\text{C}$), b) umidade específica (g/g), c) vorticidade relativa e vento horizontal e d) divergência e vento horizontal no dia 11 de maio de 2015.



Para altos níveis, o aquecimento (Figura 4.23a) continua na maior parte da Amazônia, porém ao sul e no centro da onda de Rossby é visto um esfriamento. O aumento da anomalia de umidade (Figura 4.23b) na onda de Rossby ainda é visto, porém se estendendo para sudoeste. Ao norte as anomalias negativas aumentam e se estendem para porção oeste e leste da Amazônia. Anomalias positivas surgem na parte norte da Amazônia. Em altos níveis, o comportamento dos ventos anômalos se distingue, com ventos adentrando a Amazônia de sudoeste vindos do oceano Pacífico com anomalia de vorticidade positiva (Figura 4.23c), porém mudam de direção e

sentido na Amazônia central, onde prevalece a vorticidade ciclônica. Também há o fortalecimento do giro ciclônico ao sul e sudeste da onda de Rossby. Os ventos de sudoeste vem associados à divergência anômala (Figura 4.23d) no extremo sudoeste da região Amazônica. Essa divergência é substituída por convergência na região da onda de Rossby e à noroeste dela. A nordeste da onda de Rossby, volta a aparecer divergência anômala.

Figura 4.23 - Onda de Rossby (linhas vermelhas contínuas) e Onda de Kelvin (linhas azuis contínuas) na Amazônia e anomalias no nível 200 hPa de a) temperatura (°C), b) umidade específica (g/g), c) vorticidade relativa e vento horizontal e d) divergência e vento horizontal no dia 11 de maio de 2015.



Em uma comparação entre os dois eventos de ondas de Rossby negativas, pode-se destacar que o primeiro contou com dois núcleos de fase negativa da onda de Rossby se propagando juntos, um no HN e outro no HS, enquanto o segundo evento apresentou apenas um núcleo no HS. Ao se comparar o núcleo mais ao sul no primeiro evento com o núcleo do segundo, diversas características similares podem ser destacadas. Ambos possuem aumento de temperatura em baixos níveis e diminuição em médios e altos níveis. Ambos apresentaram aumento na umidade específica nos três níveis selecionados. Nos dois eventos, há um anticiclone anômalo em baixos e médios níveis

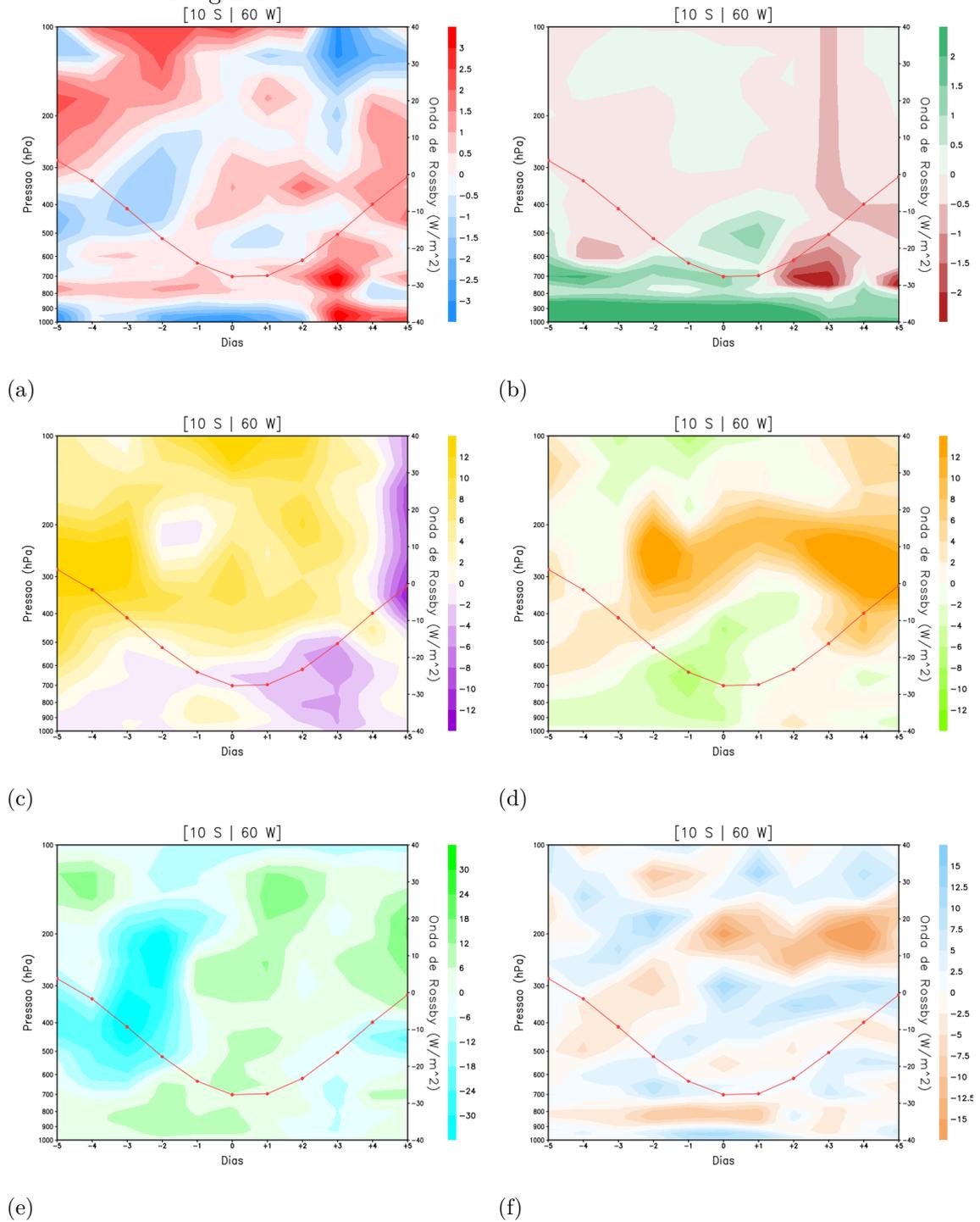
e um ciclone em altos níveis no núcleo da onda de Rossby. As diferenças surgem ao se comparar as anomalias de divergência. No primeiro evento, estas são praticamente nulas em baixos e médios níveis para a região do núcleo, apresentando divergência em altos níveis. Já o segundo evento possui divergência em baixos e médios níveis e convergência em altos níveis.

Na Figura 4.24, são vistos o perfil vertical durante a passagem desta onda centrada em 10 S e 60 W no dia 11 de maio de 2015. Assim, são acompanhadas a variação das anomalias das variáveis escolhidas desde 5 dias antes (06 de maio) até 5 dias depois (16 de maio). Vale ressaltar que no dia 12 e 13 (dias +2 e +3) a região foi impactada por uma onda de Kelvin vinda de oeste.

Nos primeiros dias, de -5 a -2, as anomalias de temperaturas (Figura 4.24a) eram negativas próximos à superfície, entre 1000 e 900 hPa, positivas entre 800 e 700 hPa, negativas em médios níveis (500 e 400 hPa) e positiva em altos níveis, entre 300 e 100 hPa. Do dia -1 ao dia +2, no ápice da fase negativa da onda, apesar das anomalias negativas permanecerem entre 1000 e 900 hPa, acima desta camada prevalecem anomalias positivas de temperatura, porém em algumas pequenas camadas podem ser observadas anomalias negativas. No dia +3 as anomalias positivas se fortalecem entre 1000 e 500 hPa e em 400 hPa, sendo substituídas por anomalias negativas entre 300 e 100 hPa. Esse comportamento é similar aos dias +4 e +5, com as anomalias positivas de 1000 hPa à 200 hPa e negativas de 200 hPa até 100 hPa. As anomalias de umidade (Figura 4.24b) mostram uma atmosfera mais úmida em baixos níveis, de 1000 à 600 hPa do dia -5 ao dia -1 e se estendendo para 400 hPa até o dia +1. As anomalias eram negativas acima desse nível, porém entre os dias -4 e -2 houve leves anomalias positivas entre 200 e 100 hPa e nos dias -1 e 0 eram positivas entre 300 e 100 hPa. Dessa forma, fica evidente uma troposfera mais úmida nos dias em que a onda de Rossby mais negativa esteve atuando na região. Com a aproximação da fase positiva da onda de Kelvin, a atmosfera se mostrou mais seca, especialmente entre 800 e 700 hPa nos dias +2 e +3, com anomalias de - 2 g/g, porém se estendendo com anomalias de - 1 g/g até 100 hPa nestes dias. A atmosfera continuou com anomalias negativas nos dias +4 e +5, porém menos pronunciadas. De acordo com as anomalias de vento zonal (Figura 4.24c) existe uma clara distinção entre a direção do vento entre baixos e altos níveis, sendo com predomínio de ventos anômalos de leste, na camada entre 1000 e 600 hPa e ventos anormalmente de oeste entre a camada 600 e 100 hPa. Os ventos anômalos em médios para altos níveis invertem de sinal e se tornam de leste apenas no dia +5, quando a onda de Rossby enfraquece (retorna à 0 W/m²). As anomalias de vento meridional (Figura 4.24d) apresentam

uma inversão similar. Os ventos foram de norte entre 1000 e 700 hPa do dia -5 ao dia +1, chegando até 400 hPa em 0 e +1. Em todos os dias, entre 400 e 200 hPa os ventos foram anormalmente de sul, chegando à + 10 m/s em cerca de 250 hPa. Do dia -5 a -2, anomalias de vorticidades (Figura 4.24e) positivas são encontradas entre 1000 e 700 hPa, com vorticidade negativa entre 700 e 200 hPa, indicando giro anticiclônico em baixos níveis e giro ciclônico em níveis médios e altos. Entre os dias -1 e +1, o ápice da fase negativa da onda, as anomalias positivas são vistas entre 1000 hPa e 100 hPa, mostrando um giro anormalmente ciclônico em todos os níveis da troposfera. Nos dias +2 e +3, anomalias negativas surgem de 1000 à 600 hPa e nos dias +4 e +5 entre 500 e 400 hPa, porém em altos níveis as anomalias permanecem positivas. As anomalias de divergência (Figura 4.24f) foram negativas entre 900 e 800 hPa (indicando convergência) com mais intensidade entre os dias -2 e +1. Entre os dias -4 e -1, as anomalias foram positivas entre 700 e 600 hPa, negativas por volta de 500 e 300 hPa e novamente positivas de 300 a 100 hPa. Dos dias -1 à +5, as anomalias mais intensas se localizam entre 400 e 300 hPa (positivas) e entre 300 e 150 hPa (negativas).

Figura 4.24 - Variação de intensidade da Onda de Rossby para o centro de maior passagem da onda dos dias 06/05 (-5) até 16/05 (+5) de 2015 entre 1000 hPa e 100 hPa com as anomalias de a) temperatura ($^{\circ}\text{C}$), b) umidade específica (g/g), c) vento zonal (m/s), d) vento meridional (m/s), e) vorticidade relativa e f) divergência.



Diversas similaridades também surgem ao comparar a passagem da onda deste evento com o anterior. Ambos os eventos contaram com o aquecimento da coluna troposférica durante e após a passagem do pico negativo, ainda que no segundo evento haja esfriamento em altos níveis. Houve aumento na umidade específica em todos os dias antes e depois da passagem da onda em baixos níveis e uma diminuição entre 800 e 600 hPa nos dias em que a intensidade da onda aumentava e retornava para a neutralidade. Em ambos os casos houve uma clara distinção entre ventos de leste em baixos níveis e ventos de oeste em altos níveis. No primeiro evento, houve uma inversão dos ventos de altos níveis, que eram de norte e se tornaram de sul com a passagem da onda, enquanto no segundo evento o vento meridional foi de sul em todos os dias. Os dois eventos também apresentam vortacidade ciclônica de baixos à altos níveis antes da passagem da onda e uma troca para anticiclônica nos dias mais negativos da onda e nos dias seguintes. Mudanças mais acentuadas são observadas nas anomalias de divergência que mostra uma mudança quase completa. Enquanto nos dois eventos há convergência em baixos níveis, no primeiro há convergência em médios níveis e divergência em altos, o que é mais compatível com um evento em que a convecção se encontra acima da média, enquanto no segundo evento há divergência em médios níveis e convergência em altos níveis.

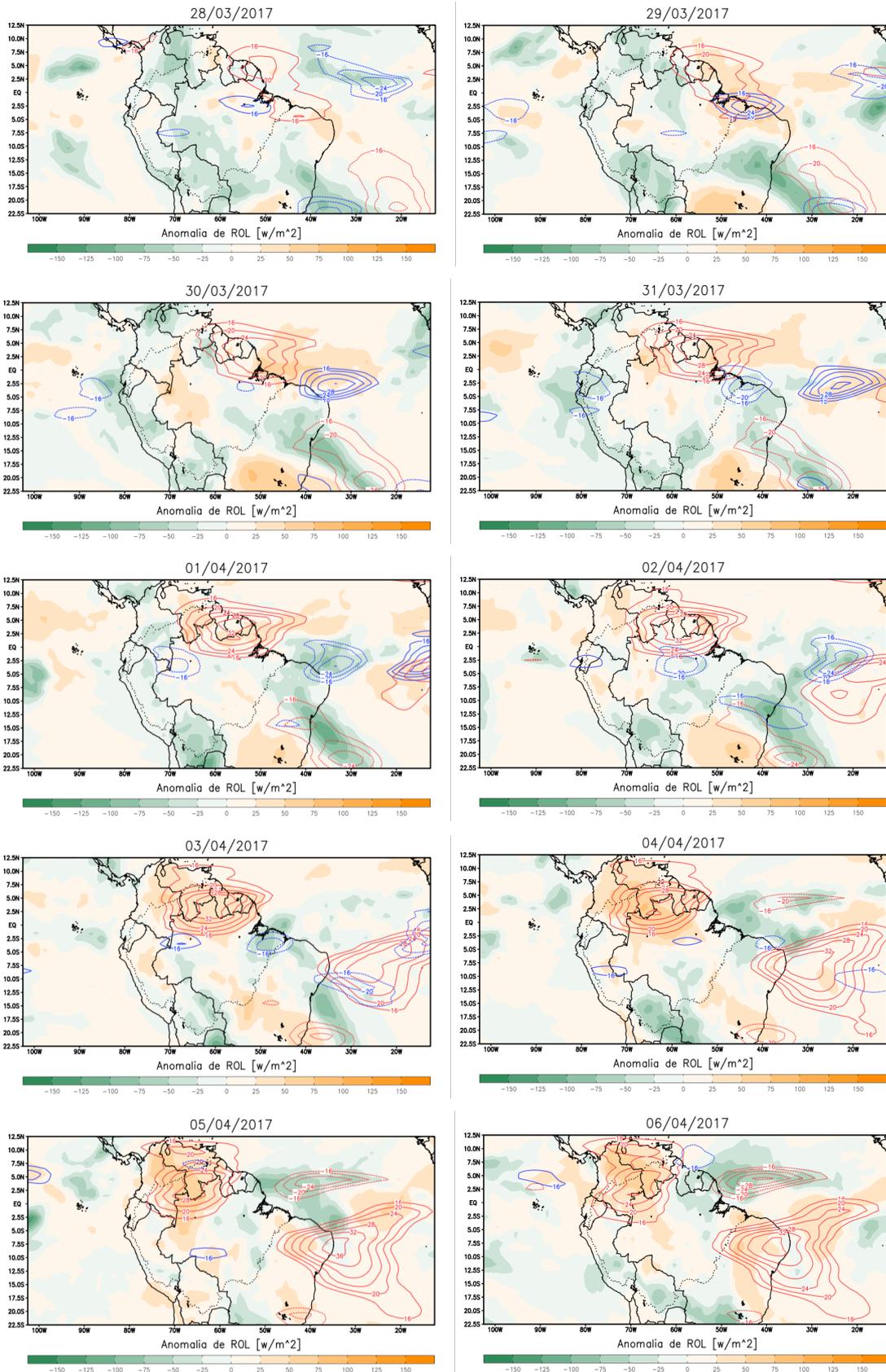
4.1.3 Terceiro evento

Na Figura 4.25 e Tabela A.5 (Apêndice A), uma onda de Rossby com fase positiva adentra a Amazônia entre os dias 28 de março e 06 de abril de 2017. O outono deste ano foi caracterizado por índice MMA negativo, ou seja, temperaturas mais frias no Oceano Atlântico Sul. No dia 28 de março, a onda se encontrava na costa nordeste da Amazônia, com um núcleo de 20 W/m^2 centrado em aproximadamente 5 S e 52 W , mas se estendendo para sudeste até cerca de 5 S e 40 W . Na Amazônia, nota-se uma onda de Kelvin com fase positiva em cerca de 2.5 S e 54 W e a fase negativa em 7.5 S e 70 W . Neste dia, as anomalias positivas de ROL são próximas a zero e localizadas na porção nordeste da Amazônia, com anomalias negativas mais intensas na parte sudoeste. A fase negativa da onda de Rossby se localiza sobre o oceano Atlântico, com núcleo em cerca de 21 S e 22 W (30° de longitude de distância), estendendo sua atuação para nordeste até cerca de 12 S e 30 W . No dia 29, a onda de Rossby aumenta sua área de atuação e se intensifica para sudeste, porém o centro da onda não parece se deslocar. A onda de Kelvin positiva se desloca para para cerca de 2.5 S e 45 W , entrando em fase com parte da onda de Rossby e se intensificando. Com isso, no Oceano Atlântico adjacente as anomalias positivas de ROL se intensificam. A fase negativa da onda de Kelvin se desloca

para 7.5 S e 60 W, com anomalias negativas de ROL à norte, sudoeste e sudeste dela. O núcleo da fase negativa de Rossby se desloca 2° para oeste, mas sua região à noroeste aumenta de forma a se aproximar mais rapidamente do continente até cerca de 12 S e 38 W. Nos dias 30 e 31, há o fortalecimento da fase positiva da onda de Rossby e o deslocamento de 2° de longitude para oeste ao mesmo tempo que enfraquece seu ramo à sudeste. A fase negativa da onda de Kelvin avança ao sul da onda de Rossby e se intensifica sobre o nordeste brasileiro. As anomalias positivas de ROL no dia 30 se mantêm principalmente sobre o oceano Atlântico e no centro da onda de Rossby, além da porção oeste do estado do Amazonas e o estado do Acre no Brasil. A fase negativa da onda de Rossby adentra o continente ao sul do nordeste brasileiro, associado com anomalias negativas de ROL. Nos dias 01 e 02 de abril, a onda se desloca mais lentamente, além de se estender levemente para o sul no dia 02, de forma a alcançar 3 N no segundo dia de abril. Uma outra onda de Kelvin de fase negativa vinda do Pacífico, encontra-se sobre o oeste da Amazônia no dia 01 e passa ao sul da onda de Rossby no dia 02. As anomalias de ROL no dia 01 eram positivas ao norte da Amazônia, associadas com a onda de Rossby, e negativas a oeste devido a presença da onda de Kelvin negativa e ao sul. No dia 02, as anomalias positivas permaneceram ao norte e também estiveram presentes no oeste, enquanto parte central, sul e leste se mantiveram com anomalias negativas de ROL por possível efeito da onda de Kelvin. Nestes dias, a fase negativa da onda de Rossby continua a avançar pelo continente, porém perdendo intensidade. Uma nova onda de Rossby com fase positiva surge no oceano Atlântico vinda de leste, onde no dia 02 se localiza em 7.5 S e 20 W com intensidade em seu centro de 24 W/m². Nos dias 03 e 04 de abril a onda de Rossby no continente volta a se deslocar 2° para oeste diariamente. A intensidade em seu centro se mantém a mesma no dia 03, porém, começa a diminuir no dia 04. Além disso, no dia 04 há a divisão do centro em dois núcleos menores, um deles em 5 N e outro em 2.5 N. A região da onda de Rossby continua sendo capaz de gerar anomalias positivas de ROL ao norte da Amazônia. A fase positiva da onda de Kelvin passa ao sul da onda de Rossby, ampliando a área das anomalias de ROL para a Amazônia central. As anomalias negativas de ROL são vistas na porção leste e sul da região. A fase negativa da onda de Rossby perde mais intensidade e diminui sua área de atuação, restando apenas o núcleo ao sul, que se aproxima do continente em cerca de 21 S e 40 W. Ainda no dia 04, um outro centro da fase negativa da onda de Rossby surge no hemisfério norte, sobre o oceano Atlântico em cerca de 4 N e 34 W (28° de longitude de distância da fase positiva) e anomalias negativas de ROL na região da onda e à sul-sudoeste dela. Entre as ondas de fase negativa, está a outra onda de Rossby positiva, que começa

a adentrar o continente em 7.5 S após ter viajado 5° de longitude por dia e agora ter o núcleo com 32 W/m² de intensidade. Nos dias 05 e 06, a onda de Rossby com fase positiva começa a sair da Amazônia, estando sobre Venezuela, Colômbia e parte da Amazônia, e continua a perder intensidade. As anomalias positivas de ROL se mantêm no noroeste e oeste da Amazônia. A fase negativa da onda de Rossby perde intensidade ao sul e desaparecerá após o dia 06, enquanto ao norte ganha intensidade nos dias que passam, no dia 06 se posicionando em 4 N e 40 W com intensidade de - 30 W/m² no centro. Permanecem as anomalias negativas de ROL na região desta onda e no nordeste da Amazônia, com a aproximação desta onda de fase negativa. Ao sul desta, a outra onda de Rossby positiva avança pelo continente afetando o nordeste brasileiro com anomalias positivas de ROL.

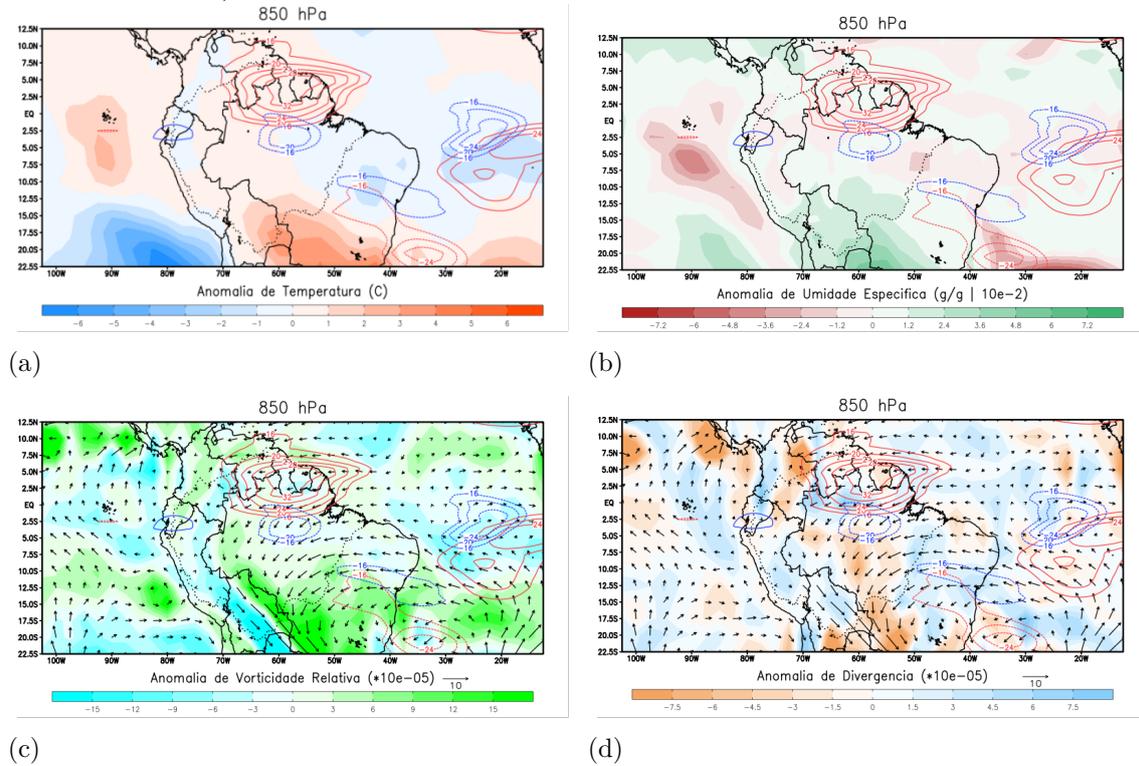
Figura 4.25 - Passagem de uma Onda de Rossby com fase positiva pela Amazônia no outono de 2017 entre os dias 28/03 e 06/04. Linhas vermelhas são Ondas de Rossby e linhas azuis Ondas de Kelvin.



Nas Figuras 4.26 à 4.28, são apresentadas as anomalias das variáveis a) temperatura, b) umidade específica, c) vorticidade relativa e vento horizontal e d) divergência e vento horizontal para níveis baixos, médios e altos da troposfera para o dia 02 de abril, em um dos dias em que a onda positiva de Rossby esteve mais intensa e ocasionando anomalias positivas de ROL no norte da Amazônia.

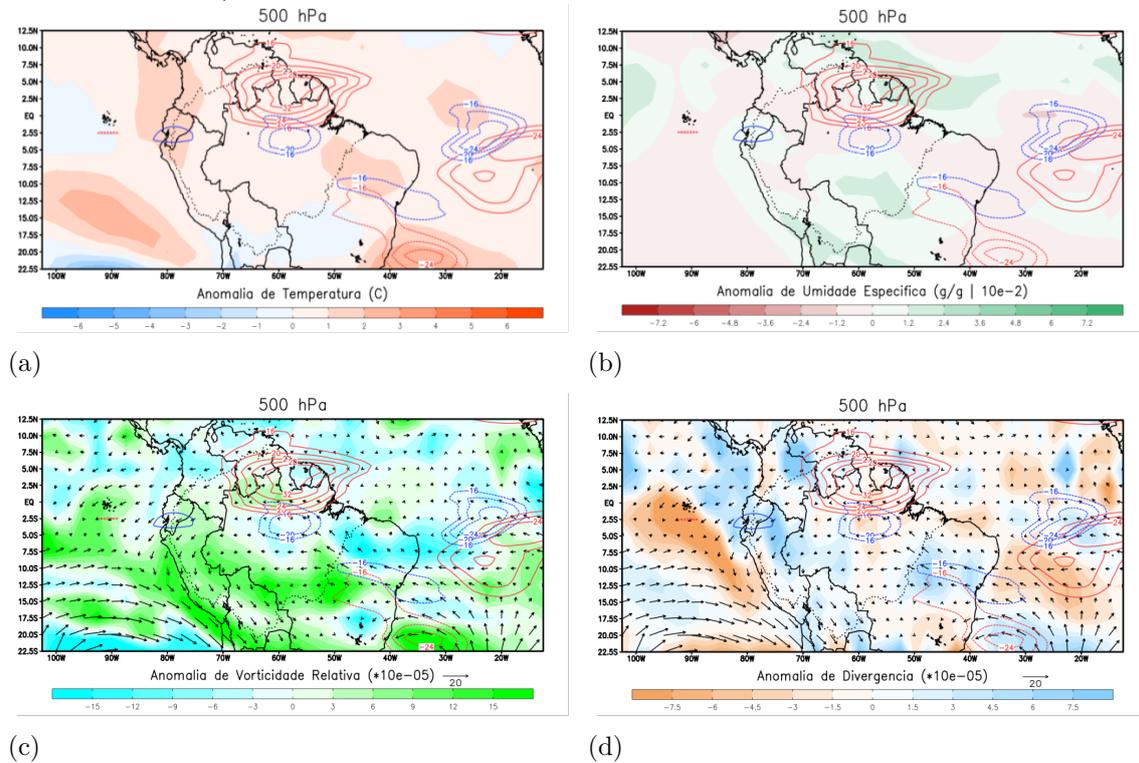
Em baixos níveis, a Amazônia apresenta anomalias positivas de temperatura próximas da normalidade (Figura 4.26a), entre 0 e 1 °C em sua maioria, exceto na porção leste da Amazônia e nordeste brasileiro, com anomalias negativas de até -1 °C. No extremo sul da Amazônia as anomalias positivas são mais intensas. As anomalias de umidade (Figura 4.26b) são levemente positivas no centro da onda de Rossby e negativas em seu entorno. Valores maiores de anomalias positivas são observados ao sul da Amazônia. Em baixos níveis, os ventos são anormalmente de leste e de nordeste na Amazônia, com anomalias positivas de vorticidade (Figura 4.26c) na fronteira sul da Amazônia. As anomalias de divergência (Figura 4.26d) se aproximam de 0 em toda a Amazônia, com valores levemente positivos na região à oeste da onda de Rossby.

Figura 4.26 - Onda de Rossby (linhas vermelhas contínuas) e Onda de Kelvin (linhas azuis contínuas) na Amazônia e anomalias no nível 850 hPa de a) temperatura ($^{\circ}\text{C}$), b) umidade específica (g/g), c) vorticidade relativa e vento horizontal e d) divergência e vento horizontal no dia 02 de abril de 2017.



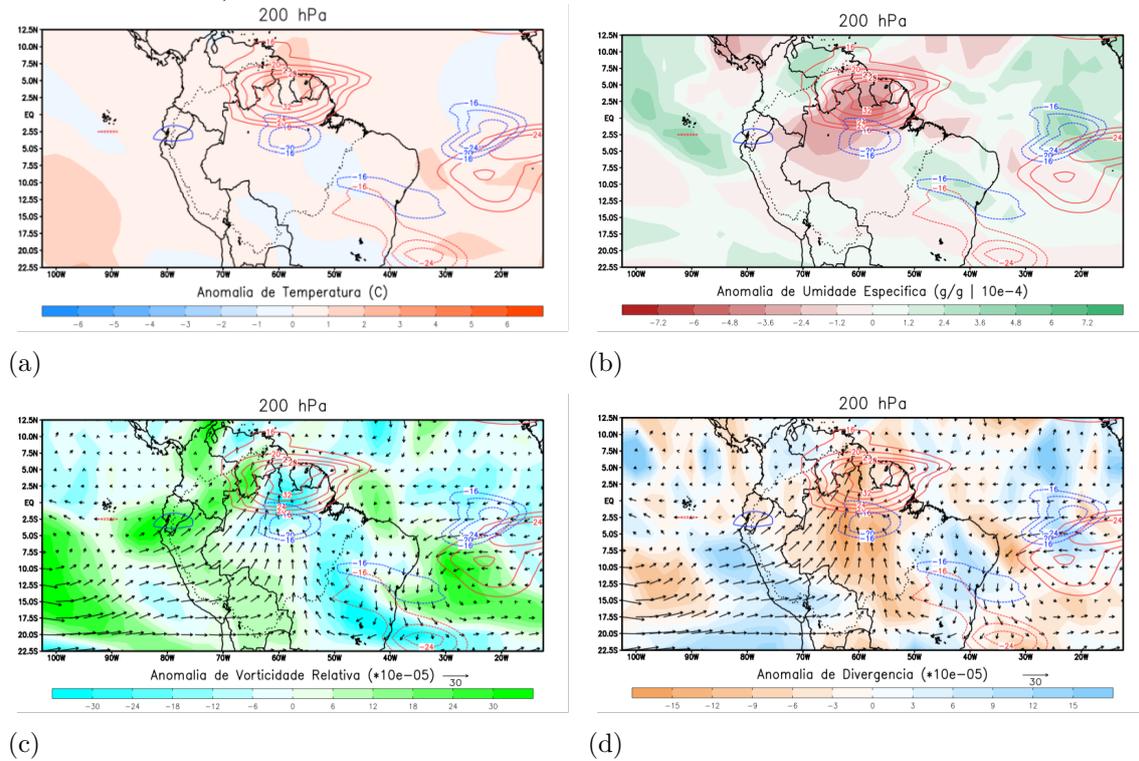
Em médios níveis, as anomalias de temperatura (Figura 4.27a) permanecem positivas e próximas da normalidade (até $+1^{\circ}\text{C}$) na Amazônia. O comportamento das anomalias de umidade (Figura 4.27b) são semelhantes aos baixos níveis, sendo positivas no centro da onda de Rossby e negativas no entorno, com anomalias positivas mais intensas ao sul da Amazônia. Em médios níveis, a intensidade dos ventos são consideravelmente menores na região da onda, com ventos de sudeste na porção leste da Amazônia e de nordeste no sudoeste da Amazônia. A vorticidade (Figura 4.27c) é positiva em toda a porção sul da Amazônia e negativa na porção centro-leste. As anomalias de divergência (Figura 4.27d) são positivas e próximas a zero na região central e norte da Amazônia, com maior intensidade na porção oeste e noroeste.

Figura 4.27 - Onda de Rossby (linhas vermelhas contínuas) e Onda de Kelvin (linhas azuis contínuas) na Amazônia e anomalias no nível 500 hPa de a) temperatura (°C), b) umidade específica (g/g), c) vorticidade relativa e vento horizontal e d) divergência e vento horizontal no dia 02 de abril de 2017.



Em altos níveis, as anomalias de temperatura (Figura 4.28a) são positivas e maiores (com relação a baixos e médios níveis) ao norte do centro da onda de Rossby de fase positiva. Nesses níveis, a região afetada pela onda de Rossby se mostra anormalmente mais seca (Figura 4.28b), inclusive à sudoeste dela. Os maiores valores de anomalias de vorticidade (Figura 4.28c) são vistos nesse nível, em comparação com os baixos e médios níveis. Estes são positivos no oeste da Amazônia e negativos no leste. Os ventos convergem na região da onda, gerando uma forte convergência em uma faixa central que vai de sul a norte na Amazônia e que compreende a região da onda de Rossby positiva: (Figura 4.28d). Assim, é uma região de convergência que fica entre uma circulação anticiclônica à oeste e uma ciclônica à leste, como pode ser visto na Figura 4.28c.

Figura 4.28 - Onda de Rossby (linhas vermelhas contínuas) e Onda de Kelvin (linhas azuis contínuas) na Amazônia e anomalias no nível 200 hPa de a) temperatura ($^{\circ}\text{C}$), b) umidade específica (g/g), c) vorticidade relativa e vento horizontal e d) divergência e vento horizontal no dia 02 de abril de 2017.

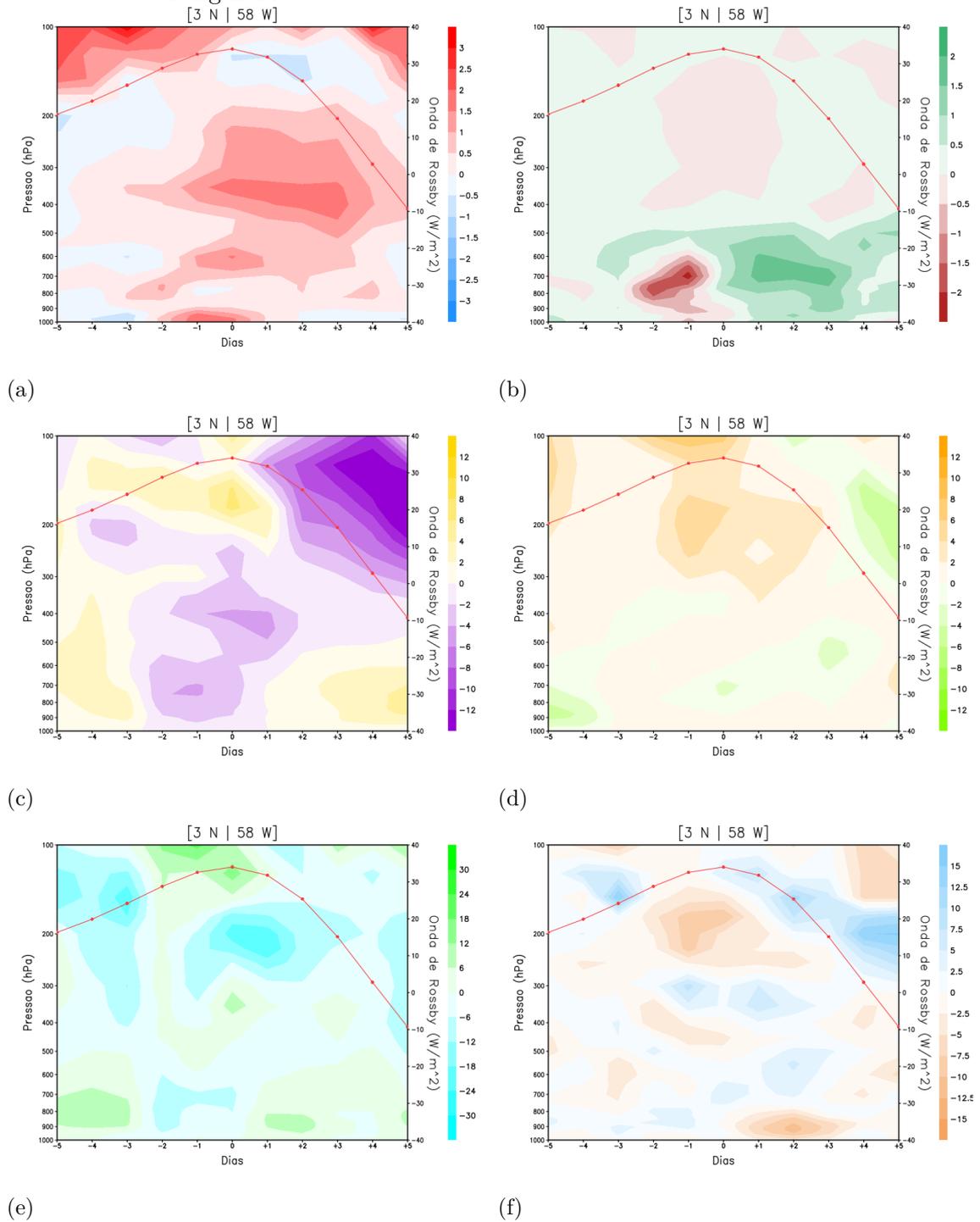


O terceiro evento apresentou aumento de temperatura nos três níveis na região de atividade da onda, similar ao primeiro evento. A umidade específica apresentou aumento nos baixos e médios níveis, com diminuição no entorno do núcleo, e diminuição de umidade em altos níveis. Comparativamente, essas anomalias são mais parecidas com aquelas do segundo evento do que com as do primeiro. É notável leve giro ciclônico na região da onda em baixos níveis e anticiclônico em altos níveis, fato que a princípio contradiz as anomalias de divergência generalizada em baixos níveis com convergência em altos níveis, mas observando o campo de vento em altos níveis, pode-se notar que a convergência é resultado da confluência dos ventos. Por mais que o comportamento da vorticidade seja distinto nos dois eventos anteriormente analisados, o mesmo padrão de divergência que foi encontrado nos dois eventos anteriores se faz presente: divergência em baixos níveis e convergência em altos níveis, ainda que no segundo evento a divergência só seja vista no núcleo do HN.

Na Figuras 4.29, é abordado as características das anomalias na vertical entre 5 dias

antes até 5 dias depois do dia 02 de abril, ou seja, entre os dias 28 de março e o dia 07 de abril de 2017. Observa-se na Figura 4.29a que há um leve esfriamento de -1 °C nos dias -5 e -4 desde os baixos níveis até 200 hPa, mas após estes dois dias é notável um aquecimento de toda a coluna troposférica, em especial entre 1000 e 900 hPa nos dias -1 e 0 e entre 400 e 300 hPa dos dias 0 a +4, com anomalias de cerca de $+1.5$ °C. Há um pequeno esfriamento de -1.5 °C em 150 hPa nos dias 0 e +1, durante o máximo da atividade da onda de Rossby. As anomalias de umidade específica (Figura 4.29b) são negativas em baixos e médios níveis, entre 900 e 600 hPa, nos dias -2 e -1 e positivas dos dias +1 até +4 entre 900 e 500 hPa, assim, mostrando uma atmosfera mais seca antes da passagem da onda e após o máximo dela a atmosfera se tornou mais úmida. Em altos níveis, a atmosfera é levemente mais seca entre os dias -1 e +2, apesar de ser mais úmida antes e depois destes dias. O comportamento das anomalias de vento zonal (Figura 4.29c) é semelhante ao primeiro caso e distinto do segundo. Os ventos são anormalmente de oeste entre dias -5 e -3 entre 1000 e 300 hPa e se tornam de leste com o pico da onda entre dias -2 e +1, com as anomalias de leste indo de 1000 à 200 hPa. Em altos níveis, os ventos são anormalmente de oeste entre 200 e 100 hPa, só havendo uma alternância para ventos de leste com o decaimento da onda dos dias +2 à +5. As anomalias de vento meridional (Figura 4.29d) apresentam ventos com velocidade próxima a zero da superfície até 300 hPa em todos os dias. Diferente dos outros eventos de fase positiva, os ventos entre 300 hPa e 100 hPa se tornam intensos e anormalmente de sul durante o máximo da onda entre dias -2 e +2, enquanto nos outros eventos as anomalias eram de norte durante o pico. Entre os dias -5 a -3, as anomalias de vorticidade (Figura 4.29e) são positivas entre 1000 e 700 hPa e negativas entre 400 e 100 hPa. Dos dias -2 até dia 0, as anomalias negativas prevalecem da superfície até 200 hPa, com anomalias positivas apenas surgindo entre 200 e 100 hPa, indicando um anticiclone desde os baixos até altos níveis. Nos dias +1 e +2, o núcleo máximo de anomalias positivas surge entre 1000 e 800 hPa, porém, nesses dias o núcleo máximo de anomalias negativas vai de 300 à 100 hPa. Com relação à seção vertical das anomalias de divergência, observa-se que nos dias +4 e +5 havia anomalias negativas entre 600 e 150 hPa. Entre os dias -4 e -3 havia divergência (Figura 4.29f) entre 200 e 100 hPa e entre os dias -2 a 0, havia convergência anômala em 200 hPa, apesar do giro anticiclônico visto na Figura 4.28 para este nível, com divergência por volta de 400 e 300 hPa. Nos dias +1 a +3, há convergência entre 1000 e 900 hPa e divergência entre 200 e 100 hPa, compatível com o sentido do giro observado na figura anterior, sendo ciclônico em baixos níveis e anticiclônico em altos níveis.

Figura 4.29 - Variação de intensidade da Onda de Rossby para o centro de maior passagem da onda dos dias 28/03 (-5) até 07/04 (+5) de 2017 entre 1000 hPa e 100 hPa com as anomalias de a) temperatura ($^{\circ}\text{C}$), b) umidade específica (g/g), c) vento zonal (m/s), d) vento meridional (m/s), e) vorticidade relativa e f) divergência.

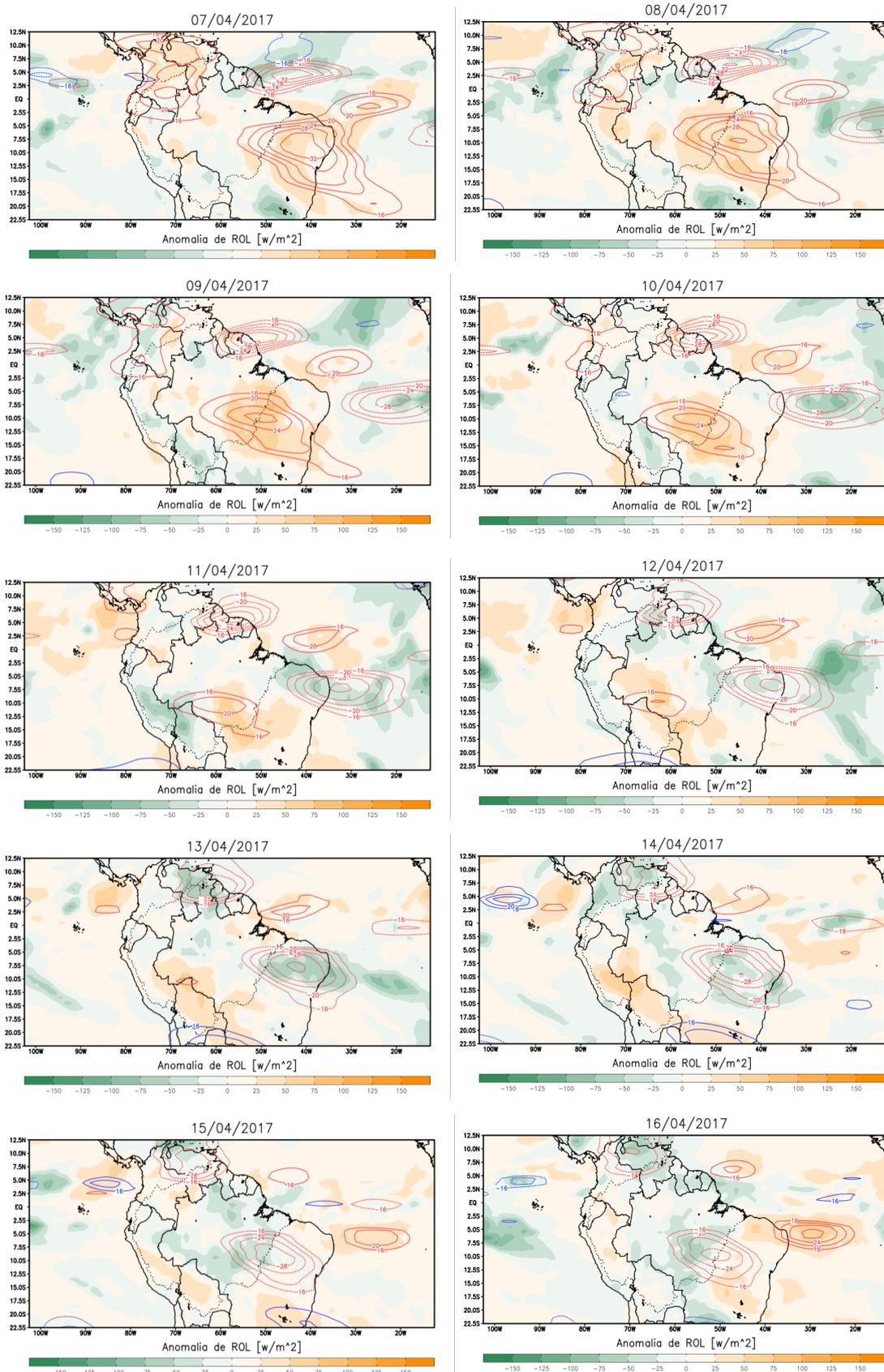


Analisando este evento em comparação com os anteriores, tornam-se evidentes as semelhanças: aumento da temperatura na coluna troposférica e convergência em altos níveis durante a atividade máxima da onda, porém com giro anticiclônico em altos níveis ao invés de ciclônicos. No terceiro evento, notou-se aumento de umidade específica em baixos e médios níveis, semelhante apenas ao núcleo do HS no segundo evento. Os ventos zonais são anormalmente de leste em baixos e médios níveis e de oeste em altos níveis durante o pico da onda, algo semelhante ao segundo evento, porém com os ventos em alto níveis em intensidade menor do que durante o segundo evento. Também durante o pico da onda, os ventos em altos níveis foram intensos e anormalmente de sul, similar apenas ao núcleo do HS do primeiro evento.

A fase negativa desta mesma onda de Rossby é vista através da Figura 4.30 e Tabela A.6 (Apêndice A). Como dito anteriormente, há o enfraquecimento e desaparecimento do núcleo que se propagava ao sul, porém com um fortalecimento do núcleo ao norte, no dia 07 de abril de 2017, localizado em aproximadamente 5 N e 46 W com intensidade de -32 W/m^2 em seu centro. A fase positiva da onda de Rossby se encontra em cerca de 7,5 S e 42 W, com intensidade de 32 W/m^2 . Neste dia as anomalias positivas de ROL se encontram na porção oeste da Amazônia, efeito dos resquícios da antiga onda de Rossby de fase positiva, enquanto anomalias negativas são vistas no Atlântico equatorial e norte com a fase negativa da onda de Rossby e anomalias positivas de ROL no nordeste brasileiro, associadas à fase da segunda onda de Rossby positiva. No dia 08, as ondas avançam para oeste, com a fase positiva no continente se deslocando mais rápido do que a fase negativa ao norte. Ambas permanecem com as mesmas intensidades em seus núcleos e conforme avançam sobre a Amazônia, impactam na nebulosidade: a fase negativa causando diminuição de ROL no norte da Amazônia e a fase positiva aumentando ROL no leste da Amazônia. Uma parte à nordeste da onda de fase positiva se “desprende” a nordeste no Oceano Atlântico, com intensidade máxima de 20 W/m^2 em 0° de latitude e em 30 W. No dia 09 com o avanço mais lento da onda negativa, os dois núcleos da onda de Rossby de fases opostas se encontram na mesma faixa de longitude de 50 W. Enquanto a onda de fase negativa mantém a mesma intensidade, a onda positiva enfraquece. Na Amazônia, as anomalias de ROL mais significativas são na porção leste associadas à onda de Rossby de fase positiva. A onda no oceano na latitude equatorial continua se propagando para oeste, bem como uma nova onda de fase negativa que surge com núcleo em aproximadamente 6 S e 22 W. No dia 10 de abril, ambas as ondas sobre o continente se deslocam com mesma velocidade de propagação, com a onda positiva ao sul perdendo mais intensidade. Apesar de mais intensa negativamente, a onda ao norte não parece ocasionar anomalias negativas de ROL ao seu entorno, enquanto

que a onda ao sul continua fortemente associada com anomalias positivas de ROL, agora no sudeste da Amazônia. No dia 11, as ondas ao norte e ao sul da Amazônia perdem intensidade e deixam de se propagar com a mesma velocidade, com a onda positiva ao sul novamente se tornando a mais rápida. No centro da onda ao sul e à sudeste dela, as anomalias de ROL são positivas, enquanto que à sudoeste são negativas. Para o dia seguinte, dia 12, a onda negativa ao norte mantém a mesma intensidade e velocidade, dessa vez com a presença de anomalias negativas de ROL na sua região de atuação ao norte da Amazônia. A onda de fase positiva continua se deslocando para oeste e perdendo intensidade, mas mesmo assim causando anomalias positivas de ROL no sul-sudoeste da Amazônia. Nos dias 13 e 14 de abril, a onda negativa se deslocou com a mesma velocidade e com intensidade de -24 W/m^2 em seu centro. A onda positiva perde intensidade até desaparecer, porém anomalias positivas de ROL permanecem no sudoeste da Amazônia no dia 14. A segunda onda negativa adentra a Amazônia vinda de leste e as anomalias negativas de ROL se concentram no norte, centro e leste da Amazônia com estas ondas. Nos dias 15 e 16, a onda de fase negativa se propaga para nordeste, saindo da Amazônia e perdendo cada vez mais intensidade até desaparecer nos dias seguintes. Apesar disso, nestes dias predominam as anomalias negativas de ROL na Amazônia brasileira com o avanço da segunda onda negativa para a Amazônia.

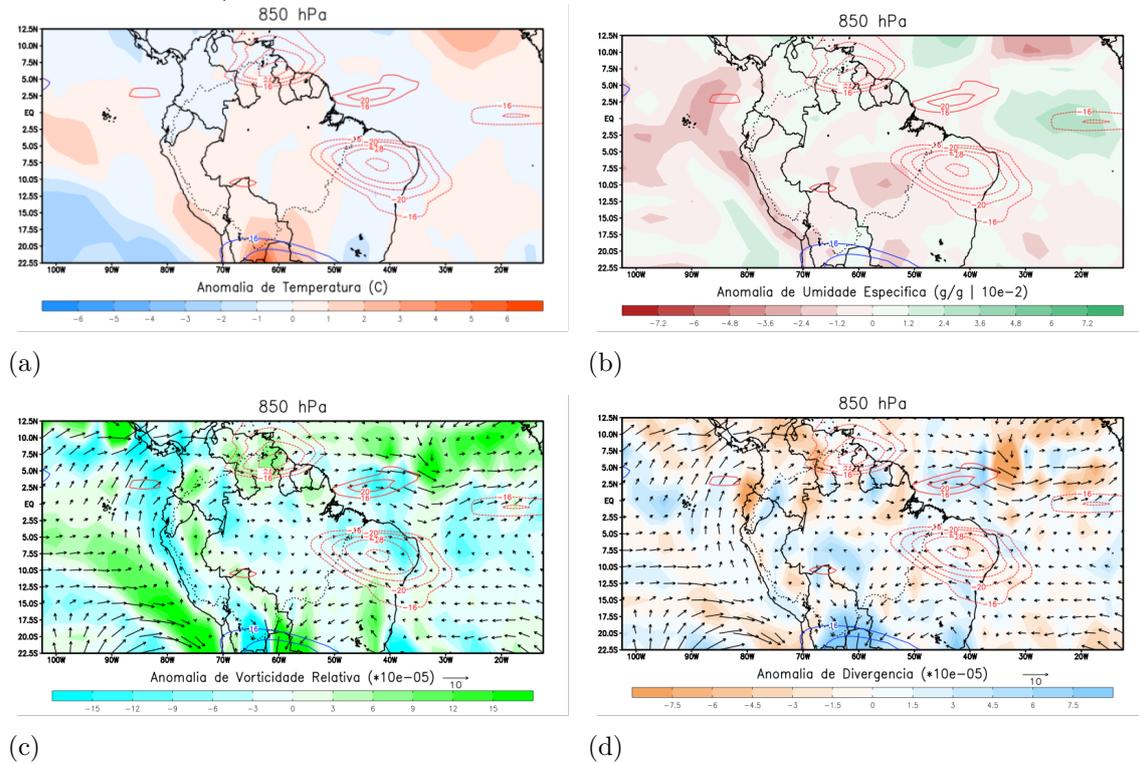
Figura 4.30 - Passagem de uma Onda de Rossby com fase negativa pela Amazônia no outono de 2017 entre os dias 07/04 e 18/04. Linhas vermelhas são Ondas de Rossby e linhas azuis Ondas de Kelvin.



As características horizontais das anomalias de variáveis meteorológicas são vistas da Figura 4.31 à 4.33, com enfoque no dia 13 de abril de 2017, pois, conforme visto na Figura 4.30, a onda de fase negativa se mostra intensa e ocasionando anomalias negativas de ROL na porção norte da Amazônia.

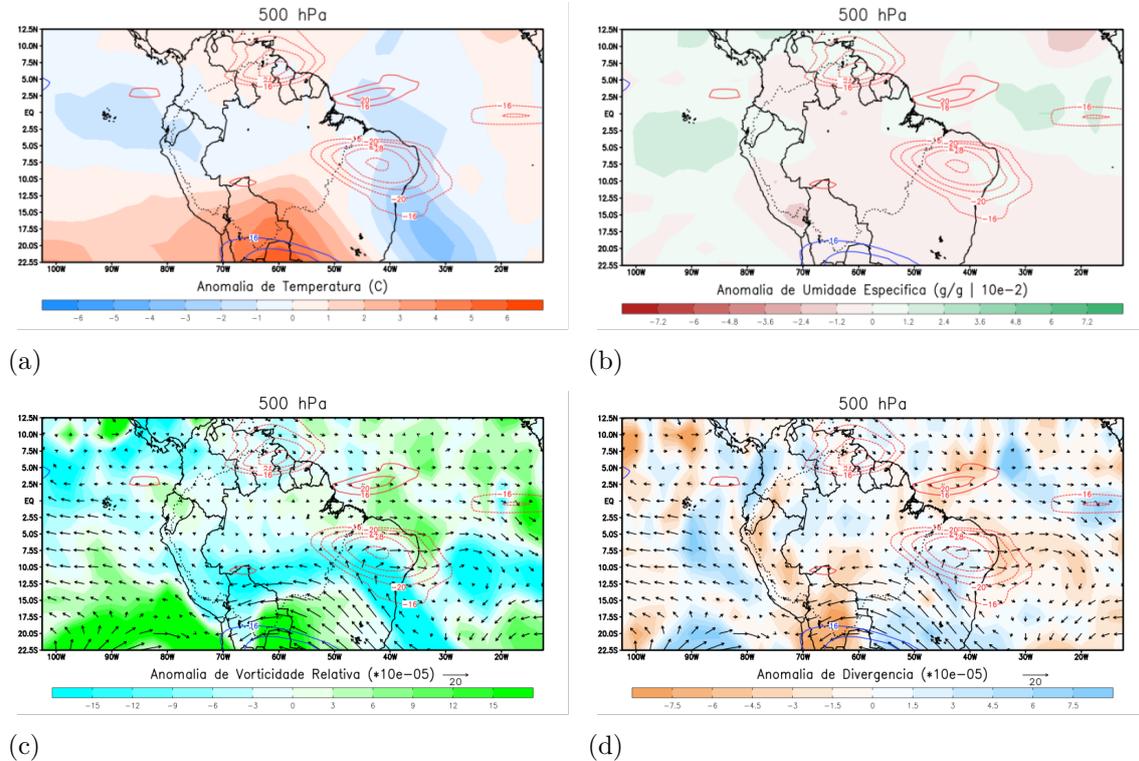
Assim, na Figura 4.31 é visto o campo horizontal das anomalias para baixos níveis. Nota-se anomalias positivas de temperatura (Figura 4.31a) na região central da Amazônia, mas estas são negativas nas regiões de atuação das ondas de Rossby em sua fase negativa. Ao sul da Amazônia são observados altos valores de anomalias positivas associadas com a fase positiva da onda de Kelvin na região. As anomalias de umidade específica (Figura 4.31b) são próximas a normalidade em toda a Amazônia, sendo levemente negativas em boa parte da região, exceto no nordeste com anomalias levemente positivas. Para a onda de Rossby negativa sobre o norte da Amazônia, as anomalias de vorticidade (Figura 4.31c) são positivas, enquanto estas são negativas para a onda ao sul, no nordeste brasileiro. Ou seja, são anomalias ciclônicas em ambos os casos. Os ventos são fracos na Amazônia e com uma circulação ciclônica na região central. Nota-se convergência (Figura 4.31d) nas regiões da onda de Rossby negativa, tanto naquela ao norte da Amazônia, quanto aquela no nordeste brasileiro. Ao sul destas, há divergência. Na Amazônia, as anomalias são predominantemente negativas na porção norte e positivas ao sul.

Figura 4.31 - Onda de Rossby (linhas vermelhas contínuas) e Onda de Kelvin (linhas azuis contínuas) na Amazônia e anomalias no nível 850 hPa de a) temperatura ($^{\circ}\text{C}$), b) umidade específica (g/g), c) vorticidade relativa e vento horizontal e d) divergência e vento horizontal no dia 13 de abril de 2017.



A Figura 4.32a mostra as anomalias de temperatura em médios níveis. Observa-se nessa figura que as anomalias positivas, observadas em 850 hPa ao sul da Amazônia, as anomalias positivas observadas em 850 hPa se estendem para a região de estudo, enquanto nas regiões central e norte da Amazônia são notadas anomalias negativas. Na região da onda de Rossby posicionada sobre o nordeste brasileiro, as anomalias de temperatura também são negativas e mais intensas do que em baixos níveis. As anomalias de umidade (Figura 4.32b) continuam próximas à normalidade neste nível. As anomalias de vorticidade (Figura 4.32c) se tornam negativas ao norte da Amazônia. Na região central da onda de Rossby sobre o nordeste brasileiro, se tornam ainda mais negativas, o mesmo ocorrendo à sudeste dela e em toda a porção sul da Amazônia. Ao sul da Amazônia há vorticidade positiva e com ela intensos ventos de sudeste-leste adentrando sobre a Amazônia. Há divergência anômala (Figura 4.32d) nos centros negativos da onda de Rossby. Na Amazônia central e norte, há divergência, enquanto no sul e oeste nota-se convergência.

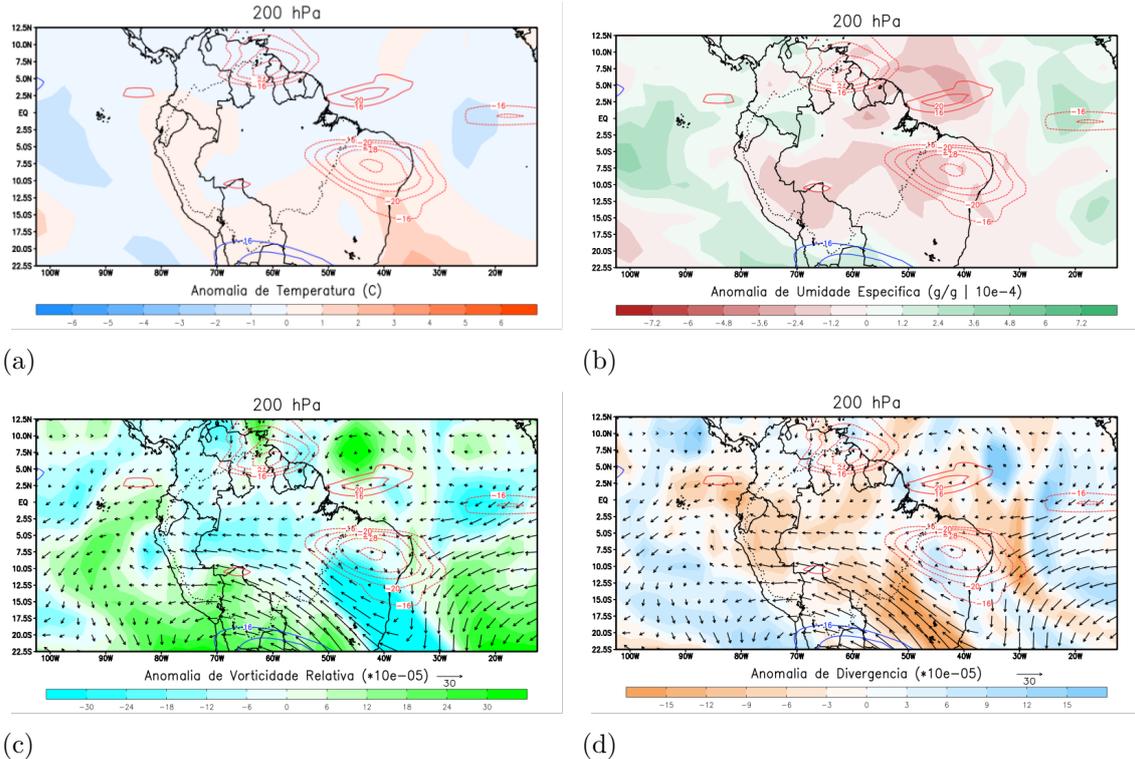
Figura 4.32 - Onda de Rossby (linhas vermelhas contínuas) e Onda de Kelvin (linhas azuis contínuas) na Amazônia e anomalias no nível 500 hPa de a) temperatura (°C), b) umidade específica (g/g), c) vorticidade relativa e vento horizontal e d) divergência e vento horizontal no dia 13 de abril de 2017.



Em altos níveis, as anomalias positivas de temperatura (Figura 4.33a), associadas à onda ao sul, perdem intensidade, porém permanecem presentes. Na Amazônia, as anomalias são próximas a zero, sendo negativas nas regiões central e norte (incluindo região onde está posicionada a onda de Rossby) e positivas à oeste e sul. Na onda de Rossby sobre o nordeste brasileiro, as anomalias são positivas, contrárias ao que era visto em baixos e médios níveis. De maneira geral, anomalias negativas de umidade (Figura 4.33b) estão presentes em toda a Amazônia, exceto na porção noroeste. Na região da onda de Rossby ao norte da Amazônia, nota-se que as anomalias de vorticidade permanecem levemente negativas (Figura 4.33c) no centro da onda, com vorticidade positivas ao norte e negativas ao sul. Na onda negativa no nordeste, a vorticidade negativa se fortalece ao sul-sudoeste dela, bem como a vorticidade positiva ao sul da Amazônia. Associado à estas anomalias, há um intenso escoamento de sudeste-sul na Amazônia. Nessa região, a vorticidade é negativa nos setores central e oeste, enquanto é positiva ao sul. Ressalta-se que há convergência (Figura 4.33d) em toda a região Amazônia, e nas regiões da onda de Rossby negativa, tendo estas

mais intensidade no oeste e sudeste da Amazônia.

Figura 4.33 - Onda de Rossby (linhas vermelhas contínuas) e Onda de Kelvin (linhas azuis contínuas) na Amazônia e anomalias no nível 200 hPa de a) temperatura (°C), b) umidade específica (g/g), c) vorticidade relativa e vento horizontal e d) divergência e vento horizontal no dia 13 de abril de 2017.

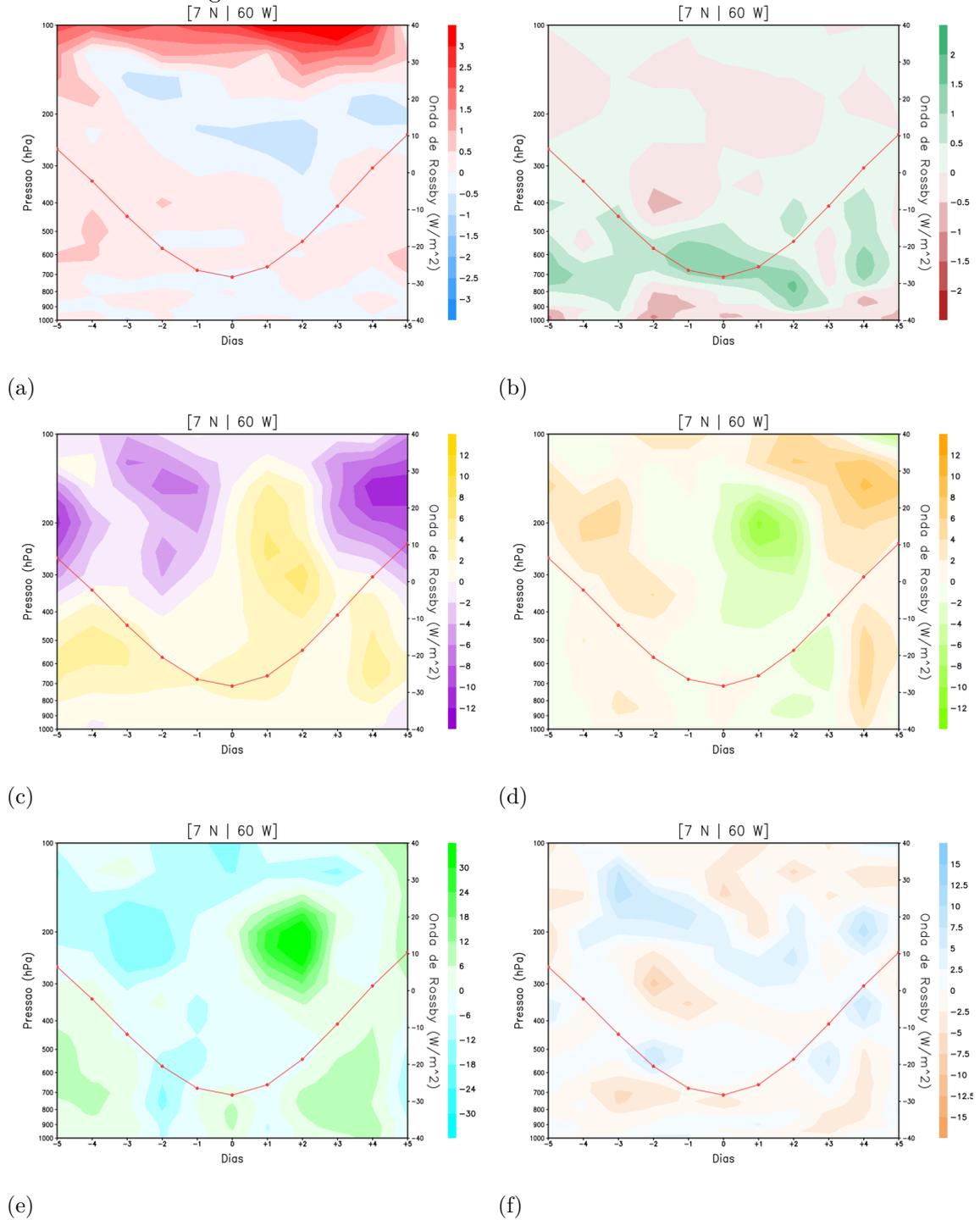


Na região de atuação da onda, notou-se uma queda na temperatura em baixos e altos níveis e aumento em médios níveis, diferente dos eventos anteriores em que se teve aumento em baixos níveis e diminuição em médios e altos níveis. A umidade específica foi anormalmente negativa, contrário dos dois eventos anteriores com aumento de umidade. Enquanto os eventos anteriores possuíram anticiclones anômalos em baixos e médios níveis e um ciclone em altos níveis, este evento apresentou ciclone em baixos níveis e anticiclone em médios e altos níveis. Com relação à divergência, este evento se assemelhou ao segundo evento, por apresentar, no núcleo da onda, divergência em médios níveis e convergência em altos níveis. Porém, o segundo possuía divergência em baixos níveis, já o terceiro possui convergência anômala.

As anomalias na vertical são apresentadas na Figura 4.34, para o período entre 08/04 e 18/04 no ponto de grade 7 N e 60 W, ponto este que corresponde ao centro da

onda de Rossby de fase negativa no norte da Amazônia. Nota-se em todos os dias anomalias negativas de temperatura (Figura 4.34a) em baixos níveis, entre 1000 e 700 hPa. Nos dias -5 e -4, as anomalias acima de 700 hPa são positivas até 100 hPa e 150 hPa, respectivamente. Anomalias negativas são vistas em 200 hPa para os dias -3 à +5, podendo se estender até 300 hPa entre os dias -1 e +3. Dos dias -2 a 0, anomalias negativas também são vistas entre 600 e 500 hPa e dos dias +2 e +3 são negativas entre 500 e 300 hPa. Na região da onda de Rossby, as anomalias de umidade específica (Figura 4.34b) são negativas mais próximas à superfície, entre 1000 e 900 hPa em todos os dias, exceto no dia -4, se estendendo para 800 hPa nos dias -2 e -1. Acima desse nível, a umidade mostra anomalias positivas, entre 800 e 500 hPa, se estendendo para 400 hPa nos dias -5 à -3 e de +2 à +5. Há o predomínio de anomalias positivas em altos níveis, porém anomalias negativas surgem entre 200 e 100 hPa no dia -5, em 150 hPa no dia -4, entre 400 e 300 hPa nos dias -3 até -1, e entre 300 e 150 hPa nos dias 0 até +3. As anomalias de vento zonal (Figura 4.34c) permitem visualizar uma clara distinção entre a camada 1000 e 400 hPa e entre 400 e 100 hPa. Na camada mais baixa, os ventos foram anomalmente de oeste em todos os dias, com máximo de 6 m/s de velocidade, enquanto na camada mais alta os ventos eram anomalmente de leste até o dia 0, se tornando de oeste até o dia +3, depois retornando para leste. A anomalia de velocidade nesta camada chega até -10 m/s. Com relação ao vento meridional (Figura 4.34d), em toda a coluna troposférica os ventos eram anomalmente de sul entre dias -5 e -1, se tornaram de norte com a passagem da fase mais negativa da onda, entre dias 0 e +3 e nos dias +4 e +5 tornam a ser anomalmente de sul. Por meio da Figura 4.34e pode-se observar anomalias de vorticidade relativa. De 1000 até 300 hPa estas são predominantemente positivas, exceto nos dias -2 e -1, onde se tornam negativas. De 300 até 100 hPa elas são negativas, porém há uma troca de sinal com a passagem da onda de Rossby negativa, com a vorticidade anômala se tornando positiva entre 300 e 150 hPa dos dias -1 até +3, restringindo a vorticidade negativa para acima de 150 hPa. Nos dias +3 e +4 vorticidades positivas também aparecem entre 1000 e 500 hPa. Há convergência anômala (Figura 4.34f) de 1000 hPa até 600 hPa e divergência entre 600 e 100 hPa em todos os dias, porém com uma quebra nesse padrão nos dias -2 e -1 com convergência entre 400 e 300 hPa e nos dias 0 e +1 com convergência acima de 200 hPa. Além disso, do dia +2 ao +5, convergência surge acima do nível de 150 hPa.

Figura 4.34 - Variação de intensidade da Onda de Rossby para o centro de maior passagem da onda dos dias 08/04 (-5) até 18/04 (+5) de 2017 entre 1000 hPa e 100 hPa com as anomalias de a) temperatura ($^{\circ}\text{C}$), b) umidade específica (g/g), c) vento zonal (m/s), d) vento meridional (m/s), e) vorticidade relativa e f) divergência.



Em comparação com os eventos anteriores, durante o pico da onda houve aquecimento em médios níveis e diminuição de temperatura em altos níveis assim com o segundo evento. O aumento na umidade específica ocorreu principalmente entre 800 e 600 hPa nos dias que antecedem a passagem mais negativa da onda e nos dias seguintes, similar ao primeiro evento, porém sem a diminuição de umidade vista no segundo aumento, quando houve o retorno para intensidade próxima a 0 W/m^2 . Enquanto nos eventos anteriores os ventos zonais eram anormalmente de leste em baixos níveis e de oeste em altos níveis, no terceiro evento essa situação é completamente oposta, com exceção dos dias 0 até +3 quando houve uma troca dos ventos em altos níveis de leste para oeste. Com a passagem da onda, os ventos em altos níveis que eram de sul se tornaram de norte, semelhando ao núcleo do HN no primeiro evento e contrário ao núcleo do HS e ao núcleo solitário do segundo evento, indicando um padrão diferente para os dois hemisférios. Assim como nos dois eventos, a vortacidade era ciclônica antes da passagem da onda, para todos os níveis na vertical, e se tornou anticiclone após a passagem da parte mais negativa da onda, com maiores valores de vortacidade encontrados em altos níveis. Observou-se convergência anômala em baixos níveis e divergência em altos níveis, compatível com o primeiro evento e distinto do segundo, onde havia convergência em altos níveis.

4.1.4 Síntese e discussão

Neste Item 4.1 buscou-se explorar as características das Ondas de Rossby sobre a Amazônia, estas que se propagam de leste para oeste, adentrando a região de estudo por meio do Oceano Atlântico ou após passar pelo nordeste brasileiro. Tanto a fase positiva quanto negativa das Ondas de Rossby foram observadas, bem como sua relação com as anomalias de ROL, temperatura, umidade específica, vento horizontal, vortacidade relativa e divergência.

Como, de maneira geral, as Onda de Rossby podem ser intensas em qualquer estação do ano (algo que vai ser mais explorado no Item 4.3), escolheu-se o outono para definição das características associadas com a passagem destas ondas devido que as maiores variabilidades no índice MMA ocorrerem nesta estação do ano. Assim, escolheu-se o ano de 2010 por representar um ano normal, 2015 um ano com MMA positivo e 2017 um ano com MMA negativo. Dessa forma, as características similares e diferentes entre cada evento são sintetizadas nesta categoria por meio das Tabelas A.7 e A.8 localizadas no Apêndice A.

Conforme ressaltado em [Kiladis et al. \(2009\)](#), devido aos processos úmidos, a estrutura vertical das ondas equatoriais associadas com a convecção é complexa e possui

escala que não corresponde à teoria linear das ondas. Além disso, os autores citam as Ondas de Rossby Equatoriais como sendo as ondas equatoriais mais problemáticas de se analisar, devido à sua baixa velocidade de propagação e grande escala espacial que permitem que as ondas sejam moduladas pelo “vento do estado básico”.

Ainda em [Kiladis et al. \(2009\)](#), os autores identificaram ciclones se propagando para oeste com velocidade de fase de 4,5 m/s. Estudaram a estrutura vertical das ondas de Rossby centradas no ponto 7,5 N e 152,0 E no Oceano Pacífico. Eles encontraram perturbações de ventos de leste no setor leste nos ciclones em superfície, ciclones em médios níveis e anticiclone em altos níveis na fase ativa da onda (fase negativa neste trabalho). Com a aproximação destes ciclones, anomalias nas variáveis meteorológicas surgem. A temperatura aumenta entre 1000 e 850 hPa, diminui entre 700 e 500 hPa, aumenta entre 500 e 150 hPa e diminui até 100 hPa. Há aumento na umidade específica em toda a camada troposférica com a passagem da onda. Ventos são de oeste e sul de 1000 à 400 hPa e se tornam de leste e norte entre 400 e 100 hPa.

Em comparação com a fase negativa dos três eventos descritos neste capítulo, a velocidade média diária foi entre 2 lon/dia e 4 lon/dia, o que se converte para 2,572 m/s e 5,144 m/s. Apenas o terceiro evento apresentou anomalias ciclônicas em baixos níveis e anticiclônicas em altos níveis, porém todos possuíam convergência em baixos níveis e divergência em altos níveis. Em geral também há aquecimento em médios e altos níveis e aumento da umidade específica, especialmente em baixos níveis. O padrão dos ventos anômalos não é o mesmo observado por [Kiladis et al. \(2009\)](#), que observou ventos de oeste e de sul em superfície e de norte e de leste em altos níveis. Anomalias de oeste não foram encontradas em nenhum evento para baixos níveis, enquanto que as anomalias de sul são vistas para os núcleos localizados no Hemisfério Sul. Com relação aos altos níveis, os eventos mostraram predomínio de anomalias de norte e oeste.

Em [Yang et al. \(2007\)](#), a propagação das ondas de Rossby para oeste se dá por meio de dois ciclones em superfície igualmente espaçados da Linha do Equador, com anticlones em altos níveis. Em altos níveis, há divergência na área da onda de Rossby, com forte divergência de vento meridional e fraca convergência de vento zonal. São características similares à [Kiladis et al. \(2009\)](#) e aos eventos aqui analisados.

4.2 Estrutura horizontal e vertical das Ondas de Kelvin

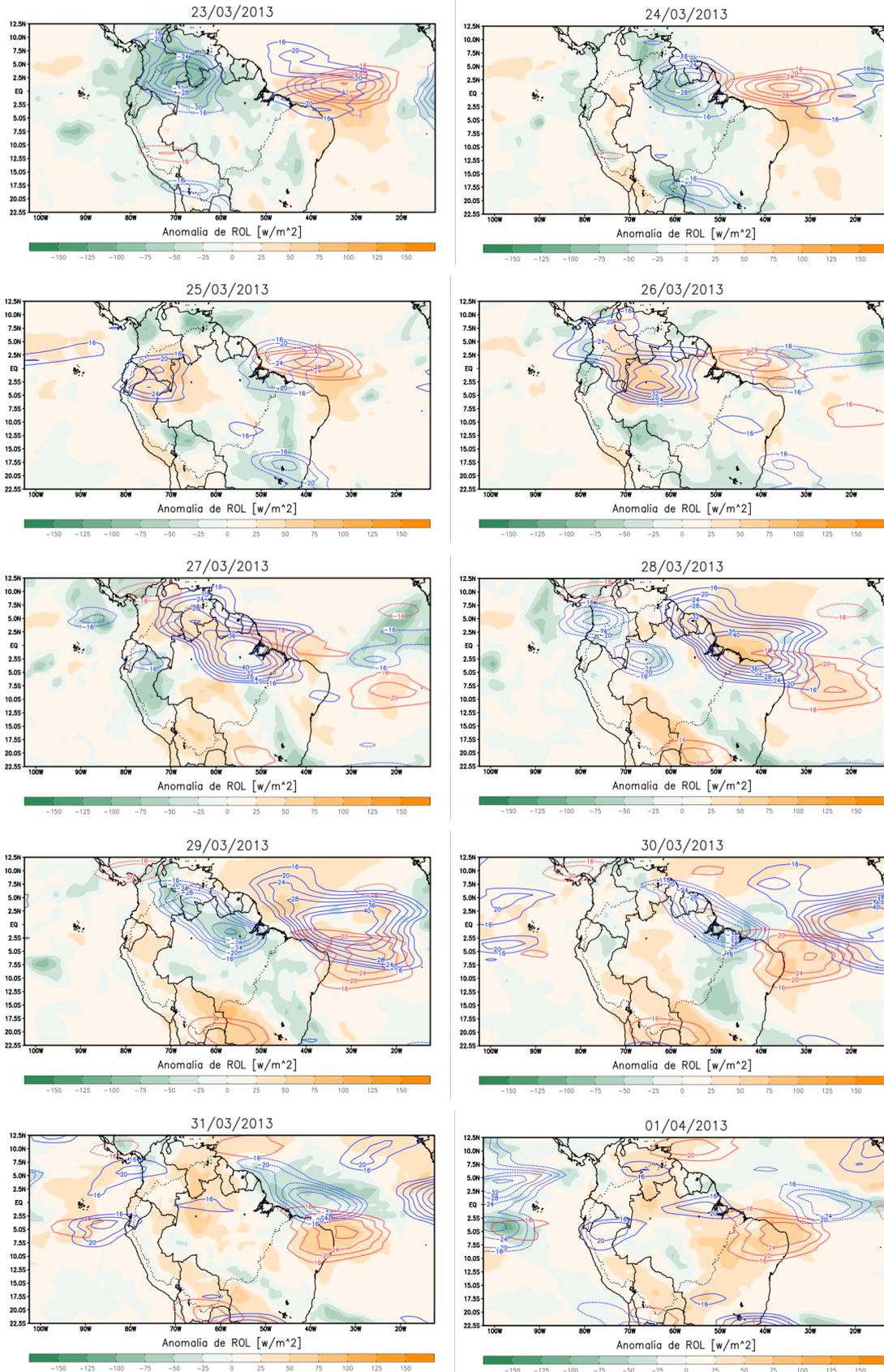
Como será discutido no Item 4.3, o outono austral é a estação do ano com maior frequência e intensidade das ondas de Kelvin na Amazônia. Assim, esta estação também foi a escolhida para mostrar eventos significativos da atividade destas ondas. Dessa forma, foi escolhido o outono de 2013 para representar um ano sem ocorrência de El Niño ou La Niña, 2011 como um ano de La Niña intensa e 2016 como ano de El Niño intenso.

4.2.1 Primeiro evento

Por meio da Figura 4.35 e das Tabelas A.9 e A.10 (Apêndice A) nota-se que a propagação de uma onda de Kelvin equatorial com suas fases positivas e negativas é distinta sobre a Amazônia durante o outono de 2013, ano com ENOS neutro. Nos dias 23 e 24 de março, houve a passagem de uma onda de Kelvin com fase negativa pela Amazônia e com núcleo centrado em 2,5 N, ocasionando anomalias negativas de ROL na região equatorial da Amazônia. No dia 25 esta onda negativa avança sobre o Oceano Atlântico em direção à uma onda de Rossby de fase oposta, estando o centro das duas ondas muito próximos um do outro. Nesse mesmo dia, um núcleo da fase positiva da onda de Kelvin surge no extremo oeste da Amazônia, com núcleo aproximadamente em 2,5 S e 75 W e intensidade máxima de 24 W/m² em seu centro. As anomalias de ROL se tornam positivas no oeste da Amazônia, enquanto permanecem negativas no leste com a saída da onda de fase negativa. No Oceano Pacífico, observa-se outra onda de Kelvin de fase positiva que se aproxima do continente e no dia 26, se une à fase positiva que está sobre a região central da Amazônia. Assim, a fase positiva ganha um núcleo secundário no hemisfério norte e o seu núcleo original sofre uma intensificação. As anomalias de ROL na Amazônia permanecem positivas na região central, oeste e noroeste, conforme posicionamento da onda de Kelvin. Sobre o Oceano Atlântico, com a passagem da onda de Kelvin negativa pela onda de Rossby positiva, nota-se um enfraquecimento de ambas. No dia 27 a onda de Kelvin com fase positiva continua se propagando para a Amazônia, com o núcleo expandindo sua área de atuação e centrado na Amazônia Oriental. A intensidade aumenta para 40 W/m² e se torna a onda de Kelvin mais intensa do outono de 2013. As anomalias positivas de ROL permanecem na porção central, norte e sul da Amazônia. Neste dia, dois núcleos da fase negativa da onda de Kelvin surgem à oeste da fase positiva, um deles em 2,5 S e 75 W, 20° de distância do núcleo positivo, e outro em 5 N e 86 W, ambos com mesma intensidade de - 16 W/m². No dia 28, a onda positiva de Kelvin se desloca para o Oceano Atlântico,

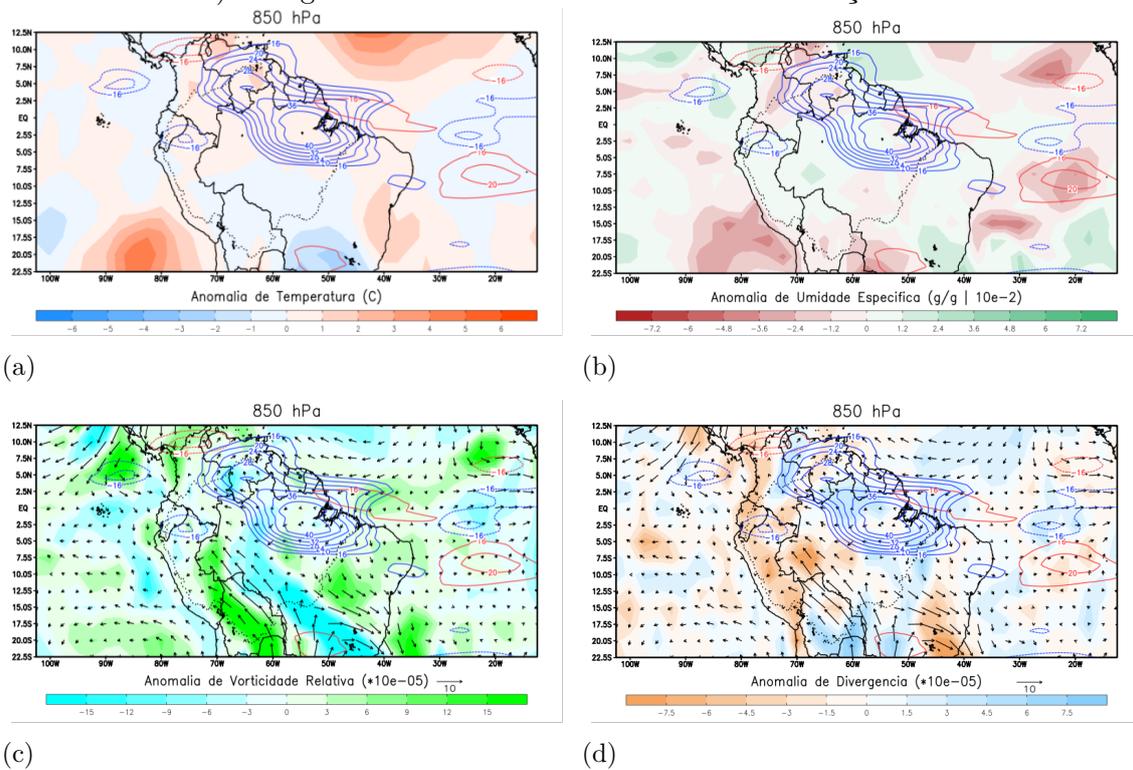
expande sua área de atuação e permanece com mesma intensidade, provocando anomalias positivas de ROL na região nordeste da Amazônia e oceano adjacente. A fase negativa da onda alcança a região central da Amazônia, se intensifica e ambos os núcleos intensificam sua área de atuação e se deslocam com mesma velocidade de propagação, semelhante ao que ocorre com as ondas de Rossby, porém em direção contrária. As anomalias negativas de ROL na Amazônia permanecem nos locais de atuação da onda e possuem uma organização noroeste-sudeste. No dia 29 é visto o pico da fase negativa desta onda de Kelvin atuando na região centro-leste da Amazônia, a qual se estende para noroeste e se conecta com o núcleo no hemisfério norte. No entanto, o núcleo no hemisfério sul ganhou mais intensidade nas últimas 24 horas. Anomalias negativas de ROL são notáveis em toda Amazônia brasileira. No dia 30 de março a fase negativa da onda de Kelvin atinge a região costeira da América do Sul, com as anomalias negativas de ROL sendo retidas no extremo leste da Amazônia e para o restante da região nota-se o predomínio de anomalias positivas. A onda perde o seu núcleo no HN, porém o núcleo no HS continua alongado para noroeste. Nos dias 31 de março e 01 de abril, com o avanço da onda de Kelvin negativa para o Oceano Atlântico, três núcleos positivos da onda de Kelvin adentram a Amazônia vindos do Oceano Pacífico. De leste, uma onda de Rossby positiva adentra o continente pela região do nordeste brasileiro, assim, o conjunto dessas ondas ocasiona anomalias positivas de ROL em quase toda América do Sul tropical.

Figura 4.35 - Passagem de uma Onda de Kelvin pela Amazônia no outono de 2013 entre os dias 23/03 e 02/04. Linhas vermelhas são Ondas de Rossby e linhas azuis Ondas de Kelvin.



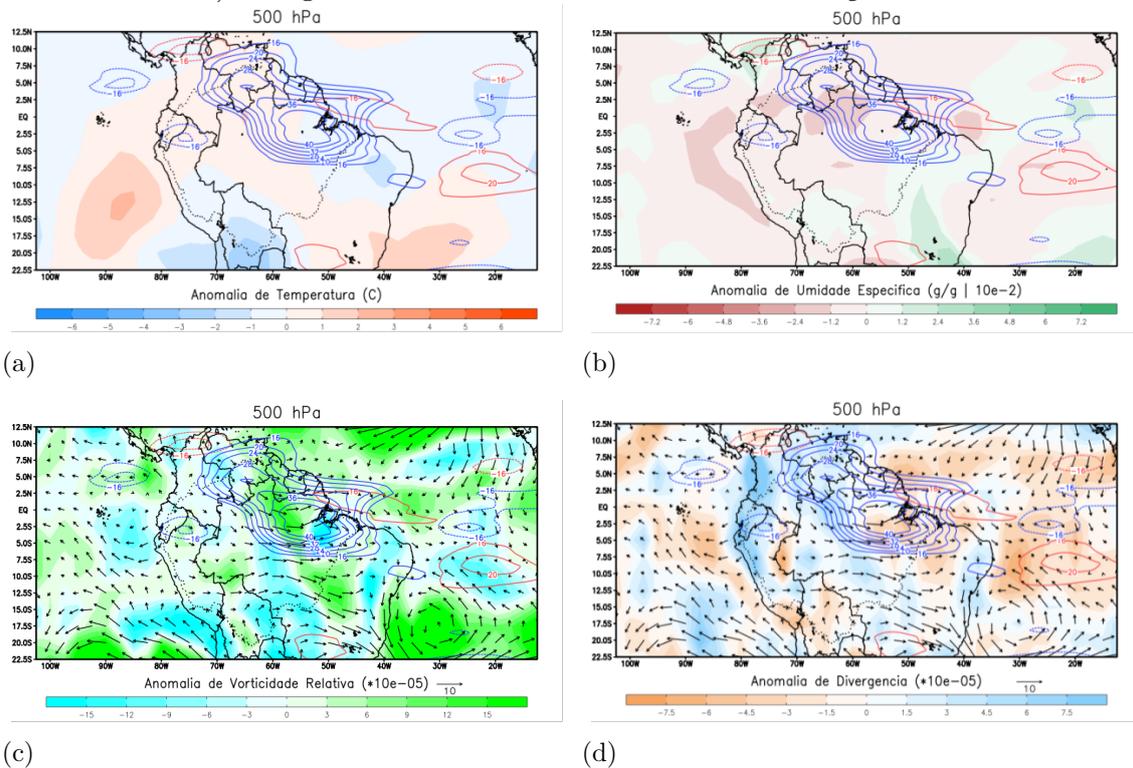
Nas Figuras 4.36 tem-se as anomalias das variáveis meteorológicas em baixos níveis da atmosfera para o dia 27 de março de 2013, com o pico da fase positiva da onda de Kelvin atuante na Amazônia. As anomalias de temperatura (Figura 4.36a) mostram uma atmosfera levemente mais quente ($+1\text{ }^{\circ}\text{C}$) na região central e norte da Amazônia com o posicionamento da onda positiva, enquanto a porção sul apresenta anomalias negativas de $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$. Somado a isso, há anomalias negativas de umidade específica (Figura 4.36b) na região da onda, mostrando uma atmosfera mais seca neste dia, ainda que existam anomalias positivas de maneira isolada. As anomalias são positivas à sudoeste da onda. Com relação às anomalias de vento e de vorticidade relativa (Figura 4.36c), nota-se intenso escoamento anômalo de ventos adentrando a Amazônia de sudeste. Na região de atuação da onda de Kelvin, a velocidade do vento e vorticidade são mínimas, mas à sudoeste notam-se vorticidades negativas, enquanto que à sudeste estas são positivas. No campo das anomalias de divergência (Figura 4.36d), observa-se leve divergência em toda região de atuação da onda de Kelvin e ao sul da mesma. À oeste-sudoeste da onda, tem-se uma região de convergência.

Figura 4.36 - Onda de Rossby (linhas vermelhas contínuas) e Onda de Kelvin (linhas azuis contínuas) na Amazônia e anomalias no nível 850 hPa de a) temperatura ($^{\circ}\text{C}$), b) umidade específica (g/g), c) vorticidade relativa e vento horizontal e d) divergência e vento horizontal no dia 27 de março de 2013.



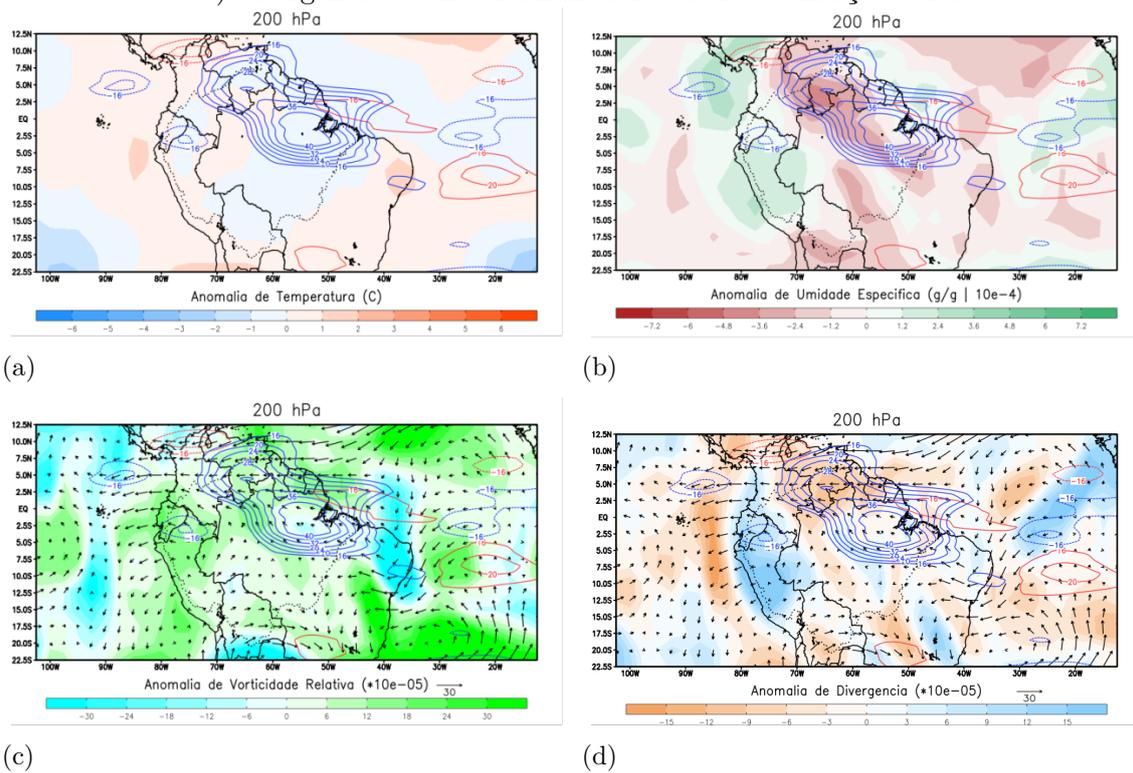
A Figura 4.37 apresenta as mesmas variáveis que a figura anterior, porém para médios níveis na troposfera. Com relação às anomalias de temperatura (Figura 4.37a), estas continuam sendo predominantemente positivas na Amazônia e em grande parte da área de atuação da onda de Kelvin, exceto na porção leste dela. As anomalias negativas na porção sul da Amazônia, observadas em 850 hPa, estão deslocadas para oeste em 500 hPa. As anomalias de umidade (Figura 4.37b) são negativas em toda a Amazônia e com mais intensidade do que em baixos níveis. Neste nível da atmosfera, os ventos (Figura 4.37c) são anormalmente de oeste na região da onda, associado com anomalias de vorticidade positiva. Na porção sul da Amazônia, nota-se vorticidade anormalmente negativa e giro ciclônico. Com relação às anomalias de divergência (Figura 4.37d), é visível a divergência em toda a Amazônia como um todo, incluindo na região de atuação da onda de Kelvin, a exceção disto é o extremo leste da Amazônia.

Figura 4.37 - Onda de Rossby (linhas vermelhas contínuas) e Onda de Kelvin (linhas azuis contínuas) na Amazônia e anomalias no nível 500 hPa de a) temperatura ($^{\circ}\text{C}$), b) umidade específica (g/g), c) vorticidade relativa e vento horizontal e d) divergência e vento horizontal no dia 27 de março de 2013.



Para os altos níveis da troposfera (Figura 4.38) o comportamento das anomalias de temperatura é distinto (Figura 4.38a), pois a área de atuação da onda de Kelvin apresenta anomalias negativas, bem como a maior parte da Amazônia, exceto em um setor a oeste do centro da onda, onde permanecem anomalias positivas. As anomalias de umidade (Figura 4.38b) apresentam uma atmosfera mais seca para este nível, com exceção no extremo sudoeste na Amazônia. As anomalias de vorticidade (Figura 4.38c) se mostram positivas em toda a Amazônia, com maior intensidade na faixa noroeste. Os ventos são fracos em toda a região. A divergência (Figura 4.38d) aparece anormalmente positiva em boa parte da região, com mais intensidade no norte da Amazônia. A exceção disso é uma região de intensa divergência no oeste da Amazônia, onde tem-se aumento de umidade de acordo com a Figura 4.38b.

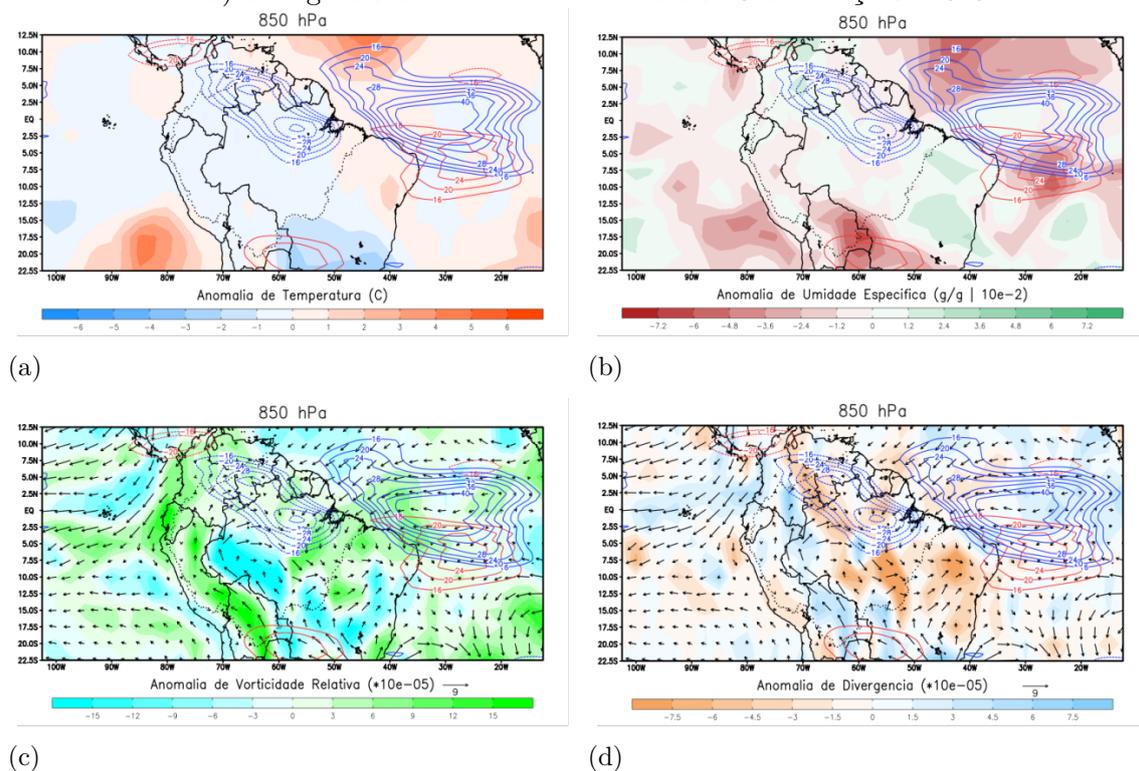
Figura 4.38 - Onda de Rossby (linhas vermelhas contínuas) e Onda de Kelvin (linhas azuis contínuas) na Amazônia e anomalias no nível 200 hPa de a) temperatura ($^{\circ}\text{C}$), b) umidade específica (g/g), c) vorticidade relativa e vento horizontal e d) divergência e vento horizontal no dia 27 de março de 2013.



Dois dias após o pico da fase positiva da onda de Kelvin no outono de 2013, teve-se a atuação do pico da fase negativa. Nas Figuras 4.39, 4.40 e 4.41 as anomalias de

temperatura, umidade específica, vento e vorticidade relativa e vento e divergência são vistas para baixos, médios e altos níveis, respectivamente, para o dia 29 de março. Em baixos níveis, nota-se um leve esfriamento (Figura 4.39a) da Amazônia como um todo, ainda que em números absolutos seja próximo a zero. Com relação à umidade específica (Figura 4.39b), as anomalias mostram uma Amazônia mais seca e próximas à normalidade, contrário do que era esperado, visto que as anomalias de ROL mostram mais nuvens convectivas, logo, mais precipitação. As anomalias de vorticidade (Figura 4.39c) se mostram fracas e positivas na região da onda, porém à sudoeste dela tem-se intensas anomalias negativas associadas com um giro ciclônico. O campo das anomalias de divergência (Figura 4.39d) mostram o predomínio de convergência em boa parte da Amazônia, com exceção de extremo oeste e sul, onde há divergência.

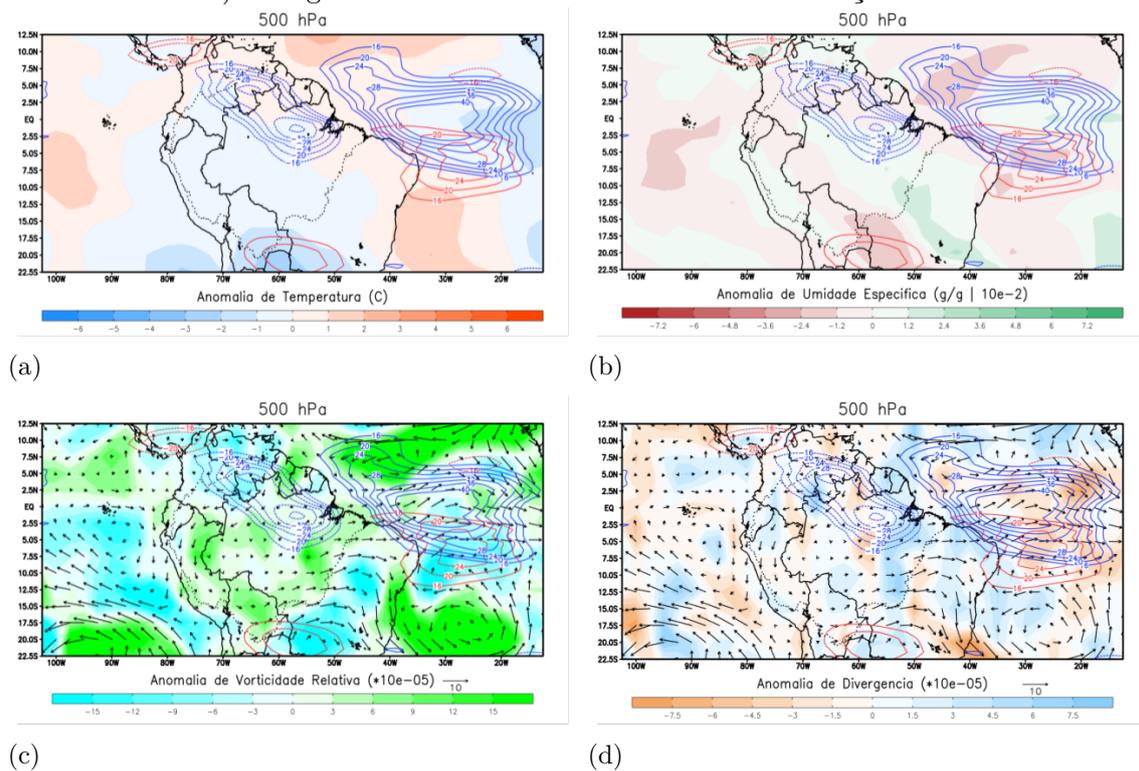
Figura 4.39 - Onda de Rossby (linhas vermelhas contínuas) e Onda de Kelvin (linhas azuis contínuas) na Amazônia e anomalias no nível 850 hPa de a) temperatura ($^{\circ}\text{C}$), b) umidade específica (g/g), c) vorticidade relativa e vento horizontal e d) divergência e vento horizontal no dia 29 de março de 2013.



Para médios níveis, o comportamento das anomalias de temperatura (Figura 4.40a)

é similar a dos baixos níveis, com diminuição de temperatura na Amazônia como um todo. A exceção disso é o extremo nordeste da região e o extremo leste da onda, com leve aumento. As anomalias de umidade específica (Figura 4.40b) continuam mostrando uma atmosfera mais seca, na parte central e norte da onda negativa de Kelvin e no extremo sul da Amazônia. Na região central e sudeste da Amazônia, há anomalias positivas para este nível. Com relação às anomalias de vorticidade (Figura 4.40c), essas são positivas em quase toda a Amazônia, sendo negativas somente no noroeste da região. Associado à isto, as anomalias de divergência (Figura 4.40d) são positivas, indicando que em 500 hPa a Amazônia apresenta giro anticiclônico e divergência de vento durante a passagem da onda de Kelvin de fase negativa.

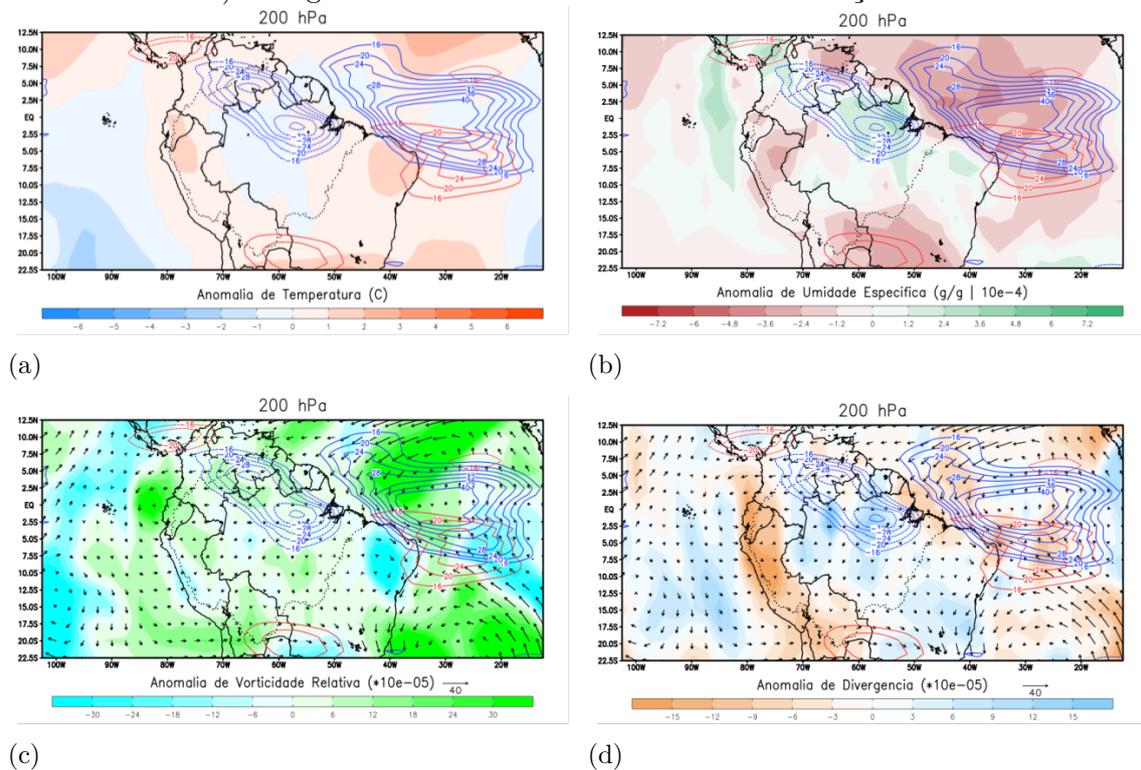
Figura 4.40 - Onda de Rossby (linhas vermelhas contínuas) e Onda de Kelvin (linhas azuis contínuas) na Amazônia e anomalias no nível 500 hPa de a) temperatura ($^{\circ}\text{C}$), b) umidade específica (g/g), c) vorticidade relativa e vento horizontal e d) divergência e vento horizontal no dia 29 de março de 2013.



Em altos níveis, as anomalias negativas de temperatura (Figura 4.41a) se tornam restritas ao centro da Amazônia, com o resto da região contendo anomalias positivas. Analisando as anomalias de umidade (Figura 4.41b) nota-se que na região do núcleo

da fase negativa da onda de Kelvin a atmosfera se tornou mais úmida. Com relação às anomalias de vorticidade (Figura 4.41c) e de divergência (Figura 4.41d), estas continuam sendo positivas em toda a Amazônia, assim como em níveis médios. Os ventos são fracos e próximos a zero, a única região com convergência sendo o extremo oeste da Amazônia.

Figura 4.41 - Onda de Rossby (linhas vermelhas contínuas) e Onda de Kelvin (linhas azuis contínuas) na Amazônia e anomalias no nível 200 hPa de a) temperatura (°C), b) umidade específica (g/g), c) vorticidade relativa e vento horizontal e d) divergência e vento horizontal no dia 29 de março de 2013.

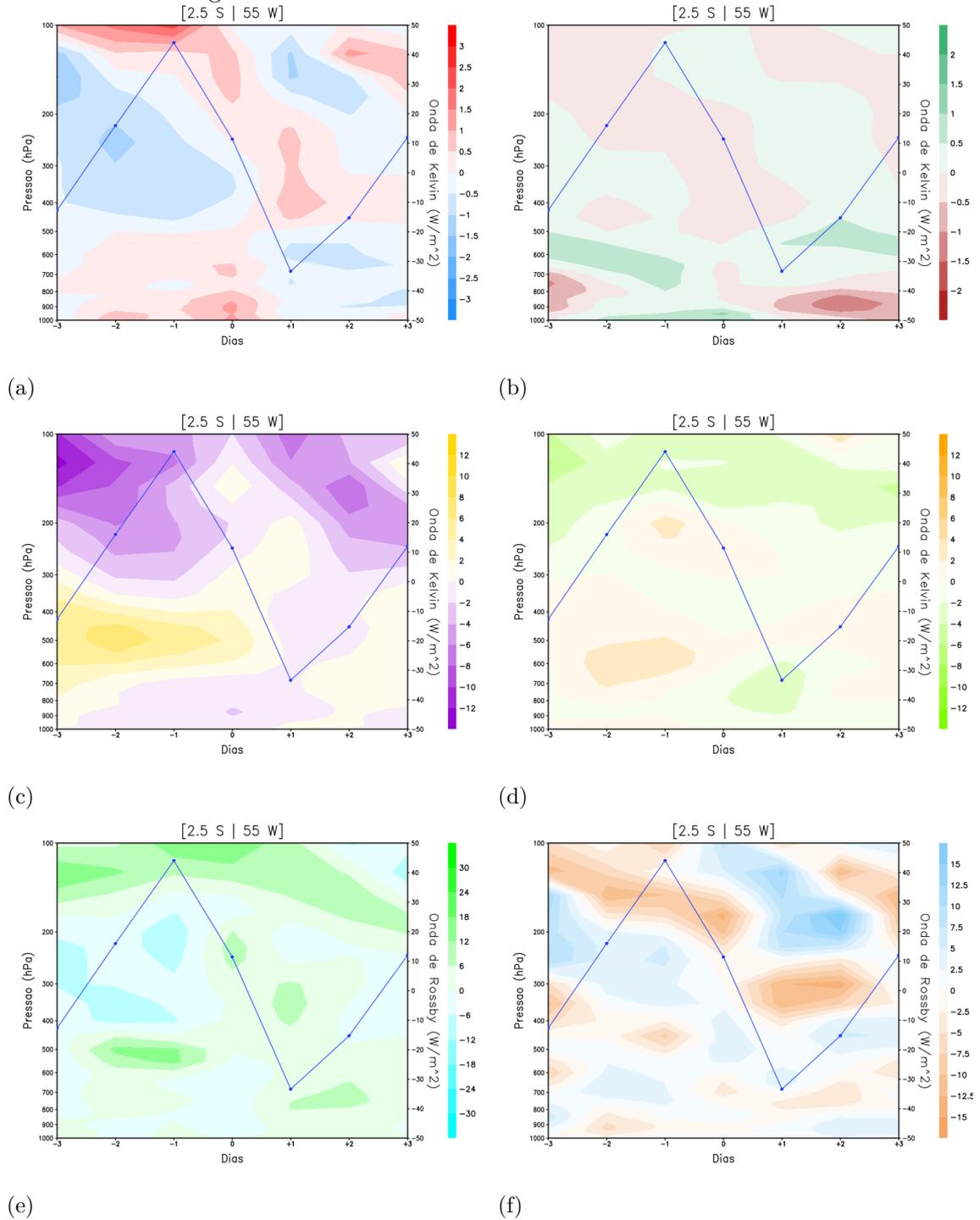


Devido ao deslocamento rápido da onda de Kelvin (em média 10° de longitude por dia), a mudança entre as fases negativa e positiva em determinado local ocorrem em um período de tempo consideravelmente menor do que nas ondas de Rossby. Neste caso, o pico positivo da onda de Kelvin ocorreu no dia 27 de março de 2013 e foi o mais intenso de todo o outono deste ano. Após dois dias, em 29 de março de 2013, teve-se os valores mais negativos para todo o outono, se considerando a onda de Kelvin em sua passagem pela Amazônia. Assim, na Figura 4.42 a passagem da onda de Kelvin em 2.5 °S e 55 °W para os dias 25/03 (-3) até 31/03 (+3) é vista em

um corte vertical de 1000 à 100 hPa com as anomalias das variáveis meteorológicas selecionadas.

Com relação às anomalias de temperatura (Figura 4.42a), no dia -1 com o pico positivo da onda tem-se um incremento na temperatura na camada entre 1000 e 500 hPa, diminuição de temperatura entre 500 e cerca de 150 hPa e novamente aquecimento entre 150 e 100 hPa. A situação praticamente se inverte no dia +1 com o pico negativo, onde a temperatura decai entre 1000 e 500 hPa, se eleva entre 500 e 200 hPa e novamente volta a decair entre 200 e 100 hPa. A umidade específica (Figura 4.42b) apresenta uma inversão semelhante, no dia -1 possuindo um incremento de umidade de 1000 até 300 hPa, uma diminuição de umidade entre 300 e 250 hPa e um pequeno aumento entre 150 e 100 hPa. Já no dia +1, há diminuição de umidade na camada mais inferior da troposfera, entre 1000 e 800 hPa, aumento de umidade entre 800 e 500 hPa, leve diminuição entre 500 e 400 hPa e novamente aumento de umidade na camada superior. Para o perfil das anomalias de vento zonal (Figura 4.42c), é notável no pico da fase positiva (e nos demais dias antes dos valores negativos da onda de Kelvin) ventos anormalmente de oeste na camada entre 600 e 400 hPa. Nos demais níveis, os ventos são anormalmente de leste, com maiores velocidades entre 300 e 100 hPa. Para a onda negativa, os ventos são anormalmente de leste em todos os níveis da troposfera, com uma camada entre 300 e 200 hPa com fracos ventos de oeste no dia +1. O vento meridional (Figura 4.42d) contém comportamento semelhante, durante a fase positiva tendo anomalias de sul entre 850 e 400 hPa e novamente entre 300 e 200 hPa, com anomalias de norte entre 200 e 100 hPa. No pico da fase negativa, as anomalias são de norte em quase todos os níveis. Para as anomalias de vorticidade relativa (Figura 4.42e), estas são predominantemente positivas em todos os dias, porém dos dias -3 ao -1 anomalias negativas surgem de médios para altos níveis, entre 500 e 200 hPa. As anomalias de divergência (Figura 4.42f) mostram constante alternância com a altura. No dia -1, há convergência entre 1000 e 800 hPa, entre 500 até 400 hPa e entre 200 e 100 hPa, e divergência de 800 à 500 hPa e de 400 até 200 hPa. Isto praticamente se inverte no dia +1, com divergência entre 1000 e 900 hPa, entre 700 e 400 hPa e novamente entre 300 e 100 hPa, e convergência de 900 até 700 hPa e de 400 à 300 hPa.

Figura 4.42 - Variação de intensidade da Onda de Kelvin para o centro de maior passagem da onda nos dias 25/03 (-3) até 31/03 (+3) de 2013 entre 1000 hPa e 100 hPa com as anomalias de a) temperatura ($^{\circ}\text{C}$), b) umidade específica (g/g), c) vento zonal (m/s), d) vento meridional (m/s), e) vorticidade relativa e f) divergência.

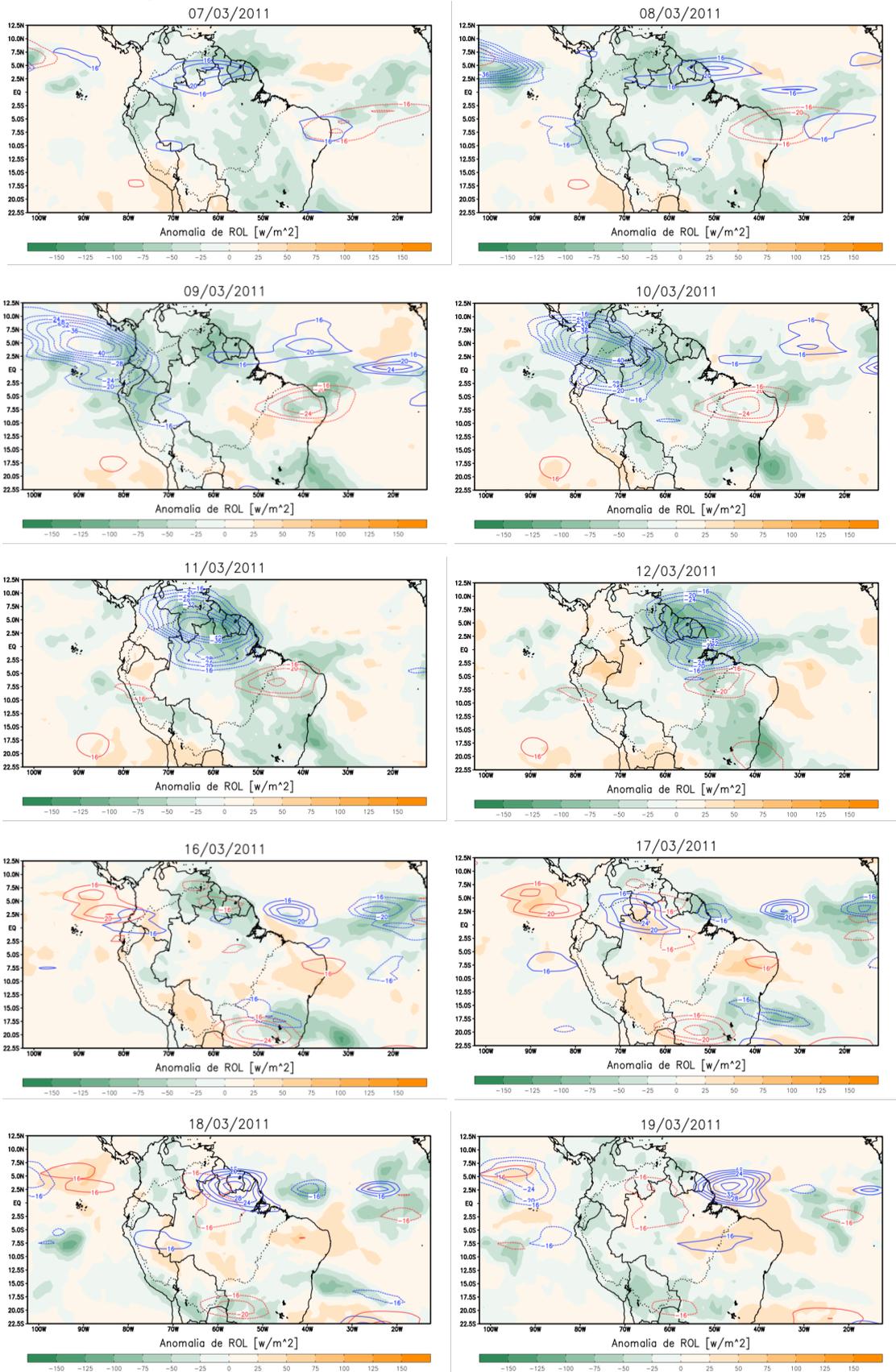


4.2.2 Segundo evento

Na Figura 4.43 é possível acompanhar a passagem da onda de Kelvin mais intensa de todo o outono de 2011 pela Amazônia, este ano foi escolhido devido à intensa La Niña que se encontrava atuante no Oceano Pacífico. Informações sobre posicionamento do núcleo, deslocamento em um dia, velocidade de propagação e intensidade são vistas nas Tabelas A.11 e A.12 (Apêndice A). Nos dias 07 e 08 de março, uma onda de Kelvin com fase positiva pode ser observada sobre o norte da Amazônia, porém com anomalias positivas de ROL apenas no setor sul da onda. Em quase toda a Amazônia, também em boa parte das regiões do nordeste, centro-oeste e sudeste brasileiro, as anomalias de ROL são negativas, indicando maior cobertura de nuvens convectivas em comparação com a climatologia. Vinda do Oceano Pacífico, a fase negativa desta onda possui núcleo entre 81 e 91 W e 2,5 e 5 S com intensidade de -40 W/m^2 . No dia 8, a onda continua sua propagação para leste sobre o continente e intensifica as anomalias negativas de ROL na Amazônia como um todo. Entre os dias 09 e 10, a onda de Kelvin com fase positiva sai do continente, ao mesmo tempo uma onda de Rossby de fase negativa propagando para oeste começa a adentrar na região Amazônica ao sul da Linha do Equador. No dia 11, a onda de Kelvin negativa se posiciona na região centro-norte da Amazônia, intensificando ainda mais as anomalias negativas de ROL na região. A onda de Rossby negativa provoca intensificação das anomalias negativas no extremo leste da Amazônia. Durante esses dias, a intensidade mínima no núcleo da onda de Kelvin permaneceu a mesma, porém, esta diminui no dia 12 de março, com o núcleo da onda alcançando o extremo nordeste da Amazônia. As anomalias negativas mais intensas de ROL acompanham o deslocamento da onda de Kelvin e também são vistas para o Oceano Atlântico adjacente. Nos dias 13, 14 e 15 (Figuras não mostradas), esta vai perdendo intensidade e se desloca cada vez mais devagar sobre o oceano Atlântico, porém associado com ela ainda estão intensas anomalias negativas de ROL. Nestes três dias consecutivos, ondas de Kelvin com fase positiva e negativa surgem na Amazônia, porém com intensidade próximas a zero e sem notável influência nas anomalias de ROL. Uma fase positiva de maior impacto surge no dia 16, no oeste da Amazônia, aproximadamente entre 0 e 4 N de latitude e 70 e 84 W com intensidade de 16 W/m^2 . As anomalias de ROL são positivas na região e já se mostravam positivas nos três dias anteriores devido à atuação de uma onda de Rossby positiva. Na região central da Amazônia existem tanto anomalias negativas como positivas de ROL, porém na porção norte as anomalias são negativas e na porção sul são positivas. No dia 17 a onda positiva se propaga pela Amazônia e aumenta de intensidade. Anomalias positivas de ROL seguem por toda faixa central da Amazônia e setor sudoeste, com anomalias

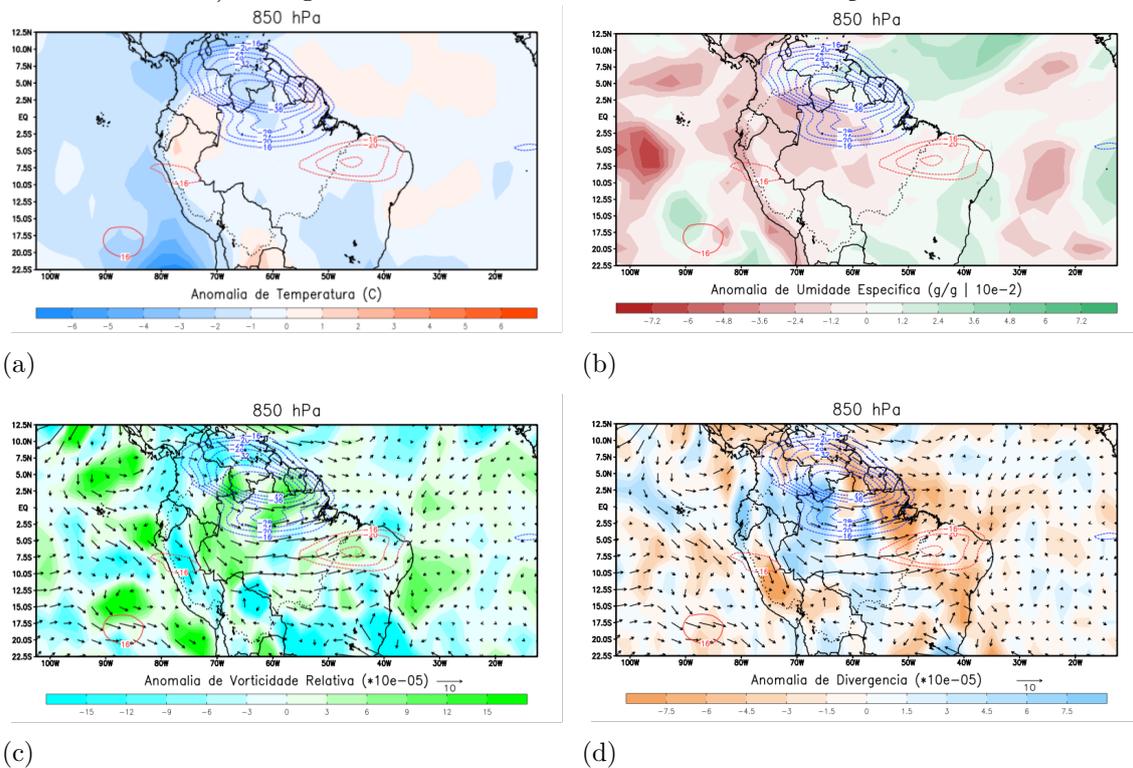
negativas à leste e oeste. No dia 18, com a onda positiva de Kelvin continuando a se propagar pela Amazônia e aumentar sua intensidade, as anomalias positivas de ROL se restringem à uma faixa central ainda mais estreita, com uma onda de Rossby negativa intensificando as anomalias negativas de ROL. Este foi o dia com a onda de Kelvin positiva mais intensa para este outono inteiro. Nos dias 19 e 20 de março a onda de Kelvin se propaga para o Oceano Atlântico, intensificando no dia 19 e desintensificando no dia 20, causando anomalias positivas de ROL sobre o oceano, porém sem impactos visíveis para a Amazônia.

Figura 4.43 - Passagem de uma Onda de Kelvin pela Amazônia no outono de 2011 entre os dias 07/03 e 19/03. Linhas vermelhas são Ondas de Rossby e linhas azuis Ondas de Kelvin.



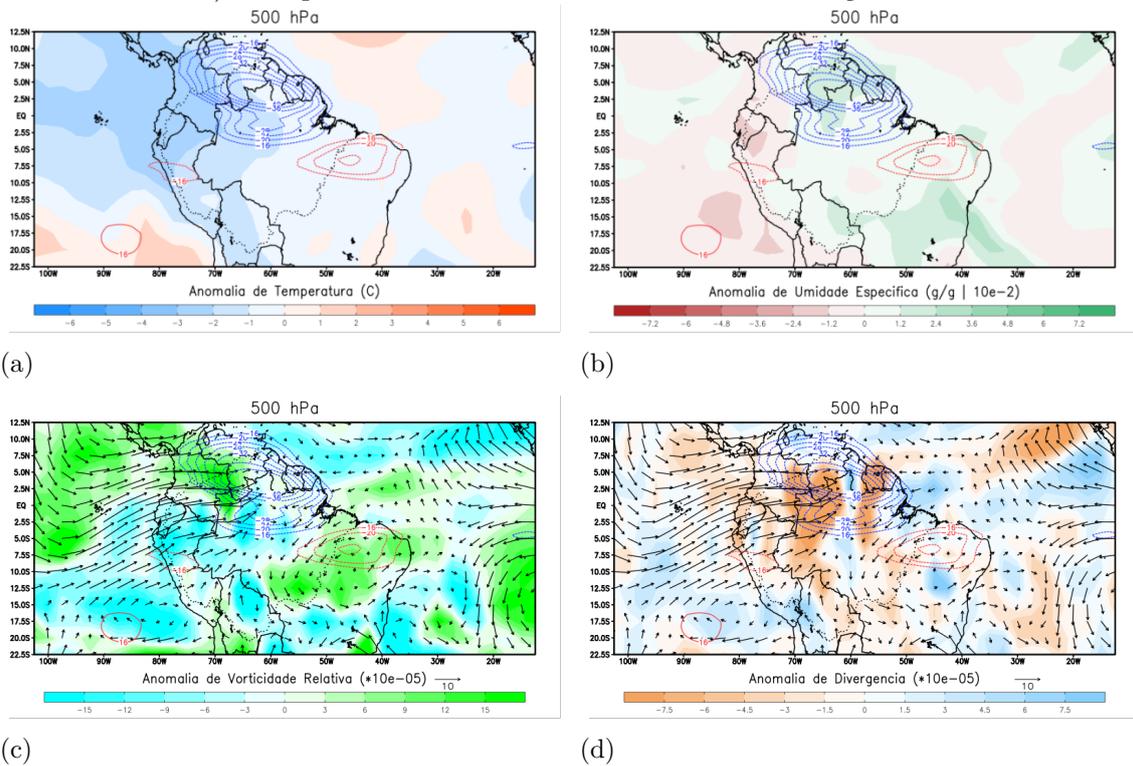
Para verificação das anomalias de variáveis meteorológicas associadas à passagem desta Onda de Kelvin, é possível selecionar o dia 11 de março por possuir elevada intensidade da fase negativa da onda de Kelvin posicionada no centro-norte da Amazônia. Na Figura 4.44 as anomalias são vistas para baixos níveis da atmosfera. As anomalias de temperatura (Figura 4.44a) mostram claramente temperaturas mais baixas em todo o Oceano Pacífico próximo à América do Sul, consequência da La Niña atuante, mas também temperaturas mais baixas em toda a América do sul e Amazônia em geral, com exceção para uma pequena porção oeste da região. As anomalias de umidade (Figura 4.44b) também mostram anomalias negativas no Pacífico equatorial, Amazônia central e oeste. As anomalias de vorticidade (Figura 4.44c) se apresentam como positivas na Amazônia central e negativas no oeste e sul. O sentido do vento na Amazônia são anormalmente anticiclônicos ao sul da Linha do Equador. Com relação às anomalias de divergência (Figura 4.44d), tem-se divergência ao oeste e sul da onda de Kelvin e convergência à leste e norte.

Figura 4.44 - Onda de Rossby (linhas vermelhas contínuas) e Onda de Kelvin (linhas azuis contínuas) na Amazônia e anomalias no nível 850 hPa de a) temperatura ($^{\circ}\text{C}$), b) umidade específica (g/g), c) vorticidade relativa e vento horizontal e d) divergência e vento horizontal no dia 11 de março de 2011.



Em médios níveis da atmosfera (Figura 4.45), as anomalias negativas de temperatura (Figura 4.45a) generalizada permanecem sobre a Amazônia. Há uma mudança no perfil de umidade específica (Figura 4.45b) com relação aos baixos níveis, em 500 hPa há aumento de umidade para a Amazônia, com exceção do oeste da região. No campo das anomalias de vorticidade relativa (Figura 4.45c), estas são positivas à oeste e sudeste da onda de Kelvin e negativas à sudoeste. Há um giro anticiclônico no leste da Amazônia e nordeste brasileiro. As anomalias de divergência (Figura 4.45d) são intensas e negativas tanto à leste quanto à oeste do núcleo da onda de Kelvin.

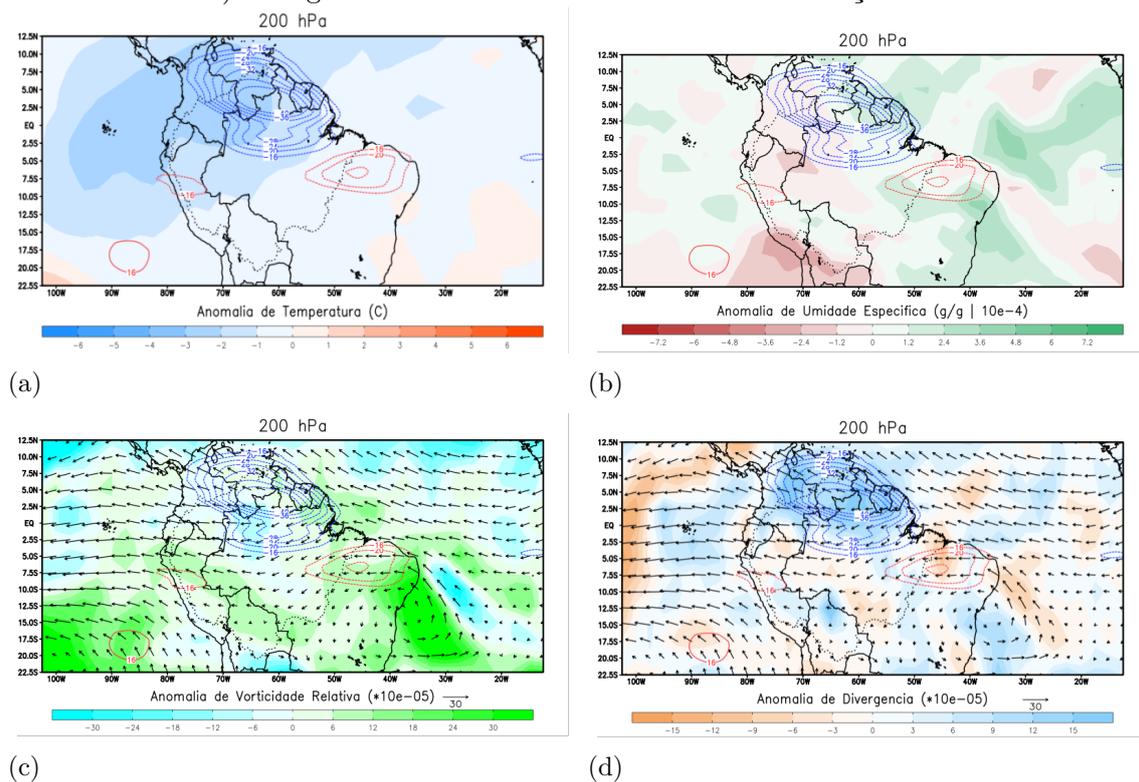
Figura 4.45 - Onda de Rossby (linhas vermelhas contínuas) e Onda de Kelvin (linhas azuis contínuas) na Amazônia e anomalias no nível 500 hPa de a) temperatura (°C), b) umidade específica (g/g), c) vorticidade relativa e vento horizontal e d) divergência e vento horizontal no dia 11 de março de 2011.



Em altos níveis da atmosfera (Figura 4.46), as anomalias de temperatura (Figura 4.46a) continuam negativas em toda a região. Com relação às anomalias de umidade específica (Figura 4.46b), nota-se que elas são negativas à oeste da onda de Kelvin e positivas à leste. As anomalias de vorticidade relativa (Figura 4.46c) são mínimas

neste nível, mas positivas na Amazônia com ventos predominantemente de leste. Há intensas anomalias de divergência (Figura 4.46d) na região afetada pela onda negativa de Kelvin, o que é esperado em uma região com convecção anômala.

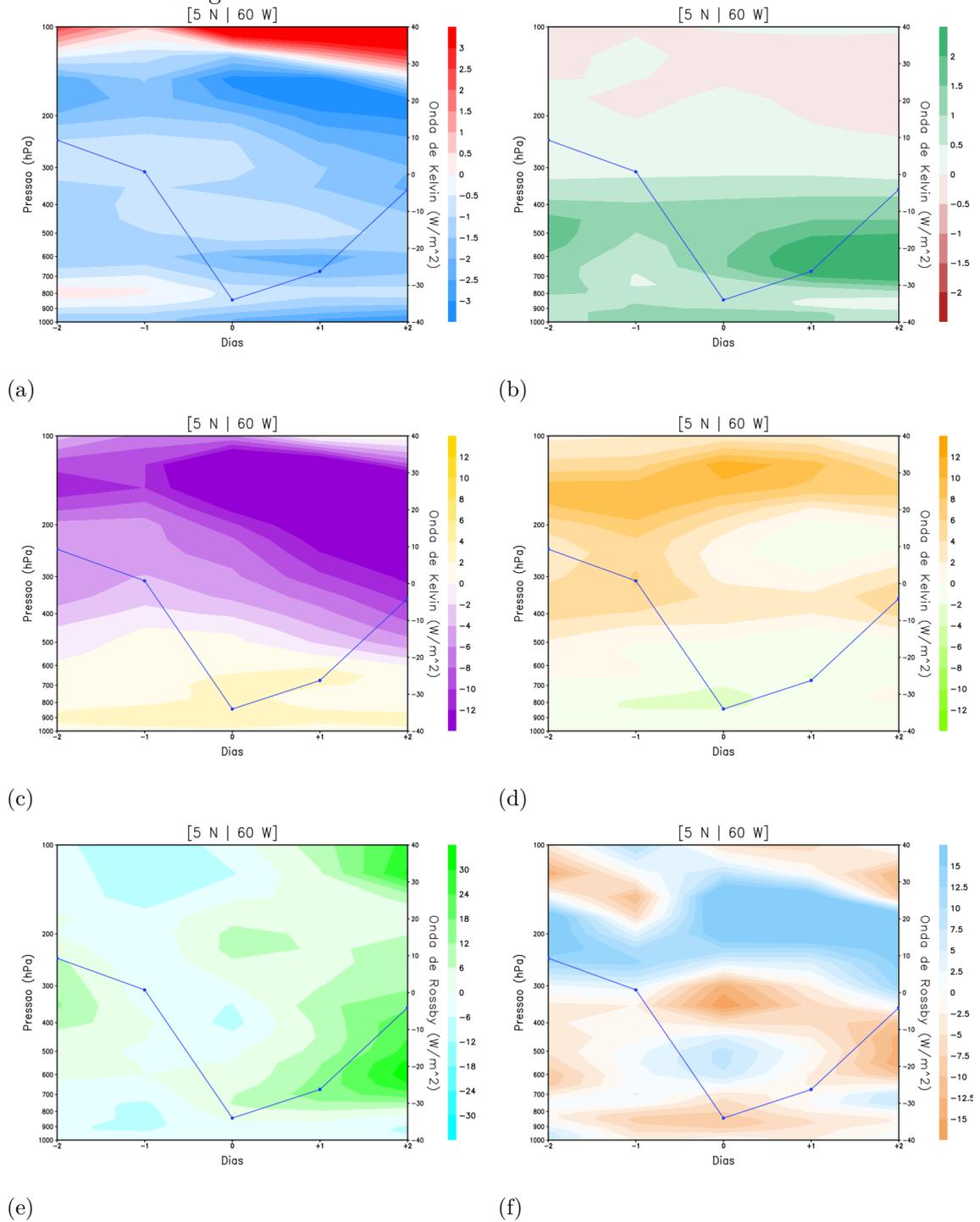
Figura 4.46 - Onda de Rossby (linhas vermelhas contínuas) e Onda de Kelvin (linhas azuis contínuas) na Amazônia e anomalias no nível 2000 hPa de a) temperatura (°C), b) umidade específica (g/g), c) vorticidade relativa e vento horizontal e d) divergência e vento horizontal no dia 11 de março de 2011.



Assim como no evento anterior, houveram anomalias negativas de temperatura para a região de atuação da onda de Kelvin com fase negativa, porém estas foram mais intensas e generalizadas para toda Amazônia. A diminuição de umidade em baixos níveis e o aumento em médios e altos é visto em ambos eventos. Com relação à vorticidade relativa, no primeiro evento um anticiclone era visto na região do núcleo da onda, de baixos à altos níveis, enquanto que no segundo evento em médios níveis tem-se um ciclone. No primeiro evento as anomalias de divergência mostram convergência em baixos níveis e divergência em médios e altos níveis, enquanto que no segundo evento a divergência aparece em baixos e altos níveis, com convergência em médios níveis.

Na Figura 4.47 são vistas as anomalias das variáveis meteorológicas para o período entre 09 de março (-2) até 13 de março (+2) para todos os níveis da troposfera em 5 N e 60 W com a passagem da fase negativa da onda de Kelvin mais intensa neste ano. Para todos este período, as anomalias de temperatura (Figura 4.47a) são negativas em todos os níveis na vertical, exceto próximo à 100 hPa. As anomalias de umidade específica (Figura 4.47b) são positivas em todos os dias até cerca de 200 hPa, acima deste nível se tornando negativas. As anomalias de vento zonal (Figura 4.48c) mostram uma clara distinção entre os níveis de 1000 e 600 hPa e entre 600 e 100 hPa. Os ventos mais próximos à superfície são anormalmente de oeste, enquanto na camada superior são de leste. Essa inversão é semelhante no perfil de vento meridional (Figura 4.47d), na camada de 1000 à 600 hPa os ventos são anormalmente de norte, enquanto entre 600 e 100 hPa são de sul, exceto entre 300 e 200 hPa quando se tornaram de norte. O campo das anomalias de vorticidade relativa (Figura 4.47e) mostram uma mudança no perfil vertical desta anomalia, onde nos primeiros dias era negativa e com a passagem da parte mais negativa da onda de Kelvin e para os dias seguintes se tornou positiva. Ou seja, houve a troca de um giro anticiclônico por ciclônico com a passagem da onda. Semelhante ao evento anterior, há constante alternância entre as anomalias de divergência (Figura 4.47f) com a altura. No dia 0 estas são negativas entre 1000 e 800 hPa e entre 400 e 300 hPa, e positivas entre 800 e 400 hPa e entre 300 e 100 hPa.

Figura 4.47 - Variação de intensidade da Onda de Kelvin para o centro de maior passagem da onda nos dias 09/03 (-2) até 13/03 (+2) de 2011 entre 1000 hPa e 100 hPa com as anomalias de a) temperatura ($^{\circ}\text{C}$), b) umidade específica (g/g), c) vento zonal (m/s), d) vento meridional (m/s), e) vorticidade relativa e f) divergência.

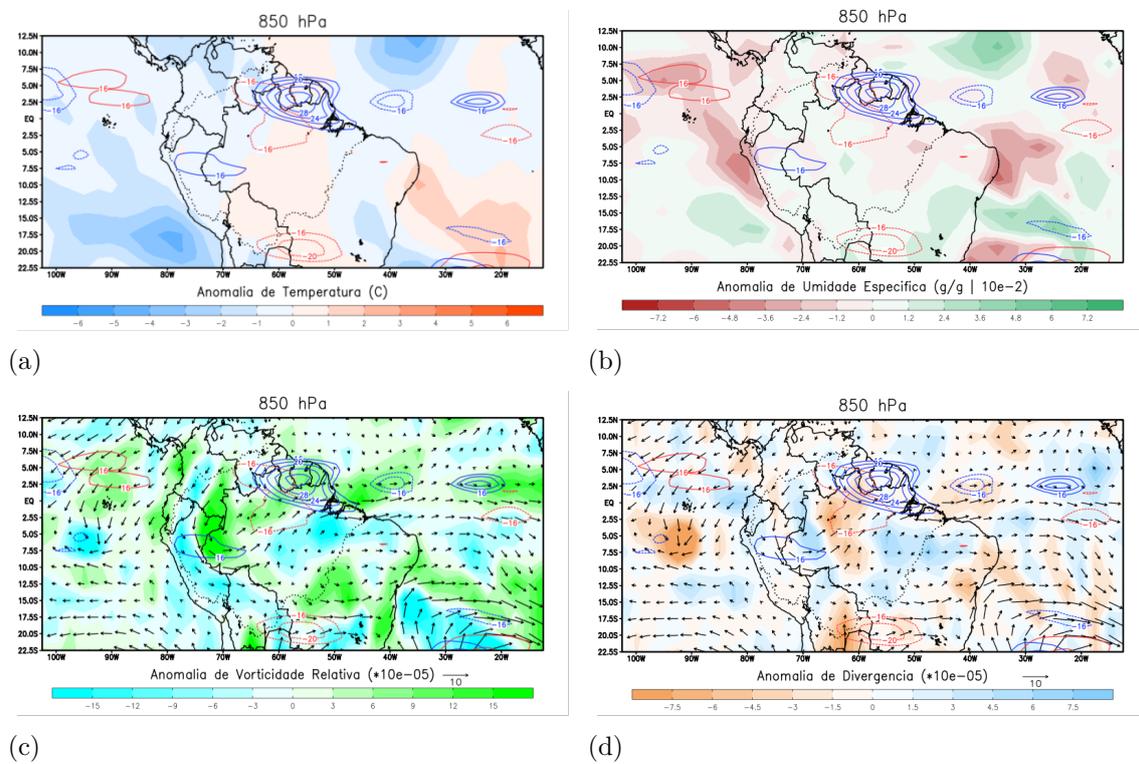


No evento anterior, as anomalias de temperatura eram negativas em baixos e altos níveis para o pico da onda negativa, neste evento foram nos três níveis, porém mais intensas entre 200 e 150hPa, e entre 700 e 600hPa. Não são vistas anomalias negativas de umidade específica entre 1000 e 800 hPa como no primeiro evento, havendo o predomínio de aumento de umidade até 200 hPa. No evento anterior os ventos de leste eram vistos em toda a camada de 1000 à 100 hPa, não apenas de médios para altos níveis, e o vento era anormalmente de norte em toda a camada, não apenas de baixo para médios níveis. No primeiro evento havia um anticiclone em baixos e altos níveis, enquanto que no segundo evento tem-se um ciclone. As anomalias de divergência são as mais similares ao primeiro evento, incluindo as alternâncias entre divergência e convergência com a altura.

A máxima intensidade da onda positiva neste outono ocorreu no dia 18 de março, 7 dias após o pico da fase negativa. Em módulo, a intensidade no núcleo positivo da onda de Kelvin foi muito inferior à fase negativa e também menos intenso do que durante o primeiro evento. Nas Figuras 4.48, 4.49 e 4.50 as anomalias das variáveis meteorológicas são vistas para baixos, médios e altos níveis da troposfera, respectivamente.

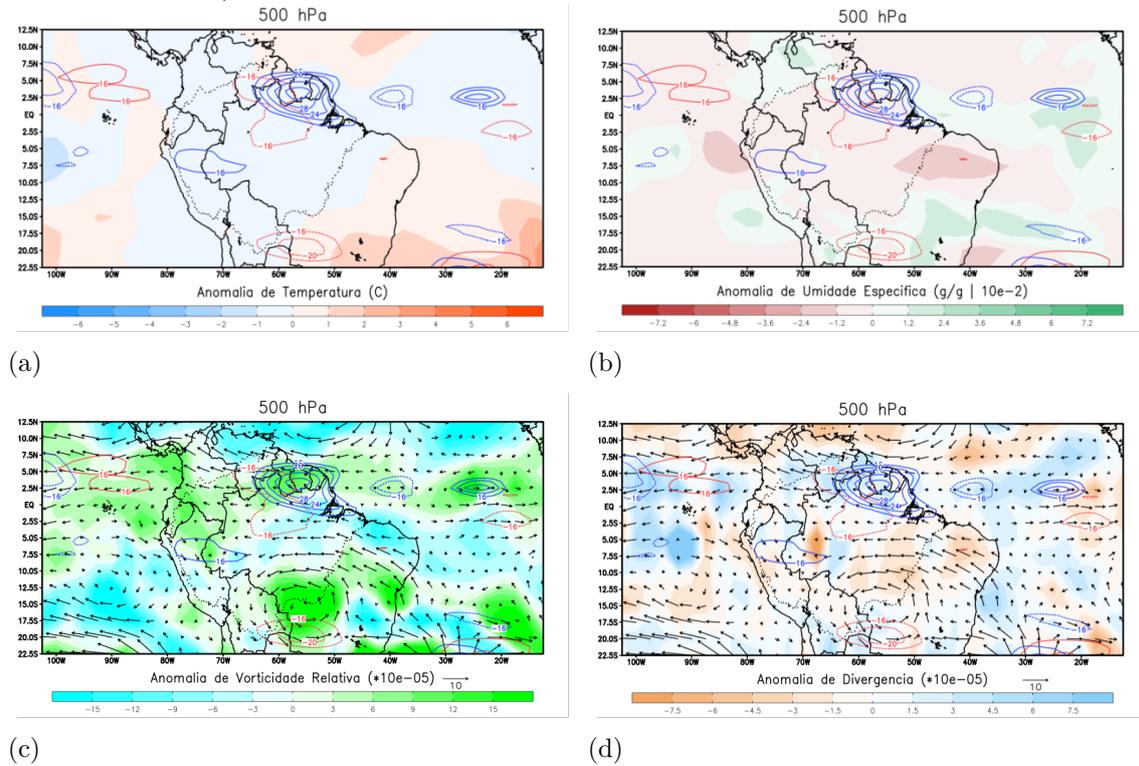
A temperatura em baixos níveis (Figura 4.48a) apresenta anomalias negativas para o Oceano Pacífico e parte da Amazônia, porém para a região do pico da fase positiva é notável anomalias positivas ao norte e ao sul do núcleo. As anomalias de umidade específica (Figura 4.48b) também são negativas na região associada com a onda de Kelvin, porém é anormalmente positiva em uma pequena porção centro-sul da Amazônia. As anomalias de vorticidade (Figura 4.48c) são positivas na área da onda e à sudoeste dela, associado com giro anticiclônico no oeste da Amazônia, porém uma região de vorticidade negativa surge à sudeste da onda de Kelvin. Há leves anomalias de divergência (Figura 4.48d) na região da onda de Kelvin e uma área de convergência à sudoeste dela.

Figura 4.48 - Onda de Rossby (linhas vermelhas contínuas) e Onda de Kelvin (linhas azuis contínuas) na Amazônia e anomalias no nível 850 hPa de a) temperatura ($^{\circ}\text{C}$), b) umidade específica (g/g), c) vorticidade relativa e vento horizontal e d) divergência e vento horizontal no dia 18 de março de 2011.



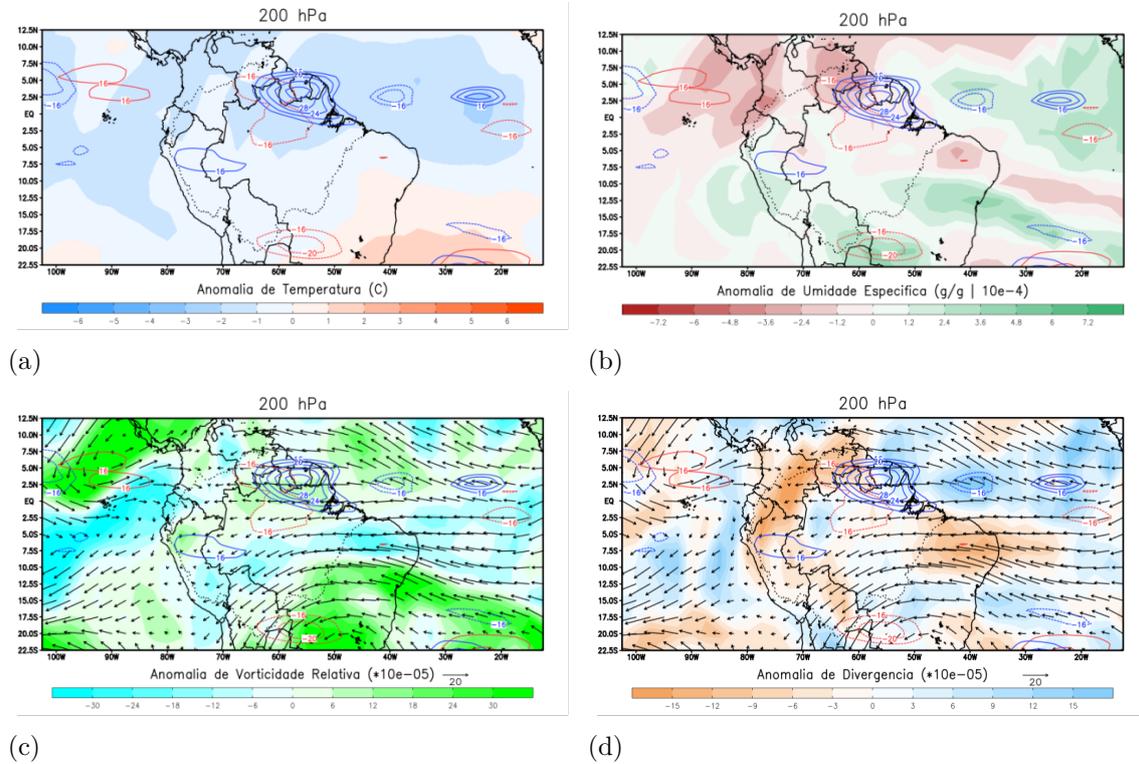
Em médios níveis, as anomalias de temperatura (Figura 4.49a) permanecem negativas na Amazônia e as anomalias de umidade específica (Figura 4.49b) são negativas em toda a Amazônia. Com relação à vorticidade relativa (Figura 4.49c), estas são anormalmente positivas na porção norte e sul da Amazônia, sendo negativas na porção central. Intenso giro anticiclônico é visto na fronteira sul da Amazônia. As anomalias de divergência (Figura 4.49d) para este nível da atmosfera se mostram positivas na região da onda de Kelvin e negativas ao sul desta.

Figura 4.49 - Onda de Rossby (linhas vermelhas contínuas) e Onda de Kelvin (linhas azuis contínuas) na Amazônia e anomalias no nível 500 hPa de a) temperatura ($^{\circ}\text{C}$), b) umidade específica (g/g), c) vorticidade relativa e vento horizontal e d) divergência e vento horizontal no dia 18 de março de 2011.



Em altos níveis da atmosfera, as anomalias negativas de temperatura (Figura 4.50a) permanecem, além de serem mais intensas em módulo (até -3°C) na porção norte da Amazônia e local onde a onda de Kelvin se faz presente. Neste nível, as anomalias negativas de umidade específica (Figura 4.50b) ficam retidas na metade norte da Amazônia e norte da América do Sul, enquanto na metade sul as anomalias são positivas. A vorticidade relativa (Figura 4.50c) é anormalmente positiva na região da onda de Kelvin e negativa no restante da Amazônia ao sul da linha do equador, ou seja, giro ciclônico em toda Amazônia. Os ventos adentram a Amazônia vindos de leste. Com relação às anomalias de divergência (Figura 4.50d), nota-se convergência à oeste da onda de Kelvin e divergência à leste.

Figura 4.50 - Onda de Rossby (linhas vermelhas contínuas) e Onda de Kelvin (linhas azuis contínuas) na Amazônia e anomalias no nível 200 hPa de a) temperatura (°C), b) umidade específica (g/g), c) vorticidade relativa e vento horizontal e d) divergência e vento horizontal no dia 18 de março de 2011.

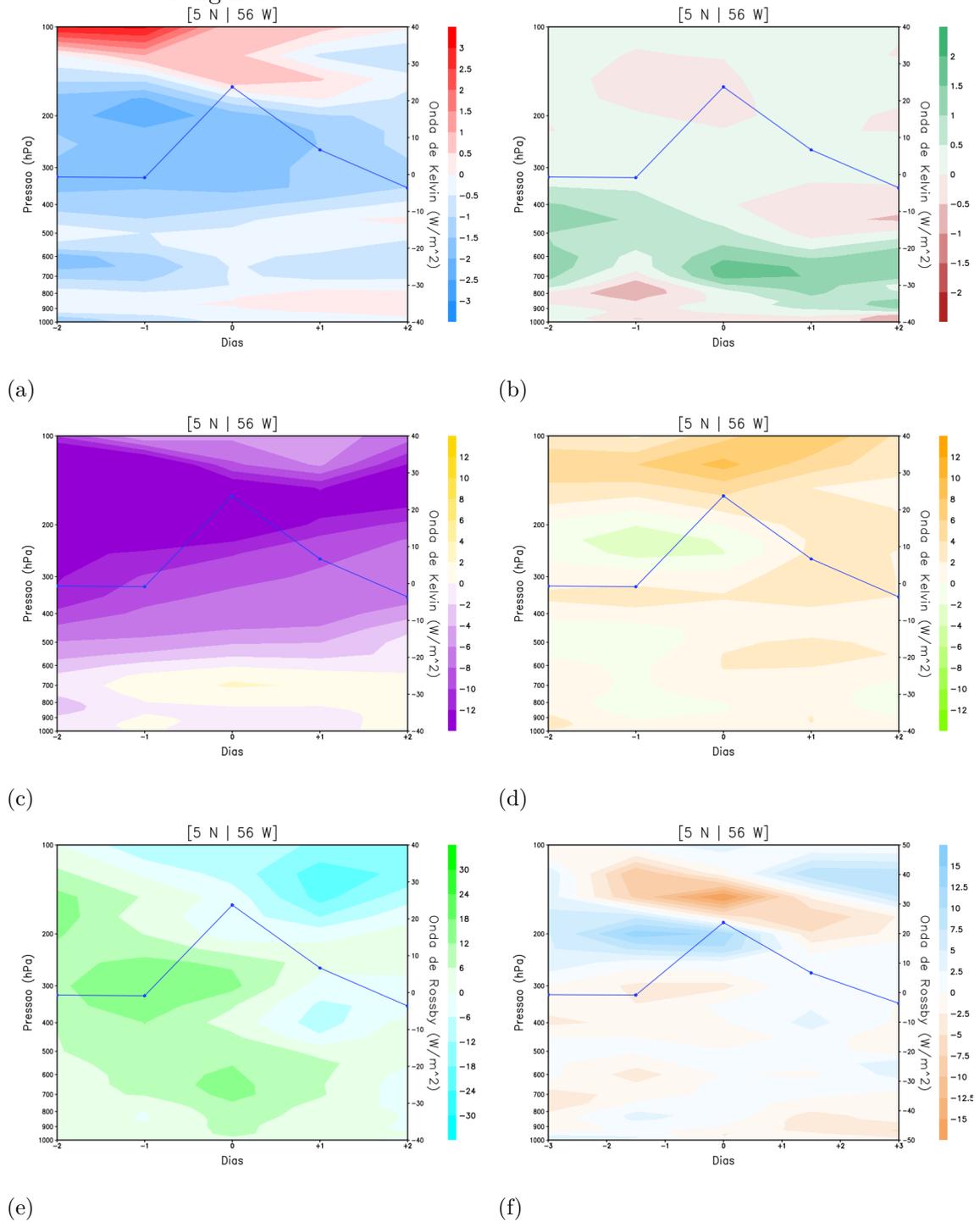


Em comparação com a fase positiva do primeiro evento, no primeiro a Amazônia apresentava anomalias positivas de temperatura em baixos e médios níveis, com diminuição de temperatura apenas em altos níveis da troposfera, enquanto neste evento o predomínio foi de anomalias negativas. Nos dois eventos, houve diminuição da umidade específica na região de atuação da onda nos três níveis na vertical, especialmente na metade norte da Amazônia. A vorticidade relativa também apresentou o mesmo comportamento nos dois eventos, sendo positiva nos três níveis. Nos dois eventos, tinha-se divergência em baixos e médios níveis no pico da onda positiva. No entanto, no primeiro evento em altos níveis o núcleo apresentava anomalias neutras e convergência ao seu redor, já no segundo evento é notável convergência à oeste e divergência à leste do núcleo. Esta convergência em altos níveis à oeste da onda de Kelvin é compatível com o posicionamento de uma onda de Rossby negativa e anomalias positivas de ROL.

A Figura 4.51 apresenta os perfis verticais com o tempo das anomalias para os dias 16

(-2) à 20 (+2) de março de 2011 com a passagem do pico positivo da onda de Kelvin em 5 N e 56 W. O perfil das anomalias de temperatura (Figura 4.51a) permanece com o mesmo comportamento da fase negativa: diminuição de temperatura da superfície até cerca de 150 hPa, acima deste nível ocorrendo aumento de temperatura. As anomalias de umidade específica (Figura 4.51b) são menos pronunciadas que na fase negativa, porém ainda predominam de baixos para altos níveis. Diminuição na umidade específica ocorre entre 1000 e 800 hPa nos dias -2 e -1, entre 200 e 120 hPa nos dias -1 e 0 e por volta de 400 hPa nos dias +1 e +2. Nas anomalias de vento zonal (Figura 4.51c) nota-se predomínio de ventos de leste, exceto em uma camada entre 800 e 600 hPa com leves anomalias de oeste. As anomalias de vento meridional (Figura 4.51d) mostram anomalias generalizadas de sul em todos os dias e níveis na vertical, com anomalias de norte surgindo entre 300 e 200 nos dias -2 à 0. As anomalias de vorticidade relativa (Figura 4.51e) mostram o predomínio de vorticidade positiva nos dias -2 e -1 em todos os níveis na vertical, indicando um ciclone anômalo de baixos à altos níveis. Giro anticiclônico surge entre 200 e 100 hPa dos dias 0 à +2 e também entre 500 e 300 hPa nos dias +1 e +2. Com relação às anomalias de divergência (Figura 4.51f), estas se tornam mais intensas com a altura, no pico da fase positiva sendo divergente entre 1000 e 400 hPa, convergente entre 400 e 300 hPa, divergente em 200 hPa e convergente em 150 hPa.

Figura 4.51 - Variação de intensidade da Onda de Kelvin para o centro de maior passagem da onda nos dias 16/03 (-2) até 20/03 (+2) de 2011 entre 1000 hPa e 100 hPa com as anomalias de a) temperatura ($^{\circ}\text{C}$), b) umidade específica (g/g), c) vento zonal (m/s), d) vento meridional (m/s), e) vorticidade relativa e f) divergência.



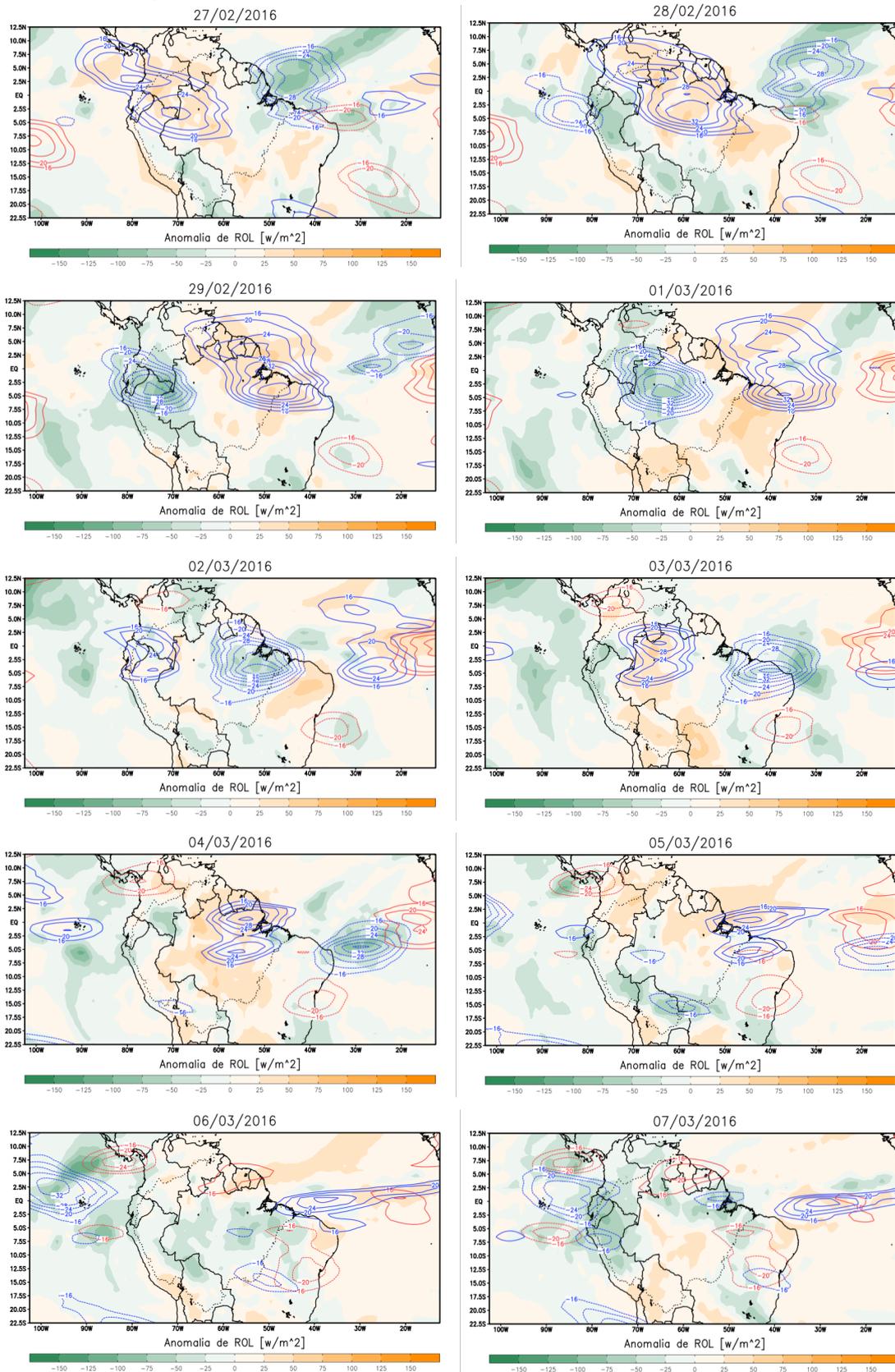
Em comparação com a fase positiva do primeiro evento, ambos tiveram diminuição de temperatura na vertical, com o primeiro evento possuindo diminuição de temperatura em médios e altos níveis e o segundo evento sendo desde a superfície até 200 hPa. Em ambos os eventos houve anomalias positivas de umidade específica em baixos e médios níveis e negativas em altos níveis. No primeiro evento, uma faixa entre 600 e 400 hPa possuía ventos de oeste em uma troposfera dominada por ventos de leste, enquanto no segundo evento essa faixa é mais estreita e surge entre 800 e 600 hPa. No primeiro evento as anomalias eram de sul até 200 hPa, neste caso as anomalias de norte surgem entre 300 e 200 hPa. No primeiro evento há anticiclone anômalo em baixos e médios níveis e ciclone em altos níveis, enquanto no segundo um ciclone é evidente desde a superfície até 200 hPa, com anticiclone anômalo surgindo acima de 200 hPa. Ambos os eventos possuem divergência entre 300 e 200 hPa e convergência entre 200 e 100 hPa.

4.2.3 Terceiro evento

O terceiro evento selecionado ocorreu no outono de 2016, ano da presença do fenômeno El Niño. Na Figura 4.52 e nas Tabelas A.13 e A.14 (Apêndice A), são apresentadas as anomalias de ROL e as ondas de Rossby e de Kelvin entre os dias 27 de fevereiro e 07 de março de 2016. É notável uma sequência de intensas ondas de Kelvin alternando entre positiva e negativa adentrando a Amazônia e ocasionando anomalias de ROL com sua passagem, provável consequência do aumento da convecção no Pacífico Equatorial decorrente das temperaturas mais aquecidas na superfície do mar. No dia 27, uma onda de Kelvin com fase positiva adentrava a Amazônia vinda de oeste, com núcleo de intensidade 28 W/m^2 centrado aproximadamente entre $2,5$ e 5 S e 70 W , alongado para noroeste e com ele anomalias positivas de ROL no sentido noroeste-sudeste na Amazônia. Outra onda de Kelvin, mas com fase negativa, se encontra no Oceano Atlântico adjacente, com intensidade de -28 W/m^2 em seu núcleo, centrada aproximadamente em 5 N e 45 W e ocasionando anomalias negativas de ROL no Oceano Atlântico e na costa nordeste da Amazônia. No dia 28, a onda positiva de Kelvin adentra ainda mais sobre a Amazônia e se posiciona na porção centro-norte da região. Anomalias positivas de ROL surgem na parte central, norte e leste da Amazônia. Uma nova fase negativa da onda de Kelvin surge próxima à costa oeste do continente, com -24 W/m^2 em seu centro, núcleo aproximadamente entre $2,5$ e 5 S e 85 W . Anomalias negativas de ROL surgem à oeste e sul da Amazônia. Com o deslocamento da fase positiva e negativa da onda de Kelvin pela Amazônia e fortalecimento das duas fases, também há um notável deslocamento das anomalias de ROL para leste. As anomalias positivas ficam retidas na porção leste

da Amazônia, com as anomalias negativas à oeste se aproximando da região central. No dia 1º de março, a fase positiva se desloca para o Oceano Atlântico, provocando anomalias positivas de ROL na região equatorial do oceano e no nordeste brasileiro. A fase negativa aumenta sua intensidade conforme se propaga pela região central da Amazônia e provoca anomalias negativas de ROL na parte centro-oeste da região. No dia 02 de março a onda de fase negativa propaga para o leste da Amazônia e aumenta ainda mais de intensidade, sendo a onda negativa mais intensa de todo este outono. Outro núcleo da fase positiva da onda de Kelvin surge no extremo oeste da Amazônia, porém parece influenciar pouco nas anomalias de ROL, que são negativas em toda Amazônia, exceto em pontos específicos à leste e sudeste da onda positiva. Já no dia 03, a fase negativa posiciona-se sobre o nordeste brasileiro, ocasionando anomalias negativas de ROL nessa região. A fase positiva propaga pela Amazônia brasileira provocando anomalias positivas de ROL em uma faixa central e no sul da região. Esta onda se deslocou com dois núcleos distintos: um deles com maior intensidade centrado na linha do Equador e um núcleo secundário por volta de 5 S. No dia 04 a onda atinge sua intensidade máxima e provoca anomalias positivas de ROL em toda a Amazônia brasileira. Com o deslocamento da onda de Kelvin para o Oceano Atlântico nos dias seguintes, nota-se o desaparecimento do núcleo mais ao sul, enquanto o núcleo centrado na linha do Equador continua a se propagar e manter a mesma intensidade nestes dias.

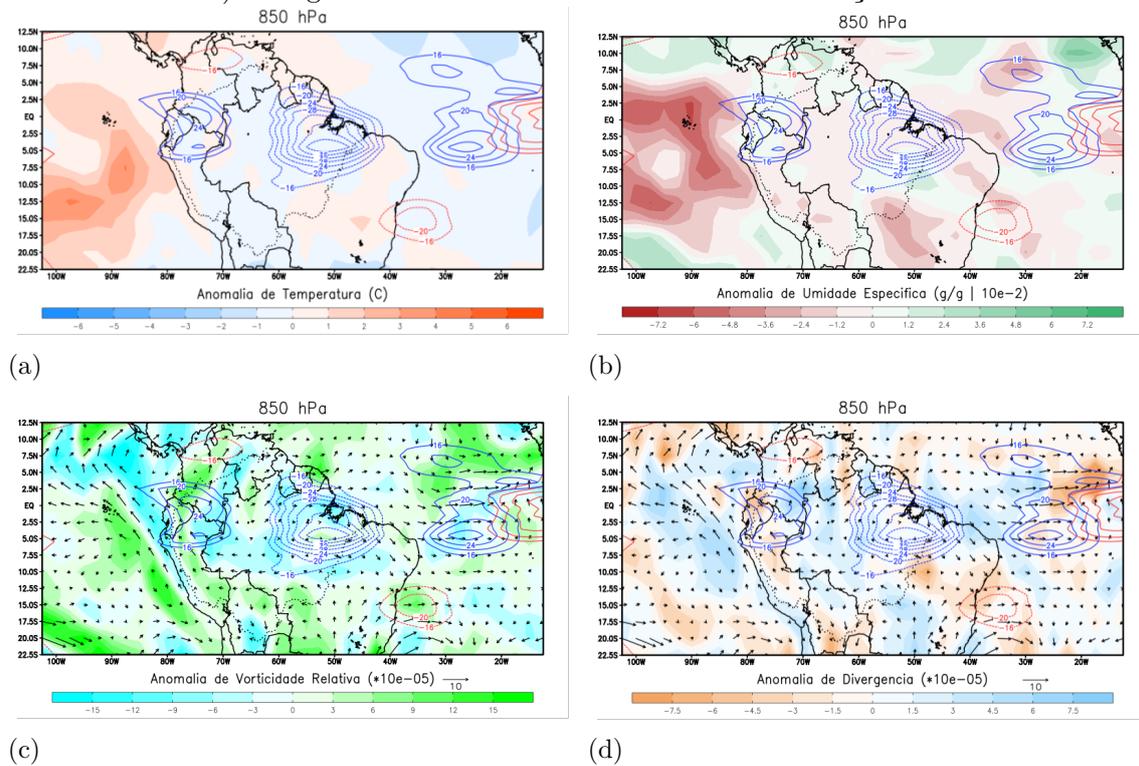
Figura 4.52 - Passagem de uma Onda de Kelvin pela Amazônia no outono de 2016 entre os dias 27/02 e 07/03. Linhas vermelhas são Ondas de Rossby e linhas azuis Ondas de Kelvin.



Selecionando o dia 02 de março de 2016 como pico da fase negativa da onda de Kelvin, as características das anomalias das variáveis meteorológicas selecionadas são vistas por meio das Figuras 4.53, 4.54 e 4.55 para baixos, médios e altos níveis na atmosfera, respectivamente. Em seguida, nas Figuras 4.56, 4.57 e 4.58 as anomalias são vistas para os mesmos níveis na vertical para o dia 04 de março de 2016 com o máximo de atividade da fase positiva da mesma onda de Kelvin.

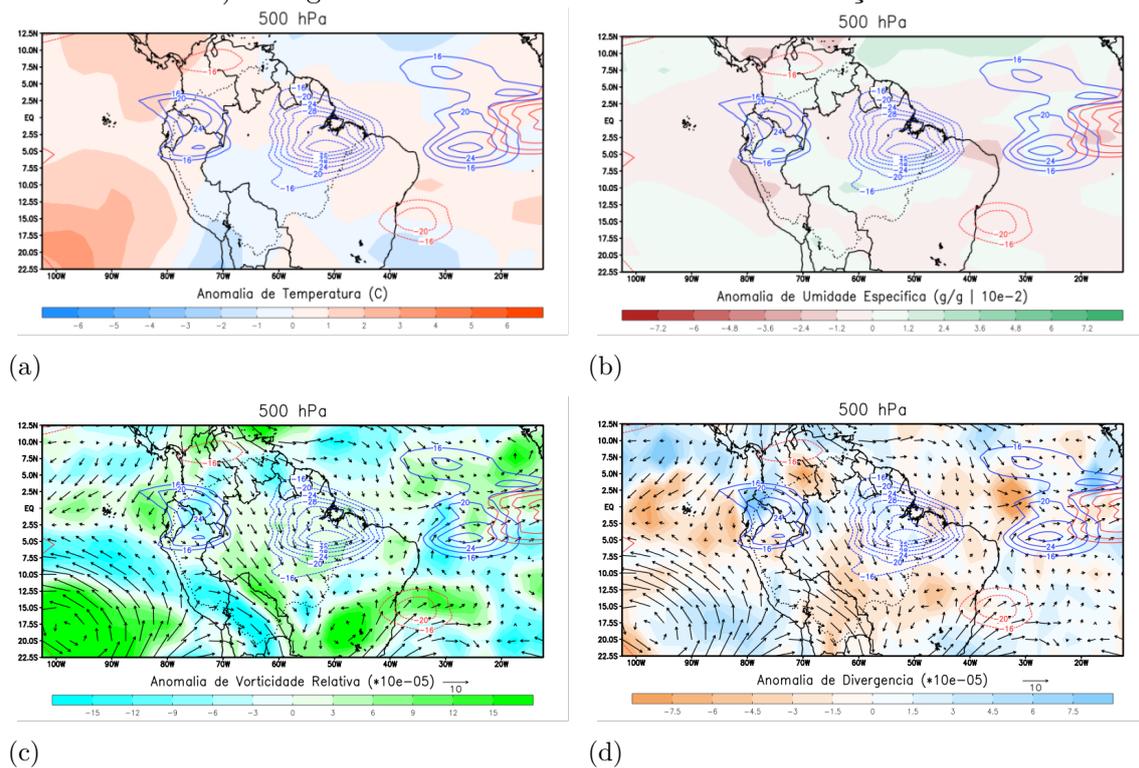
No dia 02 de março, em baixos níveis é observado um aumento de temperatura (Figura 4.53a) sobre o Oceano Pacífico decorrente do El Niño atuante e uma diminuição da temperatura na Amazônia de acordo com a atuação da onda de Kelvin. A umidade específica (Figura 4.53b) também decai na Amazônia como um todo, exceto ao sul-sudeste da onda de Kelvin negativa. As vorticidades (Figura 4.53c) anormalmente negativas são observadas na Amazônia, indicando giro ciclônico, os ventos são fracos e com velocidade próxima à zero. Neste nível também são visíveis anomalias de divergência (Figura 4.53d) em quase toda a Amazônia, o que contradiz com as anomalias ciclônicas também presentes.

Figura 4.53 - Onda de Rossby (linhas vermelhas contínuas) e Onda de Kelvin (linhas azuis contínuas) na Amazônia e anomalias no nível 850 hPa de a) temperatura ($^{\circ}\text{C}$), b) umidade específica (g/g), c) vorticidade relativa e vento horizontal e d) divergência e vento horizontal no dia 02 de março de 2016.



Em médios níveis, é notável aumento de temperatura (Figura 4.54a) na região central da onda de Kelvin com fase negativa e na metade norte da Amazônia, com as anomalias negativas sendo visíveis na metade sul da região. As anomalias de umidade (Figura 4.54b) também seguem semelhante padrão dos baixos níveis, com redução na metade norte e aumento na metade sul da Amazônia. As anomalias de vorticidade (Figura 4.54c) na Amazônia central e leste são positivas, com valores mínimos na região da onda. No norte, oeste e sul da Amazônia as vorticidades são negativas. O vento adentra a Amazônia de noroeste neste nível. Com relação à divergência (Figura 4.54d), estas são positivas na região da onda de Kelvin e na maior parte da metade norte da Amazônia, enquanto são negativas na metade sul.

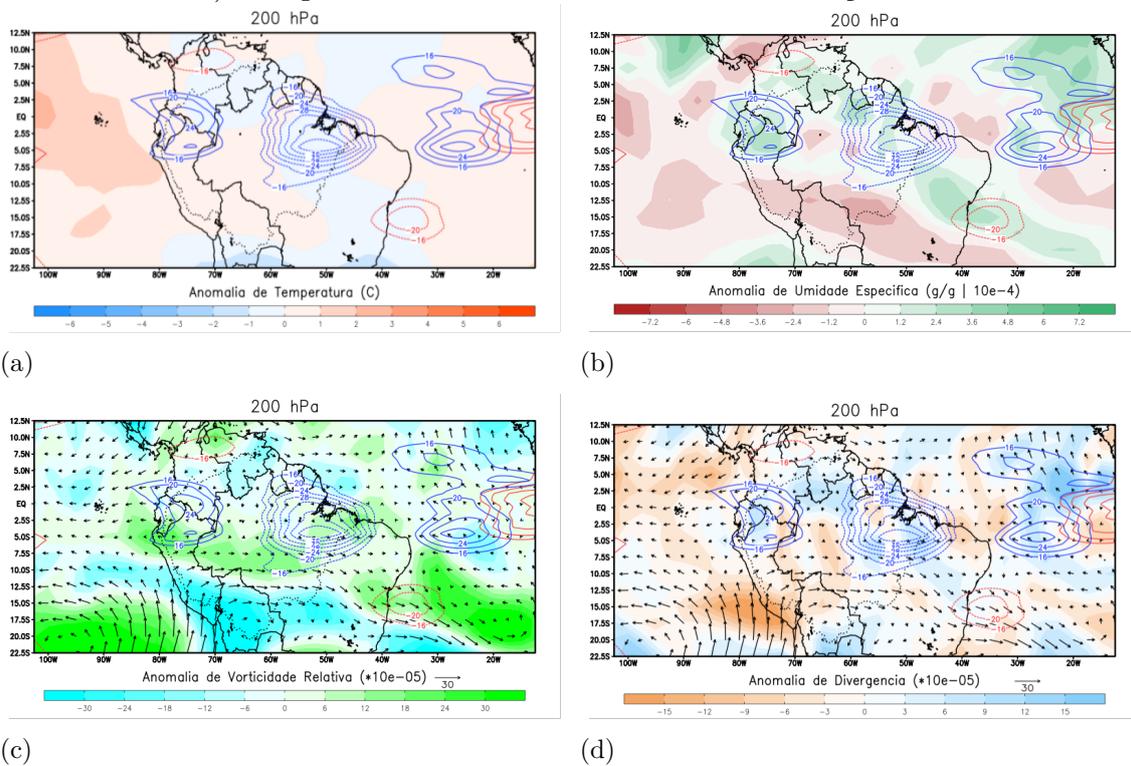
Figura 4.54 - Onda de Rossby (linhas vermelhas contínuas) e Onda de Kelvin (linhas azuis contínuas) na Amazônia e anomalias no nível 500 hPa de a) temperatura ($^{\circ}\text{C}$), b) umidade específica (g/g), c) vorticidade relativa e vento horizontal e d) divergência e vento horizontal no dia 02 de março de 2016.



Nos altos níveis, anomalias negativas de temperatura (Figura 4.55a) voltam a aparecer na região central da onda, na Amazônia leste e norte, enquanto o resto da região apresenta anomalias positivas. As anomalias de umidade específica (Figura 4.55b)

são negativas na parte central e sul da Amazônia, enquanto são positivas no norte e leste e na região da onda de Kelvin. Na faixa central da Amazônia e região da onda, há vorticidade (Figura 4.55c) anomalmamente positiva, enquanto ao norte e ao sul da Amazônia as anomalias são negativas. No núcleo da onda de Kelvin, ao norte, oeste e leste da Amazônia, há anomalias de divergência (Figura 4.55d), enquanto na parte central e sul há convergência.

Figura 4.55 - Onda de Rossby (linhas vermelhas contínuas) e Onda de Kelvin (linhas azuis contínuas) na Amazônia e anomalias no nível 200 hPa de a) temperatura ($^{\circ}\text{C}$), b) umidade específica (g/g), c) vorticidade relativa e vento horizontal e d) divergência e vento horizontal no dia 02 de março de 2016.

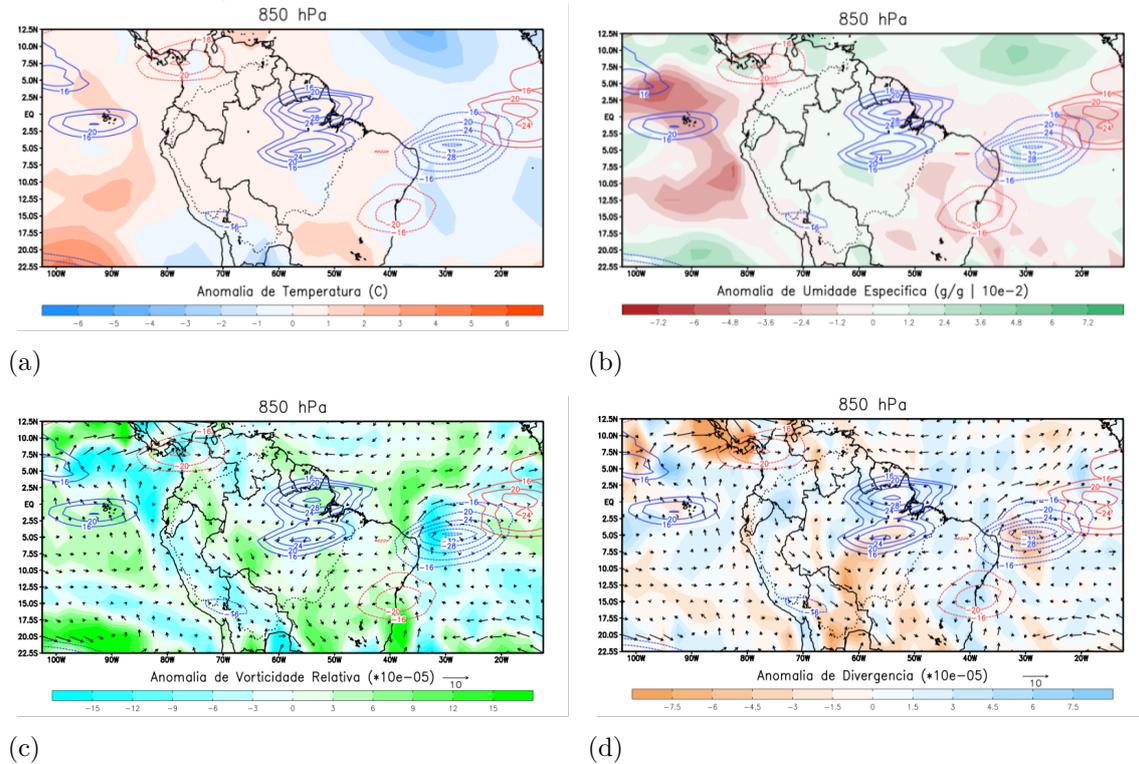


Nos dois eventos anteriores, as anomalias de temperatura foram negativas no núcleo da onda para os três níveis na troposfera. No terceiro evento, isso se faz presente em baixos e altos níveis, já que houve aumento de temperatura em médios níveis. Nos eventos anteriores notou-se diminuição de umidade específica em baixos níveis e aumento em médio e altos níveis, padrão que se repetiu neste evento, porém, com diminuição em médios níveis. Este evento contou com a presença de vorticidades anomalmamente ciclônicas em baixos níveis e anticiclônicas em médios e altos níveis.

Enquanto giro ciclônico em baixos níveis não foi uma característica vista nos primeiros dois eventos, o primeiro evento também registrou giro anticiclônico em médios níveis e todos eventos tiveram anticiclone em altos níveis. No primeiro evento divergência era vista em médios e altos níveis, enquanto no segundo evento em baixos e altos níveis, já no terceiro evento foi notável nos três níveis. Assim, a característica mais presente é a divergência em altos níveis.

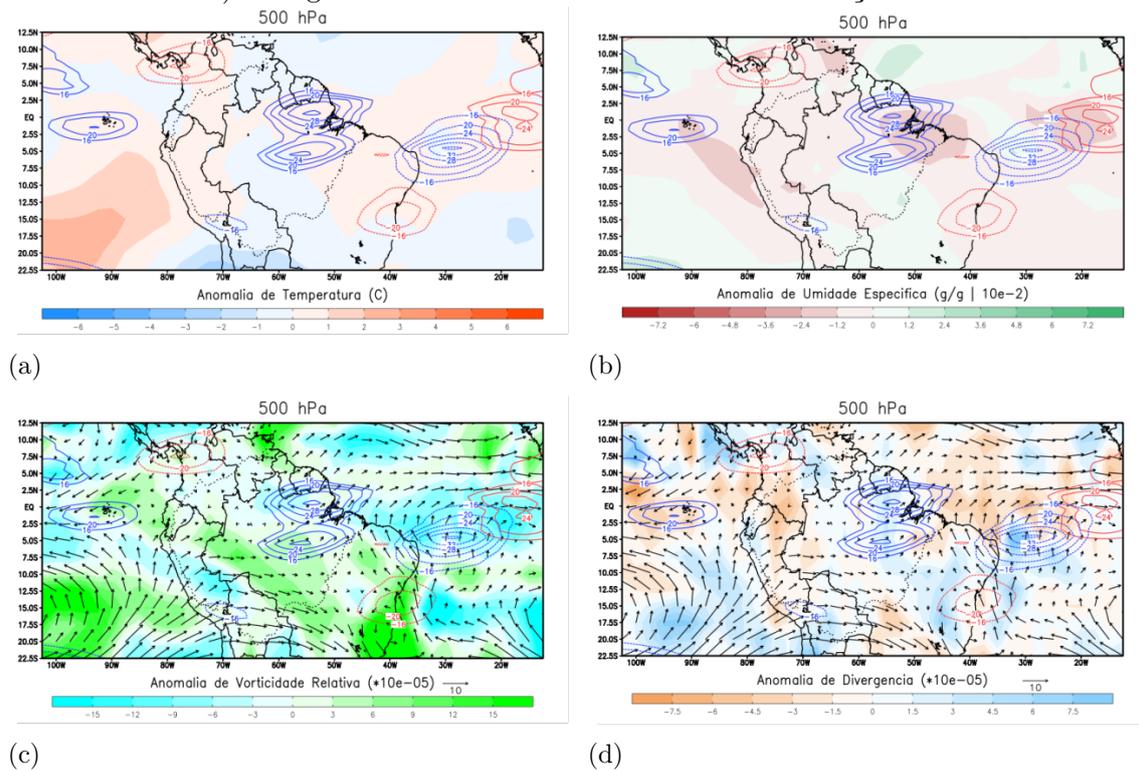
Durante o pico da fase positiva no dia 04 de março de 2016, nota-se aumento de temperatura (Figura 4.56a), aumento de umidade específica (Figura 4.56b) e vorticidade relativa (Figura 4.56c) positiva em toda a Amazônia de forma geral. Em questão das anomalias de divergência (Figura 4.56d), estas estão presentes em boa parte da Amazônia, porém convergência em uma porção central-sul da Amazônia, de forma que o núcleo da onda de Kelvin localizado na Linha do Equador apresenta divergência e o no HS convergência.

Figura 4.56 - Onda de Rossby (linhas vermelhas contínuas) e Onda de Kelvin (linhas azuis contínuas) na Amazônia e anomalias no nível 850 hPa de a) temperatura ($^{\circ}\text{C}$), b) umidade específica (g/g), c) vorticidade relativa e vento horizontal e d) divergência e vento horizontal no dia 04 de março de 2016.



Em médios níveis, as anomalias positivas de temperatura (Figura 4.57a) permanecem na região da onda de Kelvin, porém nota-se queda na temperatura na parte norte e centro-sul da Amazônia. As anomalias de umidade específica (Figura 4.57b) mostram o predomínio das anomalias negativas na Amazônia e na região das ondas, com exceção da parte sudeste da região de estudo. As anomalias de vorticidade (Figura 4.57c) são positivas ao sul da Linha do Equador e negativas ao norte, indicando vorticidade anticiclônica na região da onda de Kelvin. Ventos adentam a Amazônia vindo de sudoeste. As anomalias de divergência (Figura 4.57d) são positivas na Amazônia de forma geral, exceto no oeste.

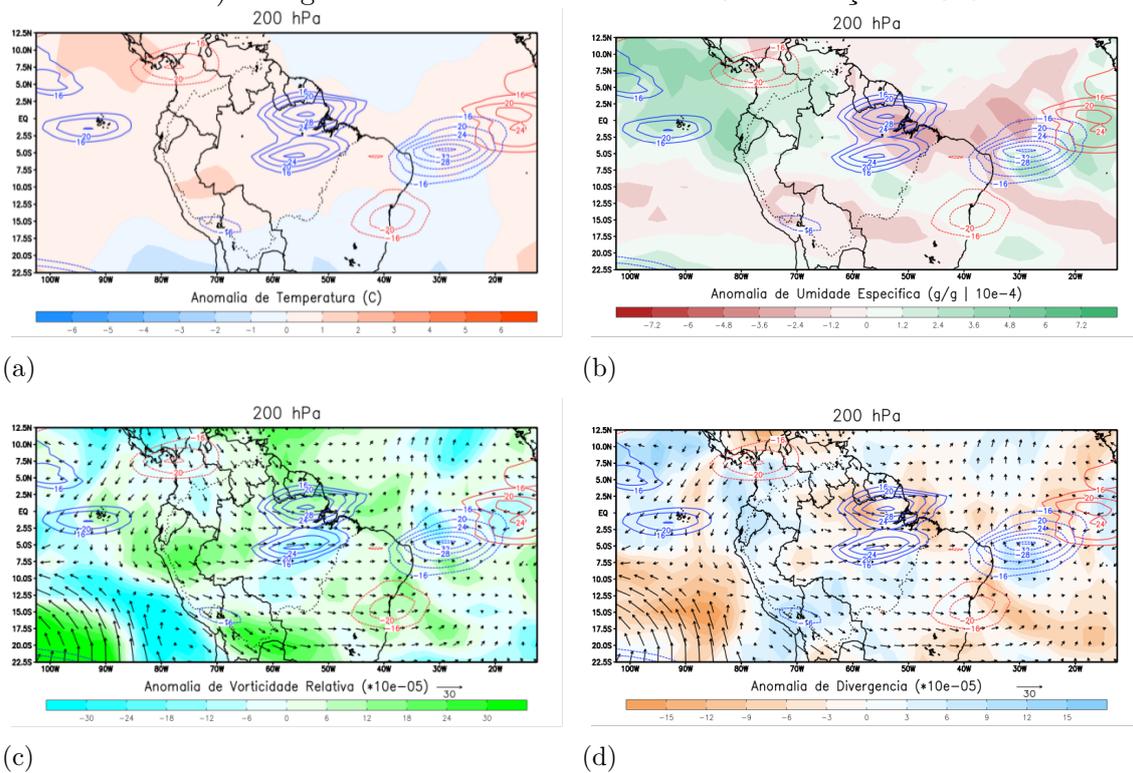
Figura 4.57 - Onda de Rossby (linhas vermelhas contínuas) e Onda de Kelvin (linhas azuis contínuas) na Amazônia e anomalias no nível 500 hPa de a) temperatura ($^{\circ}\text{C}$), b) umidade específica (g/g), c) vorticidade relativa e vento horizontal e d) divergência e vento horizontal no dia 04 de março de 2016.



Em altos níveis, nota-se um aumento das áreas cobertas pelas anomalias positivas de temperatura (Figura 4.58a) em toda a Amazônia. As anomalias de umidade específica (Figura 4.58b) continuam negativas na região de atuação da onda de Kelvin, porém são visíveis anomalias positivas na parte noroeste e sudeste da Amazônia.

No núcleo posicionado na Linha do Equador e ao norte, as anomalias de vorticidade (Figura 4.58c) são positivas, enquanto são negativas no núcleo ao sul, marcando assim giro ciclônico na região da onda de Kelvin. Com relação à divergência (Figura 4.58d), nota-se convergência na faixa equatorial da Amazônia e abrangendo a região da onda de Kelvin, porém com divergência no oeste, sul e sudeste da Amazônia.

Figura 4.58 - Onda de Rossby (linhas vermelhas contínuas) e Onda de Kelvin (linhas azuis contínuas) na Amazônia e anomalias no nível 200 hPa de a) temperatura ($^{\circ}\text{C}$), b) umidade específica (g/g), c) vorticidade relativa e vento horizontal e d) divergência e vento horizontal no dia 04 de março de 2016.



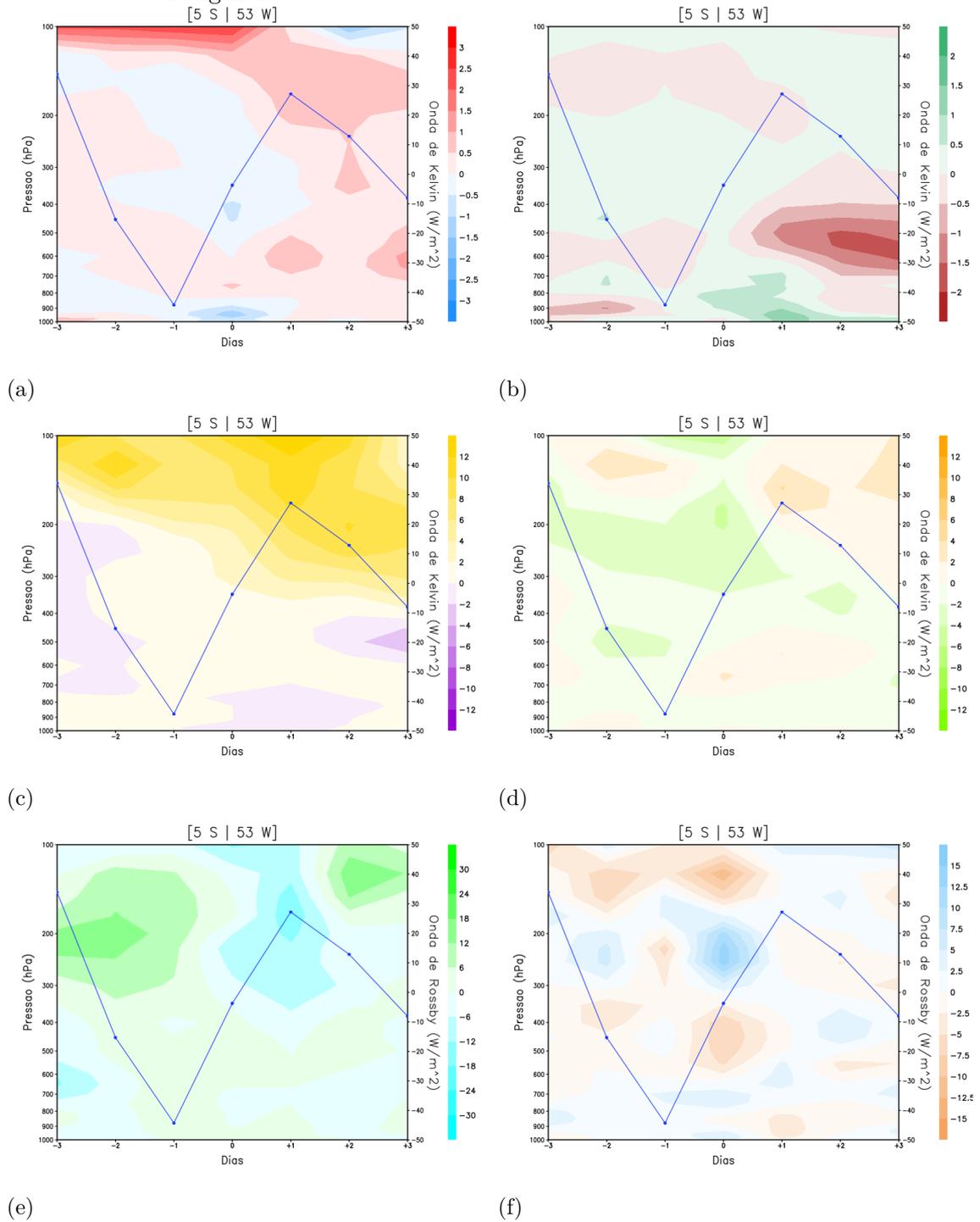
Diversas semelhanças e diferenças surgem ao comparar este evento com os dois anteriores. As anomalias de temperatura foram positivas nos três níveis para a região da onda de Kelvin, similar ao primeiro (que teve diminuição somente em altos níveis) e completamente diferente do segundo, em que anomalias negativas estiveram presentes em todos os níveis, provavelmente devido ser um ano de La Niña. Apesar do aumento da umidade específica em baixos níveis ser incompatível com os outros eventos, em médios e altos níveis também houve diminuição como nos anteriores. Nota-se na região da onda giro anticiclônico em baixos e médios níveis, invertendo

para ciclônico em altos níveis, enquanto nos dois eventos anteriores foram anticiclônicos nos três níveis. O núcleo centrado na linha do Equador apresenta divergência em baixos e médios níveis e convergência em altos níveis, enquanto o núcleo no HS convergência em baixos e altos níveis e divergência em médios níveis. Nos eventos anteriores, havia divergência em baixos e médios níveis, porém no primeiro evento em altos níveis apresentava anomalias neutras e convergência ao redor do núcleo, enquanto no segundo evento é notável convergência à oeste e divergência à leste do núcleo. A única característica em comum entre todos os eventos é a divergência em médios níveis.

Na Figura 4.59, as anomalias das variáveis meteorológicas são vistas na vertical para os dias 29 de fevereiro (-3) até 06 de março (+3) de 2016, assim abrangendo a passagem tanto da fase negativa quanto positiva da onda de Kelvin em 5 S e 53 W. Pode-se notar que durante a fase negativa as temperaturas (Figura 4.59a) eram anormalmente negativas por volta de 900 hPa, entre 400 e 300 hPa e novamente em torno de 250 e cerca de 150 hPa. No dia seguinte, com a intensidade da onda de Kelvin próxima à 0 W/m², as anomalias negativas estão ainda mais presentes, com maior intensidade em 900 hPa e ocupando uma área entre 600 e 150 hPa. No próximo dia, com o pico da fase positiva, ainda é possível ver anomalias negativas entre 400 e 300 hPa, mas o predomínio é de aumento de temperatura e permanece dessa forma nos dias seguintes. A umidade específica (Figura 4.59b) com a fase negativa mostra diminuição por volta de 600 hPa e novamente em 150 hPa, com aumento de umidade entre estes níveis. Nos dois dias seguintes, com o aumento da intensidade da onda de Kelvin e pico da fase positiva, nota-se um aumento na umidade específica até 700 hPa e uma diminuição em médios níveis entre 600 e 400 hPa. Durante a fase negativa, os ventos zonais (Figura 4.59c) eram de oeste e de baixa velocidade, entre 0 e 2 m/s, da superfície até 200 hPa, acima desse nível ganha velocidade até um máximo 8 m/s. Na fase positiva, anomalias de leste surgem próximo à superfície até 800 hPa, porém acima desse nível permanecem de oeste, sendo mais intensos à partir de 400 hPa. Com relação às anomalias de vento meridional (Figura 4.59d), estas são predominantemente de norte desde a superfície, se tornando de sul entre 150 e 100 hPa. Este padrão permanece durante a fase positiva, porém com anomalias de sul surgindo em 700 e 600 hPa e novamente entre 200 e 100 hPa. Durante o pico da fase negativa, há um giro anormalmente anticiclônico (Figura 4.59e) em altos níveis, enquanto na fase positiva é ciclônico. Ao observar as anomalias de divergência (Figura 4.59f), nota-se na fase negativa o predomínio de divergência em baixos níveis e convergência em médios e altos níveis. Na fase positiva este padrão se inverte. As anomalias mais intensas são vistas no dia 0, com intensa divergência em altos níveis

e convergência em médios níveis.

Figura 4.59 - Variação de intensidade da Onda de Kelvin para o centro de maior passagem da onda nos dias 29/02 (-3) até 06/03 (+3) de 2016 entre 1000 hPa e 100 hPa com as anomalias de a) temperatura ($^{\circ}\text{C}$), b) umidade específica (g/g), c) vento zonal (m/s), d) vento meridional(m/s), e) vorticidade relativa e f) divergência.



Em todos os eventos, durante a fase negativa as anomalias de temperatura foram negativas em baixos e médios níveis, somente o segundo evento não apresentou uma inversão nas anomalias negativas para positivas em altos níveis. O terceiro evento apresentou anomalias negativas de umidade em cerca de 800 (assim como no primeiro evento), 600 e 150 hPa, sendo distinto dos outros eventos que possuíam predomínio de aumento de umidade específica na vertical. Os ventos foram de oeste em todos os níveis, completamente oposto ao primeiro evento com ventos de leste em toda a camada e diferente do segundo evento com anomalias de oeste apenas em baixos níveis. Este terceiro evento apresentou ventos anormalmente de norte em todos os níveis, assim como no primeiro evento, enquanto no segundo era apenas em baixos e médios níveis. Assim como no primeiro evento, há um anticiclone anômalo de baixos para altos níveis. Embora haja constante alternância entre convergência e divergência com a altura no último evento estudado, assim como nos anteriores, não há convergência em baixos níveis e divergência em altos níveis, mas sim a situação inversa.

4.2.4 Síntese e discussão

Este subcapítulo buscou explorar as características das Ondas de Kelvin sobre a Amazônia, estas que se propagam de oeste para leste, adentrando a região de estudo por meio do Oceano Pacífico. Tanto a fase positiva quanto negativa das Ondas de Kelvin foram estudadas analisando as anomalias de ROL, temperatura, umidade específica, vento horizontal, vorticidade relativa e divergência.

O outono do HS foi escolhido para determinar os eventos intensos de Ondas de Kelvin por esta ser a estação do ano com maior frequência de ondas intensas (como será visto no Item 4.3). Com o objetivo de definir as características das ondas de Kelvin em anos com condições oceânicas diferentes, escolheu-se 2013 para representar um ano neutro, 2011 com uma La Niña intensa e 2016 com El Niño intenso. As características similares e diferentes entre cada evento encontradas neste capítulo são sintetizadas por meio das Tabelas A.15 e A.16 localizadas no Apêndice A.

Com relação à velocidade de propagação das ondas, nos três eventos escolhidos as ondas se propagaram com velocidade média de 12,86 m/s durante as fases positivas e 13,85 m/s durante as fases negativas. Para fins comparativos: em [Wheeler e Kiladis \(1999\)](#) a velocidade dessas ondas globalmente variavam entre 11 e 22 m/s. Em [Straub e Kiladis \(2002\)](#) a velocidade de propagação destas ondas no Oceano Pacífico era de 17 m/s. Em [Mekonnen et al. \(2008\)](#) a velocidade das ondas no Oceano Atlântico eram maiores que no continente, 25 m/s, enquanto no continente africano tinham

velocidade média de 14 m/s, valor bem próximo à média encontrada neste capítulo para as ondas de Kelvin na América do Sul. Em Kiladis et al. (2009), a velocidade das ondas de Kelvin no Oceano Pacífico variavam de 15 m/s até 20 m/s.

Em Straub e Kiladis (2003), as características dinâmicas associadas com a passagem de ondas de Kelvin foram notadas ao realizarem experimentos com modelos de instabilidade de ondas. Os resultados deles mostraram um aquecimento na coluna troposférica com o aumento da convecção, assim como aumento da umidade específica na vertical, movimentos ascendentes, convergência em baixos níveis e divergência em altos níveis. No nosso estudo, foi encontrado que o aumento de temperatura ocorre predominantemente em médios e altos níveis com a onda de fase negativa. O aumento da umidade específica na vertical é predominante. Convergência em superfície é vista em dois dos três eventos e divergência em altos níveis é notável nos três eventos.

Roundy (2008) encontraram descolamentos meridionais de massa associado com a passagem da onda de Kelvin e formação de ciclones em baixos níveis e anticiclones em altos níveis. Isso explica as anomalias no vento meridional encontradas nos resultados apresentados neste item, visto que as ondas de Kelvin apenas se deslocam zonalmente.

Kiladis et al. (2009) observaram características presentes em pelo menos 1 evento discutido neste capítulo, focando em uma estação em 7,1 N e 171,4 E, no período de máxima atividade da onda de Kelvin negativa (no trabalho, identificado por anomalias negativas de Temperatura de Brilho): Em baixos e médios níveis os ventos eram de leste e se tornam de oeste com a passagem da onda (como nos eventos 2 e 3), em altos níveis eram de oeste e se tornam de leste (eventos 1 e 2). Diminuição de temperatura entre 1000 e 500 hPa (evento 1 e 2), aumento entre 500 e 150 hPa (evento 1). Aumento de umidade na vertical (todos os eventos). A convergência em baixos níveis ocorre a leste do aumento da atividade convectiva. Cada uma dessas características surge em pelo menos 1 evento discutido deste capítulo.

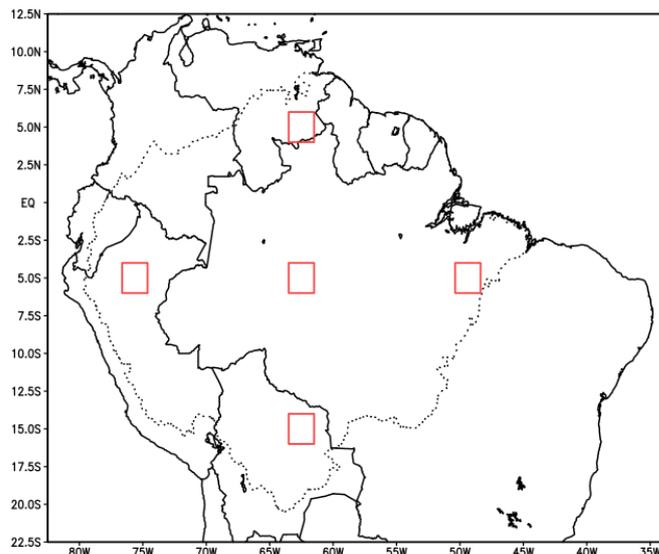
Serra et al. (2020) identificaram o aumento e a diminuição da precipitação na região central da Amazônia associado com a passagem de ondas de Kelvin durante o experimento Green Ocean Amazon (GOAmazon) entre os anos de 2014 e 2015. Os autores identificaram mudanças no ciclo diurno da convecção, quando a onda está ativa na região central da Amazônia, há uma convergência de umidade na região, com divergência à leste e oeste. Na fase oposta da onda, há divergência de umidade na Amazônia central. Também ficou claro nas análises que estas fases estão

associadas a, respectivamente, aumento e diminuição da precipitação na região do GOAmazon. Exceto com o surgimento de centros de divergência no leste e oeste da Amazônia quando a onda de Kelvin se encontra ativa no centro da Amazônia, o restante das características concorda com os resultados aqui apresentados.

4.3 Quantificação das Ondas de Rossby e Kelvin no período de 10 anos

Com o objetivo de estudar a atuação e variação das ondas de Rossby e Kelvin na Amazônia para o período de estudo, cinco regiões da Amazônia foram escolhidas por meio de específicas posições geográficas. Região Centro-Norte (Lat = 4.0N - 6.0 N, Lon = 63.5 - 61.5W), Centro (Lat = 6.0S - 4.0S, Lon = 63.5W - 61.5W), Centro-Sul (Lat = 16.0S - 14.0S, Lon = 63.5W - 61.5W), Oeste-Centro (Lat = 6.0S - 4.0S, Lon = 76.625W - 74.625W) e Leste-Centro (Lat = 6.0S - 4.0S, Lon = 50.375W - 48.375W) podem ser vistas na Figura 4.60.

Figura 4.60 - Posição das 5 regiões geográficas escolhidas.



Pela natureza do cálculo das TRF, os primeiros e os últimos 50 dias dos cálculos devem ser desconsiderados. Dessa forma, apenas os valores encontrados a partir de março de 2010 são relevantes. Em 2019 a variação da Onda de Rossby é vista até o dia 28 de junho desse ano, data de término dos dados do ERA-Interim e portanto desta análise. Como a TRF foi aplicada em dados de ROL, a unidade de medida

das ondas são a mesma de ROL, ou seja, W/m^2 .

4.3.1 Centro-Norte

Com relação à região Centro-Norte da Amazônia (Figura 4.61), ressalta-se uma atuação maior das ondas de Rossby no trimestre Março-Abril-Maio de 2010, com as fases positivas e negativas mais intensas do ano ocorrendo neste trimestre, que marca a primavera do hemisfério norte. Em 2011 os valores mais marcantes da onda de Rossby foram nos meses de janeiro e fevereiro (inverno) e março (primavera), onde aconteceram os extremos de valores positivos e negativos. Para o ano de 2012, a região mostrou ondas de Rossby com pouca variabilidade sazonal e ondas que se destacam em intensidade durante o inverno boreal. A onda mais positiva ocorreu em fevereiro e a mais negativa em dezembro. Nota-se a atividade das ondas de Rossby mais intensa durante a primavera boreal de 2013 e secundariamente em outubro, novembro e dezembro (outono e início do inverno). Para o ano de 2014, tiveram atividade das ondas de Rossby ao norte da Amazônia intensas em grande parte do ano, com redução apenas no mês de novembro (outono boreal). As maiores amplitudes e os picos positivos e negativos da onda ocorreram durante a primavera. As ondas de Rossby se mostraram bem ativas o ano todo de 2015, em especial com onda negativa mais intensa ocorrendo em janeiro (inverno boreal) e mais positiva em maio (primavera boreal). Em 2016, as ondas de Rossby se mostraram mais ativas nos meses de março e abril (primavera) e em dezembro (inverno). Durante a primavera foram observadas as maiores amplitudes e ondas mais intensas positiva e negativamente. No ano de 2017, as ondas de Rossby se mostraram especialmente ativas entre janeiro e abril para o norte da Amazônia, assim abrangendo boa parte do inverno boreal e primavera. A onda com fase positiva e negativa mais intensa é vista em abril. Para o ano de 2018, Rossby se apresentou com maiores amplitudes no inverno boreal, início da primavera e no outono, com onda mais negativa ocorrendo em março (primavera) e mais positiva em novembro (outono). Em 2019, Rossby se apresentou mais com picos de atividade positiva e negativa da onda ocorrendo em janeiro e abril, respectivamente, inverno e primavera do hemisfério norte.

Figura 4.61 - Comportamento das ondas de Rossby no Centro-Norte da Amazônia para os anos de 2010 - 2014.

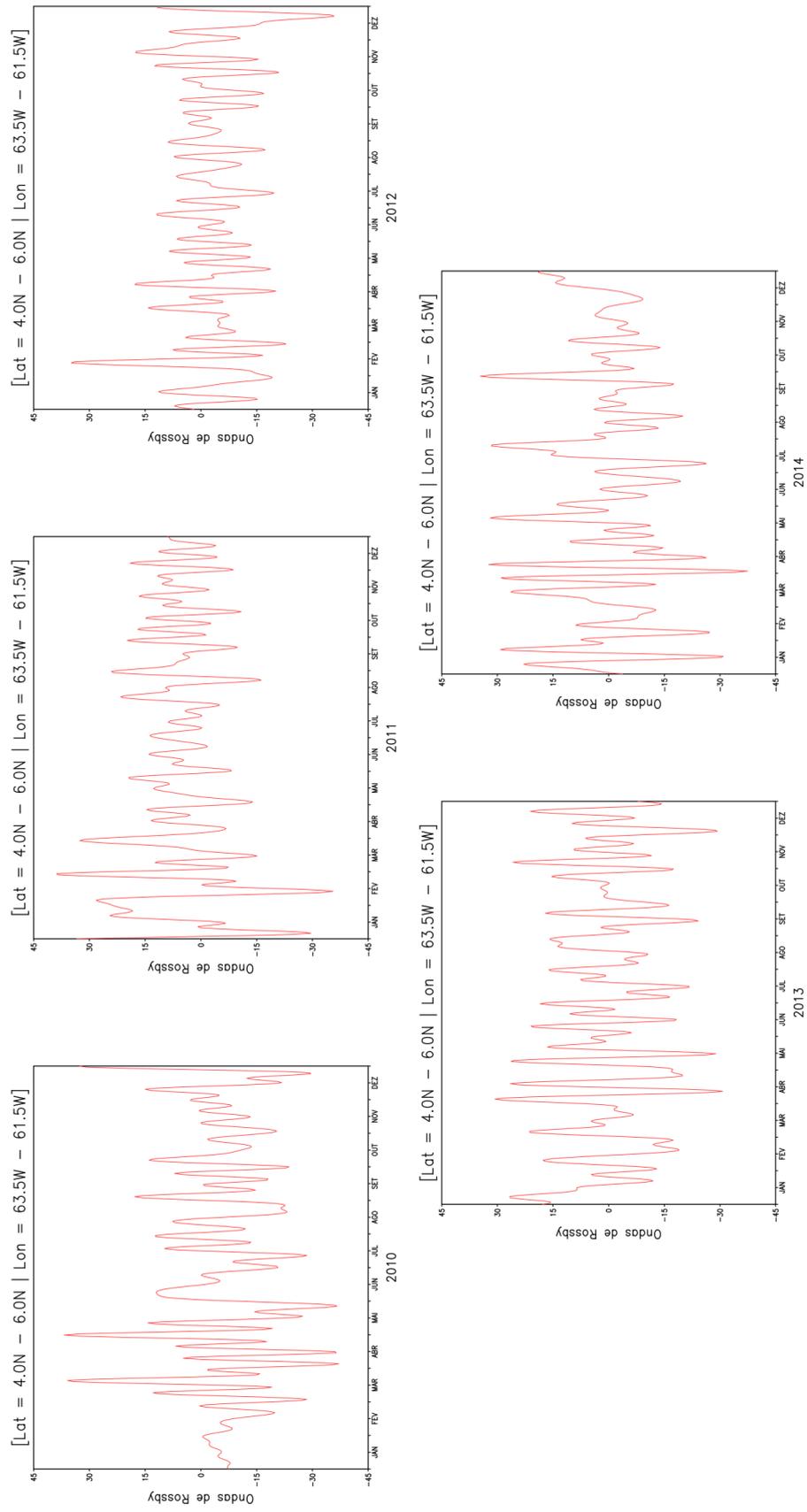
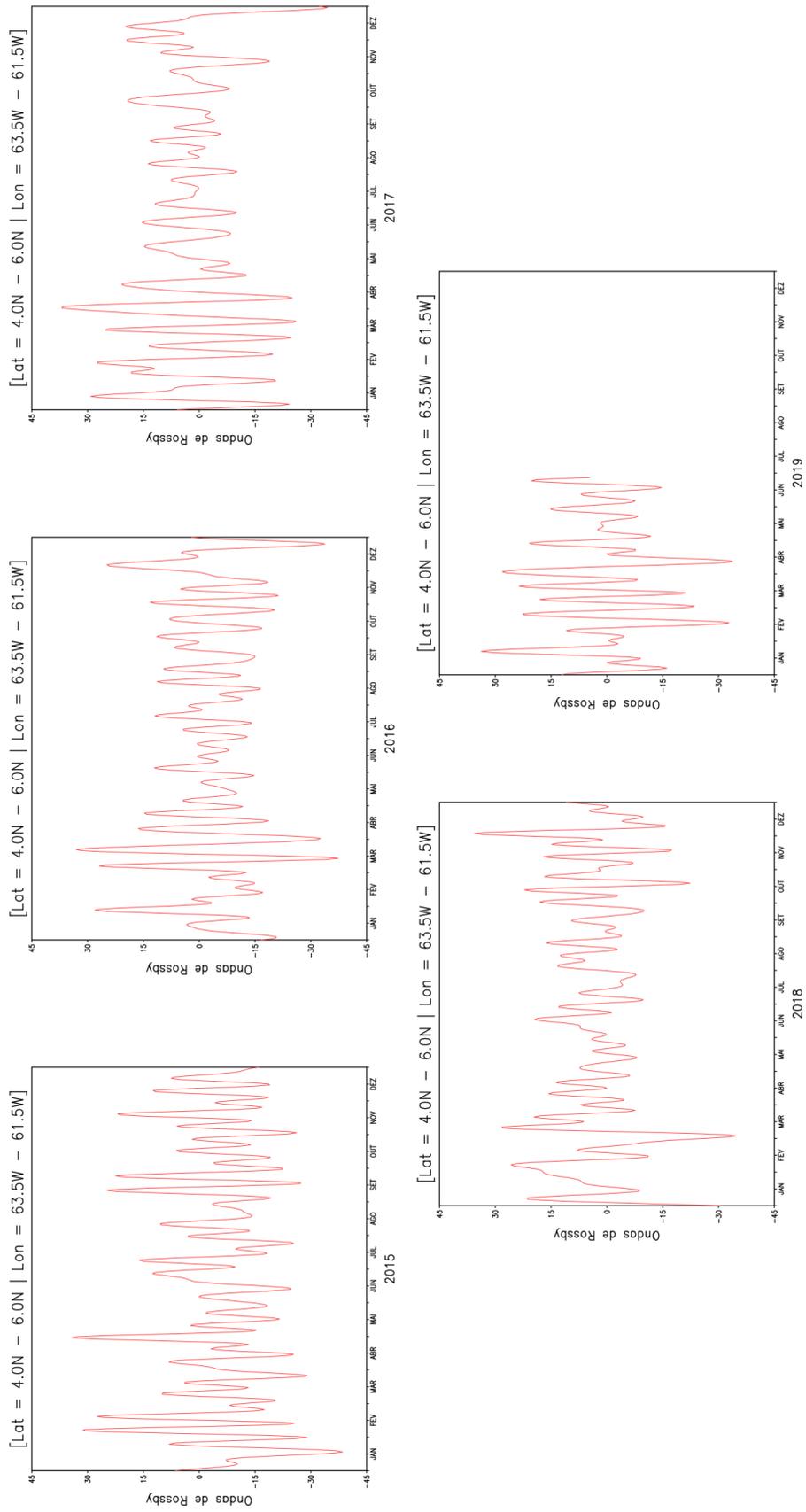


Figura 4.61 - Comportamento das ondas de Rossby no Centro-Norte da Amazônia para os anos de 2015 - 2019.



Para o ano de 2010, a atividade das ondas de Kelvin (Figura 4.62) possuiu maior atuação no trimestre da primavera (e parte de junho), assim como as Ondas de Rossby. O comportamento desta onda não variou de forma marcante ao longo do ano de 2011, mas notou-se os valores mais positivos e mais negativos se destacando no mês de junho (verão boreal) e secundariamente em março (primavera boreal). As ondas de Kelvin se mostraram menos expressivas em janeiro e fevereiro (inverno) de 2012 e mais expressivas em outubro, novembro e dezembro (outono e início do inverno). Em 2013 e 2014, Kelvin apresentou grande atividade durante o ano inteiro, com maior amplitude em março e abril (primavera) de 2013 e em dezembro (inverno) de 2014. Para o ano de 2015, Kelvin se mostrou especialmente mais ativa nos meses de maio (primavera), junho e julho (verão), o que não havia acontecido nos outros anos até então observados. Em 2016, Kelvin se mostrou ativa o ano todo nesta região, em especial tendo maiores amplitudes durante a primavera. Já em 2017, as ondas de Kelvin mostraram aumento no trimestre de maio (primavera), junho e julho (verão) com picos em junho, de maneira similar a 2015. Houve uma leve redução da atividade desta onda em julho e agosto, transição entre verão e outono. A atividade das ondas de Kelvin estiveram bem distribuídas ao longo do ano de 2018, com episódios de maiores amplitudes ocorrendo na primavera, verão e outono do hemisfério norte. Em 2019 Kelvin possuiu maiores amplitudes em maio, junho e julho (final da primavera e parte do verão) com as ondas atingindo valores mais positivo e mais negativo em maio.

Figura 4.62 - Comportamento das ondas de Kelvin no Centro-Norte da Amazônia para os anos de 2010 - 2014.

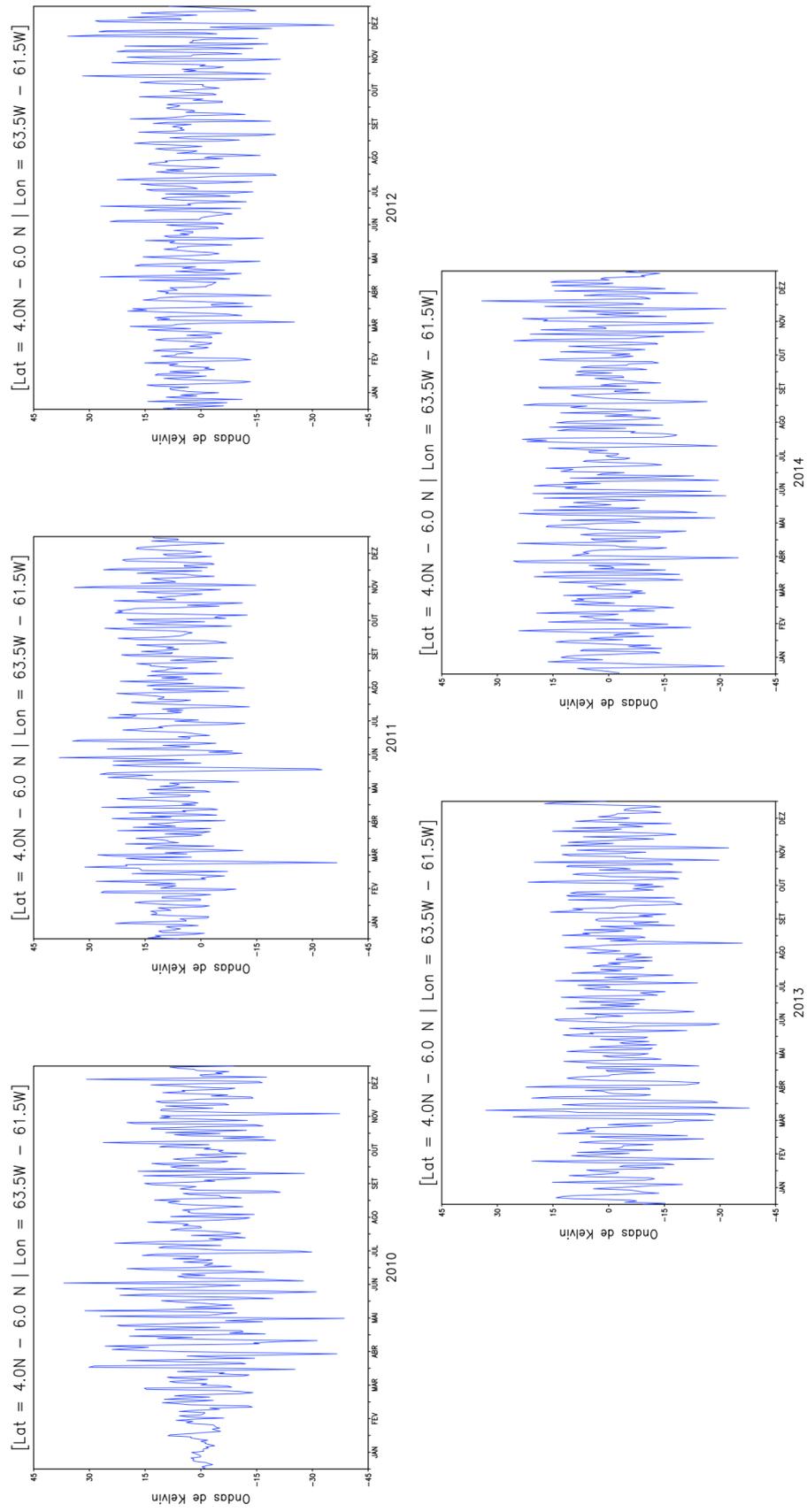
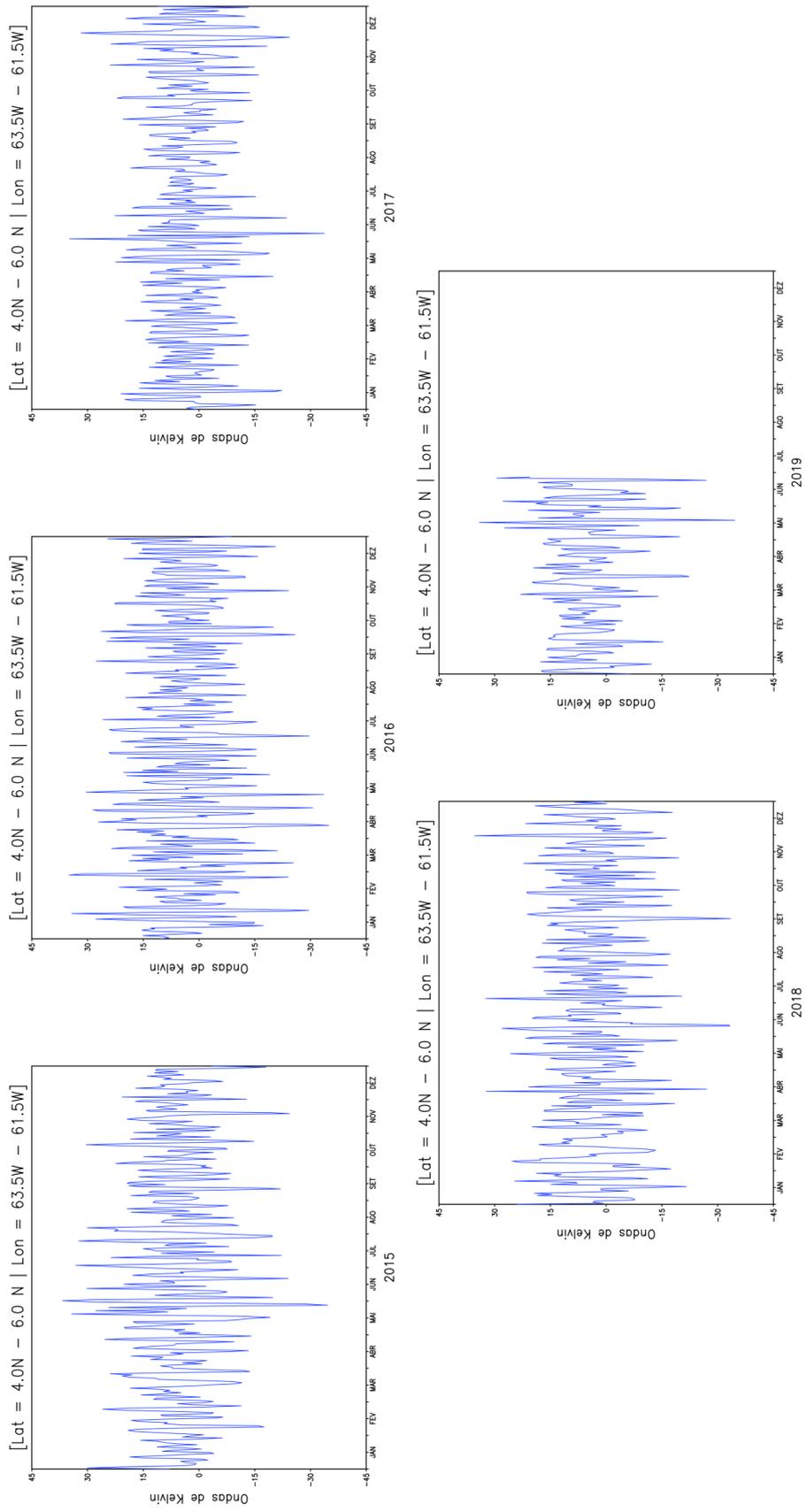


Figura 4.62 - Comportamento das ondas de Kelvin no Centro-Norte da Amazônia para os anos de 2015 - 2019.



4.3.2 Centro

Para a região Centro da Amazônia (Figura 4.63) no ano de 2010, pode-se notar que as oscilações mais negativas e positivas das ondas de Rossby apresentaram maior amplitude durante agosto (inverno) e na primavera, apesar de um pico de onda negativa e positiva ocorrendo em abril. Houve pouca mudança no comportamento da onda de Rossby nesta região ao longo de 2011. No entanto, o valor mais intenso de uma onda negativa aconteceu em maio (outono) e o mais positivo em agosto (inverno). A maior intensidade da onda de Rossby, tanto negativa quanto positiva, em 2012 foi em agosto (inverno). Notou-se pouca atividade de Rossby para os primeiros três meses de 2013, com amplitudes mais expressivas de abril à dezembro. Os picos das fases positivas e negativas ocorreram em agosto (inverno) e setembro (primavera) deste ano. Também foi notável um comportamento “crescente” nas amplitudes das ondas de Rossby atuantes nessa região durante o ano de 2014. As menores amplitudes foram vistas em janeiro e fevereiro (verão), aumentaram durante os meses do outono e então apresentaram as maiores amplitudes no inverno e na primavera, com os picos das fases positiva ocorrendo em outubro e negativa em novembro, ambos na primavera. 2015 mostrou ondas de Rossby com amplitudes maiores se concentrando nos meses da primavera. No entanto, a onda positiva mais intensa ocorreu em fevereiro (verão) e a mais negativa em julho (inverno). Já em 2016, as ondas de Rossby se mostram menos intensas entre janeiro e abril, atingem seu valor mais negativo em junho (inverno) e mais positivo em outubro (primavera). Em 2017, Rossby possui elevadas amplitudes a partir de março, com pico de onda positiva em setembro (primavera) e negativa em junho (inverno) com picos secundários em dezembro (verão). Durante 2018, as ondas de Rossby apresentam maiores amplitudes de julho a outubro (inverno e primavera) com pico negativo em julho e positivo em setembro. O ano de 2019 apresentou baixa amplitude das ondas de Rossby em relação às outras áreas, exceto no mês de maio (outono) com picos de atividade positiva e negativa.

Figura 4.63 - Comportamento das ondas de Rossby no Centro da Amazônia para os anos de 2010 - 2014.

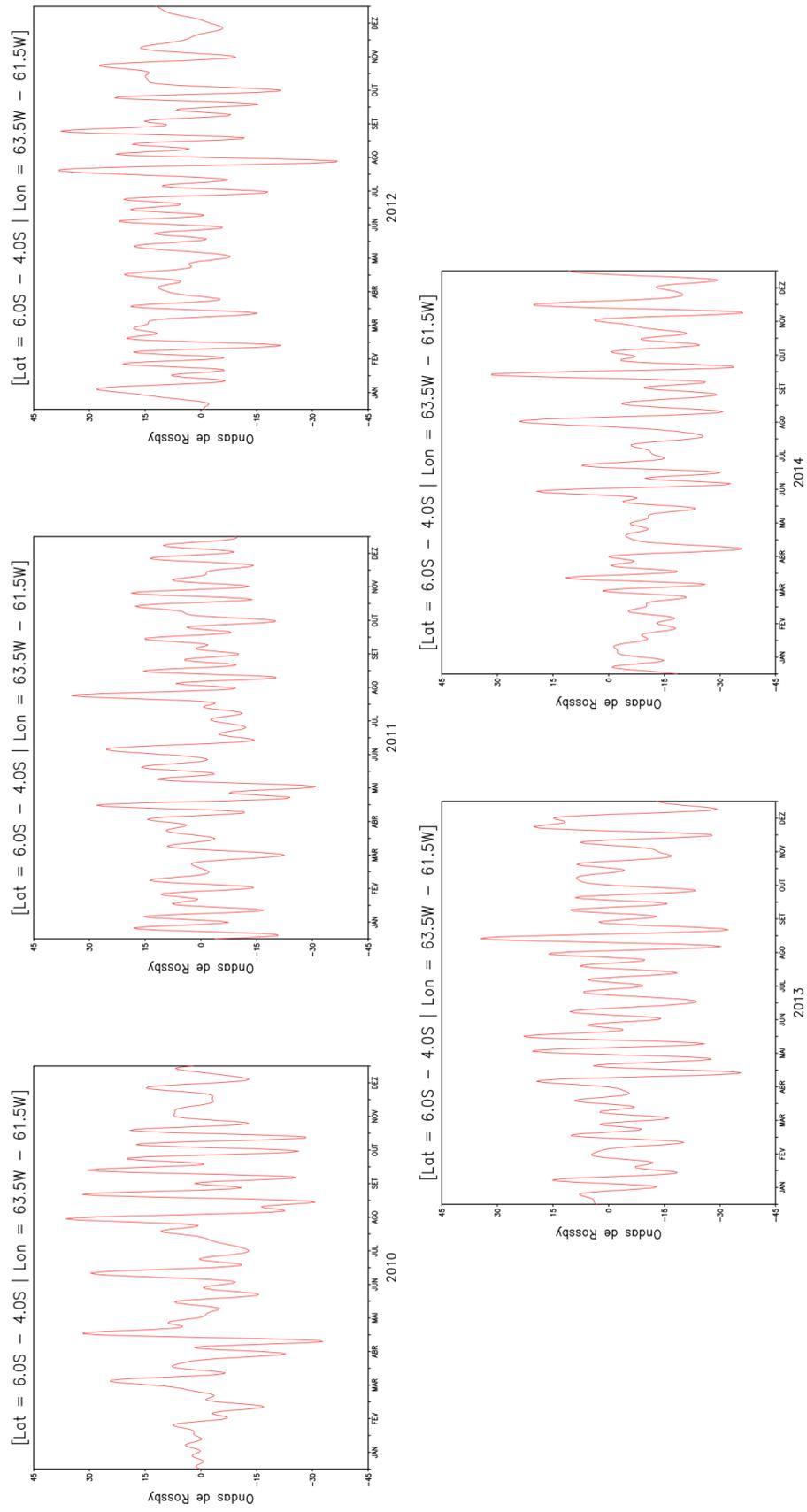
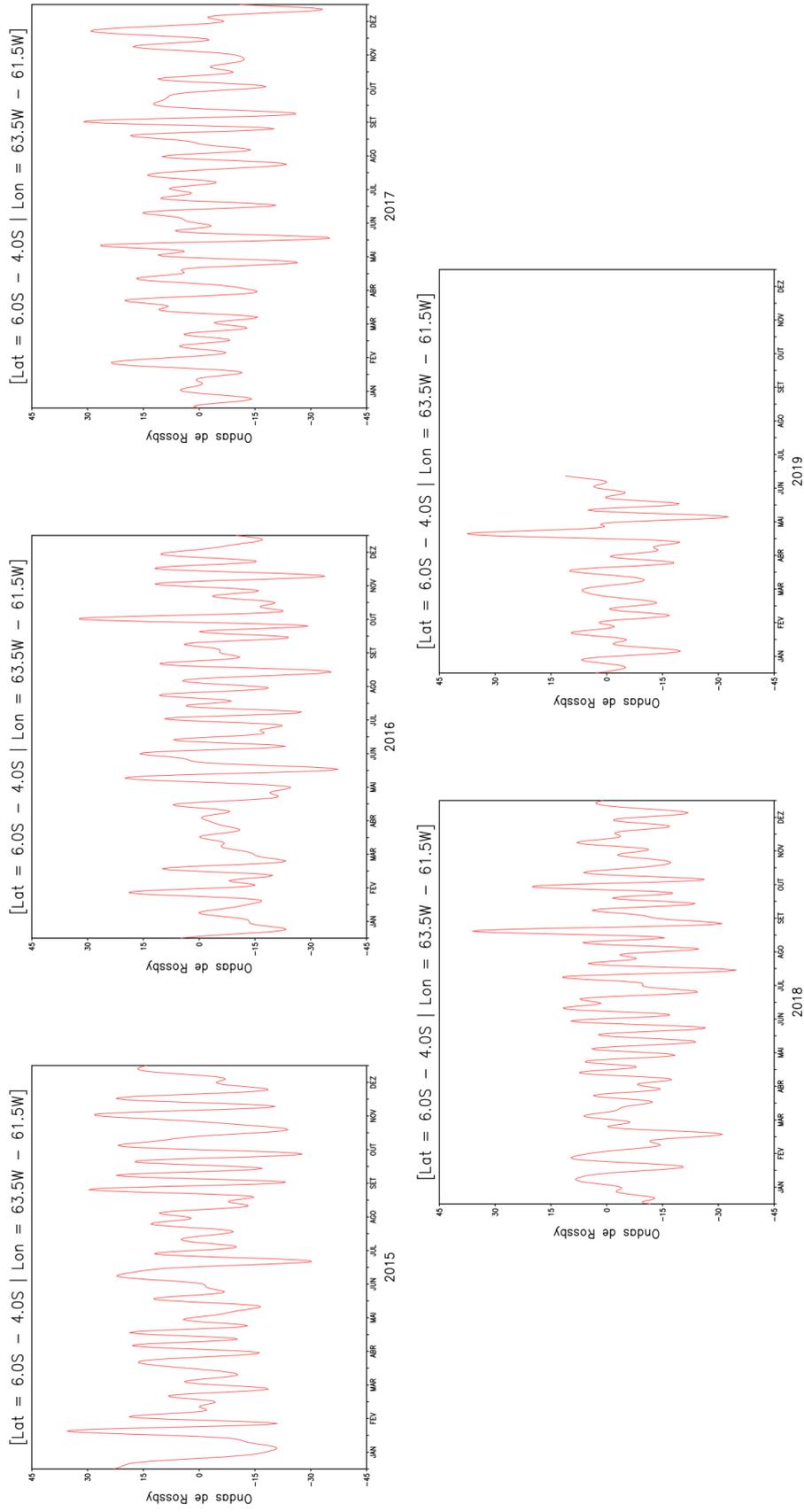


Figura 4.63 - Comportamento das ondas de Rossby no Centro da Amazônia para os anos de 2015 - 2019.



As ondas de Kelvin (Figura 4.64) em 2010 possuem maiores amplitudes durante o outono. Os meses de menos impacto, ou seja, com onda próximas a zero, foram junho a setembro, assim englobando inverno e parte da primavera. Esta onda se apresentou novamente com valores mais intensos entre outubro e dezembro, sendo primavera e início do verão. Com relação à 2011, esta se mostrou presente o ano inteiro, mas diminuiu drasticamente de intensidade nos meses do inverno, com valores se aproximando de 0. A onda mais negativa ocorreu em março (outono) e a mais positiva em novembro (primavera). Em 2012, as ondas de Kelvin se apresentaram mais intensas durante o outono, a primavera e o início do verão (em dezembro). Em especial a onda com fase positiva e negativa mais intensa ocorreu em abril (outono). A ocorrência das ondas de Kelvin foi mínima durante o inverno. Já em 2013 Kelvin demonstrou grande atividade e maiores amplitudes durante o ano inteiro, exceto durante os meses de inverno, com fases positiva e negativa mais intensas ocorrendo no outono. Em 2014 nota-se maior atividade nos meses do outono, com maiores amplitude e picos positivos e negativos. Inverno foi a estação com menores amplitudes e as demais estações possuíram amplitudes moderadas. Kelvin se apresentou com maiores amplitudes em 2015 durante fevereiro (verão) e no outono e com amplitudes próximas a zero em julho e agosto (inverno) e parte de setembro (primavera). O valor mais negativo foi visto em fevereiro e o mais positivo em março. As ondas de Kelvin em 2016 foram mais intensas nos meses de outono (com maiores picos) e secundariamente no verão e na primavera. Durante o inverno os valores se aproximaram bastante de zero, mostrando assim que as ondas atuantes neste período foram ínfimas. Em 2017, mostrou-se mais intenso no verão do início do ano (janeiro e fevereiro) com picos positivos e negativos neste período, enquanto os meses de inverno foram os menos intensos. As ondas de Kelvin nesta região foram mais ativas em 2018 durante de janeiro a maio (verão e outono) com picos das fases positiva e negativa acontecendo em fevereiro e março. Em 2019 Kelvin se mostrou especialmente ativa em março (outono) com maiores amplitudes e picos.

Figura 4.64 - Comportamento das ondas de Kelvin no Centro da Amazônia para os anos de 2010 - 2014.

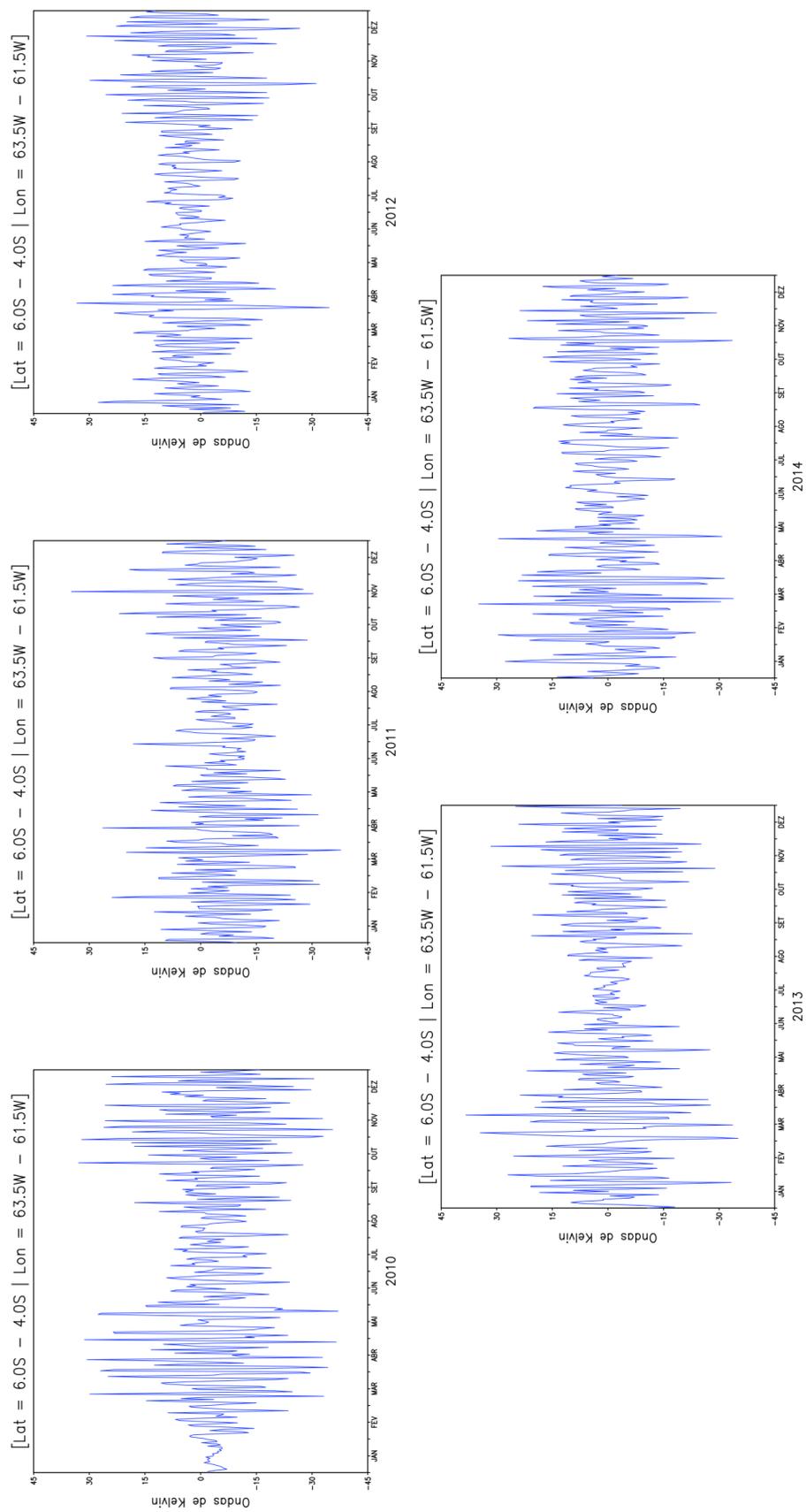
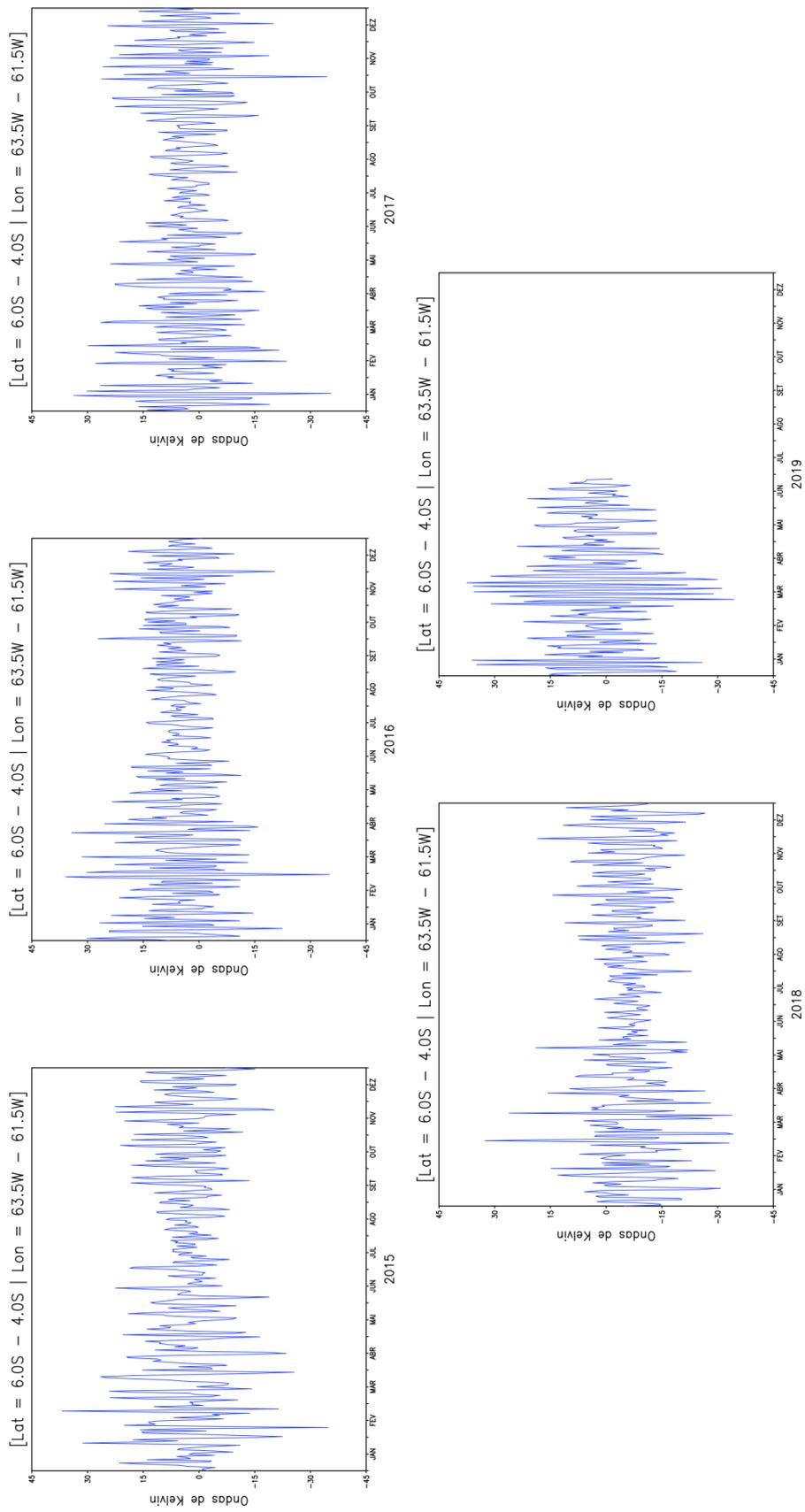


Figura 4.64 - Comportamento das ondas de Kelvin no Centro da Amazônia para os anos de 2015 - 2019.



4.3.3 Centro-Sul

Na região Centro-Sul (Figura 4.65), o comportamento das ondas de Rossby não mostrou grande variação ao longo do ano de 2010, com as oscilações entre fases negativa e positiva em escala semelhante em todos os meses. Não notou-se grande variância no comportamento da Onda de Rossby também em 2011, a onda de fase positiva mais intensa acontecendo em fevereiro (verão) e a segunda em dezembro (verão). A mais negativa foi registrada em dezembro, com um segundo pico em outubro (primavera). As ondas de Rossby se mostraram bem ativas durante 2012, com máximos positivos em fevereiro (verão) e maio (outono) e máximo negativo em dezembro (verão). Rossby em 2013 aconteceram no início do ano, em fevereiro (verão), houve uma boa distribuição desta onda durante o ano, com uma leve redução no inverno. Os picos positivos foram encontrados em março e maio (outono) e setembro (primavera). Pode-se notar ondas de Rossby bem distribuídas ao longo de 2014, porém com maiores amplitudes durante a primavera. O pico de onda mais negativa ocorreu em julho e a mais positiva em agosto, ambos no inverno austral. 2015 apresentou grandes amplitudes das ondas de Rossby durante o ano inteiro, mais intensas especialmente durante fevereiro (verão) e março (outono) e durante outubro e novembro (ambos primavera). Os picos de onda positiva/negativa ocorreram em novembro. O ano seguinte mostrou ondas de Rossby intensas o ano todo, porém com queda de amplitude entre maio e agosto, assim abrangendo final de outono e inverno. A onda mais positiva ocorreu em fevereiro (verão) e a mais negativa em setembro (primavera). As ondas de Rossby também foram bem distribuídas em 2017, com onda mais positiva ocorrendo em março (outono) e setembro (primavera) e as mais negativa em março e maio (outono). 2018 possuiu altas amplitudes da onda de Rossby de janeiro à setembro, com maior intensidade em janeiro e fevereiro (verão) onde ocorreram os picos de onda positiva e negativa, respectivamente. Pouca variação na atividade das ondas de Rossby foi vista durante os seis meses disponíveis em 2019, com alta amplitude e picos bem distribuídos.

Figura 4.65 - Comportamento das ondas de Rossby no Centro-Sul da Amazônia para os anos de 2010 - 2014.

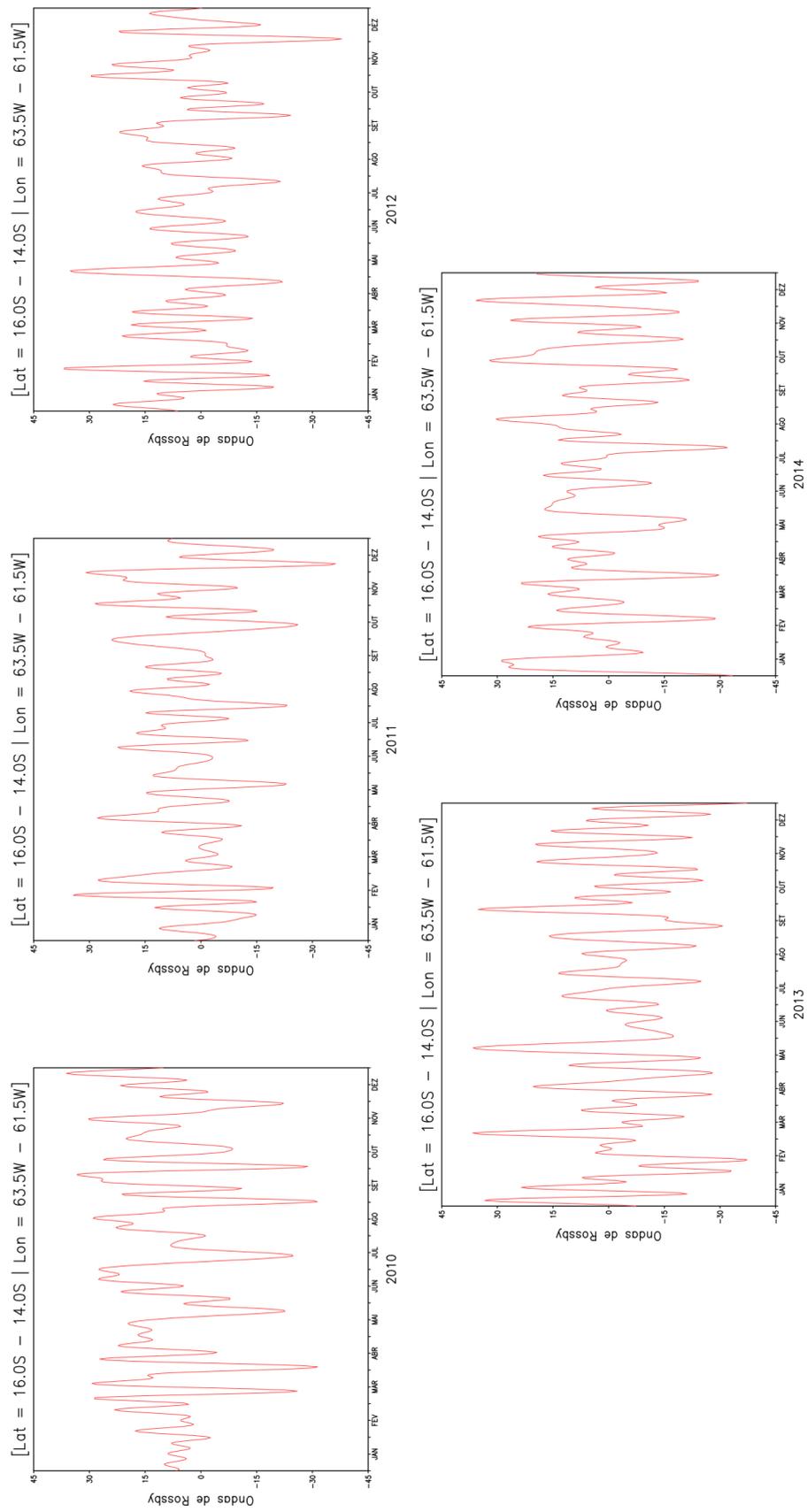
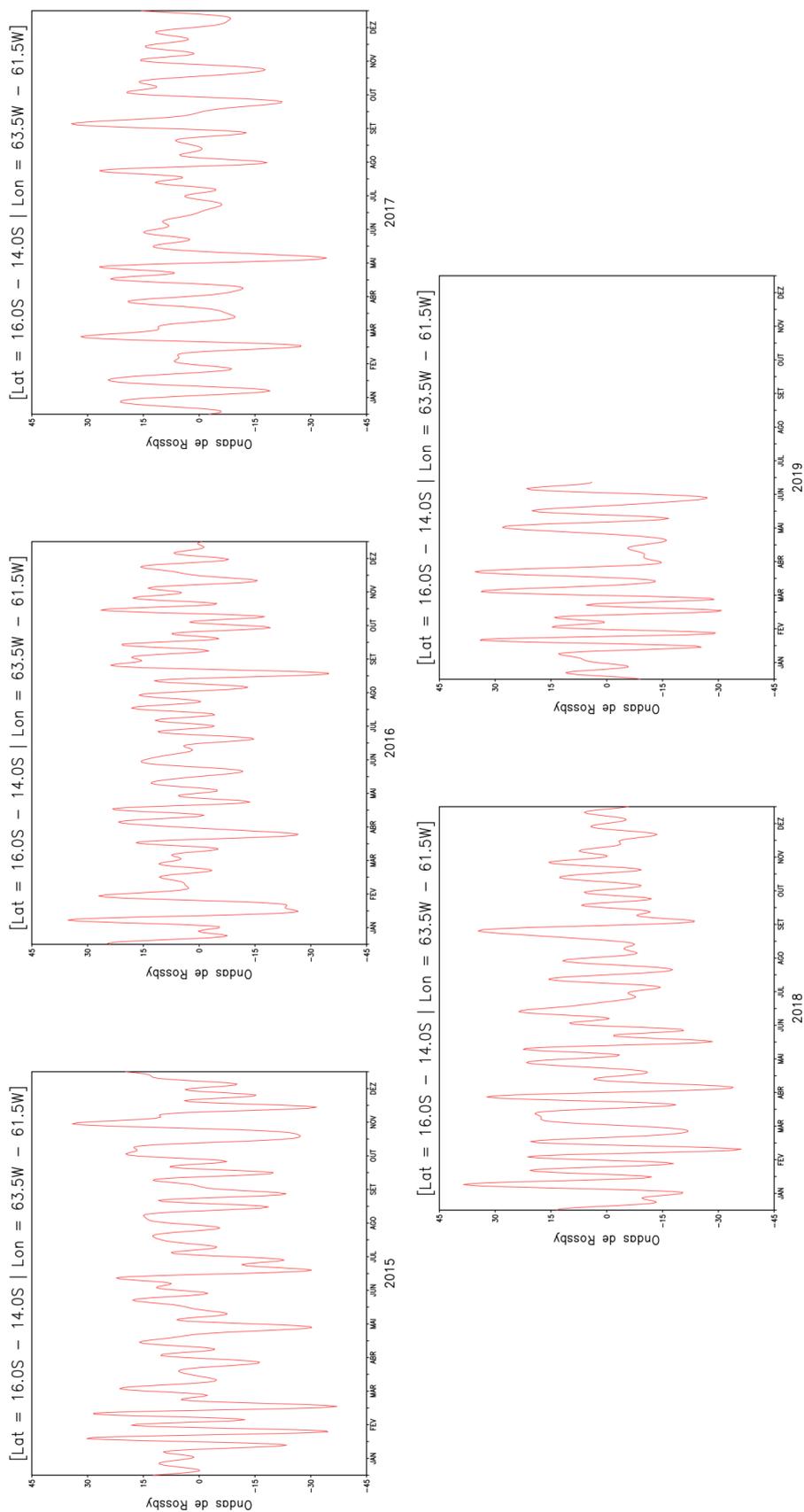


Figura 4.65 - Comportamento das ondas de Rossby no Centro-Sul da Amazônia para os anos de 2015 - 2019.



Com relação às ondas de Kelvin (Figura 4.66), em 2010 os meses com ondas mais marcantes foram abril, maio e junho e depois entre outubro, novembro e dezembro. Em 2011, estas mostraram maior atividade durante novembro e dezembro (final da primavera e início do verão), diminuição no inverno e atividade moderada no outono e na primavera. Ao longo do ano de 2012, ondas mais negativas ocorreram em maio (outono) e maior amplitude entre valores positivos e negativos em novembro (primavera). Kelvin se apresentou intensa durante o ano inteiro em 2013, principalmente durante o outono e a primavera, com os picos positivos e negativos ocorrendo nestas estações do ano. As ondas de Kelvin se reduziram a valores próximos à zero nos meses de agosto (inverno) e setembro (primavera). As ondas de Kelvin foram bem ativas durante o ano de 2014, com diminuição em julho e agosto (inverno) e setembro (primavera). As ondas mais negativas ocorreram em abril (outono) e junho (inverno), sendo que o pico positivo ocorreu em novembro (primavera) e um secundário em junho (inverno). Em 2015 Kelvin mostrou pouca variação, com maiores amplitudes e picos durante o outono e drástica diminuição nos valores encontrados na transição entre julho e agosto (verão). Esta região aparentemente não apresentou variação sazonal em sua intensidade durante 2016. A fase negativa mais intensa ocorreu em agosto (inverno) e a positiva mais intensa em outubro (primavera). Em 2017, Kelvin foi mais ativa nos meses da primavera de (em especial novembro) e menos intensa nos meses de inverno. Já em 2018, se mostrou especialmente mais intensa em julho e agosto (inverno) e na primavera, com pico negativo em agosto e positivo em novembro. Em 2019, Kelvin se mostrou levemente mais intensa durante o outono.

Figura 4.66 - Comportamento das ondas de Kelvin no Centro-Sul da Amazônia para os anos de 2010 - 2014.

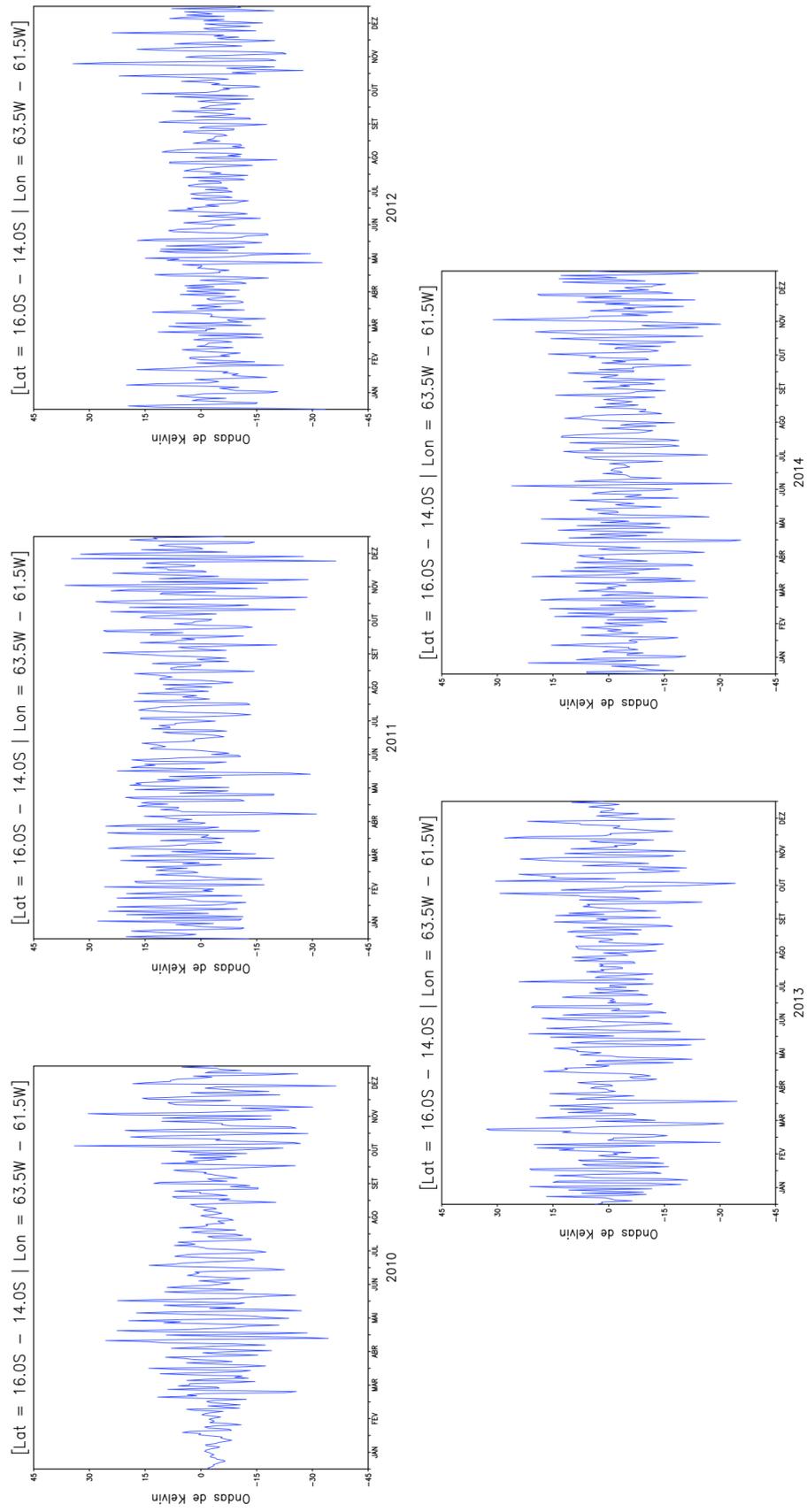
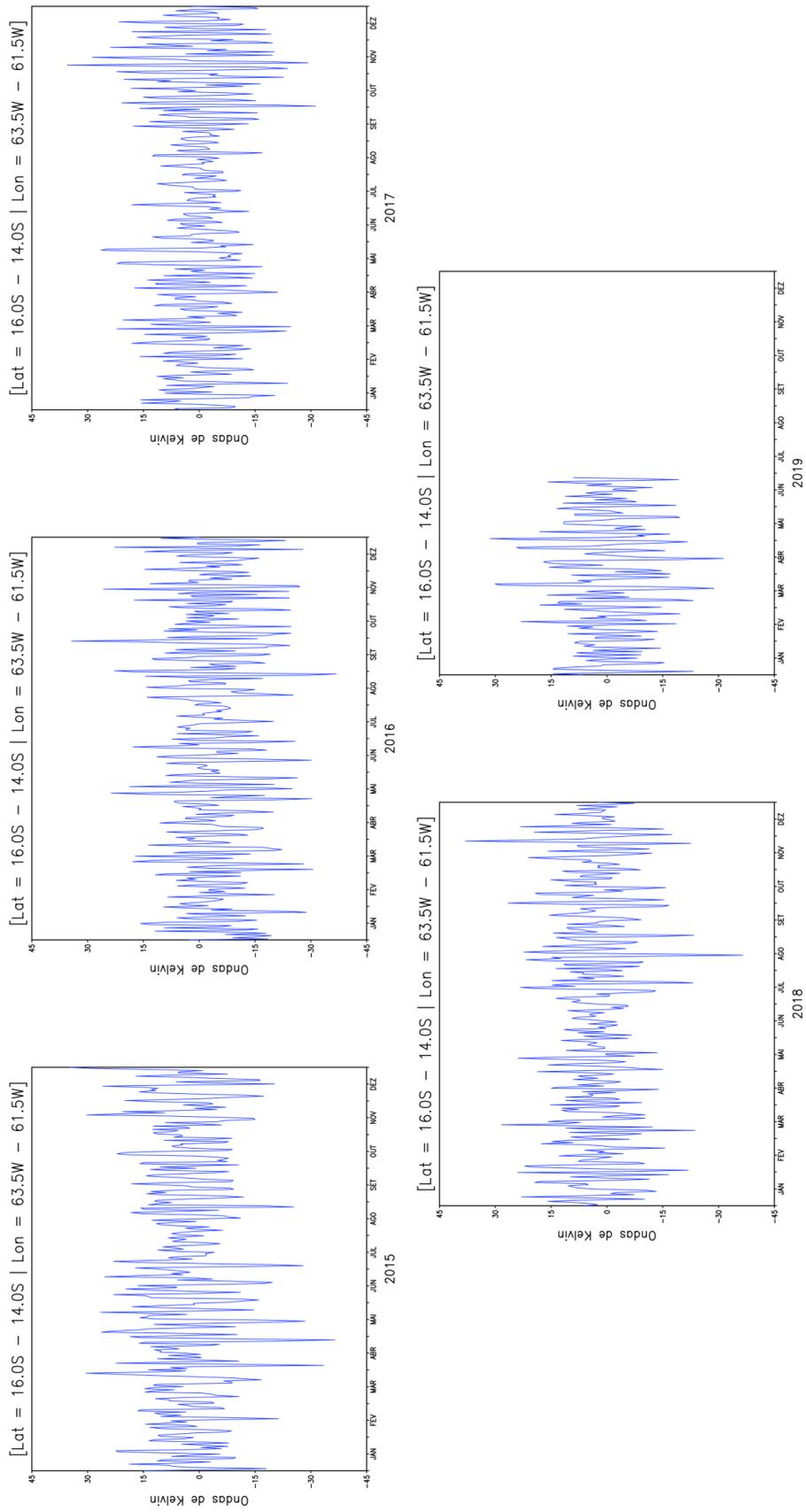


Figura 4.66 - Comportamento das ondas de Kelvin no Centro-Sul da Amazônia para os anos de 2015 - 2019.



4.3.4 Oeste-Centro

No Oeste-Centro da Amazônia (Figura 4.67), o destaque para as ondas de Rossby em 2010 foi para o valor mais positivo ocorrendo no mês de agosto (inverno) e mais negativo em setembro (primavera), com ondas mais expressivas nos meses da primavera. Notou-se uma distribuição quase igualitária das ondas de Rossby em 2011, com amplitudes maiores entre maio e agosto. Os picos de fases positivas e negativas encontraram-se bem divididos entre outono, inverno e primavera. Em 2012, as ondas de Rossby apresentaram maior amplitude durante o trimestre agosto (inverno), setembro e outubro (primavera) com os valores mais positivos e mais negativos. O comportamento de Rossby em 2013 mostrou valores mais próximos a zero no início do ano, em janeiro e fevereiro (verão), e mais intenso para os meses seguintes com pico positivo em abril (outono) e setembro (primavera) e pico negativo em agosto (inverno). O comportamento das ondas de Rossby em 2014 se mostrou ativo durante o ano de 2014, com exceção de janeiro e fevereiro com valores mais próximos a zero. Altas amplitudes foram vistas durante o restante do ano todo, com destaque na transição de março para abril (outono) com a onda mais intensa tanto negativamente quanto positivamente. Em 2015, as ondas de Rossby se mostraram especialmente mais intensas durante a primavera, com maiores amplitudes e as ondas mais intensas. Nota-se pouca variação sazonal das ondas de Rossby em 2016. Ainda assim, houve um pico de fase positiva em fevereiro (verão) e outro em outubro (primavera), enquanto o pico negativo ocorreu em junho (inverno). Rossby foi ativa em 2017 como um todo, com aumento em fevereiro (verão com pico de onda positiva) e março (outono com pico de onda negativa) e secundariamente em setembro com ondas de maior amplitude. As ondas de Rossby possuíram maior amplitude em 2018 no final do inverno e início da primavera (agosto e setembro), com a onda mais negativa em agosto e mais positiva em setembro. Para os meses disponíveis em 2019, as ondas de Rossby na região Oeste-Centro se mostraram mais ativas durante o outono, com pico negativo em abril e positivo em maio.

Figura 4.67 - Comportamento das ondas de Rossby no Oeste-Centro da Amazônia para os anos de 2010 - 2014.

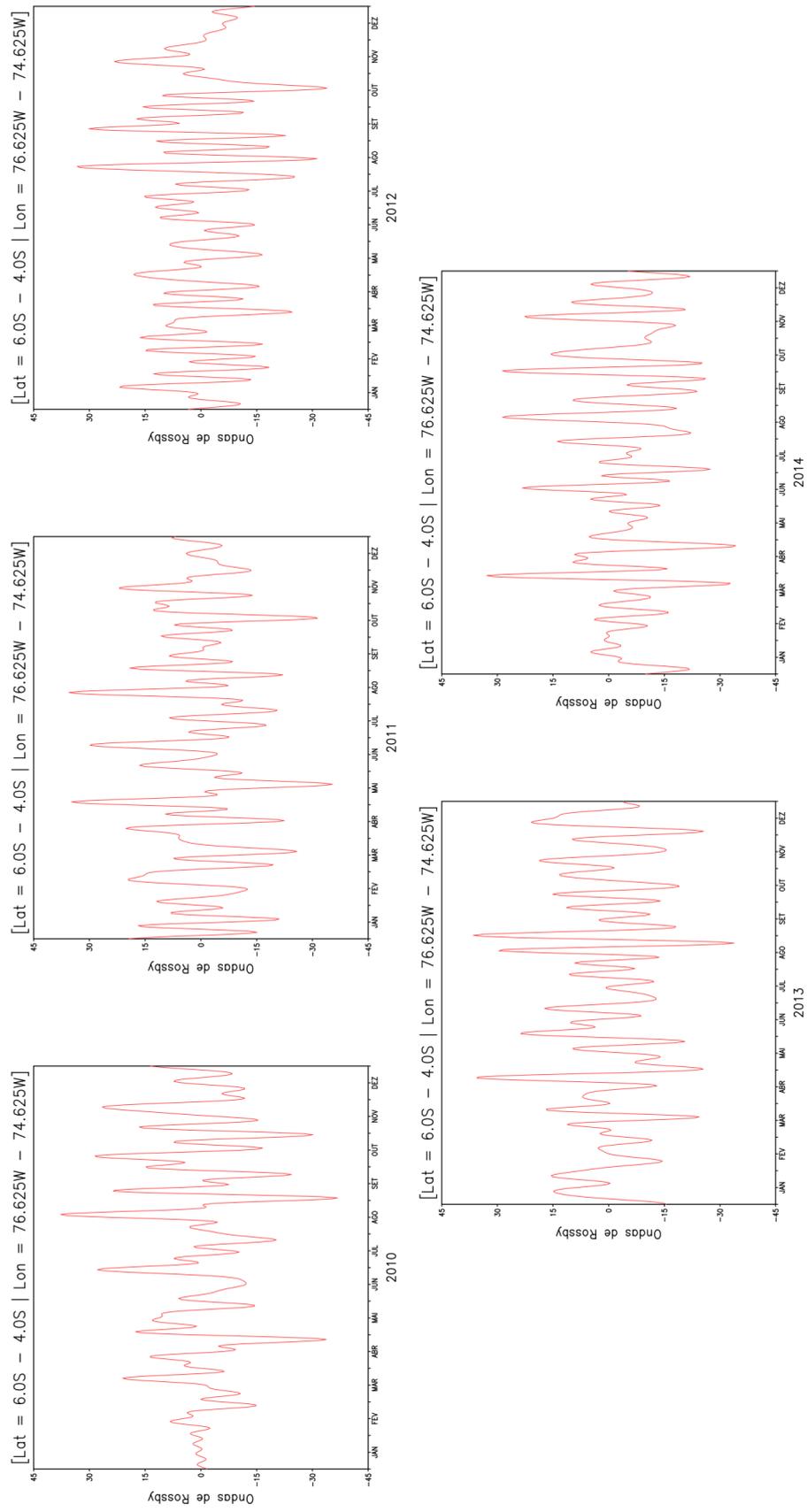
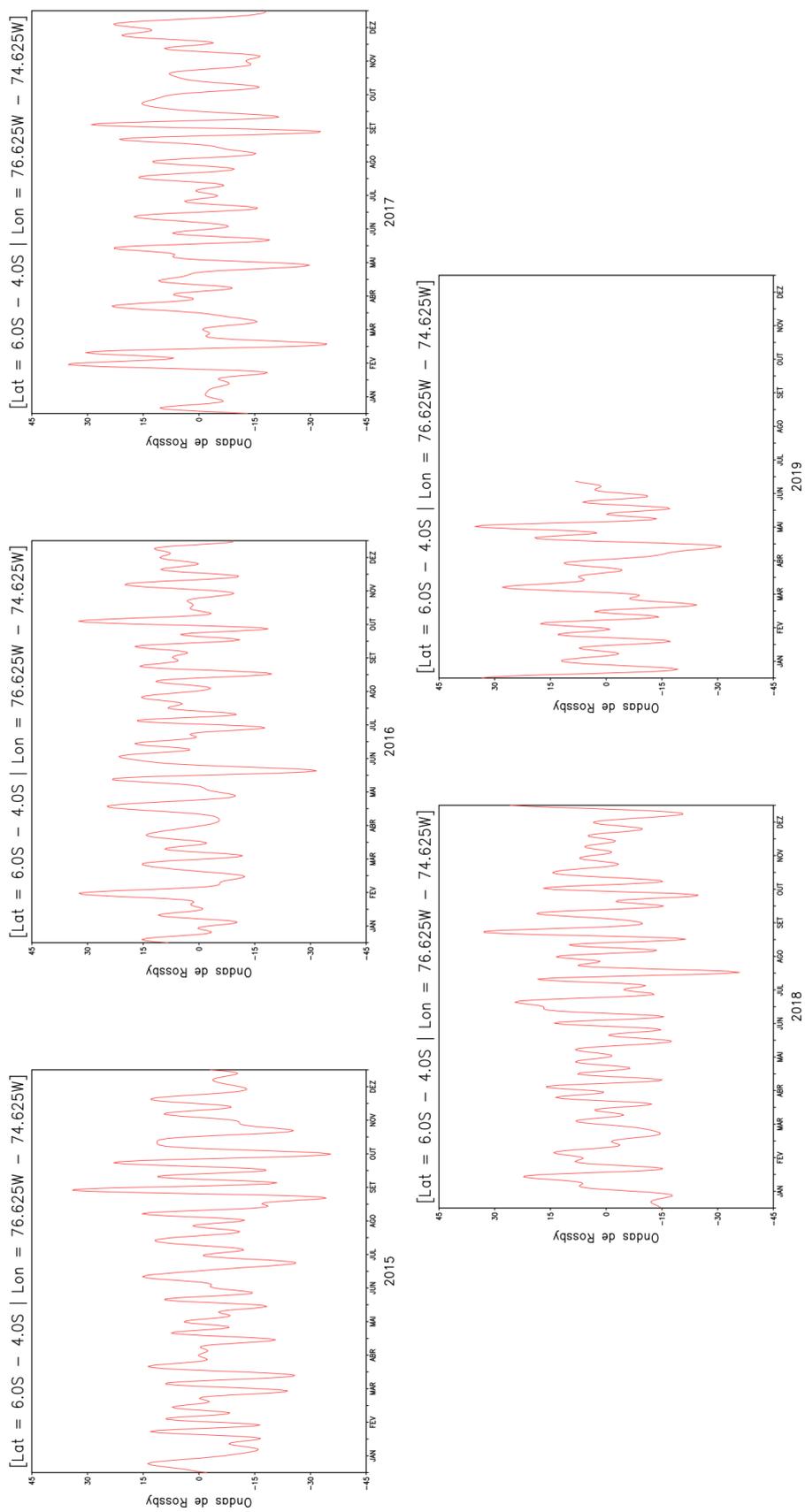


Figura 4.67 - Comportamento das ondas de Rossby no Oeste-Centro da Amazônia para os anos de 2015 - 2019.



Sobre as ondas de Kelvin (Figura 6.68), em 2010 o comportamento na região Oeste-Centro foi semelhante a outras regiões, com maior atividade durante outono e primavera. Em 2011 a onda foi bem ativa e possuiu decréscimo de atividade somente no inverno. Os valores mais negativos foram encontrados nos meses de outono e os mais positivos durante a primavera. Com relação a 2012, notou-se atividade marcante durante o ano inteiro, com valores acima de 0 W/m^2 na média e queda de frequência no inverno, fase positiva mais intensa em janeiro (verão) e fase negativa mais intensa em abril (outono). Notou-se intensidade elevada durante 2013 inteiro, exceto no inverno, com as maiores amplitudes e os picos máximos e mínimos ocorrendo no outono. Em 2014, Kelvin mostrou mais intensidade de janeiro a maio, em especial no trimestre março-abril-maio (outono) com maiores amplitudes e picos positivos e negativos. Com relação a 2015, as ondas foram mais intensas entre janeiro e junho, abrangendo assim maior parte do verão, todo o outono e começo do inverno. Os picos mais positivos e negativos da onda ocorreram em fevereiro. As menores amplitudes e valores próximos a zero se localizaram em julho e agosto (inverno). Em 2016, Kelvin se apresentou mais intensa durante o verão e outono (com picos positivo/negativo no final de fevereiro) e menos intensa no inverno. As ondas de Kelvin em 2017 apareceram mais intensas no outono (picos positivos em março) e na primavera (pico negativo em outubro) e menos intensas no inverno. As ondas de Kelvin em 2018 foram mais intensas no outono com picos em março e menos intensa no inverno. Em 2019 as ondas de Kelvin possuíram maiores amplitudes em março (outono) com picos negativos e positivos neste mês e secundariamente em janeiro (verão).

Figura 4.68 - Comportamento das ondas de Kelvin no Oeste-Centro da Amazônia para os anos de 2010 - 2014.

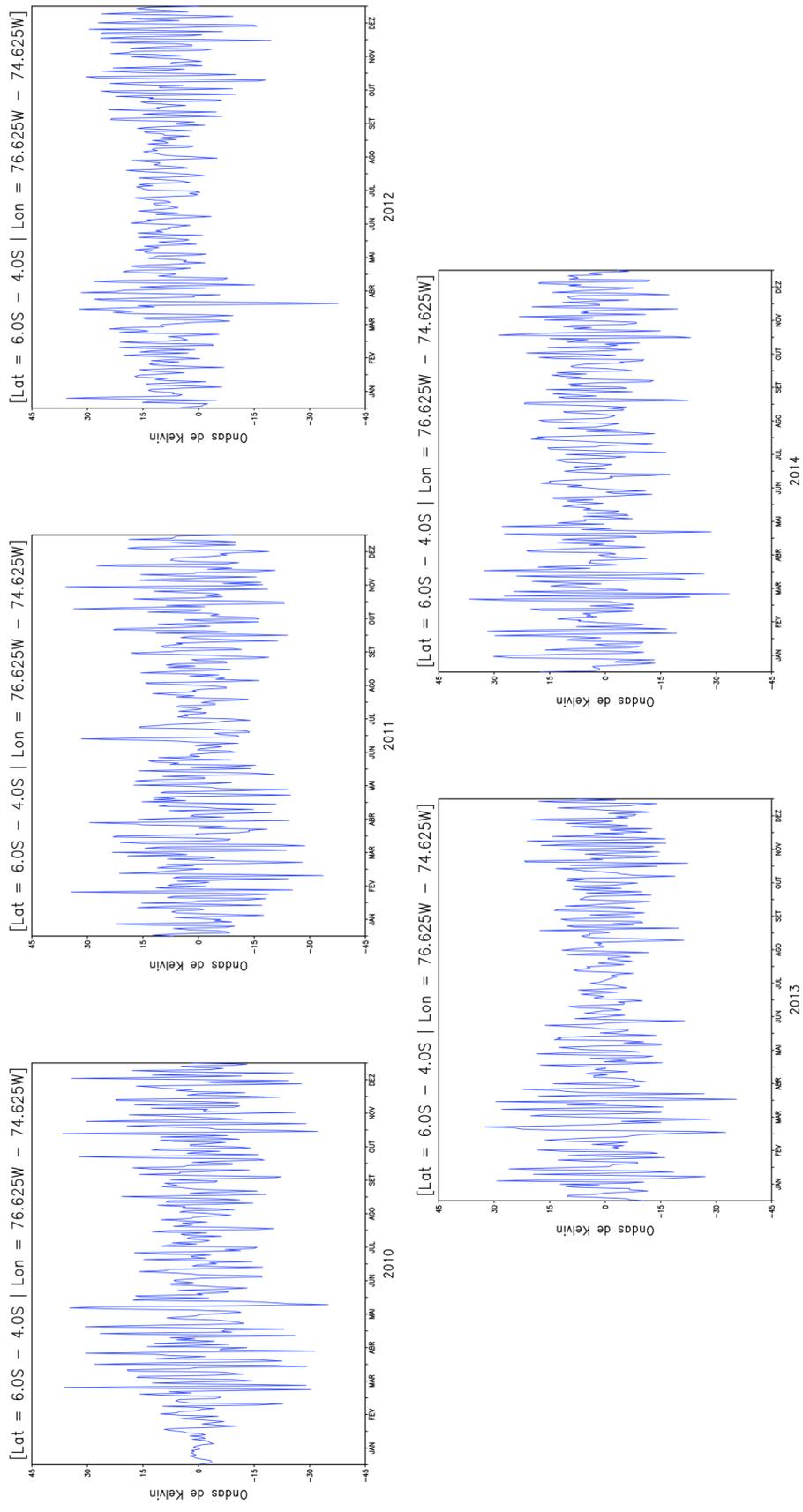
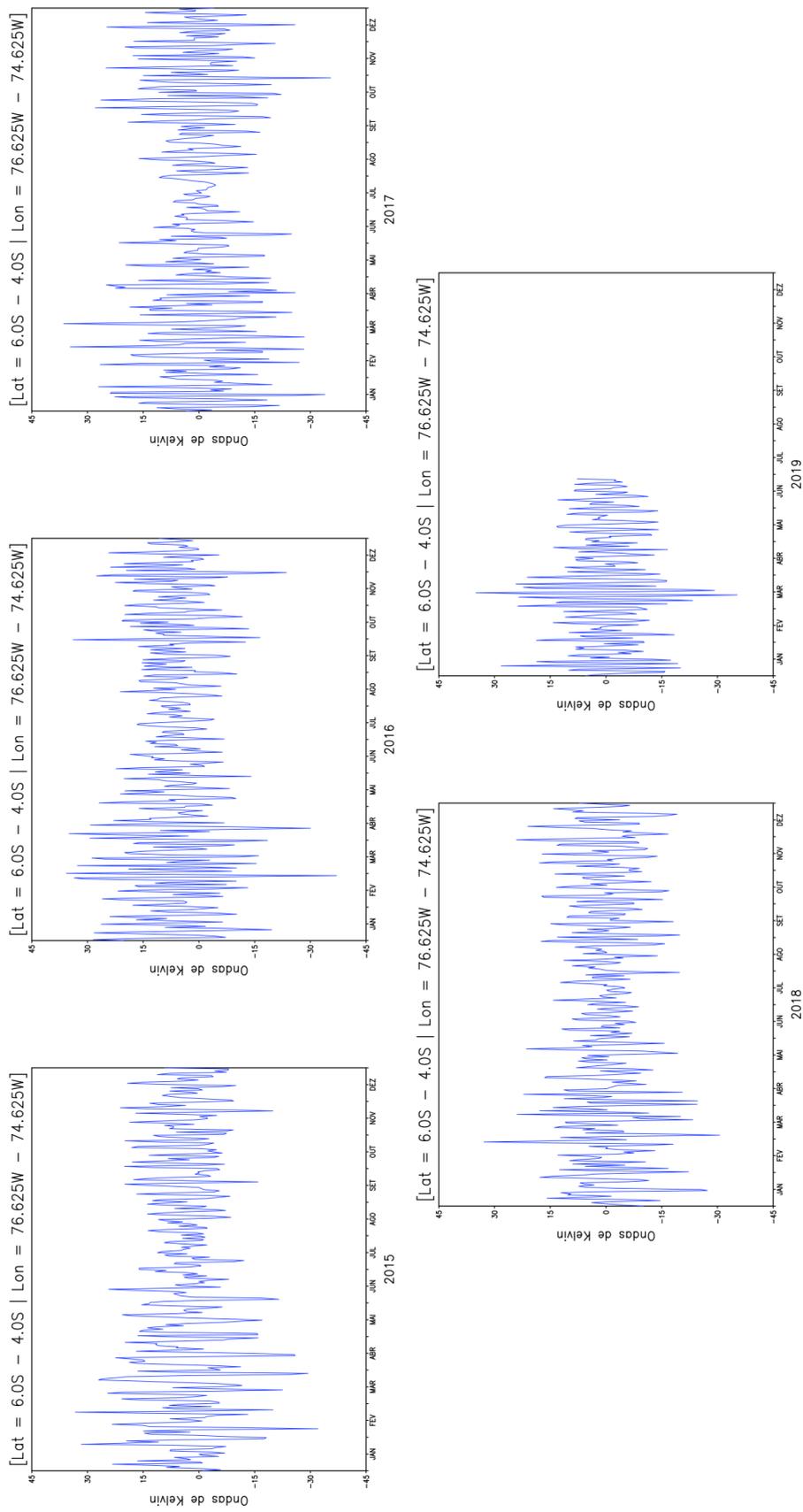


Figura 4.68 - Comportamento das ondas de Kelvin no Oeste-Centro da Amazônia para os anos de 2015 - 2019.



4.3.5 Leste-Centro

Na porção Leste-Centro (Figura 4.69), em 2010 as ondas de Rossby foram bem distribuídas, tendo fase positiva mais intensa ocorrendo em maio (outono) e mais intensa de fase negativa em dezembro (verão). A atividade das ondas de Rossby se manteve constante durante 2011, com valores mais negativos em janeiro (verão) e nos meses do outono austral, enquanto o valor mais positivo foi visto em agosto (inverno). Ondas de Rossby bem distribuídas ao longo de 2012 com pouca variação entre elas e com maior intensidade em agosto (inverno). Rossby se mostrou intensa durante boa parte de 2013, com leve diminuição nos meses de setembro, outubro e novembro, meses da primavera. Os picos das fases positiva e negativa se encontraram em dezembro (verão). Em 2014, as ondas de Rossby se mostraram semelhantes às Oeste-Centro e Centro, com valores mínimos em janeiro e fevereiro e altas amplitudes nos meses seguintes. Os picos de atividade negativa ocorreram em abril (outono) e junho (inverno) e positivos em setembro e novembro, ambos primavera. Rossby apresentou maior atividade em 2015 nos meses de janeiro a abril, com maiores amplitudes e picos positivos ocorrendo em fevereiro e abril. Destacou-se também o pico negativo desta onda ocorrendo em julho (inverno) e secundariamente em abril (outono). As ondas de Rossby apresentaram leve decréscimo em amplitude em 2016 durante o inverno e grande aumento entre outubro e dezembro (primavera e início do verão). As maiores amplitudes e pico de atividade positiva e negativa ocorreram em outubro. Em 2017, as ondas de Rossby possuíram maiores amplitudes nos meses do outono, com picos de fase positiva e negativa em abril e maio. Não se observou drástica variação sazonal no comportamento das ondas de Rossby em 2018, com amplitudes altas em todos os meses do ano. Picos máximos de ondas positivas ocorreram em março (outono) e novembro (primavera) e negativos em maio (outono) e setembro (primavera). Pode-se notar em 2019 um aumento na amplitude da onda de Rossby apenas em maio (outono) onde ocorreu a onda com fase positiva mais intensa e em seguida negativa mais intensa.

Figura 4.69 - Comportamento das ondas de Rossby no Leste-Centro da Amazônia para os anos de 2010 - 2014.

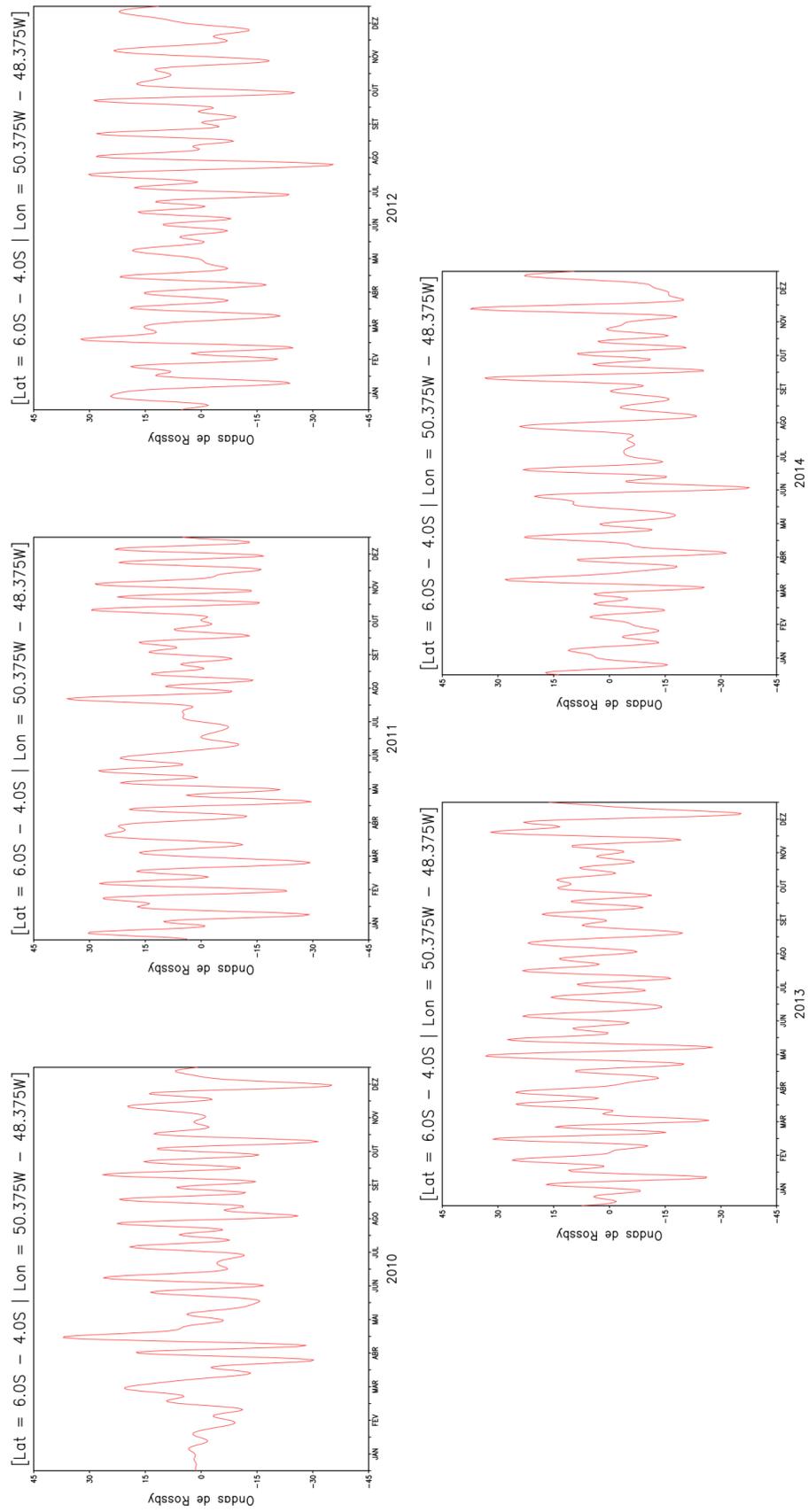
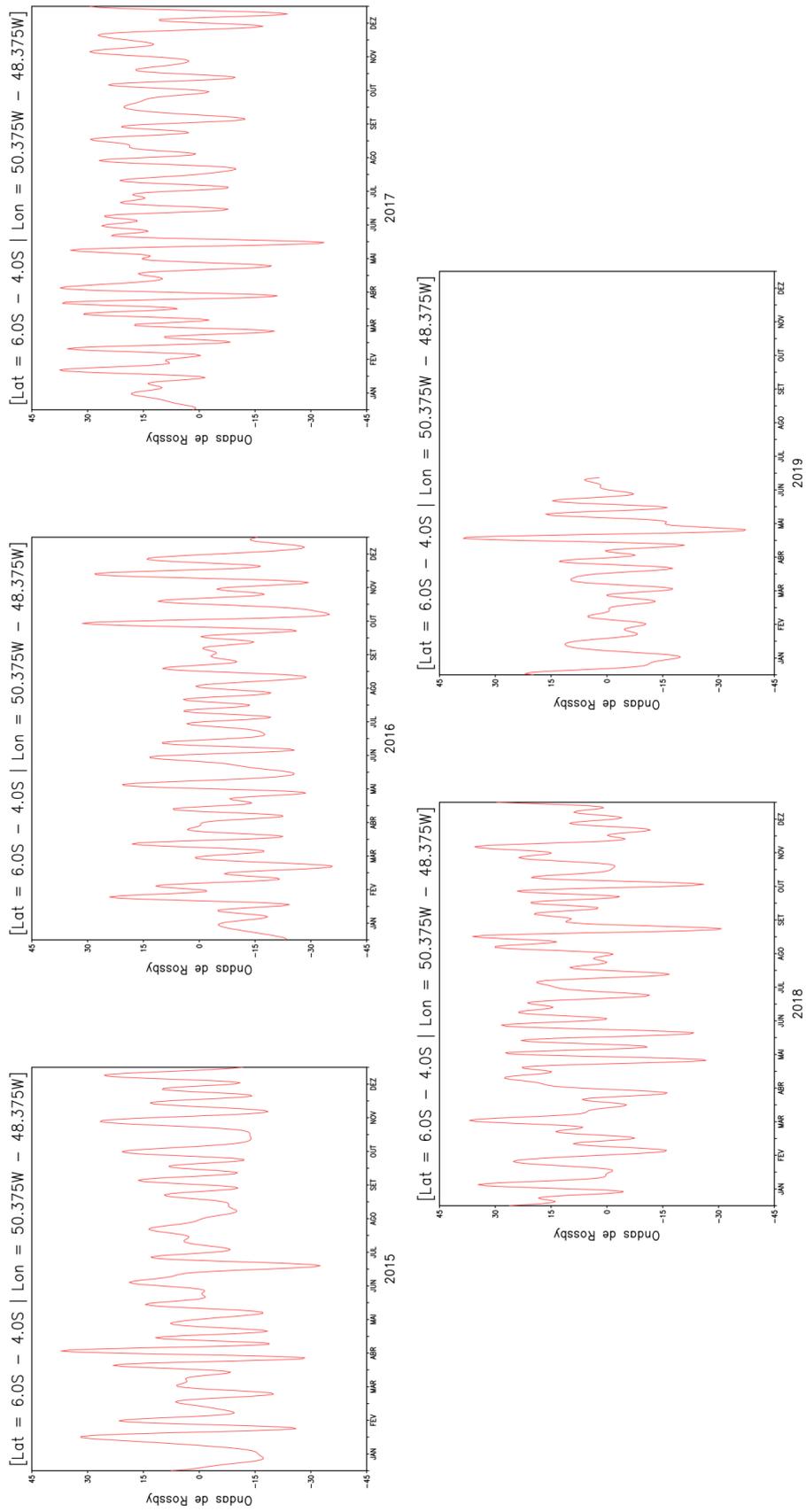


Figura 4.69 - Comportamento das ondas de Rossby no Leste-Centro da Amazônia para os anos de 2015 - 2019.



Na região Leste-Centro (Figura 4.70), Kelvin apresentou o mesmo comportamento médio das outras localidades em 2010, com maior atividade durante outono e primavera, com ondas mais intensas ocorrendo nestas estações. Para 2011, o menor período de atividade foi durante o inverno e os períodos de maior atividade outono e primavera. A onda mais intensa com os valores mais positivos e negativos ocorreu em novembro (primavera). Em 2012 notou-se valores mais próximos de zero no inverno, maior atividade no outono e primavera, onda mais positiva em abril (outono) e mais negativa em outubro (primavera). O padrão mudou levemente em 2013, onde os picos e ondas mais frequentes foram notados no outono. Primavera permanece como segunda estação mais intensa e o inverno como tendo valores mínimos. Kelvin se apresentou intensa em 2014 especialmente de janeiro a maio, com destaque para o trimestre do outono. Inverno foi o período de menos intensidade dessas ondas, que recuperaram intensidade na primavera e verão. As ondas de Kelvin se apresentaram em 2015 mais intensas durante os meses de verão e outono, com picos positivos e negativos mais expressivos ocorrendo em fevereiro e março. Os valores desta onda se aproximaram a zero da segunda metade de junho até a primeira metade de setembro, assim contendo quase todo o inverno e parte da primavera. Kelvin em 2016 se mostrou novamente mais intensa no verão e no outono e menos intensa no inverno. A maior amplitude e os picos das ondas em fase positiva e negativa ocorreram em março (outono). As ondas de Kelvin se mostraram ativas na maioria das estações 2017, com maiores amplitudes e picos em janeiro (verão) e menor intensidade no inverno e em parte de setembro (início da primavera). As ondas de Kelvin em 2018 foram mais intensas durante verão e outono, com picos em março. Esta onda possuiu valores se aproximando de 0 nos meses do inverno austral. Outono também foi a estação do ano com as ondas de Kelvin mais amplas em 2019, com picos sendo atingidos nessa estação. Janeiro também foi um mês de ondas de Kelvin intensas.

Figura 4.70 - Comportamento das ondas de Kelvin no Leste-Centro da Amazônia para os anos de 2010 - 2014.

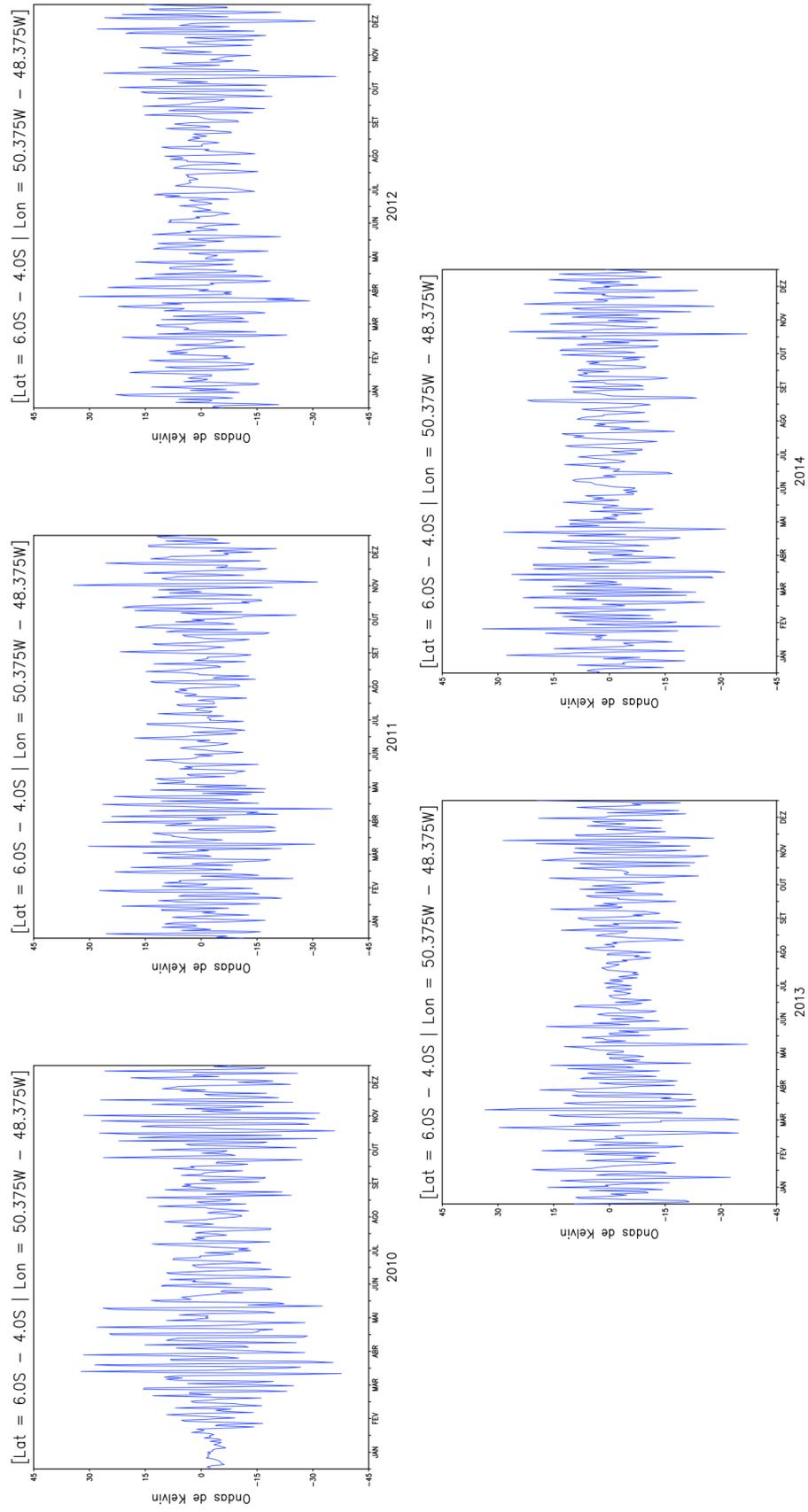
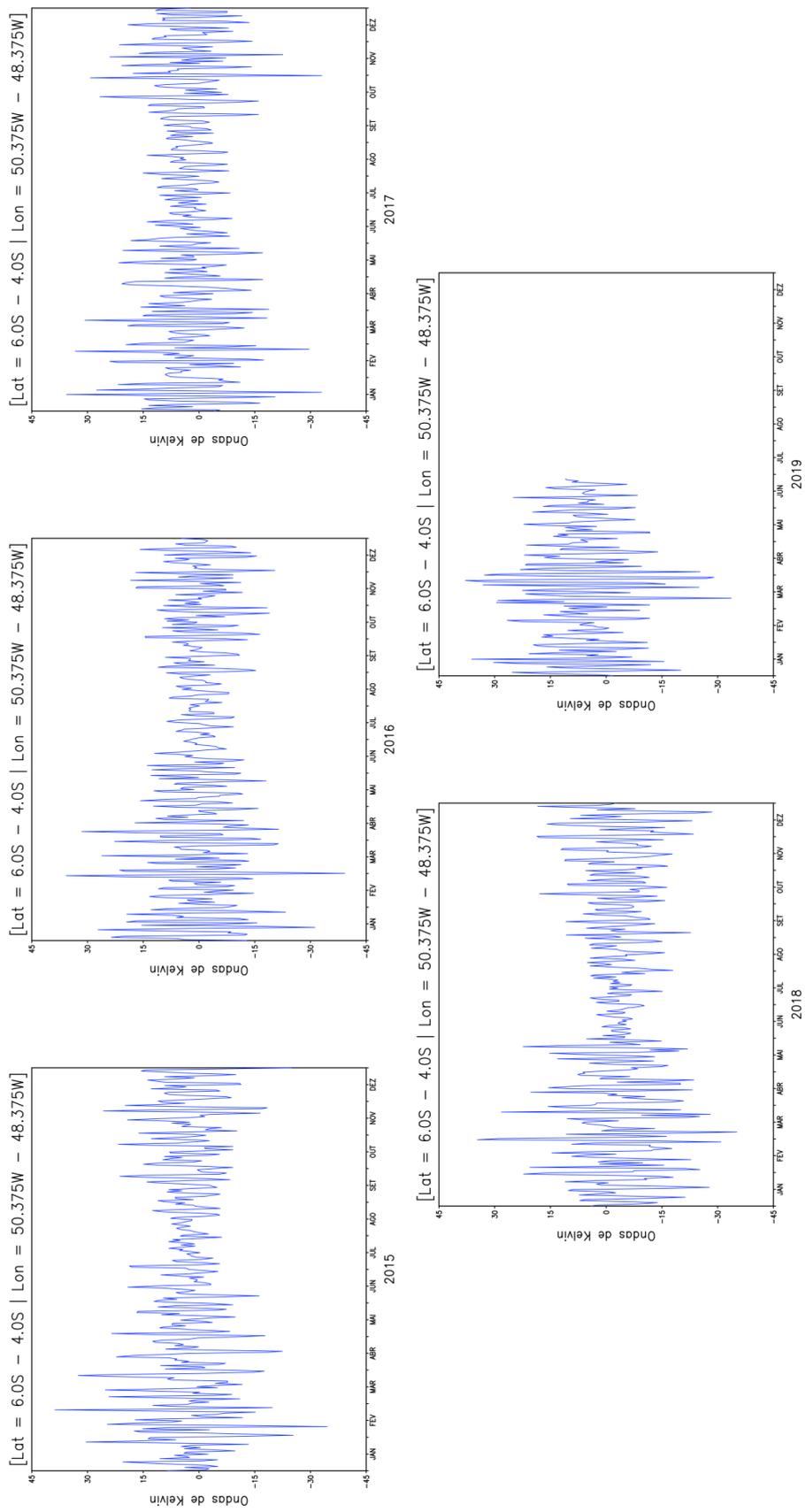


Figura 4.70 - Comportamento das ondas de Kelvin no Leste-Centro da Amazônia para os anos de 2015 - 2019.



4.3.6 Síntese e discussão

Observando o comportamento das ondas de Rossby e Kelvin para o período de 10 anos em 5 regiões da Amazônia, características similares para cada região foram identificadas. São as seguintes:

Centro-Norte da Amazônia (Lat = 4.0N - 6.0 N | Lon = 63.5W - 61.5W):

- Rossby - Atividade elevada da onda de Rossby pode ocorrer em qualquer estação do ano, porém as maiores amplitudes e picos tanto das fases positiva, quanto da negativa costumam ocorrer na primavera, exceto em 2012, que foi no inverno. Em 2015, apenas a onda mais positiva ocorreu na primavera, enquanto em 2018 apenas a onda mais negativa esteve presente nesta estação. Destes anos, 2012 foi ano de La Niña moderada, 2015 de El Niño muito forte e 2018 de El Niño fraco.
- Kelvin - Esta região apresenta distribuição de ondas de Kelvin entre primavera, verão e outono, com picos das fases positiva/negativa normalmente acontecendo nestas estações do ano, com exceção de 2015 quando as amplitudes foram maiores no inverno. De todas as estações do ano, a primavera conteve mais picos positivos/negativos, em 6 dos 10 anos (2010, 2011, 2013, 2014, 2016, 2018).

Centro da Amazônia (Lat = 6.0S - 4.0S | Lon = 63.5W - 61.5W):

- Rossby - Altas amplitudes bem distribuídas em todas as estações do ano. Em 4 anos estas ficaram bem distribuídas entre primavera e inverno (2013, 2014, 2016, 2018), em 2 anos a atividade foi maior durante a primavera (2010, 2015), em 2 anos esteve entre outono e inverno (2011 e 2017), 1 no inverno (2012) e 1 no outono (2019). As ondas foram mínimas, se aproximando de zero, no verão de 3 anos (2013, 2014 e 2017). Nota-se então que a primavera e o inverno foram as estações com maior frequência de ondas intensas.
- Kelvin - Esta onda foi mais intensa no outono em 9 dos 10 anos, por 4 vezes aparecendo durante o verão e da primavera (2010, 2011, 2012 e 2013), em 3 anos sendo mais intensa no verão (2014, 2015 e 2018) em 2 anos as maiores amplitudes apareceram apenas no outono (2016 e 2019) e 2017 foi a exceção, com ondas mais amplas ocorrendo no verão e na primavera

apenas. Em todos os 10 anos, o inverno foi a estação do ano com anomalias próximas a 0, porém estas amplitudes próximas a 0 podem se iniciar no final do outono (2010) e se estender até início da primavera (2015).

Centro-Sul da Amazônia (Lat = 16.0S - 14.0S | Lon = 63.5W - 61.5W):

- Rossby - Ondas bem distribuídas ao longo dos anos. Em 2 anos não se pode identificar estação com ondas mais amplas (2010 e 2019), em 2 anos elas se localizaram no verão e na primavera (2011 e 2016), em 2 anos apenas na primavera (2014 e 2015), 2 anos com foco no outono e primavera (2013 e 2017), 1 ano onde as ondas mais amplas ocorreram distribuídas no verão, outono e primavera (2012) e 1 ano com destaque para o verão (2018). Assim, a estação que aparece mais frequentemente é a primavera, em 7 dos 10 anos.
- Kelvin - Dos 10 anos de dados, as ondas de Kelvin apresentam como característica marcante ondas de valores elevados distribuídas principalmente entre outono e primavera. Em 6 anos a estação mais impactada pela onda de Kelvin foi a primavera (2012, 2013, 2014, 2016, 2017 e 2018), em 3 anos foi o outono (2010, 2015 e 2019) e em 1 ano o verão (2011). Em quase todos os anos, o inverno foi período de atividade de Kelvin próxima a zero, porém em 2 anos (2016 e 2018) as ondas passaram a aumentar sua amplitude na metade/final do inverno, se aproximando do comportamento característico da primavera.

Oeste-Centro da Amazônia (Lat = 6.0S - 4.0S | Lon = 76.625W - 74.625W):

- Rossby - Ondas bem distribuídas ao longo das estações do ano. As ondas de maiores amplitudes apareceram no outono, inverno e primavera (2011 e 2014), verão, inverno e primavera (2016), verão, outono e primavera (2017), inverno e primavera (2012 e 2018), outono e primavera (2010), outono e inverno em (2013), apenas primavera (2015) e apenas outono (2019). Assim, a primavera apresenta maior frequência de ondas com alta amplitude, com 8 dos 10 anos, outono e inverno aparecem em 6 dos 10 anos. Verão foi a estação com menos ondas de amplitude elevadas, apenas 3 dos 10 anos. Além disso, em 2 anos (2013 e 2014) as ondas de Rossby foram mínimas no verão, se aproximando de 0.

- Kelvin - O outono esteve entre as estações do ano com onda mais ampla e intensa em todos os 10 anos, em contrapartida o inverno foi a menos intensa em todos os 10 anos. A primavera e o verão também foram destaque, a primavera aparecendo junto do outono em 4 anos (2010, 2011, 2012, 2017) e o verão também em 4 anos (2012, 2014, 2015, 2016). Assim, apenas em 2012 verão, outono e primavera estiveram como estações de ondas de Kelvin mais expressivas. Em 3 anos, o mês de junho (início do inverno) apresentou ondas de alta amplitude, comportamento típico de outono (2011, 2015 e 2017).

Leste-Centro da Amazônia (Lat = 6.0S - 4.0S | Lon = 50.375W - 48.375W):

- Rossby - Como nas outras regiões, as ondas de Rossby podem ocorrer em todas as estações do ano. Em 2 anos as ondas mais amplas foram mais frequentes no outono e verão (2010 e 2011), em 2 anos no outono (2017 e 2019), em 1 ano no inverno e na primavera (2012), em 1 ano no verão (2013), em 1 ano no outono, inverno e primavera (2014), em 1 ano no verão, outono e inverno (2015), em 1 ano na primavera e verão (2016) e em 1 ano no outono e primavera (2018). Assim, outono é a estação com ondas mais amplas, 7 dos 10 anos, o verão em 5 anos, primavera em 4 dos 10 anos e o inverno em 3 anos. As amplitudes foram mínimas, próximas a zero, na primavera de 2013 e no verão de 2014.
- Kelvin - Em todos os 10 anos analisados, Kelvin possuiu as maiores amplitudes em 9 outonos. A primavera apresentou ondas de amplitudes similares ao outono nos 3 primeiros anos (2010, 2011 e 2012) e em 2017, enquanto o verão apresentou amplitudes mais elevadas em 5 anos (2014, 2015, 2016, 2017 e 2018). Assim, 2017 foi o ano em que as maiores amplitudes estiveram presentes principalmente no verão e primavera, porém com um outono não tão expressivo. O inverno foi a estação com menores amplitudes da onda de Kelvin, se aproximando a zero nesta estação do ano para todos os anos, podendo se estender para o primeiro mês da primavera como em 2015 e 2017.

Ao observar as 5 regiões distintas da Amazônia, nota-se que as ondas de Rossby podem se fazer presente durante qualquer estação do ano com amplitudes diversas, porém, há uma tendência de ser mais ativas e atingirem maiores valores durante

a estação da primavera. Isso é uma exceção apenas para a região leste da Amazônia, onde a preferência destas ondas é o outono. Mesmo para as regiões de mesma latitude, o comportamento das ondas de Rossby pode variar bastante. Um outono com ondas mais amplas na região leste da Amazônia não indica necessariamente um outono com ondas intensas na região oeste.

Como as ondas de Rossby viajam de leste para oeste, teoriza-se que o modo meridional de temperatura do Oceano Atlântico possa se relacionar com a entrada das ondas de Rossby no continente Sul-Americano, modulando sua intensidade ou posicionamento. O efeito desta oscilação é mais evidente na região Centro-Sul, onde as ondas de Rossby foram mais amplas na primavera de 2014 e 2015, após invernos com temperaturas do Atlântico Sul mais quentes. De maneira similar, em 2018 o verão teve ondas mais amplas após um período com o Oceano Atlântico Sul mais aquecido desde abril deste ano. Com relação ao fenômeno ENOS, este não parece impactar a atuação das ondas de Rossby, sua intensidade maior ou menor em determinada estação do ano não apresenta relação com fase positiva ou negativa do ENOS. Porém, para ter uma conclusão sobre a influência desse fenômeno é necessário realizar este estudo para vários anos de El Niño e de La Niña.

Com relação às ondas de Kelvin, estas se mostram mais ativas no trimestre março-abril-maio em todos os 10 anos para região Oeste-Centro, ou em 9 dos 10 anos para regiões Centro-Norte, Centro e Leste-Centro. Vale lembrar que este trimestre marca primavera do hemisfério norte. A única região que contrasta este comportamento é a Centro-Sul, onde a primavera do hemisfério sul possui as maiores amplitudes de onda em 6 dos 10 anos e o outono em apenas 3 dos 10 anos. O inverno tem a tendência em praticamente todos os anos e regiões de ser a estação com menos ondas de Kelvin, com elas atingindo valores próximos a zero. Durante o inverno do hemisfério sul, as ondas se restringem principalmente ao hemisfério norte, como pode ser visto nos gráficos do Centro-Norte da Amazônia. Há pouca diferença observada nas ondas de Kelvin para 3 regiões de mesma latitude, porém há diferença em algumas estações do ano. Por exemplo, em 2017 as ondas de Kelvin tiveram mais amplitude no Centro e Leste-Centro do que na região Oeste-Centro, indicando que talvez a onda tenha ficado mais intensa conforme tenha passado pela Amazônia.

As ondas de Kelvin equatoriais se deslocam de oeste para leste, sendo assim, as ondas que adentram a América do Sul possuem origem no Oceano Pacífico ou Oceano Índico com propagação sobre o Oceano Pacífico. Dessa forma, surge o questionamento de que o fenômeno ENOS possa causar alguma mudança nas ondas de

Kelvin. Nota-se que nos pontos de mesma latitude, os anos com ocorrência de La Niña estão associados a anos em que a primavera apresenta ondas de Kelvin tão intensas quanto no outono ou até mesmo mais intensas (2010, 2011, 2012 e 2017), enquanto que o El Niño esteve presente em anos em que o verão apresentou ondas mais intensas do que o normal (2014, 2015, 2016 e 2018).

5 CONCLUSÕES

Esta dissertação apresenta as características físicas e dinâmicas das variáveis meteorológicas associadas com a passagem das ondas de Rossby e Kelvin equatoriais e seus impactos em alterar os padrões de precipitação da região Amazônica. Os resultados aqui apresentados comprovam que, dependendo de sua fase, estas ondas equatoriais são capazes de aumentar ou diminuir a cobertura de nuvens convectivas na Amazônia, assim impactando diretamente o regime de chuvas.

5.1 Ondas de Rossby

As Ondas de Rossby encontradas nesta pesquisa são atuantes durante todos os meses do ano, porém escolheu-se o outono de três anos: 2010, 2015 e 2017 para realizar uma análise. Com isso, buscou-se uma relação com a variabilidade do índice MMA. As regiões mais aquecidas do Oceano Atlântico podem modular onde as ondas de Rossby são geradas ou onde são intensificadas, assim modificando a latitude na qual adentram o continente.

Assim como nos trabalhos encontrados na literatura para ondas de Rossby em outras regiões do globo, as anomalias encontradas mostram que durante a passagem da fase negativa da onda, ocorre aumento na temperatura e aumento de umidade específica na troposfera. Na maioria dos eventos, os ventos próximos à superfície foram anormalmente de leste e de norte, enquanto em altos níveis foram de oeste e sul, uma completa inversão com a altura. Apesar de serem esperados anomalias ciclônicas em superfície e anticiclônicas em altos níveis, estas foram minorias nos eventos descritos. Porém, as anomalias de divergência foram mais realistas, apresentando convergência em baixos níveis e divergência em altos níveis.

5.2 Ondas de Kelvin

Diferente das Ondas de Rossby, as Ondas de Kelvin possuem maior atividade no outono e primavera, menores no verão e mínimas no inverno. Assim, escolheu-se o outono de três anos: 2013, 2011 e 2016. Com isso, buscou-se uma relação com a variabilidade do ENOS. Enquanto o ano neutro e o ano com La Niña tiveram a maioria das características anômalas em comum, o ano de El Niño apresentou mais divergências.

As ondas aqui observadas tiveram velocidade média de 12,86 m/s durante as fases positivas e 13,85 m/s durante as fases negativas. Estas velocidades foram inferiores aos encontrados na literatura para as ondas se propagando nos oceanos, porém si-

milar à velocidade de 14 m/s encontrada em Mekonnen et al. (2008) para a África. Assim como na passagem das ondas de Rossby, há um notável aumento na temperatura da troposfera (sendo mais predominante em médios e altos níveis), aumento na umidade específica, convergência em superfície e divergência em altos níveis. Nas ondas associadas com convecção (negativas) notou-se anomalias predominantemente de oeste e norte próximo à superfície e de leste e norte em altos níveis.

5.3 Quantificação das Ondas de Rossby e Kelvin no período de 10 anos

Para estudar a atuação e variação das ondas de Rossby e Kelvin na Amazônia no período de 10 anos, a Amazônia foi dividida em 5 regiões: Centro-Norte, Central, Centro-Sul, Oeste-Centro e Leste-Centro. Ao observar as regiões, percebeu-se que as ondas de Rossby podem aparecer com magnitudes variadas em qualquer estação do ano, porém, há uma tendência de serem mais ativas e atingirem valores mais elevados na primavera. Esta é apenas uma exceção na Amazônia oriental, onde a preferência por essas ondas é o outono. Mesmo para regiões da mesma latitude, as ondas de Rossby podem se comportar de maneira bem diferente. Torna-se evidente que um outono com ondas intensas no leste da Amazônia não significa necessariamente um outono com ondas intensas no oeste.

Em relação às ondas Kelvin, elas são mais ativas no trimestre do outono do Hemisfério Sul para todos os 10 anos no Centro-Oeste e em 9 dos 10 anos nas regiões Centro-Norte, Central e Leste. A única região que contrasta com esse comportamento é o Centro-Sul, onde a primavera no Hemisfério Sul apresenta as maiores frequências, em 6 de 10 anos, e o outono em apenas 3 de 10 anos. O inverno costuma ser a estação com menos ondas de Kelvin em quase todos os anos e regiões, com seus valores próximos de zero, de forma que as ondas são confinadas ao hemisfério norte (onde é verão). As ondas Kelvin observadas nas 3 regiões de mesma latitude são quase indistinguíveis, raramente havendo divergência.

5.4 Modelos conceituais

Considerando as diferenças entre cada um dos casos analisados, não há precisão em afirmar um modelo conceitual da atuação das Ondas de Rossby em determinada localidade. Ainda assim, com as características aqui apresentadas, ressalta-se que nos dias que antecedem a aproximação de um núcleo de fase positiva há uma gradativa diminuição na cobertura de nuvens (anomalias positivas de ROL), aumento de temperatura em baixos e altos níveis para os cinco dias anteriores, diminuição da umidade específica acima de 850 hPa, ventos anômalos de leste e norte para altos

níveis com máxima intensidade um dia antes do pico da onda, além de anomalias ciclônicas em médios níveis, anticiclônicas em altos níveis e convergência em altos níveis nos dias que antecedem o núcleo da onda.

Várias destas características são opostas para a fase negativa. Nos dias que antecedem a chegada do núcleo da onda, há o gradativo aumento da nebulosidade (anomalias negativas de ROL), o predomínio ainda é de aumento de temperatura em baixos e altos níveis, porém a umidade relativa aumenta à partir de 850 hPa, os ventos em altos níveis são anormalmente de oeste e sul com maior intensidade dois dias antes do pico da onda. Cerca de três dias antes do dia de máxima intensidade começam a surgir anomalias anticiclônicas em superfície e ciclônicas em altos níveis, sendo acompanhadas de convergência e divergência, respectivamente.

Como as Ondas de Kelvin se propagam com velocidade elevada, a determinação das características que antecedem a chegada do núcleo da onda são menos evidentes do que nas Ondas de Rossby. A intensificação ou desintensificação da cobertura de nuvens não ocorre de forma gradativa como nas Ondas de Rossby. Ainda assim, é notável para a fase positiva que o aumento de temperatura, de baixos para médios níveis e a diminuição em altos níveis, surge cerca de dois dias antes do pico da onda. Pelo menos um dia antes do pico dessa fase, surgem anomalias de leste no vento zonal e de norte no vento meridional, bem como a presença de convergência de massa em altos níveis.

Para a fase negativa, a diminuição de temperatura em baixos e médios níveis surge em pelo menos dois dos eventos um dia antes do pico da fase negativa, junto do aumento da umidade específica acima de 850 hPa e em médios níveis. Os ventos zonais são anômalos de leste e os ventos meridionais são anômalos de norte em altos níveis pelo menos dois dias antes do pico da onda negativa ou mantêm este padrão anômalo desde a passagem da fase positiva de Kelvin, caso haja uma precedendo a fase negativa. A divergência de massa em altos níveis surge pelo menos um dia antes do pico negativo.

5.5 Sugestões para trabalhos futuros

Em trabalhos futuros, recomenda-se uma seleção maior de casos de ondas de Rossby e Kelvin intensas, inclusive em outras estações do ano, para maior entendimento sobre as características associadas à estas ondas. Além disso, pode-se explorar com mais detalhes como o MMA afeta a propagação das ondas de Rossby e o ENOS afeta as ondas de Kelvin que se propagam para a América do Sul. Mais décadas podem ser

utilizadas para um estudo da variabilidade dessas duas ondas em cada ano e estação do ano, assim possibilitando a criação de uma "climatologia" da atuação, intensidade e propagação das ondas para cada uma das 5 regiões da Amazônia como mostrado no Capítulo 4.

Estas pesquisas futuras podem contribuir para a previsão de tempo, previsão sazonal e intrasazonal para a região Amazônica, além de cooperar para uma maior compreensão da propagação das ondas equatoriais ao redor do globo. Espera-se que esta pesquisa abra portas para expandir os trabalhos focados na atuação das ondas equatoriais no continente sul-americano e seus impactos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADAMS, D. K.; SOUZA, E. P. d.; COSTA, A. A. Convecção úmida na Amazônia: implicações para modelagem numéric. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 24, n. 2, p. 168–178, 2009. 1
- ARKIN, P. A.; ARDANUY, P. E. Estimating climatic-scale precipitation from space: a review. **Journal of Climate**, v. 2, n. 11, p. 1229–1238, 1989. 13
- CARVALHO, L. M.; JONES, C.; LIEBMANN, B. Extreme precipitation events in southeastern South America and large-scale convective patterns in the South Atlantic Convergence Zone. **Journal of Climate**, v. 15, n. 17, p. 2377–2394, 2002. 1
- CAVALCANTI, I. F. **Tempo e clima no Brasil**. [S.l.]: Oficina de textos, 2016. 1
- COHEN, J.; DIAS, M. S.; NOBRE, C. Aspectos climatológicos das linhas de instabilidade na Amazônia. **Climanálise**, v. 4, n. 11, p. 34–40, 1989. 1
- DUNKERTON, T. J.; CRUM, F. X. Eastward propagating 2-to 15-day equatorial convection and its relation to the tropical intraseasonal oscillation. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 100, n. D12, p. 25781–25790, 1995. 8
- FIGUEROA, S. N.; NOBRE, C. A. Precipitation distribution over central and western tropical South America. **Climanálise**, v. 5, n. 6, p. 36–45, 1990. 1
- GILL, A. E. Some simple solutions for heat-induced tropical circulation. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 106, n. 449, p. 447–462, 1980. 5, 31
- HOLTON, J. An introduction to dynamic meteorology, int. **Geophys. Ser**, v. 88, p. 313–369, 2004. 2
- JANICOT, S.; CANIAUX, G.; CHAUVIN, F.; COËTLOGON, G. D.; FONTAINE, B.; HALL, N.; KILADIS, G.; LAFORE, J.-P.; LAVAYSSE, C.; LAVENDER, S. L. Intraseasonal variability of the west african monsoon. **Atmospheric Science Letters**, v. 12, n. 1, p. 58–66, 2011. 8
- JANICOT, S. et al. The dynamics of the west african monsoon. part v: the detection and role of the dominant modes of convectively coupled equatorial rossby waves. **Journal of Climate**, v. 23, n. 14, p. 4005–4024, 2010. 7

- KILADIS, G. N.; WHEELER, M. Horizontal and vertical structure of observed tropospheric equatorial rossby waves. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 100, n. D11, p. 22981–22997, 1995. 6
- KILADIS, G. N.; WHEELER, M. C.; HAERTEL, P. T.; STRAUB, K. H.; ROUNDY, P. E. Convectively coupled equatorial waves. **Reviews of Geophysics**, v. 47, n. 2, 2009. 7, 10, 82, 83, 121
- LIEBMANN, B.; KILADIS, G. N.; CARVALHO, L. M.; JONES, C.; VERA, C. S.; BLADÉ, I.; ALLURED, D. Origin of convectively coupled kelvin waves over South America. **Journal of Climate**, v. 22, n. 2, p. 300–315, 2009. 1, 2
- MACHADO, L. A. et al. Overview: precipitation characteristics and sensitivities to environmental conditions during goamazon2014/5 and acridicon-chuva. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 18, n. 9, p. 6461–6482, 2018. 1
- MADDEN, R. A.; JULIAN, P. R. Detection of a 40–50 day oscillation in the zonal wind in the tropical pacific. **Journal of Atmospheric Sciences**, v. 28, n. 5, p. 702–708, 1971. 1
- _____. Description of global-scale circulation cells in the tropics with a 40–50 day period. **Journal of Atmospheric Sciences**, v. 29, n. 6, p. 1109–1123, 1972. 1
- _____. Observations of the 40–50-day tropical oscillation: a review. **Monthly Weather Review**, v. 122, n. 5, p. 814–837, 1994. 1
- MARUYAMA, T.; YANAI, M. Evidence of large-scale wave disturbances in the equatorial lower stratosphere. **Journal of the Meteorological Society of Japan Serie II**, v. 45, n. 2, p. 196–199, 1967. 5
- MATSUNO, T. Quasi-geostrophic motions in the equatorial area. **Journal of the Meteorological Society of Japan Serie II**, v. 44, n. 1, p. 25–43, 1966. 5, 7, 10
- MEKONNEN, A.; THORNCROFT, C. D.; AIYYER, A. R. Analysis of convection and its association with african easterly waves. **Journal of Climate**, v. 19, n. 20, p. 5405–5421, 2006. 9
- MEKONNEN, A.; THORNCROFT, C. D.; AIYYER, A. R.; KILADIS, G. N. Convectively coupled kelvin waves over tropical africa during the boreal summer: structure and variability. **Journal of Climate**, v. 21, n. 24, p. 6649–6667, 2008. 9, 13, 120

MOLION, L. C. B. Climatologia dinâmica da região amazônica: mecanismos de precipitação. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 2, n. 1, p. 107–117, 1987.

1

MOURA, M. d. N.; VITORINO, M. I. Variabilidade da precipitação em tempo e espaço associada à zona de convergência intertropical. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 27, n. 4, p. 475–483, 2012. 1

NAKAZAWA, T. Mean features of 30-60 day variations as inferred from 8-year olr data. **Journal of the Meteorological Society of Japan Serie II**, v. 64, n. 5, p. 777–786, 1986. 6

_____. Tropical super clusters within intraseasonal variations over the western pacific. **Journal of the Meteorological Society of Japan Serie II**, v. 66, n. 6, p. 823–839, 1988. 6

NUMAGUTI, A. Characteristics of 4-to-20-day-period disturbances observed in the equatorial pacific during the toga coare iop. **Journal of the Meteorological Society of Japan Serie II**, v. 73, n. 2B, p. 353–377, 1995. 7

QUISPE, D. P. **Importância de Fatores Físicos na Ocorrência de Dois Eventos Hídricos Extremos na Região Amazônia: Um Estudo Numérico**. 159 p. Tese (Doutorado em Meteorologia) - — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2004. 17

RAMAGE, C. S. Role of a tropical “maritime continent” in the atmospheric circulation. **Monthly Weather Review**, v. 96, n. 6, p. 365–370, 1968. 5

ROUNDY, P. E. Analysis of convectively coupled kelvin waves in the indian ocean mjo. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 65, n. 4, p. 1342–1359, 2008. 121

ROUNDY, P. E.; FRANK, W. M. A climatology of waves in the equatorial region. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 61, n. 17, p. 2105–2132, 2004. 7, 8

ROUNDY, P. E.; JANIGA, M. A. Analysis of vertically propagating convectively coupled equatorial waves using observations and a non-hydrostatic boussinesq model on the equatorial beta-plane. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 138, n. 665, p. 1004–1017, 2012. 13

SCHLUETER, A.; FINK, A. H.; KNIPPERTZ, P.; VOGEL, P. A systematic comparison of tropical waves over northern Africa. part I: influence on rainfall. **Journal of Climate**, v. 32, n. 5, p. 1501–1523, 2019. 10

SERRA, Y. L.; JR, R. A. H. Observations of variability on synoptic timescales in the east pacific ITCZ. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 59, n. 10, p. 1723–1743, 2002. 8

SERRA, Y. L.; ROWE, A.; ADAMS, D. K.; KILADIS, G. N. Kelvin waves during goamazon and their relationship to deep convection. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 77, n. 10, p. 3533–3550, 2020. 1, 2, 121

STRAUB, K. H.; KILADIS, G. N. Observations of a convectively coupled Kelvin wave in the eastern pacific ITCZ. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 59, n. 1, p. 30–53, 2002. 8, 10, 13, 120

_____. The observed structure of convectively coupled Kelvin waves: comparison with simple models of coupled wave instability. **Journal of Atmospheric Sciences**, v. 60, n. 14, p. 1655–1668, 2003. 8, 121

TAKAYABU, Y. N. Large-scale cloud disturbances associated with equatorial waves part I: spectral features of the cloud disturbances. **Journal of the Meteorological Society of Japan Serie II**, v. 72, n. 3, p. 433–449, 1994. 6, 8

VENTRICE, M. J.; THORNCROFT, C. D. The role of convectively coupled atmospheric Kelvin waves on african easterly wave activity. **Monthly Weather Review**, v. 141, n. 6, p. 1910–1924, 2013. 9

VENTRICE, M. J.; THORNCROFT, C. D.; JANIGA, M. A. Atlantic tropical cyclogenesis: a three-way interaction between an african easterly wave, diurnally varying convection, and a convectively coupled atmospheric Kelvin wave. **Monthly Weather Review**, v. 140, n. 4, p. 1108–1124, 2012. 9

WALLACE, J.; CHANG, L. On the application of satellite data on cloud brightness to the study of tropical wave disturbances. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 29, n. 7, p. 1400–1403, 1972. 6

WALLACE, J. M.; KOUSKY, V. Observational evidence of kelvin waves in the tropical stratosphere. **Journal of Atmospheric Sciences**, v. 25, n. 5, p. 900–907, 1968. 5

WANG, B.; XIE, X. Low-frequency equatorial waves in vertically sheared zonal flow. part i: Stable waves. **Journal of Atmospheric Sciences**, v. 53, n. 3, p. 449–467, 1996. 7

- WANG, H.; FU, R. The influence of Amazon rainfall on the atlantic ITCZ through convectively coupled Kelvin waves. **Journal of Climate**, v. 20, n. 7, p. 1188–1201, 2007. 1, 2, 8
- WHEELER, M.; KILADIS, G. N. Convectively coupled equatorial waves: analysis of clouds and temperature in the wavenumber–frequency domain. **Journal of Atmospheric Sciences**, v. 56, n. 3, p. 374–399, 1999. 7, 8, 9, 13, 120
- WHEELER, M.; KILADIS, G. N.; WEBSTER, P. J. Large-scale dynamical fields associated with convectively coupled equatorial waves. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 57, n. 5, p. 613–640, 2000. 8, 13
- YANAI, M.; MARUYAMA, T. Stratospheric wave disturbances propagating over the equatorial pacific. **Journal of the Meteorological Society of Japan Serie II**, v. 44, n. 5, p. 291–294, 1966. 5
- YANG, G.-Y.; HOSKINS, B.; SLINGO, J. Convectively coupled equatorial waves. part I: horizontal and vertical structures. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 64, n. 10, p. 3406–3423, 2007. 10, 11, 23, 83
- ZANGVIL, A. Temporal and spatial behavior of large-scale disturbances in tropical cloudiness deduced from satellite brightness data. **Monthly Weather Review**, v. 103, n. 10, p. 904–920, 1975. 6

APÊNDICE A - TABELAS

Tabela A.1 - Posição, distância percorrida em 1 dia, velocidade meridional e intensidade dos núcleos positivos da Onda de Rossby para a fase positiva do Primeiro Evento descrito neste capítulo.

Dia	Posição Sul	Distância Percorrida em 1 Dia	Velocidade Zonal (m/s)	Intensidade no Núcleo (W/m ²)	Posição Norte	Distancia Percorrida em 1 Dia	Velocidade Zonal (m/s)	Intensidade no Núcleo (W/m ²)
15/03/2010	10° S - 42° W	-----	-----	32	-----	-----	-----	-----
16/03/2010	10° S - 46° W	4° lon	5,144	32	4° N - 36° W	-----	-----	18
17/03/2010	10° S - 50° W	4° lon	5,144	32	3° N - 42° W	1° lat 6° lon	7,716	24
18/03/2010	10° S - 52° W	2° lon	2,572	32	2° N - 48° W	1 lat 6° lon	7,716	28
19/03/2010	11° S - 56° W	1° lat 4° lon	5,144	28	2° N - 50° W	2° lon	2,572	32
20/03/2010	12° S - 60° W	1° lat 4° lon	5,144	24	2° N - 54° W	4° lon	5,144	36
23/03/2010	-----	-----	-----	-----	2° N - 66° W	4° lon	5,144	40
24/03/2010	-----	-----	-----	-----	2° N - 70° W	4° lon	5,144	36

Tabela A.2 - Posição, distância percorrida em 1 dia, velocidade meridional e intensidade dos núcleos positivos da Onda de Rossby para a fase negativa do Primeiro Evento descrito neste capítulo.

Dia	Posição Sul	Distancia Percorrida em 1 Dia	Velocidade Zonal (m/s)	Intensidade no Núcleo (W/m ²)	Posição Norte	Distancia Percorrida em 1 Dia	Velocidade Zonal (m/s)	Intensidade no Núcleo (W/m ²)
26/03/2010	-----	-----	-----	-----	2.5° N - 42° W	-----	-----	-28
27/03/2010	-----	-----	-----	-----	2.5° N - 46° W	4° lon	5,144	-28
28/03/2010	5° S - 35° W	-----	-----	-20	2.5° N - 46° W	4° lon	5,144	-24
29/03/2010	5° S - 37° W	2° lon	2,572	-20	2.5° N - 46° W	4° lon	5,144	-20
30/03/2010	5° S - 40° W	3° lon	3,858	-18	-----	-----	-----	-----

Tabela A.3 - Posição, distância percorrida em 1 dia, velocidade meridional e intensidade dos núcleos positivos da Onda de Rossby para a fase positiva do Segundo Evento descrito neste capítulo.

Dia	Posição Sul	Distância Percorrida em 1 Dia	Velocidade Zonal (m/s)	Intensidade no Núcleo (W/m ²)	Posição Norte	Distancia Percorrida em 1 Dia	Velocidade Zonal (m/s)	Intensidade no Núcleo (W/m ²)
27/04/2015	20° S - 45° W	----	----	18	5° N - 45° W	----	----	24
28/04/2015	20° S - 49° W	4° lon	5,144	20	5° N - 49° W 7.5° N - 49° W	4° lon	5,144	28
29/04/2015	20° S - 51° W	2° lon	2,572	24	7.5° N - 51° W	2° lon	2,572	32
30/04/2015	20° S - 56° W	5° lon	6,430	24	7.5° N - 56° W	5° lon	6,430	36
01/05/2015	20° S - 58° W	2° lon	2,572	20	7.5° N - 58° W	2° lon	2,572	40
02/05/2015	20° S - 60° W	2° lon	2,572	18	7.5° N - 62° W	4° lon	5,144	40
03/05/2015	20° S - 62° W	2° lon	2,572	16	7.5° N - 66° W	4° lon	5,144	40
04/05/2015	----	----	----	----	7.5° N - 70° W	4° lon	5,144	40

Tabela A.4 - Posição, distância percorrida em 1 dia, velocidade meridional e intensidade do núcleo negativo da Onda de Rossby para a fase negativa do Segundo Evento descrito neste capítulo.

Dia	Posição Sul	Distância Percorrida em 1 Dia	Velocidade Zonal (m/s)	Intensidade no Núcleo (W/m ²)
08/05/2015	7.5° S - 52° W 10° S - 52° W	----	----	-16
09/05/2015	10° S - 54° W	2° lon	2,572	-20
10/05/2015	10° S - 56° W	2° lon	2,572	-24
11/05/2015	10° S - 58° W	2° lon	2,572	-28
12/05/2015	10° S - 58° W	2° lon	2,572	-28
13/05/2015	10° S - 60° W	2° lon	2,572	-28
14/05/2015	10° S - 62° W	2° lon	2,572	-24
15/05/2015	10° S - 64° W	2° lon	2,572	-20

Tabela A.5 - Posição, distância percorrida em 1 dia, velocidade meridional e intensidade do núcleo positivo da Onda de Rossby para a fase positiva do Terceiro Evento descrito neste capítulo.

Dia	Posição Norte	Distância Percorrida em 1 Dia	Velocidade Zonal (m/s)	Intensidade no Núcleo (W/m ²)
28/03/2017	5° N - 52° W	----	----	20
29/03/2017	5° N - 52° W	0°	0	20
30/03/2017	5° N - 54° W	2° lon	2,572	24
31/03/2017	5° N - 56° W	2° lon	2,572	28
01/04/2017	5° N - 57° W	1° lon	1,286	32
02/04/2017	5° N - 58° W	1° lon	1,286	32
03/04/2017	5° N - 60° W	2° lon	2,572	32
04/04/2017	2.5° N - 62° W 5° N - 62° W	2° lon	2,572	28
05/04/2017	2.5° N - 66° W 5° N - 66° W	4° lon	5,144	28
06/04/2017	2.5° N - 70° W 5° N - 70° W	4° lon	5,144	24

Tabela A.6 - Posição, distância percorrida em 1 dia, velocidade meridional e intensidade do núcleo negativo da Onda de Rossby para a fase negativa do Terceiro Evento descrito neste capítulo.

Dia	Posição Norte	Distância Percorrida em 1 Dia	Velocidade Zonal (m/s)	Intensidade no Núcleo (W/m ²)
07/04/2015	5° N - 46° W	----	----	-32
08/04/2015	5° N - 48° W	2° lon	2,572	-32
09/04/2015	5° N - 50° W	2° lon	2,572	-32
10/04/2015	5° N - 54° W	4° lon	5,144	-32
11/04/2015	5° N - 56° W	2° lon	2,572	-28
12/04/2015	5° N - 58° W	2° lon	2,572	-28
13/04/2015	5° N - 58° W	2° lon	2,572	-24
14/04/2015	5° N - 58° W	2° lon	2,572	-24

Tabela A.7 - Síntese das principais características das anomalias meteorológicas encontradas durante os dias de maior atividade das Ondas de Rossby de fase positiva.

Evento	Evento 1		Evento 2		Evento 3	
	Núcleo no HN	Núcleo no HS	Núcleo no HN	Núcleo no HS	Núcleo no HN	Núcleo no HS
Aumento de Temperatura	850, 500 e 200 hPa	850, 500 e 200 hPa	850, 500 e 200 hPa	X	850, 500 e 200 hPa	X
Diminuição na Umidade Específica	850, 500 e 200 hPa	850, 500 e 200 hPa	500 hPa	850 e 200 hPa	200 hPa	X
Vento Zonal em 850 hPa	Leste	Leste	Leste	Leste	Leste	X
Vento Zonal em 200 hPa	Leste	Leste	Oeste	Oeste	Oeste	X
Vento Meridional em 850 hPa	Norte	Sul	Norte	Sul	Norte	X
Vento Meridional em 200 hPa	Norte	Sul	Norte	Norte	Sul	X
Vorticidade em 850hPa	Giro anticiclônico à oeste	Giro ciclônico	X			
Vorticidade em 500hPa	Giro ciclônico	Giro ciclônico	Giro ciclônico	Giro ciclônico	Giro ciclônico à oeste	X
Vorticidade em 200hPa	Giro ciclônico à leste	Giro anticiclônico	Giro ciclônico	Giro anticiclônico à oeste	Giro anticiclônico	X
Divergência em 850hPa	Divergência	Divergência	Divergência	Divergência	Divergência	X
Divergência em 500hPa	Convergência	Divergência	Divergência	Convergência	Divergência	X
Divergência em 200hPa	Convergência	Convergência	Convergência	Divergência	Convergência	X

Tabela A.8 - Síntese das principais características das anomalias meteorológicas encontradas durante os dias de maior atividade das Ondas de Rossby de fase negativa.

Evento	Evento 1		Evento 2		Evento 3	
	Núcleo no HN	Núcleo no HS	Núcleo no HN	Núcleo no HS	Núcleo no HN	Núcleo no HS
Aumento de Temperatura	850, 500 e 200 hPa	850, 500 e 200 hPa	X	850 e 200 hPa	500 hPa	X
Aumento na Umidade Específica	850 e 200 hPa	850, 500 e 200 hPa	X	850, 500 e 200 hPa	850 e 500 hPa	X
Vento Zonal em 850 hPa	Leste	Leste	X	Leste	Oeste	X
Vento Zonal em 200 hPa	Oeste	Oeste	X	Oeste	Oeste	X
Vento Meridional em 850 hPa	Norte	Norte	X	Norte	Norte	X
Vento Meridional em 200 hPa	Sul	Sul	X	Sul	Norte	X
Vorticidade em 850hPa	Giro anticiclônico	Giro anticiclônico	X	Giro anticiclônico	Giro ciclônico	X
Vorticidade em 500hPa	Giro ciclônico	Giro anticiclônico	X	Giro anticiclônico	Giro anticiclônico	X
Vorticidade em 200hPa	Giro ciclônico	Giro ciclônico	X	Giro anticiclônico	Giro anticiclônico	X
Divergência em 850hPa	Convergência	Convergência	X	Convergência	Convergência	X
Divergência em 500hPa	Divergência	Convergência	X	Divergência	Convergência	X
Divergência em 200hPa	Divergência	Divergência	X	Divergência	Divergência	X

Tabela A.9 - Posição, distância percorrida em 1 dia, velocidade meridional e intensidade do núcleo positivo da Onda de Kelvin para a fase positiva do Primeiro Evento descrito neste capítulo.

Dia	Posição Núcleo	Distância Percorrida em 1 Dia	Velocidade Zonal (m/s)	Intensidade no Núcleo (W/m ²)
25/03/2013	2.5° S - 75° W	-----	-----	24
26/03/2013	2.5° S - 65° W	10° lon	12,860	32
27/03/2013	2.5° S - 55° W 0° - 55° W	10° lon	12,860	40
28/03/2013	2.5° S - 45° W 2.5° N - 45° W	10° lon	12,860	40
29/03/2013	2.5° S - 30° W 2.5° N - 30° W	15° lon	19,290	40
30/03/2013	2.5° S - 20° W 2.5° N - 20° W	10° lon	12,860	40

Tabela A.10 - Posição, distância percorrida em 1 dia, velocidade meridional e intensidade do núcleo negativo da Onda de Kelvin para a fase negativa do Primeiro Evento descrito neste capítulo.

Dia	Posição Núcleo	Distância Percorrida em 1 Dia	Velocidade Zonal (m/s)	Intensidade no Núcleo (W/m ²)
27/03/2013	2.5° S - 75° W	-----	-----	-16
28/03/2013	2.5° S - 65° W	10° lon	12,860	-24
29/03/2013	2.5° S - 58° W	7° lon	9,002	-32
30/03/2013	2.5° S - 48° W 0° - 48° W	10° lon	12,860	-32
31/03/2013	2.5° S - 38° W 0° - 38° W	10° lon	12,860	-32
01/04/2013	2.5° S - 26° W 0° - 26° W	12° lon	15,432	-24

Tabela A.11 - Posição, distância percorrida em 1 dia, velocidade meridional e intensidade do núcleo negativo da Onda de Kelvin para a fase negativa do Segundo Evento descrito neste capítulo.

Dia	Posição Núcleo	Distância Percorrida em 1 Dia	Velocidade Zonal (m/s)	Intensidade no Núcleo (W/m ²)
09/03/2011	2.5° N - 81° W 5° N - 91° W	-----	-----	-40
10/03/2011	2.5° N - 69° W 5° N - 79° W	12° lon	15,432	-40
11/03/2011	2.5° N - 55° W 5° N - 65° W	14° lon	18,004	-40
12/03/2011	2.5° N - 48° W 5° N - 54° W	9° lon	11,574	-32
13/03/2011	2.5° N - 40° W	11° lon	14,146	-32

Tabela A.12 - Posição, distância percorrida em 1 dia, velocidade meridional e intensidade do núcleo positivo da Onda de Kelvin para a fase positiva do Segundo Evento descrito neste capítulo.

Dia	Posição Núcleo	Distância Percorrida em 1 Dia	Velocidade Zonal (m/s)	Intensidade no Núcleo (W/m ²)
16/03/2011	0° - 70° W 4° N - 84° W	-----	-----	16
17/03/2011	0° - 68° W 2,5° N - 68° W	9° lon	11,574	24
18/03/2011	2,5° N - 56° W 5° N - 56° W	12° lon	15,432	28
19/03/2011	2,5° N - 46° W 5° N - 46° W	10° lon	12,860	32
20/03/2011	2,5° N - 38° W 5° N - 38° W	8° lon	10,288	28

Tabela A.13 - Posição, distância percorrida em 1 dia, velocidade meridional e intensidade do núcleo negativo da Onda de Kelvin para a fase negativa do Terceiro Evento descrito neste capítulo.

Dia	Posição Núcleo	Distância Percorrida em 1 Dia	Velocidade Zonal (m/s)	Intensidade no Núcleo (W/m ²)
28/02/2016	2,5° S - 85° W 5° S - 85° W	-----	-----	-24
29/02/2016	2,5° S - 75° W 5° S - 75° W	10° lon	12,860	-32
01/03/2016	2,5° S - 62° W 5° S - 62° W	13° lon	16,718	-36
02/03/2016	5° S - 51° W	11° lon	14,146	-40
03/03/2016	5° S - 40° W	11° lon	14,146	-40

Tabela A.14 - Posição, distância percorrida em 1 dia, velocidade meridional e intensidade do núcleo positivo da Onda de Kelvin para a fase positiva do Terceiro Evento descrito neste capítulo.

Dia	Posição Núcleo	Distância Percorrida em 1 Dia	Velocidade Zonal (m/s)	Intensidade no Núcleo (W/m ²)
02/03/2016	0° - 75° W 5° S - 75° W	-----	-----	24
03/03/2016	0° - 65° W 5° S - 65° W	10° lon	12,860	28
04/03/2016	0° - 54° W 5° S - 58° W	9° lon	11,574	28
05/03/2016	0° - 45° W 5° S - 45° W	10° lon	12,860	24
06/03/2016	0° - 38° W	7° long	9,002	24

Tabela A.15 - Síntese das principais características das anomalias meteorológicas encontradas durante os dias de maior atividade das Ondas de Kelvin de fase positiva.

Evento	Evento 1	Evento 2	Evento 3
Características	Núcleo no HS	Núcleo no HN	Núcleo no HS
Aumento de Temperatura	Entre 1000 e 500 hPa, entre 150 e 100 hPa	Entre 150 e 100 hPa	Entre 800 e 400 hPa, entre 300 e 100 hPa
Diminuição de Temperatura	Entre 500 e 150 hPa	Entre 1000 hPa e 200 hPa	Entre 400 e 300 hPa
Diminuição na Umidade Específica	Entre 300 e 250 hPa	Entre 200 e 150 hPa	Entre 700 e 400 hPa
Aumento na Umidade Específica	Entre 1000 e 300 hPa, entre 150 e 100 hPa	Entre 1000 hPa e 200 hPa	Entre 1000 e 700 hPa, entre 150 e 100 hPa
Vento Zonal em 850 hPa	Leste	Leste	Leste
Vento Zonal em 500 hPa	Oeste	Oeste	Oeste
Vento Zonal em 200 hPa	Leste	Leste	Oeste
Vento Meridional em 850 hPa	Sul	Sul	Norte
Vento Meridional em 500 hPa	Sul	Sul	Sul
Vento Meridional em 200 hPa	Norte	Norte	Sul
Vorticidade em 850hPa	Giro anticiclônico	Giro ciclônico	Giro ciclônico
Vorticidade em 500hPa	Giro anticiclônico	Giro ciclônico	Giro ciclônico
Vorticidade em 200hPa	Giro ciclônico	Giro anticiclônico	Giro ciclônico
Divergência em 850hPa	Convergência	X	Divergência
Divergência em 500hPa	Divergência	X	Convergência
Divergência em 200hPa	Divergência	Divergência	Convergência

Tabela A.16 - Síntese das principais características das anomalias meteorológicas encontradas durante os dias de maior atividade das Ondas de Kelvin de fase negativa.

Evento	Evento 1	Evento 2	Evento 3
Características	Núcleo no HS	Núcleo no HN	Núcleo no HS
Aumento de Temperatura	Entre 500 e 200 hPa	Entre 150 e 100 hPa	Entre 850 e 400 hPa
Diminuição de Temperatura	Entre 1000 e 500 hPa, entre 200 e 100 hPa	Entre 1000 e 150 hPa	Entre 1000 e 850 hPa, entre 400 e 150 hPa
Diminuição na Umidade Específica	Entre 1000 e 800 hPa, entre 500 e 400 hPa	Entre 200 e 100 hPa	Entre 800 e 500 hPa, entre 200 e 150 hPa
Aumento na Umidade Específica	Entre 800 e 500 hPa, entre 400 e 150 hPa	Entre 1000 e 200 hPa	Entre 1000 e 800 hPa, entre 500 e 200 hPa
Vento Zonal em 850 hPa	Leste	Oeste	Oeste
Vento Zonal em 500 hPa	Leste	Oeste	Oeste
Vento Zonal em 200 hPa	Leste	Leste	Oeste
Vento Meridional em 850 hPa	Norte	Norte	Norte
Vento Meridional em 500 hPa	Norte	Norte	Norte
Vento Meridional em 200 hPa	Norte	Sul	Norte
Vorticidade em 850hPa	Giro anticiclônico	Giro anticiclônico	Giro anticiclônico
Vorticidade em 500hPa	Giro anticiclônico	Giro anticiclônico	Giro anticiclônico
Vorticidade em 200hPa	Giro anticiclônico	Giro ciclônico	Giro anticiclônico
Divergência em 850hPa	Convergência	Convergência	Divergência
Divergência em 500hPa	Divergência	Divergência	Convergência
Divergência em 200hPa	Divergência	Divergência	Divergência