

## UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ INSTITUTO DE RECURSOS NATURAIS PROGRAMA DE GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS

# ANÁLISE DA ENERGÉTICA DE QUATRO CICLONES SUBTROPICAIS NO OCEANO ATLÂNTICO SUL

MONOGRAFIA DE GRADUAÇÃO

Karina Reciate da Costa

Itajubá, MG, Brasil

2019

## ANÁLISE DA ENERGÉTICA DE QUATRO CICLONES SUBTROPICAIS QUE RECEBERAM NOME NO OCEANO ATLÂNTICO SUL

por

## Karina Reciate da Costa

Monografia apresentada à comissão examinadora Programa de Graduação em Ciências Atmosféricas da Universidade Federal Itajubá (UNIFEI, MG), como requisito parcial para obtenção do grau de **Bacharel em Ciências Atmosféricas.** 

Orientadora: Professora Dra. Michelle Simões Reboita Coorientador: Professor Dr. Manoel Alonso Gan

Itajubá, MG, Brasil

2019

## Universidade Federal de Itajubá Instituto de Recursos Naturais Programa de Graduação em Ciências Atmosféricas

A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova a Monografia

## ANÁLISE DA ENERGÉTICA DE QUATRO CICLONES SUBTROPICAIS QUE RECEBERAM NOME NO OCEANO ATLÂNTICO SUL

elaborada por

Karina Reciate da Costa

Como requisito parcial para a obtenção do grau de

Bacharel em Ciências Atmosféricas

Comissão Examinadora:

Michelle S. Rebrita

Michelle Simões Reboita, Dr<sup>a</sup>. (UNIFEI) (Presidente/Orientadora)

10 amel Alouso Que

\_\_\_\_\_

Manoel Alonso Gan, Dr. (INPE)



Sergio Henrique Soares Ferreira, Dr. (INPE)

Itajubá, 27 de junho de 2019.

### AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Valter Luiz e Marileia por todo o apoio aos meus estudos, às minhas irmãs Camila e Carolina pela torcida constante e ao meu sobrinho, Vinicius, por ser minha maior fonte de perguntas científicas não respondidas.

Aos meus orientadores, professores Michelle e Gan, pela paciência e dedicação e por serem profissionais que me servem de grande inspiração, assim como ao Sergio Henrique, que muito me auxiliou neste trabalho.

Aos meus colegas de graduação pelas inúmeras vezes em que me auxiliaram, seja tecnicamente ou puramente por terem sido companhia com quem sempre pude contar.

Aos demais professores do curso de Ciências Atmosféricas, bem como a todos os servidores da universidade, desde as responsáveis pela limpeza até os funcionários da secretaria e dos laboratórios, que fazem diariamente com que a instituição funcione e se consolide a cada dia mais, cada um com o seu mérito.

Dedico este trabalho aos meus pais, Marileia e Valter.

"O começo de todas as ciências é o espanto de as coisas serem o que são." Aristóteles

#### RESUMO

Monografia de Graduação Programa de Graduação em Ciências Atmosféricas Universidade Federal de Itajubá, MG, Brasil

## ANÁLISE DA ENERGÉTICA DE QUATRO CICLONES SUBTROPICAIS QUE RECEBERAM NOME NO OCEANO ATLÂNTICO SUL

#### AUTORA: KARINA RECIATE DA COSTA ORIENTADORA: Profa. Dra. MICHELLE SIMÕES REBOITA Itajubá, 27 de junho de 2019.

Este trabalho analisou a energética de quatro casos de ciclones subtropicais que ocorreram no Oceano Atlântico Sul, de 2010 a 2016, em complemento ao trabalho "Key Features and Adverse Weather of the Named Subtropical Cyclones over the Southwestern South Atlantic Ocean. Atmosphere". Utilizando análises numéricas do modelo Global Forecast System (GFS) e o programa Energética, desenvolvido no Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC), foram calculados, através da metodologia de Orlanski e Katzfey, os termos das conversões baroclínica, barotrópica e desenvolvimento corrente abaixo da energia dos ciclones subtropicais Anita, Arani, Bapo e Eçaí. Nos casos Anita, Arani e Bapo, o termo baroclínico domina a conversão de energia potencial do estado básico para o distúrbio na intensificação dos sistemas, sendo também o principal mecanismo responsável pelo decaimento desses ciclones, no geral. No ciclone Eçaí, o termo do desenvolvimento corrente abaixo domina os processos de intensificação do sistema, bem como o seu decaimento, diferentemente dos outros casos analisados. Nos quatro casos, Anita, Arani, Bapo e Eçaí, notou-se uma tendência inversamente proporcional nas variações dos temos de conversões baroclínicas e barotrópicas da energia cinética do distúrbio.

Palavras-chave: Instabilidade Baroclínica. Conversão de Energia. Energia Cinética. Energia Potencial. Tempestades Subtropicais.

### ABSTRACT

Monografia de Graduação Programa de Graduação em Ciências Atmosféricas Universidade Federal de Itajubá, MG, Brasil

### ENERGETIC ANALYSIS OF FOUR SUBTROPICAL CYCLONS THAT RECEIVED NAMES IN SOUTH ATLANTIC

#### AUTORA: KARINA RECIATE DA COSTA ORIENTADORA: Profa. Dra. MICHELLE SIMÕES REBOITA Itajubá, 27 de junho de 2019.

This study analyzed the energetics of four cases of subtropical cyclones that occurred in the South Atlantic Ocean, from 2010 to 2016, in addition to the work "Key Features and Adverse Weather of the Named Subtropical Cyclones over the Southwestern South Atlantic Ocean. Atmosphere. " Using the numerical analysis of the Global Forecast System (GFS) model and the Energetic program developed at the Center for Weather Forecasting and Climate Studies (CPTEC), the terms of the baroclinic, barotropic and downstream development conversions were calculated using Orlanski and Katzfey current below the energy of the subtropical cyclones Anita, Arani, Bapo and Eçaí. In the cases of Anita, Arani and Bapo, the term baroclinic dominates the conversion of potential energy from the basic state to the disturbance in the intensification of the systems, being also the main mechanism responsible for the decay of these cyclones in general. In the Eçaí cyclone, the downstream development dominates the intensification processes of the system, as well as its decay, unlike the other cases analyzed. In the four cases, Anita, Arani, Bapo and Eçaí, we noticed an inversely proportional tendency in the variations of the baroclinic and barotropic conversions of the kinetic energy of the disturbance.

Keywords: Baroclinic instability. Energy Conversion. Kinetic energy. Potential energy. Subtropical Storms.

### LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Trajetórias dos ciclones estudados. Todos tiverem sua gênese próximo à costa do Brasil e se dissiparam no ponto mais adentro do oceano. a) Anita; b) Arani; c) Bapo; d) Cari; e) Deni; f) Eçaí17

Figura 3. Idem a Figura 2. Momento da ciclogênese do ciclone subtropical Anita, 06Z06MAR2010 .. 20

Figura 4. Idem a Figura 2. Momento da maturidade do ciclone subtropical Anita, 12Z09MAR2010 ... 21

Figura 5. Idem a Figura 2. Momento do decaimento e do ciclone subtropical Anita, 12Z12MAR2010 22

Figura 7. Quadros da esquerda para a direita, de cima para baixo: Energia cinética do distúrbio (K') integrada na vertical (cores - Jkg-1.10-2) e vetor vento em 300 hPa (ms-1); Termo de conversão baroclínica (BRC - cores – Wkg-1.10-3) e altura geopotencial em 925 hPa (linhas contínuas); Termo de conversão barotrópica (BRT - cores – Wkg-1.10-3) e altura geopotencial em 300 hPa (linhas contínuas); Termo de convergência do fluxo ageostrófico (DSD - cores – Wkg-1.10-3) e vetor do fluxo ageostrófico. O quadrado em linhas pretas em torno do ciclone representa a região onde foi feita a integração no volume. Momento da pré-ciclogênese do ciclone subtropical Arani, 12Z12MAR2011..24

Figura 8: Idem a Figura 7. Momento da ciclogênese do ciclone subtropical Arani, 12Z15MAR2011..25

Figura 9: Idem a Figura 7. Momento da maturidade do ciclone subtropical Arani, 12Z15MAR2011 ... 26

Figura 10: Idem a Figura 7. Momento do decaimento do ciclone subtropical Arani, 12Z21MAR2011 27

Figura 12. Quadros da esquerda para a direita, de cima para baixo: Energia cinética do distúrbio (K') integrada na vertical (cores - Jkg-1.10-2) e vetor vento em 300 hPa (ms-1); Termo de conversão baroclínica (BRC - cores – Wkg-1.10-3) e altura geopotencial em 925 hPa (linhas contínuas); Termo de conversão barotrópica (BRT - cores – Wkg-1.10-3) e altura geopotencial em 300 hPa (linhas contínuas); Termo de convergência do fluxo ageostrófico (DSD - cores – Wkg-1.10-3) e vetor do fluxo ageostrófico. O quadrado em linhas pretas em torno do ciclone representa a região onde foi feita a integração no volume. Momento da pré-ciclogênese do ciclone subtropical BAPO, 18Z04FEB2015. 29

Figura 13. Idem a Figura 12. Momento da gênese do ciclone subtropical BAPO, 06Z07FEB2015..... 30

 Figura 15. Idem a Figura 12. Momento do decaimento do ciclone subtropical BAPO, 06Z10FEB2015

Figura 17. Quadros da esquerda para a direita, de cima para baixo: Energia cinética do distúrbio (K') integrada na vertical (cores - Jkg-1.10-2) e vetor vento em 300 hPa (ms-1); Termo de conversão baroclínica (BRC - cores – Wkg-1.10-3) e altura geopotencial em 925 hPa (linhas contínuas); Termo de conversão barotrópica (BRT - cores – Wkg-1.10-3) e altura geopotencial em 300 hPa (linhas contínuas); Termo de convergência do fluxo ageostrófico (DSD - cores – Wkg-1.10-3) e vetor do fluxo ageostrófico. O quadrado em linhas pretas em torno do ciclone representa a região onde foi feita a integração no volume. Momento da pré-ciclogênese do ciclone subtropical EÇAÍ, 00Z04DEC2016...34

Figura 18: Idem à Figura 17. Momento da gênese do ciclone subtropical EÇAÍ, 06Z04DEC2016...... 35

Figura 19: Idem à Figura 17. Momento da maturidade do ciclone subtropical EÇAÍ, 06Z05DEC2016 36

Figura 20: Idem à Figura 17. Momento do decaimento do ciclone subtropical EÇAÍ, 18Z06DEC201637

## LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

- $F_0$  Somatória das Forças Viscosas
- V Vetor Velocidade do Vento
- AS América do Sul
- CPTEC Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos
- CPS Cyclone Phase Space
- DCA Desenvolvimento Corrente Abaixo
- DEC Dezembro
- DSD Downstream Development (mesmo que DCA)
- Ekli Energia Cinética do Distúrbio
- FEB Fevereiro
- GFS Global Forecast System
- hPa Hectopascal
- INPE Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
- JBN Jatos de Baixos Níveis
- Jkg Joules por Kilograma
- K Energia Cinética
- K' Energia Cinética do Distúrbio
- Kg Kilograma
- lat Latitude
- Ion Longitude
- m Metros
- MAR Março
- ms-1 Metro por Segundo
- NCEI Nacional Centers for Environmental Information
- NOAA Nacional Ocean and Atmospheric Administration
- NOMADS Nacional Operation Model Archive and Distribution System
- Pa Pascal
- Pas-1 Pascal por Segundo
- R Resíduo
- res Resíduo
- TEC Tendência da Energia Cinética Calculada

- TEO Tendência da Energia Cinética Observada
- Wkg Watts por Kilograma
- $\alpha$  Volume Específico
- $\omega$  Velocidade Vertical
- $\phi$  Geopotencial

## SUMÁRIO

	vi
ABSTRACT	Erro! Indicador não definido.
LISTA DE FIGURAS	viii
LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS	x
1. INTRODUÇÃO	11
2. METODOLOGIA	14
2.1. Formulação de Orlanski e Katzfey (1991)	14
	45
2.2. Dados	
2.3. Modelo Energética	
2.3. Modelo Energética 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	
2.3. Modelo Energética 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	16 17
<ul> <li>2.3. Modelo Energética</li> <li>3. RESULTADOS E DISCUSSÃO</li> <li>3.3. Energética dos Sistemas</li> </ul>	
<ul> <li>2.3. Modelo Energética</li></ul>	
<ul> <li>2.3. Modelo Energética</li></ul>	
<ul> <li>2.3. Modelo Energética</li></ul>	16 
<ul> <li>2.3. Modelo Energética</li></ul>	16 17 18 18 24 29 34
<ul> <li>2.3. Modelo Energética</li></ul>	16 17 18 18 24 29 34 39
<ul> <li>2.3. Modelo Energética</li></ul>	16 17 18 18 18 24 29 34 39 40

#### 1. INTRODUÇÃO

Diversos distúrbios meteorológicos apresentam padrões tipo-onda e podem ter seus processos dinâmicos na atmosfera melhor representados através de métodos de análise de energia, particularmente em termos de atividade de ondas e a advecção, conversão e radiação da energia das ondas.

A energética fornece informações quantitativas quanto a origem, crescimento e dissipação de diversos tipos de distúrbios meteorológicos, possibilitando avaliar diretamente as principais conversões de energia envolvidas no processo (baroclínicas, barotrópicas, convergência do fluxo ageostrófico, tendência da energia cinética do distúrbio e outras) e obter uma visão geral do sistema, integrado verticalmente nas camadas em que ocorre, bem como explicitar os processos físicos principais na formação e manutenção desses distúrbios.

Estudos sobre a energética de sistemas atmosféricos podem ser encontrados em Orlanski e Katzfey (1991), que analisaram uma tempestade tropical no Hemisfério Sul; Gan e Rao (1999), que avaliaram distúrbios de alta frequência sobre a América do Sul (AS); Chang (2000), que estudou o papel dos pacotes de ondas nas interações do fluxo médio durante o verão no hemisfério Sul; Veiga et al. (2008), que realizou a análise energética do ambiente no qual se formou o tropical Catarina, em Piva et al. (2010) que analisou os cavados que atingem a América do Sul (AS) no escoamento no inverno da AS; Pezza et al. (2010), que analisou a energética do ambiente de uma tempestade de alta latitude, Dias Pinto e da Rocha (2011), que avaliaram o ciclo de energia de Lorenz sobre uma área limitada, para três ciclones com diferentes origens e evoluções, onde cada um deles foi formado em uma importante região ciclogênica perto do sudeste da América do Sul.; Ferreira (2013), que computou a análise energética dos jatos em baixos níveis (JBN) na borda oriental da Cordilheira dos Andes, Rosa et al. (2013), que realizou uma análise do ciclo energético de 58 casos de ciclogênese ocorridos de 2003 a 2011 na costa sul do Brasil, Gan e Piva (2013) que estudaram a energética de eventos de cut-off low sobre o Pacífico Sul e AS, Pezza et al. (2014), que neste estudo analisa as características em grande escala da energética subtropical de baixo Duck, na Austrália e Muller et al. (2015, 2017), que estudou a energética de ondas de frio que atingiram a AS.

Além da instabilidade baroclínica e da instabilidade barotrópica, a instabilidade e o desenvolvimento corrente abaixo (DCA) são as principais teorias de gênese e intensificação de sistemas transientes (Nielssen-Gammon, 1995). A conversão baroclínica, conversão de energia potencial disponível do distúrbio em energia cinética do distúrbio, está associada com a circulação direta, isto é, com ar quente ascendendo e ar frio descendo. A conversão barotrópica, conversão de energia cinética do estado básico para energia cinética do distúrbio, está associada com transporte horizontal e vertical de momento angular absoluto pelas perturbações (Lorenz, 1967).

O desenvolvimento corrente abaixo (DSD) é um dos mecanismos conhecidos de formação e intensificação de cavados em médios e altos níveis e baseia-se no conceito de que um cavado pode crescer recebendo energia de um cavado préexistente localizado corrente acima (a oeste) através dos fluxos ageostróficos. A teoria da instabilidade baroclínica e do DCA são os mecanismos que podem explicar a formação e intensificação da maioria dos sistemas transientes nas latitudes médias.

De modo geral, sistemas transientes são os responsáveis por determinar as condições de tempo na América do Sul ao longo do ano, tanto sobre o continente, como nos oceanos que a delimitam. Com relação aos fenômenos de tempo, o setor sudoeste do oceano Atlântico Sul é propício ao desenvolvimento de ciclones e entre eles têm-se os subtropicais (Dias Pinto et al., 2013, Gozzo et al., 2014). Esses sistemas possuem características híbridas, isto é, possuem núcleo quente simétrico em baixos níveis, como os ciclones tropicais e frio em altos níveis, como os extratropicais.

São escassos os estudos sobre a energética dos ciclones subtropicais; há o de Dias Pinto et al. (2013) que realizaram a análise energética usando o equacionamento de Lorenz(1955) do ciclone subtropical Anita no oceano Atlântico Sul, e seus resultados indicam que o sistema começou como um ciclone subtropical puro, com os termos da energia cinética da perturbação e conversão barotrópica dominando sua evolução. Após esse processo, evoluiu para uma condição favorável à transição tropical, de modo que nesse período os fluxos de calor turbulento (latente e sensível) do oceano diminuíram, e as conversões de energia baroclínicas foram mais importantes.

Cavicchia et al. (2018) também estudou a energética de um ciclone subtropical (Duke) e de um extratropical (Pasha Bulker) próximos da costa leste da Austrália. Os autores também usaram a formulação de Lorenz (1955). No ciclone subtropical, os termos de conversão de energia barotrópica e baroclínica têm uma magnitude comparável durante a formação e evolução da tempestade. O ciclone extratropical, por outro lado, mostra a estrutura térmica típica de um ciclone baroclínico.

Reboita et al. (2019) descrevem as características sinóticas de seis ciclones subtropicais que receberam nome no oceano Atlântico Sul. A fim de complementar o estudo de Reboita et al. (2019), o presente trabalho tem como objetivo analisar os processos de conversões de energia na atmosfera para quatro dos seis casos de ciclones subtropicais, ocorridos entre 2010 e 2016, através da formulação de Orlanski e Katzfey (1991), que permite utilizar a integração das quantidades energéticas calculadas em um volume de controle, que se move com o sistema ao longo do tempo, além de também apresentar os principais mecanismos de instabilidade baroclínica, barotrópica e convergência de fluxo ageostrófico.

#### 2. METODOLOGIA

Foram utilizados dados de análises numéricas do modelo *Global Forecast System* (GFS) e os cálculos da energética foram baseados na formulação de Orlanski e Katzfey (1991), implementada no Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) pelo Dr. Sérgio Henrique Soares Ferreira.

#### 2.1. Formulação de Orlanski e Katzfey (1991)

A análise da energética empregada no presente estudo é baseada na formulação de Orlanski e Katzfey (1991), composto por diversas equações obtidas a partir da equação do movimento e na decomposição dos escoamentos atmosféricos estado básico e distúrbio. A principal equação utilizada é a equação da tendência da energia cinética do distúrbio em termos de quantidades energética por unidade de massa (1). Durante o desenvolvimento desta equação, ocorre o cancelamento do termo relativo a força de Coriolis e a separação em equação de energia para o estado básico e para o estado perturbado (Ferreira, 2013) resultando na equação 1.

$$\frac{dK'}{dt} + \underbrace{\left(\underset{V_{m}}{\rightarrow} \cdot \nabla\right)K'}_{2} + \underbrace{\left(\underset{V_{m}}{\rightarrow} \cdot \nabla_{3}\right)K'}_{3} = \\
= \underbrace{-\left(\underset{V'}{\rightarrow} \cdot \nabla\phi'\right)}_{4} - \underbrace{\omega'\alpha'}_{5} - \underbrace{\left(\underset{V'}{\rightarrow} \cdot \nabla_{3} \xrightarrow{V_{m}}\right)}_{6} + \underbrace{V'}_{V'} \cdot \underbrace{\left(\underset{V'}{\rightarrow} \cdot \nabla_{3} \xrightarrow{V'}_{N}\right)}_{6} + \underbrace{V'}_{V'} \cdot \underbrace{\left(\underset{V'}{\rightarrow} \cdot \nabla_{3} \xrightarrow{V'}_{N}\right)}_{7}$$
(1)

onde as variáveis sobrescritas com (') referem-se as variáveis do distúrbio, e os termos subscritos com (m) referem-se aos valores do estado básico. A variável K é a energia cinética,  $\frac{1}{V}$  é o vetor velocidade do vento,  $\omega$  a velocidade vertical do vento,  $\alpha$  o volume específico,  $\Phi$  o geopotencial,  $\frac{1}{F0}$  corresponde à somatória das forças viscosas e R é o resíduo. Os termos enumerados correspondem: 1) tendência local da energia cinética; 2) advecção de energia cinética do distúrbio pelo estado básico; 3) advecção de energia cinética do distúrbio pelo estado básico; 5) advecção de

vertical de geopotencial ou conversão baroclínica; 6) conversão de energia pelo stress de Reynolds ou conversão barotrópica; 7) resíduos provenientes dos erros numéricos e outras forças resistivas.

O termo R representa, de modo geral, mecanismos não modelados pela equação, como os efeitos de fricção, efeitos diabáticos, efeitos de montanha, fluxos de sub-grade, além de erros embutidos por métodos numéricos como interpolação e derivadas.

Integrada verticalmente, essa equação fornece o resultado das quantidades energéticas na vertical.

A formulação de Orlanski e Katzfey foi implementada no Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC), do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) pelo pesquisador Dr. Sérgio Henrique Soares Ferreira, o qual denominou o programa de "Energética". Esse modelo foi utilizado para o estudo dos seis ciclones subtropicais em análise e seu funcionamento será melhor explicado no item 2.3 da presente seção.

#### 2.2. Dados

Os dados utilizados foram obtidos do Nacional Centers for Environmental Information (NCEI), da Nacional Ocean and Atmospheric Administration (NOAA), do projeto NOAA National Operational Model Archive and Distribution System (NOMADS) (Alpert e Wang, 2004). Trata-se de dados de análises numéricas do modelo GFS, do período de fevereiro de 2010 a janeiro de 2017, com 0.5º de resolução horizontal e intervalo de tempo de 6 h (0000, 0006, 0012, 0018Z), disponíveis em ftp://nomads.ncdc.noaa.gov/GFS/analysis\_only/.

Os dados possuem grade horizontal de 360 x 181 pontos e 31 níveis verticais que vão de 1000 hPa a 1 hPa, além de 116 variáveis meteorológicas. Dessas 116, utilizaram-se nove variáveis para os cálculos e análises realizados no programa *Energética*. São elas a topografia (altura do relevo em metros), altura geopotencial (m), pressão à superfície (em Pa), pressão do nível isobárico (em Pa), temperatura do ar (K), umidade específica ou razão de mistura (adimensional, kg/kg), componente zonal do vento (ms-1), componente meridional do vento (ms-1) e Vento vertical (ms-1) ou Omega (Pas-1). Em níveis verticais, a análise vai até o nível de 100 hPa.

#### 2.3. Modelo Energética

O modelo Energética implementa a formulação de Orlanski e Katzfey (1991), adaptada por Chang (2000). Seu funcionamento se dá em quatro etapas sequenciais, que são, respectivamente, 1. Obtenção do Estado Básico, 2. Cálculo da Energética Cinética dos Distúrbios, 3. Obtenção da Máscara de Integração e 4. Cálculo da Energética Integrada no volume. A versão 1.9 do programa *Energética*, desenvolvido no CPTEC, na linguagem Fortran-90, foi utilizada na obtenção dos resultados desse estudo. A conversão de energia cinética do distúrbio é calculada conforme a equação (1), apresentada na seção 2.1.

A obtenção do estado básico corresponde ao estado médio da atmosfera, sem a existência específica do distúrbio estudado. Calcula-se os termos de energia cinética do estado básico. Para cada um dos ciclones estudados, usou-se dados de 30 dias antes e 30 dias após a ciclogênese para obter o estado básico da atmosfera. Estes resultados são utilizados no passo seguinte, para obtenção da energética dos distúrbios e na integração vertical dos resultados. Os dois primeiros passos são processados para todo o domínio do modelo e na terceira etapa, é gerada uma máscara para uma região de estudo. Esta máscara é utilizada no passo seguinte (passo 4) para obter a evolução dos termos de energética no tempo, integrada no volume de controle em torno do distúrbio.

A tendência da K' é obtida como Tendência da K' Observada (TEO) e a Tendência de K' Calculada (TEC). A primeira é dada pela diferença entre dois campos de K' no decorrer de dois passos de tempo, um 6 horas antes e o outro 6 horas depois do tempo de referência, e a segunda através da soma de todos os termos do lado direito da equação (1), exceto o termo residual (R).

Quando integrados em volume em torno do sistema meteorológico de interesse, obtém-se informações de como as conversões de energia evoluem ao longo do tempo, indicando os processos físicos envolvidos na formação, intensificação de dissipação dos sistemas estudados. Nesse passo, é necessário fornecer as dimensões do volume onde será realizada a integração. O tamanho desse volume irá variar de acordo com o ciclone e os centros de energia cinética envolvidos no processo e a integração vertical é efetuada até o nível de 100 hPa.

#### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os casos analisados foram o Anita que teve sua gênese (Reboita et al. 2019) em 06 de março de 2010, o Arani em 14 de março de 2011, o Bapo em 05 de fevereiro de 2015 e o Eçaí em 04 de dezembro de 2016. Houve problemas com a análise energética dos ciclones Cari (10 de março de 2015) e Deni (5 de novembro de 2016). No caso do Cari, de acordo com Oliveira (2019), a duração do ciclone foi de 10 dias, tendo a ciclólise em 17 de março de 2015, e na fonte de dados utilizada, não há dados para o dia 10 de março de 2015 e, para o dia 11, pouco antes do sistema atingir a maturidade, os dados disponíveis são apenas as análises das 12Z e 18Z. Sendo esses dados faltantes coincidentes com dias de atuação importantes do sistema, a análise não pôde ser realizada. Para o ciclone Deni, os dados disponíveis apresentam valores de ordem muito superior à média dos outros casos em variáveis dos níveis acima de 850 hPa, o que é um possível erro que inviabilizou os cálculos.

As trajetórias desses sistemas estão representadas na Figura 1. A característica de subtropical desses seis ciclones foi registrada pelo CPS em Reboita et al. (2019).



Figura 1: Trajetórias dos ciclones estudados. Todos tiverem sua gênese próximo à costa do Brasil e se dissiparam no ponto mais adentro do oceano. a) Anita; b) Arani; c) Bapo; d) Eçaí.

Para compreender melhor a dinâmica desses sistemas é realizada a análise de energética que está apresentada na próxima seção.

#### 3.1. Energética dos Sistemas

#### 3.1.1 Ciclone Subtropical Anita

O ciclone subtropical Anita formou-se como um sistema puramente subtropical e, ao longo de seu desenvolvimento, adquiriu características semelhantes àquelas apresentadas durante o desenvolvimento do tropical Catarina, com padrão de bloqueio de dipolo nos níveis superiores reduzindo o cisalhamento vertical do vento e o desenvolvimento de um olho simétrico em sua estrutura de nebulosidade. No entanto, ao se aproximar da costa Sul do Brasil, o sistema enfraqueceu e se tornou um ciclone extratropical, diferentemente de Catarina, que se transformou em ciclone tropical. Durante todo o seu ciclo de vida, Anita produziu ventos intensos e precipitação perto do litoral (Dutra, 2012).

#### Pré-ciclogênese (00Z de 06 de março de 2010)

O ambiente da fase de pré-ciclogênese do ciclone Anita apresentava núcleos de energia cinética do distúrbio, tendo um centro de intensidade dessa energia que corta perpendicularmente o volume de integração do sistema. Esse período é marcado por pouca atividade barotrópica e baroclínica no volume de integração do ciclone e núcleos consideráveis do termo DSD, BRC e BRT, tanto ao redor do ciclone como ao sul do sistema (Figura 2).



Figura 2. Quadros da esquerda para a direita, de cima para baixo: Energia cinética do distúrbio (K') integrada na vertical (cores - Jkg-1.10-2) e vetor vento em 300 hPa (ms-1); Termo de conversão baroclínica (BRC - cores – Wkg-1.10-3) e altura geopotencial em 925 hPa (linhas contínuas); Termo de conversão barotrópica (BRT - cores – Wkg-1.10-3) e altura geopotencial em 300 hPa (linhas contínuas); Termo de convergência do fluxo ageostrófico (DSDi - cores – Wkg-1.10-3) e vetor do fluxo ageostrófico. O quadrado em linhas pretas em torno do ciclone representa a região onde foi feita a integração no volume. Pré-ciclogênese do ciclone subtropical Anita, 00Z06MAR2010.

#### Ciclogênese (06Z de 06 de março de 2010)

Na fase de ciclogênese, as configurações da energética se alteram relativamente pouco em relação ao estágio anterior, sendo que o sistema passa por uma pequena expansão e os termos BRC e BRT do ciclone se intensificam ligeiramente, ao mesmo tempo que intensifica o núcleo negativo do DSD (Figura 3). O geopotencial em 925 hPa mostra circulação fechada.



Figura 3. Idem a Figura 2. Momento da ciclogênese do ciclone subtropical Anita, 06Z06MAR2010.

#### Maturidade (12Z de 09 de março de 2010)

No estágio de maturidade do Anita, um núcleo bem configurado de K' se organiza ao redor da perturbação, com um formato de vírgula invertida. Nesse momento, a atividade baroclínica é fraca no volume de integração do ciclone e consideravelmente maior ao redor dele, com relação ao estágio anterior, a atividade barotrópica do sistema aumenta, enquanto a do ambiente ao redor diminui e o termo DSD' torna-se mais considerável (Figura 4).



Figura 4. Idem a Figura 2. Momento da maturidade do ciclone subtropical Anita, 12Z09MAR2010.

#### Decaimento (12Z de 12 de março de 2010)

Na ciclólise do Anita, nota-se ainda valores altos de K' e a intensificação núcleo postivo do DSD (exportando energia K' para fora do distúrbio). A atividade baroclínica também mostra expressivos núcleos positivos nessa fase (Figura 5).



Figura 5. Idem a Figura 2. Momento do decaimento e do ciclone subtropical Anita, 12Z12MAR2010.



Figura 6: Evolução Temporal da tendência da energia cinética para o ciclone subtropical Anita, integrada no cubo representado pelo retângulo traçado nas Figuras 2 a 4, para o período de 6 a 12 de março de 2010: Ekli- energia cinética do distúrbio, DSD- termo de desenvolvimento corrente abaixo, BRC- termo baroclínico, BRT- termo barotrópico, ETO – tendência da energia cinética calculado pela derivada no tempo, ETC- tendência da energia cinética, res- resíduo.

O máximo de K' observado coincide com a fase de maturidade do ciclone, sendo que ocorre um novo pico da variável pouco após do decaimento. As conversões baroclínicas de energia dominam a energética do ciclone em suas fases iniciais e no decaimento, esse termo se equipara ao BRT e desenvolvimento corrente abaixo, de modo que o BRT é maior na maior parte do estágio final do Anita. No decaimento, há um pico positivo da variável res (resíduo), o que sugere que há a atuação de mecanismos não modelados pela equação no processo.

#### 3.3.2 Ciclone Subtropical Arani

O ciclone Arani é um ciclone com estrutura subtropical típica, formado no sudoeste do oceano Atlântico Sul, próximo à costa da região sul do Brasil, tendo apresentado estrutura térmica híbrida desde a gênese: quente em baixos níveis como os ciclones tropicais e frio em níveis médios/altos como os extratropicais e não transiciona durante sua atuação (Reboita et al., 2017b).

#### Pré-ciclogênese (12Z de 12 de março de 2011)

O ciclone Arani se teve sua fase pré-ciclogenese em um ambiente de K' escassa, bem como poucas conversões baroclínicas e barotrópicas ocorrendo no volume de integração. Com relação ao termo DSD, são observados pequenos centros de convergência e divergência do fluxo ageostrófico nas bordas do sistema (Figura 7).



Figura 7. Quadros da esquerda para a direita, de cima para baixo: Energia cinética do distúrbio (K') integrada na vertical (cores - Jkg-1.10-2) e vetor vento em 300 hPa (ms-1); Termo de conversão baroclínica (BRC - cores – Wkg-1.10-3) e altura geopotencial em 925 hPa (linhas contínuas); Termo de conversão barotrópica (BRT - cores – Wkg-1.10-3) e altura geopotencial em 300 hPa (linhas contínuas); Termo de convergência do fluxo ageostrófico (DSDi - cores – Wkg-1.10-3) e vetor do fluxo ageostrófico. O quadrado em linhas pretas em torno do ciclone representa a região onde foi feita a integração no volume. Momento da pré-ciclogênese do ciclone subtropical Arani, 12Z12MAR2011.

#### Ciclogênese (12Z de 14 de março de 2011)

Na fase de ciclogênese, núcleos negativos de DSD surgem no setor leste e noroeste do distúrbio, bem como há um núcleo positivo de atividade baroclínica, em fase com o local onde, no volume de integração, aparece um núcleo de energia cinética.



Figura 8: Idem a Figura 7. Momento da ciclogênese do ciclone subtropical Arani, 12Z14MAR2011.

#### Maturidade (12Z de 15 de março de 2011)

Ao atingir a fase de maturidade, o Arani permanece em um ambiente prioritariamente mais baroclínico (núcleos positivos mais intensos), especialmente em seu setor leste, e a divergência do DSD se intensifica (Figura 9).



Figura 9: Idem a Figura 7. Momento da maturidade do ciclone subtropical Arani, 12Z15MAR2011.

#### Decaimento (12Z de 21 de março de 2011)

Na ciclólise do sistema, os termos BRC e BRT praticamente não apresentam contribuições e na altura geopotencial ainda se vê o ciclone fechado, mas em enfraquecimento. O termo DSD' apresenta pequenos núcleos nas bordas do volume de controle (Figura 10).



Figura 10: Idem a Figura 7. Momento do decaimento do ciclone subtropical Arani, 12Z21MAR2011.



Figura 11: Evolução Temporal da tendência da energia cinética para o ciclone subtropical Arani, integrada no cubo representado pelo retângulo traçado nas Figuras 6 a 8, para o período de 14 a 21 de março de 2011: Ekli- energia cinética do distúrbio, DSD- termo de desenvolvimento corrente abaixo, BRC- termo baroclínico, BRT- termo barotrópico, ETO – tendência da energia cinética calculado pela derivada no tempo, ETC- tendência da energia cinética calculada pela equação de tendência da energia cinética, res- resíduo.

O pico de K' ocorre dias depois da maturidade do sistema. O termo BRT permanece durante todos os estágios do ciclone em comportamento quase linear, oscilando perto de 0.

A predominância do termo baroclínico durante quase todas as fases do ciclone mostra que foi através dessa transformação que o distúrbio teve energia potencial disponível da perturbação convertida em K' e, no decaimento, converteu K' para energia potencial do distúrbio , sendo que nesse momento há uma colaboração significativa também do termo DSD para a ciclólise, em pelo menos um momento do processo (Figura 11).

#### 3.3.3 Ciclone Subtropical Bapo

O ciclone subtropical Bapo foi o primeiro desenvolveu-se a cerca de 400 km a sudeste do estado de São Paulo. A tempestade produziu ondas fortes ao longo da costa entre as regiões Sul e Sudeste do Brasil, causando ressaca e alguns danos.

#### Pré-ciclogênese (18Z de 04 de fevereiro de 2015)

A pré-ciclogênese do ciclone subtropical Bapo ocorreu em um ambiente com núcleos discretos de conversão de energia pelo termo BRC, à leste do volume de integração e de conversão BRT, ao sul. Núcleos de convergência e divergência de DSD são observados por todo o volume, sendo os de divergência os mais expressivos. Há fluxo de K' (Figura 12).



Figura 12. Quadros da esquerda para a direita, de cima para baixo: Energia cinética do distúrbio (K') integrada na vertical (cores - Jkg-1.10-2) e vetor vento em 300 hPa (ms-1); Termo de conversão baroclínica (BRC - cores – Wkg-1.10-3) e altura geopotencial em 925 hPa (linhas contínuas); Termo de conversão barotrópica (BRT - cores – Wkg-1.10-3) e altura geopotencial em 300 hPa (linhas contínuas); Termo de convergência do fluxo ageostrófico (DSDi - cores – Wkg-1.10-3) e vetor do fluxo ageostrófico. O quadrado em linhas pretas em torno do ciclone representa a região onde foi feita a integração no volume. Momento da pré-ciclogênese do ciclone subtropical BAPO, 18Z04FEB2015.

#### Ciclogênese (06Z de 05 de fevereiro de 2015)

No momento da ciclogênese, a quantidade de K' aumenta consideravelmente, com núcleos mais intensos nas bordas sul e oeste no volume de integração. Há aumento dos núcleos negativos das conversões de energia barotrópicas e baroclínicas, bom como do DSD (Figura 13).



Figura 13. Idem a Figura 12. Momento da gênese do ciclone subtropical BAPO, 06Z07FEB2015.

#### Maturidade (06Z de 07 de fevereiro de 2015)

Núcleos bem definidos de K' podem ser notados no distúrbio na fase de maturidade. Há um outro núcleo de K', mais intenso, à sudeste do sistema. O termo BRC fica mais positivo e há mais núcleos positivos do termo de conversão barotrópica observados. O núcleo negativo de divergência do fluxo ageostrófico aumenta (Figura 14).



Figura 14. Idem a Figura 12. Momento da maturidade do ciclone subtropical BAPO, 06207FEB2015.

#### Decaimento (06Z de 10 de fevereiro de 2015)

No decaimento, DSD torna-se mais positivo, há mais conversão baroclínica de energia e o fluxo de K' não diminui (Figura 15).



Figura 15. Idem a Figura 12. Momento do decaimento do ciclone subtropical BAPO, 06Z10FEB2015.



Figura 16: Evolução Temporal da tendência da energia cinética para o ciclone subtropical Bapo, integrada no cubo representado pelo retângulo traçado nas Figuras 10 a 12, para o período de 5 a 10 de fevereiro de 2015: Ekli- energia cinética do distúrbio, DSD- termo de desenvolvimento corrente abaixo, BRC- termo baroclínico, BRT- termo barotrópico, ETO – tendência da energia cinética calculado pela derivada no tempo, ETC- tendência da energia cinética calculada pela equação de tendência da energia cinética, res- resíduo.

Há, também nesse ciclone, o predomínio das conversões baroclínicas de energia em praticamente toda a fase de maturidade ao decaimento do sistema. Nas fases de pré-ciclogênese e ciclogênese, o termo DSD se equipara ao BRC. O comportamento do termo BRT é secundário, variando em torno de 0 (Figura 16). O termo de resíduo aumenta no decaimento do sistema.

#### 3.3.4 Ciclone Subtropical Eçaí

#### Pré-ciclogênese (00Z de 04 de dezembro de 2016)

A pré-ciclogênese do ciclone Eçaí ocorre em um ambiente com muita dominância do termo DSD, que possui núcleos intensos de convergência e divergência também no volume de integração. Há também alguns núcleos K' e dos termos BRC e BRT, negativos e positivos em proporções equiparáveis (Figura 17).



Figura 17. Quadros da esquerda para a direita, de cima para baixo: Energia cinética do distúrbio (K') integrada na vertical (cores - Jkg-1.10-2) e vetor vento em 300 hPa (ms-1); Termo de conversão baroclínica (BRC - cores – Wkg-1.10-3) e altura geopotencial em 925 hPa (linhas contínuas); Termo de conversão barotrópica (BRT - cores – Wkg-1.10-3) e altura geopotencial em 300 hPa (linhas contínuas); Termo de convergência do fluxo ageostrófico (DSDi - cores – Wkg-1.10-3) e vetor do fluxo ageostrófico. O quadrado em linhas pretas em torno do ciclone representa a região onde foi feita a integração no volume. Momento da pré-ciclogênese do ciclone subtropical EÇAÍ, 00Z04DEC2016.

#### Ciclogênese (06Z de 04 de dezembro de 2016)

No processo de gênese, aumenta a K', o núcleo de divergência de DSD diminui no volume de integração e o de convergência ganha mais expressão, bem como as conversões barotrópicas de energia, que ganham um núcleo positivo bem configurado no distúrbio (Figura 18).



Figura 18: Idem à Figura 17. Momento da gênese do ciclone subtropical EÇAÍ, 06Z04DEC2016.

#### Maturidade (06Z de 05 de dezembro de 2016)

Na fase madura do Eçaí, o núcleo de K' fica muito bem configurado e mais intenso, o termo de divergência de DSD volta a aumentar, as conversões de energia pelo termo BRC aumentam, tanto em núcleos positivos quanto em negativos, e o núcleo positivo de BRT se desconfigura e núcleos negativos aparecem (Figura 19).



Figura 19: Idem à Figura 17. Momento da maturidade do ciclone subtropical EÇAÍ, 06Z05DEC2016.

#### Decaimento (18Z de 06 de dezembro de 2016)

No decaimento do sistema cai a quantidade de K', as trocas de energia por conversão baroclínica diminuem e ainda é muito intensa a DSD' em todo o ambiente. A atividade BRT' diminui, mas é mais expressiva que BRC' (Figura 20).



Figura 20: Idem à Figura 17. Momento do decaimento do ciclone subtropical EÇAÍ, 18Z06DEC2016.



Figura 21: Evolução Temporal da tendência da energia cinética para o ciclone subtropical Eçaí, integrada no cubo representado pelo retângulo traçado nas Figuras 14 a 16, para o período de 4 a 6 de dezembro de 2016: Ekli- energia cinética do distúrbio, DSD- termo de desenvolvimento corrente abaixo, BRC- termo baroclínico, BRT- termo barotrópico, ETO – tendência da energia cinética calculado pela derivada no tempo, ETC- tendência da energia cinética calculada pela equação de tendência da energia cinética, res- resíduo.

Diferente dos demais, nesse ciclone há o domínio do desenvolvimento corrente abaixo, tanto na intensificação, como no decaimento do sistema. O termo BRT não varia muito, ficando próximo a 0 e o termo BRC apresenta comportamento similar (Figura 21).

#### 5. CONCLUSÃO

Este trabalho teve como objetivo complementar a análise realizada por Reboita et al. (2019), que descreveram as características sinóticas de seis casos de ciclones subtropicais no oceano Atlântico Sul. Aqui foram estudados 4 casos desses ciclones subtropicais: Anita, Arani, Bapo e Eçaí.

Com relação ao trabalho de Cavicchia et. al. (2018), que mostrou que no ciclone subtropical Duke os termos BRT e BRC eram comparáveis, tal característica só foi observada no ciclone Eçaí e, em menor grau, no ciclone Bapo. No que se refere ao trabalho de Dias Pinto et.al (2013), a análise energética sugeriu que os termos K' e BRT dominaram sua fase como híbrido puro e o termo BRC dominou a fase de transição para extratropical. Nos casos Anita, Arani e Bapo, o termo BRC domina a conversão de energia potencial do estado básico para o distúrbio na intensificação dos sistemas e também é a principal conversão responsável pelo decaimento desses sistemas, no geral. No ciclone Eçaí, o termo do desenvolvimento corrente abaixo domina os processos de intensificação do sistema, bem como o seu decaimento.

É importante ressaltar que o tamanho do volume de integração, terceiro passo dos cálculos, não irá alterar nos cálculos efetuados, pois a integração na vertical é feita por unidade de massa. Em Dias Pinto et al. (2013), o domínio foi delimitado por uma área de 25° lat x 25° lon, enquanto no presente estudo essa máscara de integração muda de tamanho a cada passo de tempo que for necessário, para acompanhar o ciclone em seu desenvolvimento, de modo a envolver o distúrbio em baixos níveis e seu centro de K'.

#### 6. REFERÊNCIAS

ALPERT, J. C.; WANG, Jun. **The real time NOMADS project: Access to operational model data and value-added products**. In: Proc. 20th Conf. on Interactive Information Processing Systems (IIPS) for Meteorology, Oceanography, and Hydrology. 2004.

CAVICCHIA, Leone; DOWDY, Andrew; WALSH, Kevin. Energetics and dynamics of subtropical Australian east coast cyclones: two contrasting cases. Monthly Weather Review, v. 146, n. 5, p. 1511-1525, 2018.

CHANG, E.K.M.; Wave packets and life cycles of troughs in the upper troposphere: Examples from the souther hemisphere summer season of **1984/85**. Monthly Weather Review, v.128, p.25-50,2000.

DIAS PINTO, J. R.; DA ROCHA, R. P. The energy cycle and structural evolution of cyclones over southeastern South America in three case studies. Journal of Geophysical Research, v. 116, D14112, doi:10.1029/2011JD016217, 2011.

DIAS PINTO, J. R.; REBOITA, M. S.; da ROCHA, R. P. Synoptic and dynamical analysis of subtropical cyclone Anita (2010) and its potential for tropical transition over the South Atlantic Ocean. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, v. 118, p. 10870–10883, 2013.

DUTRA L. M. M.; daROCHA, R. P.; LEE, R. W. Structure and evolution of subtropical cyclone Anita as evaluated by heat and vorticity budgets. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. v. 143, p. 1539–1553, 2017.

FARREL, B. F. Modal and non-modal baroclinic waves. Journal of the Atmospheric Sciences, v. 41, n. 4, p. 668-673. 1984.

FERREIRA, S. H. S. Energética de eventos de jato em baixos níveis durante o SALLJEX. 2013. 222 p. IBI: <8JMKD3MGP7W/3E2SL38>. (sid.inpe.br/mtcm19/ 2013/04.30.13.22-TDI). Tese (Doutorado em Meteorologia) - Instituto Nacional de

Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2013. Disponível em: <a href="http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/3E2SL38">http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/3E2SL38</a>>.

GAN, M. A.; RAO, V. B. Energetics of the high frequency disturbances over South America. Revista Brasileira de Geofísica, v. 17, n. 1, p. 21-28, 1999.

GAN, M. A.; DAL PIVA, E. Energetics of a Southeastern Pacific cut-off low. Atmospheric Science Letters, v. 14, n. 4, p. 272-280, 2013. DOI: <10.1002/asl2.451>. Disponível em: <a href="http://dx.doi.org/10.1002/asl2.451">http://dx.doi.org/10.1002/asl2.451</a>.

GOZZO, L. F.; daROCHA, R. P.; REBOITA, M. S.; SUGAHARA, S. Subtropical cyclones over the southwestern South Atlantic: Climatological aspects and case study. Journal of Climate, v.27, p.8543–8562, 2014.

HOLTON, James R.; HAKIM, Gregory J. **An introduction to dynamic meteorology.** 2004.

LORENZ, E. N. (1955), Available potential energy and the maintenance of the general circulation. Tellus, 7, 157–167, doi:10.1111/j.2153-3490.1955. tb01148.x.

MÜLLER, G. V.; GAN, M. A.; PIVA, E. D.; PICCININI, V. S. Energetics of wave propagation leading to cold event in tropical latitudes of South America. Climate Dynamics, v. 45, p. 1–20, 2015.

MÜLLER, G. V.; GAN, M. A.; PIVA, E. D. Energetics of wave propagation leading to frost events in South America: extratropical latitudes. Atmospheric Science Letters, v. 18, p. 342–348, 2017, doi:10.1002/asl.762.

NIELSSEN-GAMMON, J. W. Dynamical conceptual models of upper-level mobile trough formation: Comparison and application. Tellus, 47A, n. 5, p. 705-721. Out 1995.

ORLANSKI, I.; KATZFEY,J. The life cycle of a cyclone wave in the southern hemisphere. part I: eddy energy budget. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v.48, n.17 p.1972-1998, 1991.

PETTERSSEN S. SMEBYE S.J. On the development of extratropical cyclones. Quart. J. R. Met. Soc., 97, 457-482. 1971.

PEZZA, A. B.; GARDE, L. A.; VEIGA, J. A. P.; SIMMONDS, I. Large scale features and energetics of the hybrid subtropical low 'Duck' over the Tasman Sea. Climate Dynamics. v. 42, p. 453–466, 2014.

PEZZA, A. B.; VEIGA, J. A. P.; SIMMONDS, I.; KEAY, K. Environmental energetics of an exceptional high-latitude storm. Atmospheric Science Letters, v. 11, p. 39–45. 2010.

PIVA, E.D.; GAN, A. M.; RAO, V. B. Energetics of Winter Troughs Entering South America. Monthly Weather Review, v. 138, p. 1084-1103, 2010.

REBOITA, M., DA ROCHA, R., OLIVEIRA, D. M. Key Features and Adverse Weather of the Named Subtropical Cyclones over the Southwestern South Atlantic Ocean. Atmosphere, v. 10(1), p. 6, 2019.

ROSA, M. B. et al. Energetics of cyclogenesis events over the southern coast of **Brazil.** Revista Brasileira de Meteorologia, São Paulo, v. 28, n. 3, p. 231-245, 2013.

VEIGA, J.; PEZZA, A.; SILVA DIAS, P. L. An analysis of the energetics on the transition of the first South Atlantic Hurricane. Geophysical Research Letters, v. 35, L15806, 2008.