

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO MESTRADO EM MEIO
AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS**

Débora Martins de Oliveira

**ANÁLISE SINÓTICA DE SEIS CICLONES SUBTROPICAIS NO
SUDOESTE DO OCEANO ATLÂNTICO SUL E EXPERIMENTOS
NUMÉRICOS DE SENSIBILIDADE**

**Itajubá-MG
Março, 2019**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO MESTRADO EM MEIO
AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS**

Débora Martins de Oliveira

**ANÁLISE SINÓTICA DE SEIS CICLONES SUBTROPICAIS NO
SUDOESTE DO OCEANO ATLÂNTICO SUL E EXPERIMENTOS
NUMÉRICOS DE SENSIBILIDADE**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-graduação em Meio Ambiente e Recursos Hídricos, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Meio Ambiente e Recursos Hídricos.

Área de concentração:

Meio Ambiente e Recursos Hídricos

Orientadora:

Prof^a Dra. Michelle Simões Reboita

**Itajubá-MG
Março, 2019**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO MESTRADO EM MEIO
AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS**

Débora Martins de Oliveira

**ANÁLISE SINÓTICA DE SEIS CICLONES SUBTROPICAIS NO
SUDOESTE DO OCEANO ATLÂNTICO SUL E EXPERIMENTOS
NUMÉRICOS DE SENSIBILIDADE**

Dissertação aprovada por banca examinadora em 15 de março de 2019 conferindo à autora o título de **Mestre em Ciências em Meio Ambiente e Recursos Hídricos.**

Banca Examinadora:

Prof^a Dra. Michelle Simões Reboita (Orientadora)
Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI

Prof. Dr. Roger Rodrigues Torres
Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI

Prof^a Dra. Rosmeri Porfirio da Rocha
Universidade de São Paulo – USP

Prof^a Dra. Marta Pereira Llopart
Universidade Estadual Paulista - UNESP

**Itajubá-MG
Março, 2019**

AGRADECIMENTOS

- À professora *Michelle Simões Reboita*, primeiramente pela amizade, paciência, otimismo e compreensão; por ser um exemplo de profissional para mim; por todos os ensinamentos e incentivos; e pelo apoio e atenção para a realização deste trabalho;
- Aos meus pais, *Fabiana e Luciano*, que estiveram ao meu lado durante todo esse período me apoiando incondicionalmente e sendo minha base para continuar;
- À toda minha família, em especial à minha vó *Rosaceleste*, que é minha inspiração de vida;
- Aos amigos especiais que sempre estiveram presentes nos melhores momentos e também estavam ao meu lado nos momentos mais difíceis: *Heloísa, Jéssica, Michel, Diego, Josi, Ygor e Leandro*;
- A todos os professores do colegiado do programa de Mestrado em Meio Ambiente e Recursos Hídricos, em especial a coordenadora *Fabrina Bolzan Martins*, pela amizade e pelo profissionalismo;
- A todos os professores da UNIFEI que contribuíram para a minha formação;
- Aos membros da banca do Exame de Qualificação, Professores *Rosmeri Porfirio da Rocha, Marta Pereira Llopart e Roger Rodrigues Torres*, pelas sugestões e críticas construtivas que contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho;
- Ao grupo do laboratório GREC do IAG-USP, em especial à *Lívia Dutra* por toda a ajuda nas etapas de simulação numérica deste trabalho;
- Ao IAG-USP pela oportunidade de fazer as simulações numéricas e matérias eletivas;
- À CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pela concessão da bolsa de Mestrado e pelo apoio financeiro.

Dedico este trabalho aos meus pais, Fabiana e Luciano.

“Não importa se a estação do ano muda...
Se o século vira, se o milénio é outro.
Se a idade aumenta...
É preciso conservar a vontade de viver,
Não se chega a parte alguma sem ela.”

Fernando Pessoa

RESUMO

OLIVEIRA, Débora Martins de. **Análise Sinótica de Seis Ciclones Subtropicais no Sudoeste do Oceano Atlântico Sul e Experimentos Numéricos de Sensibilidade.** 2019. 76 f. Dissertação (Mestrado em Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Instituto de Recursos Naturais, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2019.

Este trabalho apresenta as principais características de seis ciclones subtropicais ocorridos entre os anos de 2010 e 2016 sobre o sudoeste do Oceano Atlântico, através de dados da reanálise ERA5 do *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF). Com relação aos dados de reanálise, observou-se que o cisalhamento vertical do vento mais fraco do que a climatologia, o suprimento de calor e umidade e a presença de um cavado ou de um padrão tipo bloqueio nos níveis médios/altos da atmosfera foram elementos importantes para a ciclogênese subtropical em superfície. Em relação à estrutura vertical dos ciclones subtropicais, em baixos níveis predominou ar mais quente que a média zonal e em médios/altos níveis, ar mais frio. Com relação à vorticidade relativa ciclônica, o tubo vertical de vorticidade não se inclinou com o aumento da altura, como nos ciclones extratropicais, e foram mais raso do que em ciclones tropicais. Também se realizaram experimentos numéricos para verificar o potencial do ciclone Anita se transformar de subtropical para tropical. Para isso, foi utilizado o modelo *Weather Research and Forecast* (WRF), que foi dirigido com dados do *Global Forecast System* (GFS) do *National Centers for Environmental Prediction* (NCEP). Inicialmente a performance do modelo em simular o Anita foi testada com o uso de três esquemas de parametrizações de *cumulus* - Kain-Fritsch (new Eta - KF), Betts-Miller-Janjic *scheme* (BM) e Grell 3D *ensemble scheme* (Grell) - e iniciando a simulação 24 horas antes da gênese do ciclone. Uma vez verificada melhor performance com o esquema BM, avaliou-se a sensibilidade do modelo a diferentes tempos de inicialização: 24, 48 e 72 h. Com 24h de antecedência o ciclone Anita (ERA5) foi melhor representado. Então foram feitos dois tipos de experimentos de sensibilidade com essa simulação considerando uma alteração na Temperatura da Superfície do Mar (TSM). No primeiro tipo a TSM foi aquecida em 2°C ao longo de toda a simulação e no outro a TSM foi aquecida a partir do dia 9 de março, quando o ciclone tinha potencial para transicionar para tropical, até o decaimento do sistema. Nesse segundo, a TSM foi aumentada em 1°C, 2°C e 4°C, respectivamente. As simulações foram avaliadas através do *Cyclone Phase Space* (CPS). O experimento com aquecimento contínuo da TSM mostra que o ciclone altera sua trajetória, tem gênese como subtropical e do dia 10 para 11 o sistema transiciona para tropical; já nos experimentos com a TSM alterada a partir do dia 9, as 3 condições de TSM não afetam a trajetória do sistema, mas também geram condições para o sistema transicionar para tropical, sendo que quanto maior é o aumento de temperatura, mais características de tropical o ciclone adquire.

Palavras chave: ERA5; ciclogênese; WRF; parametrização de *cumulus*; CPS.

ABSTRACT

OLIVEIRA, Débora Martins de. **Synoptic Analysis of Six Subtropical Cyclones in the Southwestern South Atlantic Ocean and Numerical Sensitivity Experiments.** 2019. 76 f. Master of Science Dissertation (Master in Environment and Water Resources) – Natural Resources Institute, Federal University of Itajubá, Itajubá, 2019.

This study presents the main characteristics of six subtropical cyclones that occurred between the years 2010 and 2016 on the Southwest Atlantic Ocean, through data from the European Center for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) reanalysis. Vertical wind shear weaker than climatology, heat and moisture supply, and the presence of a trough or block pattern in the upper / middle levels of the atmosphere are important elements for surface subtropical cyclogenesis. Regarding the vertical structure of the subtropical cyclones, at lower levels, air is warmer than the zonal average and in the medium / high levels, cooler air. With respect to cyclonic relative vorticity, the vertical all-vorticity does not tilt with increasing height, as in extratropical cyclones, and is shallower than in tropical cyclones. Numerical experiments were also carried out to verify the potential of Anita to transform from subtropical to tropical. In order to evaluate that, the Weather Research and Forecast (WRF) model, which was managed with data from the National Centers for Environmental Prediction (NCEP) Global Forecast System (GFS) was used. The model performance in Anita simulation was tested using three Kain-Fritsch (New Eta-KF), Betts-Miller-Janjic scheme (BM) and Grell 3D ensemble schemes (Grell) parametrization schemes and initiating the simulation 24 hours before the genesis of the cyclone. Once the best performance was verified with the BM scheme, the sensitivity of the model was evaluated at different start time scales: 24, 48 and 72 h. The 24h simulation in advance cyclone Anita (ERA5) was best represented. Two types of sensitivity experiments were then made with this simulation considering a change in Sea Surface Temperature (SST). In the first type the SST was heated at 2°C throughout the simulation and in the other the TSM was heated from March 9, when the cyclone had the potential to transition to tropical until the system decayed. In that second, SST was increased 1°C, 2°C and 4°C, respectively. The simulations were evaluated through the Cyclone Phase Space (CPS). The experiment with continuous heating of the TSM shows that the cyclone changes its trajectory, has genesis as subtropical and from day 10 to 11 the system transitions to tropical, already in the experiments with the modified SST from day 9, the 3 conditions of SST not affected the trajectory of the system, but also generated conditions for the system to do a transition to tropical, and the more the temperature is increased, the more tropical characteristics the cyclone acquires.

Keywords: ERA5; cyclogenesis; WRF; cumulus parameterization; CPS.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Densidade anual de ciclogêneses no Atlântico Sul. Na escala de cor da figura, o valor 1,5 corresponde a aproximadamente 37,5 sistemas. Adaptado de Reboita et al. (2010).	18
Figura 2 - Localizações geográficas de ciclones em desenvolvimento (1981- 2011) durante o verão no Hemisfério Sul. Ciclones Extratropicais (azul), Ciclones Tropicais (vermelho) e Ciclones Subtropicais (Verde). Em destaque os Ciclones Subtropicais que atingem a região sudoeste do Oceano Atlântico Sul. Adaptado de Yanasse et al. (2014).	21
Figura 3 – Pressão ao nível do mar (hPa), temperatura em 925 hPa (° C) e vento (ms ⁻¹). L's vermelho e azul mostram a posição do Anita próximo ao centro de um ciclone extratropical. Adaptado de Dias Pinto et al., (2013).	22
Figura 4 - Evolução temporal ciclone subtropical Anita. Adaptado de Dutra et al. (2017)....	22
Figura 5 - Ciclogênese subtropical com dados do NCEP1 e do ERAInt. Adaptado de Gozzo et al. (2014).	23
Figura 6 – Visualização do algoritmo CPS. Fase 1: -V _T ^L versus B. Adaptado de Hart (2003).	26
Figura 7 - Visualização do algoritmo CPS. Fase 2: -V _T ^L versus -V _T ^U . Adaptado de Hart (2003).	26
Figura 8 - Exemplo de CPS para cada tipo de ciclone, publicado por Reboita et al. (2017b).	27
Figura 9 – Trajetória dos Ciclones estudados. Os pontos iniciais das trajetórias estão indicados pela letra I e os pontos finais pela letra F.	36
Figura 10 – Altura geopotencial em 500 hPa (m;cor) e pressão ao nível médio do mar (hPa; contorno) para a gênese e maturidade de: (a-d) Anita; (b-e) Arani e (c-f) Bapo. L indica a posição do centro do ciclone.	40
Figura 11 - Altura geopotencial em 500 hPa (m;cor) e pressão ao nível médio do mar (hPa; contorno) para a gênese e maturidade de: (a-d) Cari; (b-e) Deni e (c-f) Eçaí. L indica a posição do centro do ciclone.	40
Figura 12 - Temperatura de brilho próximo a 11 microns (K; cor) e intensidade e direção do vento a 925 hPa (m s ⁻¹ ;vetor) para a maturidade de: (a) Anita; (b) Arani; (c) Bapo; (d) Cari; (e) Deni; (f) Eçaí.	42
Figura 13 – Fluxos de calor latente + sensível (Wm ⁻² ;cor) e vorticidade em 925 hPa (10 ⁻⁵ s ⁻¹ ;contorno) para a gênese e maturidade de: (a-d) Anita; (b-e) Arani e (c-f) Bapo. L indica a posição do centro do ciclone.	44

Figura 14 – Fluxos de calor latente + sensível (Wm^{-2} ; cor) e vorticidade em 925 hPa ($10^{-5}s^{-1}$; contorno) para a gênese e maturidade de: (a-d) Cari; (b-e) Deni e (c-f) Eçaí. L indica a posição do centro do ciclone.	44
Figura 15 - Divergência do fluxo de umidade integrado na vertical ($kg_xm^{-1}s^{-1}$; cor e vetor) para a gênese e maturidade de: (a-d) Anita; (b-e) Arani e (c-f) Bapo. L indica a posição do centro do ciclone.....	46
Figura 16 - Divergência do fluxo de umidade integrado na vertical ($kg_xm^{-1}s^{-1}$; cor e vetor) para a gênese e maturidade de: (a-d) Cari; (b-e) Deni e (c-f) Eçaí. L indica a posição do centro do ciclone.....	46
Figura 17 – Cisalhamento do vento (200-850) (ms^{-1} ; cor) e TSM - temp. a 2m ($^{\circ}C$; contorno) para a gênese e maturidade de: (a-d) Anita; (b-e) Arani e (c-f) Bapo. L indica a posição do centro do ciclone.....	48
Figura 18 - Cisalhamento do vento (200-850) (ms^{-1} ; cor) e TSM - temp. a 2m ($^{\circ}C$; contorno) para a gênese e maturidade de: (a-d) Cari; (b-e) Deni e (c-f) Eçaí. L indica a posição do centro do ciclone.....	48
Figura 19 - Perfil vertical do desvio zonal de temperatura ($^{\circ}C$; cor) e anomalia de altura geopotencial (m; contorno) para a maturidade de: (a) Anita; (b) Arani; (c) Bapo; (d) Cari; (e) Deni; (f) Eçaí.....	49
Figura 20 - Perfil vertical vorticidade relativa ($10^{-5}s^{-1}$) para a maturidade de: (a) Anita; (b) Arani; (c) Bapo; (d) Cari; (e) Deni; (f) Eçaí.....	50
Figura 21 - Trajetória das simulações com as parametrizações de <i>cumulus</i> BM, KF e Grell comparadas à trajetória do ciclone Anita obtida com a reanálise ERA5.....	52
Figura 22 - Evolução temporal da pressão central das simulações com as parametrizações de <i>cumulus</i> BM, KF e Grell comparadas à pressão do ciclone Anita (ERA5).	52
Figura 23 - CPS das simulações com as parametrizações de cumulus: (a) BM; (b) KF e (c) Grell. A coluna da esquerda apresenta os parâmetros B versus $-V_T^L$, e na coluna da direita os parâmetros $-V_T^L$ versus $-V_T^U$. A e Z indicam, respectivamente, a início e fim do ciclo de vida do ciclone. O tamanho do círculo indica o raio médio da força do vento em 925 hPa (ms^{-1}) e as cores são os valores da pressão ao nível do mar (ver escala à direita da figura).	53
Figura 24 - Trajetória das simulações com 72, 48 e 24h de antecedência comparadas à trajetória do ciclone Anita (ERA5).....	55
Figura 25 - Evolução temporal da pressão central das simulações com 72, 48 e 24h de antecedência comparadas à pressão do ciclone Anita (ERA5).....	55

Figura 26 - Trajetória das simulações com os testes de aquecimento da TSM (parametrização de <i>cumulus</i> BM) comparadas à trajetória do ciclone Anita (ERA5).	57
Figura 27 - Evolução temporal da pressão central das simulações com os testes de aquecimento da TSM (parametrização de <i>cumulus</i> BM) comparadas à trajetória do ciclone Anita (ERA5).	57
Figura 28 - CPS das simulações com os testes de aquecimento da TSM (parametrização de <i>cumulus</i> BM):	58
Figura 29 - Trajetória das simulações com os testes de aquecimento da TSM (parametrização de <i>cumulus</i> KF) comparadas à trajetória do ciclone Anita (ERA5).	60
Figura 30 - Evolução temporal da pressão central das simulações com os testes de aquecimento da TSM (parametrização de <i>cumulus</i> KF) comparadas à trajetória do ciclone Anita (ERA5).	60
Figura 31 - CPS das simulações com os testes de aquecimento da TSM (parametrização de <i>cumulus</i> KF): (a) TSM+2_KF; (b) TSM+1_KF_m; (c) TSM+2_KF_m; (d) TSM+4_KF_m.	61

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros do CPS para ciclones tropicais, subtropicais e extratropicais; baseado em Evans e Hart (2003), Hart (2003), Guishard (2006) e Evans e Guishard (2009).	25
Tabela 2 - Dados utilizados no estudo.	28
Tabela 3 - Configurações das simulações.....	33
Tabela 4 - Resumo dos experimentos feitos através do modelo WRF.	34
Tabela 5 - Características dos seis ciclones subtropicais estudados sobre o Oceano Atlântico Sul.....	35
Tabela 6 - Características dos seis ciclones nas fases de gênese e maturidade, calculadas como a média em uma caixa de $10^{\circ} \times 10^{\circ}$ de latitude/longitude centrada no ciclone. Valores durante a fase de maturidade estão entre parênteses.	38

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

Alta subtropical do Atlântico Sul (ASAS)

Calor latente (LH)

Calor sensível (SH)

Cyclone Phase Space (CPS)

El Niño-Oscilação Sul (ENOS)

Esquema Betts-Miller Janjic (BM)

Esquema Kain-Fritsch (KF)

European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF)

Forecast Systems Laboratory (FSL)

Global Forecast System (GFS)

National Aeronautics and Space Administration (NASA)

National Center for Atmospheric Research (NCAR)

National Centers for Environmental Prediction (NCEP)

National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)

Oceano Atlântico Sul (OAS)

Pressão Média ao Nível do Mar (PMNM)

Simetria térmica (B)

Temperatura da Superfície do Mar (TSM)

Temperatura do ar (Tar)

Vento térmico em altos níveis ($-V_T^U$)

Vento térmico em baixos níveis ($-V_T^L$)

Weather Research and Forecast (WRF)

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	15
1.1 Objetivos.....	16
1.2 Justificativa.....	16
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	17
2.1 Ciclo de Vida dos Ciclones	17
2.1.1 Ciclones Extratropicais.....	17
2.1.2 Ciclones Tropicais	19
2.1.3 Ciclones Subtropicais	20
2.2 <i>Cyclone Phase Space (CPS)</i>	24
3. METODOLOGIA.....	28
3.1 Dados.....	28
3.2 Escolha dos Ciclones Subtropicais	29
3.3 Análise Sinótica.....	30
3.4 Análise numérica	30
3.4.1 <i>Weather Research and Forecast (WRF)</i>	31
3.4.2 <i>Design</i> dos Experimentos	33
4. RESULTADOS	35
4.1 Trajetória dos Ciclones Subtropicais Estudados	35
4.2 Análise Sinótica.....	37
4.3 Experimentos Numéricos	50
4.3.1 Definição da simulação controle	50
4.3.2 Experimento de Sensibilidade	56
5. CONCLUSÕES	62
REFERÊNCIAS	64
ANEXO A	69
ANEXO B	72

1. INTRODUÇÃO

Ciclones são sistemas atmosféricos que apresentam centro de baixa pressão (PETTERSEN, 1956) e possuem um importante papel na distribuição de energia e vapor de água no planeta (PEIXOTO e OORT, 1992). Esses sistemas afetam as condições de tempo e interferem no clima de uma região, pois favorecem a formação de nuvens com grande desenvolvimento vertical que estão associadas à intensa precipitação e também causam mudanças na temperatura e ventos intensos.

Durante muito tempo a comunidade científica acreditava que os ciclones podiam ter apenas características extratropicais ou tropicais, porém estudos mais recentes avaliaram a existência de ciclones que podem passar por processos de transição, apresentando estrutura híbrida entre os dois tipos de ciclones previamente conhecidos (BEVEN, 1997), denominados ciclones subtropicais (EVANS e BRAUN, 2012). Assim, os ciclones podem ser classificados em três tipos: i) ciclones extratropicais, que ocorrem em latitudes médias, possuem núcleo frio e são assimétricos, e têm formação associada a intensos gradientes horizontais de temperatura (BJERKNES e SOLBERG, 1922; CHARNEY, 1947), ii) ciclones tropicais, que ocorrem entre 30°S e 30°N, possuem núcleo quente e são simétricos, e têm formação associada à transferência de calor latente (LH) do oceano para a atmosfera (CHARNEY e ELIASSEN, 1964), e iii) ciclones subtropicais, também conhecidos como híbridos, pois apresentam combinações da estrutura extratropical e tropical durante seu desenvolvimento, com um núcleo quente na baixa troposfera e núcleo frio na alta troposfera (HART, 2003).

Os estudos pioneiros dos ciclones subtropicais ocorreram no oceano Atlântico Norte com Guishard (2006), Evans e Guishard (2009) e Guishard et al. (2009); logo após, foi dada atenção a esses sistemas em outras bacias oceânicas como documento em da Rocha et al. (2019). No oceano Atlântico Sul os estudos existentes são os de Evans e Braun (2012), Dias Pinto et al. (2013), Gozzo et al. (2014, 2017), Dutra et al. (2017) e Reboita et al. (2017 a,b)

Gozzo et al. (2014) mostraram que a região próxima ao sudeste do Brasil é uma região propícia a ciclones subtropicais. Além disso, Dias Pinto et al. (2013) estudou o ciclone subtropical Anita e lançou a hipótese de que esse poderia ter se tornado tropical se os fluxos turbulentos de calor latente do oceano para a atmosfera tivessem aumentado. Embora esses estudos elucidem algumas características dos ciclones subtropicais no oceano Atlântico Sul, ainda são necessários mais estudos para uma compreensão dos mecanismos de formação desses sistemas.

Desta forma, este estudo analisa seis ciclones que ocorreram no oceano Atlântico Sul e que receberam nome pela Marinha do Brasil. Além disso, serão realizadas simulações numéricas a fim de verificar o potencial de transição do ciclone subtropical Anita para tropical.

1.1 Objetivos

Como há poucos estudos sobre ciclones subtropicais no Atlântico Sul, o objetivo desse trabalho é realizar uma análise sinótica de seis sistemas que receberam nome, a maioria dado pela Marinha do Brasil, durante o período de 2011 a 2016. Além disso, através de simulações numéricas, será verificado o potencial do ciclone subtropical Anita ter se tornado um ciclone tropical. Portanto, esse estudo envolve os seguintes objetivos específicos:

- Descrever as características sinóticas dos seis ciclones subtropicais que ocorreram entre 2011 e 2016 no sudoeste do Atlântico Sul e que receberam nome pela Marinha do Brasil;
- Executar simulações numéricas com o modelo computacional *Weather Research and Forecast* (WRF) com dados do ciclone subtropical Anita;
- Analisar o potencial de transição do ciclone subtropical Anita para tropical através de experimentos numéricos de sensibilidade.

1.2 Justificativa

A ocorrência dos ciclones subtropicais na bacia do oceano Atlântico Sul pode afetar regiões litorâneas densamente povoadas e de grande importância econômica (costa do sul e sudeste do Brasil), causando diversos danos através de inundações e ventos fortes. Esses sistemas causam agitação marítima que pode afetar negativamente a navegação, as atividades portuárias e as plataformas de petróleo, tornando o problema ainda mais relevante.

Este trabalho visa complementar a literatura existente sobre os ciclones subtropicais no oceano Atlântico Sul. Assim poderá fornecer mais elementos para os previsores de tempo monitorarem a ocorrência de tais sistemas. Além disso, poderá contribuir com informações sobre as condições que podem propiciar à transição tropical de um ciclone subtropical, através do estudo de sensibilidade do Anita.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Ciclo de Vida dos Ciclones

Dependendo dos mecanismos de formação e da faixa latitudinal da gênese dos ciclones, eles podem ser divididos em três categorias: ciclones extratropicais, ciclones tropicais e ciclones subtropicais. Um estudo de caso de cada tipo de ciclone em latitudes austrais pode ser encontrado em Reboita et al. (2017b), enquanto que uma revisão bibliográfica dos ciclones subtropicais nas bacias oceânicas do globo em da Rocha et al. (2019).

2.1.1 Ciclones Extratropicais

O estudo pioneiro sobre os ciclones extratropicais foi de Bjerknes (1919). Ele descreveu um modelo teórico em que a partir do centro do ciclone, saíam duas linhas de convergência dos ventos, que separam a massa de ar quente da massa de ar frio. Pouco depois, Bjerknes e Solberg (1922) aprofundaram o assunto e desenvolveram o primeiro modelo conceitual sobre os processos de formação desse sistema, chamado de Teoria da Frente Polar, onde mostraram que os ciclones de latitudes médias se formam como um resultado da interação de duas massas de ar: uma de origem polar e outra de origem tropical, e a frente polar é o contorno que separa o ar frio de origem polar, do ar quente das altas subtropicais.

De acordo com a Teoria da Frente Polar, com o aprofundamento do ciclone, a rotação da frente fria, que se propaga em direção ao Equador, no Hemisfério Sul, alcança a frente quente, que se propaga em direção ao polo e possui deslocamento com menor velocidade. À medida que a massa de ar fria se desloca e sobrepõe a massa de ar quente, ocorre o processo de oclusão, estágio em que o ciclone atinge sua intensidade máxima. Após o ciclone se tornar um vórtice frio e simétrico, o sistema entra em decaimento, pois não há mais o ar quente como fonte de energia disponível. Já Sutcliffe (1947) propôs que a intensificação dos ciclones ocorre principalmente através da advecção de temperatura em baixos níveis da troposfera, que amplifica as ondas em altos níveis. (MARRAFON e REBOITA, 2018).

Shapiro e Keyser (1990) verificaram que nem todos os ciclones extratropicais seguem o modelo de Bjerknes e Solberg, e delinearam outro modelo em que a frente fria se move praticamente perpendicular à frente quente, e que o setor frio aprisiona a região de ar mais quente, configurando uma oclusão quente.

Os ciclones extratropicais apresentam diâmetro que pode variar de 1.500 a 5.000 km, tempo de vida médio de 3 dias (REBOITA et al., 2010) e são caracterizados pela assimetria térmica horizontal (presença de frentes). Com relação à oclusão, essa pode ser do tipo fria ou quente. Em termos da propagação dos ciclones extratropicais, esse ocorre em direção ao setor quente da onda ciclônica (REBOITA et al., 2017a).

Reboita et al. (2010) verificaram três regiões mais ciclogênicas no oceano Atlântico Sul (Figura 1), utilizando dados da reanálise do *National Centers for Environmental Prediction – National Center for Atmospheric Research* (NCEP/NCAR), no período de 1990 a 1999. Foram considerados os sistemas que tiveram tempo de vida maior ou igual a 24 horas e se iniciaram com vorticidade menor ou igual a $-1,5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$. As três regiões ciclogênicas foram identificadas como: RG1 (costa sul/sudeste do Brasil $\sim 25^\circ\text{S}$); RG2 (costa do Uruguai $\sim 35^\circ\text{S}$); e RG3 (costa sudeste da Argentina $\sim 45^\circ\text{S}$).

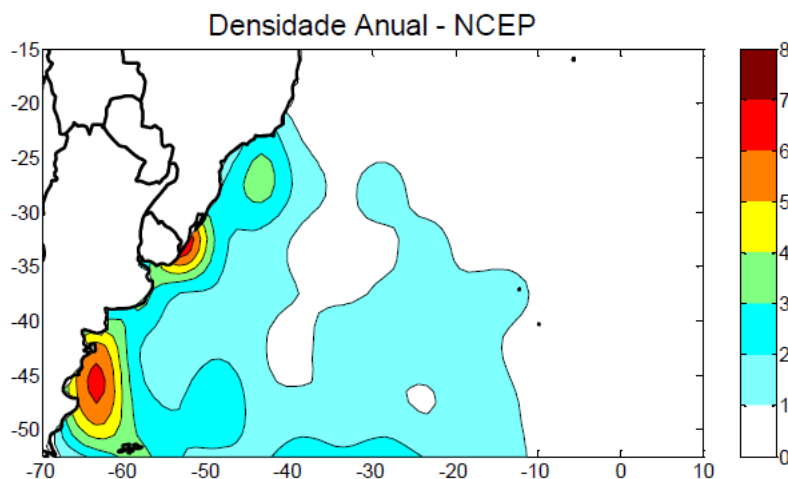


Figura 1 - Densidade anual de ciclogêneses no Atlântico Sul. Na escala de cor da figura, o valor 1,5 corresponde a aproximadamente 37,5 sistemas. Adaptado de Reboita et al. (2010).

Em termos de climatologia, Reboita et al. (2015) investigaram a tendência anual e sazonal da ocorrência de ciclones extratropicais, de 1980 a 2012, considerando todo o Hemisfério Sul, e avaliaram a influência do fenômeno El Niño-Oscilação Sul (ENOS), modo anular sul e o dipolo do oceano Índico na densidade da trajetória dos ciclones durante a primavera austral. Os autores utilizaram dados de Pressão Média ao Nível do Mar (PMNM) do NCEP/NCAR e um esquema automático de rastreamento de ciclones. O número de ciclones nas diferentes fases do ENOS, modo anular sul e o dipolo do oceano Índico é semelhante ao

dos períodos neutros. No entanto, estes padrões de teleconexão são importantes para modificar as regiões preferenciais de ocorrência de ciclones.

2.1.2 Ciclones Tropicais

Os ciclones tropicais são sistemas de baixa pressão não-frontal, apresentam diâmetro menor que os ciclones extratropicais, podendo variar de 500 a 1.000 km, são mais intensos, simétricos e duradouros (GRAY, 1968; FRANK, 1977). Esses sistemas possuem um núcleo quente, se desenvolvem sobre os oceanos tropicais ou subtropicais e sua classificação leva em conta um limiar de máxima intensidade dos ventos; quando atingem intensidade maior ou igual a 119 km/h, podem receber diferentes denominações de acordo com a região do globo em que ocorrem, sendo chamados de furacões no Atlântico Norte e Caribe, de tufões no Pacífico e ciclones nos Oceanos Índico e Pacífico Sul. Nos Oceanos Atlântico e Pacífico Leste, os ciclones tropicais também são classificados de acordo com os danos causados, de acordo com a escala Saffir–Simpson, que varia de 1 a 5, onde os ciclones mais destrutivos são de categoria 5.

Gray (1968) mostrou algumas características que facilitam a ciclogênese tropical: Temperatura da Superfície do Mar (TSM) superior a 26° C, valores elevados de umidade relativa em 700 hPa, instabilidade condicional, distúrbio ciclônico em baixos níveis e cisalhamento vertical do vento horizontal fraco. Durante a ocorrência de um ciclone tropical ventos mais fortes ocorrem próximos à superfície, como consequência do núcleo quente associado (MARKS, 2003). Esse núcleo quente é verticalmente alinhado (barotrópico) e muito profundo, indo desde a superfície até a tropopausa. Essa grande extensão vertical do núcleo quente é a chave da sustentação do ciclone pelos fluxos de calor latente intensos da superfície do oceano (EMANUEL, 1986). De acordo com DeMaria et al. (2001), os ciclones tropicais formam-se em regiões de fraco gradiente horizontal de temperatura em baixos níveis, pois necessitam de fraco cisalhamento vertical do vento horizontal para se manter.

Emanuel (1988) e Holland (1997) verificaram uma relação direta entre a máxima intensidade de uma tempestade tropical e a TSM alta, enquanto sistemas que se deslocam sobre regiões com TSMs mais frias perdem a capacidade de gerar convecção e podem entrar em ciclólise. Uma grande profundidade da camada de mistura oceânica, com águas quentes estendendo-se por até aproximadamente 50 metros de profundidade, possibilita a transferência

de calor latente do oceano para a atmosfera, sustentando o desenvolvimento do ciclone (MARKS, 2003).

Marks (2003) também apresentou uma frequência anual de 80 a 90 ciclones tropicais em todo globo e verificou que a maior ocorrência de ciclones tropicais é no Hemisfério Norte, nos meses de verão boreal.

2.1.3 Ciclones Subtropicais

Os ciclones subtropicais, também chamados de híbridos, apresentam núcleo frio em altos níveis, como os ciclones extratropicais e quente em baixos níveis, como os ciclones tropicais (HART, 2003; EVANS e GUSHARD, 2009).

Guishard (2006) estudou os ciclones subtropicais no oceano Atlântico Norte e mostrou que a formação deles ocorre quando um cavado em altos níveis ou uma *cutoff low* fornece o suporte dinâmico para seu desenvolvimento vertical. Evans e Guishard (2009) estudaram 18 ciclones subtropicais sobre a bacia do Atlântico Norte, ocorridos em 5 anos (1999 a 2004), e também observaram que a presença de um cavado em níveis superiores nos ventos de oeste é uma característica dominante para o desenvolvimento dos ciclones subtropicais. Em termos de climatologia no Atlântico Norte, Guishard et al. (2009) encontrou uma média anual de 4,4 ciclones/ano a partir da análise de 45 anos de dados do ERA-40 (Uppala et al., 2005). Outubro é o mês com maior ocorrência desses sistemas, pois a sobreposição entre a forçante baroclínica e altos valores de TSM é mais favorável.

Os ciclones subtropicais ocorrem em diferentes bacias oceânicas (DA ROCHA et al., 2019). Yanasse et al. (2014) mostra a localização de alguns ciclones subtropicais (cor verde na Figura 2) no globo. Esses sistemas ocorrem preferencialmente a leste dos continentes.

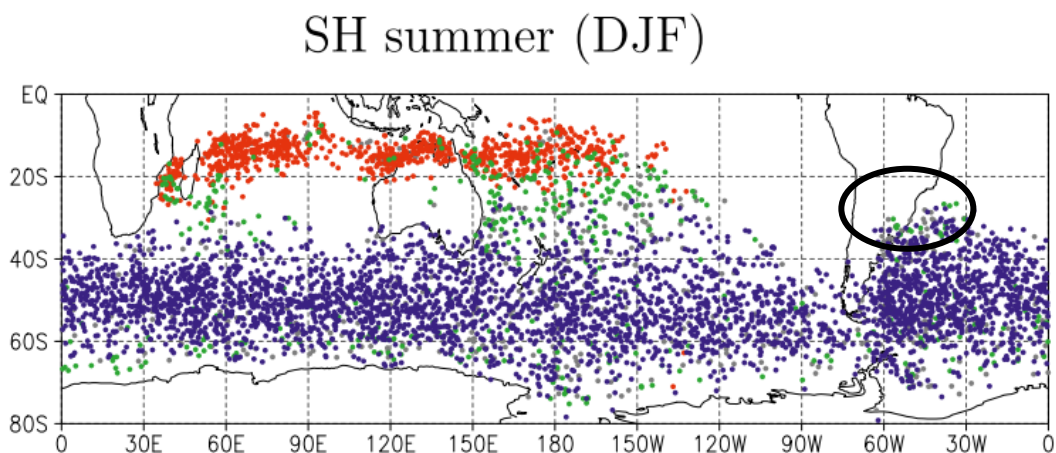


Figura 2 - Localizações geográficas de ciclones em desenvolvimento (1981- 2011) durante o verão no Hemisfério Sul. Ciclones Extratropicais (azul), Ciclones Tropicais (vermelho) e Ciclones Subtropicais (Verde). Em destaque os Ciclones Subtropicais que atingem a região sudoeste do Oceano Atlântico Sul. Adaptado de Yanasse et al. (2014).

No mar Mediterrâneo, Tous e Romero (2013) obtiveram uma variabilidade sazonal significativa dos ciclones subtropicais (chamados nessa região de Medicanes), mostrando que no verão, a frequência de ciclones é fraca, enquanto no inverno, aumentam notavelmente.

Os ciclones podem ter gênese como subtropical ou sofrer transição de extratropical ou tropical para subtropical. Um exemplo de sistema que sofreu transição sobre o sudoeste do Atlântico Sul, foi o furacão Catarina, em março de 2004, que começou como um sistema extratropical e apresentou estrutura subtropical, passando ainda para um ciclone tropical. Segundo McTaggart-Cowan et al. (2006), esse sistema não se desenvolveu sobre elevada TSM, mas com ar frio em altitude, reforçando o movimento ascendente e a atividade convectiva, enquanto um padrão persistente de bloqueio de tipo Rex de nível superior foi responsável pelo enfraquecimento do cisalhamento vertical do vento e da direção do ciclone.

Também sobre o sudeste do Atlântico Sul, a tempestade subtropical Anita se desenvolveu em condições muito semelhantes de bloqueio do tipo dipolo, em março de 2010, e, segundo Dias Pinto et al. (2013), esse sistema não transicionou para tropical, devido à redução dos fluxos de calor latente do oceano para a atmosfera e pela interação com um distúrbio extratropical (Figura 3).

Dutra et al. (2017) analisaram cinco etapas do ciclo de vida do ciclone subtropical Anita (Figura 4): i) fase incipiente em 4 de março; ii) fase de intensificação em 7 de março; iii) fase

madura em 9 de março; iv) fase de enfraquecimento em 10 de março; v) transição extratropical em 11 de março.

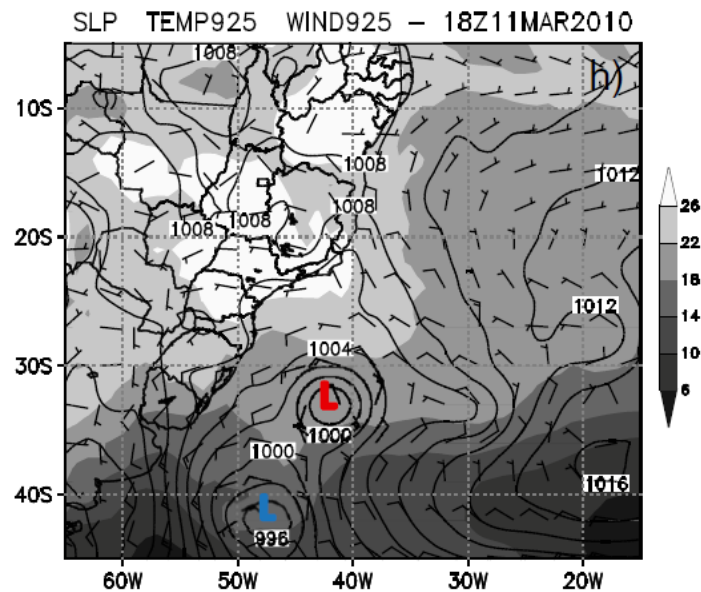


Figura 3 – Pressão ao nível do mar (hPa), temperatura em 925 hPa ($^{\circ}$ C) e vento (ms^{-1}). L's vermelho e azul mostram a posição do Anita próximo ao centro de um ciclone extratropical. Adaptado de Dias Pinto et al., (2013).

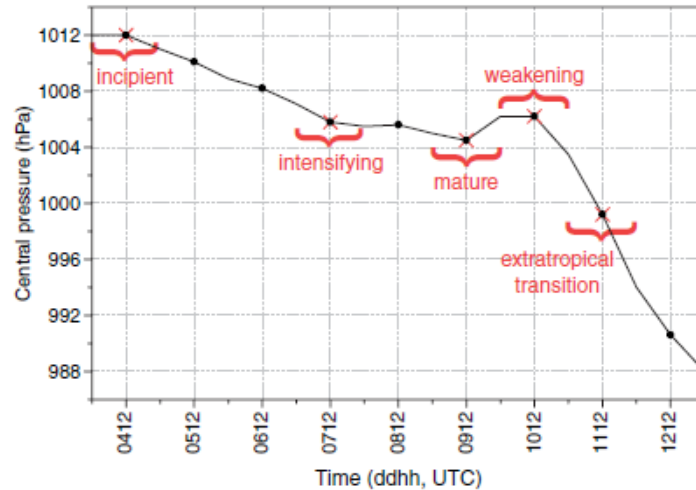


Figura 4 - Evolução temporal ciclone subtropical Anita. Adaptado de Dutra et al. (2017)

Um estudo de sensibilidade numérica às configurações físicas e dinâmicas na simulação do ciclone subtropical Anita foi feito por Abreu e da Rocha (2015). Os autores testaram diferentes esquemas de parametrização de cumulus e horas de antecedência (24, 48 e 72h) para inicialização do modelo WRF. Os autores observaram que os experimentos com 72 h de antecedência tenderam a aproximar o centro do ciclone do continente, enquanto os com

antecedência de 24 h apresentaram maior concordância com a análise do FNL/NCEP; a parametrização Betts-Miller-Janjic foi a que simulou resultados mais próximos dos observados.

Com relação à climatologia de ciclones subtropicais no Atlântico Sul, há os estudos de Evans e Braun (2012) e Gozzo et al. (2014) que mostram que a região oceânica próxima da costa sul/sudeste do Brasil tem maior ocorrência desses sistemas (Figura 5.). Outra característica dos ciclones subtropicais que ocorrem no oceano Atlântico Sudoeste é que sua frequência é maior no verão.

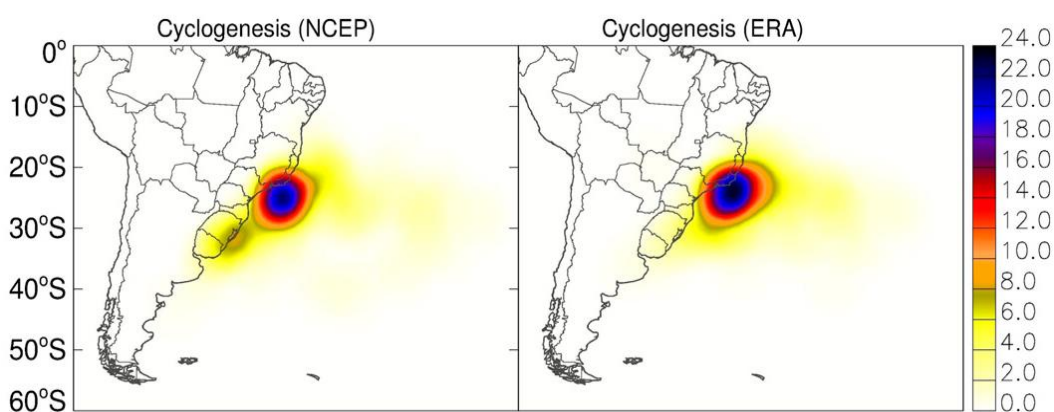


Figura 5 - Ciclogênese subtropical com dados do NCEP1 e do ERAInt. Adaptado de Gozzo et al. (2014)

Gozzo et al. (2014) também elaboraram uma climatologia de ciclones subtropicais usando dados de 33 anos (1979-2011) da reanálise do *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF), ERAInterim e da reanálise I do NCEP-NCAR. Ambas as reanálises mostraram boa concordância na intensidade, distribuição geográfica e variabilidade sazonal dos ciclones subtropicais. O número médio anual de ciclones subtropicais é quase idêntico para ERAInt e NCEP1 (7.2 ± 2.8 e 7.1 ± 2.8 ciclones por ano, respectivamente). Esse estudo também verificou que os ciclones subtropicais percorrem distâncias menores do que os extratropicais, e com menor velocidade. O maior número de sistemas encontrados por Gozzo et al. (2014) comparado a Evans e Braun (2012) deve-se ao uso de uma metodologia menos restritiva, isto é, à inclusão de ciclones subtropicais rasos (cuja circulação ciclônica não atinge 500 hPa), sistemas que não atingem ventos com força de vendaval e ainda um relaxamento no limiar mínimo do vento térmico em baixos níveis ($-V_T^L$) (DA ROCHA et al., 2019).

2.2 Cyclone Phase Space (CPS)

Uma maneira de avaliar o tipo de ciclone é através do *Cyclone Phase Space* (CPS), metodologia desenvolvida por Hart (2003). Essa metodologia consiste de um diagrama que mostra a estrutura tridimensional dos ciclones baseado em 3 parâmetros que medem, respectivamente, a simetria térmica (B e o vento térmico em baixos ($-V_T^L$) e altos níveis ($-V_T^U$) da atmosfera, respectivamente. O CPS possibilita inferir se os ciclones são extratropicais, tropicais ou subtropicais (híbridos) a partir do campo tridimensional de altura geopotencial (Z).

O parâmetro B avalia se há gradiente horizontal de temperatura no sistema, e é calculado a partir da diferença da espessura da camada nos níveis de 900 e 600 hPa, em dois semicírculos, direito e esquerdo, de raio 500 km em torno do centro do ciclone:

$$B = h(\overline{Z_{600hPa} - Z_{900hPa}}|_R - \overline{Z_{600hPa} - Z_{900hPa}}|_L)$$

Se o sistema possuir natureza frontal, como os ciclones extratropicais, vai apresentar um lado frio e outro quente, portanto essa assimetria térmica resultará num valor elevado de B , enquanto sistemas tropicais que possuem núcleo todo quente apresentará um valor de B ínfimo.

De acordo com Gozzo et al. 2014, os ciclones subtropicais apresentam valor de B maior que dos ciclones tropicais, mas não ultrapassam, em geral, 25 m.

Os parâmetros do vento térmico são definidos como uma mudança no gradiente de altura geopotencial entre diferentes níveis de pressão; em altos níveis ($-V_T^U$) é utilizado como parâmetro os níveis de 300 e 600 hPa e em baixos níveis ($-V_T^L$), 600 e 900 hPa:

$$-|V_T^L| = \frac{\partial(Z_{max} - Z_{min})}{\partial \ln p} \Big|_{900}^{600}$$

$$-|V_T^U| = \frac{\partial(Z_{max} - Z_{min})}{\partial \ln p} \Big|_{600}^{300}$$

Basicamente, esses dois termos estão avaliando o cisalhamento vertical do vento. Dado que nos ciclones extratropicais os ventos se intensificam com a altura, $-V_T^U$ e $-V_T^L$ sempre

apresentarão valor muito menor que zero, enquanto nos ciclones tropicais, onde os ventos são mais intensos na superfície, $-V_T^U$ e $-V_T^L$ são valores muito maior que zero. No caso dos ciclones subtropicais, como apresentam núcleo frio em altos níveis, como os ciclones extratropicais e quente em baixos níveis, como os ciclones tropicais, seus parâmetros de vento térmico serão $-V_T^U$ negativo e $-V_T^L$ positivo.

De forma prática, a Tabela 1 mostra um resumo de como caracterizar cada tipo de ciclone através do CPS.

Tabela 1 – Parâmetros do CPS para ciclones tropicais, subtropicais e extratropicais; baseado em Evans e Hart (2003), Hart (2003), Guishard (2006) e Evans e Guishard (2009).

TIPO	B(m)	$- V_T^L$	$- V_T^U$
Tropical	$-10 < B < 10$	$- V_T^L \gg 0$	$- V_T^U \gg 0$
Subtropical	Varia, mas não adquire valores grandes	$- V_T^L > 0$	$- V_T^U < 0$
Extratropical	$B > 10$	$- V_T^L \ll 0$	$- V_T^U \ll 0$

Hart (2003) não desenvolveu apenas a teoria, mas também um algoritmo que gera uma saída gráfica apresentando um parâmetro versus o outro (Figuras 6 e 7), onde é de fácil visualização a posição e a trajetória para cada tempo do ciclo de vida do ciclone, assim pode-se inferir qual a natureza do ciclone ou se ele transiciona. Atualmente, na *home page* do pesquisador, em (<http://moe.met.fsu.edu/cyclonephase/gfs/fcst/index.html>), é possível acompanhar os ciclones em tempo real, de acordo com o CPS.

Na figura 8, extraída de Reboita et al. (2017b) são apresentados exemplos da configuração das informações no CPS para cada tipo de ciclone.

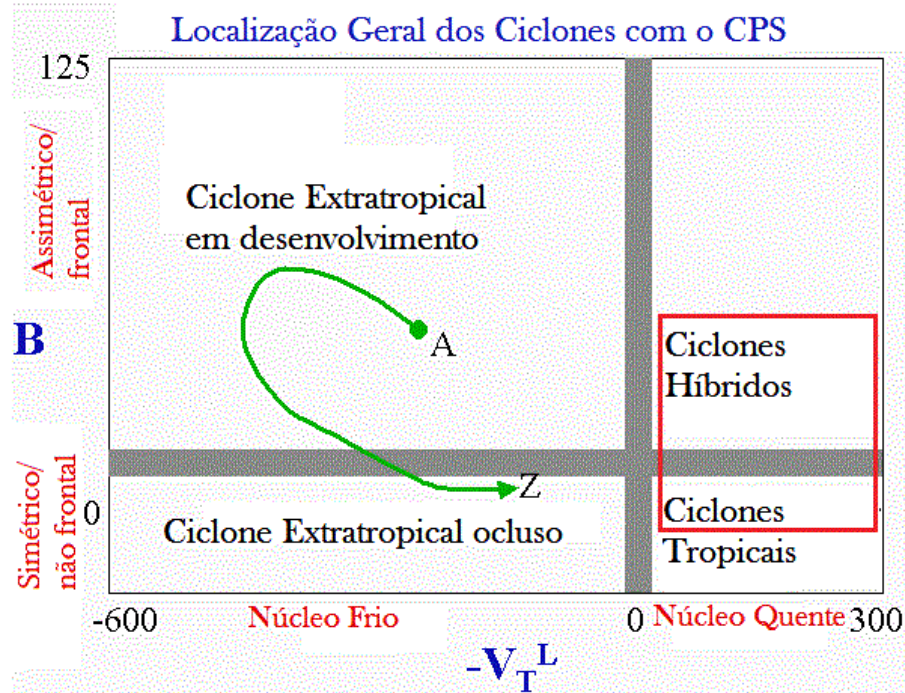


Figura 6 – Visualização do algoritmo CPS. Fase 1: $-V_T^L$ versus B. Adaptado de Hart (2003).

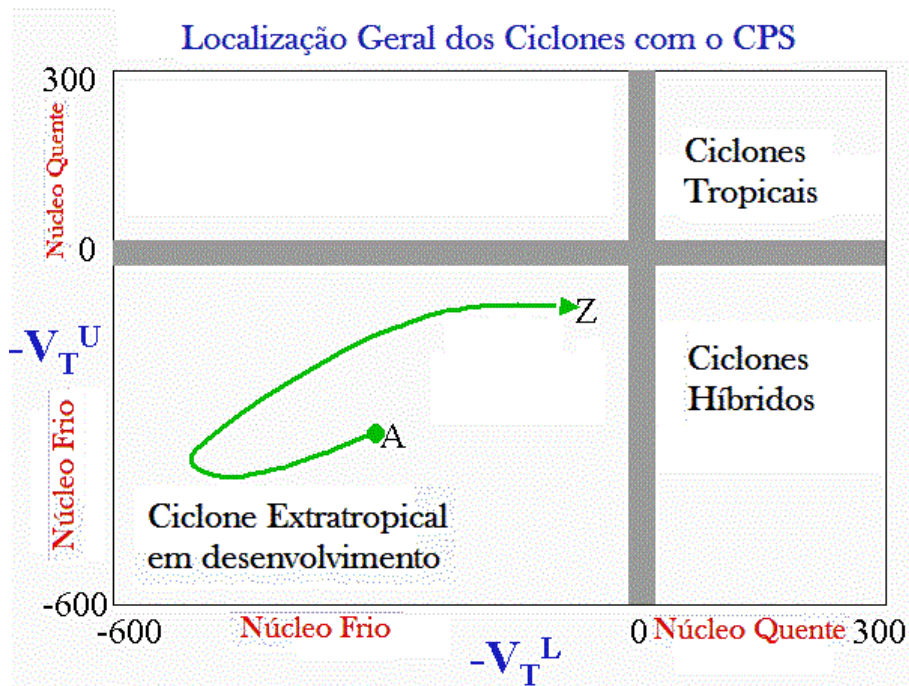
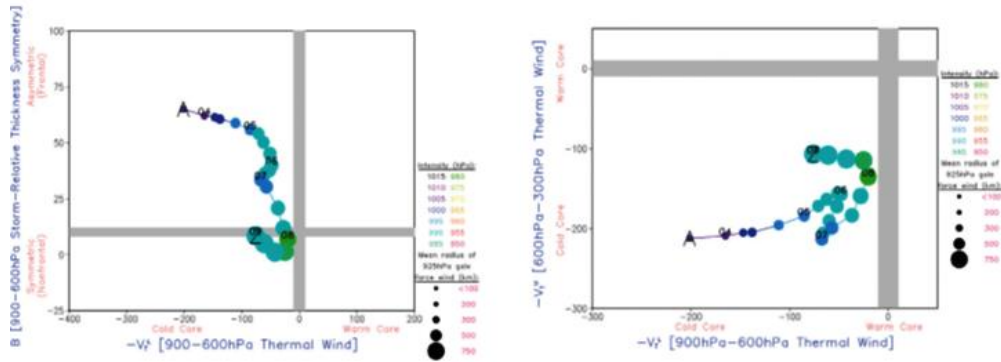
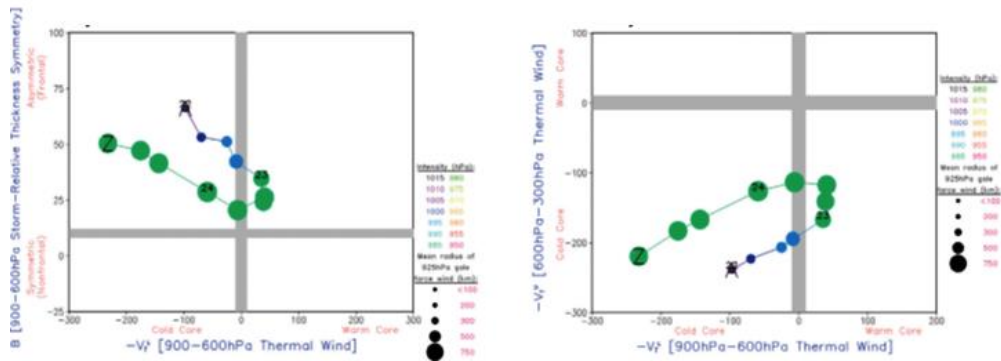


Figura 7 - Visualização do algoritmo CPS. Fase 2: $-V_T^L$ versus $-V_T^U$. Adaptado de Hart (2003).

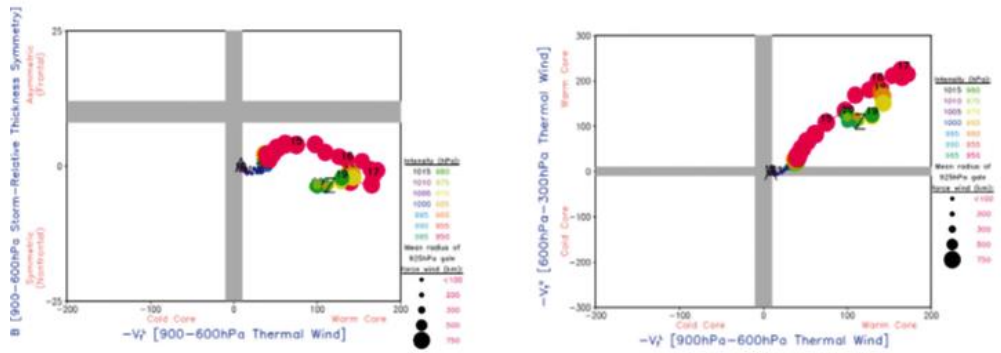
Ciclone Extratropical Tipo Bjerknes e Solberg (1922)



Ciclone Extratropical Tipo Shapiro e Keyser (1990)



Ciclone Tropical Ului



Ciclone Subtropical Arani

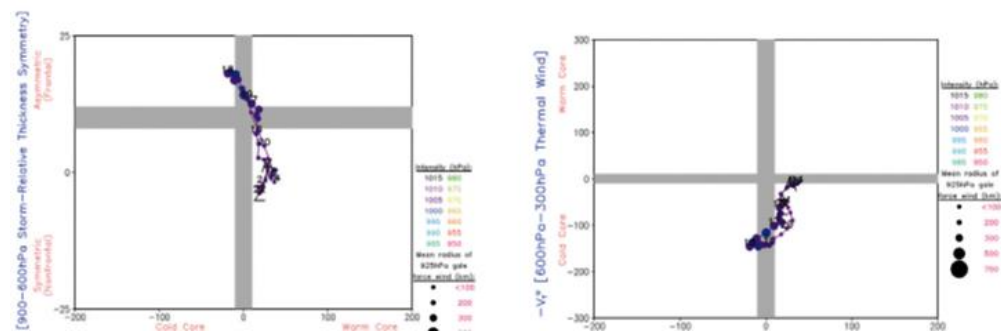


Figura 8 - Exemplo de CPS para cada tipo de ciclone, publicado por Reboita et al. (2017b).

3. METODOLOGIA

3.1 Dados

Os dados utilizados no presente estudo são da ERA5, a quinta geração de reanálise do *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF), que representa o estado da arte em dados de reanálise (HERSBACH, H.; DEE, D, 2016). Os dados foram obtidos a cada 6 h para variáveis atmosféricas em níveis de pressão, e a cada 3 h para variáveis de superfície.

A tabela 2 sintetiza as informações (variáveis, nível, resolução, região, período e fonte) dos dados que foram utilizados tanto da reanálise quanto de outras fontes para a análise sinótica dos ciclones.

Tabela 2 - Dados utilizados no estudo.

Dado	Resolução Espacial	Área	Período	Fonte
Temperatura (K): 1000 hPa – 30 hPa	0,28° x 0,28°	América do Sul e Oceano Atlântico	2010-2016	ERA 5 Interim/ ECMWF – https://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets/reanalysis-datasets/era5
Umidade Relativa (%): 1000 hPa – 30 hPa				
Geopotencial (m ² /s ²): 1000 hPa – 30 hPa				
Componente U do vento (m/s): 1000 hPa – 30 hPa				
Componente V do vento (m/s): 1000 hPa – 30 hPa				
Fluxo de Calor Latente (W/m ²)				
Fluxo de Calor Sensível (W/m ²)				
Temperatura de Brilho perto de 11microns (K)	0,07° X 0,07°			GridSat-B1/NOAA - https://www.ncdc.noaa.gov/gridsat/

3.2 Escolha dos Ciclones Subtropicais

Os ciclones estudados são aqueles que receberam nome pela Marinha do Brasil (DIAS PINTO et al., 2013), exceto o Anita que foi o primeiro documentado e que a partir dele a Marinha passou a monitorar esses sistemas. Os ciclones analisados são: Anita que teve sua gênese (segundo o critério que considera a gênese no tempo que possui a primeira isóbara fechada no campo de pressão ao nível médio do mar) em 06 de março de 2010, o Arani em 14 de março de 2011, o Bapo em 05 de fevereiro de 2015, o Cari em 10 de março de 2015, o Deni em 15 de novembro de 2016 e o Eçaí em 04 de dezembro de 2016. A característica de subtropical desses seis ciclones foi também registrada pelo CPS em Reboita et al. (2019).

A distância total percorrida pelos ciclones foi estimada de duas formas: (1) considerando apenas o ponto de gênese e ciclólise e (2) somando a distância entre cada passo no tempo de cada sistema, calculada pelo princípio da lei dos cossenos na trigonometria esférica (VAN BRUMMELEN, 2012; Equação 1), ao longo de todo o ciclo de vida.

$$D = \text{acos}(\sin \varphi 1 \cdot \sin \varphi 2 + \cos \varphi 1 \cdot \cos \varphi 2 \cdot \cos \Delta\lambda) \cdot R \quad (\text{Eq. 1})$$

Em que:

D = distância entre duas coordenadas geográficas (km);

$\varphi 1$ = latitude do ponto 1 (radianos);

$\varphi 2$ = latitude do ponto 2 (radianos);

$\Delta\lambda$ = diferença entre as longitudes (radianos);

R = raio da Terra (km).

A posição a cada seis horas dos ciclones subtropicais foi identificada através dos mínimos de vorticidade relativa obtida com as componentes de vento horizontais a 925 hPa da reanálise do ERA5. A vorticidade relativa permite identificar os centros de circulação associados aos ciclones antes de sua configuração (isóbaras fechadas) na pressão média do nível do mar (SINCLAIR, 1994).

A partir do rastreamento foi possível identificar, além da gênese e maturidade, a data de oclusão do sistema; portanto, é apresentado o tempo de vida útil de cada sistema.

3.3 Análise Sinótica

No estudo sinótico dos ciclones escolhidos utilizou-se os dados descritos na Tabela 2. Para cada caso, foram mostrados os estágios de gênese do ciclone, onde utilizou-se o critério que considera a gênese no tempo que possui a primeira isóbara fechada no campo de pressão ao nível médio do mar, e os estágios de maturidade do sistema, que foi definido como o estágio em que o sistema apresenta a maior vorticidade relativa ciclônica estendida verticalmente na coluna de atmosfera, um critério similar usado por Reboita et al. (2017b).

Para essa análise sinótica serão apresentados os campos de:

- i) Pressão média ao nível do mar e geopotencial em 500 hPa;
- ii) Fluxo de calor latente (LH) somado ao fluxo de calor sensível (SH) e vorticidade;
- iii) Divergência do fluxo de umidade integrado na vertical;
- iv) Cisalhamento do vento (200-850) hPa e temperatura a 2 m subtraída da temperatura da superfície do mar;
- v) Perfil vertical do desvio zonal de temperatura e anomalia de geopotencial;
- vi) Perfil vertical de vorticidade relativa ciclônica;

Para o estágio de maturidade dos ciclones, foi plotado o campo de nebulosidade e ventos na superfície com o propósito de mostrar como esses sistemas podem causar ventos fortes próximos da costa.

3.4 Análise numérica

Para esse estudo, foram feitas diversas simulações com o modelo WRF a fim de testar a hipótese de que o ciclone subtropical Anita poderia sofrer transição para um ciclone tropical na presença de fluxos turbulentos mais intensos, que podem ser resultado de uma TSM mais elevada. Inicialmente descreve-se as características do modelo e na sequência o *design* dos experimentos.

3.4.1 *Weather Research and Forecast (WRF)*

O *Weather Research and Forecast (WRF)* é um modelo de mesoescala de alta resolução, desenvolvido pelo NCAR em colaboração de várias organizações, como o NCEP, *Forecast Systems Laboratory (FSL)* / *National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)*, Universidade de Oklahoma, *National Aeronautics and Space Administration (NASA)*, entre outras. Um dos principais objetivos do desenvolvimento deste modelo é vincular a pesquisa, portanto, ele pode ser aplicado para atender às necessidades de previsão operacional e à pesquisa atmosférica. O modelo é projetado para ser independente de plataforma, e pode ser executado em máquinas compartilhadas e distribuídas. Ele é amplamente utilizado em universidades e institutos de pesquisa.

O WRF é um modelo não hidrostático totalmente compressível, e suas equações governantes são escritas em forma de fluxo para fins de conservação de massa. Ao invés de utilizar uma grade B como no MM5, o WRF escolhe uma grade C de Arakawa para obter uma melhor precisão em simulações de alta resolução (SKAMAROCK et al., 2008).

Uma simulação envolve uma grade externa e pode conter múltiplas grades aninhadas internas. O modelo WRF contém várias opções físicas e dinâmicas diferentes para levar em conta os efeitos de processos atmosféricos significativos. Essas opções podem ser alteradas na calibração do modelo. Portanto, o conjunto mais efetivo de opções de física é selecionado antes do modelo ser aplicado para qualquer finalidade operacional. As opções de física do WRF são divididas em várias categorias. É essencial executar o modelo usando diferentes esquemas de parametrização, a fim de descobrir a melhor combinação para uma determinada região e determinada estação do ano. As opções de parametrizações físicas disponíveis no modelo são para: radiação atmosférica, microfísica, esquemas convectivos, camada limite planetária e física da superfície terrestre. No presente estudo é utilizada a versão WRF 3.8.1 lançada em agosto de 2016. Os detalhes de todos os esquemas podem ser encontrados no guia do modelo disponível em: http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/user_guide_V3.8. Uma descrição detalhada das equações físicas e dinâmicas do modelo, está disponível em Dudhia (2004) e Skamarock et al. (2008).

Na versão 3.8.1 do modelo WRF, existem 10 esquemas convectivos, também chamados de parametrização de *cumulus*, mas para este estudo foram escolhidos três esquemas, que são amplamente utilizados na literatura quando se trata do modelo WRF, sendo eles:

1) Kain-Fritsch (*new Eta*) *scheme*:

O Esquema Kain-Fritsch (KF vem do esquema convectivo de parametrização Fritsch-Chappell, onde a estrutura é explicada por Fritsch e Chappell (1980). Kain-Fritsch (1990) publicou a primeira versão do esquema convectivo KF, que utiliza Fritsch-Chappell como base, mas com modificações na parte de *updraft*. Pouco depois, é publicado outra versão, Kain e Fritsch (1993), a última atualização do esquema KF foi publicada por Kain (2004). Esse esquema usa um método conservador de massa unidimensional, um modelo que parametriza as correntes ascendentes e descendentes. A mistura é permitida em todos os níveis verticais através de um modelo de arrastamento e desmembramento, isto é, usa o método de parcela de ar incluindo equações dinâmicas do momento vertical para explicar a instabilidade das massas de ar e explicar quais variáveis são possíveis de ocorrer na nuvem. Este esquema remove a energia potencial convectiva disponível (CAPE) através de reorganização da massa em cada ponto de grade. O esquema consiste de uma função de disparo convectiva (baseada na velocidade vertical resolvida na malha da grade).

2) Betts-Miller-Janjic *scheme*:

O esquema Betts-Miller Janjic (BETTS; MILLER, 1986) foi criado para representar uma condição de quase-equilíbrio (nuvens convectivas que mantém a estrutura de temperatura e umidade dentro da atmosfera) que ocorre visando evitar a incerteza decorrente de determinar os parâmetros usando indiretamente as equações de nuvens complicadas. O conceito de quase-equilíbrio tenta equacionar a convecção profunda e convectiva rasa simultaneamente e foi introduzido pela primeira vez por Betts e Miller (1986). Algumas das vantagens deste esquema incluem: bom uso em ambientes úmidos, melhor tratamento de convecção elevado que outros esquemas, não exigir muitos cálculos.

3) Grell 3D *ensemble scheme*:

Este esquema de parametrização convectiva é baseado no esquema desenvolvido por Grell (1993). A diferença mais básica deste esquema é o uso de um conjunto de parâmetros físicos que podem ou não ocorrer nas nuvens. Segundo Skamarock et al. (2008), várias abordagens são usadas nesse esquema de agrupamento Grell 3D, como: remoção CAPE, quase-equilíbrio, 16 abordagens para o fluxo de massa, multi parâmetros para conservação de umidade, efeitos de *updraft* e *downdraft* explícito, entre outros.

3.4.2 Design dos Experimentos

Para definir o experimento controle, primeiro foram feitas três simulações testando as parametrizações de *cumulus* descritas em 3.4.1: Betts-Miller-Janjic (BM), Kain-Fritsch (*new Eta*) *scheme* (KF) e Grell 3D ensemble *scheme* (Grell). A parametrização BM mostrou melhor desempenho ao simular o sistema e foi escolhida como controle.

Após definida a parametrização de *cumulus*, foram feitos testes iniciando 24, 48 e 72 horas antes da gênese do ciclone. Portanto, como o sistema teve sua gênese em 6 de março de 2010, o primeiro experimento iniciou no dia 3 de março de 2010, o segundo no dia 4 de março de 2010 e o último no dia 5 de março de 2010.

Após analisar cada uma dessas simulações, concluiu-se que o experimento que iniciou 24 horas antes da gênese do sistema foi o que melhor representou a trajetória e as características do ciclone Anita. Esse experimento, com a parametrização de *cumulus* BM foi considerado como controle, portanto ele foi utilizado novamente com dados da temperatura da superfície do mar (TSM) modificados.

Posteriormente, foram feitos quatro testes alterando as TSM. Para o primeiro teste a TSM foi aumentada em 2°C em todo o tempo de simulação. Depois, optou-se por aumentar a TSM a partir da data de maturidade do sistema, que ocorreu em 9 de março de 2010, até a data de sua oclusão; esse experimento foi realizado aumentando a TSM em 1, 2 e 4°C.

Adicionalmente, para entendermos como seria o comportamento do sistema diante dos referidos experimentos para a parametrização KF, optou-se por fazê-los também com essa parametrização, resultando então, num total de 8 simulações testes para verificar o comportamento do ciclone diante das situações propostas. As configurações do modelo estão descritas na Tabela 3.

Tabela 3 - Configurações das simulações.

Número de domínio	Domínio Único
Ponto central do domínio	23,0 S 50,0 W
Resolução	25 km x 25 km
Número de pontos da grade	290 x 200
Resolução vertical	19 níveis
Projeção de Mapa	Mercator

A Tabela 4 apresenta um resumo de todas as simulações feitas com o modelo WRF. Primeiramente optou-se por fazer a simulação do evento com diferentes parametrizações de *cumulus*. Ao escolher-se a parametrização BM como mais representativa, fez-se os teste com diferentes tempos de inicialização e por fim, os testes de sensibilidade foram feitos com as parametrizações BM e KF, aumentando a TSM em 2°C durante todo o ciclo de vida do sistema, e aumentando a partir da data de maturidade do sistema (9 de março) até a data de oclusão em 1, 2 e 4°C.

Tabela 4 - Resumo dos experimentos feitos através do modelo WRF.

Nome do Experimento	Hora de inicialização (horas antes do início do sistema)	Esquema de Parametrização <i>Cumulus</i>	Temperatura Superfície Mar (TSM)
BM	24h	BM	Sem modificar
KF	24h	KF	Sem modificar
GRELL	24h	GRELL	Sem modificar
72h	72h	BM	Sem modificar
48h	48h	BM	Sem modificar
24h	24h	BM	Sem modificar
TSM+2_BM	24h	BM	+2°C Todo Período
TSM+1_BM_m	24h	BM	+1°C A partir dia 9
TSM+2_BM_m	24h	BM	+2°C A partir dia 9
TSM+4_BM_m	24h	BM	+4°C A partir dia 9
TSM+2_KF	24h	KF	+2°C Todo Período
TSM+1_KF_m	24h	KF	+1°C A partir dia 9
TSM+2_KF_m	24h	KF	+2°C A partir dia 9
TSM+4_KF_m	24h	KF	+4°C A partir dia 9

4. RESULTADOS

4.1 Trajetória dos Ciclones Subtropicais Estudados

Para conhecimento prévio dos ciclones analisados, algumas características dos seis ciclones subtropicais, como data de gênese, posição inicial (latitude e longitude), tempo de vida (dias) e distância percorrida de acordo com a Eq. 1 (considerando duas métricas: a soma da distância percorrida a cada seis horas e a distância calculada entre as posições iniciais e finais do ciclone) são apresentadas na Tabela 5.

Tabela 5 - Características dos seis ciclones subtropicais estudados sobre o Oceano Atlântico Sul.

Ciclone	Data da Gênese (Data da Ciclólise)	Posição Inicial		Vida Útil (Dias)	Distância Percorrida (km)	
		Latitude	Longitude		Todo Trajeto	Da Primeira à Última Posição
Anita	06Z04Mar2010 (00Z13Mar2010)	-19,75	-34,75	9	5361	2674
Arani	12Z08Mar2011 (18Z17Mar2011)	-24,00	-41,25	9	3769	1725
Bapo	18Z04Fev2015 (06Z10Fev2015)	-26,00	-43,50	6	3395	2622
Cari	00Z08Mar2015 (18Z17Mar2015)	-26,25	-45,00	10	3300	1441
Deni	00Z15Nov2016 (00Z18Nov2016)	-23,00	-42,50	3	2031	1766
Eçaí	00Z04Dez2016 (18Z06Dez2016)	-26,50	-47,50	3	1267	1156

Observa-se que Cari teve a vida mais longa (10 dias) seguida por Anita e Arani (9 dias), enquanto Deni e Eçaí tiveram a menor duração (3 dias). Anita viajou a maior distância. Todos os ciclones, exceto o Eçaí, apresentaram uma característica semi-estacionária, que se destaca pela grande diferença entre as distâncias percorridas considerando o deslocamento a cada 6 h e a distância da posição inicial à final (Tabela 5).

Os sistemas estudados tiveram gênese no verão ou em estações de transição, concordando com o estudo de Gozzo et al. (2014) que encontraram uma sazonalidade bem marcada na ocorrência dos ciclones subtropicais no verão e outono.

Na figura 9 temos a trajetória dos ciclones, e pode-se observar que todos os sistemas tiveram sua gênese ao norte de 30 °S e perto da costa sudeste / sul do Brasil. O Anita teve gênese em latitudes mais baixas, próximo à costa do Espírito Santo, seguido do Arani e Deni que também afetaram diretamente a região Sudeste. Bapo, Cari e Eçaí foram mais intensos próximo a região Sul. Os sistemas preferencialmente se deslocam para o sul e sudoeste até a fase de maturação. Apenas Arani deslocou-se ligeiramente para o norte durante sua fase inicial.

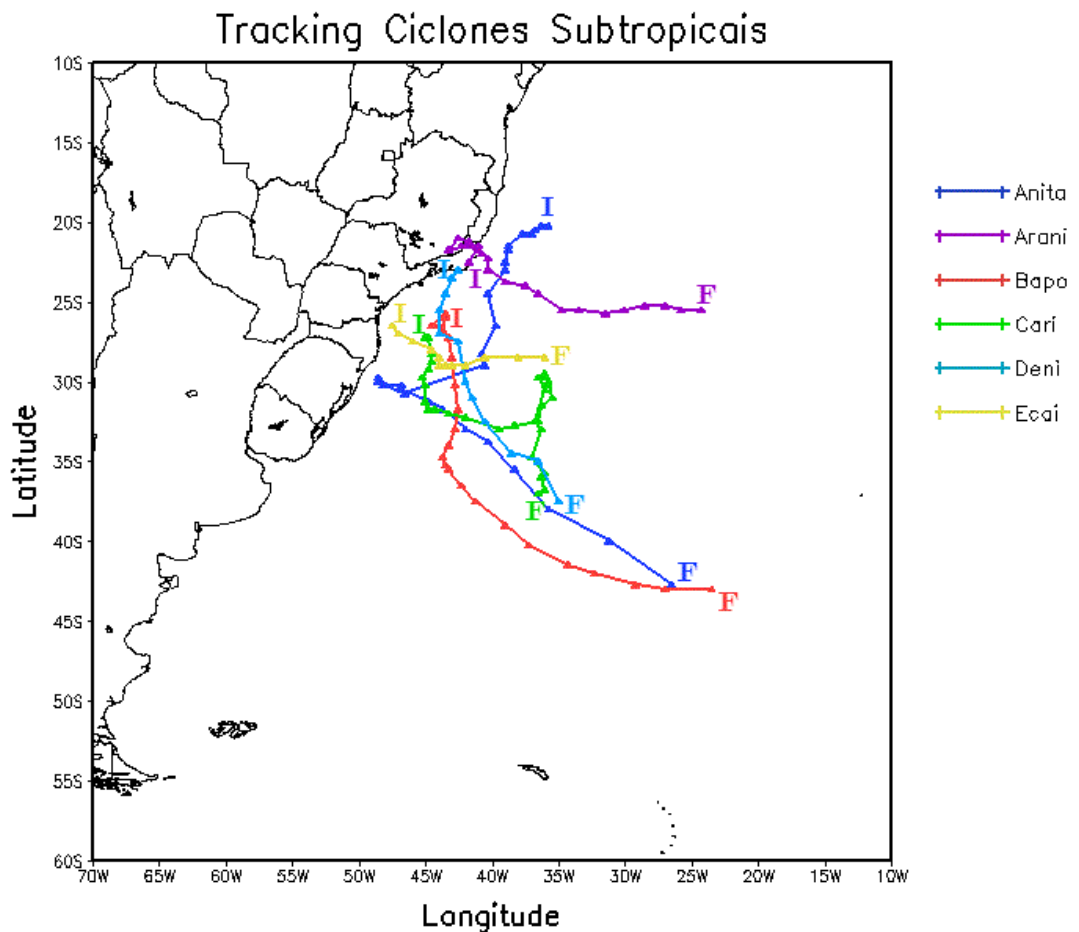


Figura 9 – Trajetória dos Ciclones estudados. Os pontos iniciais das trajetórias estão indicados pela letra I e os pontos finais pela letra F.

4.2 Análise Sinótica

Para avaliar as principais características dos ciclones subtropicais, este trabalho apresenta os campos sinóticos nas fases de gênese e maturidade de cada um dos sistemas estudados. A gênese é definida como o primeiro tempo sinótico com uma isóbara fechada no campo de pressão ao nível médio do mar. A escolha da data com base na pressão deve-se ao fato de que os campos atmosféricos são mais organizados do que quando há apenas circulação ciclônica registrada no campo de vorticidade relativa. A fase de maturidade foi definida como o estágio em que o sistema apresenta a maior vorticidade relativa ciclônica estendida verticalmente na coluna de atmosfera, um critério similar usado por Reboita et al. (2017b). Esses critérios de gênese e maturidade indicam as mesmas datas para o ciclo de vida de Anita e Arani, mostradas por Dias Pinto et al. (2013) e por Reboita et al. (2017b), respectivamente.

A Tabela 6 apresenta a data de gênese e maturidade e a média, calculada em uma caixa de $10^\circ \times 10^\circ$ de latitude por longitude do centro do ciclone, das variáveis: temperatura da superfície do mar (TSM), diferença entre a TSM e temperatura do ar a 2 metros de altura, fluxo de calor latente próximo à superfície (LH) e a soma dos fluxos de calor latente e sensível (LH + SH) para cada ciclone subtropical.

Os valores calculados indicam que a TSM é sempre maior durante a gênese do sistema, para todos os ciclones. Apenas o ciclone Arani que apresenta uma diferença pequena entre a TSM durante a gênese e a maturidade.

Analisando a diferença da TSM e da temperatura do ar a 2 metros, percebe-se que o oceano sempre está mais quente que o ar adjacente. Isso contribui para a transferência de fluxos de calor do oceano para a atmosfera. A maior diferença entre TSM e a temperatura do ar a 2 metros é do ciclone Anita, e também os maiores valores de LH e LH+SH, durante a fase de gênese, em relação aos demais sistemas estudados.

Tabela 6 - Características dos seis ciclones nas fases de gênese e maturidade, calculadas como a média em uma caixa de $10^\circ \times 10^\circ$ de latitude/longitude centrada no ciclone. Valores durante a fase de maturidade estão entre parênteses.

Ciclone	Gênese (Maturidade)	TSM (° C)	TSM - T_{ar} (°C)	LH (W m⁻²)	LH + SH (W m⁻²)
Anita	00Z06Mar2010 (12Z09Mar2010)	28,6 (24,7)	2,0 (0,9)	180,8 (110,4)	197,5 (121,3)
Arani	12Z14Mar2011 (12Z15Mar2011)	26,8 (26,6)	1,1 (0,9)	137,8 (103,6)	151,8 (111,5)
Bapo	06Z05Fev2015 (06Z07Fev2015)	26,0 (22,8)	1,4 (0,3)	108,1 (96,4)	119,6 (100,3)
Cari	00Z10Mar2015 (00Z12Mar2015)	26,1 (25,0)	1,1 (0,6)	102,6 (118,3)	111,8 (126,4)
Deni	06Z15Nov2015 (12Z17Nov2015)	23,3 (19,9)	0,5 (-0,5)	95,1 (33,9)	99,6 (25,2)
Eçaí	00Z04Dez2016 (06Z05Dez2016)	22,5 (21,7)	0,4 (1,1)	94,1 (172,1)	96,2 (191,8)

As figuras 10 e 11 apresentam os campos de altura geopotencial em 500 hPa juntos à pressão média ao nível do mar, para a fase de gênese e maturidade de cada sistema.

A gênese dos ciclones Anita (Figura 10 a), Deni (Figura 11 b) e Eçaí (Figura 11 c) ocorre sob um cavado com pequena amplitude em 500 hPa, já a gênese de Bapo (Figura 10 c) e Cari (Figura 11 a) ocorre na presença de um padrão de bloqueio tipo *cutoff-low*. A gênese do Arani (Figura 10 b) ocorre a leste de um cavado de onda curta que favoreceu uma região com movimentos ascendentes à jusante do seu eixo.

Os seis ciclones subtropicais desenvolveram-se a norte dos jatos em altos níveis, que indica uma região com fraco gradiente de temperatura em superfície. Este padrão também caracteriza uma das diferenças entre os ciclones extratropicais e subtropicais.

Em relação à pressão em superfície, os sistemas apresentam intensidade fraca de 1008 hPa para Arani, Bapo, Deni e Eçaí e 1012 hPa para Anita e Cari. Desde a gênese até a maturidade, os ciclones permanecem próximos à costa brasileira e a pressão central dos sistemas se tornam-se mais intensas.

Na fase de maturidade dos sistemas, o bloqueio tipo *cutoff-low* em que estão associados os ciclones Bapo (Figura 10 f) e Cari (Figura 11 d) se intensifica, enquanto que esse tipo de bloqueio se desenvolve na região dos ciclones Anita (Figura 10 d) e Eçaí (Figura 11 f). Com relação ao Arani (Figura 10 e) e Deni (Figura 11 f), estes se acoplam a um cavado de pequena amplitude em 500 hPa.

Cutoff low é um sistema de baixa pressão com núcleo frio em altos níveis da atmosfera e que integra os padrões de bloqueio em nível superior. Existem quatro tipos de bloqueios e, em três deles (bloqueio tipo dipolo ou bloqueio Rex, bloqueio ômega e bloqueio *cutoff low*), a baixa pressão é uma parte intrínseca e está localizada no lado equatorial de um centro de alta pressão (COMET, 2009).

Mctaggart-Cowan et al. (2006) também verificaram um padrão de bloqueio do tipo dipolo quando da ocorrência do ciclone Catarina e documentaram que na região de transição entre a baixa pressão e o centro de alta pressão no bloqueio, a circulação destes sistemas reduz a intensidade dos ventos de oeste, ou até mesmo altera o sentido do vento que muda de oeste para leste em níveis médios. Padrão similar foi documentado na ocorrência do Anita por Dias Pinto et al. (2013). A influência dos sistemas em altos níveis nos ciclones em superfície é mostrada através do deslocamento desses sistemas em superfície (Figura 9), pois os sistemas de altos níveis induzem o deslocamento dos ciclones subtropicais para sul/sudoeste (somente Arani deslocado diretamente para o leste) até a fase de maturidade.

A circulação induzida pelos níveis médio-superiores também contribui para o acoplamento do ciclone em superfície com a baixa em níveis médios, promovendo um ambiente barotrópico na fase de maturidade em Arani, Bapo, Cari e Eçaí.

No leste-sudeste do centro dos ciclones há uma alta pressão, que está ligada ao anticiclone subtropical do Oceano Atlântico Sul (ASAS). Este padrão ajuda a intensificar o vento de nordeste no lado leste dos ciclones em superfície (Figuras 10 e 11).

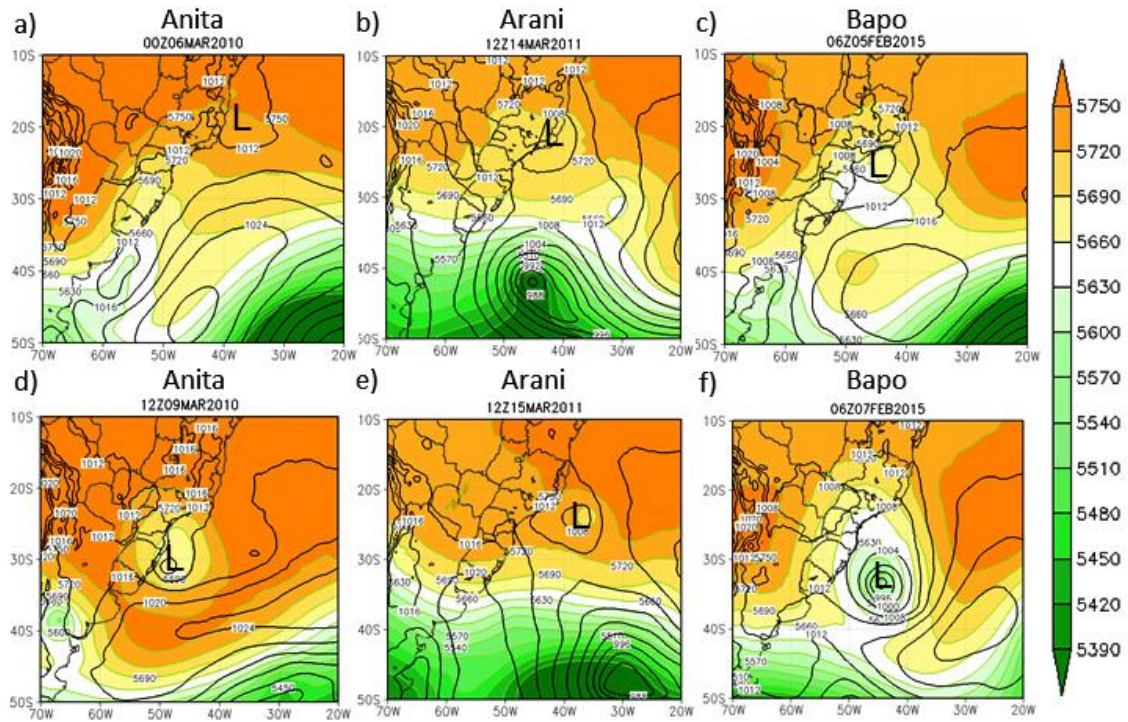


Figura 10 – Altura geopotencial em 500 hPa (m;cor) e pressão ao nível médio do mar (hPa; contorno) para a gênese e maturidade de: (a-d) Anita; (b-e) Arani e (c-f) Bapo. L indica a posição do centro do ciclone.

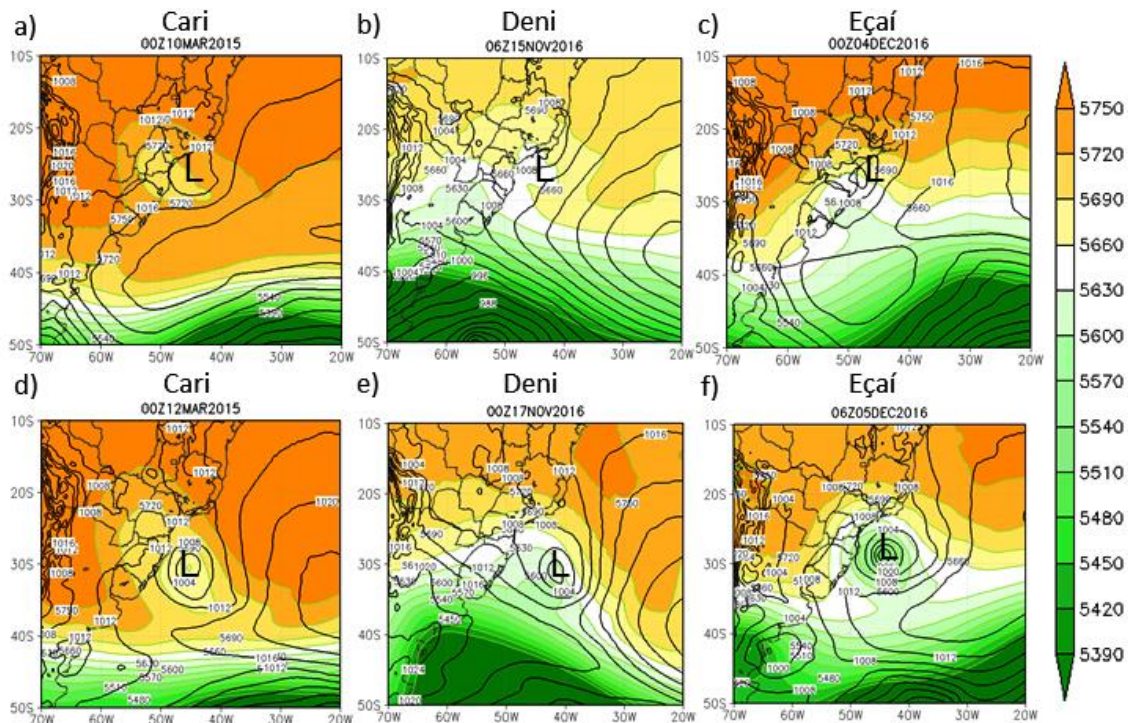


Figura 11 - Altura geopotencial em 500 hPa (m;cor) e pressão ao nível médio do mar (hPa; contorno) para a gênese e maturidade de: (a-d) Cari; (b-e) Deni e (c-f) Eçaí. L indica a posição do centro do ciclone.

Uma motivação para o estudo dos ciclones subtropicais são os ventos intensos que eles causam e que podem prejudicar a região litorânea. Essa característica dos ciclones subtropicais pode ser observada na Figura 12 que apresenta as imagens do canal infravermelho do satélite do GridSAT-B1 juntamente com a intensidade dos ventos em 925 hPa. Embora a intensidade do vento em 925 hPa tenha sido analisada durante todo o ciclo de vida dos seis ciclones subtropicais, só é apresentada a fase de maturidade, a fim de verificar sua máxima intensidade.

Durante a maturidade, os ventos mais intensos em Anita (Figura 12 a), Cari (Figura 12 d) e Eçaí (Figura 12 f) foram observados em seus setores sul, enquanto no Arani (Figura 12 b), Bapo (Figura 12 c) e Deni (Figura 12 e), tais ventos ocorreram em seus setores leste/sudeste. A ocorrência de ventos mais fortes, principalmente nos setores sul e/ou leste do centro dos ciclones, concorda com estudos anteriores, como Gozzo et al. (2014) e Gray (1968) que mostraram ventos máximos distantes do centro dos ciclones subtropicais.

Sobre o oceano Atlântico Sul, a localização de ventos intensos em relação ao centro do ciclone está associada a maiores gradientes de pressão horizontal devido à presença do ASAS a leste ou um anticiclone migratório ao sul dos ciclones.

Nas imagens de satélite (Figura 12), as áreas úmidas e, conseqüentemente, a nebulosidade são caracterizadas pela presença de grandes áreas com baixos valores de temperatura de brilho (cor branca) sobre os lados leste/sul dos ciclones.

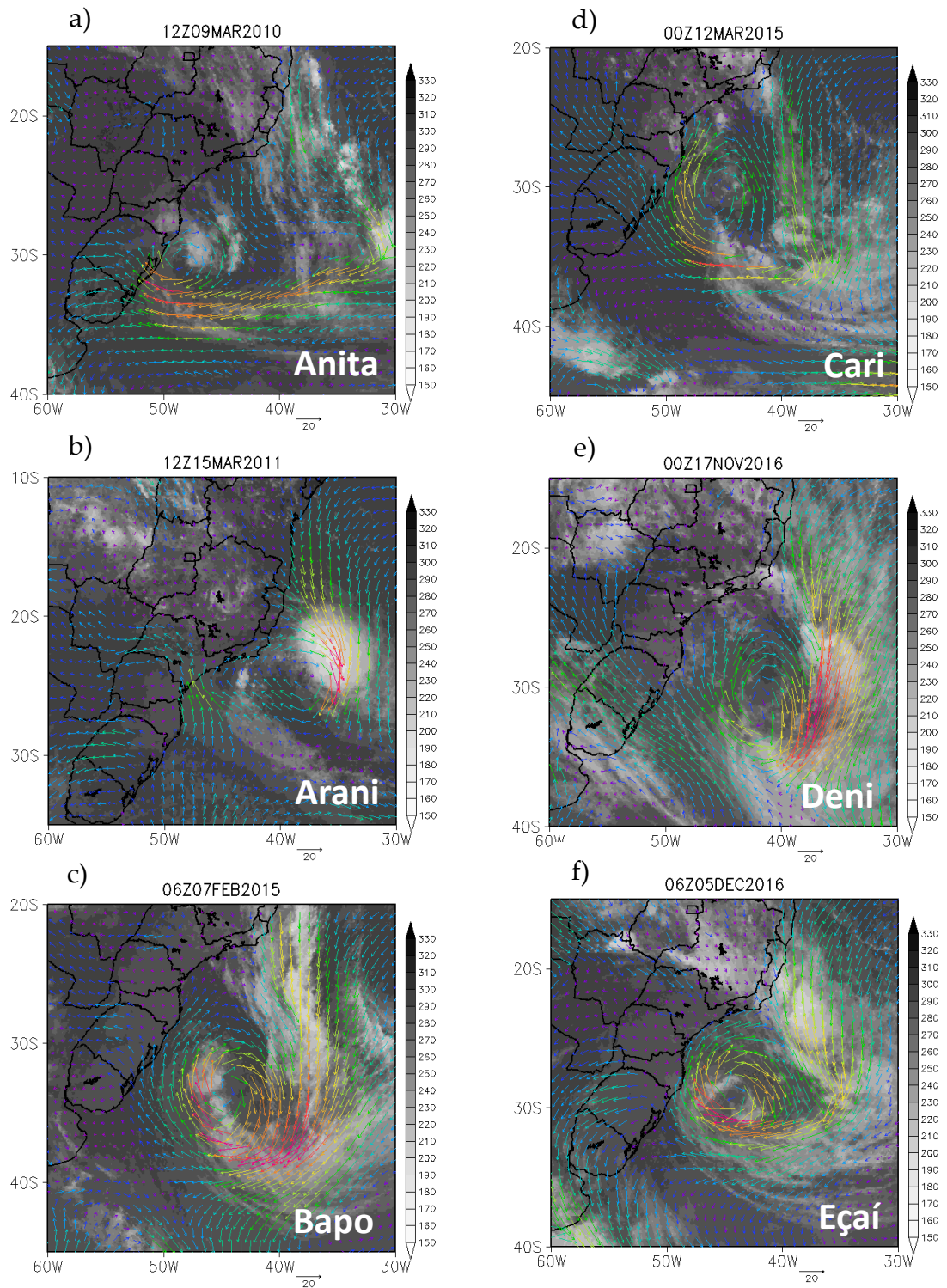


Figura 12 - Temperatura de brilho próximo a 11 microns (K; cor) e intensidade e direção do vento a 925 hPa ($m s^{-1}$; vetor) para a maturidade de: (a) Anita; (b) Arani; (c) Bapo; (d) Cari; (e) Deni; (f) Eçaí.

Os estudos de Montgomery e Farrell (1993) e de Zhang e Sippel (2009) mostram que a convecção úmida é a principal forçante para o desenvolvimento de ciclones tropicais. Como os ciclones subtropicais têm algumas características semelhantes às dos tropicais, é importante conhecer suas fontes de calor e umidade. Neste trabalho, verificou-se que as fontes de calor e umidade são localmente fornecidas por fluxos de calor latente (LH) e sensível (SH) ou transportados de áreas remotas. Neste sentido, as figuras 13 e 14 mostram os fluxos de calor latente + sensível e a vorticidade em 925 hPa, para os ciclones subtropicais estudados.

A Tabela 6 mostra que os ciclones se desenvolvem em um ambiente onde o mar é mais quente que o ar acima ($T_{ar} > T_{SM}$). Em termos de fonte de umidade local, a Tabela 6 e as Figuras 13 e 14 indicam que o Anita (Figura 13 a) se desenvolveu em uma região com LH médio de $\sim 180 \text{ W m}^{-2}$, enquanto Arani (Figura 13 b) se desenvolveu em uma região com $\sim 138 \text{ W m}^{-2}$; médias mais baixas de LH ($\sim 100 \text{ W m}^{-2}$) ocorreram na gênese dos outros quatro ciclones.

Exceto Anita, todos os outros ciclones tiveram sua gênese em um ambiente com LH próximo à climatologia calculada pra essa região por Reboita et al. (2010), que é $\sim 100 \text{ W m}^{-2}$ no verão e $\sim 130 \text{ W m}^{-2}$ no outono. Esse é um indicativo de que as fontes de umidade remotas podem ter uma contribuição importante para o desenvolvimento dos ciclones subtropicais, conforme discutido anteriormente por Gozzo et al. (2017).

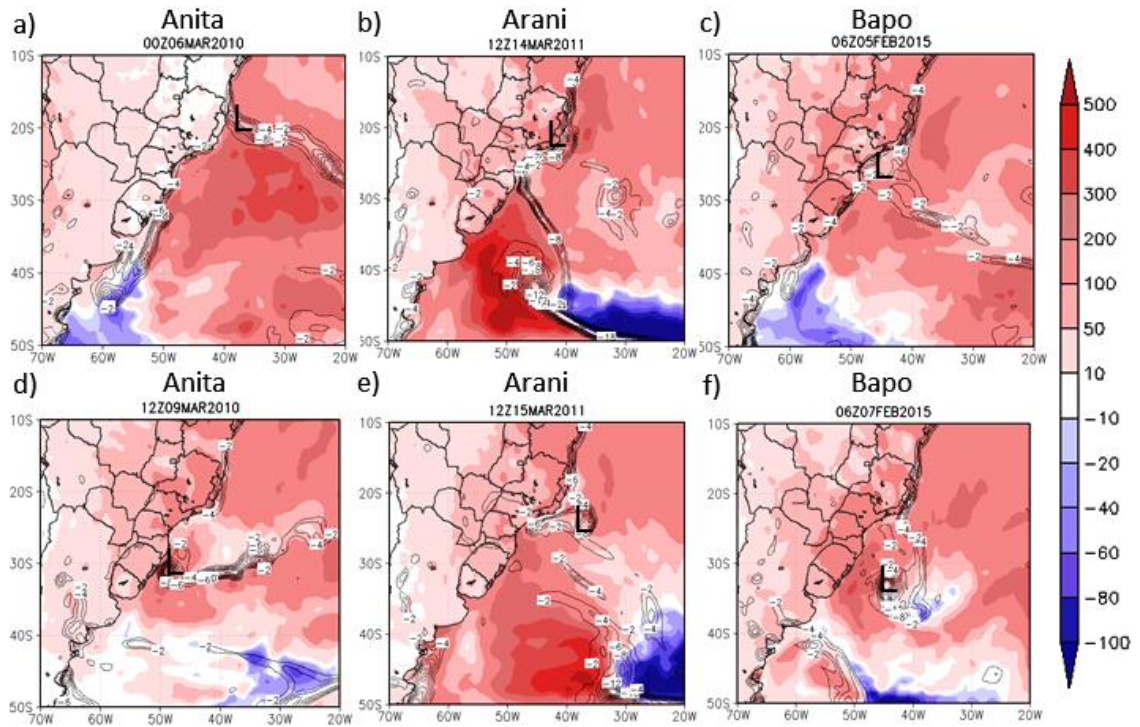


Figura 13 – Fluxos de calor latente + sensível (Wm^{-2} ; cor) e vorticidade em 925 hPa (10^{-5}s^{-1} ; contorno) para a gênese e maturidade de: (a-d) Anita; (b-e) Arani e (c-f) Bapo. L indica a posição do centro do ciclone.

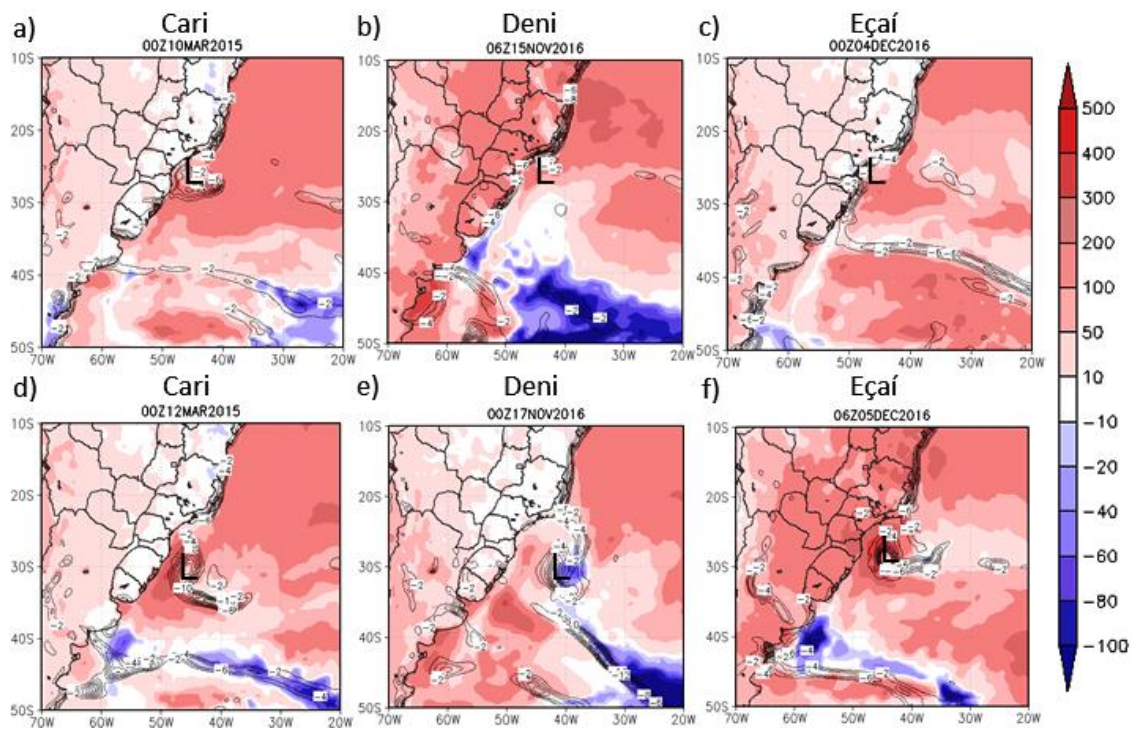


Figura 14 – Fluxos de calor latente + sensível (Wm^{-2} ; cor) e vorticidade em 925 hPa (10^{-5}s^{-1} ; contorno) para a gênese e maturidade de: (a-d) Cari; (b-e) Deni e (c-f) Eçaí. L indica a posição do centro do ciclone.

Assim como em Gozzo et al. (2017), as fontes de umidade remotas foram indicadas pela variável divergência do fluxo de umidade integrado na vertical (Figuras 15 e 16). A convergência do fluxo de umidade verticalmente integrado é uma característica comum na região de gênese dos seis ciclones, resultante dos ventos do noroeste e ventos de nordeste do setor leste do ASAS. Da gênese à maturidade, há um aumento na convergência do fluxo de umidade ao redor dos ciclones, que é favorecido pelos ventos intensos, como mostrado na Figura 12. Essas características encontradas concordam com Gozzo et al. (2017), que mostrou uma forte contribuição das mesmas fontes de umidade remotas favorecendo o desenvolvimento dos ciclones subtropicais para esta região de estudo. Ambas as fontes de umidade (LH local e convergência de fluxo de umidade) são o combustível para a convecção de *cumulus*, com consequente liberação de calor latente por condensação.

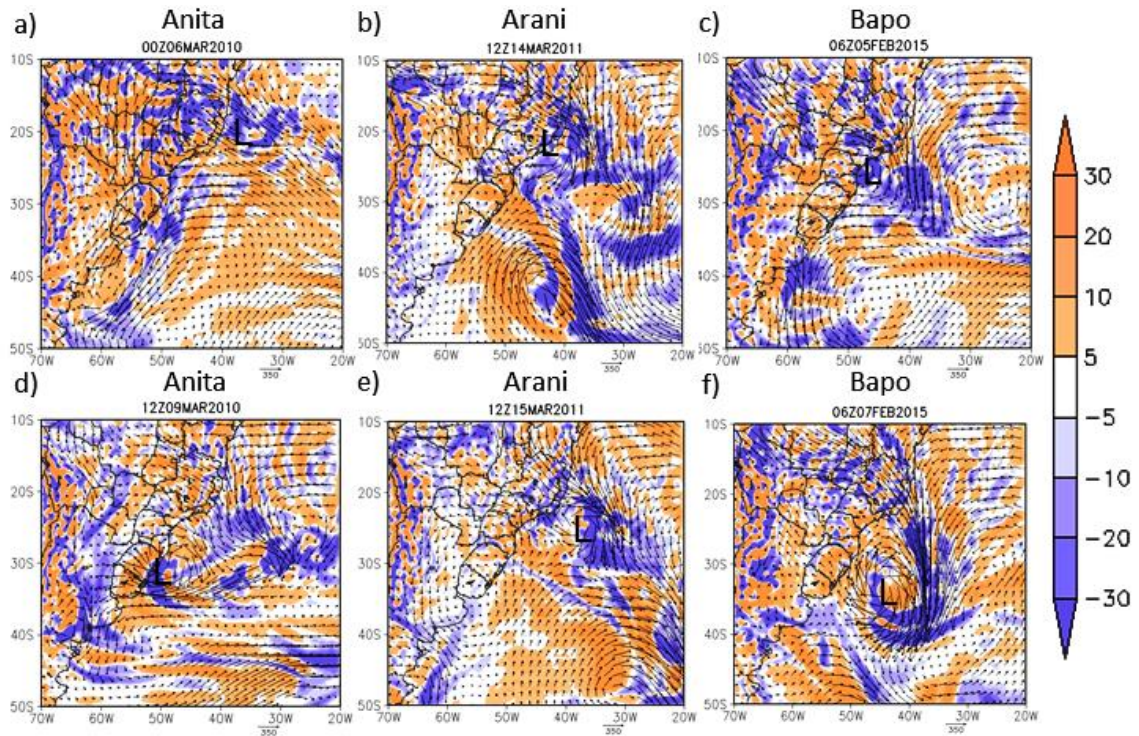


Figura 15 - Divergência do fluxo de umidade integrado na vertical ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$; cor e vetor) para a gênese e maturidade de: (a-d) Anita; (b-e) Arani e (c-f) Bapo. L indica a posição do centro do ciclone.

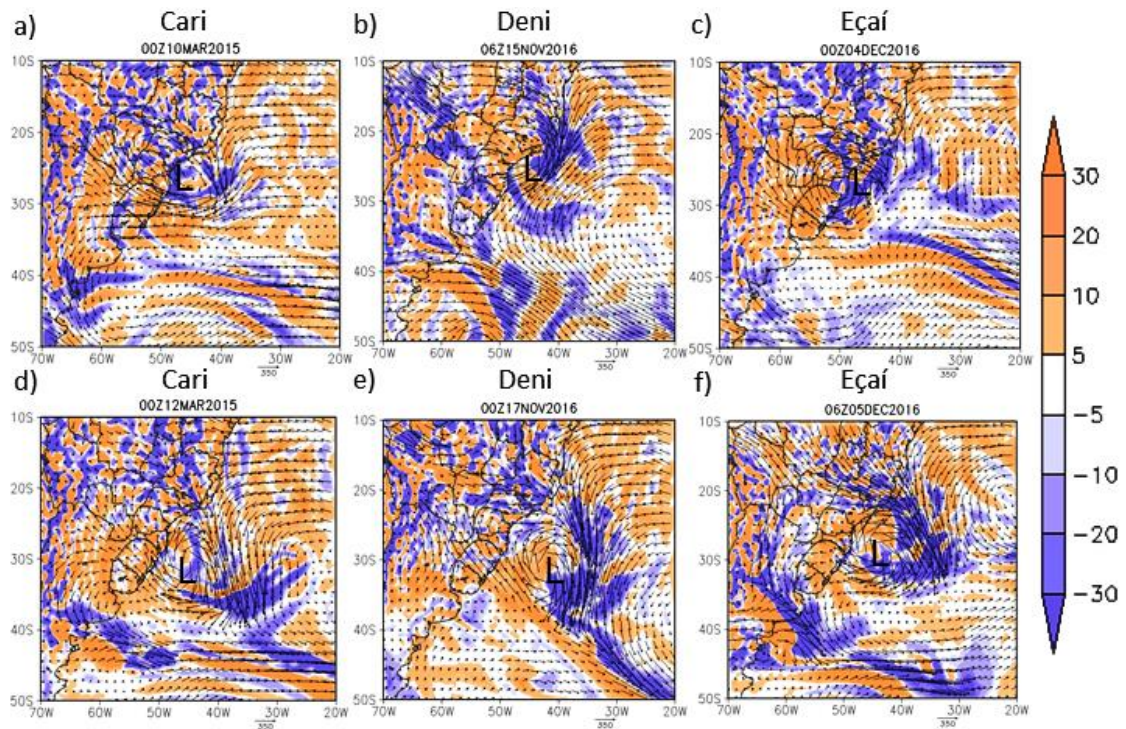


Figura 16 - Divergência do fluxo de umidade integrado na vertical ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$; cor e vetor) para a gênese e maturidade de: (a-d) Cari; (b-e) Deni e (c-f) Eçaí. L indica a posição do centro do ciclone.

Outro fator importante para o suporte dos ciclones subtropicais são os baixos valores de cisalhamento vertical do vento, pois favorecem a organização da convecção. O estudo de DeMaria (1996) sobre os efeitos do cisalhamento vertical na intensidade dos ciclones mostra que valores baixos de cisalhamento vertical do vento fornecem um potencial para a organização vertical da nebulosidade nos ciclones favorecendo o aprofundamento da pressão; também é discutido que o efeito do cisalhamento vertical do vento na mudança da intensidade do ciclone tropical é explicado através da “ventilação”. Nesse mecanismo, o calor e a umidade nos níveis médio-superiores são desviados da circulação de baixo nível, impedindo o desenvolvimento do ciclone.

As Figuras 17 e 18 mostram o cisalhamento do vento (200-850 hPa) junto com a diferença entre a TSM e temperatura do ar a 2m para os sistemas estudados, nas fases de gênese e maturidade. As ciclogêneses ocorreram em regiões com menor cisalhamento vertical do vento (200–850 hPa) do que o valor climatológico de $\sim 26 \text{ m s}^{-1}$ indicado por Pezza e Simmonds (2005). Anita (Figura 17 a), Arani (Figura 17 b) e Cari (Figura 18 a) desenvolveram-se especialmente sob cisalhamento vertical do vento menor que 8 m s^{-1} , que é considerado um limiar ideal para a gênese de ciclones tropicais, conforme Gray (1968). Durante a maturidade dos ciclones subtropicais, o cisalhamento vertical do vento muda para negativo ou intensifica os valores negativos observados na gênese. Esses valores negativos indicam ventos mais intensos em níveis baixos (850 hPa) do que em níveis superiores (200 hPa), com grande potencial destrutivo (como também ocorre normalmente em tempestades tropicais).

Neste contexto, ressalta-se que os padrões tipo bloqueios são importantes para reduzir o cisalhamento vertical do vento e que este último favorece a organização das nuvens convectivas ao redor do centro do ciclone. Portanto, está implícito que há liberação de calor latente por condensação na atmosfera, o que, por sua vez, ajuda a intensificar os movimentos ascendentes e a diminuir a pressão na superfície. A partir das análises anteriores, torna-se evidente que o cisalhamento do vento vertical mais fraco que a climatologia, o suporte dinâmico da pequena amplitude ou uma situação de bloqueio nos níveis médios e a convergência do fluxo de umidade são os “ingredientes” que contribuem para a ciclogênese subtropical em superfície.

De acordo com Scoccimarro et al. (2017) esse resfriamento contribui para uma diminuição na transferência de SH do oceano para a atmosfera, levando a um enfraquecimento dos ciclones tropicais, característica que também pode se aplicar aos ciclones subtropicais. Em relação a diferença entre Tar e TSM, é menor durante a fase de maturidade que na fase inicial (Figuras

17 e 19; Tabela 6), o que resultaria em cobertura de nuvens e na mistura da camada superior do mar devido a ventos fortes e ao processo de ressurgência de água mais fria na superfície do mar.

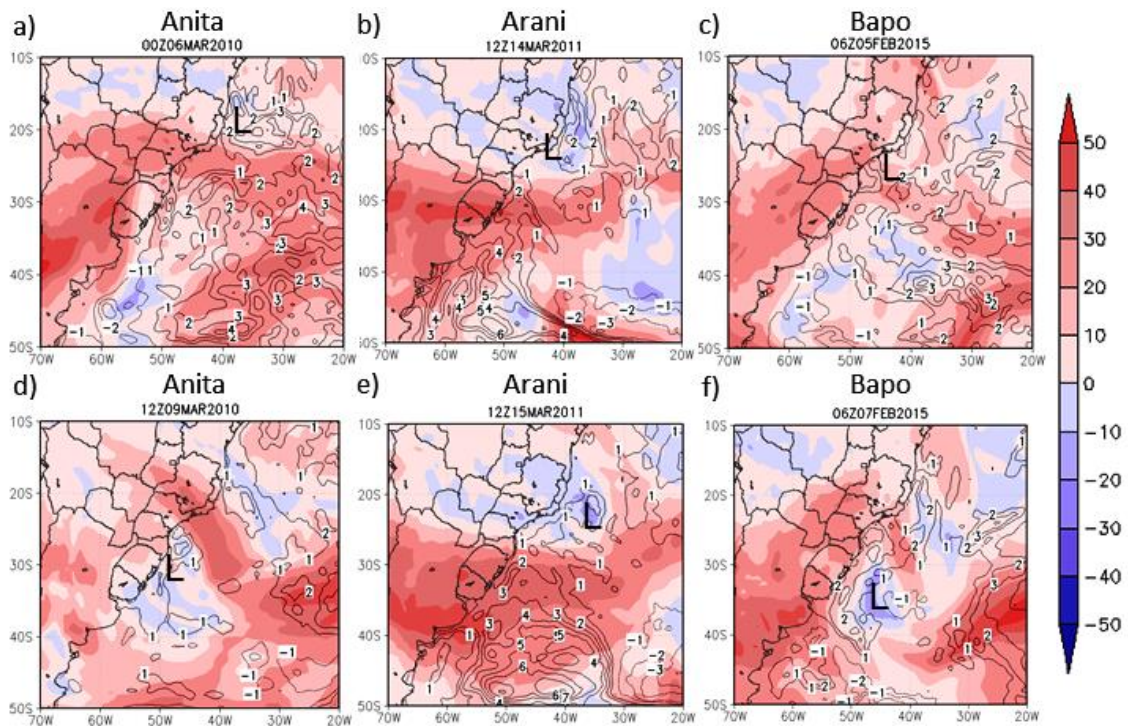


Figura 17 – Cisalhamento do vento (200-850) (ms^{-1} ; cor) e TSM - temp. a 2m ($^{\circ}\text{C}$; contorno) para a gênese e maturidade de: (a-d) Anita; (b-e) Arani e (c-f) Bapo. L indica a posição do centro do ciclone.

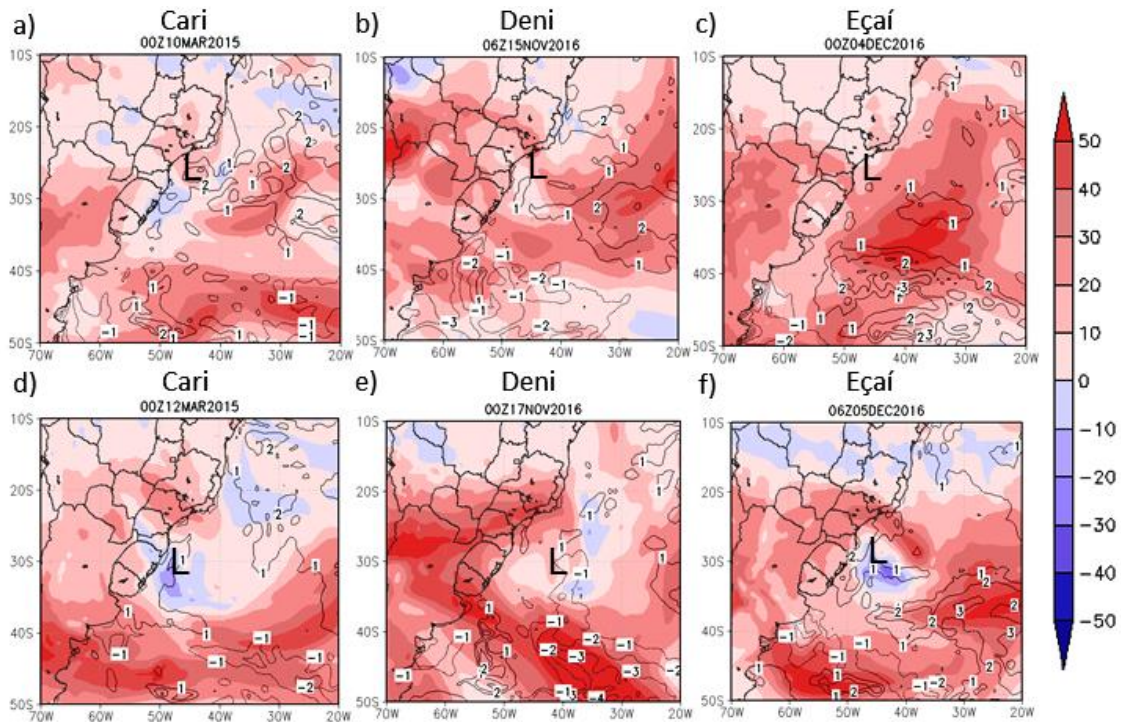


Figura 18 - Cisalhamento do vento (200-850) (ms^{-1} ; cor) e TSM - temp. a 2m ($^{\circ}\text{C}$; contorno) para a gênese e maturidade de: (a-d) Cari; (b-e) Deni e (c-f) Eçaí. L indica a posição do centro do ciclone.

A estrutura vertical dos ciclones foi analisada através de seções transversais verticais oeste-leste baseadas na latitude central destes sistemas. Por brevidade, é mostrada a fase de maturidade dos sistemas. A Figura 19 apresenta o perfil vertical do desvio zonal de temperatura e anomalia de altura geopotencial. Em geral, o ar mais quente que a média zonal predomina da superfície para níveis médios/superiores perto do centro do ciclone, e o ar mais frio é encontrado nos máximos na maioria dos eventos. Portanto, esse padrão corresponde à estrutura vertical dos ciclones subtropicais, que é diferente daquela observada nos ciclones extratropicais (quente no leste e frio no oeste dos ciclones) e tropicais (o centro do sistema é mais quente que o ambiente).

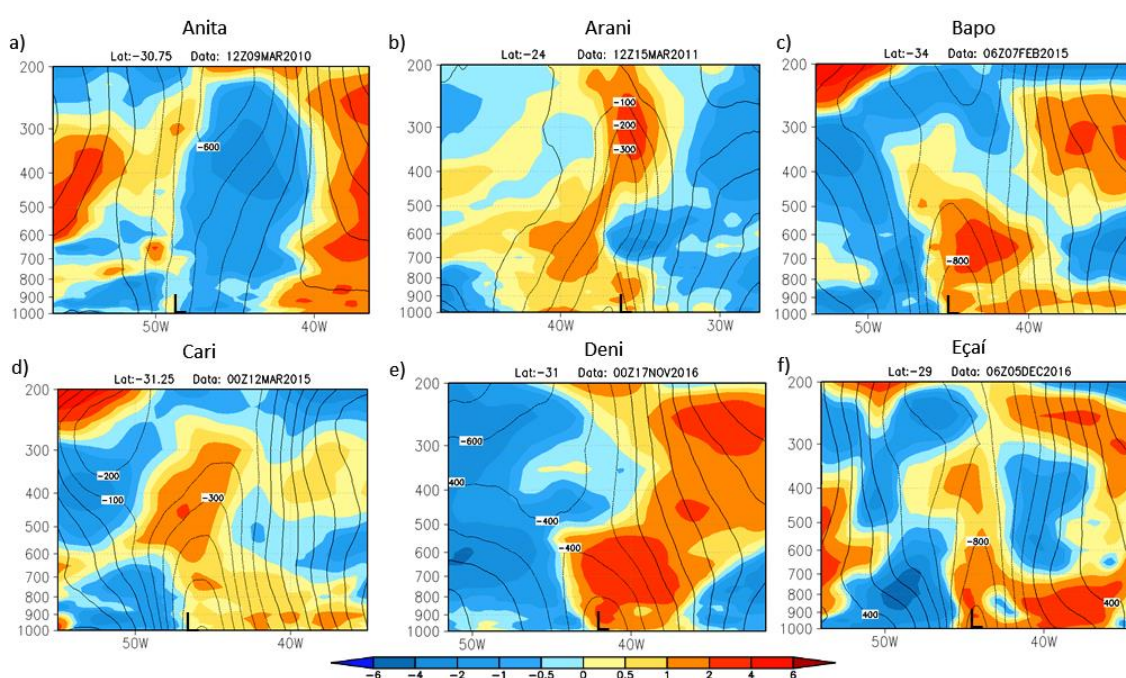


Figura 19 - Perfil vertical do desvio zonal de temperatura ($^{\circ}\text{C}$; cor) e anomalia de altura geopotencial (m; contorno) para a maturidade de: (a) Anita; (b) Arani; (c) Bapo; (d) Cari; (e) Deni; (f) Eçaí.

Quando os ciclones subtropicais atingem a maturidade, uma faixa vertical de intensa vorticidade ciclônica ocupa a maior parte da profundidade da troposfera, da superfície até ~ 300 hPa (Figura 20). No entanto, a vorticidade ciclônica mais intensa é observada em níveis baixos, com exceção de Arani (Figura 20 b). Ao longo da vida dos ciclones subtropicais, a faixa vertical de vorticidade quase não se inclina na vertical, o que é mais característico dos ciclones tropicais, como mostrado por Reboita et al. (2017b). Por outro lado, o tubo de vorticidade é mais raso (estendendo-se a ~ 400 hPa) do que o normalmente observado em ciclones tropicais (com extensão chegando a 100 hPa).

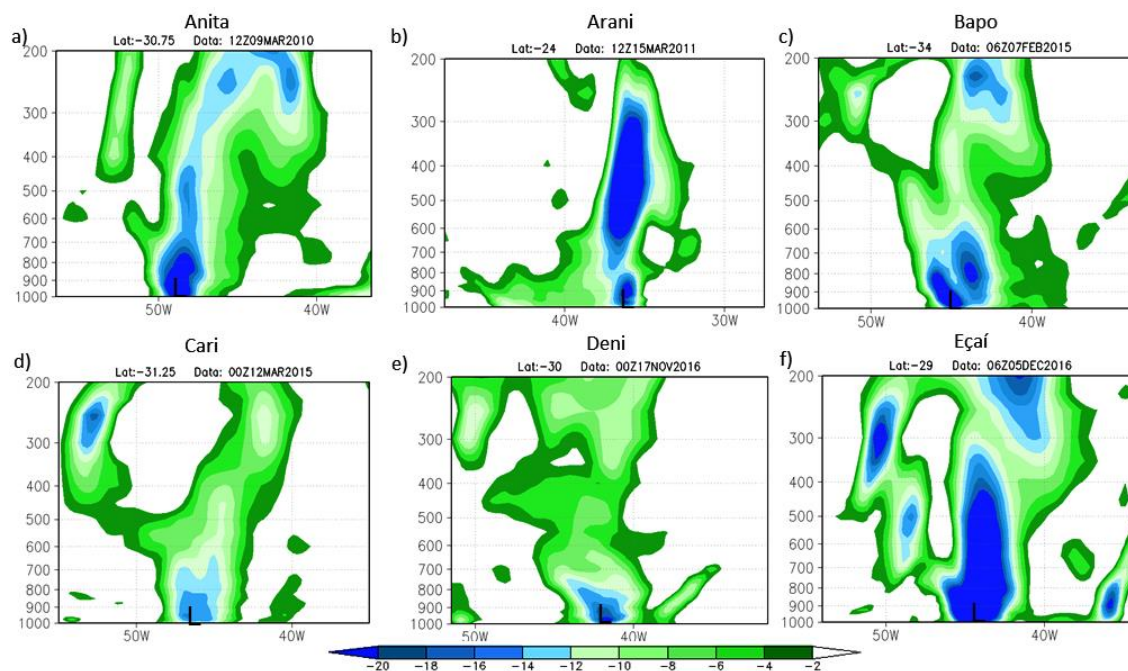


Figura 20 - Perfil vertical vorticidade relativa (10^{-5}s^{-1}) para a maturidade de: (a) Anita; (b) Arani; (c) Bapo; (d) Cari; (e) Deni; (f) Eçaí.

4.3 Experimentos Numéricos

4.3.1 Definição da simulação controle

Dias Pinto et al. (2013) mostraram que durante os dias 9 e 10 de março de 2010, os fluxos turbulentos de calor (calor latente mais calor sensível) tiveram uma grande redução na região sob o ciclone subtropical Anita. Diante disso, os autores sugeriram que se esses fluxos não tivessem reduzido, o Anita teria apresentado transição para ciclone tropical. O objetivo aqui é testar essa hipótese. Para tanto, serão apresentados experimentos realizados com o modelo WRF.

Embora Abreu e da Rocha (2015) tenham verificado que a utilização da parametrização de *cumulus* BM no WRF é a que melhor representa o ciclone subtropical Anita, aqui além dessa parametrização foram testadas outras duas: KF e Grell. Os autores mencionados usaram as análises do NCEP com 1° de resolução horizontal para dirigir o modelo, enquanto no presente estudo foram utilizadas condições iniciais e de contorno com aproximadamente $0,5^\circ$ de resolução horizontal e 28 níveis verticais obtidas do modelo *Global Forecast System* (GFS), do mesmo centro, NCEP.

Foram realizados três experimentos mudando a parametrização *cumulus* e inicializados com 24 horas de antecedência. A Figura 21 mostra a trajetória do ciclone em cada experimento (a trajetória foi obtida identificando o menor valor de pressão central ao longo do ciclo de vida do Anita), a Figura 22 a evolução temporal da pressão no centro do ciclone e a Figura 23 o CPS. Na simulação usando Grell, o centro do ciclone fica deslocado para oeste atingindo a costa de Santa Catarina, o que não ocorre na reanálise. Já o experimento usando a parametrização de KF desloca para oeste a trajetória do ciclone até a maturidade, passando a representá-la adequadamente nessa fase. Porém, a simulação que representa a trajetória do Anita mais similar à reanálise é a usando o esquema de BM (Figura 21). Em termos de pressão no centro do ciclone (Figura 22), a simulação com Grell mostra valores similares à reanálise entre os dias 5 e 6, mas simula um sistema muito mais intenso (menores valores de pressão) nos dias subsequentes. Já a simulação com KF desde o estágio inicial do ciclone produz um sistema mais intenso. Embora a simulação com o esquema de BM também subestime a pressão central do ciclone nos dois primeiros dias do ciclo de vida, nos demais possui valores muito similares aos observados (Figura 22).

Considerando o CPS, entre os dias 5 e 7, B possui valores entre -10 e 10, $-V_T^L$ entre 0 e 60 m e $-V_T^U$ entre -50 e -100 m na simulação BM (Figura 23 a), o que indica as características híbridas do Anita (ver Tabela 1 na metodologia). No dia 10, que poderia ser o da transição para tropical, B continua próximo de 10, mas o $-V_T^L$ e $-V_T^U$ reduzem para próximo de zero, enquanto no dia 11, $-V_T^L$ e $-V_T^U$ se tornam negativos indicando que o sistema adquiriu características extratropicais. De forma geral, o CPS obtido com a simulação de BM se assemelha com o da reanálise ERA5 mostrado em Reboita et al. (2019). Os outros dois experimentos também mostram a estrutura híbrida do Anita ($-V_T^L > 0$ e $-V_T^U < 0$) até o dia 8, porém não mostram a transição do ciclone para extratropical como ocorreu na observação, mas para tropical ($-V_T^U > 0$). Embora Hart (2003) indique que para ser um ciclone tropical o parâmetro B deve estar entre $-10 < B < 10$, a natureza não tem limiares fixos, então pode-se assumir as características mostradas nos dois CPSs (Figura 23 b e c) como de um sistema tropical. Ainda com relação ao experimento com o esquema Grell, a intensidade do vento em 925 hPa é muito superestimada, como mostra o tamanho dos círculos no CPS (Figura 23 c). Em síntese, o experimento que simula o ciclone subtropical Anita mais similar à observação é o utilizando BM, portanto, ele é o indicado para testar a hipótese de transição.

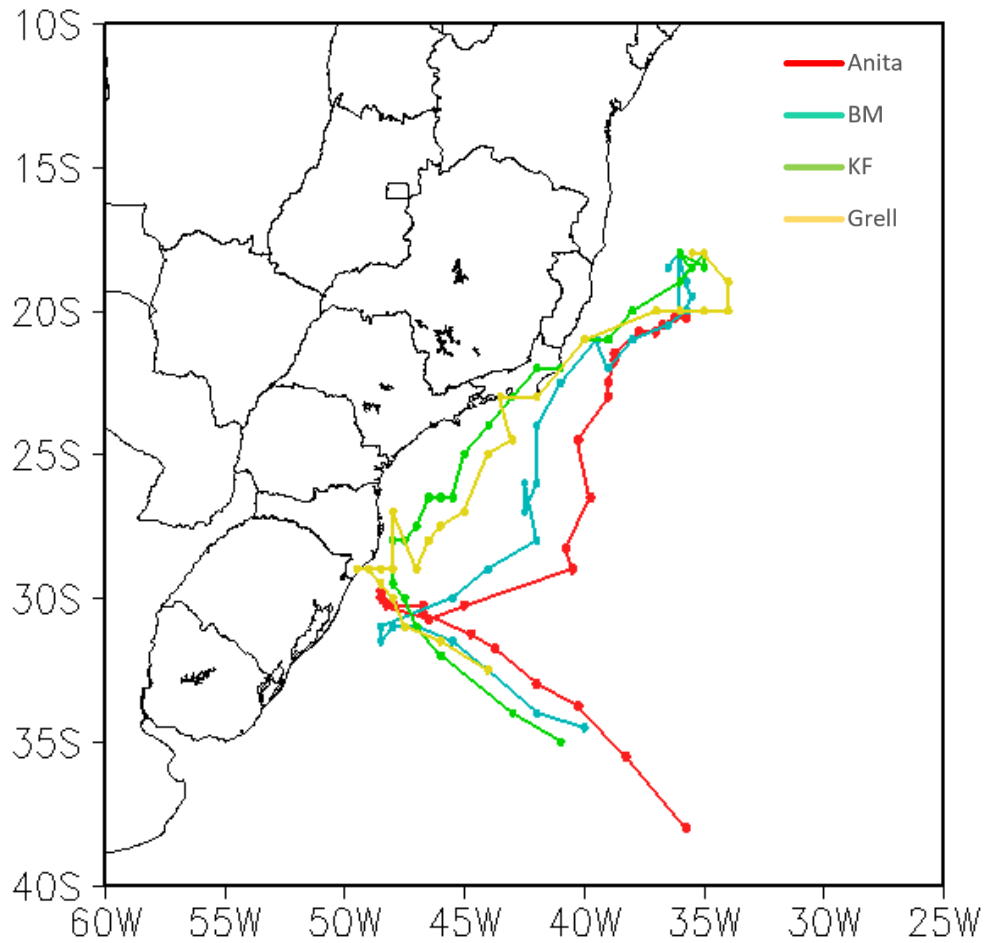


Figura 21 - Trajetória das simulações com as parametrizações de *cumulus* BM, KF e Grell comparadas à trajetória do ciclone Anita obtida com a reanálise ERA5.

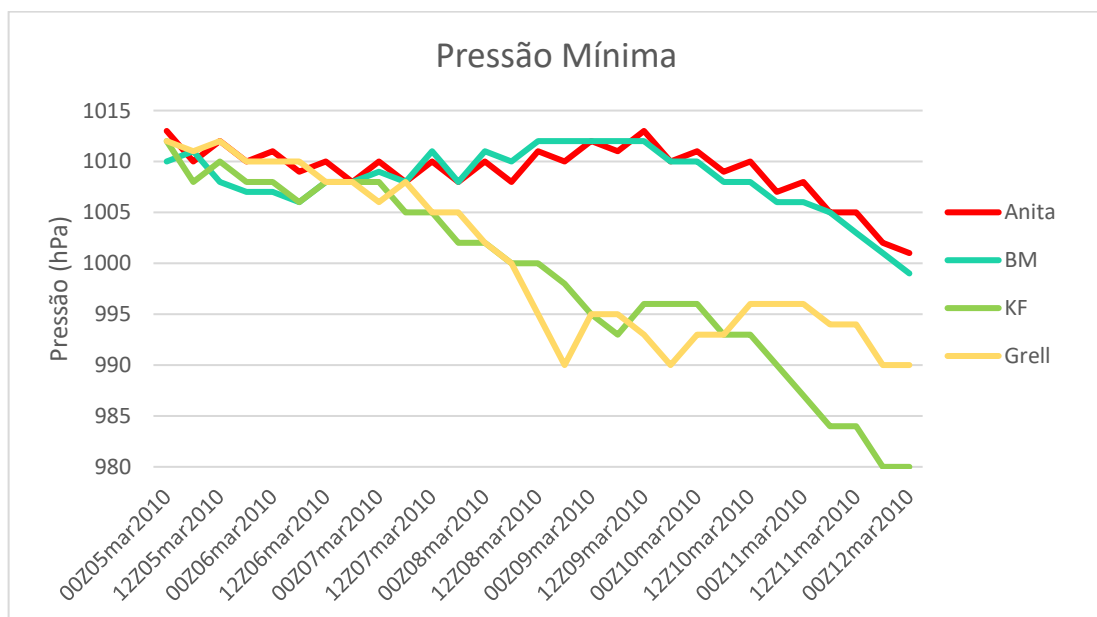


Figura 22- Evolução temporal da pressão central das simulações com as parametrizações de *cumulus* BM, KF e Grell comparadas à pressão do ciclone Anita (ERA5).

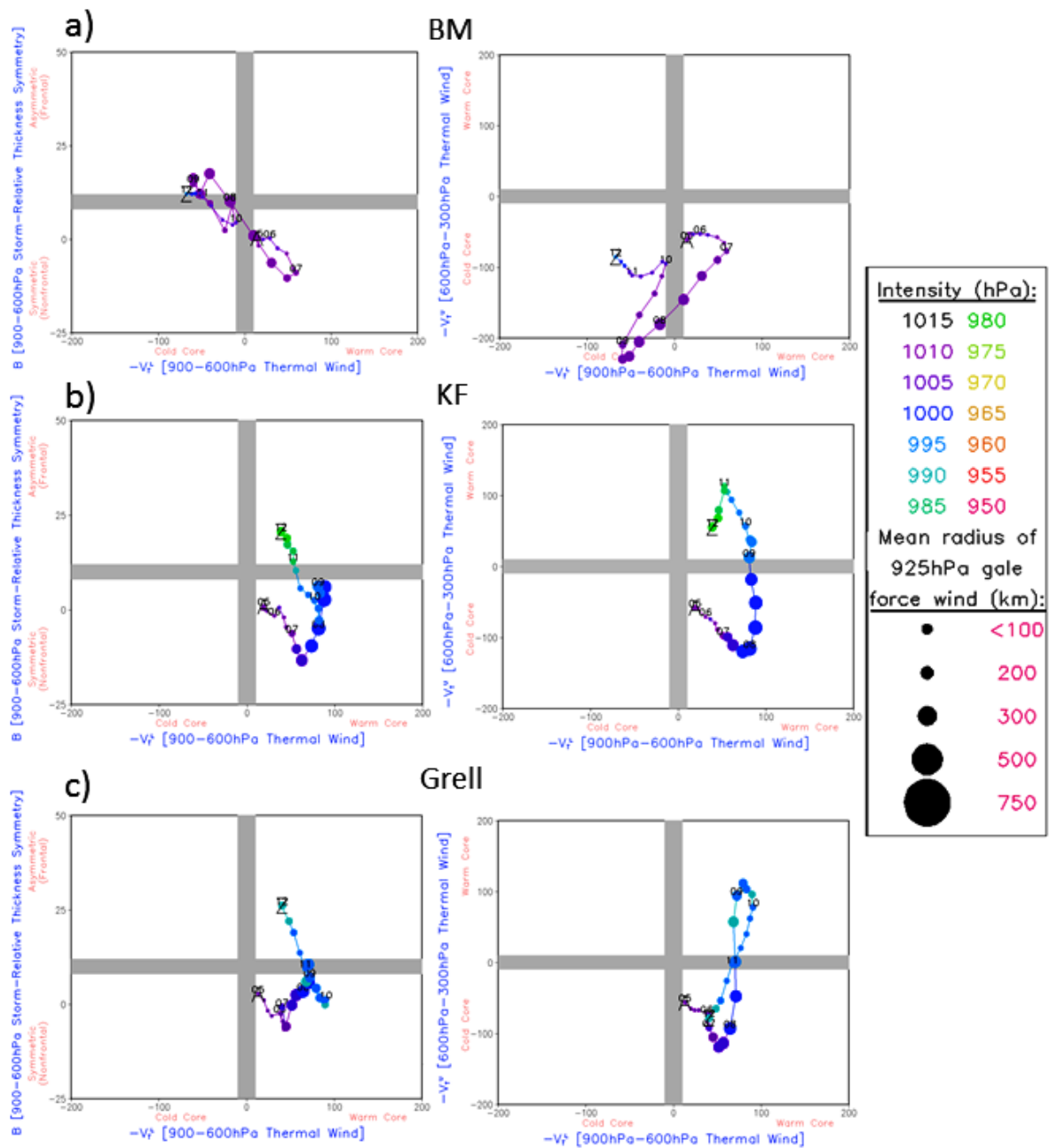


Figura 23 - CPS das simulações com as parametrizações de cumulus: (a) BM; (b) KF e (c) Grell. A coluna da esquerda apresenta os parâmetros B versus $-V_T^L$, e na coluna da direita os parâmetros $-V_T^L$ versus $-V_T^U$. A e Z indicam, respectivamente, a início e fim do ciclo de vida do ciclone. O tamanho do círculo indica o raio médio da força do vento em 925 hPa (ms^{-1}) e as cores são os valores da pressão ao nível do mar (ver escala à direita da figura).

Antes de testar a referida hipótese, mais dois experimentos foram realizados para verificar a sensibilidade do modelo com o esquema de BM a diferentes horas de inicialização (72 horas antes do início do Anita, 48 horas e 24 horas) e para escolher a melhor simulação como a controle.

A Figura 24 mostra a trajetória do Anita na reanálise e nas 3 simulações. Embora os experimentos com 72 e 48 h de antecedência, durante o início do ciclo de vida do ciclone, mostram a posição do sistema mais próxima do observado do que o com 24 h de antecedência, esse último simula melhor a posição do Anita quando se encontra próximo à costa do Rio Grande do Sul (Figura 24 d), local onde o Anita poderia ter transicionado para tropical se os fluxos de calor total não tivessem reduzido, de acordo com Dias Pinto et al. (2013). Em termos de pressão central (Figura 25), embora no dia 5 de março a pressão seja melhor simulada pelo experimento com 48 h de antecedência, a partir desse dia a pressão passa a ser melhor representada pela simulação com antecedência de 24 h. O experimento com 72 h de antecedência simula um ciclone muito mais intenso do que o observado. Diante dessas informações, o experimento com antecedência de 24 horas foi escolhido como simulação controle.

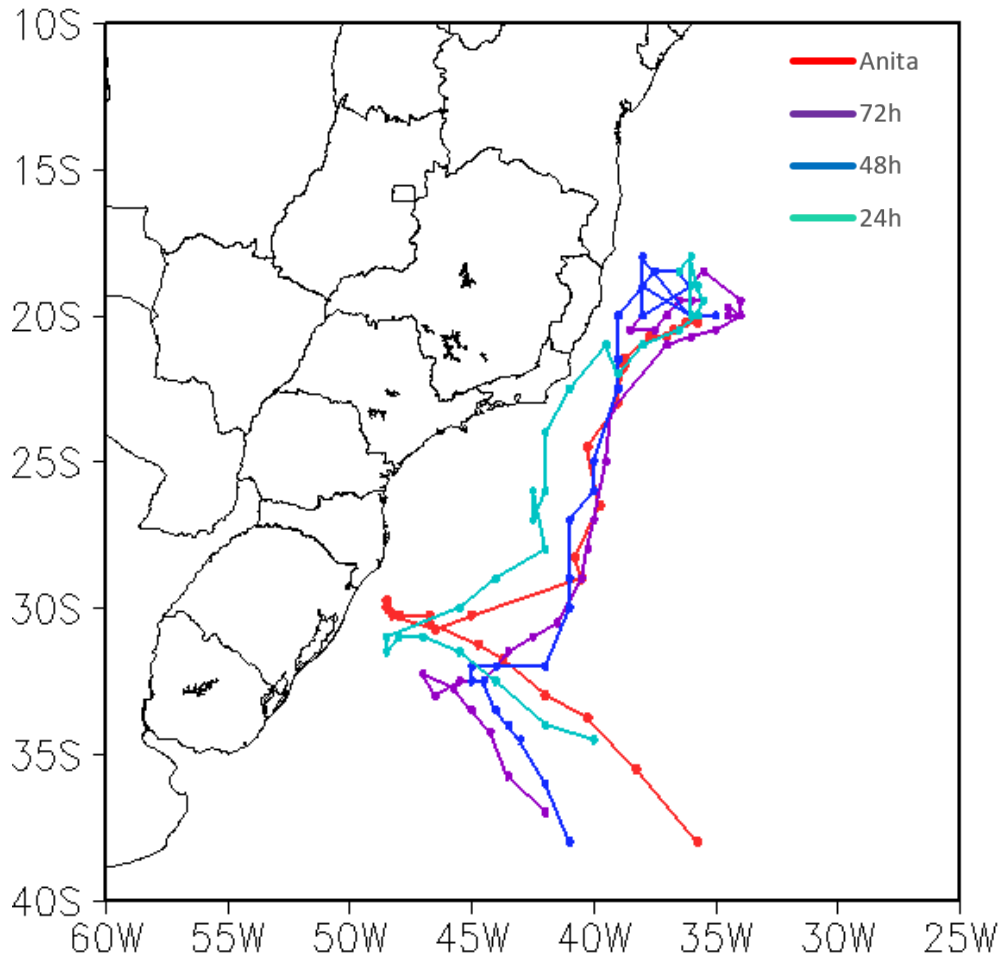


Figura 24 - Trajetória das simulações com 72, 48 e 24h de antecedência comparadas à trajetória do ciclone Anita (ERA5).

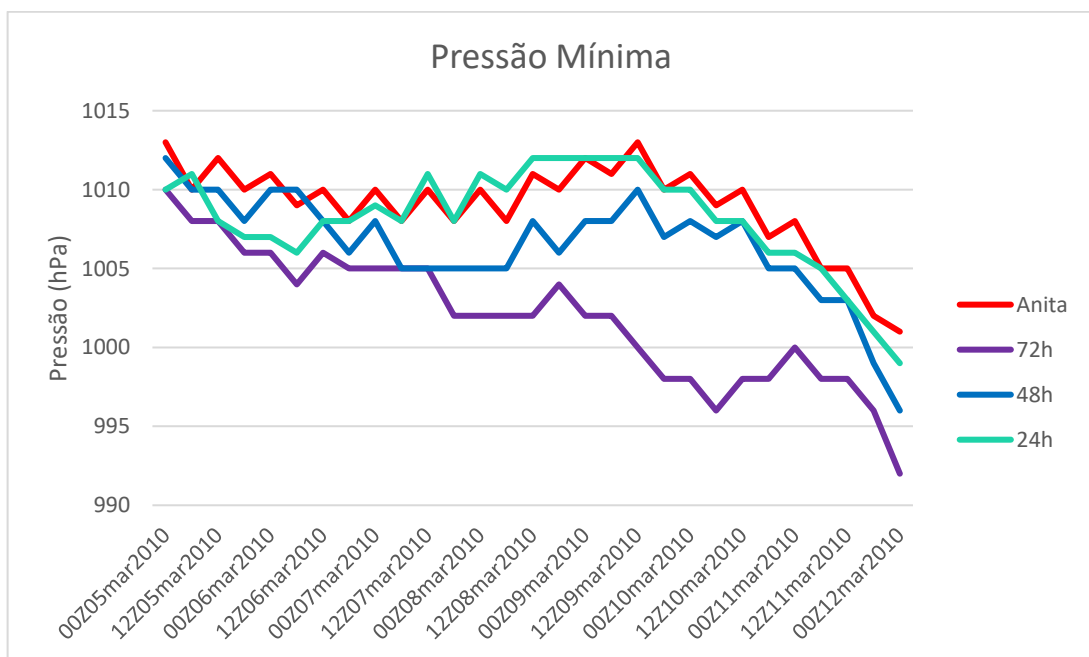


Figura 25 - Evolução temporal da pressão central das simulações com 72, 48 e 24h de antecedência comparadas à pressão do ciclone Anita (ERA5).

4.3.2 Experimento de Sensibilidade

Foram realizados dois tipos de experimentos de sensibilidade: um em que a TSM foi aquecida em 2°C ao longo de toda a simulação e outro em que a TSM só foi aquecida quando o sistema chegou à maturidade, isto é, a partir do dia 9 de março até sua oclusão. Nesse segundo, a TSM foi aumentada em 1°C, 2°C e 4°C, respectivamente. A trajetória obtida nas simulações é mostrada na Figura 26. O experimento em que a TSM é aumentada durante toda a simulação foi o que apresentou a trajetória mais diferente, isto é, deslocada para leste em relação às demais. Nos experimentos com aquecimento da TSM na maturidade, o centro do sistema aparece deslocado para sudeste em relação à observação nesse período do ciclo de vida. Em termos de pressão central (Figura 27) a distinção entre os experimentos ocorre a partir do dia 9, quando há a alteração na TSM. Quando maior o aquecimento, mais profundo torna-se o ciclone, isto é, a pressão central torna-se menor. No dia 11 de março, por exemplo, há cerca de 40 hPa de diferença entre a pressão observada e a simulada no experimento em que a TSM foi aquecida em 4°C.

O CPS do experimento com aquecimento contínuo mostra que o ciclone teve gênese como subtropical, uma vez que $B \sim 0$, $-V_T^L$ foi positivo e próximo de zero (indicando centro quente em baixos níveis) e $-V_T^U$ foi negativo e próximo de -50 m (indicando centro frio em altos níveis). Nos dias 9 e 10, B assume valor positivo e próximo de 10, $-V_T^L \sim 50$ m e $-V_T^U \sim -50$ m, enquanto que do dia 10 para 11 o sistema transiciona para tropical, pois $-V_T^U$ torna-se positivo (Figura 28 a).

Quando se considera o aquecimento durante a maturidade, o CPS para o experimento considerando aquecimento de 1° C indica que o sistema nasce como subtropical, mas no dia 9 modifica suas características: B chega a quase 25 m, enquanto $-V_T^L$ e $-V_T^U$ assumem valores próximos a zero, indicando uma possível transição para ciclone tropical (Figura 28 b). Porém, isso não ocorre, pois no dia 10 embora B tenha valor próximo a 10 m e o $-V_T^L$ seja positivo, o $-V_T^U$ torna-se negativo e com isso o sistema volta a apresentar estrutura híbrida. Do dia 10 para 11, ele transiciona para extratropical ($-V_T^L$ e $-V_T^U$ tornam-se negativos).

Comparando-se o CPS com o aquecimento de 1°C com os outros dois (aquecimento de 2° e 4° C), a principal diferença ocorre no $-V_T^U$, pois quanto maior o aquecimento do oceano o $-V_T^U$ torna-se menos negativo, chegando a zero no experimento com aquecimento de 4°C. É interessante ressaltar que o $-V_T^L$ praticamente não se altera, enquanto B tem uma pequena redução nos valores positivos tendendo ficar mais próximo de zero. Em síntese, o aumento da

TSM na fase de maturidade não afeta a trajetória do sistema, mas gera condições para o sistema transicionar para tropical.

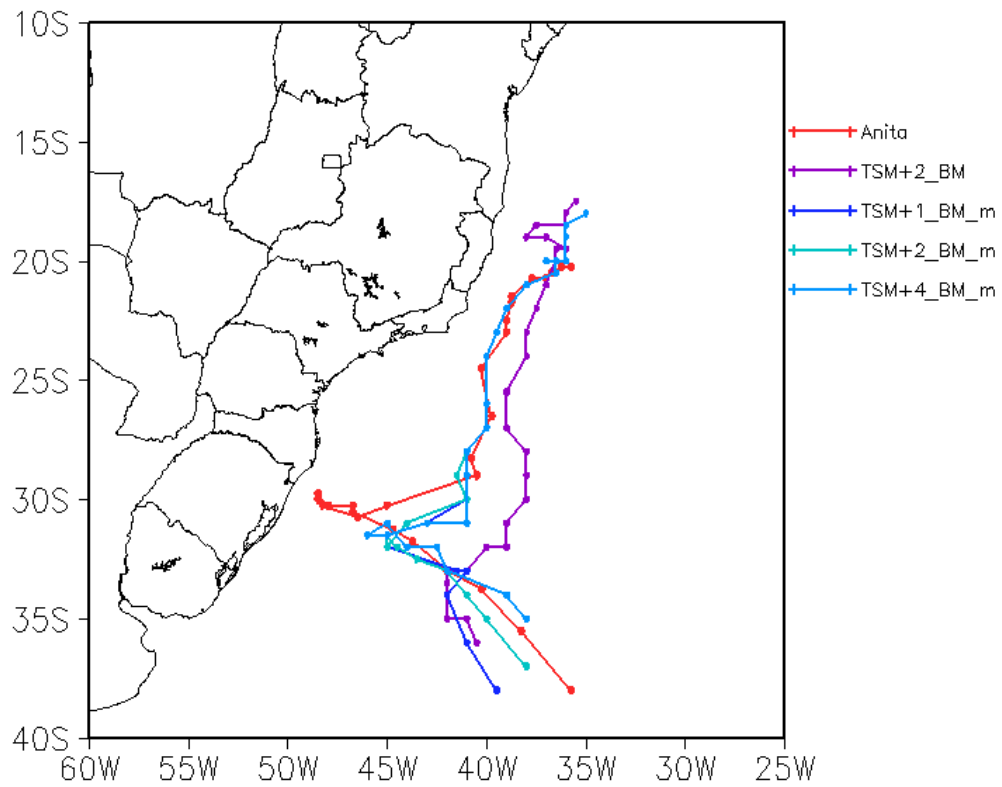


Figura 26 - Trajetória das simulações com os testes de aquecimento da TSM (parametrização de *cumulus* BM) comparadas à trajetória do ciclone Anita (ERA5).

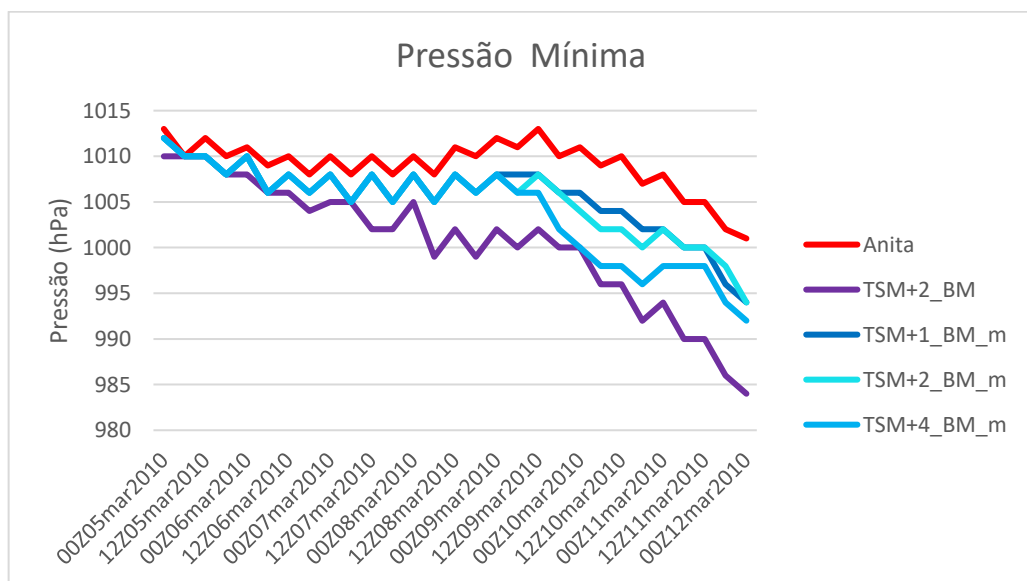


Figura 27 - Evolução temporal da pressão central das simulações com os testes de aquecimento da TSM (parametrização de *cumulus* BM) comparadas à trajetória do ciclone Anita (ERA5).

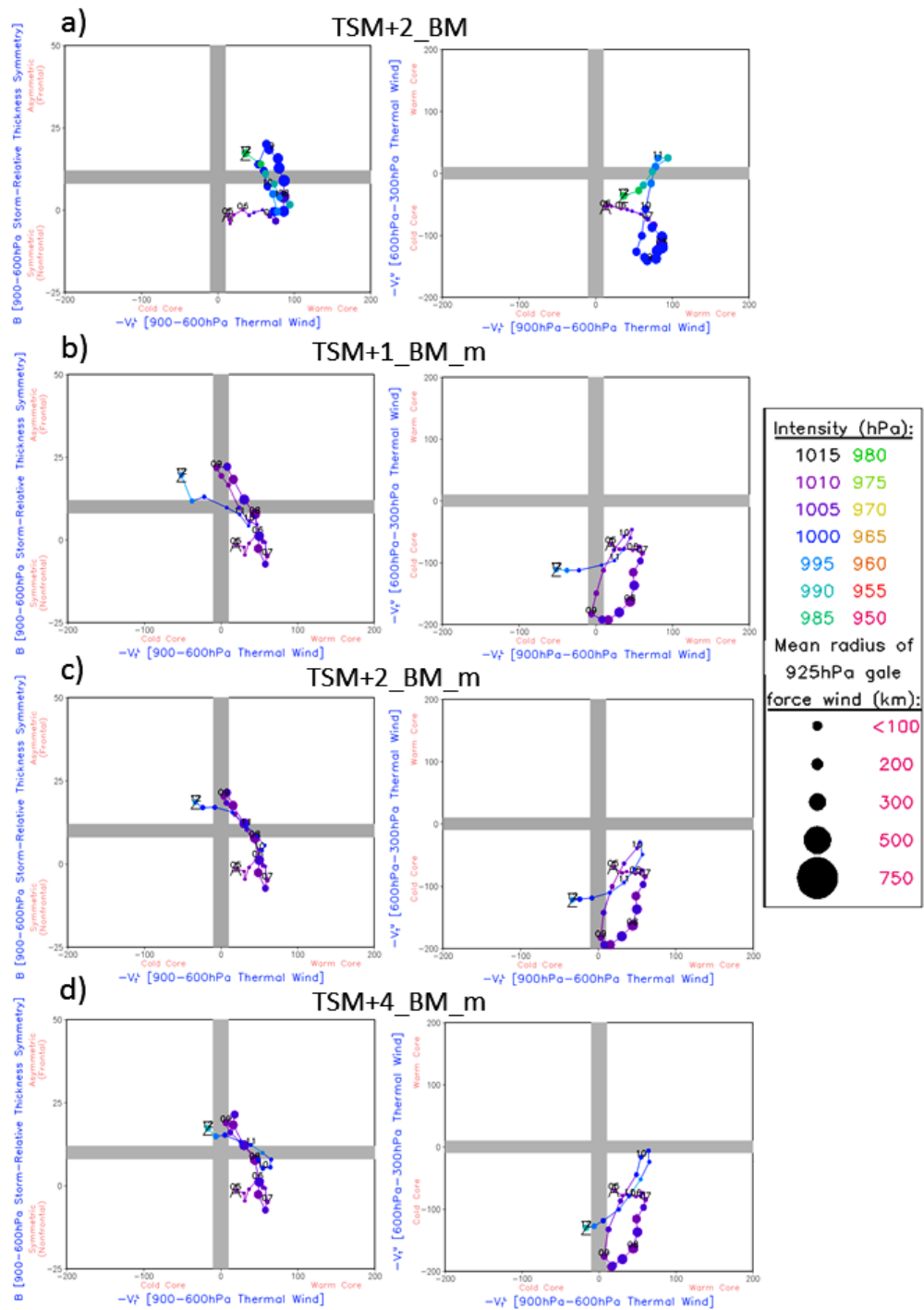


Figura 28 - CPS das simulações com os testes de aquecimento da TSM (parametrização de *cumulus* BM): (a) TSM+2_BM; (b) TSM+1_BM_m; (c) TSM+2_BM_m; (d) TSM+4_BM_m.

Embora mencionado anteriormente que a simulação KF não é adequada para a realização dos experimentos de sensibilidade, apenas a título de ilustração são apresentados os CPSs usando essa parametrização. A mesma metodologia empregada nos experimentos com BM foi utilizada com KF. Em todos os experimentos com KF a trajetória do ciclone é alterada: na simulação com aquecimento contínuo o sistema fica deslocado para leste em comparação à observação, enquanto que com o aquecimento na maturidade, fica deslocado para oeste.

No CPS com o aquecimento contínuo, o ciclone adquire características de tropical já no dia 8, enquanto que nos demais experimentos isso ocorre no dia 9, que é quando a TSM é modificada. Quanto maior o aquecimento durante a maturidade, maior é o impacto no $-V_T^U$, que adquire maiores valores positivos; já B e $-V_T^L$ praticamente não se alteram.

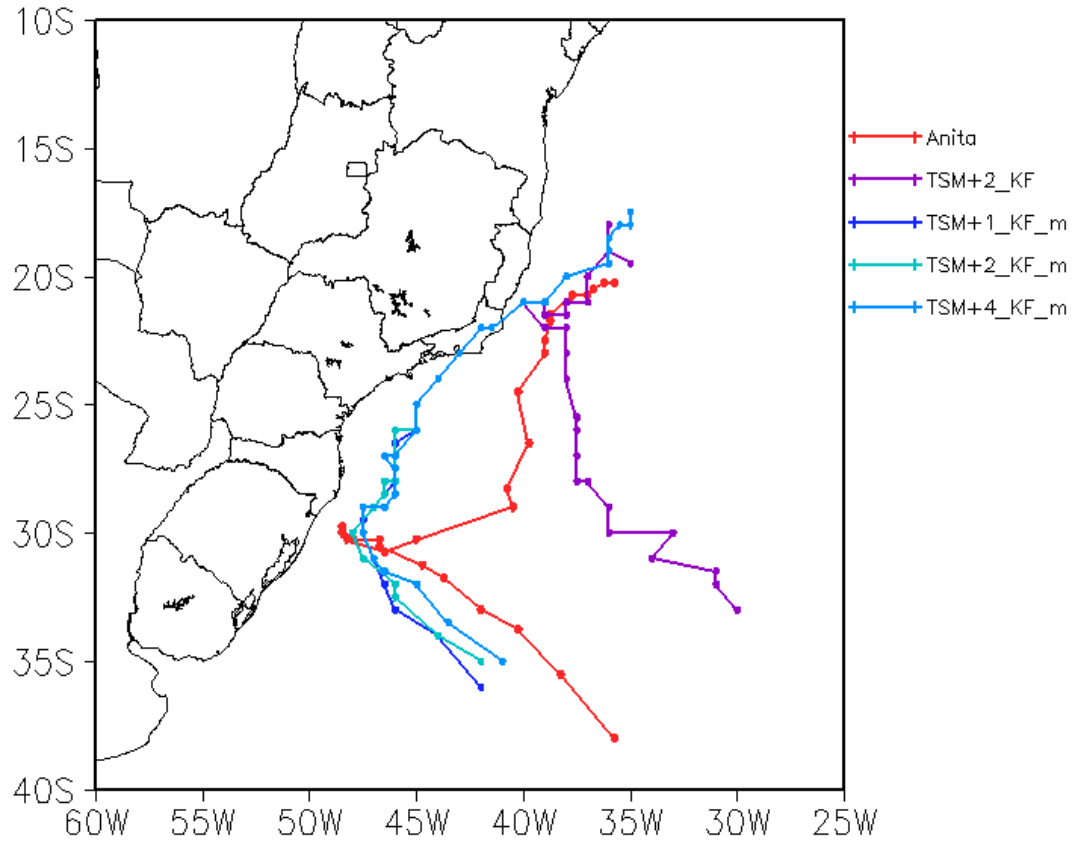


Figura 29 - Trajetória das simulações com os testes de aquecimento da TSM (parametrização de *cumulus* KF) comparadas à trajetória do ciclone Anita (ERA5).

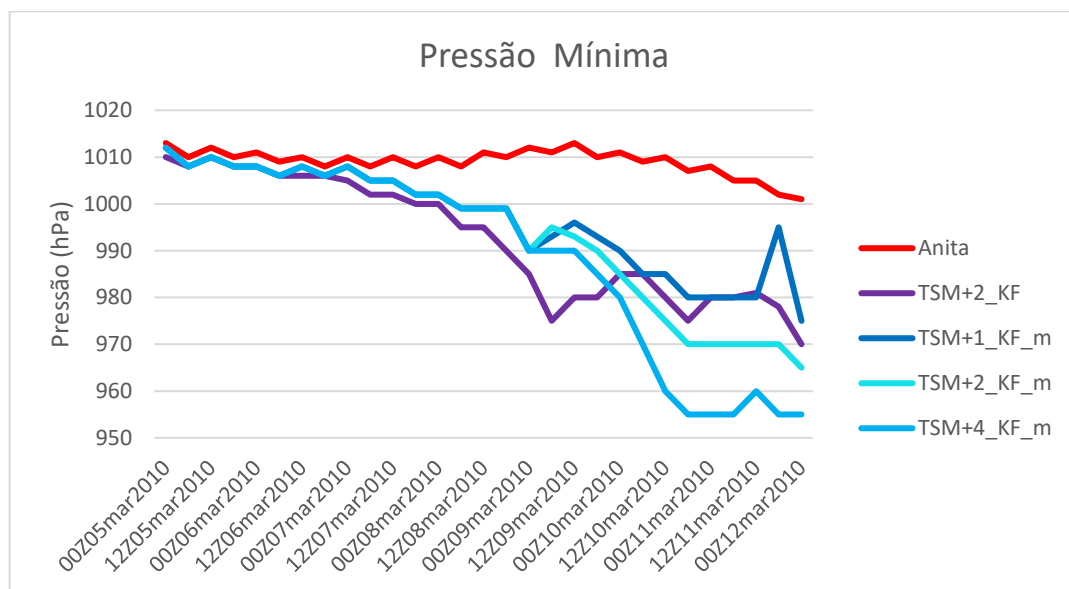


Figura 30 - Evolução temporal da pressão central das simulações com os testes de aquecimento da TSM (parametrização de *cumulus* KF) comparadas à trajetória do ciclone Anita (ERA5).

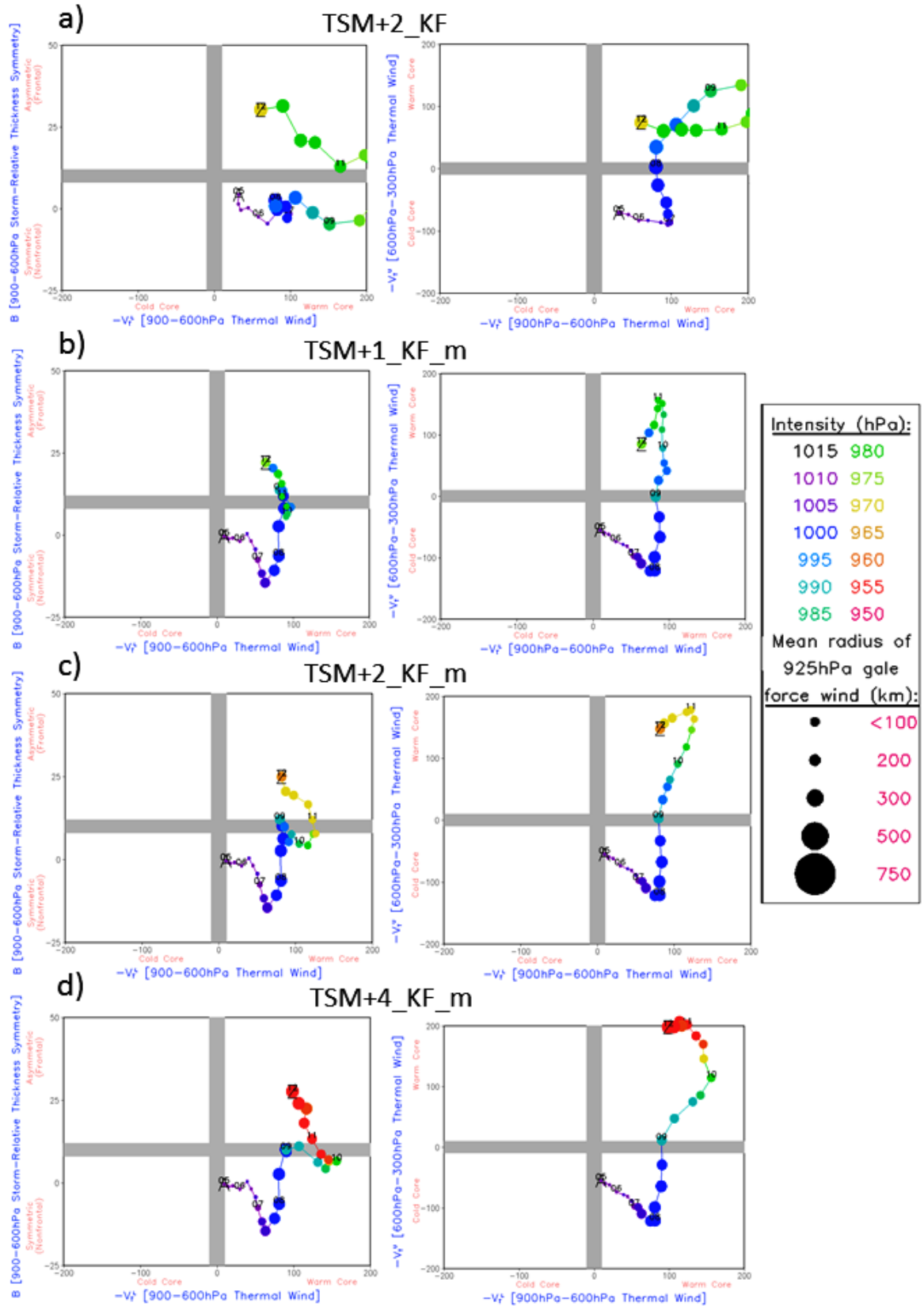


Figure 31 - CPS das simulações com os testes de aquecimento da TSM (parametrização de *cumulus* KF): (a) TSM+2_KF; (b) TSM+1_KF_m; (c) TSM+2_KF_m; (d) TSM+4_KF_m.

5. CONCLUSÕES

Os seis ciclones subtropicais aqui estudados foram os que receberam nome pela Marinha Brasileira e se formaram próximo ao sudeste do Brasil. Esses sistemas se deslocaram para o sul e sudoeste até a fase de maturidade; apenas o Arani deslocou-se ligeiramente para o norte durante sua fase inicial. Desde a gênese até a maturidade, os ciclones permaneceram próximos à costa brasileira e a pressão central foi aprofundando.

A análise sinótica dos seis sistemas mostrou que um padrão tipo bloqueio nos níveis médios/altos da atmosfera (como mostrados em Anita, Bapo, Cari, Deni e Eçaí) ou a presença de um cavado (como mostrado em Arani), o suprimento de calor e umidade e o cisalhamento vertical do vento mais fraco do que a climatologia são elementos importantes para a ciclogênese subtropical em superfície.

Em relação à estrutura vertical dos ciclones subtropicais, em baixos níveis predomina ar mais quente que a média zonal e em médios/altos níveis, ar mais frio. Com relação à vorticidade relativa ciclônica, o tubo vertical de vorticidade não se inclina com o aumento da altura, como nos ciclones extratropicais, e é mais raso do que em ciclones tropicais. Como os sistemas apresentam uma característica semi-estacionária, pode ocorrer ressurgência de água mais fria na superfície do mar, que contribui para uma diminuição na transferência de fluxos de calor do oceano para a atmosfera, levando a um enfraquecimento dos ciclones e diminuindo a possibilidade deles transicionarem para tropical.

Para avaliar a hipótese de Dias Pinto et al. (2013) de que o ciclone Anita poderia transicionar para tropical se os fluxos de calor latente e sensível não tivessem sofrido grande redução durante os dias maturidade, realizaram-se experimentos numéricos com o modelo WRF para esse ciclone. Primeiramente testou-se as parametrizações de *cumulus* BM, KF e Grell. Entre as parametrizações verificadas BM representa a trajetória do Anita mais similar à reanálise ERA5. Para escolher o experimento controle, também foram testadas simulações inicializadas com 72, 48 e 24h de antecedência à gênese do Anita. Aqui verificou-se que a simulação com 24h de antecedência representa melhor o sistema, em sua trajetória e pressão central.

Para os experimentos de sensibilidade, optou-se por realizar dois tipos de testes a fim de obter uma possível transição do ciclone Anita de subtropical para tropical. Para tanto, foram

realizados testes usando as parametrizações BM e KF. No primeiro teste, a TSM foi aquecida em 2°C ao longo de toda a simulação e no segundo a TSM foi aquecida a partir do dia 9 de março, dia que o sistema tem potencial para transicionar para tropical, até sua dissipação. Nesse segundo, a TSM foi aumentada em 1°C, 2°C e 4°C, respectivamente, em cada experimento.

Com a parametrização BM, o experimento com aquecimento contínuo da TSM mostra que o ciclone altera sua trajetória, tem gênese como subtropical e do dia 10 para 11 o sistema transiciona para tropical, já os experimentos com a TSM alterada a partir do dia 9 não afetam a trajetória do sistema, mas também geram condições para o sistema transicionar para tropical. Com a parametrização KF, a trajetória do ciclone é alterada em todos os experimentos; com o aquecimento contínuo, o ciclone se torna tropical já no dia 8. O aquecimento da TSM deixa o ciclone com a pressão central menor, isso é, quanto maior a TSM, mais intenso fica o ciclone, independente da parametrização usada.

Como sugestão para trabalhos futuros tem-se: entender o que ocorre na circulação para $-V_T^L$ não se alterar e para o $-V_T^U$ se modificar quando se aumenta a TSM na fase de maturidade e realizar mais um experimento numérico usando aquecimento de 6° C.

REFERÊNCIAS

- ABREU, R. C.; daROCHA, R. P. Experimentos numéricos para o ciclone subtropical “Anita” com o modelo WRF. **Ciência e Natura**, v.37, p.69- 74, 2015.
- BETTS, A. K., MILLER, M. J. A new convective adjustments cheme. Part II: Single column tests using GATE wave, BOMEX, and arctic air-mass data sets, **Quart. J. Roy. Meteor. Soc**, v. 112, p. 693–709, 1986.
- BEVEN II, J. L. A study of three “hybrid” storms. Preprints, 22d Conf. on Hurricanes and Tropical Meteorology, Fort Collins, CO, **American Meteor Society**, p. 645–646, 1997.
- BJERKNES, J. On the structure of moving cyclones. **Geofysiske Publikasjoner**, v. 1, n. 2, p. 1-8, 1919.
- BJERKNES, J.; SOLBERG, H. Life Cycles of Cyclones and Polar Front Theory of Atmospheric Circulation. **Geofysiske Publikasjoner**, v. 3, p. 3-18, 1922.
- CHARNEY, J. G. The Dynamics of Long Waves in a Baroclinic Westerly Currents. **Journal of Meteorology**, v. 4, p. 135-162, 1947.
- CHARNEY, J. G.; ELIASSEN, A. On the growth of hurricane depression. **Journal of Atmospheric Sciences**, v. 21, p. 68-75, 1964.
- COMET. Satellite Feature Identification: Blocking Patterns; **University Corporation for Atmospheric Research: Boulder, CO, USA**, 2009.
- DA ROCHA, R. P., REBOITA, M. S., GOZZO, L. F., DUTRA, L. M. M., DE JESUS, E. M. Subtropical cyclones over the oceanic basins: A review. **Annals of the New York Academy of Sciences**. v. 1436, p. 138-156, 2019.
- DeMARIA, M. The effect of vertical shear on tropical cyclone intensity change. **J. Atmos. Sci.** v. 53, p. 2076–2088, 1996.
- DeMARIA, M.; KNAFF, J. A.; CONNELL, B. H. A tropical cyclone genesis parameter for the tropical Atlantic. **Weather and Forecasting**, v. 16, p. 219–233, 2001.

DIAS PINTO, J. R.; REBOITA, M. S.; daROCHA, 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.

DUDHIA, J. PSU/NCAR Mesoscale Modeling System, Tutorial Class Notes and Users' Guide, **MM5 Modeling System Version 3**, 2004.

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.

EMANUEL, K. A. An Air-Sea Interaction Theory for Tropical Cyclones. Part I: Steady-State Maintenance. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 43, p. 585–605, 1986.

EMANUEL, K. A. The maximum intensity of hurricanes. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 45, p. 1143-1155, 1988.

EVANS, J. L.; BRAUN, A. A climatology of subtropical cyclones in the South Atlantic. **Journal of Climate**, v.25, p.7328– 7340, 2012.

EVANS, J. L.; GUSHARD, M. P. Atlantic subtropical storms. Part I: Diagnostic criteria and composite analysis. **Monthly Weather Review**, v. 137(7), p. 2065-2080, 2009.

FRANK, W.M. The structure and energetics of the tropical cyclone I. Storm structure. **Monthly Weather Review**, v. 105, p. 1119-1135, 1977.

FRITSCH, J. M., CHAPPELL, C. F. Numerical prediction of convectively driven mesoscale pressure systems. Part I: Convective parameterization. **J. Atmos. Sci.**, v. 37, p. 1722–1733, 1980.

GOZZO, L. F.; daROCHA, R. P.; GIMENO L.; DRUMOND A. Climatology and numerical case study of moisture sources associated with subtropical cyclogenesis over the southwestern Atlantic Ocean. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 122, p. 5636-5653, 2017.

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.

- GRAY W. M. Global view of the origin of tropical disturbances and storms. **Monthly Weather Review**, v. 96, p. 669–700, 1968.
- GRELL, G. A. Prognostic evaluation of assumptions used by cumulus parameterizations. **Mon. Wea. Rev.**, v. 121, p. 764–787, 1993.
- GUISHARD, M. P. Atlantic subtropical storms: Climatology and characteristics. Tese (Doutorado em Meteorologia), Dept. of Meteorology, The Pennsylvania State University, University Park, PA, p. 158, 2006.
- GUISHARD, M. P.; EVANS, J. L.; HART, R. E. Atlantic Subtropical Storms. Part II: Climatology. **Journal of Climate**, v. 22, p. 3574–3594, 2009.
- HART, R. E. A cyclone phase space derived from thermal wind and thermal asymmetry. **Monthly Weather Review**, v.131, p.585– 616, 2003.
- HERSBACH, H., DEE, D. ERA5 reanalysis is in production. **ECMWF newsletter**, v. 147(7), 2016.
- HOLLAND G. J. The maximum potential intensity of tropical cyclones. **Journal of Atmospheric Sciences**, v. 54, p. 2519–2541, 1997.
- KAIN, J. S. The Kain-Fritsch convective parameterization: An update. **J. Appl. Meteor.**, v. 43, p. 170–181, 2004.
- KAIN, J. S., FRITSCH, J. M. A one-dimensional entraining/detraining plume model and its application in convective parameterization. **J. Atmos. Sci.**, v. 47, p. 2784–2802, 1990.
- KAIN, J. S., FRITSCH, J. M. Convective parameterization for mesoscale models: The Kain–Fritsch scheme. The representation of cumulus convection in numerical models, Meteorological Monograph. **American Meteorological Society**, v. 46, p 165–170, 1993.
- MARKS, F. D. Hurricanes. Encyclopedia of Atmospheric Science. Edited by James R. Holton, Judith A. Curry and John A. Pyle, **Academic Press**, v. 6, p. 942–966, 2003.
- MARRAFON, V. H., REBOITA, M. S. Revisitando a Equação do Desenvolvimento de Sutcliffe. **Anuário do Instituto de Geociências**, v. 41(3), 2018.

MCTAGGART-COWAN, R.; BOSART, L. F.; DAVIS, C. A.; ATALLAH, E. H.; R. GYAKUM, J.; EMANUEL, K. A. Analysis of Hurricane Catarina (2004). **Monthly Weather Review**, v.134, p.3029– 3053, 2006.

MONTGOMERY, M.T., FARRELL, B.F. Tropical cyclone formation. **J. Atmos. Sci.** v.50, p. 285–310,1993.

PEIXOTO, J. P., OORT, A. H. Physics of climate. **1992**.

PETTERSSSEN, S. Weather analysis and forecasting (2nd ed). **McGraw-Hill**, New York, 1956.

PEZZA, A.B., SIMMONDS, I. The First South Atlantic Hurricane: Unprecedented Blocking, Low Shear and Climate Change. **Geophys. Res. Lett.** v. 32, p. L15712. 2005.

REBOITA, M. S., GAN, M. A., daROCHA, R. P., CUSTÓDIO, I. S. Surface Cyclones over Austral Latitudes: Part I-Bibliographic Review. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 32, n. 2, p. 171-186, 2017.

REBOITA, M. S., GAN, M. A., daROCHA, R. P., CUSTÓDIO, I. S. Surface Cyclones over Austral Latitudes: Part II Cases Study. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 32, n. 4, p. 509-542, 2017.

REBOITA, M. S.; daROCHA R. P.; AMBRIZZI T.; SUGAHARA S. South Atlantic Ocean Cyclogenesis Climatology Simulated by Regional Climate Model (RegCM3). **Climate Dynamics**, v. 35, p. 1331-1347, 2010.

REBOITA, M. S.; daROCHA, R. P.; AMBRIZZI, T.; GOUVEIA, C. D. Trend and teleconnection patterns in the climatology of extratropical cyclones over the southern hemisphere. **Climate Dynamics**, v.45, p.1929– 1944, 2015.

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.

SHAPIRO, M. A.; KEYSER, D. Fronts, jet streams and the tropopause. Extratropical Cyclones, The Erik Palmén Memorial Volume, C. W. Newton and E. O. Holopainen, Eds., **American Meteorological Society**, p. 167-191, 1990.

SINCLAIR, M. R. An objective cyclone climatology for the Southern Hemisphere. **Monthly Weather Review**, v. 122, p. 2239-2256, 1994.

SKAMAROCK, W. C., KLEMP, J. B. A time-split nonhydrostatic atmospheric model for weather research and forecasting applications. **Journal of computational physics**, v. 227(7), p. 3465-3485, 2008.

SUTCLIFFE, R. C. A contribution to the problem of development. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 73, p. 370- 383, 1947.

TOUS, M.; ROMERO, R. Meteorological environments associated with medicane development. **International Journal of Climatology**, v. 33, n. 1, p. 1-14, 2013.

UPPALA, S. M., P. W. KALLBERG, A. J. SIMMONS, U. ANDRAE, V. D. C. BECHTOLD, M. FIORINO, J. K. GIBSON, J. HASELER, A. HERNANDEZ, G. A. KELLY, X. LI, K. ONOGI, S. SAARINEN, N. SOKKA, R. P. ALLAN, E. ANDERSSON, K. ARPE, M. A. BALMASEDA, A. C. M. BELJAARS, L. V. D. BERG, J. BIDLOT, N. BORMANN, S. CAIRES, F. CHEVALLIER, A. DETHOF, M. DRAGOSAVAC, M. FISHER, M. FUENTES, S. HAGEMANN, E. HÓLM, B. J. HOSKINS, L. ISAKSEN, P. A. E. M. JANSSEN, R. JENNE, A. P. McNALLY, J.-F. MAHFOUF, J.-J. MORCRETTE, N. A. RAYNER, R. W. SAUNDERS, P. SIMON, A. STERL, K. E. TRENBERTH, A. UNTCH, D. VASILJEVIC, P. VITERBO e J. WOOLLEN. The ERA-40 re-analysis. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 131, p. 2961–3012, 2005.

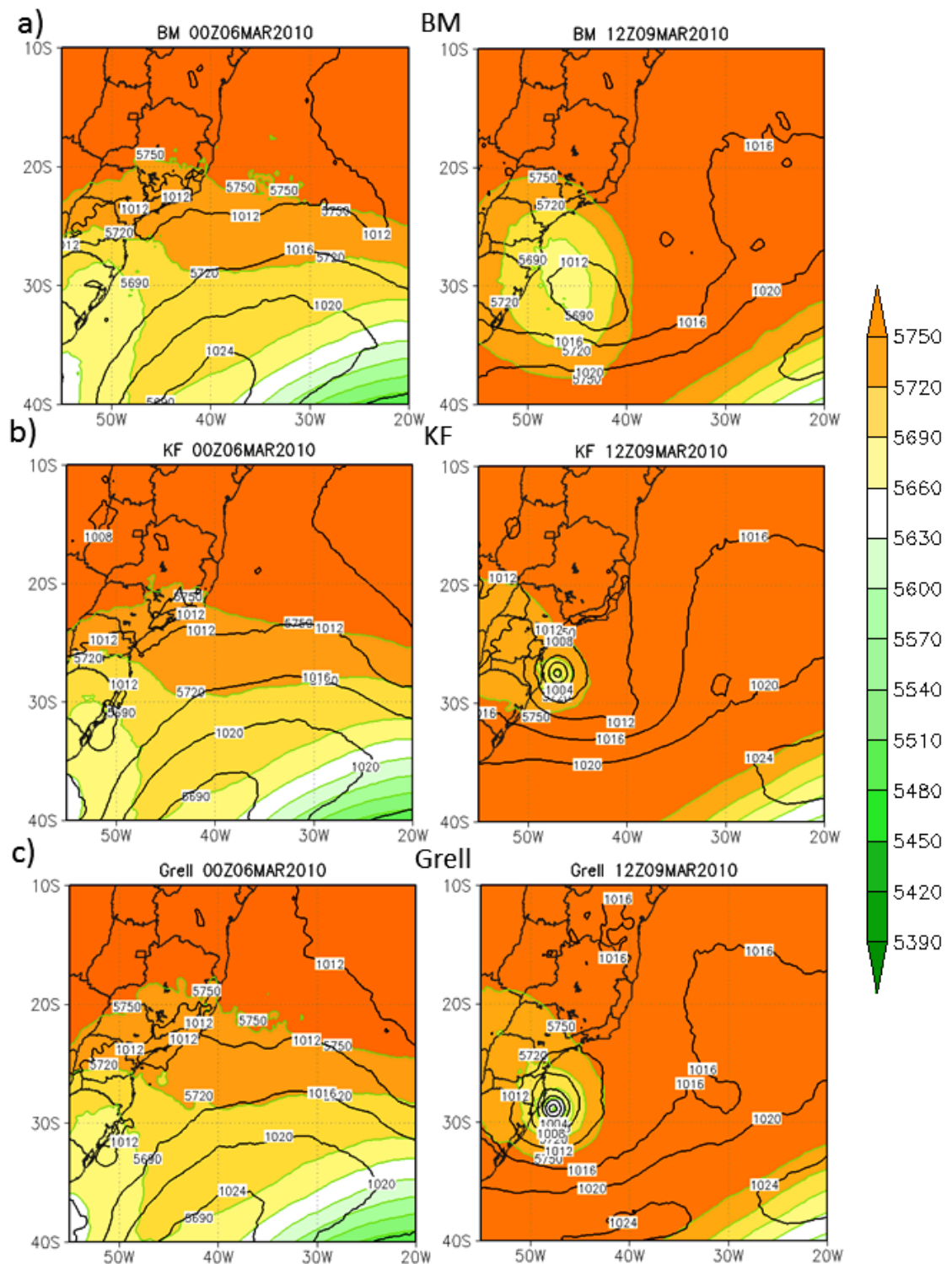
VAN BRUMMELEN, G. Heavenly Mathematics: The Forgotten Art of Spherical Trigonometry. **Princeton University Press**, 208 p, 2012.

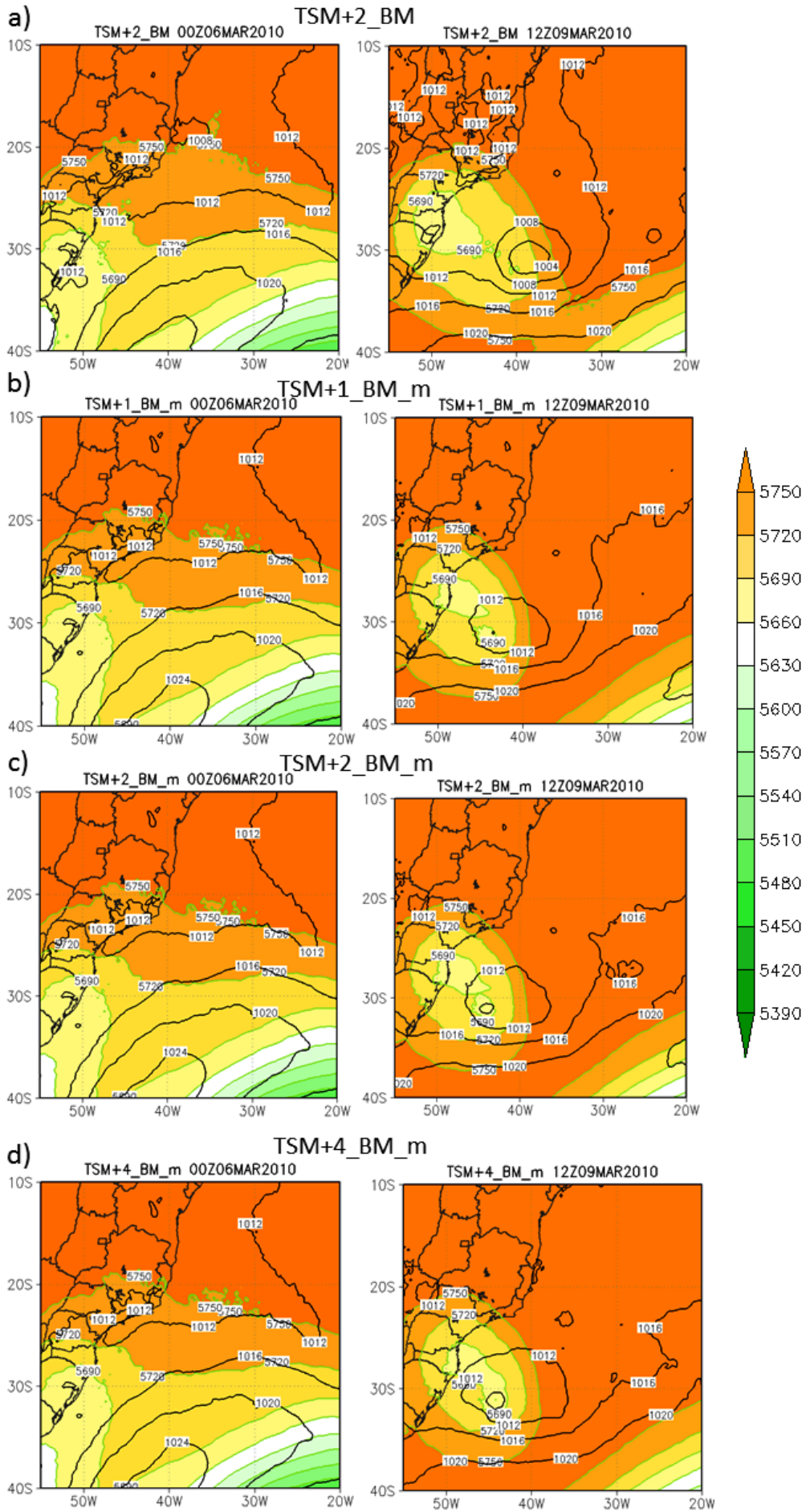
YANASE, W.; NIINO, H.; HODGES, K.; KITABATAKE, N. Parameter spaces of environmental fields responsible for cyclone development from tropics to extratropics. **Journal of Climate**, v. 27(2), p. 652-671, 2014.

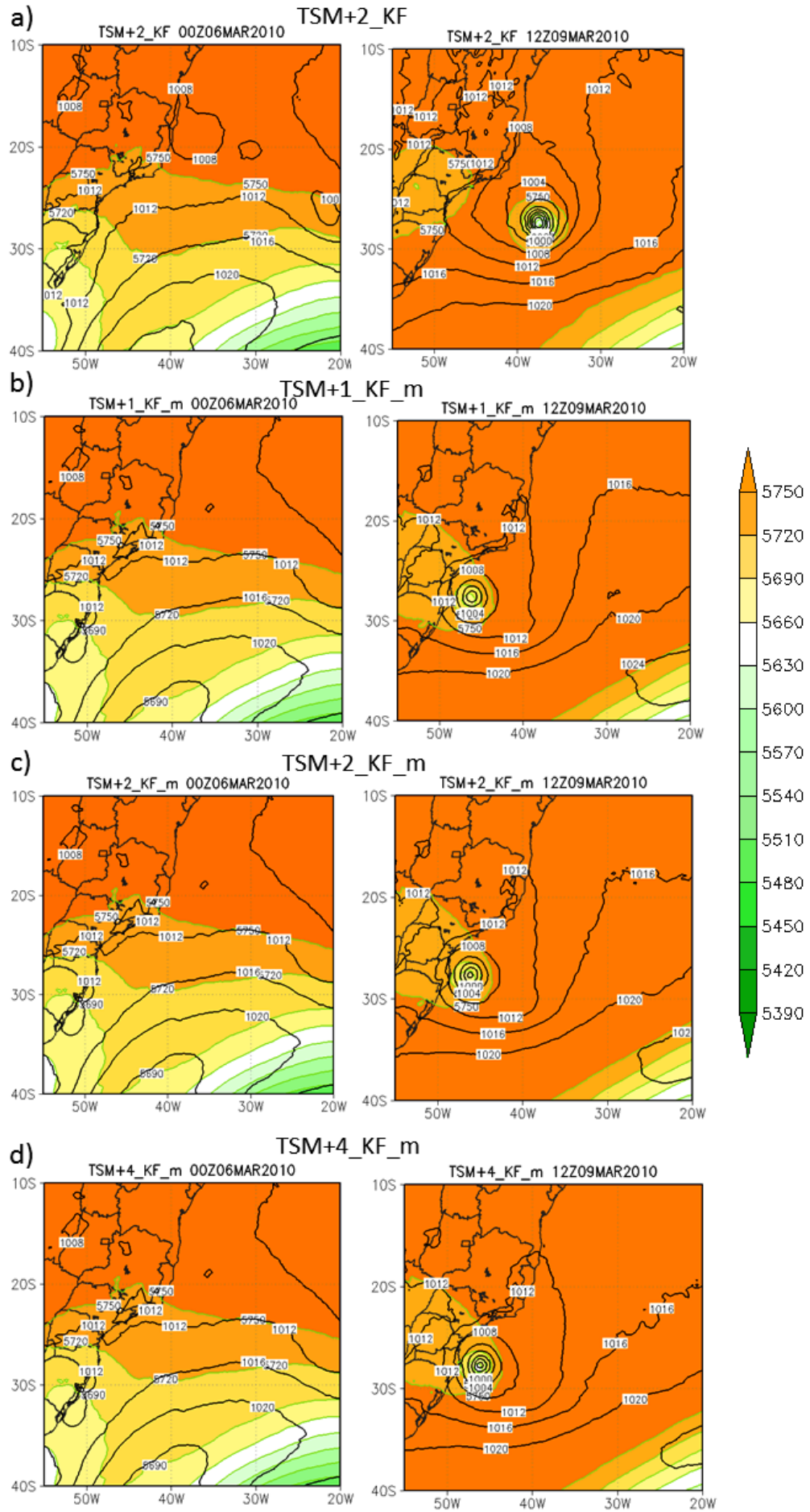
ZHANG, F., SIPPEL, J.A. Effects of moist convection on hurricane predictability. **J. Atmos. Sci.** v. 66, p. 1944–1961, 2009.

ANEXO A

- Altura geopotencial em 500 hPa (m;cor) e pressão ao nível médio do mar (hPa; contorno) para as simulações:
 - BM, KF, GRELL;
 - TSM+2_BM, TSM+1_BM_m, TSM+2_BM_m, TSM+4_BM_m;
 - TSM+2_KF, TSM+1_KF_m, TSM+2_KF_m, TSM+4_KF_m.







ANEXO B

- Fluxo de calor latente ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$; cor) e pressão ao nível médio do mar (hPa; contorno) para as simulações:
 - BM, KF, GRELL;
 - TSM+2_BM, TSM+1_BM_m, TSM+2_BM_m, TSM+4_BM_m;
 - TSM+2_KF, TSM+1_KF_m, TSM+2_KF_m, TSM+4_KF_m.

