

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS DA AMAZÔNIA - INPA  
UNIVERSIDADE DO ESTADO DO AMAZONAS - UEA  
Programa de Pós-Graduação em Clima e Ambiente - PPG-CLIAMB

# **Um estudo do impacto de eventos ENOS na energética global.**

Dissertação de Mestrado

ZAYRA CHRISTINE SÁTYRO DOS SANTOS

Orientador: PROF. DR. JOSÉ AUGUSTO PAIXÃO VEIGA

Manaus, Junho de 2014

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS DA AMAZÔNIA - INPA  
UNIVERSIDADE DO ESTADO DO AMAZONAS - UEA  
Programa de Pós-Graduação em Clima e Ambiente - PPG-CLIAMB

## **Um estudo do impacto de eventos ENOS na energética global.**

ZAYRA CHRISTINE SÁTYRO DOS SANTOS

Orientador: PROF. DR. JOSÉ AUGUSTO PAIXÃO VEIGA

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Clima e Ambiente do convênio INPA/UEA, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Clima e Ambiente.

Manaus, Junho de 2014.



**UEA**  
UNIVERSIDADE  
DO ESTADO DO  
AMAZONAS

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISA DA AMAZÔNIA - INPA  
UNIVERSIDADE DO ESTADO DO AMAZONAS-UEA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CLIMA E AMBIENTE



ATA DA DEFESA DE DISSERTAÇÃO  
DE ZAYRA CHRISTINE SÁTYRO DOS  
SANTOS ALUNA DO CURSO DE  
MESTRADO EM CLIMA E AMBIENTE.

Aos 30 dias do mês de Julho do ano de 2014, às 09:00 horas, realizou-se na sala de aula C15 da Escola Superior de Tecnologia, sito à Av. Darcy Vargas, a sessão de defesa pública da dissertação de Mestrado da aluna Zayra Christine Sátyro dos Santos, sob o título "Um estudo do impacto de eventos enos na energética global", em complemento aos critérios exigidos para obtenção do título de Mestre em Clima e Ambiente, tendo como orientador o Professor Doutor José Augusto Paixão Veiga, segundo encaminhamento da Coordenadora do Programa de Pós-Graduação em Clima e Ambiente e de acordo com os registros constantes na secretaria do Programa. A Banca Julgadora foi composta pelos seguintes membros: Professor Doutor José Augusto Paixão Veiga (Presidente), Professor Doutor Francis Wagner da Silva Correia (Membro Interno) e o Professor Doutor Flávio Natal Mendes de Oliveira (Membro Externo) **Parecer:** Encerrando os trabalhos, os membros da Banca Julgadora APROVARAM a dissertação.

  
Prof. Dr. José Augusto Paixão Veiga (UEA)  
Presidente

  
Prof. Dr. Francis Wagner da Silva Correia (UEA)  
Membro Interno

  
Prof. Dr. Flávio Natal Mendes de Oliveira (INMET)  
Membro Externo

---

Programa de Pós-Graduação do Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia – PPG-INPA  
Programa de Pós-Graduação em Clima e Ambiente – PPG-CLIAMB  
Av. André Araújo, 2936 – Bairro: Aleixo – CEP: 69.060-001  
Fone/Fax: 55 92 3643-3255  
E-mail: <http://ppg@inpa.gov.br> – [cliamb@inpa.gov.br](mailto:cliamb@inpa.gov.br)  
Manaus/Amazonas/Brasil

S237 Santos, Zayra Christine Sátyro dos  
Um estudo do impacto de eventos ENOS na energética global /  
Zayra Christine Sátyro dos Santos. --- Manaus: [s.n.], 2014.  
--, 85 f. : il. color.

Dissertação (Mestrado) --- INPA/UEA, Manaus, 2014.  
Orientador : José Augusto Paixão Veiga.  
Área de concentração : Interações Clima-Biosfera na Amazônia.

1. Ciclo de Lorenz. 2. Energética Espacial. 3. El Niño. I. Título.

CDD 551.51

**Sinopse:** No presente trabalho estudou-se o papel relativo dos eventos El Niño e La Niña, através de compostos, sobre a energética da atmosfera global.

**Palavras-chaves:** Ciclo de Lorenz, Energética Espacial, El Niño

# Sumário

<b>Agradecimentos</b>	<b>16</b>
<b>Resumo</b>	<b>18</b>
<b>Abstract</b>	<b>19</b>
<b>1 Introdução, Justificativa e Objetivos</b>	<b>20</b>
1.1 Objetivos . . . . .	23
1.1.1 Objetivos Gerais . . . . .	23
1.1.2 Objetivos Específicos . . . . .	24
<b>2 Revisão Bibliográfica</b>	<b>25</b>
2.1 Circulação Geral da Atmosfera . . . . .	25
2.1.1 Células de Circulação . . . . .	26
2.2 Energética da Atmosfera . . . . .	28
<b>3 Materiais e Métodos</b>	<b>33</b>
3.1 Dados . . . . .	33
3.2 Metodologia . . . . .	34
3.2.1 Equações de Lorenz no domínio espacial . . . . .	34
3.2.2 Compostos de ENOS . . . . .	39
<b>4 Resultados e Discussão</b>	<b>41</b>
4.1 Ciclo Energético Integrado no Volume Atmosférico . . . . .	41

4.1.1	Diagramas de Energia . . . . .	41
4.1.2	Comportamento do Ciclo Energético com relação aos eventos . . . . .	45
4.2	Climatologia dos termos de energia e conversão: análise bi-dimensional . . . . .	66
4.3	Anomalias dos eventos ENOS para os termos de energia e conversão: análise bi-dimensional . . . . .	69
4.3.1	El Niño em relação à climatologia e aos anos neutros . . . . .	69
4.3.2	La Niña em relação à climatologia e aos anos neutros . . . . .	74
<b>5</b>	<b>Conclusões</b>	<b>80</b>

# Lista de Figuras

2.1	Diagrama de dois reservatórios de energia conectados através de um termo de conversão. . . . .	29
2.2	Diagrama de quatro reservatórios de energia conectados por quatro termos de conversão. . . . .	30
2.3	Diagrama de seis reservatórios de energia conectados por nove termos de conversão. . . . .	32
3.1	Diagrama de quatro reservatórios de energia conectados por quatro termos de conversão. . . . .	34
3.2	Episódios de El Niño (1982-1983; 1986-1987; 1991-1992; 1997-1998; 2009-2010) e o composto formado pela média da TSM, baseado em um aumento de $0,5^{\circ}\text{C}$ de TSM na região Niño 3.4 [31] . . . . .	39
3.3	Episódios de La Niña (1984-1985; 1988-1989; 1998-1999; 1999-2000; 2010-2011) e o composto formado pela média da TSM, baseado em uma diminuição de $0,5^{\circ}\text{C}$ de TSM na região Niño 3.4. [31] . . . . .	40
4.1	Ciclo da energética de Lorenz para a climatologia (preto), composto de El Niño (vermelho), composto de La Niña (azul) e composto de anos neutros (verde). Todos os valores representados correspondem ao intervalo de Agosto do ano 0 a Abril do ano 0 + 1. As unidades são em $10^5 J.m^2$ para os componentes de energia e $W.m^2$ para os termos de conversão. . . . .	42
4.2	Variação temporal da energia potencial zonal ( $P_m$ ) para compostos de eventos El Niño (linha vermelha), Climatologia (linha preta), Anomalia entre El Niño e Climatologia (barras em verde) e soma da energia produzida entre agosto do ano 0 (ano anterior) e abril do ano seguinte (0+1), barras em azul na parte superior-central do gráfico. As unidades estão em $10^5 J/m^2$ . . . . .	45

4.3	Variação temporal da energia potencial zonal ( $P_m$ ) para compostos de eventos El Niño (linha vermelha), compostos de anos neutros (linha preta), Anomalia entre El Niño e anos neutros (barras em verde) e soma da energia produzida entre agosto do ano 0 (ano anterior) e abril do ano seguinte (0+1), barras em azul na parte superior-central do gráfico. As unidades estão em $10^5 J/m^2$ . . . . .	46
4.4	Variação temporal da energia potencial zonal ( $P_m$ ) para compostos de eventos La Niña (linha azul), Climatologia (linha preta), Anomalia entre La Niña e Climatologia (barras em verde) e soma da energia produzida entre agosto do ano 0 (ano anterior) e abril do ano seguinte (0+1), barras em azul na parte superior-central do gráfico. As unidades estão em $10^5 J/m^2$ . . . . .	46
4.5	Variação temporal da energia potencial zonal ( $P_m$ ) para compostos de eventos La Niña (linha azul), Composto de anos neutros (linha preta), Anomalia entre La Niña e anos neutros (barras em verde) e soma da energia produzida entre agosto do ano 0 (ano anterior) e abril do ano seguinte (0+1), barras em azul na parte superior-central do gráfico. As unidades estão em $10^5 J/m^2$ . . . . .	47
4.6	Variação temporal da energia potencial da perturbação ( $P_e$ ) para compostos de eventos El Niño (linha vermelha), Climatologia (linha preta), Anomalia entre El Niño e Climatologia (barras em verde) e soma da energia produzida entre agosto do ano 0 (ano anterior) e abril do ano seguinte (0+1), barras em azul na parte superior-central do gráfico. As unidades estão em $10^5 J/m^2$ . . . . .	47
4.7	Variação temporal da energia potencial da perturbação ( $P_e$ ) para compostos de eventos El Niño (linha vermelha), Composto de anos neutros (linha preta), Anomalia entre El Niño e anos neutros (barras em verde) e soma da energia produzida entre agosto do ano 0 (ano anterior) e abril do ano seguinte (0+1), barras em azul na parte superior-central do gráfico. As unidades estão em $10^5 J/m^2$ . . . . .	48
4.8	Variação temporal da energia potencial da perturbação ( $P_e$ ) para compostos de eventos La Niña (linha azul), Climatologia (linha preta), Anomalia entre La Niña e Climatologia (barras em verde) e soma da energia produzida entre agosto do ano 0 (ano anterior) e abril do ano seguinte (0+1), barras em azul na parte superior-central do gráfico. As unidades estão em $10^5 J/m^2$ . . . . .	48
4.9	Variação temporal da energia potencial da perturbação ( $P_e$ ) para compostos de eventos La Niña (linha azul), Composto de anos neutros (linha preta), Anomalia entre La Niña e anos neutros (barras em verde) e soma da energia produzida entre agosto do ano 0 (ano anterior) e abril do ano seguinte (0+1), barras em azul na parte superior-central do gráfico. As unidades estão em $10^5 J/m^2$ . . . . .	49



4.10	Variação temporal da energia cinética zonal ( $K_m$ ) para compostos de eventos El Niño (linha vermelha), Climatologia (linha preta), Anomalia entre El Niño e Climatologia (barras em verde) e soma da energia produzida entre agosto do ano 0 (ano anterior) e abril do ano seguinte (0+1), barras em azul na parte superior-central do gráfico. As unidades estão em $10^5 J/m^2$ . . . . .	49
4.11	Variação temporal da energia cinética zonal ( $K_m$ ) para compostos de eventos El Niño (linha vermelha), Composto de anos neutros (linha preta), Anomalia entre El Niño e anos neutros (barras em verde) e soma da energia produzida entre agosto do ano 0 (ano anterior) e abril do ano seguinte (0+1), barras em azul na parte superior-central do gráfico. As unidades estão em $10^5 J/m^2$ . . . . .	50
4.12	Variação temporal da energia cinética zonal ( $K_m$ ) para compostos de eventos La Niña (linha azul), Climatologia (linha preta), Anomalia entre La Niña e Climatologia (barras em verde) e soma da energia produzida entre agosto do ano 0 (ano anterior) e abril do ano seguinte (0+1), barras em azul na parte superior-central do gráfico. As unidades estão em $10^5 J/m^2$ . . . . .	50
4.13	Variação temporal da energia cinética zonal ( $K_m$ ) para compostos de eventos La Niña (linha azul), Composto de anos neutros (linha preta), Anomalia entre La Niña e anos neutros (barras em verde) e soma da energia produzida entre agosto do ano 0 (ano anterior) e abril do ano seguinte (0+1), barras em azul na parte superior-central do gráfico. As unidades estão em $10^5 J/m^2$ . . . . .	51
4.14	Variação temporal da energia cinética da perturbação ( $K_e$ ) para compostos de eventos El Niño (linha vermelha), Climatologia (linha preta), Anomalia entre El Niño e Climatologia (barras em verde) e soma da energia produzida entre agosto do ano 0 (ano anterior) e abril do ano seguinte (0+1), barras em azul na parte superior-central do gráfico. As unidades estão em $10^5 J/m^2$ . . . . .	51
4.15	Variação temporal da energia cinética da perturbação ( $K_e$ ) para compostos de eventos El Niño (linha vermelha), Composto de anos neutros (linha preta), Anomalia entre El Niño e anos neutros (barras em verde) e soma da energia produzida entre agosto do ano 0 (ano anterior) e abril do ano seguinte (0+1), barras em azul na parte superior-central do gráfico. As unidades estão em $10^5 J/m^2$ . . . . .	52
4.16	Variação temporal da energia cinética da perturbação ( $K_e$ ) para compostos de eventos La Niña (linha azul), Climatologia (linha preta), Anomalia entre La Niña e Climatologia (barras em verde) e soma da energia produzida entre agosto do ano 0 (ano anterior) e abril do ano seguinte (0+1), barras em azul na parte superior-central do gráfico. As unidades estão em $10^5 J/m^2$ . . . . .	52

4.17	Variação temporal da energia cinética da perturbação ( $K_e$ ) para compostos de eventos La Niña (linha azul), Composto de anos neutros (linha preta), Anomalia entre La Niña e anos neutros (barras em verde) e soma da energia produzida entre agosto do ano 0 (ano anterior) e abril do ano seguinte (0+1), barras em azul na parte superior-central do gráfico. As unidades estão em $10^5 J/m^2$ . . . . .	53
4.18	Variação temporal da conversão de energia entre os reservatórios de energia potencial zonal ( $P_m$ ) e energia potencial da perturbação ( $P_e$ ) para compostos de eventos El Niño (linha vermelha), Climatologia (linha preta), Anomalia entre El Niño e Climatologia (barras em verde) e soma da energia produzida entre agosto do ano 0 (ano anterior) e abril do ano seguinte (0+1), barras em azul na parte superior-central do gráfico. As unidades estão em $W/m^2$ . . . . .	53
4.19	Variação temporal da conversão de energia entre os reservatórios de energia potencial zonal ( $P_m$ ) e energia potencial da perturbação ( $P_e$ ) para compostos de eventos El Niño (linha vermelha), Composto de anos neutros (linha preta), Anomalia entre El Niño e anos neutros (barras em verde) e soma da energia produzida entre agosto do ano 0 (ano anterior) e abril do ano seguinte (0+1), barras em azul na parte superior-central do gráfico. As unidades estão em $W/m^2$ . . . . .	54
4.20	Variação temporal da conversão de energia entre os reservatórios de energia potencial zonal ( $P_m$ ) e energia potencial da perturbação ( $P_e$ ) para compostos de eventos La Niña (linha azul), Climatologia (linha preta), Anomalia entre La Niña e Climatologia (barras em verde) e soma da energia produzida entre agosto do ano 0 (ano anterior) e abril do ano seguinte (0+1), barras em azul na parte superior-central do gráfico. As unidades estão em $W/m^2$ . . . . .	54
4.21	Variação temporal da conversão de energia entre os reservatórios de energia potencial zonal ( $P_m$ ) e energia potencial da perturbação ( $P_e$ ) para compostos de eventos La Niña (linha azul), Composto de anos neutros (linha preta), Anomalia entre La Niña e anos neutros (barras em verde) e soma da energia produzida entre agosto do ano 0 (ano anterior) e abril do ano seguinte (0+1), barras em azul na parte superior-central do gráfico. As unidades estão em $W/m^2$ . . . . .	55
4.22	Variação temporal da conversão de energia entre os reservatórios de energia potencial da perturbação ( $P_e$ ) e energia cinética da perturbação ( $K_e$ ) para compostos de eventos El Niño (linha vermelha), Climatologia (linha preta), Anomalia entre El Niño e Climatologia (barras em verde) e soma da energia produzida entre agosto do ano 0 (ano anterior) e abril do ano seguinte (0+1), barras em azul na parte superior-central do gráfico. As unidades estão em $W/m^2$ . . . . .	55

4.23	Variação temporal da conversão de energia entre os reservatórios de energia potencial da perturbação ( $P_e$ ) e energia cinética da perturbação ( $K_e$ ) para compostos de eventos El Niño (linha vermelha), Composto de anos neutros (linha preta), Anomalia entre El Niño e anos neutros (barras em verde) e soma da energia produzida entre agosto do ano 0 (ano anterior) e abril do ano seguinte (0+1), barras em azul na parte superior-central do gráfico. As unidades estão em $W/m^2$ . . . . .	56
4.24	Variação temporal da conversão de energia entre os reservatórios de energia potencial da perturbação ( $P_e$ ) e energia cinética da perturbação ( $K_e$ ) para compostos de eventos La Niña (linha azul), Climatologia (linha preta), Anomalia entre La Niña e Climatologia (barras em verde) e soma da energia produzida entre agosto do ano 0 (ano anterior) e abril do ano seguinte (0+1), barras em azul na parte superior-central do gráfico. As unidades estão em $W/m^2$ . . . . .	56
4.25	Variação temporal da conversão de energia entre os reservatórios de energia potencial da perturbação ( $P_e$ ) e energia cinética da perturbação ( $K_e$ ) para compostos de eventos La Niña (linha azul), Composto de anos neutros (linha preta), Anomalia entre La Niña e anos neutros (barras em verde) e soma da energia produzida entre agosto do ano 0 (ano anterior) e abril do ano seguinte (0+1), barras em azul na parte superior-central do gráfico. As unidades estão em $W/m^2$ . . . . .	57
4.26	Variação temporal da conversão de energia entre os reservatórios de energia cinética da perturbação ( $K_e$ ) e energia cinética zonal ( $K_m$ ) para compostos de eventos El Niño (linha vermelha), Climatologia (linha preta), Anomalia entre El Niño e Climatologia (barras em verde) e soma da energia produzida entre agosto do ano 0 (ano anterior) e abril do ano seguinte (0+1), barras em azul na parte superior-central do gráfico. As unidades estão em $W/m^2$ . . . . .	57
4.27	Variação temporal da conversão de energia entre os reservatórios de energia cinética da perturbação ( $K_e$ ) e energia cinética zonal ( $K_m$ ) para compostos de eventos El Niño (linha vermelha), Composto de anos neutros (linha preta), Anomalia entre El Niño e anos neutros (barras em verde) e soma da energia produzida entre agosto do ano 0 (ano anterior) e abril do ano seguinte (0+1), barras em azul na parte superior-central do gráfico. As unidades estão em $W/m^2$ . . . . .	58

4.28	Variação temporal da conversão de energia entre os reservatórios de energia cinética da perturbação ( $K_e$ ) e energia cinética zonal ( $K_m$ ) para compostos de eventos La Niña (linha azul), Climatologia (linha preta), Anomalia entre La Niña e Climatologia (barras em verde) e soma da energia produzida entre agosto do ano 0 (ano anterior) e abril do ano seguinte (0+1), barras em azul na parte superior-central do gráfico. As unidades estão em $W/m^2$ . . . . .	58
4.29	Variação temporal da conversão de energia entre os reservatórios de energia cinética da perturbação ( $K_e$ ) e energia cinética zonal ( $K_m$ ) para compostos de eventos La Niña (linha azul), Composto de anos neutros (linha preta), Anomalia entre La Niña e anos neutros (barras em verde) e soma da energia produzida entre agosto do ano 0 (ano anterior) e abril do ano seguinte (0+1), barras em azul na parte superior-central do gráfico. As unidades estão em $W/m^2$ . . . . .	59
4.30	Variação temporal da conversão de energia entre os reservatórios de energia potencial zonal ( $P_m$ ) e energia cinética zonal ( $K_m$ ) para compostos de eventos El Niño (linha vermelha), Climatologia (linha preta), Anomalia entre El Niño e Climatologia (barras em verde) e soma da energia produzida entre agosto do ano 0 (ano anterior) e abril do ano seguinte (0+1), barras em azul na parte superior-central do gráfico. As unidades estão em $W/m^2$ . . . . .	59
4.31	Variação temporal da conversão de energia entre os reservatórios de energia potencial zonal ( $P_m$ ) e energia cinética zonal ( $K_m$ ) para compostos de eventos El Niño (linha vermelha), Composto de anos neutros (linha preta), Anomalia entre El Niño e anos neutros (barras em verde) e soma da energia produzida entre agosto do ano 0 (ano anterior) e abril do ano seguinte (0+1), barras em azul na parte superior-central do gráfico. As unidades estão em $W/m^2$ . . . . .	60
4.32	Variação temporal da conversão de energia entre os reservatórios de energia potencial zonal ( $P_m$ ) e energia cinética zonal ( $K_m$ ) para compostos de eventos La Niña (linha azul), Climatologia (linha preta), Anomalia entre La Niña e Climatologia (barras em verde) e soma da energia produzida entre agosto do ano 0 (ano anterior) e abril do ano seguinte (0+1), barras em azul na parte superior-central do gráfico. As unidades estão em $W/m^2$ . . . . .	60

- 4.33 Variação temporal da conversão de energia entre os reservatórios de energia potencial zonal ( $P_m$ ) e energia cinética zonal ( $K_m$ ) para compostos de eventos La Niña (linha azul), Composto de anos neutros (linha preta), Anomalia entre La Niña e anos neutros (barras em verde) e soma da energia produzida entre agosto do ano 0 (ano anterior) e abril do ano seguinte (0+1), barras em azul na parte superior-central do gráfico. As unidades estão em  $W/m^2$ . . . . . 61
- 4.34 Variação temporal da geração de energia potencial zonal ( $G_m$ ) para compostos de eventos El Niño (linha vermelha), Climatologia (linha preta), Anomalia entre El Niño e Climatologia (barras em verde) e soma da energia produzida entre agosto do ano 0 (ano anterior) e abril do ano seguinte (0+1), barras em azul na parte superior-central do gráfico. As unidades estão em  $10^5 J/m^2$ . . . . . 61
- 4.35 Variação temporal da geração de energia potencial zonal ( $G_m$ ) para compostos de eventos El Niño (linha vermelha), Composto de anos neutros (linha preta), Anomalia entre El Niño e anos neutros (barras em verde) e soma da energia produzida entre agosto do ano 0 (ano anterior) e abril do ano seguinte (0+1), barras em azul na parte superior-central do gráfico. As unidades estão em  $10^5 J/m^2$ . . . . . 62
- 4.36 Variação temporal da geração de energia potencial zonal ( $G_m$ ) para compostos de eventos La Niña (linha azul), Climatologia (linha preta), Anomalia entre La Niña e Climatologia (barras em verde) e soma da energia produzida entre agosto do ano 0 (ano anterior) e abril do ano seguinte (0+1), barras em azul na parte superior-central do gráfico. As unidades estão em  $10^5 J/m^2$ . . . . . 62
- 4.37 Variação temporal da geração de energia potencial zonal ( $G_m$ ) para compostos de eventos La Niña (linha azul), Composto de anos neutros (linha preta), Anomalia entre La Niña e anos neutros (barras em verde) e soma da energia produzida entre agosto do ano 0 (ano anterior) e abril do ano seguinte (0+1), barras em azul na parte superior-central do gráfico. As unidades estão em  $10^5 J/m^2$ . . . . . 63
- 4.38 Variação temporal da geração de energia potencial da perturbação ( $G_e$ ) para compostos de eventos El Niño (linha vermelha), Climatologia (linha preta), Anomalia entre El Niño e Climatologia (barras em verde) e soma da energia produzida entre agosto do ano 0 (ano anterior) e abril do ano seguinte (0+1), barras em azul na parte superior-central do gráfico. As unidades estão em  $10^5 J/m^2$ . . . . . 63

4.39	Variação temporal da geração de energia potencial da perturbação ( $G_e$ ) para compostos de eventos El Niño (linha vermelha), Composto de anos neutros (linha preta), Anomalia entre El Niño e anos neutros (barras em verde) e soma da energia produzida entre agosto do ano 0 (ano anterior) e abril do ano seguinte (0+1), barras em azul na parte superior-central do gráfico. As unidades estão em $10^5 J/m^2$ . . . . .	64
4.40	Variação temporal da geração de energia potencial da perturbação ( $G_e$ ) para compostos de eventos La Niña (linha azul), Climatologia (linha preta), Anomalia entre La Niña e Climatologia (barras em verde) e soma da energia produzida entre agosto do ano 0 (ano anterior) e abril do ano seguinte (0+1), barras em azul na parte superior-central do gráfico. As unidades estão em $10^5 J/m^2$ . . . . .	64
4.41	Variação temporal da geração de energia potencial da perturbação ( $G_e$ ) para compostos de eventos La Niña (linha azul), Composto de anos neutros (linha preta), Anomalia entre La Niña e anos neutros (barras em verde) e soma da energia produzida entre agosto do ano 0 (ano anterior) e abril do ano seguinte (0+1), barras em azul na parte superior-central do gráfico. As unidades estão em $10^5 J/m^2$ . . . . .	65
4.42	Seção transversal vertical da geração de energia potencial zonal (A) e da geração de energia potencial da perturbação (B), para o período de 1979-2011. As unidades são em $W.m^2.(100hPa)^{-1}$ . . . . .	66
4.43	Seção transversal vertical da energia potencial zonal (A) e da energia potencial da perturbação (B), para o período de 1979-2011. As unidades são em $J.m^2.(100hPa)^{-1}$ . . . . .	67
4.44	Seção transversal vertical da energia cinética zonal (A) e da energia cinética da perturbação (B), para o período de 1979-2011. As unidades são em $J.m^2.(100hPa)^{-1}$ . . . . .	67
4.45	Seção transversal vertical da conversão de energia potencial zonal em energia cinética zonal, ( $C(P_m, K_m)$ ), para o período de 1979-2011. As unidades são em $W.m^2.(100hPa)^{-1}$ . . . . .	67
4.46	Seção transversal vertical da conversão de energia potencial zonal em energia potencial da perturbação, ( $C(P_m, P_e)$ ), para o período de 1979-2011. As unidades são em $W.m^2.(100hPa)^{-1}$ . . . . .	68
4.47	Seção transversal vertical da conversão de energia potencial da perturbação em energia cinética da perturbação, ( $C(P_e, K_e)$ ), para o período de 1979-2011. As unidades são em $W.m^2.(100hPa)^{-1}$ . . . . .	68
4.48	Seção transversal vertical da da conversão de energia cinética da perturbação em energia cinética zonal, ( $C(K_e, K_m)$ ), para o período de 1979-2011. As unidades são em $W.m^2.(100hPa)^{-1}$ . . . . .	68

4.49	Anomalia da energia potencial disponível da perturbação do composto de El Niño em relação à climatologia (a) e em relação ao composto de anos neutros (b) vista em cada nível de pressão entre janeiro do ano 0 e dezembro do ano 0+1. As unidades são em $J.m^2.(100hPa)^{-1}$ . . . . .	69
4.50	Anomalia da energia potencial disponível zonal do composto de El Niño em relação à climatologia (a) e em relação ao composto de anos neutros (b) vista em cada nível de pressão entre janeiro do ano 0 e dezembro do ano 0+1. As unidades são em $J.m^2.(100hPa)^{-1}$ . . . . .	70
4.51	Anomalia da energia cinética zonal do composto de El Niño em relação à climatologia (a) e em relação ao composto de anos neutros (b) vista em cada nível de pressão entre janeiro do ano 0 e dezembro do ano 0+1. As unidades são em $J.m^2.(100hPa)^{-1}$ . . . . .	71
4.52	Anomalia da energia cinética da perturbação do composto de El Niño em relação à climatologia (a) e em relação ao composto de anos neutros (b) vista em cada nível de pressão entre janeiro do ano 0 e dezembro do ano 0+1. As unidades são em $J.m^2.(100hPa)^{-1}$ . . . . .	71
4.53	Anomalia da conversão de energia potencial disponível zonal em energia potencial disponível da perturbação do composto de El Niño em relação à climatologia (a) e em relação ao composto de anos neutros (b) vista em cada nível de pressão entre janeiro do ano 0 e dezembro do ano 0+1. As unidades são em $W.m^2.(100hPa)^{-1}$ . . . . .	72
4.54	Anomalia da conversão de energia potencial disponível zonal em energia cinética zonal do composto de El Niño em relação à climatologia (a) e em relação ao composto de anos neutros (b) vista em cada nível de pressão entre janeiro do ano 0 e dezembro do ano 0+1. As unidades são em $W.m^2.(100hPa)^{-1}$ . . . . .	73
4.55	Anomalia da conversão de energia cinética da perturbação em energia cinética zonal do composto de El Niño em relação à climatologia (a) e em relação ao composto de anos neutros (b) vista em cada nível de pressão entre janeiro do ano 0 e dezembro do ano 0+1. As unidades são em $W.m^2.(100hPa)^{-1}$ . . . . .	73
4.56	Anomalia da conversão de energia potencial disponível da perturbação em energia cinética da perturbação do composto de El Niño em relação à climatologia (a) e em relação ao composto de anos neutros (b) vista em cada nível de pressão entre janeiro do ano 0 e dezembro do ano 0+1. As unidades são em $W.m^2.(100hPa)^{-1}$ . . . . .	74

4.57	Anomalia da energia potencial disponível da perturbação do composto de La Niña em relação à climatologia (a) e em relação ao composto de anos neutros (b) vista em cada nível de pressão entre janeiro do ano 0 e dezembro do ano 0+1. As unidades são em $J.m^2.(100hPa)^{-1}$ . . . . .	75
4.58	Anomalia da energia potencial disponível zonal do composto de La Niña em relação à climatologia (a) e em relação ao composto de anos neutros (b) vista em cada nível de pressão entre janeiro do ano 0 e dezembro do ano 0+1. As unidades são em $J.m^2.(100hPa)^{-1}$ . . . . .	75
4.59	Anomalia da energia cinética zonal do composto de La Niña em relação à climatologia (a) e em relação ao composto de anos neutros (b) vista em cada nível de pressão entre janeiro do ano 0 e dezembro do ano 0+1. As unidades são em $J.m^2.(100hPa)^{-1}$ . . . . .	76
4.60	Anomalia da energia cinética da perturbação do composto de La Niña em relação à climatologia (a) e em relação ao composto de anos neutros (b) vista em cada nível de pressão entre janeiro do ano 0 e dezembro do ano 0+1. As unidades são em $J.m^2.(100hPa)^{-1}$ . . . . .	77
4.61	Anomalia da conversão de energia potencial disponível zonal em energia potencial disponível da perturbação do composto de La Niña em relação à climatologia (a) e em relação ao composto de anos neutros (b) vista em cada nível de pressão entre janeiro do ano 0 e dezembro do ano 0+1. As unidades são em $W.m^2.(100hPa)^{-1}$ . . . . .	77
4.62	Anomalia da conversão de energia potencial disponível zonal em energia cinética zonal do composto de La Niña em relação à climatologia (a) e em relação ao composto de anos neutros (b) vista em cada nível de pressão entre janeiro do ano 0 e dezembro do ano 0+1. As unidades são em $W.m^2.(100hPa)^{-1}$ . . . . .	78
4.63	Anomalia da conversão de energia cinética da perturbação em energia cinética zonal do composto de La Niña em relação à climatologia (a) e em relação ao composto de anos neutros (b) vista em cada nível de pressão entre janeiro do ano 0 e dezembro do ano 0+1. As unidades são em $W.m^2.(100hPa)^{-1}$ . . . . .	79
4.64	Anomalia da conversão de energia potencial disponível da perturbação em energia cinética da perturbação do composto de La Niña em relação à climatologia (a) e em relação ao composto de anos neutros (b) vista em cada nível de pressão entre janeiro do ano 0 e dezembro do ano 0+1. As unidades são em $W.m^2.(100hPa)^{-1}$ . . . . .	79



*Dedico aos meus pais.*

# Agradecimentos

Agradeço a Deus por todas as coisas pois tem me ajudado mesmo que eu não mereça.

Agradeço aos meus pais por todo amor e paciência. Pela educação que tive e todos os esforços para que eu me torna-se o ser humano que sou e gosto de ser. Por terem moldado meu caráter de uma forma tão linda que só não os amo mais porque sou só uma.

A todos os Professores que fizeram parte deste ciclo, pelo incentivo, entusiasmo, paciência e todo conhecimento transferido. Em especial ao Professor José Augusto P. Veiga - pelo bom conselho e pela boa vontade de me orientar neste trabalho.

Aos meus queridos amigos Yara Santos, André Aranha e Igor Oliveira, não tenho nem palavras para agradecer o carinho, a união, a parceria, o companheirismo, por todo esse tempo que passamos juntos, por terem tornado essa etapa da minha vida muito melhor do que eu imagina. Agradeço por tudo.

Agradeço também a José Crisanto Neto, Diogo Santos, Erick Lorenzato, Keylly Eyglys dos Santos e Argus Halley da Rocha, que mesmo longe continuaram desempenhando na minha vida o papel de sempre, agradeço sinceramente a amizade sem tamanho, o apoio e a paciência. Por nunca terem deixado de acreditar mim, mesmo quando eu não acreditava.

A todos os meus colegas da sala B9 - EST/UEA.

Ao PPG-Cliamb INPA/UEA pela oportunidade.

À CAPES pelo apoio financeiro.

*"Só quem se mostra se encontra por mais que se perca no caminho."*

*Cazuza*

# Resumo

O objetivo principal do trabalho foi quantificar o impacto de eventos tipo El Niño-Oscilação Sul (ENOS) sobre a energética global utilizando o conjunto de reanálises do NCEP/NCAR. Os impactos foram avaliados, para o período de 1979 a 2011, através de comparações entre os componentes da energética de Lorenz para os compostos de El Niño/La Niña versus campos climatológicos e neutros. As análises da energética de Lorenz foram divididas em avaliação do ciclo de Lorenz (diagramas de energia), do comportamento temporal do ciclo de energia e do campo bi-dimensional dos componentes do ciclo energético de Lorenz. Em síntese, foi observado que o reservatório de energia potencial zonal possui os maiores (menores) valores nos eventos tipo El Niño (La Niña). Em contrapartida, os valores do reservatório de Pe ficam abaixo dos valores da climatologia durante os períodos de El Niño e o contrário acontece nos períodos de La Niña. Os eventos tipo El Niño também fortalecem a energia cinética zonal proporcionando aceleração do escoamento zonal, e em épocas de La Niña o contrário é observado, ou seja, a energia cinética do estado básico enfraquece. Porém nenhuma relação de oposição foi encontrada entre os dois tipos de eventos ENOS e o reservatório de energia cinética do estado perturbado, onde ambos foram enfraquecidos, apesar de que em períodos de La Niña tenham sido observados os menores valores. Da análise das variações temporais dos termos de energia de Lorenz pode-se extrair que primeiramente os eventos ENOS alteram a energia potencial, durante o início do evento, e depois o efeito sobre a energia cinética zonal é sentido do meio para o final do evento. Durante o El Niño a energia potencial do estado básico é utilizada em maior fração na produção de energia cinética zonal do que na produção de energia potencial do distúrbio, enfraquecendo o outro ramo baroclínico de conversões e conseqüentemente reduzindo a produção de energia cinética das perturbações. Durante La Niña a conversão entre as formas zonais de energia potencial disponível e energia cinética é enfraquecida, mas não o suficiente para verificar uma intensificação nas outras conversões baroclínicas, levando também a um enfraquecimento da energia cinética das perturbações dentro do período estudado.

# Abstract

The main purpose of this study was to quantify the impact of the El Niño - Southern Oscillation (ENSO) events over the global energetics using the data from NCEP/NCAR. The impacts were assessed by comparing the components of the Lorenz's energy cycle for compounds of El Niño/La Niña events versus neutral and climatological fields. The energy analysis were divided into analysis of the Lorenz cycle trough energy diagrams, analysis of the temporal behaviour of the energy cycle components and a bi-dimensional energy analysis. In summary, we have observed that the zonal potential energy reservoir possesses the highest values in events El Niño type and that during events La Niña type the same reservoir is distinctly reduced. In contrast, values of  $Pe$  are smaller than climatology values during periods of El Niño and the reverse is observed during periods of La Niña. The results still suggest that El Niño events strengthen the zonal kinetic energy providing acceleration of zonal flow, and for La Niña compounds the opposite is observed, ie, the kinetic energy of the basic state is weakened. But no opposite relationship was found between the two types of ENSO events and the reservoir of kinetic energy of the disturbed state, wherein both were weakened, although periods of La Niña showing the lowest values. The analysis about temporal variations of the energy components of the Lorenz energy cycle show that ENSO events firstly change the potential energy at the beginning of the event, and then the effect on the zonal kinetic energy is seen from the middle to the end. During El Nino the zonal potential energy is used in much part to produce zonal kinetic energy than in the production of eddy potential energy, weakening the other baroclinic branch conversions and thereby reducing the production of kinetic energy of the disturbances. During La Niña the conversion between zonal forms of available potential energy and kinetic energy was weakened, but not enough to verify an intensification in other baroclinic conversion, also leading to a weakening of the kinetic energy of the disturbance in this fase of ENSO.

# Capítulo 1

## Introdução, Justificativa e Objetivos

Os estudos sobre a energética da atmosfera envolvem o conhecimento a respeito das transformações de energia que ocorrem dentro da atmosfera planetária. De acordo com Lorenz (1955), existe transformação de energia solar em energia interna (relacionada a temperatura) e potencial (relacionada a altura geopotencial e a gravidade), a qual pode ser considerada como sendo uma única forma de energia, a energia potencial total. Todavia, a energia potencial total, por sua vez, não pode ser totalmente convertida em energia cinética uma vez que existe um limite para a ocorrência de tal transformação, isto é, existe uma parcela de energia que não se altera que é conhecida como energia potencial do estado de referência, a qual é mínima e não disponível. A quantidade de energia disponível para conversão em outra forma de energia é conhecida como energia potencial disponível. De acordo com a formulação de Lorenz, as formas de energia potencial disponível e energia cinética podem ser ainda divididas em estado básico e perturbações em relação ao estado básico. As quantidades energéticas representam o aspecto do comportamento atmosférico (em termos de geração e conversão de energia), e daí vem sua importância, pois a técnica permite calcular as mudanças relacionadas as intensidades das perturbações atmosféricas (em escala sinótica, sub-sinótica e escala planetária), durante um intervalo de tempo específico.

Existem diferentes técnicas que podem ser utilizadas para calcular essas mudanças de intensidade, por exemplo: existe a análise no domínio espectral que é um método que analisa séries temporais (Saltzman, 1957). Essas análises podem ser feitas utilizando as transformadas de Fourier ou as transformadas de ondaletas (wavelets). Na transformada de Fourier da série temporal a função que se utiliza é baseada na consideração de que o sinal do fenômeno é periódico como o caso das funções seno e cosseno. Nas transformadas de ondaletas a função protótipo (ondaleta mãe) é composta de uma combinação linear de funções básicas e isso permite analisar os dados tanto com relação à frequência como em relação ao tempo, com a resolução de cada componente amarrada à sua escala. E essa é a principal diferença entre os dois tipos de tratamento. Na análise de Fourier,

se o sinal não for periódico, quando a transformada é feita nele automaticamente a localização espacial é perdida (Torrence e Compo, 1998). Existem também os domínios espacial (Lorenz, 1955; Marques, 2010; Veiga et al., 2013), temporal (Oort, 1964) e misto (Oort, 1964; Deckers e von Storch, 2010 ; Deckers e von Storch, 2011; Deckers e von Storch, 2012; Kim e Kim, 2013). O uso da análise no domínio espacial fornece bons resultados quanto ao escoamento médio zonal e sobre as perturbações zonais, enquanto o domínio temporal pode fornecer informações sobre o escoamento médio temporal e sobre as perturbações transientes e o domínio misto dá informação de como o escoamento médio temporal-zonal e as perturbações transientes e estacionárias são mantidas. A escolha entre um deles depende de qual informação se pretende obter.

Silva (2010) estudou o ciclo energético para a América do Sul e Oceanos Adjacentes, utilizando o método espacial e de área limitada. A autora considerou vários sistemas convectivos de grande escala e as relações existentes entre os extremos de ENOS e os cálculos dos componentes do ciclo energético de Lorenz para os sistemas. Os resultados com respeito aos eventos ENOS indicaram que os picos de máxima de todas as componentes de energias da ZCIT (Zona de Convergência Inter-Tropical) e VCANs (Vórtice Ciclônico de Altos Níveis) coincidiram com períodos de EN e os picos de mínima coincidiram com períodos de LN ou de anos Normais. O que levou a conclusão de que em anos de EN a circulação da região da América do Sul tropical é mais intensa que em anos normais ou de La Niña.

Deckers e von Storch (2010), utilizando também a análise no domínio misto investigaram a resposta dinâmica da atmosfera para o aumento da concentração do gás do efeito estufa. Utilizaram como referência climática um experimento de controle contendo 100 anos com uma concentração de  $CO_2$  de 280 ppm e dividiram esse controle em dois grupos de 50 anos. Aumentaram em 3%, e por dez anos, a concentração de  $CO_2$  em ambos os grupos, no primeiro apenas nos anos pares e no segundo apenas nos ímpares. Nesse estudo encontraram um duplo papel do padrão de aquecimento caracterizado por um forte aquecimento na alta troposfera tropical e em baixos níveis de altas latitudes. Concluíram também que esse padrão causa um aumento de energia potencial média na alta troposfera (em torno de 36%) e uma diminuição na baixa troposfera (em torno de 12%) e isso é explicado pelo aumento da concentração de  $CO_2$  que leva a uma grande geração de energia potencial disponível na alta troposfera e uma redução da geração em baixa troposfera. O resultado de enfraquecimento da energética global na baixa troposfera obtido por eles é consistente com o de Boer (1995).

Deckers e von Storch (2011), seguindo a mesma linha de trabalho, utilizaram como experimento de controle os últimos 50 anos (de 505 anos) pré-revolução industrial com concentração de  $CO_2$  em 280 ppm e para realização da simulação adicionaram 1% dessa concentração de  $CO_2$  por ano nos últimos 50 anos, alcançando o dobro da concentração inicial em 70 anos e a mantendo constante pelos 150 anos seguintes. Com o objetivo de estudar o comportamento dual da atividade

energética relacionado ao aumento de concentração de  $CO_2$ , encontraram uma diminuição de 4% na atividade energética num ambiente de aquecimento global, resultado que é atribuído a redução do gradiente de temperatura equador-pólo e um contraste mais fraco de temperatura entre terra e o oceano, em altas latitudes, durante o inverno. O enfraquecimento verificado na baixa troposfera e fortalecimento na alta troposfera, tem a ver com o caminho de conversão  $P_m \rightarrow P_e \rightarrow K_e$ , sugerindo que em um ambiente de aquecimento global a maior parte da atividade energética tem origem nas perturbações transientes.

Em continuidade, Deckers e von Storch (2012), para aprofundar o estudo sobre a resposta dual da atmosfera ao aquecimento global e determinar o comportamento de dominância entre o gradiente de temperatura e a estabilidade estática utilizaram um experimento de controle com  $1 \times [CO_2]$  e mais outros três experimentos para comparação, o primeiro que envolvia o aquecimento total da alta e da baixa troposfera, o segundo forçado a aquecer apenas a alta troposfera e o terceiro para aquecer apenas as superfícies em altas latitudes. Verificaram um enfraquecimento da atividade energética em torno de 5% no primeiro experimento que é consistente com o trabalho de 2011, um enfraquecimento no segundo experimento em torno de 10% e um fortalecimento no terceiro em torno de 4%, concluindo que o padrão de aquecimento afeta a atividade energética principalmente devido à mudança da estabilidade estática. Ou seja, a alta troposfera tropical só aquece se a atividade energética é enfraquecida e as superfícies em altas latitudes só aquecem se a atividade energética é intensificada.

No trabalho de Kim e Kim (2013), a análise no domínio misto foi utilizada para calcular e comparar a atividade energética global a partir dos dados do NCEP R2 e MERRA, o mais recente conjunto de dados de reanálises da NASA, para um período de 30 anos (1979-2008) usando médias anuais de junho-julho-agosto e dezembro-janeiro-fevereiro. Observaram que apesar do conjunto de dados MERRA e NCEP R2 serem consistentes entre si, o primeiro apresentou magnitude maior da atividade energética do que o segundo. A discrepância em relação aos componentes de energia foi em torno de 5% e enquanto aos termos de conversão, em 16%. A diferença entre os dois conjuntos de dados foi maior em junho-julho-agosto do que em dezembro-janeiro-fevereiro, assim como foi maior no hemisfério sul do que no hemisfério norte.

Veiga et al. (2013), utilizando a energética de área limitada, analisaram o ciclo de energia em uma região dominada pela circulação de Walker e sua relação com os eventos ENOS fortes. Eles concluíram que para um composto de eventos EN a atmosfera tropical é caracterizada por: um aumento da energia potencial do estado básico, diminuição da energia potencial da perturbação e diminuição dos campos de energia cinética. Ambos fatores, produzem um enfraquecimento da circulação de Walker. Para o composto de LN, a atmosfera tropical apresenta um aumento dos campos de energia cinética, diferentemente da fase oposta.



Os trabalhos acima mostram que a energética é uma ferramenta bastante útil, versátil e robusta para propósito de estudos envolvendo dinâmica da atmosfera, e até verificação da consistência entre conjuntos de dados, de forma que a sua aplicação é bastante vasta. Neste contexto, o presente trabalho teve por objetivo utilizar a energética no domínio espacial para avaliar o impacto dos eventos ENOS sobre a energética global uma vez que os eventos ENOS são um fenômeno de interação oceano-atmosfera, associado a alterações dos padrões climatológicos de TSM (Temperatura da Superfície do Mar), temperaturas de águas subsuperficiais, ventos alísios e emissão de radiação de onda longa pelo oceano na região do Pacífico Equatorial. A ocorrência de El Niño eleva a temperatura na região dos Trópicos e com isso intensifica o gradiente meridional de temperatura, gerando um ganho na produção de energia potencial disponível do estado básico. Este aumento na produção, não permanece indefinidamente na atmosfera pois esta se torna mais instável, isto por sua vez induz uma intensificação nos distúrbios do escoamento zonal e na tentativa do ambiente voltar ao equilíbrio, a energia cinética das perturbações é cedida para o escoamento básico. O aumento de gradiente meridional de temperatura também intensifica a circulação de Hadley que é o principal mecanismo de transferência de energia para o escoamento zonal a partir da energia potencial do estado básico. Na ocorrência de La Niña existe uma redução no gradiente meridional térmico, que gera diminuição na energia potencial disponível.

Sendo assim espera-se que na ocorrência de El Niño exista um aumento nos modos zonais de geração de energia potencial disponível, energia potencial disponível e energia cinética, assim como uma intensificação nas conversões ligadas ao escoamento zonal, como também, exista uma redução na energia cinética das perturbações em favor da busca da estabilidade atmosférica. E para a ocorrência de La Niña espera-se efeitos contrários no ciclo energético da atmosfera. Até hoje ainda não existiam trabalhos de avaliação dos impactos de ENOS na dinâmica atmosférica global, e em vista disso foram propostos os objetivos descritos na próxima secção.

## **1.1 Objetivos**

### **1.1.1 Objetivos Gerais**

O objetivo geral do presente trabalho é quantificar energia potencial, energia cinética, termos de geração e conversão de energia para os modos do estado básico e das perturbações para compostos de El Niño e La Niña no domínio global utilizando-se a energética no domínio espacial.

### **1.1.2 Objetivos Específicos**

1. Calcular a energética global para o período de 1979 a 2011 de forma a obter climatologia anual e sazonal;
2. Calcular a energética global para compostos dos cinco eventos de La Niña mais intensas que ocorreram no período de 1979 a 2011;
3. Calcular a energética global para compostos dos cinco eventos de El Niño mais intensos que ocorreram no período de 1979 a 2011;
4. Calcular a energética global para anos neutros;
5. Quantificar o impacto dos compostos de El Niño e La Niña na energética atmosférica.

O texto foi organizado da seguinte maneira: no capítulo dois os principais conceitos são revisados, no capítulo três são apresentados os dados utilizados para estudo e a metodologia utilizada, no capítulo quatro são apresentados os resultados e discussão dos mesmos. Por fim, no capítulo cinco são apresentadas as conclusões deste trabalho.

# Capítulo 2

## Revisão Bibliográfica

### 2.1 Circulação Geral da Atmosfera

Devido aos padrões espaciais e temporais dos campos de vento, temperatura, umidade entre outras variáveis meteorológicas, a atmosfera está sempre em movimento (Holton, 2004). Movimentos atmosféricos são induzidos por processos tanto térmicos quanto mecânicos ou pela combinação de ambos, ocorrendo nas diferentes escalas espaço-temporais e sempre havendo transformação de energia (Ayoade, 1996; Varejão-Silva, 2006). A fonte de energia primária é a radiação solar, que devido à sua incidência angular diferencial gera aquecimento terrestre de mesmo gênero. Sendo assim, as temperaturas mais altas são encontradas nos trópicos, que com insolação praticamente constante durante todo o ano apresenta um pequeno gradiente horizontal de temperatura. As temperaturas mais baixas são encontradas nos pólos onde a insolação anual é mínima. Portanto, existe um forte gradiente de temperatura no sentido equador-pólo que produz os movimentos na atmosfera.

Em termos de variação com a altura, na baixa e na média troposfera o forte gradiente de temperatura equador-pólo é encontrado nas latitudes médias. A temperatura diminui com a altura e reverte o comportamento na baixa estratosfera. Próximo ao equador a diferença de temperatura entre a superfície e a tropopausa fica em torno de 105 K, na baixa estratosfera a temperatura tem um leve aumento nas latitudes médias e se torna praticamente constante nas regiões polares (Wallace e Hobbs, 2006). Assim, a atmosfera atua como um veículo de transporte de calor em direção aos pólos e para cima, podendo ser considerada como uma máquina térmica que em geral transporta o calor da fonte quente para o sumidouro frio. O trabalho realizado pela atmosfera é para manter a energia cinética da circulação contra a constante dissipação da mesma devido às forças dissipativas (Peixoto e Oort, 1992). Em uma atmosfera sem gradientes de temperatura a capacidade de geração de energia cinética, para compensar o que é constantemente dissipado, não existiria porque o

mecanismo para a conversão de energia não estaria presente (Lorenz, 1966).

### 2.1.1 Células de Circulação

Existem certas regularidades nos movimentos atmosféricos, das quais podemos citar: no sentido meridional as circulações térmicas diretas (células de Hadley) e indiretas (células de Ferrel) e no sentido zonal a célula de Walker, que dentre muitas é dominante em escala espacial.

O modelo de circulação proposto por Rossby demonstra que a pressão à superfície se distribui zonalmente entre faixas alternadas de baixas e de altas pressões que são simétricas em relação ao equador, com áreas de altas pressões nas regiões polares. Associado a isso existem células de circulação meridional, três em cada hemisfério, das quais uma célula de circulação direta que se encontra na região tropical, onde ramos ascendentes no equador transportam o ar quente e os ramos descendentes, em torno dos  $30^\circ$ , o ar frio e a célula indireta localizada na região de médias latitudes onde o ramo subsidente em  $30^\circ$  carrega o ar menos frio e o ramo ascendente em  $60^\circ$ , o ar mais frio e finalizando com uma terceira célula encontrada na região polar. Todas essas circulações atuam na troposfera e o limite superior é a tropopausa. Na região dos trópicos, além da circulação direta (Hadley) existe também a circulação de Walker do Pacífico que são ramos zonais no sentido leste-oeste e que está relacionada à variação da pressão atmosférica entre as regiões leste e oeste do Pacífico (Oscilação Sul) o que gera uma circulação zonal na região equatorial e que é afetada pelas anomalias na TSM do Pacífico e do Atlântico. A Oscilação Sul é caracterizada por uma gangorra barométrica no Pacífico Equatorial, que apresenta um sistema de baixa pressão na região de Tahiti e um sistema de alta pressão na região de Darwin. Na fase positiva da Oscilação Sul ambos sistemas de pressão são fortalecidos, isto é, na região do Tahiti a baixa pressão apresenta-se mais baixa do que o normal e na região de Darwin a alta pressão é mais alta do que o normal. Na fase negativa verifica-se um comportamento oposto, com enfraquecimento de ambos sistemas de pressão.

De acordo com Berjeknes (1969) o enfraquecimento ou o fortalecimento da circulação de Walker está associado com as variações de TSM. Se os ventos alísios em baixos níveis estiverem enfraquecidos nas porções leste e central do Pacífico, então a TSM dessa região aumentará levando a uma diminuição do gradiente de temperatura, enfraquecendo a circulação de Walker (Feedback positivo de Berjeknes). Não sendo possível determinar qual acontece primeiro, se a atmosfera que dispara alterações no oceano ou se o oceano que dispara alterações na atmosfera. Por outro lado, se ocorre fortalecimento dos ventos alísios em baixos níveis, a TSM no leste do Pacífico Equatorial diminui, o que leva a um aumento do gradiente de temperatura e intensifica a circulação de Walker (Kousky 1984). Por outro lado, Chervin e Druyan (1984, apud Stone e Chervin 1984), empregaram o modelo de circulação da atmosfera para avaliar as mudanças no comportamento

espacial da circulação de Walker sob diferentes gradientes de TSM zonais e mostrou que quando o gradiente zonal de TSM está completamente ausente o padrão espacial da circulação de Walker é notadamente perturbado. Seus resultados sugerem que o gradiente zonal de TSM é importante para modular espacialmente a circulação de Walker, mas não para dirigi-lo. Em resumo, a atmosfera influencia o oceano através das anomalias de tensão de cisalhamento do vento enquanto que o oceano influencia a atmosfera com anomalias de TSM em associação com o fluxo de calor sensível e latente. Quando ocorre mudanças no gradiente de pressão sobre o Pacífico Equatorial observa-se alteração no campo de vento e na TSM, que são um dos principais fatores para a ocorrência de ENOS.

A hipótese de Berjeknes sobre o feedback positivo explica adequadamente o surgimento de um evento ENOS quente ou frio, mas não explica a transição entre os dois e porque os eventos persistem entre 12 e 18 meses em média. Nos anos 1960 já se sabia que as Ondas de Kelvin (movimento para leste) e Rossby Oceânicas (movimento para oeste) possuíam papéis fundamentais na explicação física da ocorrência de ENOS por transportarem energia e momentum obtidos a partir do cisalhamento do vento. Mas apenas nos anos 1980 a teoria do Oscilador Retardado, que serviria como um contra-balanço para o Feedback Positivo de Berjeknes começaria a ser aceita. A teoria do Oscilador Retardado explica que a onda de Kelvin (movendo-se para leste no equador) aprofunda a camada quente mais superficial do oceano, enquanto a onda de Rossby (movendo-se para oeste e fora do equador) torna a camada superficial mais rasa. As ondas de Kelvin levam cerca de 70 dias para atravessar o Pacífico, enquanto que as ondas de Rossby levam três vezes mais tempo (210 dias). As ondas de Kelvin quando alcançam o contorno leste são refletidas para oeste como uma onda de Rossby, quando as ondas de Rossby alcançam o contorno à oeste do Pacífico, são refletidas como ondas de Kelvin. As reflexões das ondas começam a atuar no sentido de que as águas mais quentes sejam transportadas para oeste e águas frias para leste. Quando combina-se o Feedback Positivo de ventos alísios, TSM e convecção com a Teoria do Oscilador Retardado é possível reproduzir ciclos de 3-5 anos de ENOS, que é compatível com observações. É atualmente a teoria mais aceita (Andreoli, 2010).

Para a atmosfera tropical, durante o El Niño, verifica-se um aumento da energia potencial disponível zonal, diminuição da energia potencial disponível da perturbação e diminuição dos campos de energia cinética, levando um enfraquecimento da circulação de Walker. Durante a La Niña, a atmosfera tropical apresenta um aumento dos campos de energia cinética, diferentemente da fase oposta. No entanto, a energia potencial disponível na circulação de Walker também é reduzida nesta fase (Veiga et al., 2013).

## 2.2 Energética da Atmosfera

Os primeiros estudos sobre energética da atmosfera foram realizados por Margules que considerando um sistema fechado, no qual a energia total permanecia constante, mostrou como o rearranjo de massas de ar de diferentes densidades passando de uma situação gravitacionalmente instável para outra estável produzia uma certa quantidade de energia cinética (Margules, 1903 apud Dias Pinto, 2010). Todo o estudo subsequente a partir dessas ideias iniciaram através de Edward N. Lorenz quem definiu o conceito de energia potencial disponível, o comportamento desse tipo de energia ao longo do ciclo de transformações e todo conjunto de equações que governam este ciclo.

Existem pelo menos três diferentes formas de se analisar o ciclo de energia, o chamado ciclo de energia de Lorenz (CEL). Por exemplo, pode-se utilizar o diagrama com duas, quatro ou seis caixas de reservatórios (Lorenz, 1955; Oort, 1964; Peixoto e Oort 1974; Boer, 1995; Deckers e vonStorch, 2010; Deckers e vonStorch, 2011; Deckers e vonStorch, 2012 e Kim e Kim, 2013), dependendo do objetivo do trabalho. Nos parágrafos subsequentes serão apresentadas principais características de cada um desses diagramas.

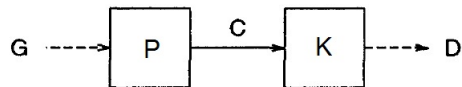
Sabe-se que a energia potencial é a energia que os corpos tem quando estão a uma certa altura. Energia potencial total é soma a energia potencial adicionada da energia interna da atmosfera. A energia interna é associada a processos diabáticos, como por exemplo o aquecimento da atmosfera através da radiação solar, e também através da condensação de vapor de água na atmosfera. De certo que o calor latente também é uma forma de energia interna, porém, se assim for considerado o mesmo seria tratado como uma forma de geração adiabática de energia interna (porque o vapor de água está presente na atmosfera), já que aconteceria dentro do sistema (atmosfera-terra-oceano). Todavia, a estimativa dessa energia latente dependeria do conhecimento das regiões que ela poderia ou não ser liberada, o que a deixaria suscetível a erros humanos. A consideração da energia latente como uma fonte externa de calor não só é mais viável, como também não introduz nenhum resultado incorreto (Lorenz, 1978).

O conceito de energia potencial disponível é fundamentado no princípio de conservação de massa e a idealização de fluxos. Sob esta condição, a soma da energia interna, potencial e cinética é uma constante (sob um fluxo adiabático) e por isso o estado da atmosfera que possui o mínimo de energia potencial, terá portanto, um máximo de energia cinética. Em uma atmosfera hidrostática horizontalmente estratificada a energia potencial total é máxima (A energia potencial disponível é zero). Mas não pode converter nenhuma parte em energia cinética se nenhum rearranjo de massa for feito (para "criar" energia potencial disponível). Para que exista conversão de energia potencial disponível em cinética é necessário que seja adicionado ou removido, diferencialmente, calor da atmosfera, para que o gradiente de pressão resultante, mesmo que pequeno, acelere os ventos, conduzindo a atmosfera a um novo estado de equilíbrio (Lorenz, 1967).

No equilíbrio hidrostático a energia potencial contida abaixo de uma coluna vertical é proporcional à energia interna na razão  $\frac{R}{c_v}$ , sendo R a constante do gás para o ar  $c_v$  o calor específico do ar a volume constante. Pelo fato delas aumentarem e diminuírem na mesma proporção, consideram-nas como um tipo único de energia, a conhecida energia potencial total.

Dentre todos os estados estatísticos da atmosfera existe um que possui a menor energia potencial total. Esse é o estado de referência, cuja energia potencial total, que é mínima também está indisponível para conversão. Qualquer outro estado em que a energia potencial total não seja mínima vai apresentar uma diferença com relação ao estado de referência. Essa diferença é chamada de energia potencial disponível. Em geral, o estado de referência não pode ser alcançado de modo que a energia potencial disponível é um limite superior e não inferior de energia disponível para conversão em energia cinética, do que implica dizer que nem toda a energia potencial disponível está realmente disponível para conversão. Segundo Lorenz (1955), apenas  $\frac{1}{200}$  da energia potencial total está disponível e somente 10% da energia potencial disponível pode ser realmente convertida em energia cinética.

Após Lorenz ter derivado as equações para quantificar o ciclo de energia para toda a atmosfera, muitos estudos tem sido realizados para quantificar e entender os processos dinâmicos que envolvem energética da atmosfera utilizando diferentes métodos de análise. Começando pela representação mais básica, tem-se o diagrama de duas caixas (Figura 2.1) é o mais simples para representação do ciclo de energia de Lorenz, sendo G a taxa de geração de energia potencial disponível (P), C é a taxa de conversão de energia potencial disponível em energia cinética (K) e D a taxa de dissipação.



**Figura 2.1:** Diagrama de dois reservatórios de energia conectados através de um termo de conversão.

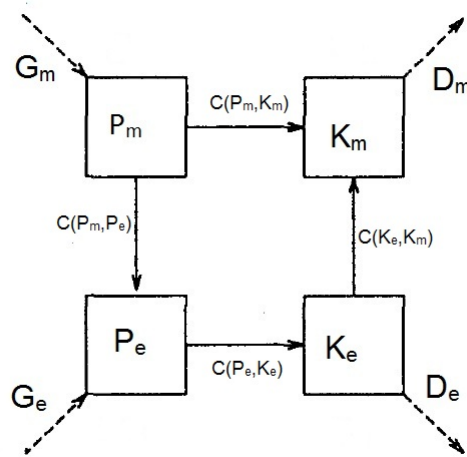
$$\frac{\partial P}{\partial t} = -C(P, K) + G \quad (2.1)$$

$$\frac{\partial K}{\partial t} = C(P, K) - D \quad (2.2)$$

As Equações 2.1 e 2.2 representam o diagrama de dois reservatórios (Figura 2.1). A taxa de variação local de P é função da conversão de energia potencial em cinética e da geração de energia potencial. Como a conversão de energia potencial em cinética produz uma diminuição na quantidade P, então este termo de conversão é negativo na taxa de variação de P. Porém, o mesmo termo de conversão é positivo na taxa de variação de K, onde existe conversão de energia potencial em cinética. A taxa de variação de K também depende da medida com que esta é dissipada, e como

representa uma diminuição na quantidade de  $K$ , é um termo negativo. Segundo Lorenz (1955),  $\frac{\partial(P+K)}{\partial t} = 0$ , isto é, a quantidade  $(P+K)$  é conservada para processos adiabáticos.

No diagrama de quatro caixas, Figura 3.1, tanto a energia potencial disponível como a energia cinética são subdivididas em dois tipos: energia zonal e energia perturbada. Energia cinética zonal média é a quantidade de energia cinética que existiria se não houvesse uma componente de perturbação que é o excesso de energia cinética em relação à média zonal. Energia potencial disponível zonal média é a quantidade de energia potencial que existiria se não houvesse uma componente de perturbação que é o excesso de energia potencial disponível em relação à média zonal (Lorenz 1967).



**Figura 2.2:** Diagrama de quatro reservatórios de energia conectados por quatro termos de conversão.

Na Figura 3.1, os quatro reservatórios correspondem a cada componente e as setas representam a direção que se dão os processos de geração, conversão ou dissipação.  $P_m$  representa a energia potencial disponível média zonal,  $P_e$  a energia potencial disponível da perturbação,  $K_m$  a energia cinética média zonal e  $K_e$  a energia cinética da perturbação. O termo  $G_m$  é a taxa de geração de energia potencial disponível do estado básico devido ao saldo de aquecimento em baixas latitudes e do déficit de aquecimento em altas latitudes (aquecimento diferencial meridional). Menos claro é o sinal da taxa de geração de energia potencial disponível da perturbação, o termo  $G_e$ , que apresenta presumivelmente um valor positivo e que ocorre quando em um mesmo círculo de latitude existe massa de ar frio sendo resfriada e massa de ar quente sendo aquecida (aquecimento diferencial zonal), ou seja, uma correlação entre temperatura potencial e aquecimento com respeito aos círculos de latitudes.  $C(P_m, P_e)$ ,  $C(P_m, K_m)$ ,  $C(P_e, K_e)$  e  $C(K_e, K_m)$  são as taxas de conversão e indicam a transformação que acontece do primeiro para o segundo componente entre parênteses. Os termos  $C(P_m, P_e)$  depende do transporte meridional de calor sensível e do gradiente meridional de temperatura média zonal.  $C(P_m, P_e)$  envolve o transporte turbulento de calor sensível na horizontal e na



vertical através do gradiente de temperatura.  $C(P_m, K_m)$  reflete o crescimento de  $K_m$  à custa de  $P_m$  quando existe ar quente subindo e ar frio descendo, latitudinalmente, processo observado em circulações médias meridionais como ocorre nas células de Hadley.  $C(P_m, K_m)$  envolve transporte de calor sensível pela circulação meridional afetando  $P_m$  e  $K_m$  porque altera a variação da média zonal da temperatura e do vento. Isto depende da covariância entre a média zonal da velocidade vertical ( $\omega$ ) e da temperatura (T), e reflete no crescimento de  $K_m$  e perda de  $P_m$  quando existe ar quente subindo e ar frio descendo na mesma latitude. Na conversão  $C(P_e, K_e)$  ocorrem processos similares a  $C(P_m, K_m)$  com respeito a perturbação. O termo  $C(P_e, K_e)$  depende da covariância entre a velocidade vertical e a temperatura. De acordo com esta conversão, o termo  $K_e$  aumenta às custas de  $P_e$ , quando o ar quente sobe e o ar frio desce, longitudinalmente.  $C(P_e, K_e)$  envolve o transporte turbulento de calor sensível na vertical, cujos valores são independente da latitude. Isto afeta  $P_e$  e  $K_e$  alterando a diferença de temperatura e vento nos círculos de latitude.  $C(K_e, K_m)$  representa a conversão de energia através de processos barotrópicos, o qual está relacionado com o transporte de momento angular horizontal e vertical.

$$\frac{\partial P_m}{\partial t} = -C(P_m, P_e) - C(P_m, K_m) + G_m \quad (2.3)$$

$$\frac{\partial P_e}{\partial t} = C(P_m, P_e) - C(P_e, K_e) + G_e \quad (2.4)$$

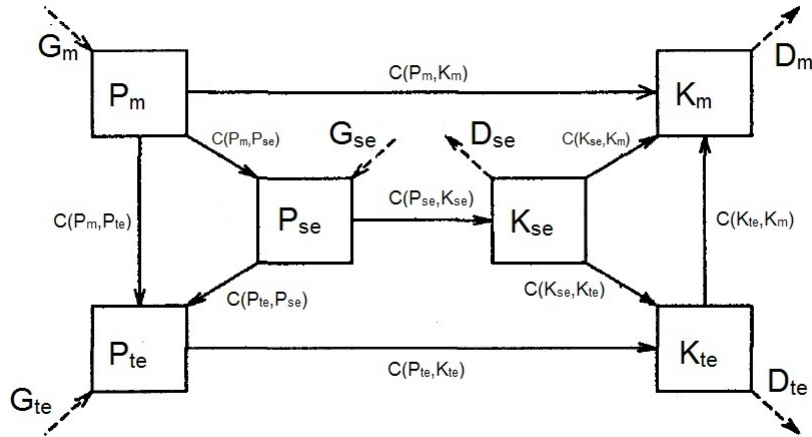
$$\frac{\partial K_m}{\partial t} = C(K_e, K_m) + C(P_m, K_m) - D_m \quad (2.5)$$

$$\frac{\partial K_e}{\partial t} = C(P_e, K_e) - C(K_e, K_m) - D_e \quad (2.6)$$

As Equações 2.3 a 2.6 representam os processos de conversão envolvidos no diagrama de quatro reservatórios, Figura 3.1. Nas equações de balanço observa-se que cada umas das quantidades  $C(P_m, K_m)$ ,  $C(P_e, K_e)$ ,  $C(K_e, K_m)$  e  $C(P_m, P_e)$  ocorrem duas vezes e com sinais opostos.

As componentes de perturbação podem ser subdivididas em mais dois grupos: perturbação estacionária e perturbação transiente. Na Figura 2.3 as setas de conversão indicam como estes componentes se relacionam com os outros reservatórios. Os componentes de perturbação estacionária descrevem desvios do campo de média zonal que é persistente no tempo e os componentes de perturbação transiente descrevem desvios do campo da média de tempo (Deckers e vonStorch 2011).

As atividades das perturbações são dominadas pelas perturbações transientes:  $P_{te}$  é três vezes maior que  $P_{se}$ , e  $K_{te}$  é sete vezes maior que  $K_{se}$ , razões similares foram encontradas em:  $C(P_m, P_{te})$ ,  $C(P_{te}, K_{te})$ ,  $C(K_{te}, K_m)$  e  $C(P_m, P_{se})$ ,  $C(P_{se}, K_{se})$ ,  $C(P_{se}, K_m)$ , respectivamente (Deckers e vonS-



**Figura 2.3:** Diagrama de seis reservatórios de energia conectados por nove termos de conversão.

torch 2011). Ademais, as perturbações transientes contribuem com a maior parte da atividade energética (Peixoto e Oort 1974, Deckers e vonStorch 2011).

$$\frac{\partial P_m}{\partial t} = -C(P_m, P_{se}) - C(P_m, P_{te}) - C(P_m, K_m) + G_m \quad (2.7)$$

$$\frac{\partial P_{se}}{\partial t} = C(P_m, P_{se}) + C(P_{te}, P_{se}) - C(P_{se}, K_{se}) + G_{se} \quad (2.8)$$

$$\frac{\partial P_{te}}{\partial t} = C(P_m, P_{te}) - C(P_{te}, P_{se}) - C(P_{te}, K_{te}) + G_{te} \quad (2.9)$$

$$\frac{\partial K_m}{\partial t} = C(K_{se}, K_m) + C(K_{te}, K_m) - C(P_m, K_m) - D_m \quad (2.10)$$

$$\frac{\partial K_{se}}{\partial t} = C(P_{se}, K_{se}) - C(K_{se}, K_{te}) - C(K_{se}, K_m) - D_{se} \quad (2.11)$$

$$\frac{\partial K_{te}}{\partial t} = C(P_{te}, K_{te}) + C(K_{se}, K_{te}) - C(K_{te}, K_m) - D_{te} \quad (2.12)$$

As Equações 2.7 a 2.12 representam os processos de conversão envolvidos no diagrama de seis reservatórios, Figura 2.3.

# Capítulo 3

## Materiais e Métodos

### 3.1 Dados

Os dados utilizados neste trabalho são oriundos das reanálises-2 do NCEP/NCAR e referem-se a um período de 33 anos (1979 a 2011) retirados do NOAA - CIRES Climate Diagnostic Center, disponível em [http : /www.cpc.ncep.noaa.gov](http://www.cpc.ncep.noaa.gov). O projeto de reanálises teve início na década de 90 (Kalnay et al. 1996, Kistler et al. 2001) dando continuidade ao projeto do National Meteorological Center/Climate Data Assimilation - NMC/CDAS, cuja base de dados originou-se de uma ampla rede global de coleta de informações, incluindo estações de superfície, radiossondagens, satélites meteorológicos, entre outros. Esses dados correspondem à médias diárias e possuem resolução horizontal de  $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$  de latitude e longitude, contendo 12 níveis de superfícies isobárias (1000, 925, 850, 700, 600, 500, 400, 300, 250, 200, 150 e 100 hPa) para os valores de altura geopotencial ( $\Phi$ ), temperatura (T), componentes zonal (u) e meridional (v) do vetor velocidade do vento e omega ( $\omega = dp/dt$ ), componente vertical do vetor velocidade do vento em coordenadas de pressão.

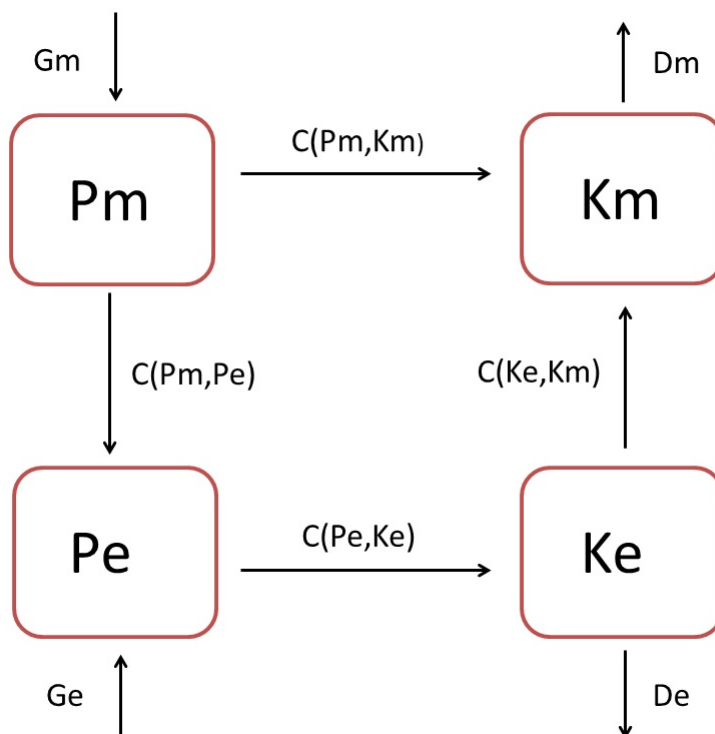
Os dados das variáveis são classificados em quatro tipos. Os dados de tipo A possuem forte influência observacional e por isso representam uma boa estimativa do estado atual da atmosfera, sendo considerados de alto grau de confiabilidade. Se encaixam nesse grupo os dados com respeito a temperatura (T), as componentes zonal (u) e meridional (v) do vento horizontal. Os dados do tipo B são parcialmente influenciados pelas observações e fortemente influenciados por algumas características do modelo, ex: sua climatologia. Os dados referentes a altura geopotencial ( $\Phi$ ) e omega ( $\omega = dp/dt$ ) fazem parte desse grupo. Os dados do tipo C são variáveis que não sofrem influência das observações e são completamente obtidas das parametrizações do modelo (exemplo: fluxos de superfície). Todavia, representam perfeitamente as variabilidades interanuais quando comparadas à sistemas de observações independentes. E os de tipo D são variáveis provenientes da climatologia, não recebendo influência das parametrizações do modelo (exemplo: rugosidade

de uma superfície) (Kalnay et al., 1996 apud, Veiga, 2004). Neste trabalho não foram utilizados dados que pertençam ao grupo C ou D.

## 3.2 Metodologia

### 3.2.1 Equações de Lorenz no domínio espacial

Foi utilizado o diagrama de quatro reservatórios, Figura 3.1, que representa adequadamente a idéia do campo de movimento atmosférico como sendo um movimento médio zonal com perturbações sobrepostas a ele. Permitindo separar de forma mais clara os processos energéticos referentes às perturbações e ao escoamento básico, assim como às relações entre ambos. Conversão de componente zonal para de perturbação indica instabilidade e a conversão de componente de perturbação para componente zonal indica estabilidade atmosférica. Abaixo do diagrama de energia temos as equações de balanço, 3.1 a 3.4 que representam a taxa de produção de cada componente de energia. Os sinais de cada termo de conversão dependem de como uma forma de energia está aumentando ou diminuindo em favor de outra. Em geral a seta entrando recebe valor positivo e a seta saindo recebe valor negativo.



**Figura 3.1:** Diagrama de quatro reservatórios de energia conectados por quatro termos de conversão.

$$\frac{\partial P_m}{\partial t} = -C(P_m, P_e) - C(P_m, K_m) + G_m \quad (3.1)$$

$$\frac{\partial P_e}{\partial t} = C(P_m, P_e) - C(P_e, K_e) + G_e \quad (3.2)$$

$$\frac{\partial K_m}{\partial t} = C(K_e, K_m) - C(P_m, K_m) - D_m \quad (3.3)$$

$$\frac{\partial K_e}{\partial t} = C(P_e, K_e) - C(K_e, K_m) - D_e \quad (3.4)$$

Os termos  $G_m$  e  $G_e$  representam a taxa com que a energia potencial disponível é gerada no sistema.  $G_m$  é a taxa de geração de energia potencial zonal média e  $G_e$  é a taxa de geração de energia potencial do distúrbio, respectivamente. Os termos  $D_m$ , e  $D_e$  representam a taxa com que a energia cinética é dissipada no sistema.  $D_m$  é a taxa de dissipação de energia cinética zonal e  $D_e$  a taxa de dissipação da energia cinética perturbada, respectivamente. Cada um dos quatro reservatórios de energia (dois de energia potencial disponível e dois de energia cinética) são ligados entre si por termos de conversão que representam a taxa com que uma determinada componente é transformada em outra, são eles:  $C(P_m, P_e)$ ,  $C(P_m, K_m)$ ,  $C(P_e, K_e)$ ,  $C(K_e, K_m)$ .

$C(P_m, K_m)$  está relacionado com o transporte de calor através da circulação meridional, por exemplo células de Hadley e Ferrel, este termo de conversão depende da covariância entre as médias zonais da velocidade vertical e da temperatura.  $C(P_e, K_e)$  está relacionado ao transporte de calor por perturbação no sentido vertical (movimento do ar quente para cima e ar frio para baixo), estes termos dependem da covariância entre os desvios em relação à média zonal da velocidade vertical e da temperatura.  $C(P_m, P_e)$  depende do transporte meridional de calor por perturbação horizontal (ar quente do equador em direção aos pólos e ar frio dos pólos em direção ao equador).  $C(K_e, K_m)$  está relacionados aos transportes horizontais e verticais de momento angular. As equações supracitadas (3.1 a 3.4) descrevem os processos de transformação das energias potencial e cinética e suas relações com os termos de conversão, geração e dissipação.

Os termos de geração serão calculados como resíduo (Equações 3.5 e 3.6) e os demais termos serão integrados em 12 níveis de pressão, contados a partir da superfície.

$$G_m = C(P_m, K_m) + C(P_m, P_e) \quad (3.5)$$

$$G_e = C(P_e, K_e) - C(P_m, P_e) \quad (3.6)$$

A média anual da energética foi realizada para todo o globo aplicando o formalismo desenvolvido por Krishnamurti (1996) para as equações do ciclo de energia de Lorenz (1955), no domínio do espaço tempo.

A média zonal da variável  $X$  entre as longitudes  $\lambda_1$  e  $\lambda_2$  é dada por:

$$[X]_{\lambda} = \frac{1}{\lambda_2 - \lambda_1} \int_{p_1}^{p_2} X d\lambda \quad (3.7)$$

e o desvio da média zonal é dado por:

$$(X)_{\lambda} = X - [X]_{\lambda} \quad (3.8)$$

A média de  $X$  numa área cercada pelas longitudes  $\lambda_1$  e  $\lambda_2$  e latitudes  $\phi_1$  e  $\phi_2$  é dada por:

$$[X]_{\lambda\phi} = \frac{1}{\lambda_2 - \lambda_1} \frac{1}{\text{sen}\phi_2 - \text{sen}\phi_1} \int_{\phi_1}^{\phi_2} \int_{p_1}^{p_2} X \cos\phi \, d\lambda \, d\phi \quad (3.9)$$

E o desvio da média na área é dado por:

$$\left( [X]_{\lambda} \right)_{\phi} = [X]_{\lambda} - [X]_{\lambda\phi} \quad (3.10)$$

Os quatro termos de reservatórios de energia são dados por:

$$P_m = \int_{p_1}^{p_2} \frac{\left[ \left( [T]_{\lambda} \right)_{\phi}^2 \right]_{\lambda\phi}}{2[\sigma]_{\lambda\phi}} dp \quad (3.11)$$

Onde a Equação 3.11 representa a energia potencial disponível média.

$$P_e = \int_{p_1}^{p_2} \frac{\left[ (T)_{\lambda}^2 \right]_{\lambda\phi}}{2[\sigma]_{\lambda\phi}} dp \quad (3.12)$$

Onde a Equação 3.12 representa a energia potencial disponível da perturbação.

$$K_m = \int_{p_1}^{p_2} \frac{\left[ [u]_{\lambda}^2 + [v]_{\lambda}^2 \right]_{\lambda\phi}}{2g} dp \quad (3.13)$$

Onde a Equação 3.13 representa a energia cinética média.

$$K_e = \int_{p_1}^{p_2} \frac{\left[ (u)_\lambda^2 + (v)_\lambda^2 \right]_{\lambda\phi}}{2g} dp \quad (3.14)$$

Onde a Equação 3.14 representa a energia cinética da perturbação.

Os quatro termos conversão são dados por:

$$\begin{aligned} C(P_m, P_e) = & \int_{p_1}^{p_2} - \left[ \frac{(v)_\lambda (T)_\lambda}{2[\sigma]_{\lambda\phi} r} \frac{\partial([T]_\lambda)}{\partial\phi} \right]_{\lambda\phi} dp \\ & + \int_{p_1}^{p_2} - \left[ \frac{(\omega)_\lambda (T)_\lambda}{p^{R/c_p}} \frac{\partial([T]_\lambda)_\phi}{\partial p} \frac{p^{R/c_p}}{[\sigma]_{\lambda\phi}} \right]_{\lambda\phi} dp \end{aligned} \quad (3.15)$$

Onde a Equação 3.15 representa a conversão de energia potencial disponível média em energia potencial disponível da perturbação. O termo  $C(P_m, P_e)$  representa a conversão de energia potencial disponível do estado básico para a forma perturbada. Esta equação é escrita em termos do transporte de calor sensível, tanto meridionalmente como verticalmente associados a gradientes de temperatura meridional e vertical. Do ponto de vista físico, na baixa troposfera uma vez que a temperatura zonal média diminui em direção aos pólos os distúrbios ondulatórios que se desenvolvem transportam o ar mais quente para latitudes frias e o ar mais frio para latitudes quentes, reduzindo portanto os gradientes meridionais, e consequentemente reduzindo  $P_m$ . Como consequência desse transporte que não é zonalmente uniforme, diferenças de temperatura ao longo de um mesmo círculo de latitude serão criadas gerando, com isso,  $P_e$ .

$$\begin{aligned} C(K_e, K_m) = & \int_{p_1}^{p_2} \frac{1}{g} \left[ (v)_\lambda (u)_\lambda \frac{\cos\phi}{r} \frac{\partial([u]_\lambda)}{\partial\phi \cos\phi} \right]_{\lambda\phi} dp \\ & + \int_{p_1}^{p_2} \frac{1}{g} \left[ \frac{(v)_\lambda^2}{r} \frac{\partial[v]_\lambda}{\partial\phi} \right]_{\lambda\phi} dp \\ & + \int_{p_1}^{p_2} \frac{1}{g} \left[ [v]_\lambda (u)_\lambda^2 \frac{\tan\phi}{r} \right]_{\lambda\phi} dp \\ & - \int_{p_1}^{p_2} \frac{1}{g} \left[ (\omega)_\lambda (u)_\lambda \frac{\partial([u]_\lambda)}{\partial p} \right]_{\lambda\phi} dp \\ & + \int_{p_1}^{p_2} \frac{1}{g} \left[ (\omega)_\lambda (v)_\lambda \frac{\partial([v]_\lambda)}{\partial p} \right]_{\lambda\phi} dp \end{aligned} \quad (3.16)$$

Onde a Equação 3.16 representa a conversão de energia cinética média em energia cinética da perturbação. O termo  $C(K_e, K_m)$  indica a conversão entre energia cinética do distúrbio e energia

cinética do estado básico. Sua equação é escrita em função do transporte meridional e vertical de momento associado a perturbações zonais ao longo do gradiente meridional e vertical de vento zonal e também em função do transporte meridional e vertical de momento associado a perturbações meridionais ao longo do gradiente meridional e vertical de vento meridional. Quando  $C(K_e, K_m)$  é positivo indica que o transporte de momento associado com os distúrbios retorna energia cinética para o escoamento zonal médio. Quando negativo indica que as perturbações retiram energia cinética do escoamento zonal. Ou seja, os transportes de momento associados a essas perturbações atuam no sentido de aumentar sua própria energia cinética.

$$C(P_m, K_m) = \int_{p_1}^{p_2} - \left[ ([\omega]_\lambda)_\phi ([T]_\lambda)_\phi \right]_{\lambda\phi} \frac{R}{gp} dp \quad (3.17)$$

Onde a Equação 3.17 representa a conversão de energia potencial disponível média em energia cinética média. O termo  $C(P_m, K_m)$  representa a conversão entre as energias potencial disponível média e a cinética média através de movimentos ascendentes de ar quente e subsidentes de ar frio em diferentes latitudes. Esse processo indica correlação negativa entre as médias zonais de  $\omega$  e  $T$  e conseqüentemente  $C(P_m, K_m)$  positivo. Indicando ganho de energia cinética para o escoamento médio a partir da energia potencial disponível média através de uma circulação térmica direta.

$$C(P_e, K_e) = \int_{p_1}^{p_2} - \left[ (\omega)_\lambda (T)_\lambda \right]_{\lambda\phi} \frac{R}{gp} dp \quad (3.18)$$

Onde a Equação 3.18 representa a conversão de energia potencial disponível da perturbação em energia cinética da perturbação. O termo  $C(P_e, K_e)$  representa a conversão entre as formas do estado perturbado da energia potencial disponível e da energia cinética. Esta conversão representa os movimentos de ascendência de ar quente e subsidência de ar frio no plano vertical no mesmo círculo de latitude.

Onde  $p_1$  e  $p_2$  são, respectivamente, o máximo e mínimo limete de pressão,  $T$  é a temperatura,  $g$  é a módulo da aceleração da gravidade,  $r$  é o raio médio da Terra,  $u$  e  $v$  são os componentes zonais e meridionais do vetor vento, respectivamente e  $\sigma$  é o parâmetro de estabilidade estática dado por:

$$[\sigma]_{\lambda\phi} = \left[ \frac{gT}{c_p} - \frac{gp}{R} \frac{\partial T}{\partial p} \right]_{\lambda\phi} \quad (3.19)$$

As equações acima serão calculadas para toda a série de dados do período de estudo, levando-se

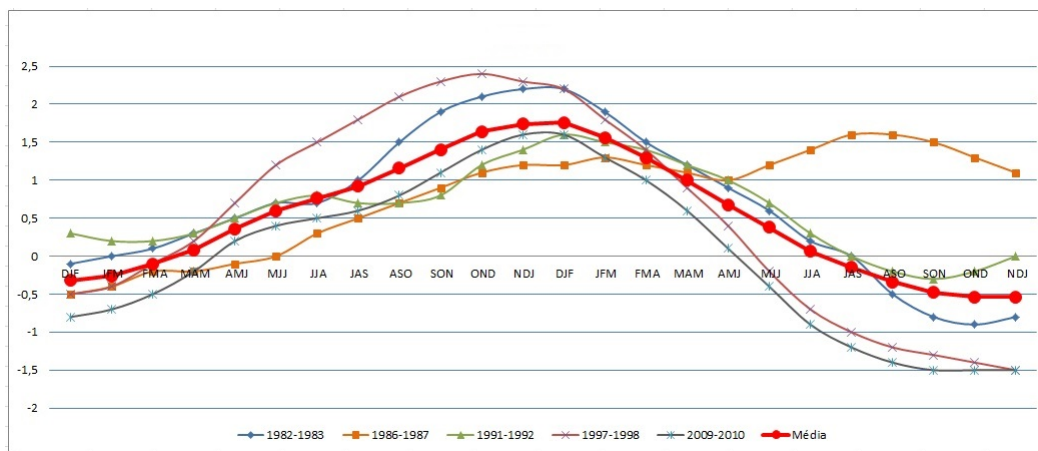


em consideração o domínio global. Porém as quantificações em termos de eventos ENSO levará em consideração compostos de El Niños e La Niñas fortes, assim como descrito na próxima seção.

### 3.2.2 Compostos de ENOS

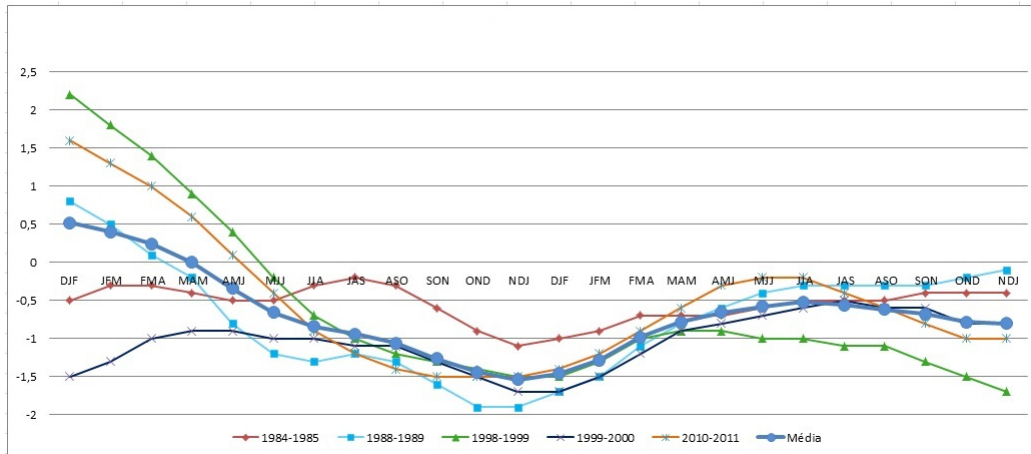
A partir dos dados de reanálise do NCEP foi calculado a energética atmosférica global e para estudar a mudança do ciclo energético para os anos de El Niño e La Niña. Foram utilizados como parâmetro os anos de El Niño e La Niña mais intensos dentro do período de estudo. Os eventos de EL Niño e La Niña utilizados nos compostos são apresentados nas Figuras 3.2 e 3.3, respectivamente.

A seleção dos cinco eventos do tipo El Niño, foi baseada no índice ONI (oceanic niño index) que classifica como episódio quente aquele em que a média de anomalias de TSM na região niño 3.4, para três meses consecutivos, mostra um aumento a partir de  $0,5^{\circ}\text{C}$  e permanece por pelo menos cinco temporadas (ex: ASO, SON, OND, NDJ, DJF). Os eventos selecionados foram os de: 1982-1983; 1986-1987; 1991-1992; 1997-1998 e 2009-2010. O composto (linha destacada em vermelho) foi feito realizando a média dos parâmetros atmosféricos dos cinco eventos. Após isso calculou-se a energética para esse composto e os nossos resultados foram obtidos a partir da alteração do ciclo de energia para o composto em comparação com a climatologia, e assim fornecendo argumentos para formular um quadro geral do comportamento da energética atmosférica para esse tipo de evento. O intervalo escolhido para estudar o impacto dos eventos tipo El Niño foi baseado no período em que TSM na região niño 3.4 permaneceu acima ou aproximadamente igual a  $1^{\circ}\text{C}$ . Resultando em um intervalo de nove meses entre agosto do ano zero e abril do ano seguinte.



**Figura 3.2:** Episódios de El Niño (1982-1983; 1986-1987; 1991-1992; 1997-1998; 2009-2010) e o composto formado pela média da TSM, baseado em um aumento de  $0,5^{\circ}\text{C}$  de TSM na região Niño 3.4 [31]

De maneira semelhante foi feita a seleção dos eventos tipo La Niña, o composto está aí representado pela linha mais grossa em azul e os eventos escolhidos foram os de: 1984-1985; 1988-1989;



**Figura 3.3:** Episódios de La Niña (1984-1985; 1988-1989; 1998-1999; 1999-2000; 2010-2011) e o composto formado pela média da TSM, baseado em uma diminuição de  $0,5^{\circ}\text{C}$  de TSM na região Niño 3.4. [31]

1998-1999; 1999-2000; 2010-2011. E os anos que não apresentaram eventos de La Niña e eventos de El Niño, de nenhuma intensidade, foram considerados anos neutros, como no caso dos anos 1979-1980, 1980-1981, 1989-1990, 1992-1993, 1996-1997, 2001-2002 e 2003-2004.

As médias calculadas para os componentes de energia do ciclo de Lorenz para o período de nove meses são observadas nas figuras dos diagramas de energia que serão apresentadas no próximo capítulo. Ao se verificar a inversão do sentido de conversão entre as formas de energia potencial disponível, mais dois intervalos foram avaliados para tentar entender este comportamento. São eles os intervalos entre julho do ano 0 e maio do ano 0+1 e junho do ano 0 e maio do ano 0+1.

# Capítulo 4

## Resultados e Discussão

### 4.1 Ciclo Energético Integrado no Volume Atmosférico

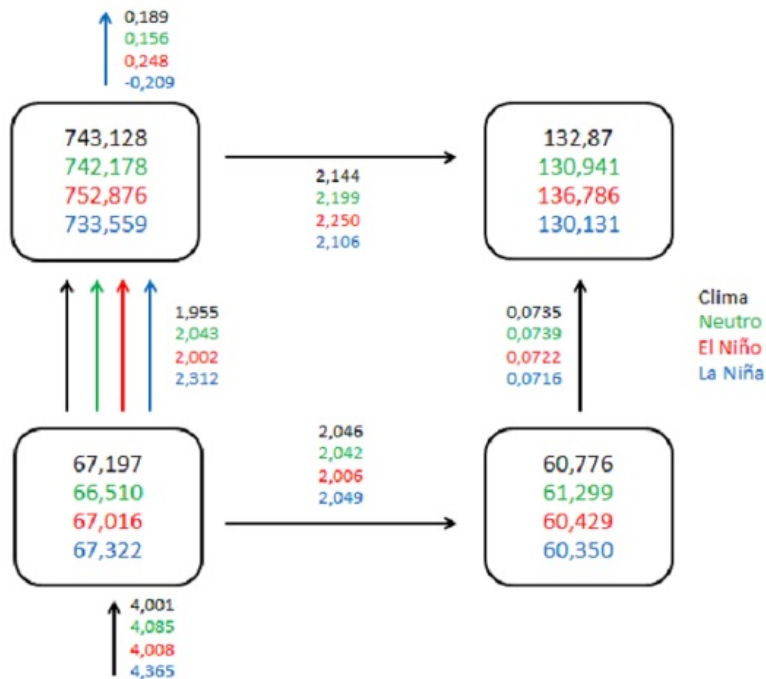
#### 4.1.1 Diagramas de Energia

O ciclo de energia de Lorenz integrado em todo o volume atmosférico para a climatologia, composto de El Niño, composto de La Niña e composto de anos neutros para o período de 1979 e 2011 com relação ao tempo é apresentado na Figura 4.1. Essa figura apresenta as médias de energia nos reservatórios, conversões e gerações de energia para o intervalo entre agosto do ano 0 e abril do ano 0+1.

A ocorrência de setas de conversão colorida indica qual dos grupos (climatologia, composto de anos neutros, composto de El Niño e composto de La Niña) teve seu sentido invertido. Ficando implícito que o grupo cuja seta não aparece seguiu o sentido de conversão convencional. O aparecimento de uma única seta na cor preta indica que todos os grupos seguiram o sentido convencional de conversão de energia. O sentido convencional das conversões é apresentado na Figura 3.1.

Na Figura 4.1, o termo de geração de energia potencial disponível zonal mostrou um aumento de 31,6% para o composto de El Niño em relação à climatologia e um aumento de 59,13% em relação aos anos neutros. Para o composto de La Niña, observa-se uma diminuição de 211,1% comparado à climatologia e uma redução de 243,44% comparada ao composto de anos neutros. O termo de geração de energia potencial disponível da perturbação apresentou um aumento de 0,16% para o composto de El Niño em relação à climatologia e uma diminuição de 1,9% em relação ao composto de anos neutros. Para o composto de La Niña, observa-se um aumento de 9,1% em relação à climatologia e um aumento de 6,8% em relação aos anos neutros.

O diagrama mostra para o reservatório de energia potencial disponível um aumento de 1,31% para



**Figura 4.1:** Ciclo da energética de Lorenz para a climatologia (preto), composto de El Niño (vermelho), composto de La Niña (azul) e composto de anos neutros (verde). Todos os valores representados correspondem ao intervalo de Agosto do ano 0 a Abril do ano 0 + 1. As unidades são em  $10^5 J.m^2$  para os componentes de energia e  $W.m^2$  para os termos de conversão.

o composto de El Niño em relação à climatologia e uma diminuição de 1,29% para os compostos de La Niña. Com relação aos anos neutros o composto de El Niño apresenta um aumento de 1,44% enquanto que o composto de La Niña, uma diminuição de 1,17%. Para o reservatório de energia potencial disponível da perturbação os compostos de El Niño e La Niña apresentaram aumento e diminuição menos significativos ainda do que no reservatório anterior. Cerca de diminuição de 0,27% (aumento de 0,76%) para o primeiro e aumento de 0,18% (aumento de 1,22%) para o segundo, quando comparado a climatologia (ao composto de anos neutros). No reservatório de energia cinética zonal verificou-se para o composto de El Niño um aumento de 2,9% (4,5%) comparado à climatologia (anos neutros). Para o composto de La Niña,  $K_m$  apresentou diminuição de 2,1% (0,62%) comparado à climatologia (anos neutros). O reservatório de energia cinética da perturbação também apresentou resultados pouco significativos. Os compostos de El Niño e La Niña apresentaram diminuição quando comparados à climatologia e anos neutros. Cerca de diminuição de 0,57% e 0,7% para El Niño e La Niña, respectivamente, quando comparados à Climatologia. E diminuição de 1,42% e 1,55% para El Niño e La Niña, respectivamente, quando comparados ao composto de anos neutros.

O termo de conversão  $C(P_m, P_e)$  apresentou uma aumento de 2,37% (diminuição de 2%) para os compostos de El Niño quando comparados à climatologia (composto de anos neutros) e apresentaram um aumento de 18% (13,3%) para compostos de La Niña quando comparados à climatologia

(composto de anos neutros). A conversão  $C(P_m, K_m)$ , para o composto de El Niño mostrou uma intensificação de 4,9% (2,3%) quando comparado à climatologia (anos neutros). Para o composto de La Niña ocorreu uma redução de 1,8% (4,2%), comparados à climatologia (anos neutros). No termo  $C(P_e, K_e)$ , para os compostos de El Niño, observou-se uma diminuição de 1,9% comparado à climatologia e diminuição de 1,7% quando comparado ao composto de anos neutros. Já para o composto de La Niña, verificou-se um aumento de 0,18% em relação à climatologia e aumento de 0,37% comparado aos anos neutros. O último termo de conversão  $C(K_e, K_m)$  apresentou diminuição de 1,7% (2,25%) para o composto de El Niño em relação à climatologia (anos neutros) e para o composto de La Niña, uma diminuição de 2,6% (3,2%) em relação à climatologia (ao composto de anos neutros).

Como pode ser visto, não há grande fortalecimento ou enfraquecimento, no que diz respeito às relações percentuais, para os termos de energia do ciclo de Lorenz. Isto pode estar associado ao fato de ser uma integração do volume atmosférico para todo o globo, e por isso regiões com atividade energética mais acentuadas tenham sido balanceadas por regiões onde a atividade energética foi menos intensa. Apesar de estes eventos provocarem alterações no clima global, seu desencadeamento está localizado na região tropical, devido às anomalias da TSM que influenciam no regime de ventos à superfície do mar e na posição dos ramos ascendentes e descendentes da circulação de Walker ao longo do cinturão equatorial. A diferença de porcentagem, principalmente com respeito aos termos de conversão, quando se compara os compostos de El Niño e La Niña com a climatologia e os compostos de anos neutros, pode estar relacionado ao fato de que nos compostos de anos neutros são considerados apenas anos em que não ocorreram nenhuma das fases do ENOS.

Os principais resultados estão relacionados ao ramo de conversões, que envolvem  $P_m$ ,  $K_m$ , e  $K_e$ .  $K_m$  apresentou fortalecimento para eventos tipo El Niño. Como sabemos este termo é abastecido tanto por parte da energia das perturbações como por parte da energia potencial do estado básico. A conversão que abastece o escoamento básico a partir de energia potencial disponível também apresentou fortalecimento para o composto de El Niño, já a conversão que abastece o escoamento básico a partir das perturbações apresentou enfraquecimento para os eventos de El Niño, indicando que o ganho de energia para o escoamento básico acontece a partir da energia potencial disponível, que também é fortalecida na fase quente do ENOS. Para o composto de La Niña,  $K_m$  apresentou enfraquecimento, assim como as duas conversões de abastecimento desse reservatório. Ou seja, para os casos de La Niña, a alteração na energia no escoamento básico deixa de ser causada apenas pela conversão a partir de energia potencial e passa a ser também causada pelo déficit na transferência de energia a partir das perturbações. Para os outros termos de conversão, relacionados ao ramo baroclínico não foi verificado nenhuma alteração muito relevante.

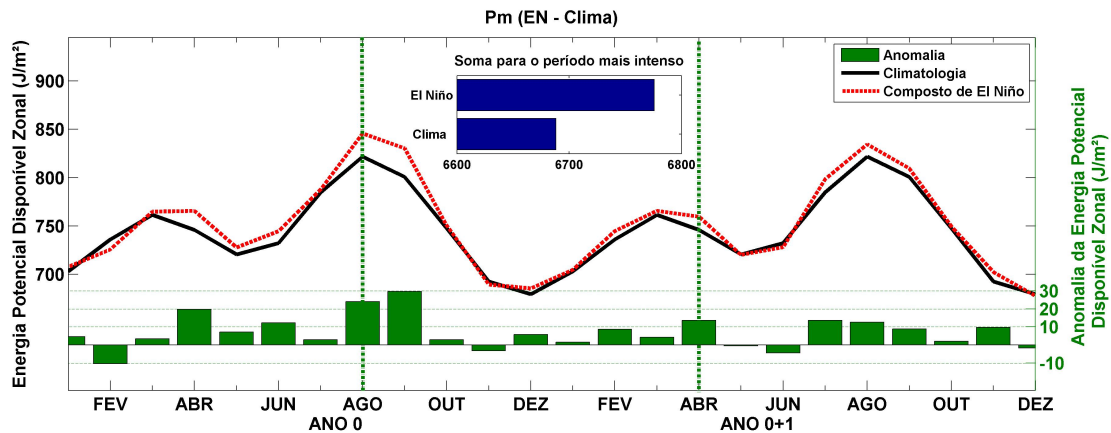
Tanto com relação à climatologia quanto com relação ao composto de anos neutros observou-se intensificação para a geração de energia potencial disponível zonal para os eventos do tipo El Niño

e enfraquecimento para os eventos do tipo La Niña. Já com respeito ao termo  $C(P_m, P_e)$ , não ficou claro como essa conversão se comporta. A inversão das setas, da climatologia e dos anos neutros, indica que entre agosto e abril o que predomina é a produção de energia potencial disponível zonal em detrimento da energia potencial disponível da perturbação. E que durante os eventos de El Niño e La Niña este comportamento se manteve. Entre agosto e abril, com relação aos anos neutros, a intensificação foi observada para os eventos do tipo La Niña e o enfraquecimento foi observado para os do tipo El Niño.

## 4.1.2 Comportamento do Ciclo Energético com relação aos eventos

As Figuras 4.2 a 4.41 apresentam a variação temporal de cada termo do ciclo de Lorez para compostos de El Niño e La Niña. Cada composto é comparado com a climatologia e compostos de anos neutros. Nestas figuras apresentam-se as anomalias para toda duração do evento, calculadas a partir da média mensal das quantidades de energia dos termos do ciclo de Lorenz.

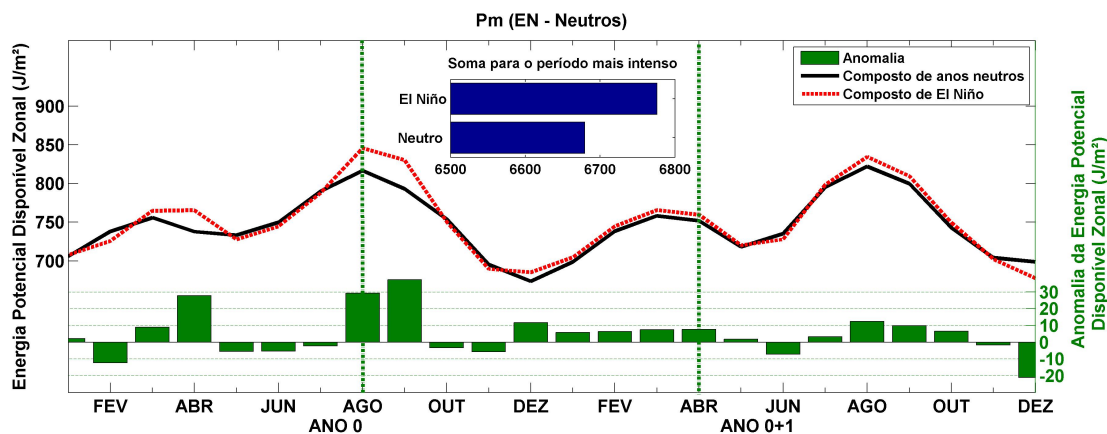
A partir das Figuras 4.2 e 4.3, verifica-se que a produção de  $P_m$ , entre agosto e abril, é intensificada em cerca de 1,31% em relação à climatologia (Figura 4.2) e 1,44% em relação aos anos neutros (Figura 4.3). Os maiores valores de anomalia correspondem ao sinal positivo, com predominância de anomalias durante maior parte do evento. Dentro do intervalo de agosto a abril nota-se um comportamento similar na distribuição do sinal de anomalias. Tanto em relação à climatologia como em relação aos anos neutros observam-se anomalias totais positivas (9,7 e 10,1, respectivamente). Estes resultados, então, sugerem que eventos tipo El Niño produzem aumento na produção de  $P_m$  globalmente, que por sua vez estão associados a intensificação do gradiente meridional de temperatura. Os resultados ainda mostram que a maior produção de  $P_m$  ocorre em relação aos anos neutros.



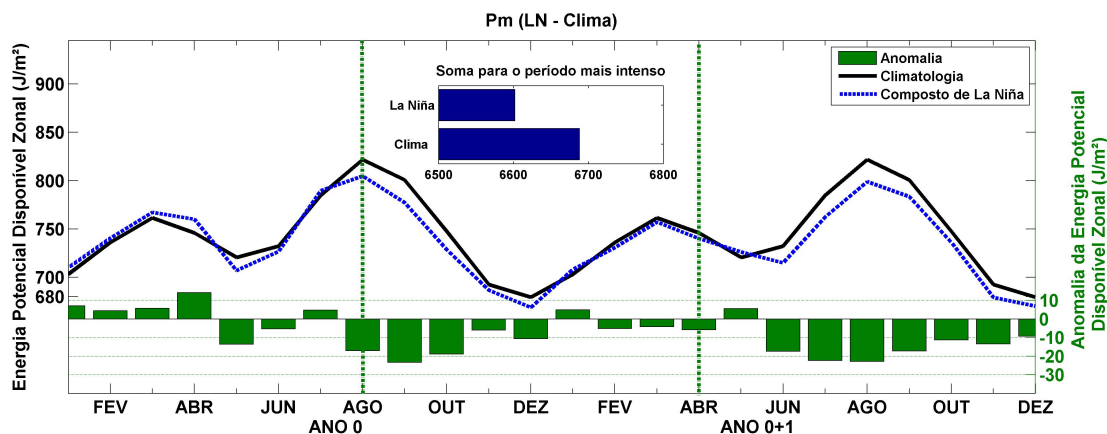
**Figura 4.2:** Variação temporal da energia potencial zonal ( $P_m$ ) para compostos de eventos El Niño (linha vermelha), Climatologia (linha preta), Anomalia entre El Niño e Climatologia (barras em verde) e soma da energia produzida entre agosto do ano 0 (ano anterior) e abril do ano seguinte (0+1), barras em azul na parte superior-central do gráfico. As unidades estão em  $10^5 J/m^2$ .

Na comparação com composto de La Niña, nota-se que a produção de energia é reduzida em cerca de 1,3% em relação à climatologia (Figura 4.4) e 1,2% em relação aos anos neutros (Figura 4.5). Os maiores valores de anomalia predominam em grande parte do intervalo. Todavia, as maiores reduções ocorrem nos três primeiros meses, a partir da configuração do evento. Para os casos de El Niño, verifica-se os maiores aumentos durante os dois primeiros meses, a partir da configuração do evento.

A partir das Figuras 4.6 e 4.7, verifica-se que a produção de  $P_e$  entre agosto e abril, para os eventos



**Figura 4.3:** Variação temporal da energia potencial zonal ( $P_m$ ) para compostos de eventos El Niño (linha vermelha), compostos de anos neutros (linha preta), Anomalia entre El Niño e anos neutros (barras em verde) e soma da energia produzida entre agosto do ano 0 (ano anterior) e abril do ano seguinte (0+1), barras em azul na parte superior-central do gráfico. As unidades estão em  $10^5 J/m^2$ .

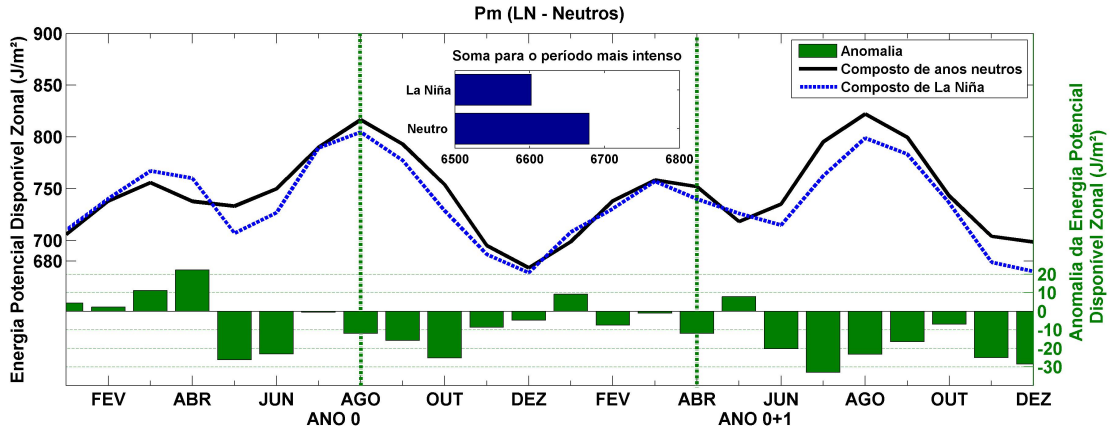


**Figura 4.4:** Variação temporal da energia potencial zonal ( $P_m$ ) para compostos de eventos La Niña (linha azul), Climatologia (linha preta), Anomalia entre La Niña e Climatologia (barras em verde) e soma da energia produzida entre agosto do ano 0 (ano anterior) e abril do ano seguinte (0+1), barras em azul na parte superior-central do gráfico. As unidades estão em  $10^5 J/m^2$ .

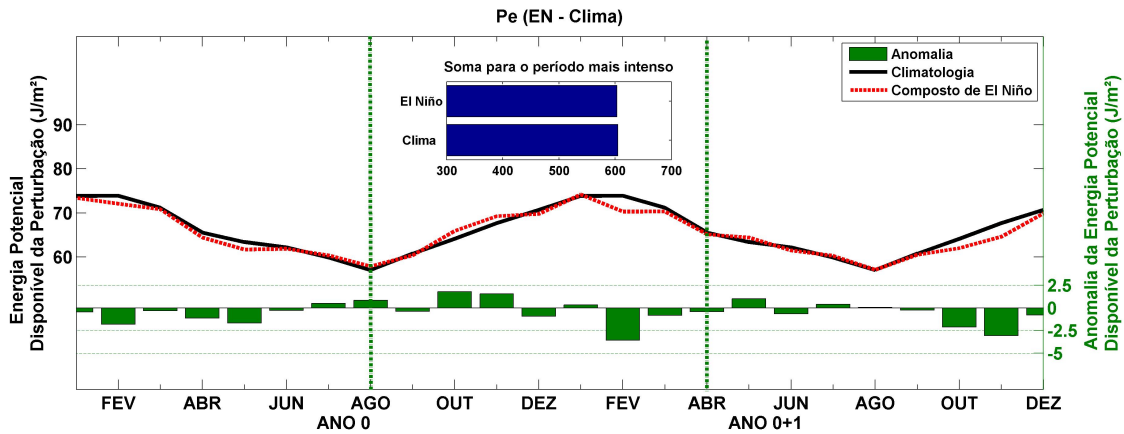
do tipo El Niño, é reduzida em cerca de 0,2% em relação à climatologia (Figura 4.6) e intensificada em cerca de 0,7% em relação aos anos neutros (Figura 4.7). Verifica-se predominância de anomalias negativas durante as fases inicial e final do evento, que são intercaladas por um período de anomalia positiva que ocorrem entre agosto e janeiro. Com relação à climatologia foi observada anomalia total negativa (0,2) e com relação aos anos neutros foi verificada anomalia total positiva (0,5)

Na comparação com o composto de La Niña, verifica-se que a produção de energia é intensificada em cerca de 0,2% em relação à climatologia (Figura 4.8) e 1,2% em relação aos anos neutros (Figura 4.9). Tanto com relação à climatologia quanto com relação aos anos neutros foram verificadas anomalias totais positivas (0,12 e 0,8, respectivamente). Os maiores valores de anomalias são ve-





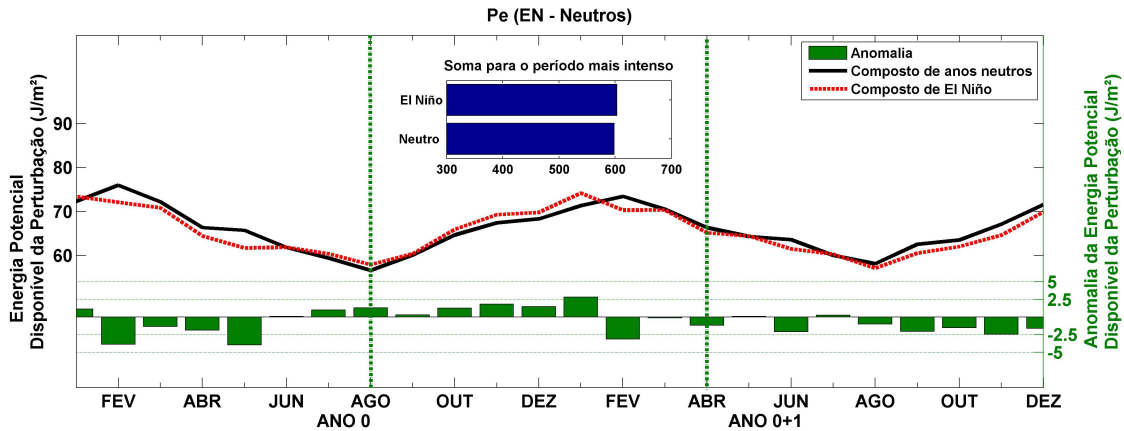
**Figura 4.5:** Variação temporal da energia potencial zonal ( $P_m$ ) para compostos de eventos La Niña (linha azul), Composto de anos neutros (linha preta), Anomalia entre La Niña e anos neutros (barras em verde) e soma da energia produzida entre agosto do ano 0 (ano anterior) e abril do ano seguinte (0+1), barras em azul na parte superior-central do gráfico. As unidades estão em  $10^5 J/m^2$ .



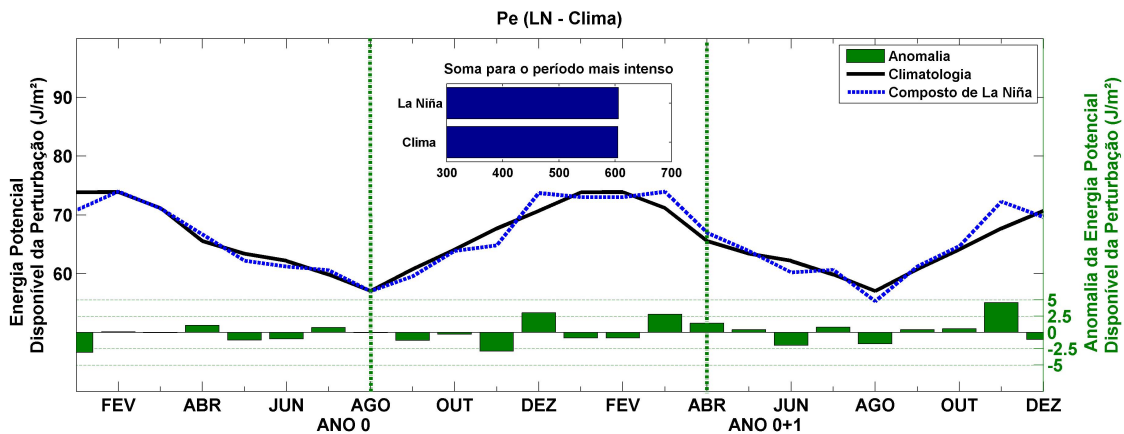
**Figura 4.6:** Variação temporal da energia potencial da perturbação ( $P_e$ ) para compostos de eventos El Niño (linha vermelha), Climatologia (linha preta), Anomalia entre El Niño e Climatologia (barras em verde) e soma da energia produzida entre agosto do ano 0 (ano anterior) e abril do ano seguinte (0+1), barras em azul na parte superior-central do gráfico. As unidades estão em  $10^5 J/m^2$ .

rificados a partir de novembro do primeiro ano. Os maiores aumentos na produção de energia são verificadas entre dezembro e março e as maiores reduções de energia são observadas entre junho e setembro do segundo ano. Não é verificado nenhum padrão de simetria entre os eventos de El Niño e La Niña.

A partir das Figuras 4.10 e 4.11, verifica-se que a produção de  $K_m$ , entre agosto e abril para os eventos do tipo El Niño é intensificado em cerca de 3% em relação à climatologia (Figura 4.10) e 4,5% em relação aos anos neutros (Figura 4.11). Em relação à climatologia os maiores aumentos de produção de energia são verificados de janeiro do segundo ano. Com relação aos anos neutros observa-se um padrão de anomalia bastante diferente: os maiores aumentos de produção de eener-gia são verificados na fase inicial do intervalo, entre abril e outubro do primeiro ano. Enquanto



**Figura 4.7:** Variação temporal da energia potencial da perturbação ( $P_e$ ) para compostos de eventos El Niño (linha vermelha), Composto de anos neutros (linha preta), Anomalia entre El Niño e anos neutros (barras em verde) e soma da energia produzida entre agosto do ano 0 (ano anterior) e abril do ano seguinte (0+1), barras em azul na parte superior-central do gráfico. As unidades estão em  $10^5 J/m^2$ .



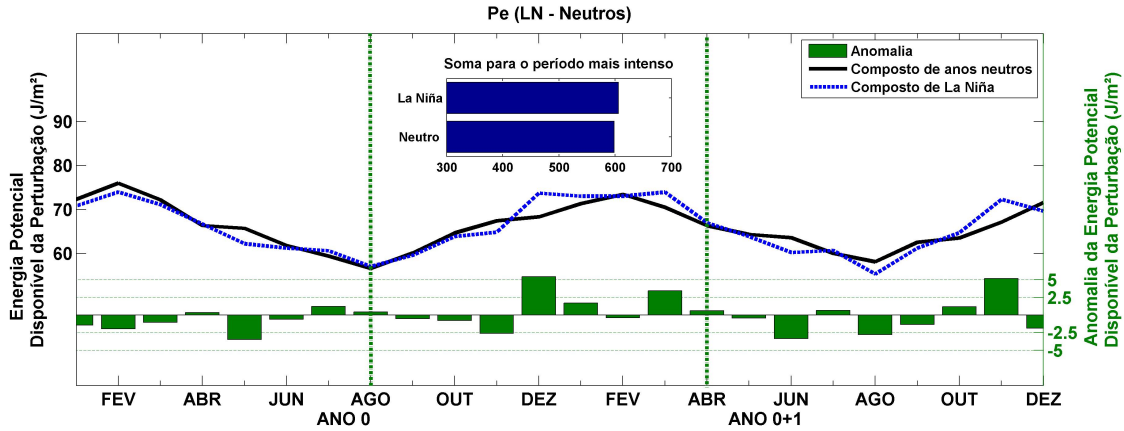
**Figura 4.8:** Variação temporal da energia potencial da perturbação ( $P_e$ ) para compostos de eventos La Niña (linha azul), Climatologia (linha preta), Anomalia entre La Niña e Climatologia (barras em verde) e soma da energia produzida entre agosto do ano 0 (ano anterior) e abril do ano seguinte (0+1), barras em azul na parte superior-central do gráfico. As unidades estão em  $10^5 J/m^2$ .

que a partir de janeiro do segundo ano são verificadas predominância de anomalias negativas. Tanto com relação à climatologia quanto com relação aos anos neutros foram observadas anomalias totais positivas (3,9 e 5,8, respectivamente).

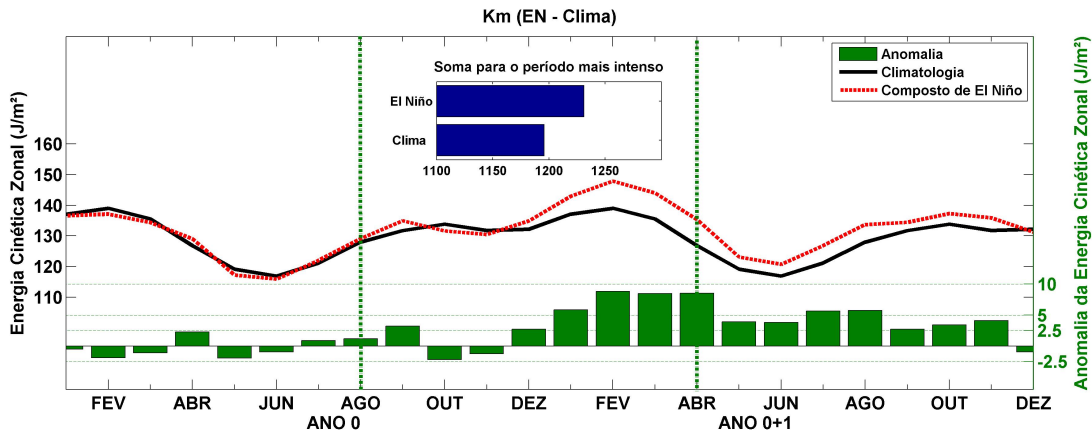
Na comparação com o composto de La Niña, verifica-se que a produção de energia é reduzida em cerca de 2,1% em relação à climatologia (Figura 4.12) e 0,6% em relação aos anos neutros (Figura 4.13). Tanto com relação à climatologia quanto com relação aos anos neutros foram observadas anomalias totais negativas (2,7 e 0,8, respectivamente).

Ou seja, para os eventos tipo El Niño predominam anomalias positivas, enquanto que para os eventos tipo La Niña observam-se anomalias negativas, embora não apresentem a mesma intensidade.

A partir das Figuras 4.14 e 4.15 verifica-se que a produção de  $K_e$ , para os eventos do tipo El Niño,



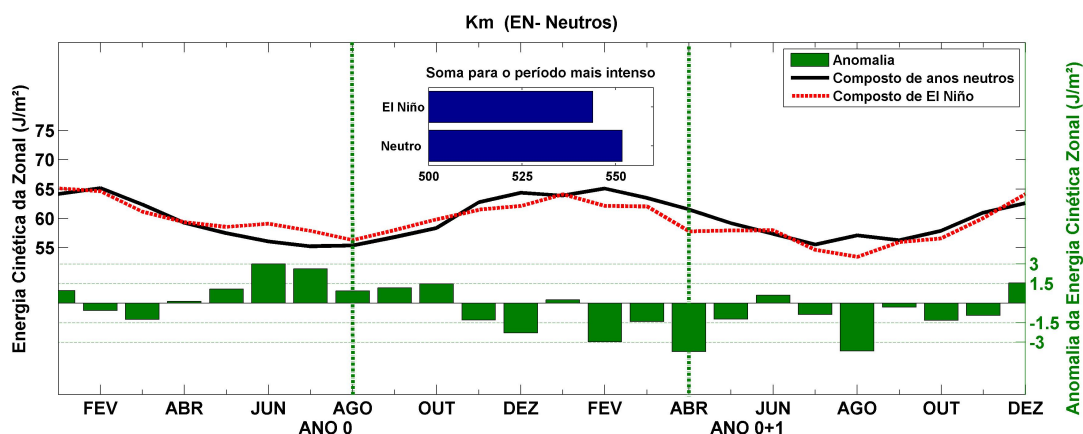
**Figura 4.9:** Variação temporal da energia potencial da perturbação ( $P_e$ ) para compostos de eventos La Niña (linha azul), Composto de anos neutros (linha preta), Anomalia entre La Niña e anos neutros (barras em verde) e soma da energia produzida entre agosto do ano 0 (ano anterior) e abril do ano seguinte (0+1), barras em azul na parte superior-central do gráfico. As unidades estão em  $10^5 J/m^2$ .



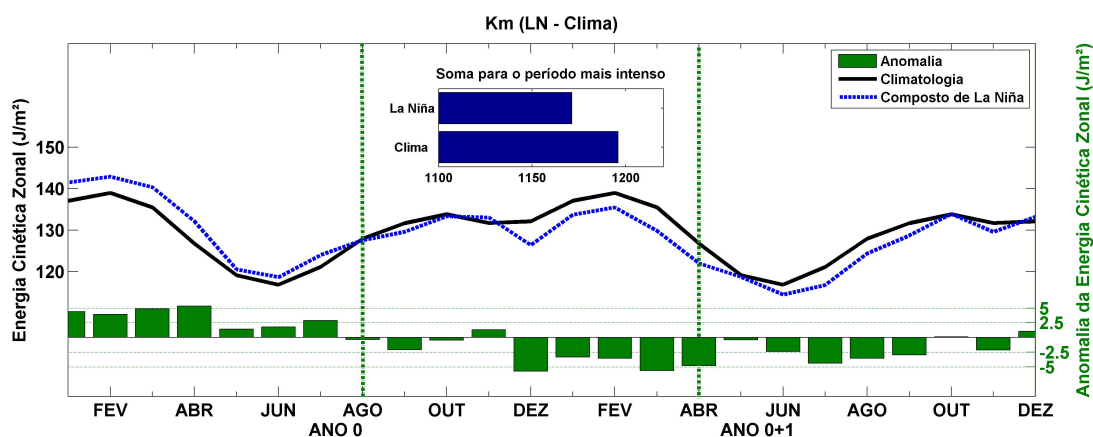
**Figura 4.10:** Variação temporal da energia cinética zonal ( $K_m$ ) para compostos de eventos El Niño (linha vermelha), Climatologia (linha preta), Anomalia entre El Niño e Climatologia (barras em verde) e soma da energia produzida entre agosto do ano 0 (ano anterior) e abril do ano seguinte (0+1), barras em azul na parte superior-central do gráfico. As unidades estão em  $10^5 J/m^2$ .

é reduzida em cerca de 0,6% em relação à climatologia (Figura 4.14) e 1,4% em relação aos anos neutros (Figura 4.15). A variação na produção de energia é marcada por um aumento de produção de energia na fase inicial do evento, ocorrendo dentre abril e outubro do ano zero, enquanto que nas fases de maturação e final é verificado predominância de anomalias negativas que indicam redução na produção de energia. Tanto com relação à climatologia quanto com relação aos anos neutros observam-se anomalias totais negativas (0,3 e 0,9, respectivamente).

Em relação ao composto de La Niña, nota-se que a produção de energia é reduzida em cerca de 0,7% em relação à climatologia (Figura 4.16) e 1,6% em relação aos anos neutros (Figura 4.17). As anomalias verificadas são predominantemente negativas, todavia observam-se ocorrências de aumento na produção de energia na fase final do evento. Tanto com relação à climatologia quanto



**Figura 4.11:** Variação temporal da energia cinética zonal ( $K_m$ ) para compostos de eventos El Niño (linha vermelha), Composto de anos neutros (linha preta), Anomalia entre El Niño e anos neutros (barras em verde) e soma da energia produzida entre agosto do ano 0 (ano anterior) e abril do ano seguinte (0+1), barras em azul na parte superior-central do gráfico. As unidades estão em  $10^5 J/m^2$ .

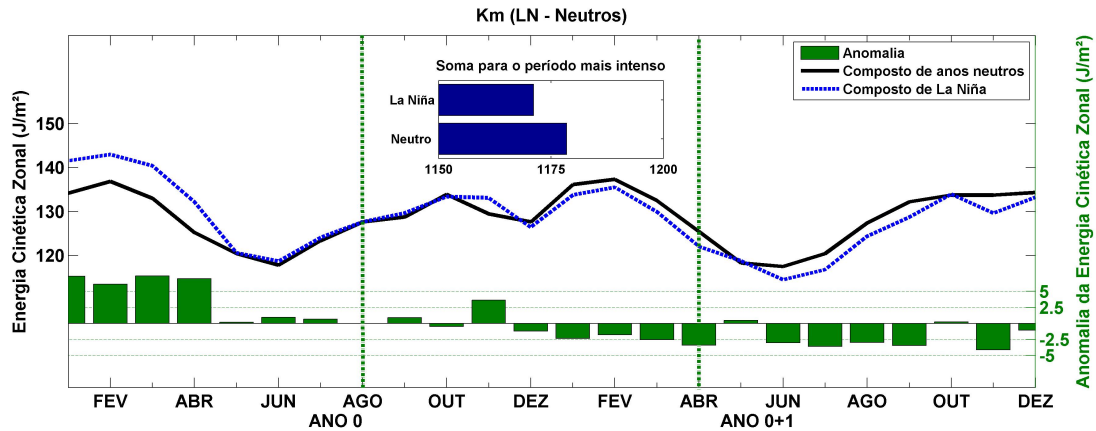


**Figura 4.12:** Variação temporal da energia cinética zonal ( $K_m$ ) para compostos de eventos La Niña (linha azul), Climatologia (linha preta), Anomalia entre La Niña e Climatologia (barras em verde) e soma da energia produzida entre agosto do ano 0 (ano anterior) e abril do ano seguinte (0+1), barras em azul na parte superior-central do gráfico. As unidades estão em  $10^5 J/m^2$ .

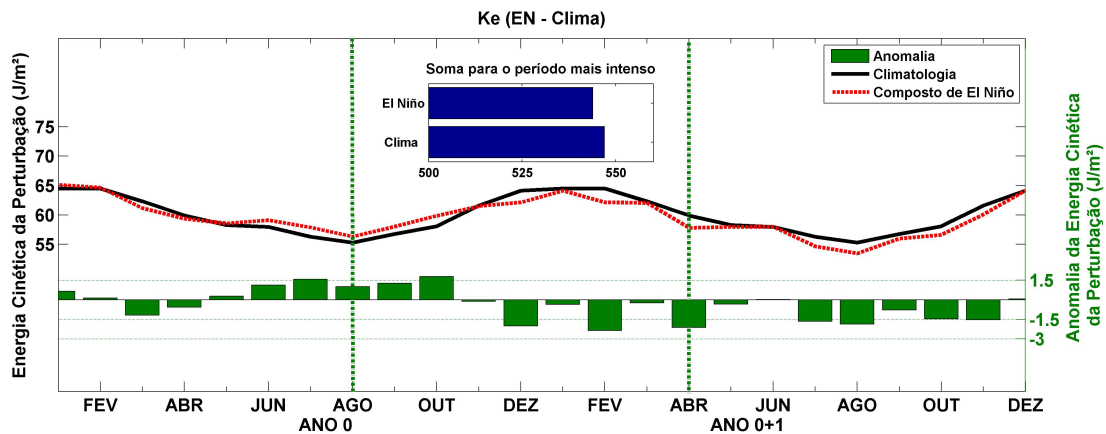
com relação aos anos neutros observam-se anomalias totais negativas (0,4 e 0,9, respectivamente).

A partir das Figuras 4.18 e 4.19 verifica-se que a conversão ( $C(P_m, P_e)$ ) é intensificada em cerca de 2,37% em relação à climatologia (Figura 4.18) e redução de 2,03% em relação aos anos neutros (Figura 4.19). Os maiores valores de anomalia correspondem ao sinal negativo. Dentro do intervalo de agosto e abril nota-se um comportamento similar na distribuição das anomalias. Tanto em relação à climatologia, quanto em relação aos anos neutros observam-se anomalias totais negativas (0,05 e 0,04, respectivamente).

Em relação ao composto de La Niña, verifica-se que a conversão de energia  $C(P_m, P_e)$  é intensificada em cerca de 18,4% comparado à climatologia (Figura 4.20) e 13,3% comparado aos anos neutros (Figura 4.21). Entre agosto e abril verificam-se anomalias totais negativas (0,3 e 0,4,



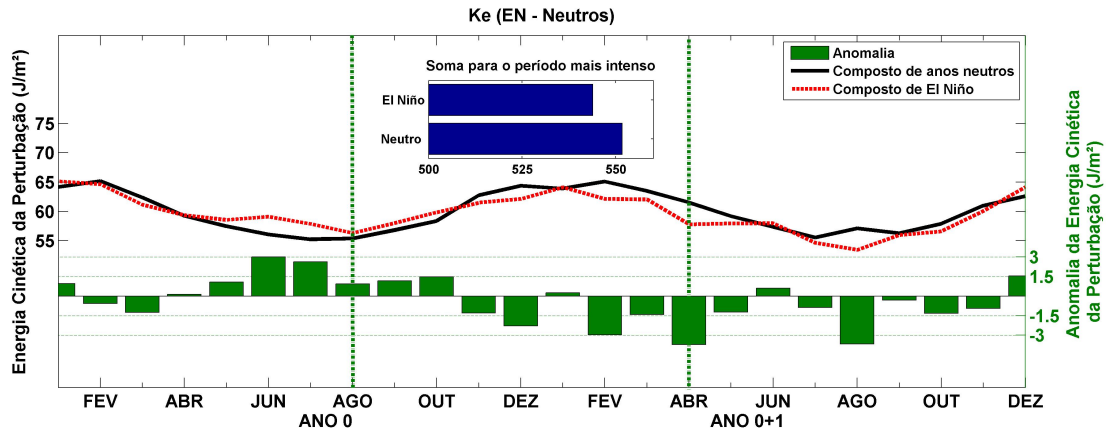
**Figura 4.13:** Variação temporal da energia cinética zonal ( $K_m$ ) para compostos de eventos La Niña (linha azul), Composto de anos neutros (linha preta), Anomalia entre La Niña e anos neutros (barras em verde) e soma da energia produzida entre agosto do ano 0 (ano anterior) e abril do ano seguinte (0+1), barras em azul na parte superior-central do gráfico. As unidades estão em  $10^5 J/m^2$ .



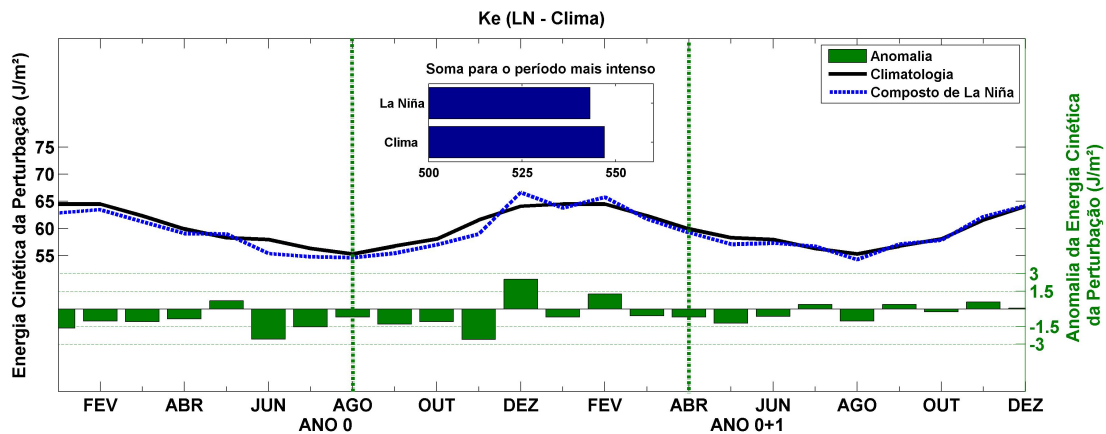
**Figura 4.14:** Variação temporal da energia cinética da perturbação ( $K_e$ ) para compostos de eventos El Niño (linha vermelha), Climatologia (linha preta), Anomalia entre El Niño e Climatologia (barras em verde) e soma da energia produzida entre agosto do ano 0 (ano anterior) e abril do ano seguinte (0+1), barras em azul na parte superior-central do gráfico. As unidades estão em  $10^5 J/m^2$ .

respectivamente). Esses resultados mostram que os eventos de La Niña causam mudanças mais expressivas na conversão  $C(P_m, P_e)$  e portanto afeta processos atmosféricos ligados a este tipo de conversão como é o caso do transporte de calor por perturbação horizontal, que é mais sensível aos eventos do tipo La Niña do que aos eventos do tipo El Niño.

A partir das Figuras 4.22 e 4.23, verifica-se que a conversão  $C(P_e, K_e)$ , para os eventos do tipo El Niño, é reduzida em cerca de 1,9% em relação à climatologia (Figura 4.22) e 1,7% em relação aos anos neutros (Figura 4.23). As anomalias com relação aos anos neutros apresentam maiores valores que as anomalias de climatologia. E são predominantemente negativas em ambas comparações. Tanto em relação à climatologia, como em relação aos anos neutros verificam-se anomalias totais negativas (iguais a 0,04 para ambos).

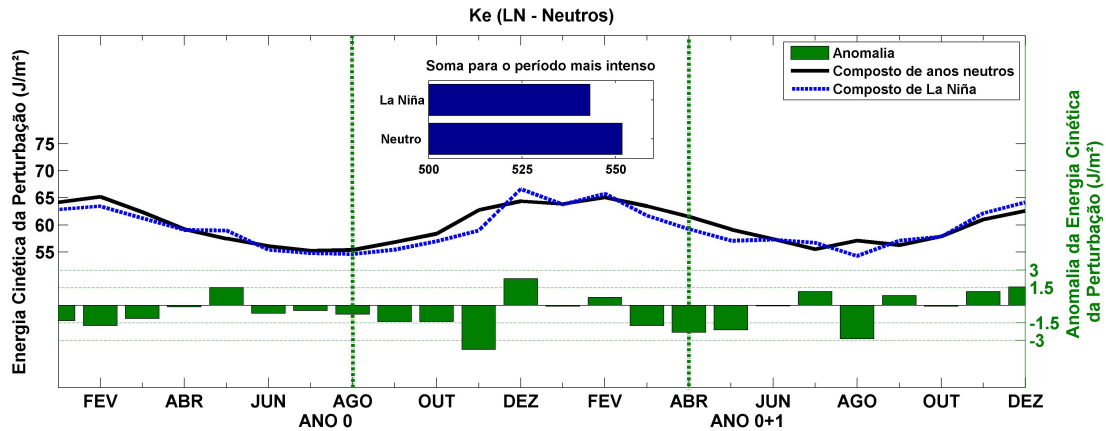


**Figura 4.15:** Variação temporal da energia cinética da perturbação ( $K_e$ ) para compostos de eventos El Niño (linha vermelha), Composto de anos neutros (linha preta), Anomalia entre El Niño e anos neutros (barras em verde) e soma da energia produzida entre agosto do ano 0 (ano anterior) e abril do ano seguinte (0+1), barras em azul na parte superior-central do gráfico. As unidades estão em  $10^5 J/m^2$ .

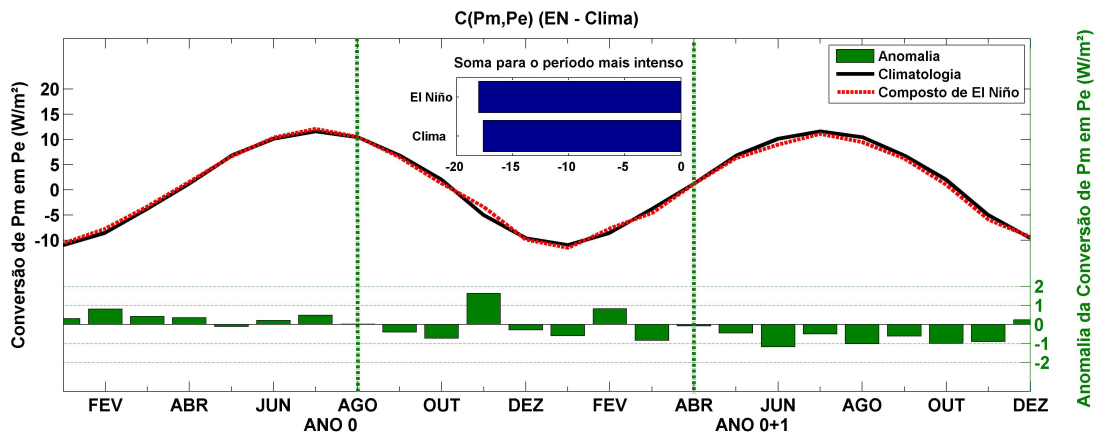


**Figura 4.16:** Variação temporal da energia cinética da perturbação ( $K_e$ ) para compostos de eventos La Niña (linha azul), Climatologia (linha preta), Anomalia entre La Niña e Climatologia (barras em verde) e soma da energia produzida entre agosto do ano 0 (ano anterior) e abril do ano seguinte (0+1), barras em azul na parte superior-central do gráfico. As unidades estão em  $10^5 J/m^2$ .

Na comparação com composto de La Niña, nota-se que a conversão  $C(P_e, K_e)$  é intensificada em cerca de 0,2% em relação à climatologia (Figura 4.24) e 0,4% em relação aos anos neutros (Figura 4.25). O padrão de distribuição de anomalia entre anos neutros e climatologia é bastante semelhante exceto pela pequena variação de intensidade. Tanto em relação à climatologia, quanto em relação aos anos neutros verificam-se anomalias totais positivas ( 0,004 e 0,008, respectivamente). Entre agosto e abril, na comparação feita em relação aos anos neutros, os eventos do tipo El Niño (Figura 4.23) apresentam anomalias predominantemente negativas, enquanto os eventos do tipo La Niña (Figura 4.25) apresentam anomalias predominantemente positivas. Todavia não existe nenhum padrão de simetria entre as anomalias das duas fases do evento. Apesar do termo  $C(P_e, K_e)$  apresentar baixos valores de anomalia, nota-se que os eventos de El Niño podem afetar mais esse



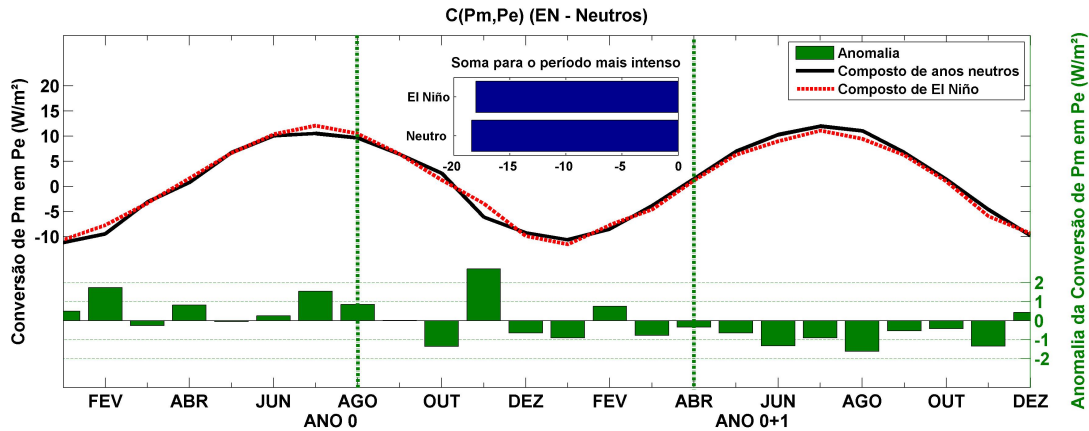
**Figura 4.17:** Variação temporal da energia cinética da perturbação ( $K_e$ ) para compostos de eventos La Niña (linha azul), Composto de anos neutros (linha preta), Anomalia entre La Niña e anos neutros (barras em verde) e soma da energia produzida entre agosto do ano 0 (ano anterior) e abril do ano seguinte (0+1), barras em azul na parte superior-central do gráfico. As unidades estão em  $10^5 J/m^2$ .



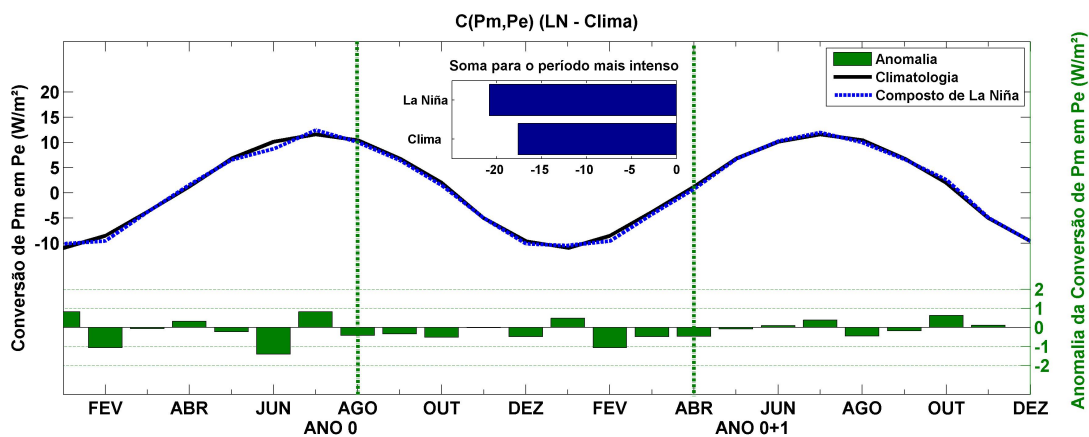
**Figura 4.18:** Variação temporal da conversão de energia entre os reservatórios de energia potencial zonal ( $P_m$ ) e energia potencial da perturbação ( $P_e$ ) para compostos de eventos El Niño (linha vermelha), Climatologia (linha preta), Anomalia entre El Niño e Climatologia (barras em verde) e soma da energia produzida entre agosto do ano 0 (ano anterior) e abril do ano seguinte (0+1), barras em azul na parte superior-central do gráfico. As unidades estão em  $W/m^2$ .

tipo de conversão do que os eventos de La Niña. Todavia, os eventos provocam resultados diferentes, isto é, durante os eventos do tipo El Niño pode ser verificada uma diminuição no transporte de calor por perturbação, que acontece devido a ascensão do ar quente e subsidência de ar frio, na direção longitudinal. Enquanto que durante a La Niña este transporte pode ser levemente intensificado.

A partir das Figuras 4.26 e 4.27, verifica-se que a conversão  $C(K_e, K_m)$ , para os eventos de El Niño, é reduzida em cerca de 1,7% em relação à climatologia (Figura 4.26) e 2,3% em relação aos anos neutros Figuras 4.27). Dentro do intervalo, as anomalias positivas ocorrem entre agosto e outubro do ano 0 e o restante do período é marcado por anomalias negativas que variam de intensidade. Tanto com relação à climatologia quanto em relação aos anos neutros observam-se



**Figura 4.19:** Variação temporal da conversão de energia entre os reservatórios de energia potencial zonal ( $P_m$ ) e energia potencial da perturbação ( $P_e$ ) para compostos de eventos El Niño (linha vermelha), Composto de anos neutros (linha preta), Anomalia entre El Niño e anos neutros (barras em verde) e soma da energia produzida entre agosto do ano 0 (ano anterior) e abril do ano seguinte (0+1), barras em azul na parte superior-central do gráfico. As unidades estão em  $W/m^2$ .

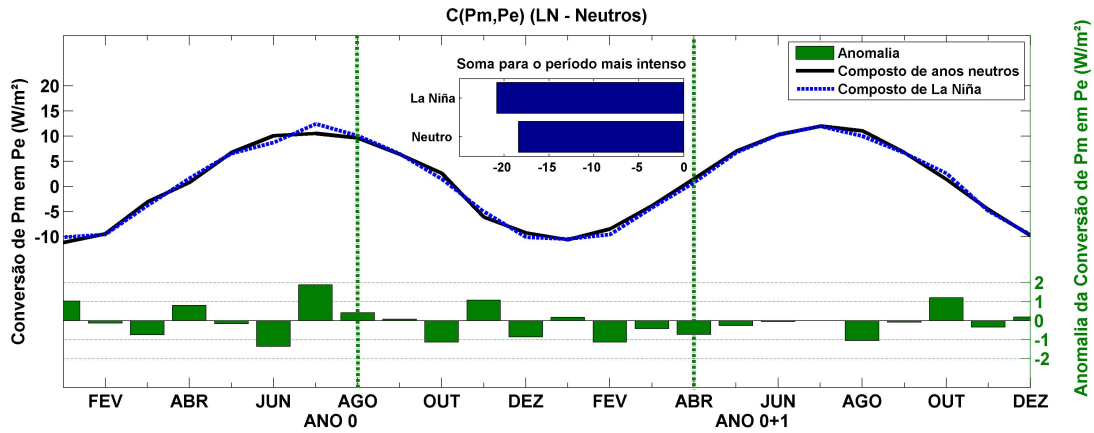


**Figura 4.20:** Variação temporal da conversão de energia entre os reservatórios de energia potencial zonal ( $P_m$ ) e energia potencial da perturbação ( $P_e$ ) para compostos de eventos La Niña (linha azul), Climatologia (linha preta), Anomalia entre La Niña e Climatologia (barras em verde) e soma da energia produzida entre agosto do ano 0 (ano anterior) e abril do ano seguinte (0+1), barras em azul na parte superior-central do gráfico. As unidades estão em  $W/m^2$ .

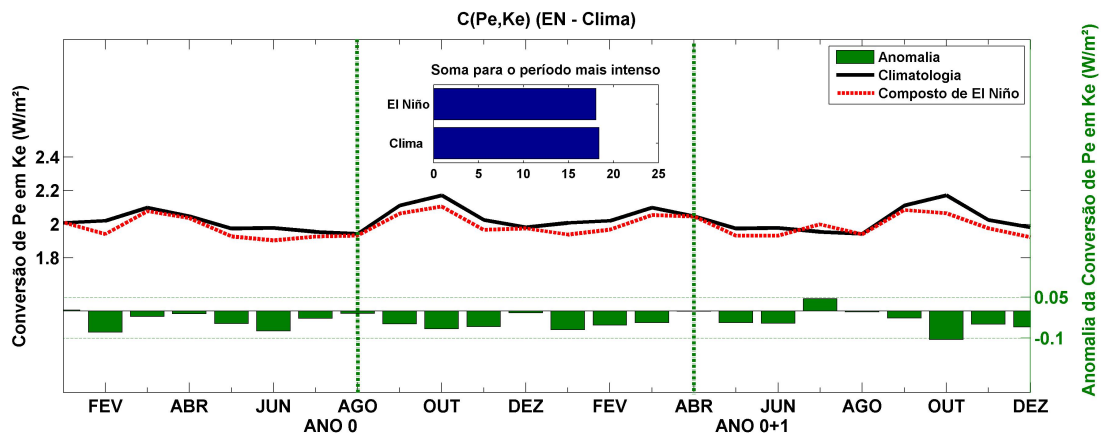
anomalias totais negativas (0,001 e 0,002, respectivamente).

Na comparação com composto de La Niña, nota-se que a conversão  $C(K_e, K_m)$  é reduzida em cerca de 2,6% em relação à climatologia (Figura 4.28) e 3,2% em relação aos anos neutros (Figura 4.29). A distribuição do sinal das anomalias são bastante similares entre si e tanto em relação à climatologia quanto em relação aos anos neutros foram verificadas anomalias totais negativas (0,002 para ambos os casos). A avaliação do termo  $C(K_e, K_m)$  mostrou que existe redução da taxa de conversão em ambos os eventos. Ou seja, este tipo de conversão que ocorre através de processos barotrópicos, e que também está relacionada aos transportes verticais e horizontais de momento angular, é enfraquecida, sobretudo durante a La Niña.





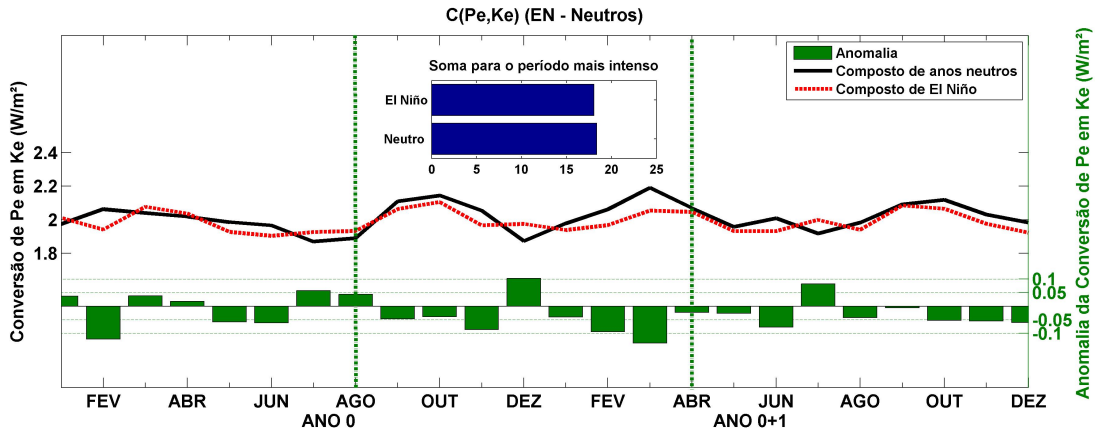
**Figura 4.21:** Variação temporal da conversão de energia entre os reservatórios de energia potencial zonal ( $P_m$ ) e energia potencial da perturbação ( $P_e$ ) para compostos de eventos La Niña (linha azul), Composto de anos neutros (linha preta), Anomalia entre La Niña e anos neutros (barras em verde) e soma da energia produzida entre agosto do ano 0 (ano anterior) e abril do ano seguinte (0+1), barras em azul na parte superior-central do gráfico. As unidades estão em  $W/m^2$ .



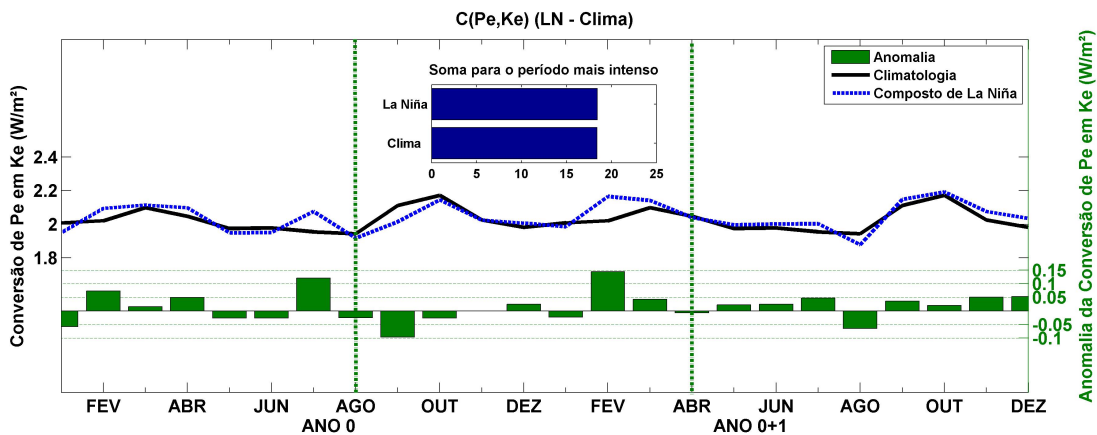
**Figura 4.22:** Variação temporal da conversão de energia entre os reservatórios de energia potencial da perturbação ( $P_e$ ) e energia cinética da perturbação ( $K_e$ ) para compostos de eventos El Niño (linha vermelha), Climatologia (linha preta), Anomalia entre El Niño e Climatologia (barras em verde) e soma da energia produzida entre agosto do ano 0 (ano anterior) e abril do ano seguinte (0+1), barras em azul na parte superior-central do gráfico. As unidades estão em  $W/m^2$ .

A partir das Figuras 4.30 e 4.31, verifica-se que a conversão  $C(P_m, K_m)$ , para o composto de El Niño, é intensificada em cerca de 5% em relação à climatologia (Figura 4.30) e 2,3% em relação aos anos neutros (Figura 4.31). As anomalias, em relação à climatologia, são predominantemente positivas. Já as anomalias em relação aos anos neutros apresentam em sua maior parte anomalias positivas menos intensas. Também verifica-se a existência de uma inversão bem marcada no sinal da anomalia no início e no final do intervalo entre agosto e abril. Tanto em relação à climatologia quanto em relação aos anos neutros verificam-se anomalias totais positivas (0,1 e 0,05 respectivamente).

Na comparação com composto de La Niña, nota-se que a conversão  $C(P_m, K_m)$  é reduzida em



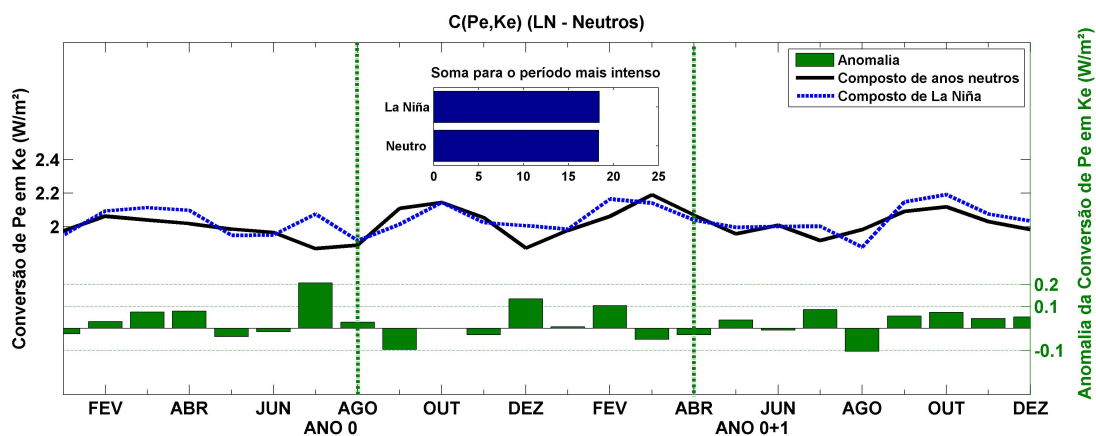
**Figura 4.23:** Variação temporal da conversão de energia entre os reservatórios de energia potencial da perturbação ( $P_e$ ) e energia cinética da perturbação ( $K_e$ ) para compostos de eventos El Niño (linha vermelha), Composto de anos neutros (linha preta), Anomalia entre El Niño e anos neutros (barras em verde) e soma da energia produzida entre agosto do ano 0 (ano anterior) e abril do ano seguinte (0+1), barras em azul na parte superior-central do gráfico. As unidades estão em  $W/m^2$ .



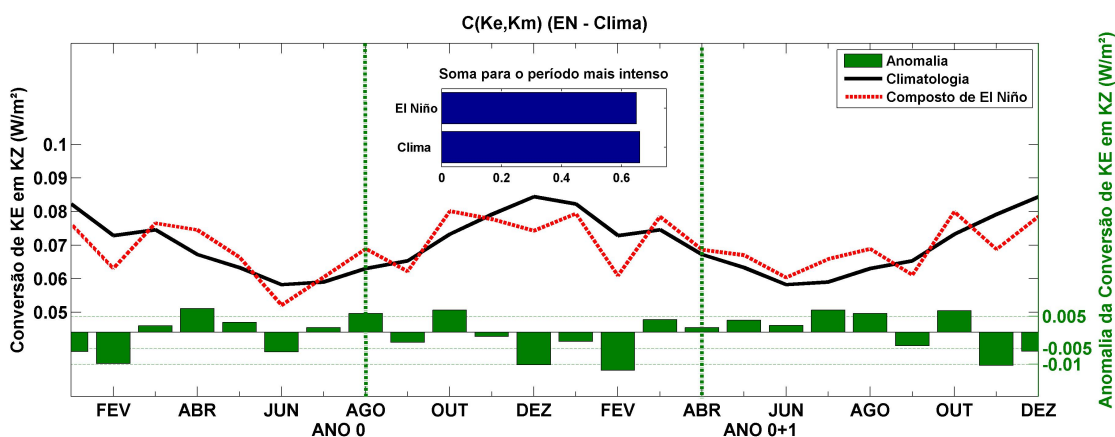
**Figura 4.24:** Variação temporal da conversão de energia entre os reservatórios de energia potencial da perturbação ( $P_e$ ) e energia cinética da perturbação ( $K_e$ ) para compostos de eventos La Niña (linha azul), Climatologia (linha preta), Anomalia entre La Niña e Climatologia (barras em verde) e soma da energia produzida entre agosto do ano 0 (ano anterior) e abril do ano seguinte (0+1), barras em azul na parte superior-central do gráfico. As unidades estão em  $W/m^2$ .

cerca de 1,8% em relação à climatologia (Figura 4.32) e 4,3% em relação aos anos neutros (Figura 4.33). Nota-se que ao longo do evento existe um comportamento similar na distribuição dos sinais de anomalia. Verifica-se também que as anomalias são predominantemente negativas. Tanto em relação à climatologia quanto em relação aos anos neutros observam-se anomalias totais negativas (0,04 em ambos os casos).

Para os eventos do tipo La Niña nota-se predominância de anomalias negativas enquanto que nos eventos do tipo El Niño são verificadas anomalias positivas. Entretanto, não foi verificada nenhuma relação de simetria entre as fases opostas do evento ENOS. Os resultados mostram também que durante os eventos de El Niño o termo  $C(P_m, K_m)$  é fortalecido, ou seja, a produção de energia



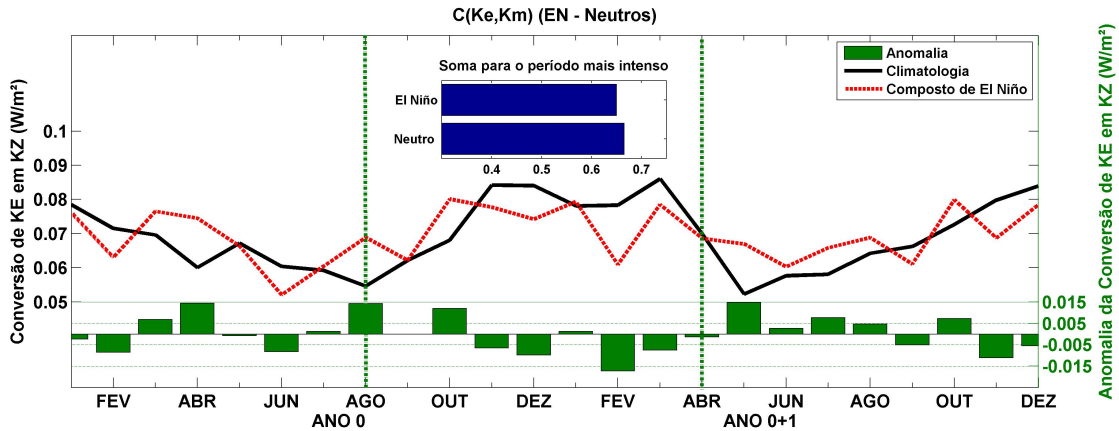
**Figura 4.25:** Variação temporal da conversão de energia entre os reservatórios de energia potencial da perturbação ( $P_e$ ) e energia cinética da perturbação ( $K_e$ ) para compostos de eventos La Niña (linha azul), Composto de anos neutros (linha preta), Anomalia entre La Niña e anos neutros (barras em verde) e soma da energia produzida entre agosto do ano 0 (ano anterior) e abril do ano seguinte (0+1), barras em azul na parte superior-central do gráfico. As unidades estão em  $W/m^2$ .



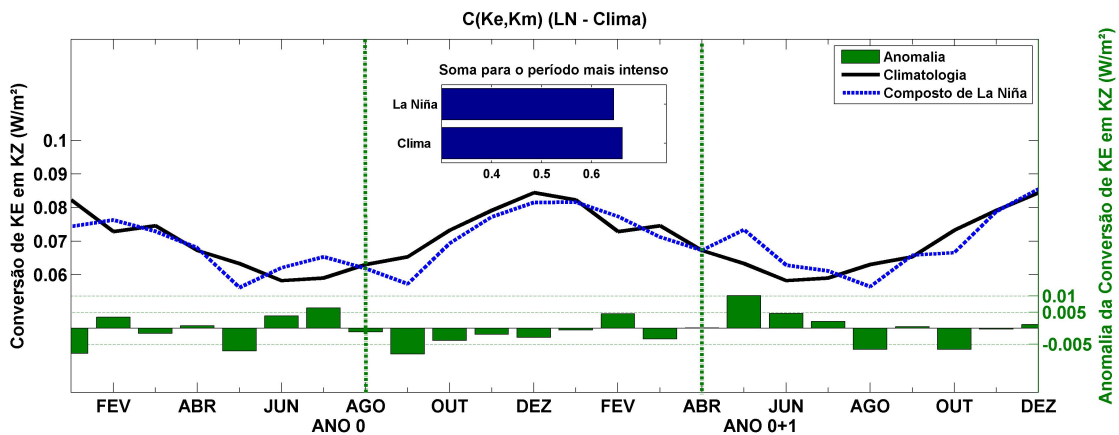
**Figura 4.26:** Variação temporal da conversão de energia entre os reservatórios de energia cinética da perturbação ( $K_e$ ) e energia cinética zonal ( $K_m$ ) para compostos de eventos El Niño (linha vermelha), Climatologia (linha preta), Anomalia entre El Niño e Climatologia (barras em verde) e soma da energia produzida entre agosto do ano 0 (ano anterior) e abril do ano seguinte (0+1), barras em azul na parte superior-central do gráfico. As unidades estão em  $W/m^2$ .

cinética zonal é intensificada devido a ascendência de ar quente e subsidência de ar frio, como também do aumento do gradiente meridional de temperatura média zonal. O comportamento oposto é verificado durante os eventos do tipo La Niña, em que se observa diminuição da produção de energia cinética zonal.

A partir das Figuras 4.34 e 4.35, nota-se que a geração de energia potencial zonal ( $G_m$ ) é intensificada em cerca de 31,6% em relação à climatologia (Figura 4.34) e 59,1% em relação aos anos neutros (Figura 4.35). Durante o intervalo a distribuição dos sinais de anomalia é bastante similar, porém as anomalias observadas com relação aos anos neutros são cerca de duas vezes às verificadas com relação à climatologia. Tanto em relação à climatologia quanto em relação aos anos



**Figura 4.27:** Variação temporal da conversão de energia entre os reservatórios de energia cinética da perturbação ( $K_e$ ) e energia cinética zonal ( $K_m$ ) para compostos de eventos El Niño (linha vermelha), Composto de anos neutros (linha preta), Anomalia entre El Niño e anos neutros (barras em verde) e soma da energia produzida entre agosto do ano 0 (ano anterior) e abril do ano seguinte (0+1), barras em azul na parte superior-central do gráfico. As unidades estão em  $W/m^2$ .

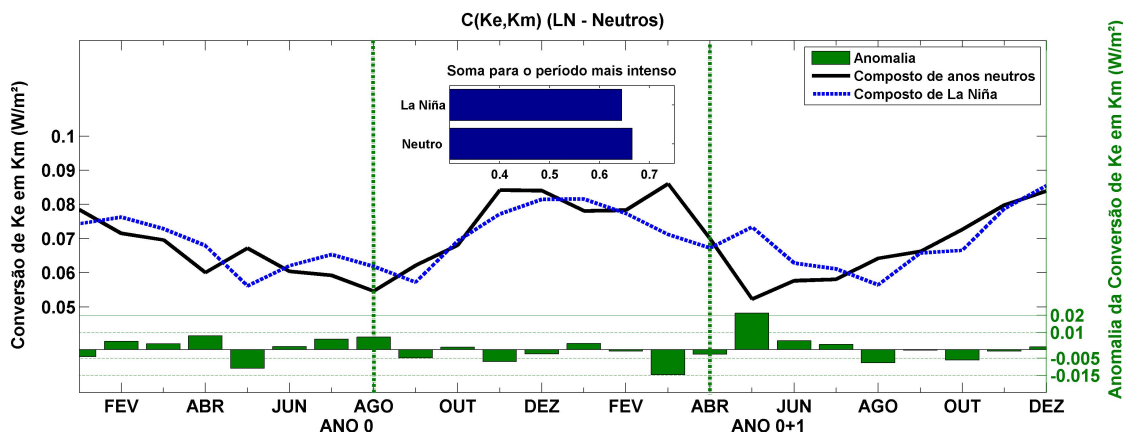


**Figura 4.28:** Variação temporal da conversão de energia entre os reservatórios de energia cinética da perturbação ( $K_e$ ) e energia cinética zonal ( $K_m$ ) para compostos de eventos La Niña (linha azul), Climatologia (linha preta), Anomalia entre La Niña e Climatologia (barras em verde) e soma da energia produzida entre agosto do ano 0 (ano anterior) e abril do ano seguinte (0+1), barras em azul na parte superior-central do gráfico. As unidades estão em  $W/m^2$ .

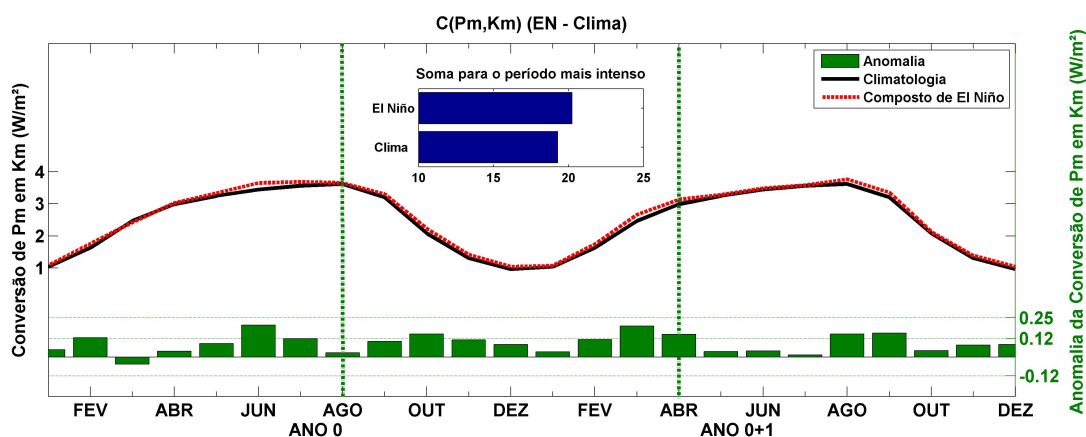
neutros observam-se anomalias totais positivas (0,5 e 1, respectivamente).

Na comparação com composto de La Niña, nota-se que a geração de energia potencial disponível zonal ( $G_m$ ) é reduzida em cerca de 211,1% em relação à climatologia e 234,4% (Figura 4.36) em relação aos anos neutros (Figura 4.37). Os sinais das anomalias de climatologia e anos neutros são bastane similares entre si e são predominantemente negativas durante todo o evento. Tanto em relação à climatologia quanto em relação aos anos neutros, no período entre agosto e abril, observam-se anomalias totais negativas (0,4 em ambos os casos).

A partir das Figuras 4.38 e 4.39, verifica-se que a geração de energia potencial da perturbação ( $G_e$ ) é intensificada em cerca de 0,2% em relação à climatologia (Figura 4.38) e é reduzida em cerca de



**Figura 4.29:** Variação temporal da conversão de energia entre os reservatórios de energia cinética da perturbação ( $K_e$ ) e energia cinética zonal ( $K_m$ ) para compostos de eventos La Niña (linha azul), Composto de anos neutros (linha preta), Anomalia entre La Niña e anos neutros (barras em verde) e soma da energia produzida entre agosto do ano 0 (ano anterior) e abril do ano seguinte (0+1), barras em azul na parte superior-central do gráfico. As unidades estão em  $W/m^2$ .

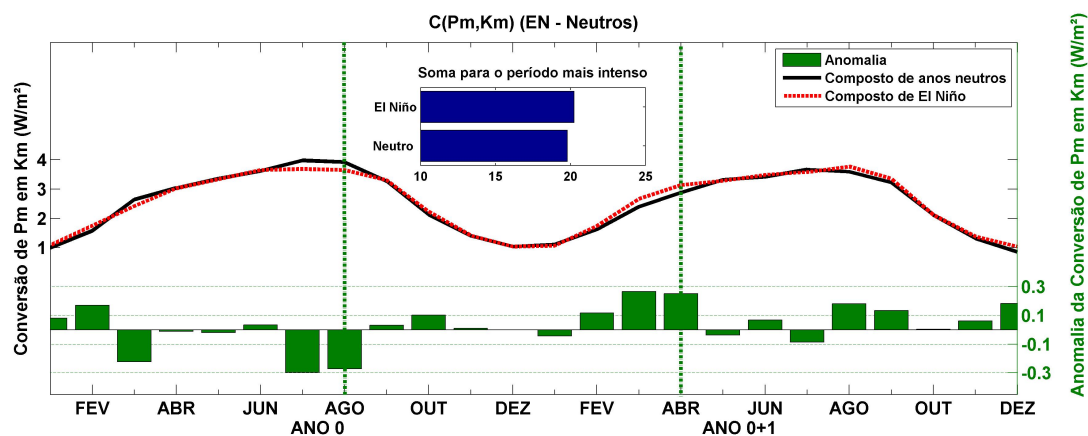


**Figura 4.30:** Variação temporal da conversão de energia entre os reservatórios de energia potencial zonal ( $P_m$ ) e energia cinética zonal ( $K_m$ ) para compostos de eventos El Niño (linha vermelha), Climatologia (linha preta), Anomalia entre El Niño e Climatologia (barras em verde) e soma da energia produzida entre agosto do ano 0 (ano anterior) e abril do ano seguinte (0+1), barras em azul na parte superior-central do gráfico. As unidades estão em  $W/m^2$ .

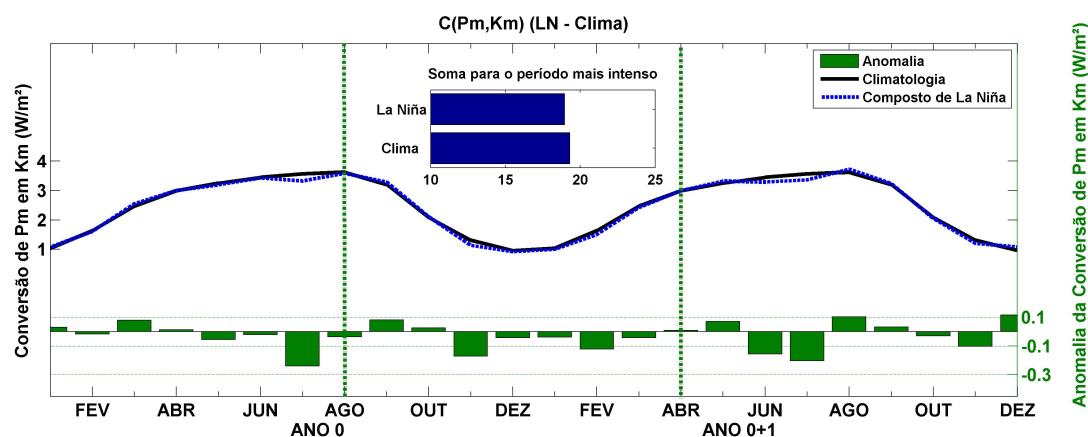
1,9% em relação aos anos neutros (Figura 4.39). Com relação à climatologia observa-se anomalia total positiva (0,007) e com relação aos anos neutros observa-se anomalia total negativa (0,08).

Na comparação com composto de La niña, nota-se que a geração de energia potencial disponível da perturbação ( $G_e$ ) é intensificado em cerca de 9,1% em relação à climaologia (Figura 4.40) e 6,8% em relação aos anos neutros (Figura 4.41). Ademais, observa-se que os maiores valores de anomalias são observados entre janeiro do primeiro ano e abril do segundo ano. As anomalias são predominantemente positivas. Tanto com relação à climatologia quanto com relação aos anos neutros são observadas anomalias totais positivas (0,4 e 0,3, respectivamente).

Em ambos os eventos foram verificadas anomalias positivas sendo a alteração mais expressiva

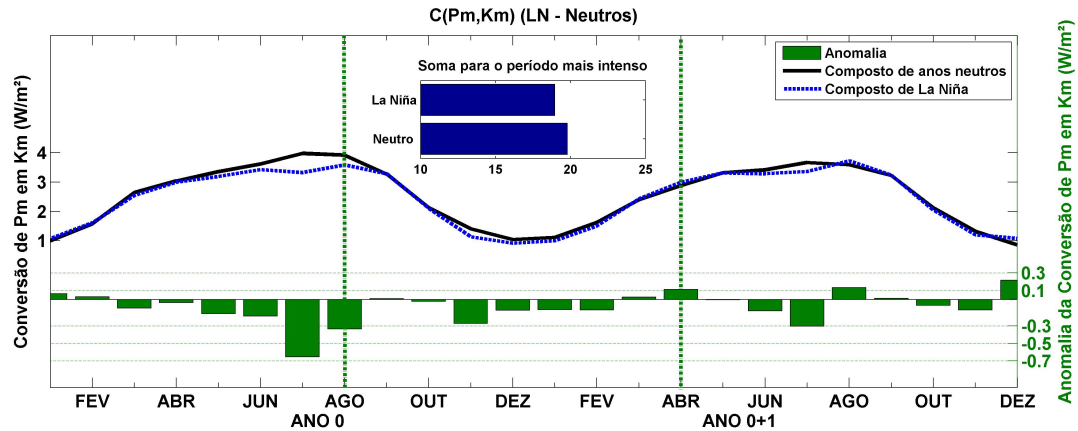


**Figura 4.31:** Variação temporal da conversão de energia entre os reservatórios de energia potencial zonal ( $P_m$ ) e energia cinética zonal ( $K_m$ ) para compostos de eventos El Niño (linha vermelha), Composto de anos neutros (linha preta), Anomalia entre El Niño e anos neutros (barras em verde) e soma da energia produzida entre agosto do ano 0 (ano anterior) e abril do ano seguinte (0+1), barras em azul na parte superior-central do gráfico. As unidades estão em  $W/m^2$ .

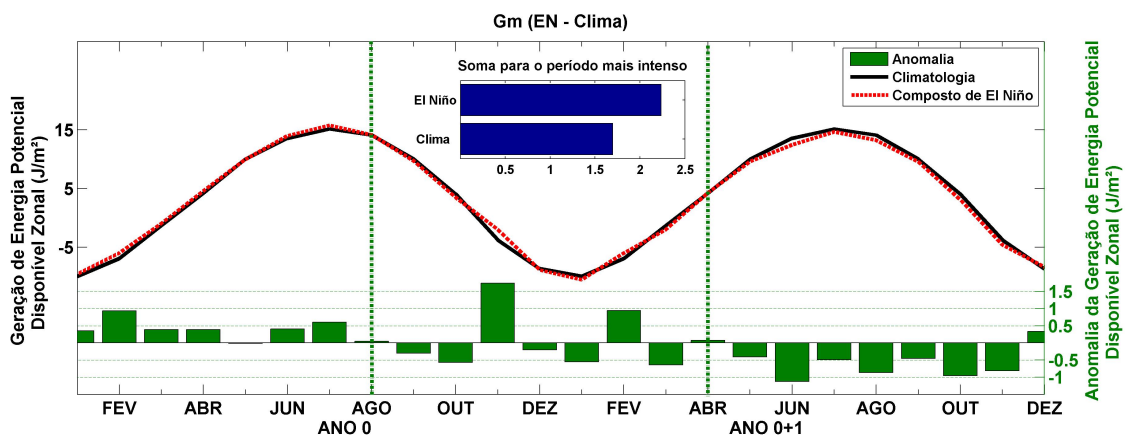


**Figura 4.32:** Variação temporal da conversão de energia entre os reservatórios de energia potencial zonal ( $P_m$ ) e energia cinética zonal ( $K_m$ ) para compostos de eventos La Niña (linha azul), Climatologia (linha preta), Anomalia entre La Niña e Climatologia (barras em verde) e soma da energia produzida entre agosto do ano 0 (ano anterior) e abril do ano seguinte (0+1), barras em azul na parte superior-central do gráfico. As unidades estão em  $W/m^2$ .

durante os eventos de La Niña. Indicando que a geração de energia potencial disponível da perturbação é intensificada durante esta fase do ENOS. Ou seja, a diferença entre a temperatura potencial das massas de ar quente e de ar frio em um mesmo círculo de latitude são maiores. Com relação ao El Niño, em relação aos anos neutros, verificou-se um enfraquecimento leve neste termo.



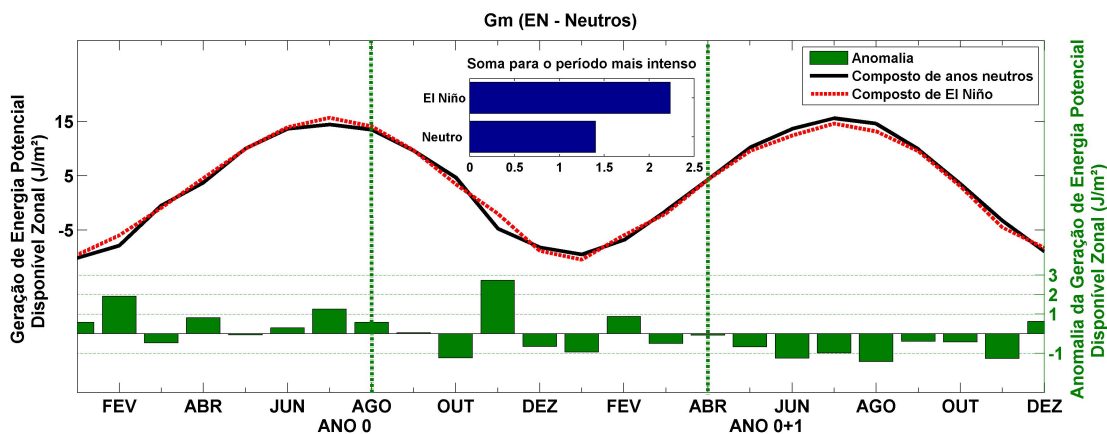
**Figura 4.33:** Variação temporal da conversão de energia entre os reservatórios de energia potencial zonal ( $P_m$ ) e energia cinética zonal ( $K_m$ ) para compostos de eventos La Niña (linha azul), Composto de anos neutros (linha preta), Anomalia entre La Niña e anos neutros (barras em verde) e soma da energia produzida entre agosto do ano 0 (ano anterior) e abril do ano seguinte (0+1), barras em azul na parte superior-central do gráfico. As unidades estão em  $W/m^2$ .



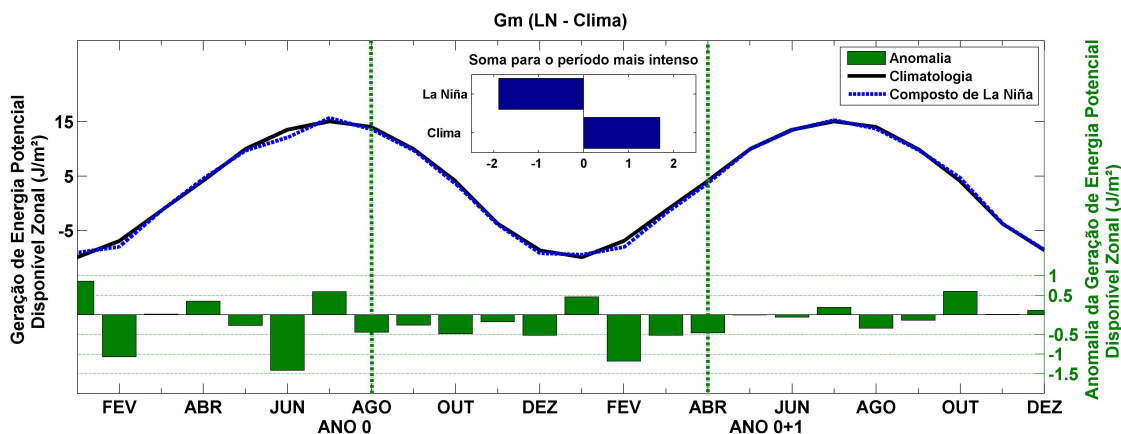
**Figura 4.34:** Variação temporal da geração de energia potencial zonal ( $G_m$ ) para compostos de eventos El Niño (linha vermelha), Climatologia (linha preta), Anomalia entre El Niño e Climatologia (barras em verde) e soma da energia produzida entre agosto do ano 0 (ano anterior) e abril do ano seguinte (0+1), barras em azul na parte superior-central do gráfico. As unidades estão em  $10^5 J/m^2$ .

Em síntese podemos dizer que para o composto de El Niño, verificou-se o comportamento esperado, ou seja, intensificação das formas zonais de geração de energia potencial, energia potencial do estado básico, energia cinética e a conversão entre eles e enfraquecimento da energia cinética dos distúrbios e a transferência de energia das perturbações para o escoamento básico. No caso do composto de La Niña, todo o ramo barotrópico enfraqueceu, enquanto que o que esperávamos era um enfraquecimento em  $G_m$ ,  $P_m$ ,  $K_m$  e na conversão entre eles e um fortalecimento na energia cinética das perturbações bem como na transferência de energia das perturbações para energia do escoamento básico.

Observamos também que os reservatórios de energia potencial disponível zonal e energia cinética apresentam uma relação de dependência. Como vimos, o reservatório de energia cinética zonal



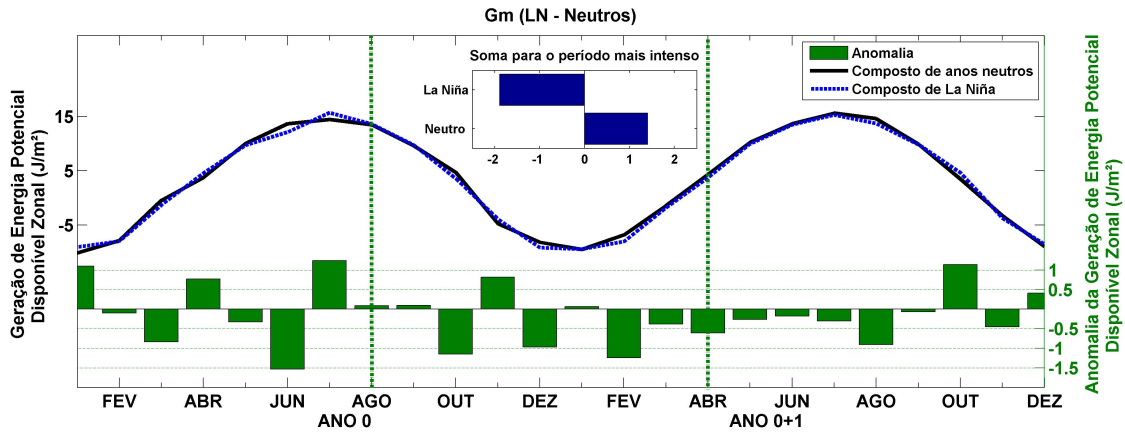
**Figura 4.35:** Variação temporal da geração de energia potencial zonal ( $G_m$ ) para compostos de eventos El Niño (linha vermelha), Composto de anos neutros (linha preta), Anomalia entre El Niño e anos neutros (barras em verde) e soma da energia produzida entre agosto do ano 0 (ano anterior) e abril do ano seguinte (0+1), barras em azul na parte superior-central do gráfico. As unidades estão em  $10^5 J/m^2$ .



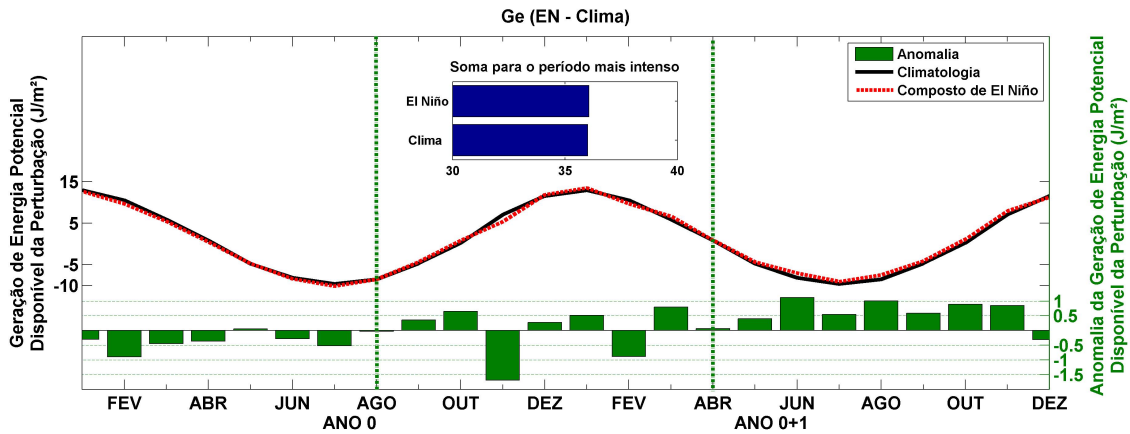
**Figura 4.36:** Variação temporal da geração de energia potencial zonal ( $G_m$ ) para compostos de eventos La Niña (linha azul), Climatologia (linha preta), Anomalia entre La Niña e Climatologia (barras em verde) e soma da energia produzida entre agosto do ano 0 (ano anterior) e abril do ano seguinte (0+1), barras em azul na parte superior-central do gráfico. As unidades estão em  $10^5 J/m^2$ .

é abastecido tanto por energia potencial disponível como por energia das perturbações. Para o composto de El Niño verificamos que a intensificação na energia do escoamento básico é devido ao aumento observado na conversão que abastece a partir de energia potencial disponível, já que a conversão que abastece a partir das perturbações enfraquece. Para o composto de La Niña, à priori relacionamos o enfraquecimento na energia do escoamento básico ao enfraquecimento das duas conversões que abastecem esse reservatório, mas a dependência existente entre a energia potencial zonal e energia cinética zonal pode nos levar a pensar que a redução observada para os eventos tipo La Niña dependem mais da conversão que abastece a partir de energia potencial disponível do que da conversão que abastece a partir da energia de perturbações. E isso fica ainda mais provável quando analisamos o comportamento das anomalias para a conversão  $C(K_e, K_m)$ , onde se verifica para o composto de La Niña uma leve tendência de intensificação na segunda fase do intervalo, a





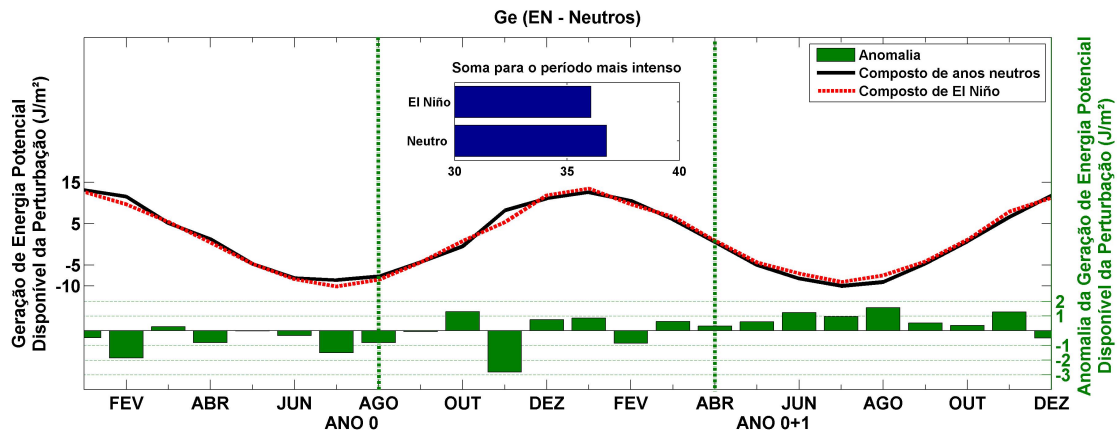
**Figura 4.37:** Variação temporal da geração de energia potencial zonal ( $G_m$ ) para compostos de eventos La Niña (linha azul), Composto de anos neutros (linha preta), Anomalia entre La Niña e anos neutros (barras em verde) e soma da energia produzida entre agosto do ano 0 (ano anterior) e abril do ano seguinte (0+1), barras em azul na parte superior-central do gráfico. As unidades estão em  $10^5 J/m^2$ .



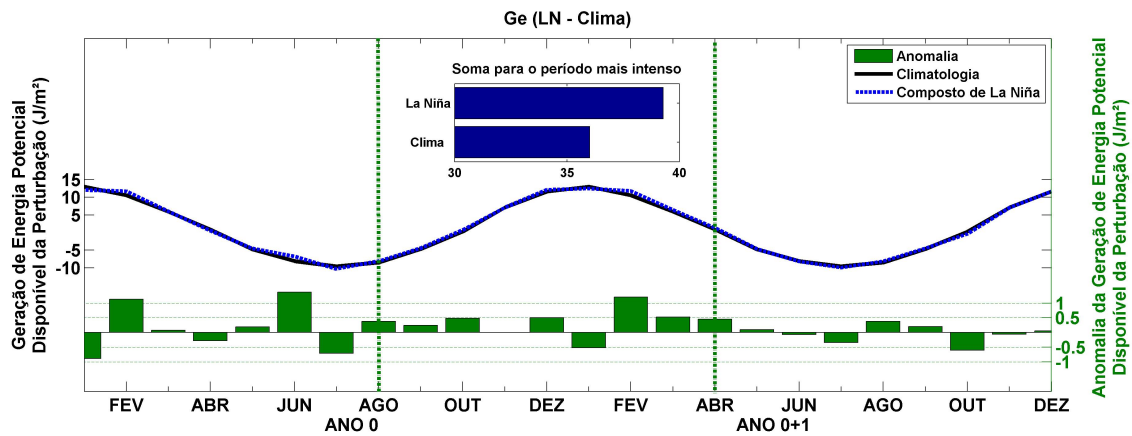
**Figura 4.38:** Variação temporal da geração de energia potencial da perturbação ( $G_e$ ) para compostos de eventos El Niño (linha vermelha), Climatologia (linha preta), Anomalia entre El Niño e Climatologia (barras em verde) e soma da energia produzida entre agosto do ano 0 (ano anterior) e abril do ano seguinte (0+1), barras em azul na parte superior-central do gráfico. As unidades estão em  $10^5 J/m^2$ .

mesma fase em que a energia cinética zonal é enfraquecida.

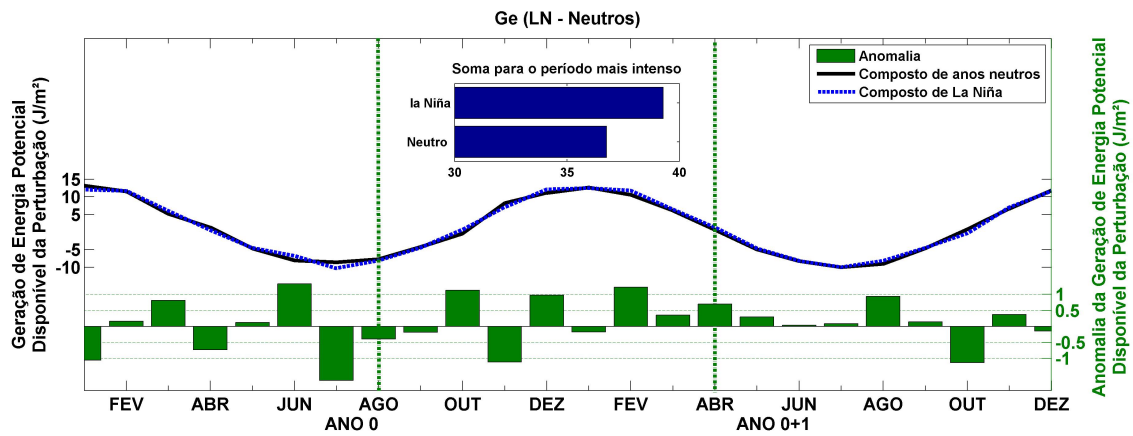
Outra observação importante é que embora a conversão que abastece o escoamento básico a partir da energia potencial disponível zonal seja enfraquecida para os eventos do tipo La Niña, esse enfraquecimento não é intenso ao ponto de promover o fortalecimento das conversões do ramo baroclínico, justificando, provavelmente, porquê a energia cinética das perturbações também é enfraquecida nessa fase do ENOS.



**Figura 4.39:** Variação temporal da geração de energia potencial da perturbação ( $G_e$ ) para compostos de eventos El Niño (linha vermelha), Composto de anos neutros (linha preta), Anomalia entre El Niño e anos neutros (barras em verde) e soma da energia produzida entre agosto do ano 0 (ano anterior) e abril do ano seguinte (0+1), barras em azul na parte superior-central do gráfico. As unidades estão em  $10^5 J/m^2$ .



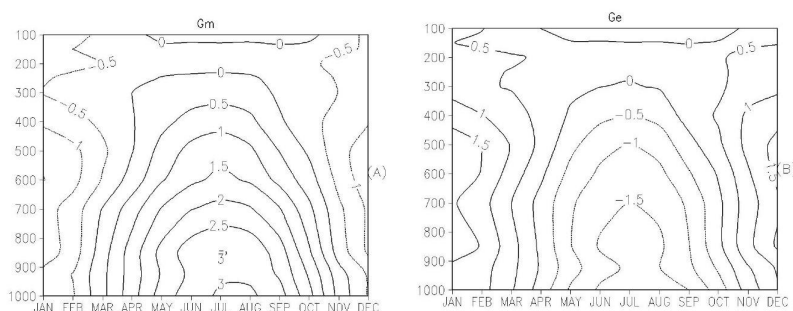
**Figura 4.40:** Variação temporal da geração de energia potencial da perturbação ( $G_e$ ) para compostos de eventos La Niña (linha azul), Climatologia (linha preta), Anomalia entre La Niña e Climatologia (barras em verde) e soma da energia produzida entre agosto do ano 0 (ano anterior) e abril do ano seguinte (0+1), barras em azul na parte superior-central do gráfico. As unidades estão em  $10^5 J/m^2$ .



**Figura 4.41:** Variação temporal da geração de energia potencial da perturbação ( $G_e$ ) para compostos de eventos La Niña (linha azul), Composto de anos neutros (linha preta), Anomalia entre La Niña e anos neutros (barras em verde) e soma da energia produzida entre agosto do ano 0 (ano anterior) e abril do ano seguinte (0+1), barras em azul na parte superior-central do gráfico. As unidades estão em  $10^5 J/m^2$ .

## 4.2 Climatologia dos termos de energia e conversão: análise bi-dimensional

As Figuras 4.42, 4.43 e 4.44 mostram a media anual da distribuição vertical da geração e termos de energia para o período de 1979-2011. A geração de energia potencial disponível zonal é mais forte nos níveis mais próximos à superfície na maior parte dos anos, Figura 4.42 A. Observa-se que os valores da geração de energia potencial disponível da perturbação, Figura 4.42 B, são positivos e maiores durante o verão do hemisfério sul entre os níveis de 900 hPa e 300 hPa. Entre abril e outubro pode-se verificar valores negativos para o termo  $G_e$ , desde a superfície a 400 hPa. Os valores negativos são interpretados como destruição de energia potencial devido a valores mais baixos de temperatura na alta troposfera.

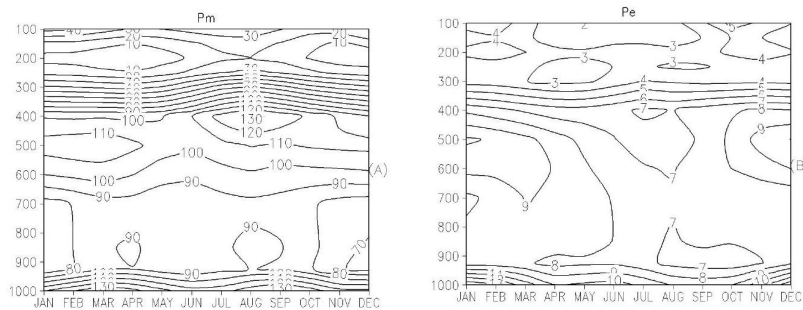


**Figura 4.42:** Seção transversal vertical da geração de energia potencial zonal (A) e da geração de energia potencial da perturbação (B), para o período de 1979-2011. As unidades são em  $W.m^2.(100hPa)^{-1}$ .

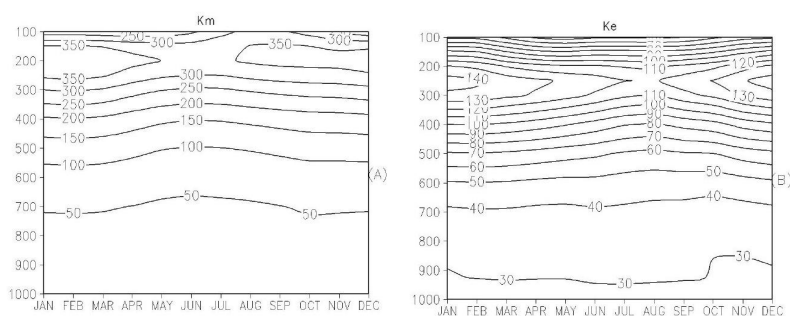
O padrão de energia potencial disponível zonal e da perturbação é mostrado na Figura 4.43. O termo de energia  $P_m$ , Figura 4.43 A, é bastante uniforme entre 1000 hPa e 900 hPa e entre 400 hPa e 300 hPa. Apresenta os menores valores entre 200 hPa e 100 hPa. Os máximos valores de energia potencial zonal estão localizados próximos à superfície, ao longo de todo o ano, e entre os níveis de 500 hPa e 400 hPa entre os meses de julho e setembro. A climatologia da energia potencial da perturbação ( $P_e$ ), Figura 4.43 B, é bastante uniforme entre 1000 hPa e 900 hPa e entre 400 hPa e 300 hPa. Seus maiores valores estão localizados junto à superfície e decrescem com a diminuição dos valores dos níveis de pressão.

O padrão de energia cinética zonal e da perturbação é mostrado na Figura 4.44. Os campos apresentam os maiores valores em níveis mais elevados, entre 600 hPa e 100 hPa. Com um máximo acima de 300 hPa. A energia cinética zonal apresenta-se bem distribuída e uniforme. Já a energia cinética da perturbação apresenta maior intensidade durante os meses do verão no hemisfério sul.

As Figuras 4.45, 4.46, 4.47 e 4.48 mostram a climatologia dos termos de conversão para o mesmo período. O ciclo de conversão inicia com valores positivos de  $C(P_m, K_m)$ . Indica como a energia cinética zonal é gerada a partir da energia potencial disponível zonal. A conversão é maximizada

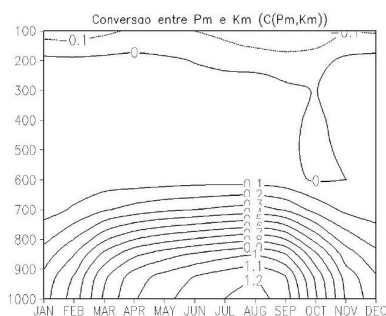


**Figura 4.43:** Seção transversal vertical da energia potencial zonal (A) e da energia potencial da perturbação (B), para o período de 1979-2011. As unidades são em  $J.m^2.(100hPa)^{-1}$ .



**Figura 4.44:** Seção transversal vertical da energia cinética zonal (A) e da energia cinética da perturbação (B), para o período de 1979-2011. As unidades são em  $J.m^2.(100hPa)^{-1}$ .

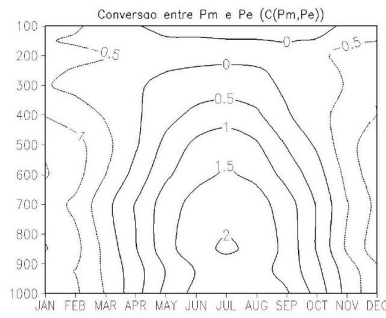
próximo à superfície, entre 900hPa e 1000 hPa.



**Figura 4.45:** Seção transversal vertical da conversão de energia potencial zonal em energia cinética zonal,  $(C(P_m, K_m))$ , para o período de 1979-2011. As unidades são em  $W.m^2.(100hPa)^{-1}$ .

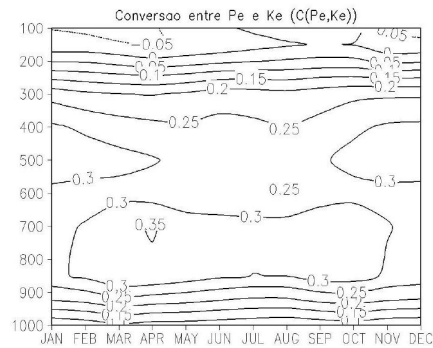
A Climatologia para o termo de conversão  $C(P_m, P_e)$ , Figura 4.46, mostra os menores valores em altos níveis. Entre os meses de janeiro e março e os meses de novembro e dezembro apresenta o mesmo valor ao longo de toda a troposfera. Entre os meses de abril e outubro observa-se que os valores de  $C(P_m, P_e)$  aumentam em direção à superfície e em direção ao meio do intervalo, apresentando um máximo localizado entre 900 hPa e 800 hPa no mês de julho.

O termo baroclínico  $C(P_e, K_e)$  tem um padrão razoável, uniforme em praticamente todo o per-

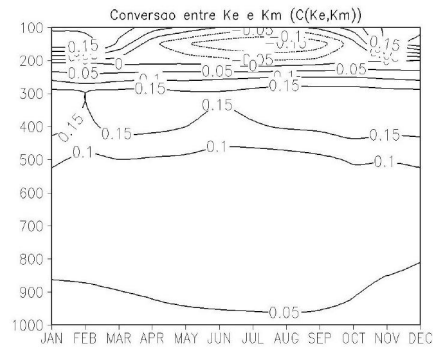


**Figura 4.46:** Seção transversal vertical da conversão de energia potencial zonal em energia potencial da perturbação,  $(C(P_m, P_e))$ , para o período de 1979-2011. As unidades são em  $W.m^2.(100hPa)^{-1}$ .

fil atmosférico, exceto pelo que se observa em médios níveis. Seu comportamento indica que fracos distúrbios nas perturbações também são observados. Completando o ciclo, a conversão barotrópica,  $C(K_e, K_m)$  apresentando os maiores valores acima de 500 hPa. Numa perspectiva climatológica  $P_m$  atua como fonte de  $K_m$  principalmente durante o verão do hemisfério sul.



**Figura 4.47:** Seção transversal vertical da conversão de energia potencial da perturbação em energia cinética da perturbação,  $(C(P_e, K_e))$ , para o período de 1979-2011. As unidades são em  $W.m^2.(100hPa)^{-1}$ .



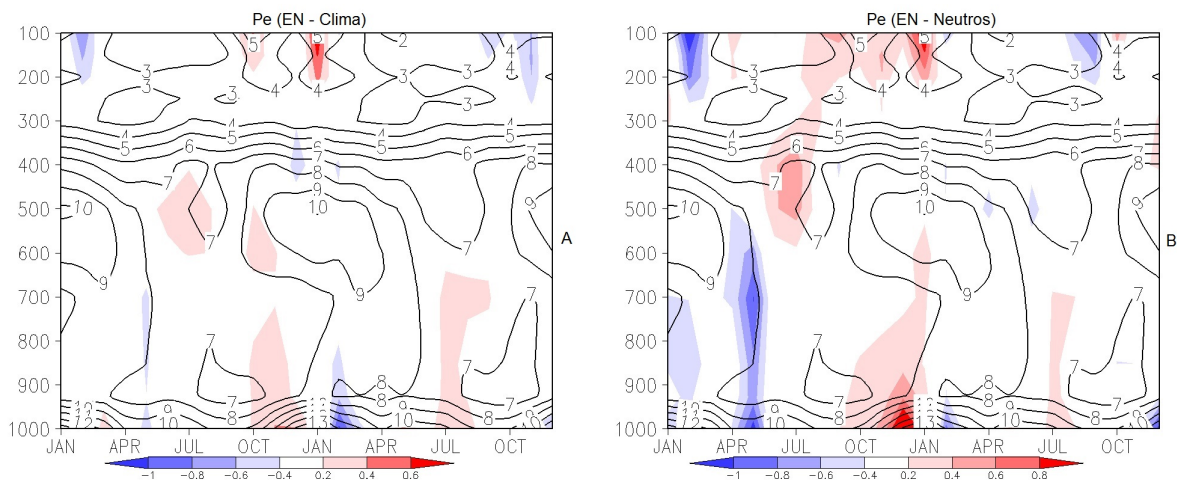
**Figura 4.48:** Seção transversal vertical da da conversão de energia cinética da perturbação em energia cinética zonal,  $(C(K_e, K_m))$ , para o período de 1979-2011. As unidades são em  $W.m^2.(100hPa)^{-1}$ .

## 4.3 Anomalias dos eventos ENOS para os termos de energia e conversão: análise bi-dimensional

### 4.3.1 El Niño em relação à climatologia e aos anos neutros

A partir das Figuras 4.49, 4.50, 4.51 e 4.52 mostram-se os resultados obtidos para os termos de energia para compostos de eventos El Niño. Com as anomalias (definidas aqui como a diferença entre o composto de El Niño e a climatologia) superpostas em cores, em relação à climatologia e em relação ao composto de anos neutros.

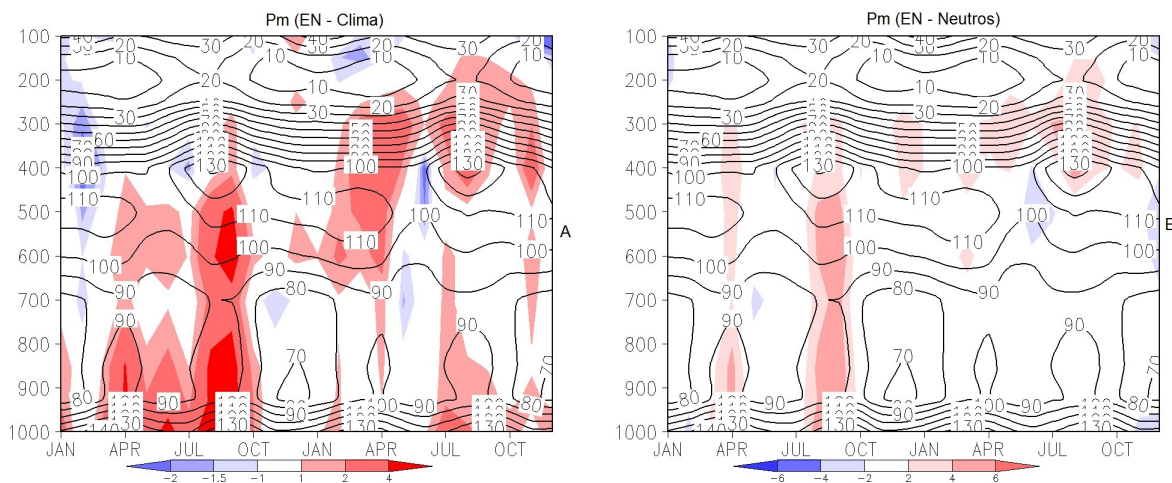
A partir da Figura 4.49a, observa-se que os anos de El Niño são caracterizados por anomalia positiva de  $P_e$  em altos níveis durante o início da fase de maturação (ano 0+1). Todavia, observa-se anomalia negativa durante o início do ano 0 e final do ano 0+1 na camada 100-200 hPa acompanhada de anomalia negativa à superfície durante o início do ano 0+1. Quando se observa a anomalia para anos neutros (Figura 4.49b), nota-se claramente a predominância de anomalias positivas ao longo da camada 1000-100 hPa. Notadamente, para a energia potencial do distúrbio, as anomalias são intensificadas quando considera-se anos neutros. Todavia, ambos resultados mostram que o El Niño tende a intensificar os efeitos de  $P_e$ .



**Figura 4.49:** Anomalia da energia potencial disponível da perturbação do composto de El Niño em relação à climatologia (a) e em relação ao composto de anos neutros (b) vista em cada nível de pressão entre janeiro do ano 0 e dezembro do ano 0+1. As unidades são em  $J.m^2.(100hPa)^{-1}$ .

Para a energia potencial disponível zonal (Figura 4.50a), observa-se que os maiores valores de anomalias positivas se estendem desde a superfície até o nível de 500 hPa, entre julho e outubro do ano 0. As anomalias negativas são principalmente notadas a partir do nível de 500 hPa e ocorrem mais nitidamente no início do ano 0 e em meados do ano 0+1. Todavia durante a fase matura a tendência do El Niño é também intensificar a energia potencial do estado básico.

Na comparação com os anos neutros (Figura 4.50b), observa-se que o padrão é mantido, mesmo que menos intenso. Com os maiores valores de anomalia ocorrendo entre 400 hPa e 300 hPa do final do ano 0 ao final do ano 0+1 e um máximo que se estende da superfície a 500 hPa entre julho e outubro do ano 0, tão bem definido quanto a anomalia em relação à climatologia.



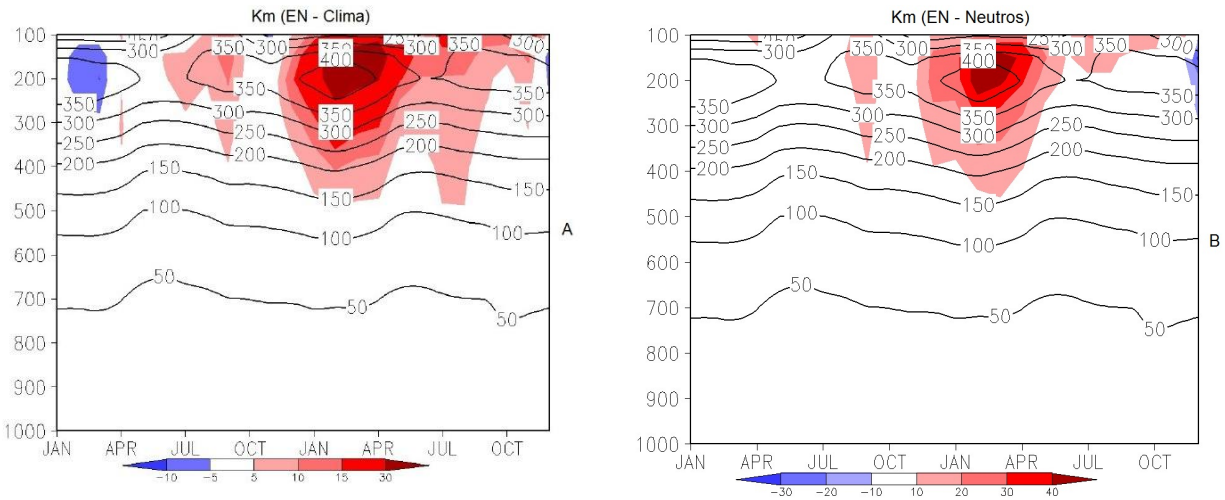
**Figura 4.50:** Anomalia da energia potencial disponível zonal do composto de El Niño em relação à climatologia (a) e em relação ao composto de anos neutros (b) vista em cada nível de pressão entre janeiro do ano 0 e dezembro do ano 0+1. As unidades são em  $J.m^2.(100hPa)^{-1}$ .

A energia cinética zonal,  $K_m$  em relação à climatologia, Figura 4.51a, apresenta os maiores valores de anomalia positiva acima de 400 hPa, indo de novembro do ano 0 a outubro do ano 0+1. Com um máximo no nível de 200 hPa entre janeiro e abril do ano 0+1. Ademais, observa-se anomalia negativa relevante entre 300 e 200 hPa que se estende de janeiro a março do ano 0. Todavia, a mesma ocorre antes da fase madura do evento. Com respeito aos anos neutros (Figura 4.51b), notam-se máximos de anomalia positiva mais concentradas, seguindo o mesmo padrão observado quando comparado à climatologia. Estes resultados mostram, então, que eventos tipo El Niño produzem aceleração do escoamento zonal, provavelmente por aumentarem o gradiente meridional de calor entre os pólos e o equador.

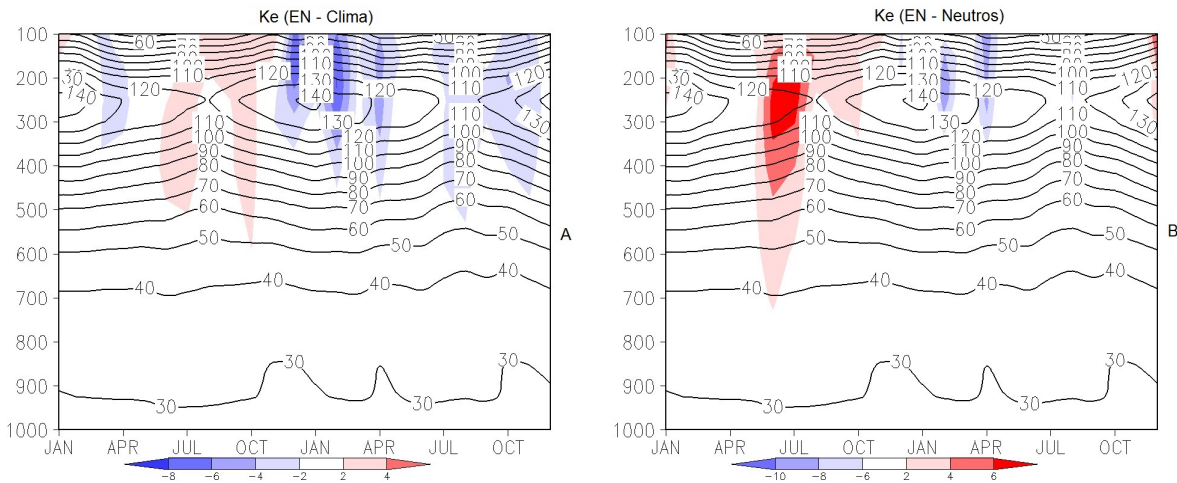
No que diz respeito aos efeitos do El Niño sobre a energia cinética do estado perturbado apresenta-se as Figuras 4.52a e 4.52b. De acordo com os resultados observados na Figura 4.52a, nota-se que a energia cinética da perturbação apresenta maiores valores de anomalia negativa a partir de 400 hPa, com o máximo se estendendo de novembro do ano 0 a fevereiro do ano zero 0+1. Com relação aos anos neutros (Figura 4.52b) nota-se uma intensificação do máximo de anomalia positiva seguida de fraca anomalia negativa entre janeiro e abril do ano 0 + 1. Estes resultados indicam, no geral, que eventos tipo El Niño enfraquecem a energia cinética da perturbação e sugerem que a troca entre  $K_e$  e  $K_m$  (dado pelo termo  $C(K_e, K_m)$ ) deva enfraquecer durante eventos tipo El Niño.

O termo de conversão entre energias potencial,  $C(P_m, P_e)$ , em relação à climatologia (Figura 4.53a)



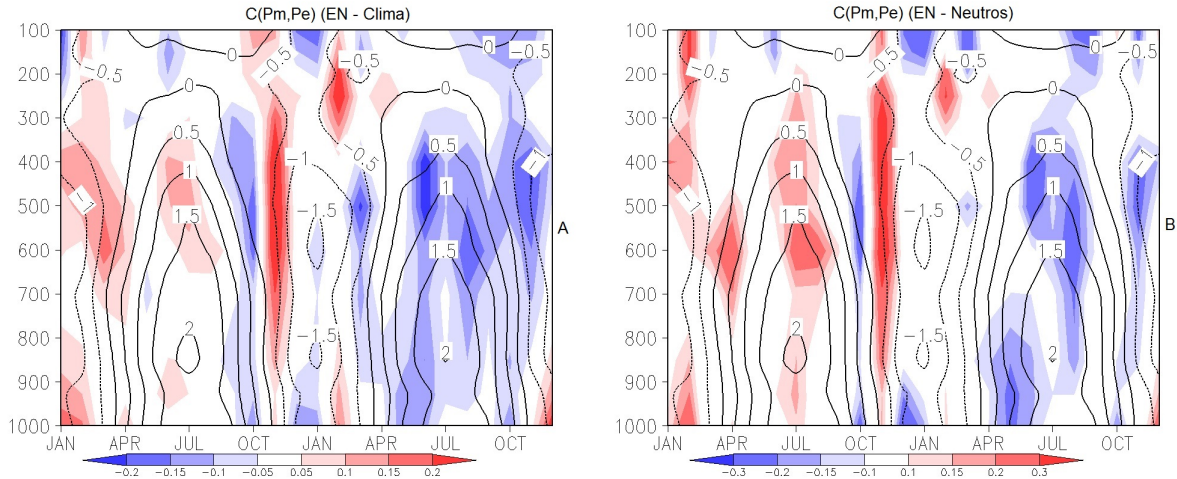


**Figura 4.51:** Anomalia da energia cinética zonal do composto de El Niño em relação à climatologia (a) e em relação ao composto de anos neutros (b) vista em cada nível de pressão entre janeiro do ano 0 e dezembro do ano 0+1. As unidades são em  $J.m^2.(100hPa)^{-1}$ .



**Figura 4.52:** Anomalia da energia cinética da perturbação do composto de El Niño em relação à climatologia (a) e em relação ao composto de anos neutros (b) vista em cada nível de pressão entre janeiro do ano 0 e dezembro do ano 0+1. As unidades são em  $J.m^2.(100hPa)^{-1}$ .

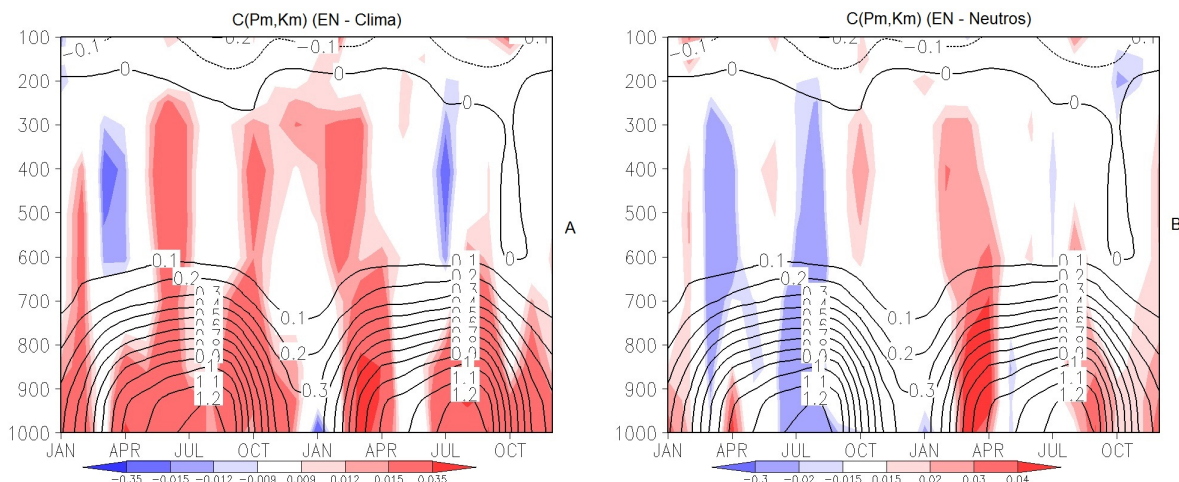
mostra que durante a maior parte do ano 0+1, anomalias negativas se estendem de abril a dezembro, com máximos localizados entre 400 e 600 hPa. Também nota-se uma anomalia positiva bem destacada entre novembro e dezembro do ano 0, se estendendo ao longo de 900 hPa a 300 hPa. Todavia, observam-se outros picos de anomalia positiva em médios níveis entre janeiro e agosto do ano 0 seguindo por um pico de anomalia negativa. Este comportamento pouco se diferencia do observado na anomalia em relação a anos neutros (Figura 4.53b), todavia, aparentemente para o caso de anos neutros a conversão é enfraquecida. Em linhas gerais, os resultados mostram que há tendência de intensificação da conversão de  $P_m$  para  $P_e$  no início do evento, seguido por forte enfraquecimento da conversão até o final do evento El Niño.



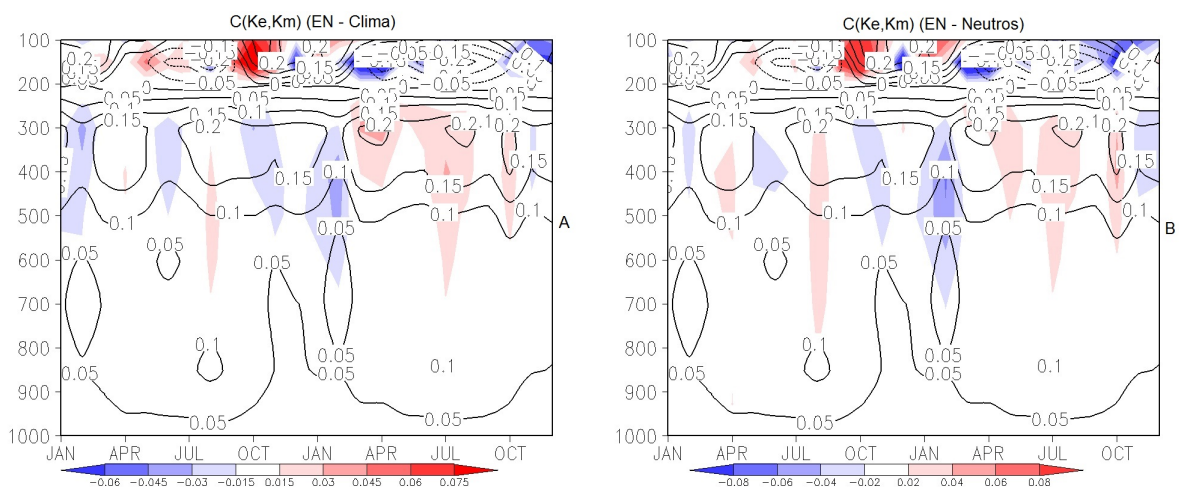
**Figura 4.53:** Anomalia da conversão de energia potencial disponível zonal em energia potencial disponível da perturbação do composto de El Niño em relação à climatologia (a) e em relação ao composto de anos neutros (b) vista em cada nível de pressão entre janeiro do ano 0 e dezembro do ano 0+1. As unidades são em  $W.m^2.(100hPa)^{-1}$ .

Um importante termo a ser observado é o que trata da conversão entre a energia potencial zonal e a energia cinética do estado básico, o termo  $C(P_m, K_m)$ . Este termo dá a informação de como a energia cinética do estado básico cresce às custas da energia potencial. De acordo com os resultados (Figura 4.54a) há predominância de anomalias positivas durante todo o evento de El Niño, com picos discretos de anomalia negativa registrados em médios níveis no início do ano 0 e em meados do ano 0+1. Essa condição indiretamente produz déficit de energia cinética da perturbação pela conversão  $C(P_e, K_e)$ , uma vez que mais energia potencial disponível zonal é utilizada para produzir energia cinética zonal em vez de energia potencial disponível da perturbação. Com relação aos anos neutros (Figura 4.54b), observa-se uma anomalia negativa bem destacada entre março e setembro do ano 0, que se estende desde a superfície a 300 hPa, padrão bastante diferente do que se observa em relação à climatologia.

Outro importante termo a ser avaliado diz respeito à conversão barotrópica, termo  $C(K_e, K_m)$ . Este termo quantifica a transferência de energia entre a energia cinética da perturbação e o estado básico. De acordo com os resultados, nota-se que existem picos discretos de anomalia negativa em médios níveis durante maior parte do ano 0 até março do ano 0+1 (4.55a). Pode ser observado que entre 200 hPa e 100 hPa, existe um máximo de anomalia positiva entre setembro e novembro do ano 0 e um máximo de anomalia negativa entre fevereiro e abril do ano 0+1. Ademais, o padrão observado em relação aos anos neutros, Figura 4.55b, é idêntico ao da climatologia, diferenciados apenas pela pouca variação de intensidade da anomalia negativa. Em linhas gerais, existe uma tendência de enfraquecimento da transferência de energia de  $K_e$  para  $K_m$  durante eventos El Niño, o que ressalta a importância do termo de conversão entre  $P_m$  e  $K_m$ , já que  $K_m$  tende a ser aumentado durante a fase quente do ENOS.



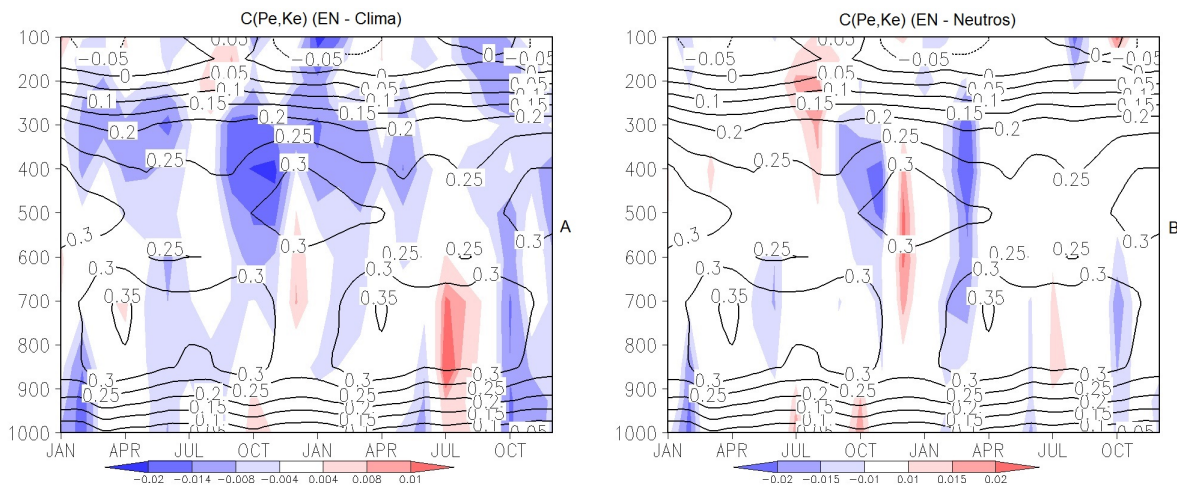
**Figura 4.54:** Anomalia da conversão de energia potencial disponível zonal em energia cinética zonal do composto de El Niño em relação à climatologia (a) e em relação ao composto de anos neutros (b) vista em cada nível de pressão entre janeiro do ano 0 e dezembro do ano 0+1. As unidades são em  $W.m^2.(100hPa)^{-1}$ .



**Figura 4.55:** Anomalia da conversão de energia cinética da perturbação em energia cinética zonal do composto de El Niño em relação à climatologia (a) e em relação ao composto de anos neutros (b) vista em cada nível de pressão entre janeiro do ano 0 e dezembro do ano 0+1. As unidades são em  $W.m^2.(100hPa)^{-1}$ .

Os resultados relativos a conversão de  $P_e$  para  $K_e$  podem ser observados a partir das Figuras 4.56a e 4.56b. No que diz respeito a comparação com a climatologia, os resultados mostram anomalias negativas em praticamente toda a duração do evento. Particularmente os maiores valores encontram-se localizados entre médios e altos níveis, principalmente, entre agosto do ano 0 e maio do ano seguinte. Nota-se um discreto pico de anomalia positiva próximo à superfície entre julho e agosto do ano 0+1. Anomalias negativas dos valores de  $C(P_e, K_e)$  sugerem menos energia sendo convertida em energia cinética da perturbação, enquanto anomalias negativas de  $C(K_e, K_m)$  em altos níveis indica menos energia sendo convertida em energia cinética zonal a partir das perturbações. Em relação aos anos neutros (Figura 4.56b), nota-se um enfraquecimento da anomalia negativa, quando comparada à anomalia em relação à climatologia e o aparecimento de duas regiões bem

marcadas com anomalia negativa. A primeira localizada entre 300 hPa e 200 hPa e ocorre entre julho e agosto do ano 0 e a segunda entre 700 hPa e 400 hPa entre novembro e dezembro do ano 0.



**Figura 4.56:** Anomalia da conversão de energia potencial disponível da perturbação em energia cinética da perturbação do composto de El Niño em relação à climatologia (a) e em relação ao composto de anos neutros (b) vista em cada nível de pressão entre janeiro do ano 0 e dezembro do ano 0+1. As unidades são em  $W.m^2.(100hPa)^{-1}$ .

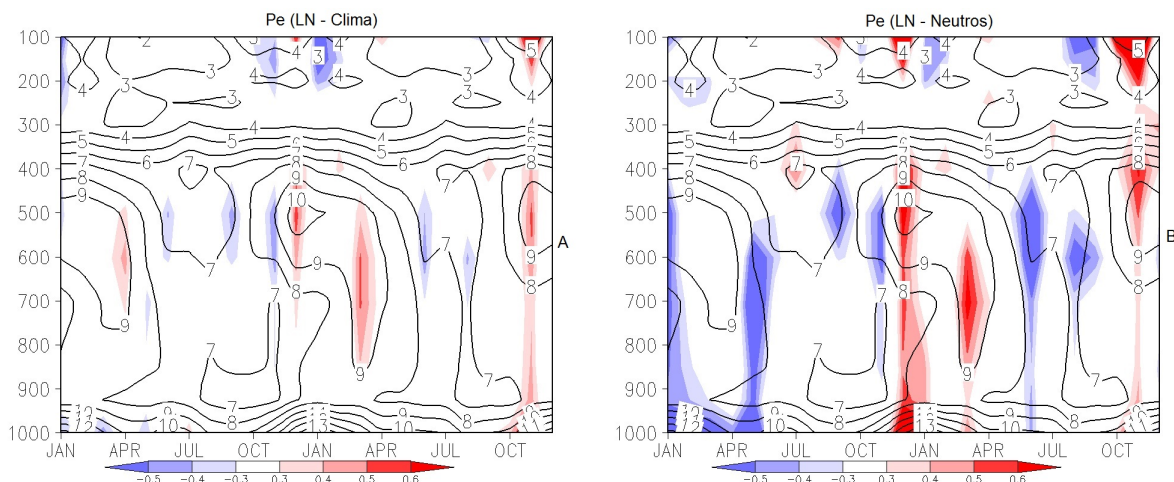
### 4.3.2 La Niña em relação à climatologia e aos anos neutros

A partir das Figuras 4.57, 4.58, 4.59, e 4.60 mostram-se os resultados obtidos para os termos de energia para para compostos de eventos La Niña. Com as anomalias (definidas aqui como a diferença entre o composto de La Niña e a climatologia) superpostas em cores, em relação à climatologia e em relação ao composto de anos neutros.

A partir da Figura 4.57a, observa-se que os anos de La Niña apresentam anomalias negativas de  $P_e$  que ocorrem entre maio e outubro do ano 0 e entre junho e agosto do ano 0+1. As anomalias positivas intercalam as negativas durante a maior parte do evento entre os níveis de 900-500 hpa. Observa-se também um máximo de anomalia negativa em altos níveis ocorrendo entre outubro do ano 0 e fevereiro do ano 0+1, possivelmente intercalado por um máximo de anomalia positiva em dezembro do ano 0. Esse comportamento verificado em altos níveis contrasta com o observado no caso do El Niño.

Em relação aos anos neutros (Figura 4.57b), observa-se uma intensificação tanto com respeito à anomalia positiva como em relação à anomalia negativa entre os níveis de 900-400 hpa. Este resultado torna clara a sugestão de que em anos de La Niña a energia potencial da perturbação é enfraquecida, que é um comportamento oposto ao verificado em anos de El Niño.

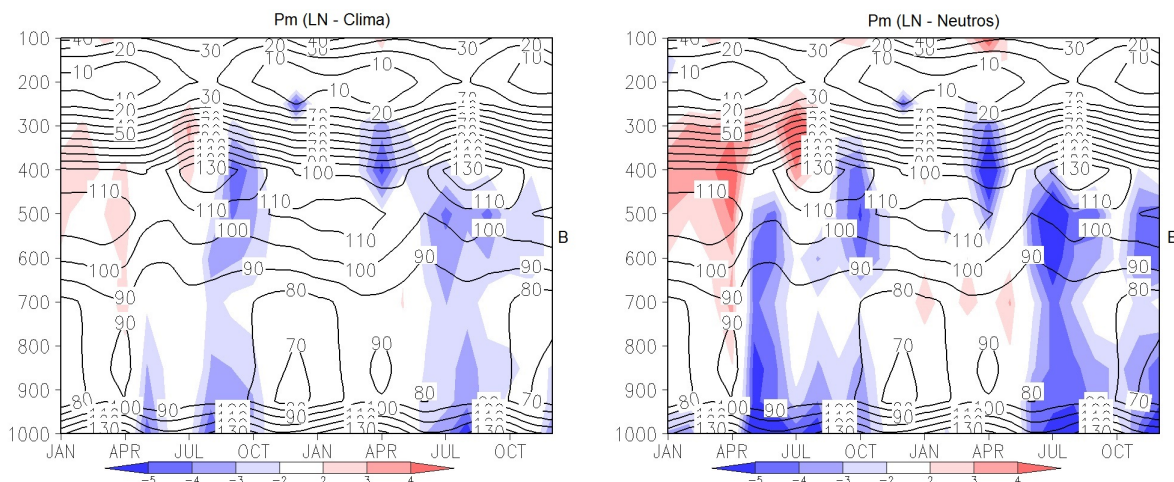
A partir das Figura 4.58a e Figura 4.58b observam-se predominância de anomalias negativas de  $P_m$  em quase todo perfil atmosférico durante o evento La Niña.



**Figura 4.57:** Anomalia da energia potencial disponível perturbação do composto de La Niña em relação à climatologia (a) e em relação ao composto de anos neutros (b) vista em cada nível de pressão entre janeiro do ano 0 e dezembro do ano 0+1. As unidades são em  $J.m^2.(100hPa)^{-1}$ .

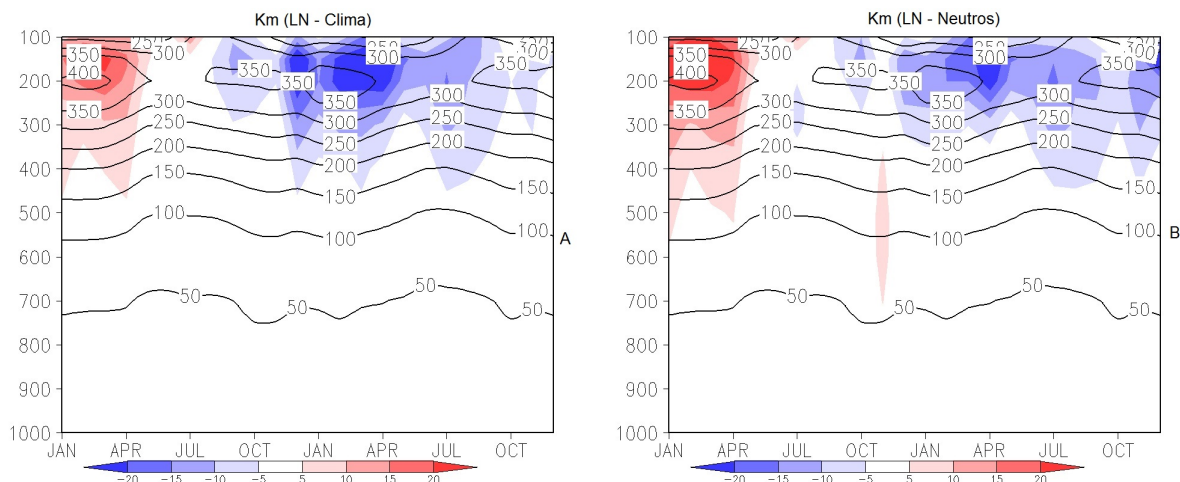
Nota-se também que os maiores valores de anomalia ocorrem entre 600-300 hpa no período de julho do ano 0 a dezembro do ano 0+1 e também próximo à superfície entre julho e outubro do ano 0 e entre julho e outubro do ano seguinte. Anomalias positivas são encontradas predominantemente entre 500-300 hPa ocorrendo nos meses de janeiro e julho do ano 0.

Não é verificado nenhum padrão de simetria bem definido entre os efeitos causados pelos eventos de El Niño e La Niña, exceto pela semelhança observada entre abril e outubro do ano 0. Nesta fase os sinais de anomalia observados são opostos, isto é, enquanto os eventos tipo El Niño tendem a intensificar a energia potencial do estado básico, os eventos do tipo La Niña tendem a enfraquece-la.



**Figura 4.58:** Anomalia da energia potencial disponível zonal do composto de La Niña em relação à climatologia (a) e em relação ao composto de anos neutros (b) vista em cada nível de pressão entre janeiro do ano 0 e dezembro do ano 0+1. As unidades são em  $J.m^2.(100hPa)^{-1}$ .

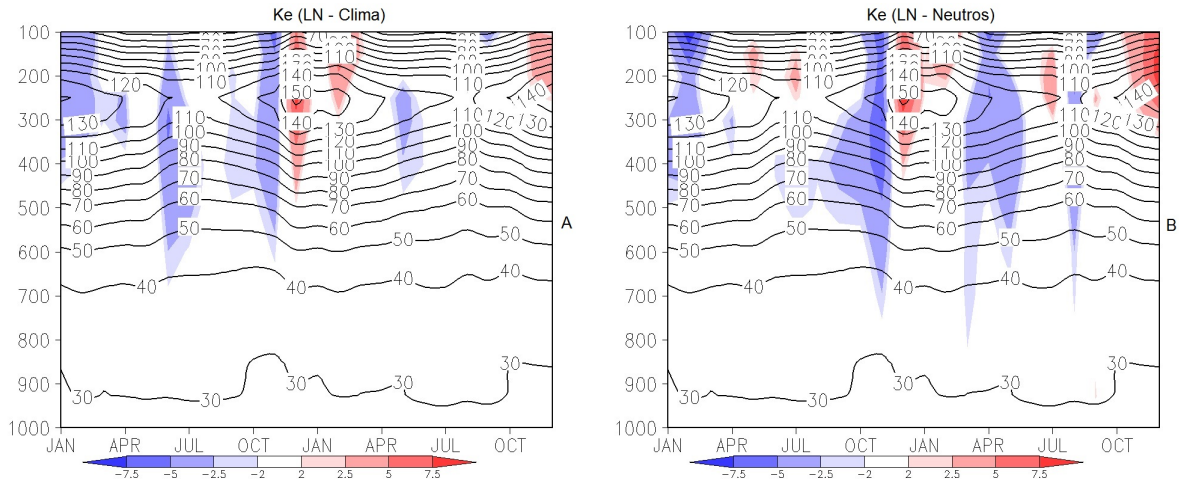
Na Figura 4.59a mostra-se anomalia negativa de  $K_m$  em altos níveis com um máximo ocorrendo entre novembro do ano 0 e abril do ano 0+1. Observam-se também anomalias positivas entre 400 hPa e 100 hPa durante os primeiros meses do ano 0. Mudanças significativas, no entanto, são observadas na energia cinética zonal quando os eventos de El Niño e La Niña são comparados entre si. Estes apresentam efeitos opostos tanto na fase de gênese como na fase de maturação e fim. No que diz respeito aos anos neutros (Figura 4.59b), a energia cinética média apresenta praticamente o mesmo padrão, exceto por uma ligeira anomalia positiva que aparece em médios níveis entre outubro e novembro do ano 0. Todavia, ambos resultados indicam que os eventos de La Niña tendem a enfraquecer a energia cinética do estado básico. E portanto produzem desaceleração do escoamento zonal, provavelmente por diminuir o gradiente meridional de calor entre os pólos e o equador.



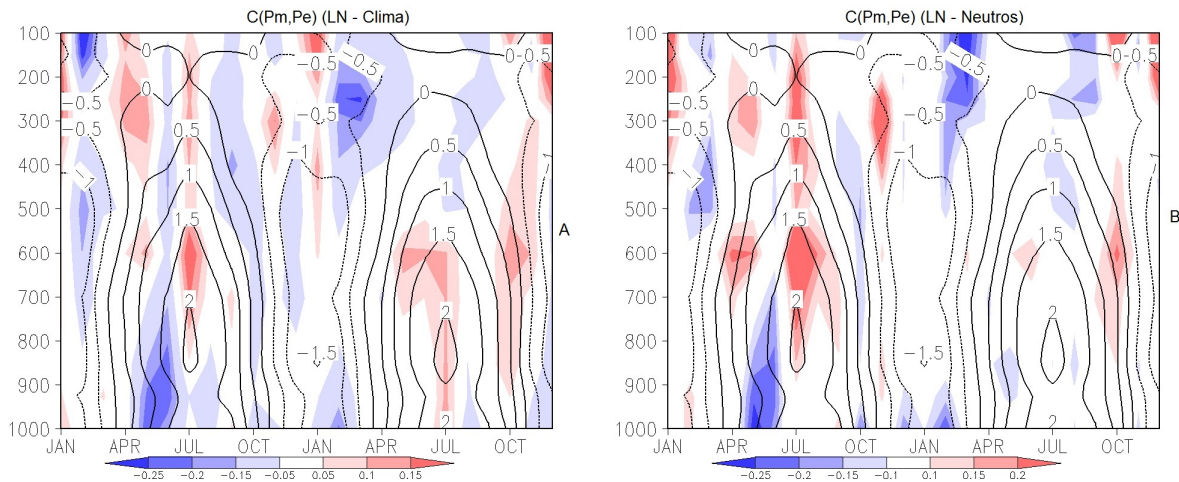
**Figura 4.59:** Anomalia da energia cinética zonal do composto de La Niña em relação à climatologia (a) e em relação ao composto de anos neutros (b) vista em cada nível de pressão entre janeiro do ano 0 e dezembro do ano 0+1. As unidades são em  $J.m^2.(100hPa)^{-1}$ .

A partir das Figuras 4.60a e 4.60b observam-se predominância de anomalias negativas de  $K_e$  em altos níveis durante todo o ano de gênese e entre abril e junho do ano 0+1. Ademais, observam-se anomalias positivas bem destacadas entre dezembro do ano 0 e março do ano 0+1, e com respeito a isto os padrões observados em  $K_e$  durante os eventos de La Niña, embora aproximadamente opostos, não são exatamente simétricos aos observados nos eventos do tipo El Niño. No geral, nota-se claramente que anomalias negativas são predominantes neste evento, portanto indicam que a energia cinética do distúrbio é enfraquecida durante as fases de La Niña.

Nas Figuras 4.61a e 4.61b mostram-se anomalias negativas da conversão  $C(P_m, P_e)$  na maior parte do perfil atmosférico. Identifica-se também um máximo negativo em altos níveis entre janeiro e março do ano 0+1 que é simetricamente oposto a um máximo observado no El Niño. No geral os resultados indicam que os eventos do tipo La Niña durante a fase de gênese tendem a enfraquecer a conversão de energia potencial do estado básico em energia potencial da perturbação.



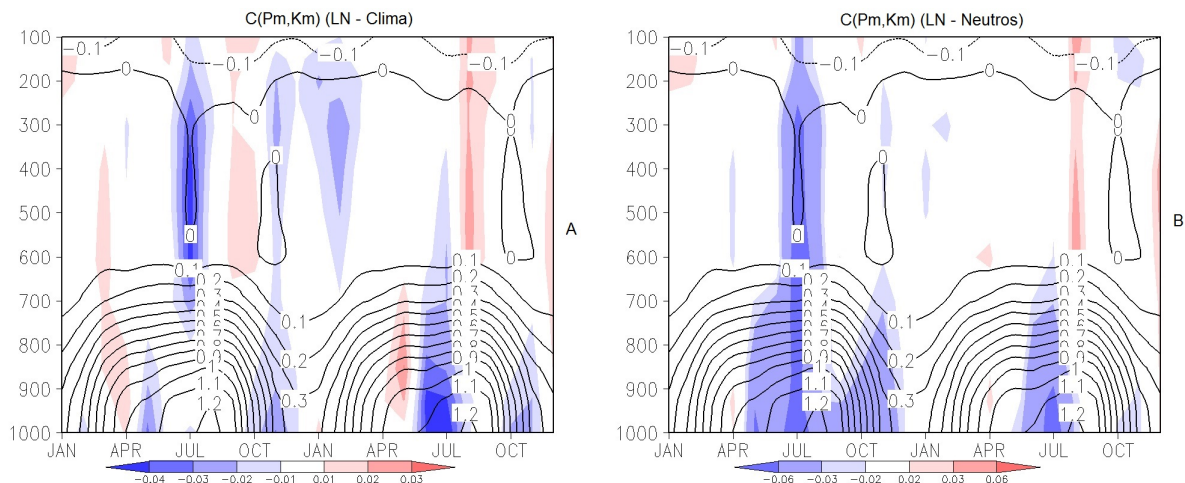
**Figura 4.60:** Anomalia da energia cinética da perturbação do composto de La Niña em relação à climatologia (a) e em relação ao composto de anos neutros (b) vista em cada nível de pressão entre janeiro do ano 0 e dezembro do ano 0+1. As unidades são em  $J.m^2.(100hPa)^{-1}$ .



**Figura 4.61:** Anomalia da conversão de energia potencial disponível zonal em energia potencial disponível da perturbação do composto de La Niña em relação à climatologia (a) e em relação ao composto de anos neutros (b) vista em cada nível de pressão entre janeiro do ano 0 e dezembro do ano 0+1. As unidades são em  $W.m^2.(100hPa)^{-1}$ .

Os resultados para a conversão  $C(P_m, K_m)$  (Figura 4.62a) mostram que há predominância de anomalia negativa durante todo o evento de La Niña, com um máximo situado entre 600-300 hPa entre julho e agosto do ano 0 e outro à superfície entre maio e julho do ano 0+1. O importante deste padrão é que contrasta com o observado para o El Niño nos mesmos níveis de pressão e fase do evento, sugerindo que ambos fenômenos imputam a atmosfera de forma diferente. Em relação aos anos neutros (Figura 4.62b), nota-se o aparecimento de uma anomalia negativa por maior parte do ano 0, que se estende desde a superfície ao nível de 700 hPa. Todavia, ambos resultados mostram que os eventos tipo La Niña tendem a enfraquecer a conversão entre  $P_m$  em  $K_m$ . E contrariamente ao discutido para os casos de El Niño, pode indiretamente favorecer a produção de energia cinética da perturbação ( $K_e$ ), uma vez que mais energia potencial dos estado básico é utilizada na produção

de energia potencial do distúrbio em vez de energia cinética do estado básico.



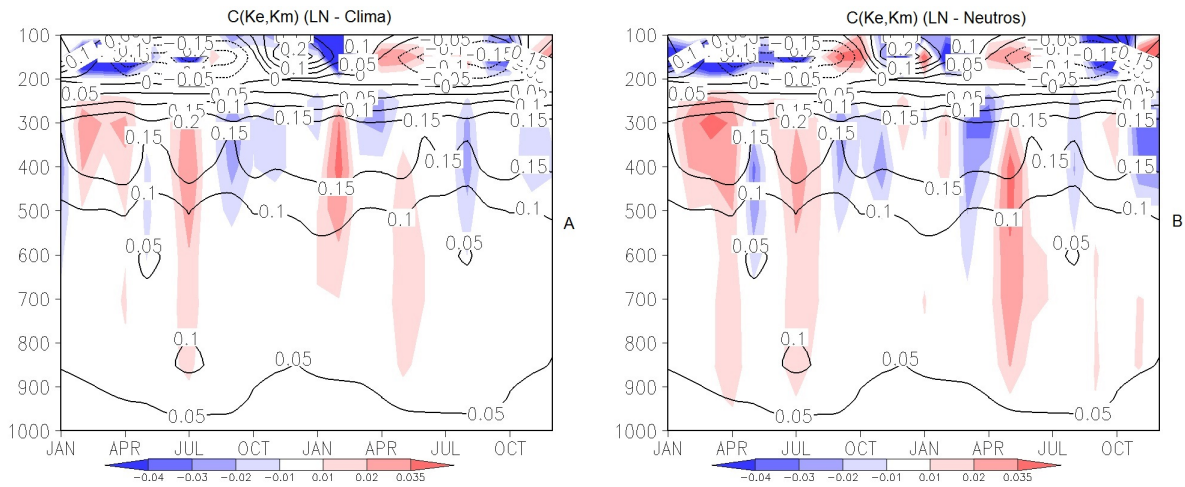
**Figura 4.62:** Anomalia da conversão de energia potencial disponível zonal em energia cinética zonal do composto de La Niña em relação à climatologia (a) e em relação ao composto de anos neutros (b) vista em cada nível de pressão entre janeiro do ano 0 e dezembro do ano 0+1. As unidades são em  $W.m^2.(100hPa)^{-1}$ .

Nas Figuras 4.63a e 4.63b observa-se que os maiores valores de anomalia de  $C(K_e, K_m)$  se encontram entre 500 hPa e 100 hPa e o que mais chama atenção neste termo é um comportamento simétrico ao El Niño quando se observa o padrão em altos níveis entre dezembro do ano 0 e maio do ano 0+1. Ademais, entre os meses de dezembro e janeiro, percebe-se um máximo de anomalia negativa entre 200 hPa e 100 hPa, onde no período de El Niño se via um máximo de anomalia positiva. Entre abril e maio, no mesmo nível, se vê um pico de anomalia positiva, onde se observa um máximo de anomalia negativa no período de El Niño. Em linhas gerais, existe intensificação da transferência de energia cinética do estado perturbado em energia cinética do estado básico durante eventos do tipo La Niña.

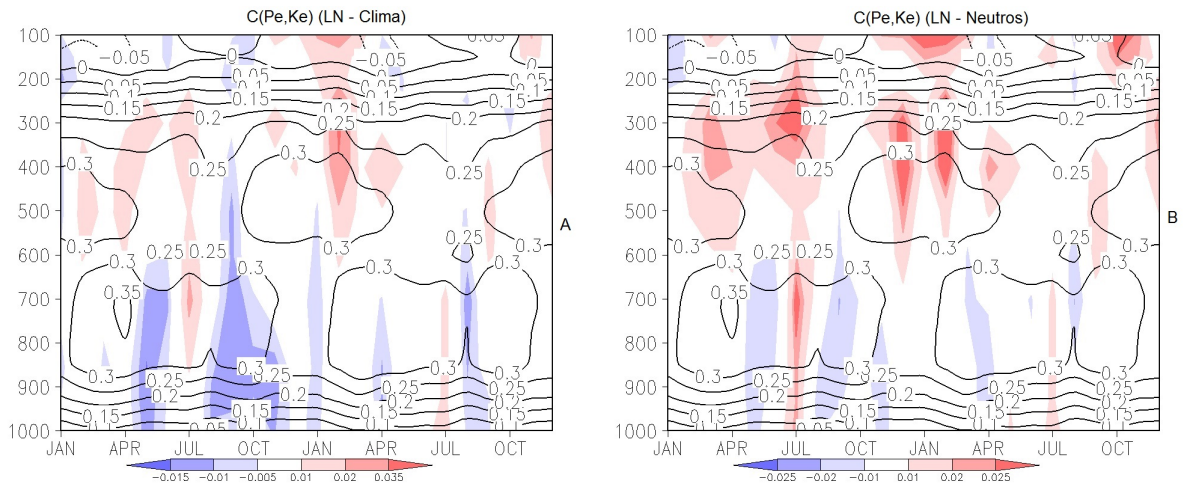
Os resultados referentes à conversão de  $P_e$  em  $K_e$  podem ser observados a partir das Figuras 4.64a e 4.64b, onde se observa padrão semelhante de anomalia que diferem apenas em intensidade. Os maiores valores de anomalia negativa são encontrados entre 1000-500 hPa entre maio e novembro do ano 0 e os maiores valores de anomalia positiva predominam entre 500-100 hPa.

Nota-se, entretanto, que as anomalias positivas são mais intensas que as negativas em ambos resultados, sugerindo que a conversão  $C(P_e, K_e)$  é fortalecida durante os eventos do tipo La Niña. Este resultado que é ratificado pelo que é observado na análise da conversão  $C(P_m, K_m)$ , onde a redução na produção de  $K_m$  leva indiretamente a maior produção de  $P_e$  ( $C(P_m, P_e)$ ) que favorece a produção de  $K_e$ .





**Figura 4.63:** Anomalia da conversão de energia cinética da perturbação em energia cinética zonal do composto de La Niña em relação à climatologia (a) e em relação ao composto de anos neutros (b) vista em cada nível de pressão entre janeiro do ano 0 e dezembro do ano 0+1. As unidades são em  $W.m^2.(100hPa)^{-1}$ .



**Figura 4.64:** Anomalia da conversão de energia potencial disponível da perturbação em energia cinética da perturbação do composto de La Niña em relação à climatologia (a) e em relação ao composto de anos neutros (b) vista em cada nível de pressão entre janeiro do ano 0 e dezembro do ano 0+1. As unidades são em  $W.m^2.(100hPa)^{-1}$ .

# Capítulo 5

## Conclusões

O objetivo principal do presente trabalho foi quantificar o impacto de eventos tipo ENOS sobre a energética global. Os impactos foram avaliados em termos de compostos de eventos El Niño e La Niña. Dentre o período de dados oriundos de reanálises, disponíveis entre 1979-2011, foram selecionados os, respectivos, eventos de El Niño e La Niña: 1982/83; 1986/87; 1991/92; 1997/98; 2009/10 e 1984/85; 1988/89; 1988/99; 1999/2000; 2010/2011. Os impactos foram avaliados através de comparações entre os componentes da energética de Lorenz para os compostos de El Niño/La Niña versus campos climatológicos e neutros. A climatologia da energética global foi obtida calculando-se os campos de energia para todo o período de estudo, 1979 a 2011. Os anos neutros foram considerados sendo aqueles que não continham os anos de El Niño e La Niña selecionados para os compostos. As análises da energética de Lorenz foram divididas em: a) análise do ciclo de Lorenz (diagramas de energia), b) análise do comportamento temporal do ciclo de energia e c) análise do campo bi-dimensional dos componentes do ciclo de energia de Lorenz. Neste último foi possível avaliar o campo da energética com dependência vertical.

Os resultados obtidos entre os meses de agosto (ano 0) do ano anterior, caracterizado como início do evento ENOS, a abril do ano seguinte, caracterizado como final do evento ENOS, (ano 0 + 1), mostram que o reservatório de energia potencial zonal possuem maiores valores em eventos tipo El Niño e que em eventos tipo La Niña o mesmo reservatório é notoriamente reduzido. Os valores do reservatório de Pe ficam abaixo dos valores da climatologia durante o período de El Niño e o contrário acontece no período de La Niña. No que diz respeito aos valores da energia potencial zonal nota-se claramente que eventos tipo El Niño causam aceleração do escoamento zonal associado as correntes de jato. Todavia, para eventos tipo La Niña a energia cinética associada ao estado básico enfraquece. Estes resultados mostram a clara influência que o gradiente meridional de temperatura exerce sobre o escoamento zonal uma vez que eventos tipo El Niño intensificam a diferença de temperatura entre os trópicos e os extratropicos. Porém, os resultados não mostram

relação oposta entre os dois tipos de eventos ENOS e o reservatório de energia cinética das perturbações. Para ambos tipos de eventos os valores do reservatório de energia cinética da perturbação diminuem, porém a maior queda é observada para eventos tipo La Niña. Ademais, o termo de conversão  $C(P_m, K_m)$ , é intensificado (desintensificado) durante eventos tipo El Niño (La Niña). Na comparação com anos neutros  $C(P_m, K_m)$  aumenta. Para as três condições, El Niño, La Niña e anos neutros, o termo  $C(P_m, P_e)$  inverte de direção, indicando que a energia potencial associada as perturbações age como fonte de energia para o reservatório do estado básico. Os valores do termo de conversão baroclínica  $C(P_e, K_e)$ , apresentam diminuição (aumento) durante eventos tipo El Niño (La Niña). Já o termo de conversão barotrópica,  $C(K_e, K_m)$ , apresentam enfraquecimento para ambos tipos de ENOS, com maior redução observada para os eventos de La Niña. Estes resultados sugerem que em anos de eventos tipo La Niña o transporte de energia cinética das perturbações para o estado básico é enfraquecido.

Quando observam-se as variações temporais dos termos da energética de Lorenz, importantes resultados são notados. Por exemplo, o aumento (a diminuição) da energia potencial do estado básico ocorre no início do evento tipo El Niño (La Niña). Por outro lado, no caso da energia cinética zonal o efeito dos eventos ENOS é mais notável da fase matura até o final do evento em questão. Estes resultados mostram que primeiramente o ENOS altera a energia potencial, durante o início do evento, e depois o efeito sobre a energia cinética zonal é sentido do meio para o final do evento. Os efeitos do ENOS sobre os estados perturbados,  $P_e$  e  $K_e$ , são menores do que sobre o estado básico. Durante os eventos El Niño a conversão entre  $P_m$  e  $K_m$  é mais influenciada entre a fase matura e final do evento. Efeito similar ocorre para os eventos tipo La Niña, todavia durante o início do evento.

Resultados importantes também são obtidos com a análise bi-dimensional dos termos de energia de Lorenz. Como é o caso da conversão de energia entre  $P_m$  e  $K_m$ , onde o aumento (diminuição) na produção da energia cinética do estado básico, durante o El Niño (a La Niña), leva indiretamente a uma diminuição (um aumento) na produção de energia cinética do estado perturbado ( $P_m \rightarrow P_e \rightarrow K_e$ ) e, por consequência, diminuição (aumento) na produção de energia cinética zonal ( $K_e \rightarrow K_m$ ). Uma vez que a energia potencial do estado básico é em maior (menor) parte utilizada na produção de energia cinética zonal do que na produção de energia potencial do distúrbio, a produção de energia cinética do estado perturbado é diminuída (aumentada). E ainda, a tendência de intensificação de  $C(P_m, P_e)$  observada na fase inicial dos compostos de El Niño justifica o aumento na produção de  $P_e$  observado.

Os demais termos relacionados ao ramo baroclínico,  $P_e$ ,  $C(P_m, P_e)$  e  $C(P_e, K_e)$ , não apresentaram alterações muito relevantes, provavelmente porque o estudo foi realizado para o domínio global. Por outro lado, isto abriu uma porta trabalhos futuros, que constariam da realização de estudo semelhante utilizando os compostos de El Niño, La Niña e anos neutros para domínios menores,

como:  $30^{\circ}\text{S} - 30^{\circ}\text{N}$ ,  $30^{\circ}\text{S} - 5^{\circ}\text{N}$  e  $45^{\circ}\text{S} - 5^{\circ}\text{N}$ , por exemplo. Possivelmente, a redução do domínio de estudo levará a alterações mais relevantes nesses termos de energia e conversão, que neste trabalho apresentaram variações pouco expressivas.

# Referências Bibliográficas

- [1] Andreolli, R. V. *Notas de Aula de Climatologia - Aula 4*. Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia/ Universidade do Estado do Amazonas. Manaus-AM. 2012.
- [2] Ayoade, J. O. *Introdução à Climatologia para os Trópicos*. 4ª edição. 1996.
- [3] Bjerknes, J. *Atmospheric Teleconnections from the Equatorial Pacific*. Monthly Weather Review, v. 97, num. 3, p. 163-172, 1969.
- [4] Boer, J. E. *Some Dynamical Consequences of Greenhouse Gas Warming*. Atmosphere-Ocean, v. 33, p. 731-751, 1995.
- [5] Deckers, D. H; von Storch, J. C. *Energetics Responses to Increases in Greenhouse Gas Concentration*. Journal of Climate, v. 23, p. 3840-3887, 2010.
- [6] Deckers, D. H; von Storch, J. C. *The energetics response to a warmer climate: relative contributions from the transient and stationary eddies*. Earth System Dynamics, v. 2, p. 105-120, 2011.
- [7] Deckers, D. H; von Storch, J. C. *Impact of Warming Pattern on Global Energetics*. Journal of Climate, v. 25, p. 5223-5240, 2012.
- [8] Dias Pinto, J. R. *Estudo da Estrutura dos Distúrbios de Escala Sinótica na Costa Leste da América do Sul*. Dissertação (Mestrado em Meteorologia). Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas. São Paulo-SP. 2010.
- [9] Holton, James. *An Introduction to Dynamic Meteorology*. 4ª edição. 2004.
- [10] Kalnay, E.; Kanamitsu, M.; Kistler, R.; Collins, W.; Deaven, D.; Gandin, L.; Iredell, M.; Saha, S.; White, G.; Woollen, J.; Zhu, Y.; Chelliah, M.; Ebisuzaki, W.; Higgins, W.; Janowiak, J.; Mo, K. C.; Ropelewski, C.; Wang, J.; Leetmaa, A.; Reynolds, R.; Jenne, R.; Joseph, D. *The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project*. Bulletin of the American Meteorological Society, v. 77, p. 437-471, 1996.

- [11] Kim, Y. H.; Kim, M. K. *Examination of the global lorenz energy cycle using MERRA and NCEP-reanalysis 2*. Clim Dyn, v. 40, p. 1499-1513, 2013.
- [12] Kistler, R.; Kalnay, E.; Collins, W.; S.Saha; White, G.; Woollen, J.; Chelliah, M.; Ebisuzaki, W.; Kanamitsu, M.; Kousky, V.; Dool, H. V.; Jenne, R.; Fiorino, M. *The NCEP/NCAR 50-year reanalysis: monthly means cd-rom and documentation*. Bulletin of the American Meteorological Society, v. 82, p. 247-267, 2001.
- [13] Kousky, V. E.; Kagano, M. T.; Cavalcanti, I. F. A. *A review of the Southern Oscillation: Oceanic-Atmospheric Circulation Changes and Related Rainfall Anomalies*. Tellus, v. 36A, p. 490-504, 1984.
- [14] Krishnamurti, T. N.; Bounoua, L. *An Introduction to Numerical Predictions Techniques*. 1996.
- [15] Lorenz, E. N. *Available Potencial Energy and the Maintenance of the General Circulation*. Tellus, 1955.
- [16] Lorenz, E. N. *Large-Scale Motions of the Atmosphere: Circulation*. 1966.
- [17] Lorenz, E. N. *The Nature and Theory of the General Circulation of the Atmosphere..* WMO, cap. II e V, 1967.
- [18] Lorenz, E. N. *Available Energy and the Maintenance of a Moist Circulation*. Tellus, v. 30, p. 15-31, 1978.
- [19] Marques, C. A. F.; Rocha, A.; Corte-Real, J.; Castanheira, J. M.; Ferreira, J.; Melo-Golçalves, P. *Global Atmospheric Energetics from NCEP-Reanalysis 2 and ECMWF-ERA40 Reanalysis*. International Journal of Climatology, v. 29, p. 159-174, 2010.
- [20] Oort A. H. *On Estimates of the Atmospheric Energy Cycle*. Monthly Weather Review, v. 92, num. 11, p. 483-493, 1964.
- [21] Peixoto, J. P.; Oort, A. H. *The Annual Distribution of Atmospheric Energy on a Planetary Scale*. Journal of Geophysical Research, v. 79, nº 15. 1974.
- [22] Peixoto, J. P.; Oort, A. H. *Physics of Climate*. 1992.
- [23] Saltzman, B. *Equations Governing the Energetics of the Larger Scales of Atmospheric Turbulence in the Domain of Wave Number*. Journal of Meteorology, v. 14, p. 513-523, 1957.
- [24] Silva, L. A. da. *Energética Atmosférica na América do Sul e Oceanos Adjacentes e Impactos Climáticos de Agentes aturais*. Tese (Doutorado em Meteorologia). Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. São José dos Campos-SP. 2010.

- [25] Stone, P. H.; Chervin, R. M. *The Influence of Ocean Surface Temperature Gradient and Continentality on the Walker Circulation Part II: Prescribed Global Changes*. Monthly Weather Review, v. 112, p. 1524-1534, 1984.
- [26] Torrence, C.; Compo, G. P. *Practical Guide to Wavelet Analysis*. Bulletin of the American Meteorological Society, v. 78, num. 12, p. 2771-2777, 1998.
- [27] Varejão-Silva, M. A. *Meteorologia e Climatologia*. 3ª edição. 2006.
- [28] Veiga, J. A. P. *Mecanismos de Formação e Manutenção da Circulação de Walker*. Tese (Doutorado em Meteorologia). Instituto Nacional de Pesquisa Espaciais. São José dos Campos-SP. 2004.
- [29] Veiga, J. A. P.; Pezza, A. B.; Ambrizzi, T.; Rao, V. B.; Franchito, S. H.; Yoshida, M. C. *The Energy Associated to the Pacific Walker Circulation and Its Relationship to ENSO*. Atmospheric and Climate Sciences, v. 3, p. 627-642, 2013.
- [30] Wallace, J. M.; Hobbs, P. V. *Atmospheric Science - An Introductory Survey*. 2006.
- [31] [http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis\\_monitoring/ensostuff/ensoyears.shtml](http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ensoyears.shtml)  
Fonte dos dados de TSM.