

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO DE CIÊNCIAS FÍSICAS E MATEMÁTICAS  
DEPARTAMENTO DE FÍSICA  
PROGRAMA DE GRADUAÇÃO EM METEOROLOGIA**

Eliana Cristine Gatti

**ESTUDO DE SISTEMAS CONVECTIVOS DE MESOESCALA EM SANTA  
CATARINA NO PERÍODO PRIMAVERA/VERÃO 2018-2019**

**ORIENTADOR(A): PROF. DR. MÁRIO FRANCISCO LEAL DE QUADRO**

Florianópolis, 2019

Eliana Cristine Gatti

**ESTUDO DE SISTEMAS CONVECTIVOS DE MESOESCALA EM SANTA  
CATARINA NO PERÍODO PRIMAVERA/VERÃO 2018-2019**

**Trabalho de Conclusão de  
Curso apresentado ao Curso de  
Bacharelado em Meteorologia,  
Centro de Ciências Físicas e  
Matemáticas, Universidade  
Federal de Santa Catarina.**

**ORIENTADOR(A): PROF. DR. MÁRIO FRANCISCO LEAL DE QUADRO**

Florianópolis, 2019

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,  
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Gatti, Eliana Cristine

Estudo de sistemas convectivos de mesoescala em Santa Catarina no período primavera/verão 2018-2019 / Eliana Cristine Gatti ; orientador, Mário Francisco Leal de Quadro, 2019.

91 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro de Ciências Físicas e Matemáticas, Graduação em Meteorologia, Florianópolis, 2019.

Inclui referências.

1. Meteorologia. 2. Santa Catarina . 3. Sistemas Convectivos de Mesoescala. I. Quadro, Mário Francisco Leal de. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em Meteorologia. III. Título.

Eliana Cristine Gatti

**ESTUDO DE SISTEMAS CONVECTIVOS DE MESOESCALA EM SANTA  
CATARINA NO PERÍODO PRIMAVERA/VERÃO 2018-2019**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de bacharel em meteorologia e aprovada em sua forma final pelo curso de graduação em meteorologia da Universidade Federal de Santa Catarina

Florianópolis, 12 de dezembro de 2019.

---

Prof. Dr. Wendell Rondinelli Gomes Farias  
Coordenador do Curso

**Banca Examinadora:**

---

Prof. Dr. Mário Francisco Leal de Quadro  
Orientador  
Instituto Federal de Santa Catarina – IFSC

---

Prof. Dr. Wendell Rondinelli Gomes Farias  
Membro  
Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC

---

Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Márcia Vetromilla Fuentes  
Membro  
Instituto Federal de Santa Catarina – IFSC

Dedico este trabalho aos meus pais, que com seu total apoio, me ajudaram a permanecer no caminho certo.

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente, gostaria de agradecer a Deus, por me ouvir e me guiar pelo caminho certo em todos os momentos.

A minha família, que com seu amor incondicional, aguentou todos os momentos de choro e de alegria, junto comigo, sempre me apoiando.

À professora Marina Hirota por ter sido uma segunda mãe nesse tempo e por não ter deixado eu desistir.

Ao professor Wendell Rondinelli Gomes Farias, obrigada por todo apoio e por sua amizade.

Ao meu orientador e amigo Mario Francisco Leal de Quadro, que foi meu guia para a realização deste trabalho. Obrigada por toda ajuda e pelos momentos de descontração.

À professora Márcia Vetromilla Fuentes, que mesmo não sendo uma pessoa tão próxima pessoalmente, aceitou fazer parte da minha banca.

À Universidade Federal de Santa Catarina e aos demais professores do curso de Meteorologia, que proporcionaram meu crescimento profissional e fizeram com que eu me tornasse uma profissional preparada para o mundo afora.

Ao professor Vagner Anabor e ao Gustavo Rasesa que foram essenciais para a realização deste trabalho.

Aos meus amigos e colegas da Defesa Civil de Santa Catarina. Obrigada pelos dois anos de amizade e aprendizado. Serei eternamente grata pela oportunidade que vocês me proporcionaram.

Aos meus amigos da graduação, que me acompanharam em toda minha trajetória. Em especial, Matheus Bonifácio Pamplona, Ana Paula da Silva Faggiani e Tayara Tavares, que estiveram presentes na maioria dos momentos. Sem vocês, teria sido muito mais difícil.

À minha querida amiga Denyse Guimarães, que por todos esses anos morando juntas, nunca mediu esforços pra me apoiar em todos os momentos e se tornou uma das pessoas mais especiais da minha vida.

Ao Gabriel Luan Rodrigues e a Carolina Kannenberg, que me ajudaram com a manipulação de dados na realização deste estudo.

E à todos os demais, que de alguma forma, me ajudaram a chegar até aqui e fizeram com que a finalização deste trabalho se torna-se possível.

Muito Obrigada!

“A força que vem de dentro é maior. Maior que todo mal que existe no mundo. Maior que todos os ventos contrários. É maior porque é do bem. E nisso sim, eu acredito até o fim”.

Caio Fernando Abreu

## RESUMO

Santa Catarina é um dos Estados do Brasil que possui registro significativo de ocorrência de tempo adverso, associados a passagens de diversos sistemas no decorrer do ano. Os Sistemas Convectivos de Mesoescala são eventos meteorológicos que exercem grande influência no regime de precipitação do estado de Santa Catarina. Tais eventos, ocorrem com maior frequência nas estações primavera e verão. Associados aos mesmos, normalmente estão presentes altos volumes de chuva, rajadas intensas de vento e ocorrência de granizo. Nesse contexto, o presente trabalho faz um estudo baseado nas ocorrências de SCMs que atingiram o Estado durante a temporada de primavera-verão entre os anos de 2018/2019, com o intuito de fazer um levantamento de dados de cada sistema para verificar a influência dos mesmos sobre o estado. Através do método de seleção para escolha dos casos, foram rastreados nove casos que atingiram SC. A partir destes casos, foi feito o levantamento de acumulados de chuva e rajadas de vento com a utilização de dados de estações pluviométricas da EPAGRI/CIRAM e INMET. Além disso, o SA-MCS Index foi calculado para todos os casos selecionados, a fim de verificar a destreza do mesmo na indicação de risco de SCMs. Com o intuito de entender melhor os processos físicos e condições atmosféricas necessárias para a formação e manutenção de um SCM, foi escolhido um entre os nove casos para a realização de uma análise sinótica. O sistema que atuou no estado nos dias 31/10 e 01/11 de 2018 foi gerador de precipitação elevada e vento intenso, que causaram diversas ocorrências de destelhamentos, interdições de avenidas, quedas de energia, etc. A partir da análise, foi verificado a presença de cavados de onda curta em 500 hPa, que influenciaram na formação de vortacidade ciclônica em baixos níveis, propiciando a convergência. Além disso, foi notada a presença de um escoamento de norte intenso, responsável pelo transporte de umidade, que permitiu a formação e manutenção do sistema. A partir de tal estudo, foi possível entender melhor os processos atmosféricos que propiciam a formação dos SCMs em SC e verificar quais os possíveis danos que os mesmos podem gerar. Dessa forma, o trabalho pode ser extremamente útil como um guia para centros de operação meteorológica no estado, em que os meteorologistas operacionais podem identificar com maior facilidade a possível formação de um SCM.

**Palavras-Chave:** SCMs. SA-MCS Index. Santa Catarina.



## ABSTRACT

Santa Catarina is one of the states in Brazil that has the highest occurrence of adverse weather, associated with crossings of many systems throughout the year. Mesoscale Convective Systems (SCMs) are meteorological events that greatly influence the precipitation regime in the state of Santa Catarina. Such events occur most frequently in the spring and summer seasons. Associated with them are usually high volumes of rain, intense gusts of wind and hail. In this context, the present work makes a study based on the occurrence of SCMs that reached the state of Santa Catarina in the last season (spring-2018 /summer-2019), with the purpose of making a data survey of each system to verify their influence in the state. Through the selection method for case selection, nine cases that reached SC were screened. From them, with the use of data from rainfall stations, it was made the data collection of accumulated rain and wind gusts. In addition, the SA-MCS Index was calculated for all selected cases to verify its performance in indicating SCM risk. In order to better understand the physical processes and atmospheric conditions required for the formation and maintenance of a SCM, one of nine cases was chosen for performing a synoptic analysis. The system, which influenced the state on October 31st and November 11th, 2018, generated a lot of rain and wind, which caused several occurrences of detachments, interdiction of avenues, power outages, etc. From the analysis, it was verified the presence of short wave troughs at 500 hPa, which influenced the formation of cyclonic vorticity at low levels, providing convergence. In addition, it was noted the presence of an intense north flow, responsible for the moisture transport, which allowed the formation and maintenance of the system. From this study, it was possible to better understand the atmospheric processes that favor the formation of SCMs in SC and to verify the possible damages that they can generate. Thus, the work can be extremely useful as a guide to state operation centers in the state, where operational meteorologists can more easily identify the possible formation of an SCM.

**Keywords:** SCMs. SA-MCS Index. Santa Catarina.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Imagens ilustrativas de sistemas meteorológicos que atuam na região Sul do Brasil: de (a) Frente Fria, (b) Ciclone, (c) Vórtice Ciclônico de Altos Níveis, (d) Linha de Instabilidade, (e) Complexo Convectivo de Mesoescala, (e) Sistema Convectivo Alongado e Persistente.....23

Figura 2 - Mapa da AS destacando as áreas selecionadas para estudo e rotas. Rota 1 (linha contínua): rota litorânea; Rota 2 (linha tracejada) : rota litorânea e continental. Os números de 1 a 11 significam as áreas selecionadas para estudo.....24

Figura 3 - Gráfico da média sazonal de sistemas frontais para o período de 1980-2002 para as 11 áreas selecionadas.....25

Figura 4 - Imagens do satélite GOES 7. a) Dois CCMs às 03:30 UTC de 20/05/1979; b) Imagem realçada em que identifica o sistema dentro dos critérios definidos.....33

Figura 5 - Diferenças sinóticas entre SCMS circulares (CCMs coluna 1) e lineares (PECS coluna 2). a) Omega (Pa/s, linha fina), Altura geopotencial (dam, linha cheia) e Vento (barbelas e sombreado) em 250mb. b) Altura Geopotencial (dam, linha cheia) e Vento (barbelas) em 500mb. c) Temperatura (°C, linha pontilhada), Vento (barbelas), Umidade específica (g/kg) em 500 mb. ....35

Figura 6 - Exemplo da interface do método desenvolvido por Anabor (2008).....37

Figura 7 - Campos médios em 250 hPa para o vento (m.s-1; barbelas e área hachurada para o núcleo do jato acima de 30 m.s-1) e altura geopotencial (mcp; linhas contínuas), acrescido da velocidade vertical Ômega em 500 hPa (Pa.s-1; linhas tracejadas). Convecção não-organizada durante a máxima atividade (esquerda) e SCMs durante o momento imediatamente anterior ao estágio de iniciação (direita).....41

Figura 8 – Campos médios em 500 hPa do vento (m.s 1, barbelas) e altura geopotencial (mcp, linhas contínuas). – Convecção não-organizada durante a máxima atividade (esquerda) e SCMs durante o momento imediatamente anterior ao estágio de iniciação (direita).....41

Figura 9 - Campos médios em 850 hPa do vento (m.s 1, barbelas), altura geopotencial

(m/gp, linhas contínuas), temperatura do ar (°C, linhas pontilhadas) e umidade específica (área hachurada). Convecção não-organizada durante a máxima atividade (esquerda) e SCMs durante o momento imediatamente anterior ao estágio de iniciação (direita).....42

Figura 10 – Campos médios do vento (m.s-1; barbs) em 1000 hPa e pressão reduzida ao nível médio do mar (hPa, linhas contínuas). Convecção não-organizada durante a máxima atividade (esquerda) e SCMs durante o momento imediatamente anterior ao estágio de iniciação (direita).....43

Figura 11 - Mapa geográfico do Estado de Santa Catarina, localizado na região Sul do Brasil. Faz divisa ao sul com Rio Grande do Sul, ao norte com Paraná, à leste com o oceano Atlântico e a oeste com a Argentina. O Estado possui 295 municípios.....48

Figura 12. Frequência mensal de ocorrência de desastres naturais no estado de Santa Catarina de 1991 à 2012, englobando as estações de primavera-verão dos respectivos anos..... 49

Figura 13: Fluxograma representando o passo a passo realizado para a seleção dos casos de SCMs que influenciaram SC.....51

Figura 14. Exemplo do cálculo do SA-MCS Index, indicando uma região intensa, de provável ocorrência de SCMs entre o PAR, MS e norte do PR.....52

Figura 15 - Imagens do canal infravermelho do satélite GOES -16 às: a) 00 UTC 31/10, b) 06 UTC 31/10, c) 12 UTC 31/10, d) 18 UTC 31/10, e) 00 UTC 01/11, d) 06 UTC 01/11, e) 12 UTC 01/11, f) 18 UTC 01/11.....59

Figura 16 - Cartas sinóticas do CPTEC/INPE às: a) 00 UTC 31/10, b) 06 UTC 31/10, c) 18 UTC 31/10, d) 12 UTC 01/11.....60

Figura 17 - Registros mais significativos de acumulado de precipitação em 31/10 e 01/11 (a e c, respectivamente; e de rajadas de vento em 31/10 e 11/01 (b e d, respectivamente) .....61

Figura 18 - Registros de danos em residências e rodovias, divulgados pela DC/SC e PRF.....63

Figura 19 - 00 UTC 31/10/2018 - a) Imagem de satélite no canal infravermelho; b) SA-MCS Index; c) Linhas de corrente e magnitude do vento em 200 hPa; d) Vento e divergência em 200 hPa; e) Vento, vorticidade e altura geopotencial em 500 hPa; f)

Magnitude e direção do vento e altura geopotencial em 850 hPa; g) PNM e espessura em superfície; h) Água precipitável.....65

Figura 20 - 06 UTC 31/10/2018 - a) Imagem de satélite no canal infravermelho; b) SA-MCS Index; c) Linhas de corrente e magnitude do vento em 200 hPa; d) Vento e divergência em 200 hPa; e) Vento, vorticidade e altura geopotencial em 500 hPa; f) Magnitude e direção do vento e altura geopotencial em 850 hPa; g) PNM e espessura em superfície; h) Água precipitável.....69

Figura 21 - 18 UTC 31/10/2018 - a) Imagem de satélite no canal infravermelho; b) SA-MCS Index; c) Linhas de corrente e magnitude do vento em 200 hPa; d) Vento e divergência em 200 hPa; e) Vento, vorticidade e altura geopotencial em 500 hPa; f) Magnitude e direção do vento e altura geopotencial em 850 hPa; g) PNM e espessura em superfície; h) Água precipitável.....72

Figura 22 - 12 UTC 01/11/2018 - a) Imagem de satélite no canal infravermelho; b) SA-MCS Index; c) Linhas de corrente e magnitude do vento em 200 hPa; d) Vento e divergência em 200 hPa; e) Vento, vorticidade e altura geopotencial em 500 hPa; f) Magnitude e direção do vento e altura geopotencial em 850 hPa; g) PNM e espessura em superfície; h) Água precipitável.....76

Figura 23 - Campo de CAPE e LI, calculado às: a) 00 UTC 31/10, b) 06 UTC 31/10, c) 18 UTC 31/10, d) 12 UTC 01/11.....78

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Variáveis meteorológicas com os mais altos Heidke Skill Score (HSS) na qualidade em distinguir SCMs de convecção não-organizada. Também são mostrados outros parâmetros estatísticos como o Threat Score (TS), probabilidade de detecção (POD), razão de falso alarme (FAR) e viés, todos também calculados para o valor ótimo. As variáveis meteorológicas destacadas em negrito foram utilizadas na avaliação dos 3 SA-MCS Index. (2017).....44

Tabela 2 – Avaliação estatística dos 5 índices de SCM. Os valores ótimos são os que possuíram os maiores Heidke Skill Score. Também são mostrados outros parâmetros estatísticos como o Threat Score (TS), probabilidade de detecção (POD), razão de falso alarme (FAR) e viés, todos também calculados para o valor ótimo.....47

Tabela 3 - Relação dos casos de SCMs selecionados no período primavera/verão (2018/2019), juntamente com os horários em que os sistemas atingiram o critério para serem considerados SCMs, começaram e deixaram de influenciar SC.....56

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AS - América do Sul  
SC - Santa Catarina  
PR - Paraná  
RS - Rio Grande do Sul  
MS - Mato Grosso do Sul  
PAR - Paraguai  
ARG - Argentina  
URU - Uruguai  
EUA - Estados Unidos da América  
SCMs - Sistemas Convectivos de Mesoescala  
CCMs - Complexos Convectivos de Mesoescala  
PECS - Sistemas Convectivos Alongados e Persistentes  
VCAN - Vórtice Ciclônico de Altos Níveis  
ZCAS - Zona de Convergência do Atlântico Sul  
SFs - Sistemas Frontais  
ASAS - Alta Subtropical do do Atlântico Sul  
CE - Ciclone Extratropical  
CT - Ciclone Tropical  
BNA - Baixa do Noroeste Argentino  
PNM - Pressão ao nível médio do mar  
IDL - Interactive Data Language  
GRADS - Grid Analysis and Display System  
NCL - NCAR Command Language  
CFSR - Climate Forecast System Reanalysis  
GFS - Global Forecast System  
HSS - Heidke Skill Score  
TS - Threat Score  
POD - Probability of Detection (Probabilidade de Detecção)  
FAR - False Alarm Ratio (Razão de Falso Alarme)  
IR - Infrared (Infravermelho)  
MCS Index - (Índice de Sistemas convectivos de Mesoescala - Mesoscale Convective Systems Index).  
SA - MCS Index - (Índice de Sistemas Convectivos de Mesoescala para a América do Sul)  
CAPE - Convective Available Potential Energy  
CIN - Convective Inhibition  
LI - Lifted Index  
LI + - LI mais instável  
NCEP - National Centers for Environment Prediction  
NCAR - National Center for Atmospheric Research  
IBGE - Instituto Nacional de Geografia e Estatística  
NOAA - Nacional Oceanic and Atmospheric Administration  
CPTEC - Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos

INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

INMET - Instituto Nacional de Meteorologia

DC/SC - Defesa Civil de Santa Catarina

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>18</b>
<b>1.1 Objetivo Geral.....</b>	<b>20</b>
<b>1.2 Objetivos específicos.....</b>	<b>20</b>
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>21</b>
<b>2.1. Eventos de escala sinótica.....</b>	<b>21</b>
2.1.1 Sistemas Frontais.....	22
2.1.2 Ciclones.....	25
2.1.3 Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis.....	27
2.1.4. Zona de Convergência do Atlântico Sul.....	28
<b>2.2 Eventos de Mesoescala.....</b>	<b>30</b>
2.2.1 Brisa Marítima/Terrestre e Vale/Montanha.....	30
<b>2.2.2 Sistemas Convectivos de Mesoescala.....</b>	<b>31</b>
<b>2.2.2.1 Classificação.....</b>	<b>32</b>
2.2.2.1.1 Complexos Convectivos de Mesoescala (CCMs).....	32
2.2.2.1.2 Sistemas Convectivos Persistentes e Alongados (PECS).....	33
<b>2.2.2.2 Características de formação.....</b>	<b>34</b>
<b>2.2.2.3 Métodos de identificação.....</b>	<b>35</b>
<b>2.2.2.4 SA-MCS Index.....</b>	<b>38</b>
<b>3. DADOS E METODOLOGIA.....</b>	<b>48</b>
<b>3.1 Área de estudo.....</b>	<b>48</b>
<b>3.2 Satélite.....</b>	<b>50</b>
3.2.1 Critérios de escolha.....	50
<b>3.3 Cálculo do Índice.....</b>	<b>52</b>
<b>3.4 Levantamento de dados.....</b>	<b>53</b>
<b>3.5 Estudo de caso.....</b>	<b>53</b>
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>55</b>
<b>4.1 Análise dos casos.....</b>	<b>55</b>
<b>4.2 Estudo de caso.....</b>	<b>57</b>



4.2.1 Caracterização do evento.....	57
4.2.2 Análise Sinótica.....	63
<b>5. CONCLUSÃO.....</b>	<b>79</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>82</b>
<b>ANEXO 1.....</b>	<b>88</b>

## 1. INTRODUÇÃO

De acordo com Reboita et. al (2012), diferentes sistemas atmosféricos de escalas sinótica e mesoescala influenciam o regime de precipitação da região Sul do Brasil ao longo do ano, tais como: sistemas frontais, ciclones, vórtices ciclônicos de altos níveis (VCANs), sistemas convectivos de mesoescala (SCMs), zona de convergência do Atlântico sul (ZCAS) e as circulações de brisa. Marcelino et al. (2006) realizaram um estudo com objetivo de mapear os índices de desastres naturais em Santa Catarina (SC), através da análise dos registros de ocorrência de eventos relacionados a tempo adverso no período de 1980 a 2003. Os autores concluíram que as mesorregiões do Oeste, Vale do Itajaí e Grande Florianópolis são as mais afetadas e frequentemente apresentam ocorrências de tempestades severas. Neste trabalho, foi feita uma revisão das principais características dos eventos que afetam a região sul do Brasil, com foco principalmente aos SCMs, para posteriormente ser realizado um estudo mais aprofundado da atuação de tal sistema sobre SC.

Os SCMs são de extrema importância para os totais pluviométricos da região sul do Brasil, principalmente na estação quente (período de maior ocorrências de SCMs). Porém, apesar do fato da ocorrência dos mesmos ser responsável por grande parte da precipitação da região em questão, os sistemas são de difícil previsão, devido a falta de observações meteorológicas e a dificuldade de simular os processos termodinâmicos e convectivos, que são as principais forçantes em mudanças na atmosfera nos meses quentes e estão diretamente relacionados com a formação dos SCMs.

Existem diferentes classificações de SCMs que levam em consideração critérios como tamanho, excentricidade e duração. Os primeiros estudos sobre esta classificação dos SCMs, ocorreram nos Estados Unidos (EUA). Maddox (1980) denominou estes sistemas como Complexos Convectivos de Mesoescala (CCMs) e classifica estes sistemas em dois critérios de tamanho. Na América do Sul (AS), estes sistemas começaram a ser documentados por Velasco e Fritsch (1987), também dentro dessa mesma classificação. Segundo Silva Dias (1987), os CCMs são aglomerados de nuvens com forma circular, que possuem curto tempo de vida e causam precipitação intensa. Anderson e Arritt (1998) descrevem Sistemas Convectivos Persistentes e Alongados (PECS) que possuem praticamente as mesmas características dos CCMs, porém é utilizado um limiar único de área e temperatura em sua definição, além de que, os sistemas possuem um escudo de nuvens com forma mais alongada (eixo menor/eixo maior  $\leq 0,7$ ).

Com relação a identificação destes sistemas, Ferreira e Anabor (2015) realizaram um estudo climatológico para localizar SCMs ocorridos no sul da AS entre os anos de 2005 e 2006. A análise mostra que 75% dos SCMs alongados e 85% dos CCMs ocorrem na estação quente, entre os meses de outubro e março, e são sistemas de longa duração, sendo que os SCMs tem duração média de 44 horas e os CCMs de 26 horas. O estudo também conclui que os SCMs alongados atingem áreas máximas maiores e possuem duração maior que os CCMs. Além disso, em outra pesquisa, Anabor e Ferreira (2012), concluíram que os CCMs dependem de um ambiente sinótico com fortes características barotrópicas enquanto os lineares dependem de um ambiente com características de forte baroclinicidade. Cohen, Coniglio et al. (2007) observaram em seu estudo que: (i) ambientes com instabilidade mais alta são mais favoráveis à manutenção do SCM e possuem mais probabilidade de produzir um SCM severo e (ii) que um forte (fraco) cisalhamento vertical do vento atuando sobre camadas profundas está usualmente associado com o estágio de maturação (dissipação) dos SCMs.

Jirak e Cotton (2007) obtiveram um índice (MCS Index) que mensurava a probabilidade de ocorrência de SCMs ocorridos nos Estados Unidos. Porém, como tal índice foi desenvolvido baseado na climatologia norte-americana, fatores geográficos e diferentes padrões atmosféricos observados sobre a AS podem modificar os parâmetros utilizados no cálculo do índice e obter um resultado insatisfatório. Levando isso em consideração, Rasera (2017) desenvolveu um índice de SCMs para a região subtropical da AS chamado “SA-MCS Index” que pode ser aplicado em um ambiente operacional e dessa forma facilitar as tomadas de decisão relacionadas a prevenção da ocorrência dos SCMs.

Normalmente, as condições atmosféricas associadas aos SCMs são de tempo adverso. Muitos temporais acompanhados de altos acumulados de precipitação, intensas rajadas de vento e queda de granizo são responsáveis por grandes prejuízos aos municípios e a população. Nesse contexto, a realização de um estudo aprofundado dos SCMs é de extrema relevância, tanto para o meio acadêmico, por ampliar o conhecimento sobre o conteúdo, melhor entender sua dinâmica, morfologia, formação e frequência no estado de SC, quanto para o meio prático, em que um melhor aperfeiçoamento do assunto pode tornar a previsão de SCMs mais precisa, ajudando os centros de previsão e os órgãos oficiais de proteção civil a emitir avisos com maior antecipação, e assim, prevenir a população da ocorrência de possíveis eventos associados aos SCMs.

## 1.1 Objetivo Geral

Realizar um levantamento de casos de SCMs (CCMs e PECS) que atuaram no Estado de Santa Catarina no período de primavera/verão de 2018-2019, a fim de melhorar o conhecimento sobre tais eventos na última estação e, através de um estudo de caso do evento que causou os maiores acumulados de precipitação e rajadas de vento, avaliar as condições atmosféricas que propiciaram a formação e manutenção do sistema.

## 1.2 Objetivos Específicos

- Realizar um estudo de episódios de SCMs em SC no período que compreende a primavera/verão do último e atual ano, visando selecionar os casos que atingiram Santa Catarina.
- Aplicar o *SA MCS Index* para os casos selecionados, para verificar a eficiência do mesmo na previsão dos SCMs.
- A partir de um evento de alto impacto socioeconômico, realizar um estudo de caso a fim de melhorar o entendimento sobre os ingredientes responsáveis pela formação de tal sistema.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A região Sul do Brasil está localizada entre 20°S e 35°S de latitude. É uma região que possui diversidade em relação ao seu relevo, considerando toda sua extensão territorial. Segundo o IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística) (2002) tal região é caracterizada pelo clima temperado, ou também subtropical, exceto o norte do Paraná (PR) que é influenciado pela região central do Brasil, que deixa o local com características mais tropicais. A região apresenta grandes contrastes nos regimes de precipitação e temperatura. Parte deles deve-se à situação geográfica da região, localizada na transição entre os trópicos e as latitudes médias, além de que, e o relevo acidentado também contribui para tais contrastes (TEMPO E CLIMA NO BRASIL, 2009). A pluviometria da região varia entre 1250 a 2000 mm, sendo bem distribuída ao longo do ano (CLIMANÁLISE, 1996). Como descrito por Reboita et al. (2012), a região sul do Brasil possui precipitação elevada e bem distribuída ao longo do ano, sendo que diferentes sistemas atmosféricos influenciam o regime de precipitação da região, tais como: sistemas frontais (Figura 1a), ciclones extratropicais (Figura 1b), vórtices ciclônicos de altos níveis (Figura 1c), linhas de instabilidade (Figura 1d), complexos convectivos de mesoescala (Figura 1e), sistemas convectivos alongados e persistentes (Figura 1f), o anticiclone subtropical do Atlântico sul, a zona de convergência do Atlântico sul e as circulações de brisa (REBOITA et al. 2012). A seguir, é feita uma revisão de tais eventos meteorológicos, tanto de escala sinótica como de mesoescala, responsáveis pelo regime de precipitação na região sul do Brasil.

### 2.1. Eventos de escala sinótica

Do grego *synoptikos*, que significa elaborar uma visão geral de um todo, a meteorologia sinótica está associada com a descrição, análise e previsão do tempo de sistemas meteorológicos de grande escala horizontal (acima de 2000 km de extensão). A classificação dos eventos meteorológicos de acordo com seu tamanho e tempo, são de extrema importância para entender cada um dos fenômenos e suas relações.

A classificação mais utilizada atualmente, é a escala desenvolvida por Orlanski (1975) que inclui a microescala (< 2 km), mesoescala (entre 2 e 2000 km) e grande escala (>2000 km). No decorrer da sessão, serão descritos alguns eventos meteorológicos de escala sinótica que exercem influência na região estudada.

### 2.1.1 Sistemas Frontais

A AS é um continente que apresenta condições favoráveis à ocorrências de Sistemas Frontais (SFs) ao longo do ano. Parte dessa atuação é devido às características atmosféricas que estão associadas com a sua posição geográfica, localizada entre o Anticiclone Subtropical do Pacífico Sul e o Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul, que favorece a intensificação de gradientes de temperatura e cria um ambiente propício para a ocorrência de tais sistemas (SATYAMURTY E MATTOS, 1989). Bjerknes (1919) definiu como "frente" a zona de transição entre duas massas de ar com características físicas distintas e fortes gradientes de temperatura e umidade, o que é atualmente chamada de zona frontal. As zonas frontais são identificadas pelo mínimo relativo da pressão, máximo de vorticidade ciclônica ao longo da frente, fortes gradientes horizontais de temperatura, umidade e movimento vertical, forte cisalhamento vertical e horizontal do vento, rápida mudança de cobertura de nuvens e precipitação (CARLSON, 1991). Um SF clássico é composto por uma frente fria, uma frente quente e um centro de baixa pressão em superfície (ciclone) e, de acordo com o modelo clássico da Escola Norueguesa, as frentes podem ser classificadas como frente fria, quente, estacionária e oclusa (ANDRADE, 2005).

Os SFs são de grande importância pois causam mudanças significativas no tempo em diversas partes do globo. Frequentemente são responsáveis por chuvas intensas, ventos fortes, causando impactos na agricultura, recursos hídricos, setor econômico e social (ANDRADE, 2005). Esses sistemas são ativos durante o ano todo, podem penetrar até latitudes tropicais e, sem dúvida, são partes fundamentais dos regimes de precipitação e temperatura em quase todo o continente (LEMOS E CALBETE, 1996; QUADRO et al., 1996).

Baseado em um trabalho realizado por Cavalcanti e Kousky (2009), Pampuch e Ambrizzi (2016) realizaram uma climatologia destes sistemas nos dados de Reanálise I do *National Centers for Environment Prediction/National Center for Atmospheric Research* (NCEP/NCAR), através de um método objetivo de identificação de sistemas frontais, onde mostraram que o norte e centro da Argentina (ARG) são as regiões que apresentam a maior frequência de passagem dos SFs durante o ano (entre 45 e 50 sistemas). No Brasil, os maiores valores são observados na região Sul, com cerca de 40 a 45 sistemas no litoral estado do Rio Grande do Sul (RS) e entre 30 e 35 nos estados do PR e SC. Além disso, nos resultados referentes a sazonalidade, foi observado que o verão é a estação em que as frentes frias se

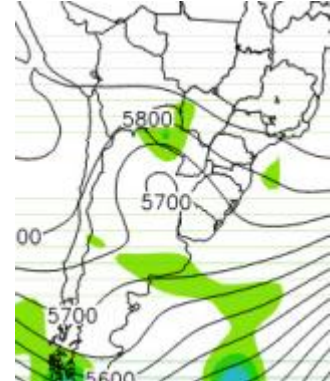
Figura 1 - Imagens ilustrativas de sistemas meteorológicos que atuam na região Sul do Brasil: de (a) Frente Fria, (b) Ciclone, (c) Vórtice Ciclônico de Altos Níveis, (d) Linha de Instabilidade, (e) Complexo Convectivo de Mesoescala, (e) Sistema Convectivo Alongado e Persistente.



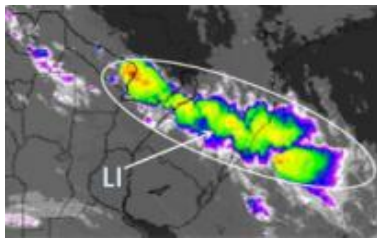
a) Frente fria



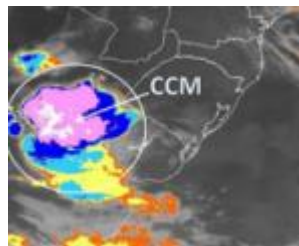
b) Ciclone



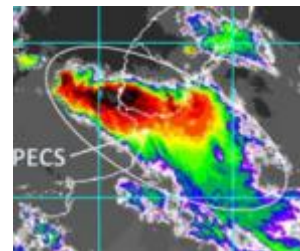
c) VCAN



d) Linha de instabilidade



e) CCM



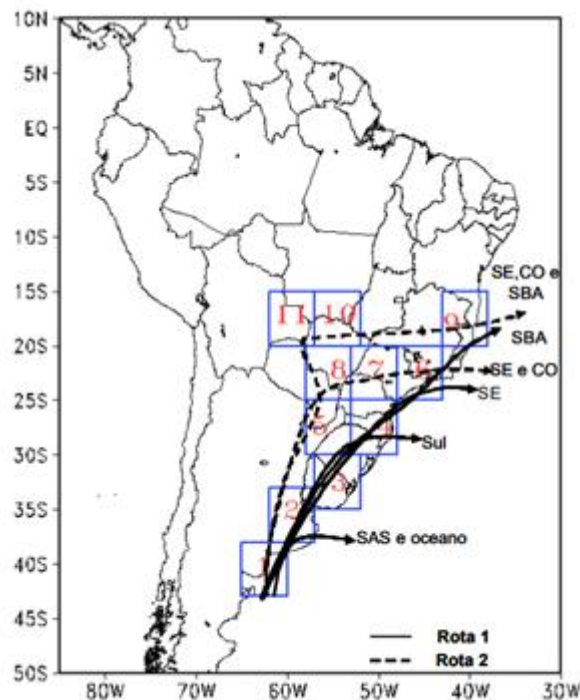
f) PECS

Fonte: Adaptada de Reboita et.al. (2012)

apresentam menos frequentes ao norte de 25°S, sendo que o litoral do estado de São Paulo recebe cerca de 7 sistemas, o seu interior 3 e o estado de Minas Gerais, Espírito Santo e sul da Bahia até 5 sistemas são identificados. Já no inverno, nessas mesmas latitudes, chegam até 8 sistemas. Especificamente sobre o estado catarinense, Rodrigues et al. (2004), realizaram uma climatologia da passagem de frentes frias sobre o litoral de SC, chegando ao resultado de que na média, 3 a 4 frentes frias atingem a costa de Santa Catarina, mensalmente, com um intervalo de 8 dias, e a partir das análises da composição de dados, é mostrado um padrão climatológico da evolução das frentes, mostrando claramente a frente fria movendo-se tipicamente de sudoeste para nordeste.

Andrade (2005) também realizou uma climatologia da passagem de SFs sobre a AS durante o período de 1980-2002, com foco para o Brasil, e estudou o comportamento dos sistemas, bem como suas características e as condições sinóticas e dinâmicas associadas. A Figura 2 mostra a região escolhida para estudo. O critério utilizado para a identificação automática dos sistemas frontais foi que, no intervalo 24 horas, considerando a média dos 5 pontos de grade em cada área analisada, houvesse: (i) queda de temperatura em 925 hPa; (ii) aumento de pressão ao nível médio do mar e (iii) mudança na componente meridional do vento em 925 hPa. A figura 3 apresenta a média mensal da ocorrência dos sistemas frontais na AS. Nota-se através da figura 3, que para as áreas 1, 2, 9 e 10 é no inverno que os sistemas ocorrem com maior frequência. Isso indica que em tal estação, mais sistemas atingem latitudes mais baixas e longitudes mais a oeste do que em outras estações do ano. Já nas áreas 3, 4, 5, 6 e 7 a maior frequência de SFs se dá na primavera, ou seja, mais sistemas atingem as Regiões Sul e Sudeste nesta estação do ano. Também percebe-se uma diminuição de

Figura 2 - Mapa da AS destacando as áreas selecionadas para estudo e rotas. Rota 1 (linha contínua): rota litorânea; Rota 2 (linha tracejada): rota litorânea e continental. Os números de 1 a 11 significam as áreas selecionadas para estudo.

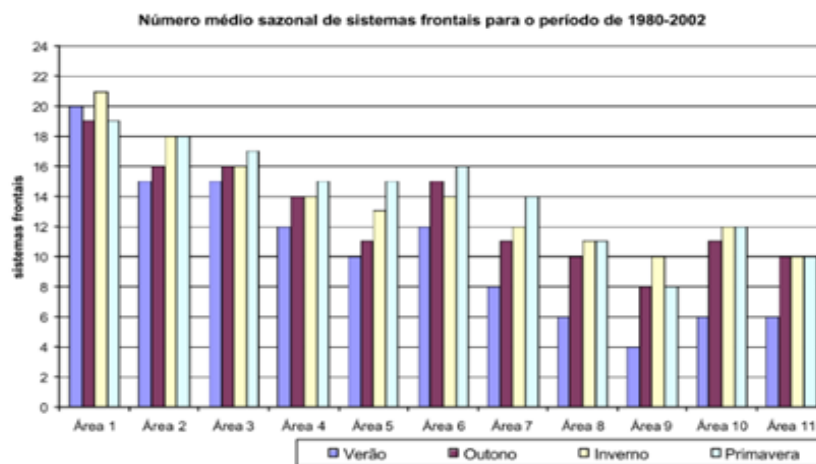


Fonte: Andrade (2005).



sistemas à medida que se consideram as áreas de sul para norte (área 1 para área 11), que corrobora com o resultado encontrado por Lemos e Calbete (1996) que fizeram uma climatologia das frentes que ocorreram entre 1987 a 1995 nas bandas de latitude: 35°S-25°S, 25°S-20°S e ao norte de 20°S, mostrando uma diminuição da ocorrência dos SFs conforme é considerado uma latitude menor. Cavalcanti e Kousky (2003), também indicaram a mesma diminuição da frequência dos sistemas das latitudes mais altas para as mais baixas.

Figura 3 - Gráfico da média sazonal de sistemas frontais para o período de 1980-2002 para as 11 áreas selecionadas.



Fonte: Andrade (2005).

### 2.1.2 Ciclones

Outro tipo de sistema sinótico que afeta a Região Sul do Brasil são os ciclones. Tal região, encontra-se entre duas áreas favoráveis à formação desse sistema: uma na costa sul/sudeste do Brasil e outra entre o Uruguai (URU) e o extremo sul do Brasil (REBOITA et al. 2012). Como descrito em Dutra (2012), no Atlântico Sul, o desenvolvimento de ciclones pode afetar diretamente as condições de tempo das regiões costeiras da AS, podendo causar diversos danos como enchentes, desabamentos e perigo as atividades portuárias e de navegação devido às chuvas intensas, ventos fortes e agitação marítima associadas aos ciclones. Além disso, tais sistemas representam um mecanismo importante no balanço de energia e vapor d'água na atmosfera, sendo responsáveis pelo transporte de calor e umidade.

Hakim (2003) descreve que os ciclones desempenham um papel fundamental no sistema climático da Terra, pois regulam os contrastes de temperatura entre os polos e o Equador e mantêm os ventos de oeste nas latitudes médias contra a dissipação friccional.

Existem diferentes classificações de ciclones, sendo os mais conhecidos os ciclones extratropicais e os ciclones tropicais. O ciclone extratropical (CE), de uma forma geral, é um sistema de baixa pressão, com frentes associadas, e derivam sua energia principalmente dos gradientes horizontais de temperatura existentes na atmosfera (DUTRA, 2012). O modelo conceitual de Bjerknes (1919) e Bjerknes e Solberg (1922), também conhecido como o modelo da escola norueguesa de Bergen ou Teoria da Frente Polar, propõe que os CEs se formam em uma região denominada frente polar, que separa massa de ar fria de origem polar de massa de ar mais quente de latitudes tropicais, sendo uma região de transição. Segundo Bjerknes e Solberg (1922); Charney (1947); Eady (1949), os CEs possuem núcleo frio, são assimétricos e se formam em latitudes médias onde os gradientes horizontais de temperatura e o consequente cisalhamento vertical do vento horizontal são mais intensos, e decaem quando a instabilidade baroclínica enfraquece. Frequentemente, a condição meteorológica na região Sul do Brasil é afetada por estes sistemas que causam ventos fortes, precipitação e redução de temperatura. Reboita et al. (2009) relata um caso ocorrido na primeira semana de maio de 2008 que, num único dia, causou precipitação acima da média esperada para o mês em Porto Alegre. Cardoso et.al (2012) realizou um estudo, baseado em dados de estações meteorológicas, para identificar como os CEs e os fatores locais, como o relevo, têm contribuído para a ocorrência de ventos intensos na faixa leste de Santa Catarina, região que frequentemente sofre com a ocorrência desses sistemas. O trabalho mostra que somente os ciclones mais intensos influenciam no comportamento dos ventos. Nos casos de ciclones menos intensos foi verificado que as características do relevo, os efeitos de brisas e a posição do ciclone, em relação à estação, apresentam aproximadamente a mesma importância no comportamento do vento. Simmonds e Keay (2000) constataram uma média de 35 a 38 sistemas ciclônicos (dependendo da estação do ano) por análise numérica sazonal no HS, com base em uma climatologia realizada no período de 1958 à 1997. Sinclair (1994) mostrou que a densidade de ciclones (centros por círculo de 5° de raio) no inverno é de até aproximadamente 200 ciclones considerando a área ciclogénica (área de formação dos CEs) da AS, entre 45°S e 15°S e entre 60°W e 20°W. Bitencourt et al. (2012) também utilizou a mesma área no seu trabalho onde apresenta uma climatologia dos ciclones explosivos (quando a pressão central decresce 1 hPa h<sup>-1</sup> em 24h) utilizando dados de reanálise do NCEP/NCAR de 1957 a 2010 e constatou que os ciclones explosivos geram ventos médios

de até 60 % mais intensos que os demais ciclones, não ocorrem ao norte de 27 °S e, em geral, iniciam sobre o oceano.

Um ciclone tropical (CT), recebe diversos nomes de acordo com a região do globo em que se forma: furacão (do inglês, hurricanes), no Atlântico Norte e Caribe; tufão (do inglês, typhoons) no Pacífico; e simplesmente ciclone nos Oceanos Índico e Pacífico Sul (ALLABY, 2009). Essas nomeações se referem aos sistemas que possuem ventos sustentados em superfície (que são medidos obtendo-se a velocidade do vento médio num intervalo de tempo fixo) maior que 33 m/s no tempo fixo de um minuto. A região interna de uma tempestade tropical é caracterizada por bandas espirais de precipitação, com um “olho” no centro do sistema com diâmetro típico de 20-50 km, visível em imagens de satélite e em radares meteorológicos (DUTRA, 2012). Tal sistema, possui núcleo quente e é simétrico, com formação fortemente associada à transferência de calor latente na interface ar-mar; o enfraquecimento e dissipação geralmente ocorrem quando esta fonte de energia cessa, ao atingir águas mais frias ou o continente (CHARNEY E ELIASSEN, 1964). De acordo com Marks (2002), a maior parte ocorre no Hemisfério Norte. A costa sul da AS em 2004, foi vítima da ocorrência do primeiro ciclone que teve características de um furacão categoria 1 durante sua fase madura. Esse sistemas desenvolveu-se nas latitudes subtropicais do Atlântico Sul, próximo ao núcleo de um ciclone extratropical ocluído. (GAN, 2009).

### 2.1.3 Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis

Um dos principais sistemas sinóticos que influenciam as regiões tropicais e extratropicais, são os Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis (VCANs) (COSTA, 2009). Segundo Lourenço (1996), no Brasil, as regiões mais afetadas pelos VCANs são: Sul, Sudeste e Nordeste. Eles podem ser definidos como sistemas com núcleo de baixa pressão em escala sinótica, formados inicialmente na alta troposfera podendo se estender à níveis inferiores e cuja circulação ciclônica fechada possui o centro mais frio que sua periferia (GAN, 1982). Coutinho et al. (2010), relata a importância de se compreender a dinâmica, termodinâmica e climatologia sinótica dos sistemas transientes, como os VCANs, que por sua persistência e deslocamento, tem um papel importante no regime de precipitação das regiões afetadas. Um dos primeiros estudos a respeito de VCAN foi feito por Palmer (1951), que documentou a ocorrência de dois casos sobre o Oceano Pacífico Norte. Como documentado pela Climanálise (2014), os VCANs podem ser classificados de duas maneiras: vórtices do tipo Palmén, que se originam nas latitudes subtropicais, também conhecidos na literatura como

Vórtices Desprendidos (RAMÍREZ et al. 2014) e os vórtices do tipo Palmer, também chamados de vórtices de origem tropical por terem origem nessa região. Os vórtices ciclônicos de origem tropical formam-se nos meses de primavera, verão e outono e, passam a maior parte de suas vidas nos trópicos (PALMER, 1951). Além disso, relata que os vórtices ciclônicos de origem tropical apresentam as seguintes características: originam-se acima de 9000m nas latitudes mais baixas, são persistentes, crescem e intensificam-se durante a passagem para as latitudes mais altas e, no Hemisfério Norte, deslocam-se para Nordeste ou Leste-nordeste no cinturão de 20° - 30° de latitude. Os vórtices ciclônicos na vizinhança do Nordeste do Brasil, formam-se devido à intensificação simultânea da crista associada à Alta da Bolívia e o cavado corrente abaixo sobre o Oceano Atlântico (KOUSKY E GAN 1981). Através de uma análise climatológica dos VCANs para o sul da AS no período de janeiro de 1980 a dezembro de 1989, realizada pelo boletim Climanálise em sua edição comemorativa 10 anos, utilizando imagens de satélites meteorológicos e dados de análises do European Center for Medium Range Weather Forecasts (ECMWF). Tal estudo, compreendeu as longitudes de 0° a 120° W e as latitudes de 0° a 70° S e obteve o resultado de que o maior número de VCANs é observado nos meses de inverno (JJA) e especificamente no mês de julho, em média, ocorre o maior número de formação de VCAN por ano, mesmo mês que ocorre também a maior frequência dos VCAN que chegam até o oceano Atlântico. Severo (2010) realizou uma climatologia de VCANs que afetam o sul do Brasil, utilizando dados do NCEP/NCAR no período de 1979-2008 para traçar uma trajetória dos sistemas usando um método de análise subjetiva. A área de estudo foi escolhida entre as latitudes de 60°S a 20°S e as longitudes que envolvem a área continental da AS e oceanos adjacentes. O estudo concluiu que o movimento dos VCAN é quase zonal (oeste-leste) sobre o oceano Pacífico, encurva-se para nordeste ao se aproximar da cordilheira dos Andes e depois se volta para sudeste em direção ao oceano Atlântico. No outono e no inverno, os VCANs conseguem alcançar latitudes mais baixas chegando inclusive ao centro-oeste da AS. No verão, raramente o caminho seguido pelos VCANs se aproxima dos estados do Sul do Brasil. Ademais, notou-se através de um estudo de caso, que a precipitação produzida pelo VCAN durante sua passagem pelo continente está concentrada nos setores leste e sul do centro ciclônico.

#### 2.1.4. Zona de Convergência do Atlântico Sul

Além de todos os sistemas atmosféricos que possuem influência na região Sul do

Brasil, a mesma ainda sofre uma influência indireta da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), que é facilmente identificada em imagens de satélite como uma banda de nebulosidade que se estende desde a Amazônia até o oceano Atlântico Sul (KOUSKY, 1988). Segundo Quadro (1994), a ZCAS é uma área de instabilidade que orienta-se de noroeste (NW) para sudeste (SE) e é caracterizada principalmente pela estacionaridade da banda de nebulosidade por vários dias, e a consequente alteração do regime de chuvas da região afetada. As primeiras observações da existência de tal banda de nebulosidade, puderam ser feitas com o uso sistemático das informações de satélites (CAVALCANTI et. al, 2002). Kodama (1992a, 1992b) trouxe um grande avanço no entendimento do fenômeno, com a descrição de algumas principais características termodinâmicas e dinâmicas do evento. Associada à ZCAS, importantes variações ocorrem na organização espacial, na intensidade das chuvas e na circulação. Tais variações muitas vezes são responsáveis pela ocorrência de eventos severos (CAVALCANTI et al.2009). Elevados totais de precipitação também estão associados ao sistema, como por exemplo o evento de ZCAS do dia 14 de janeiro de 2011 (GPT/INPE) descrito por Reboita et. al (2012), que propiciou a ocorrência de quase 100 mm de chuva em menos de 24 horas no município de São Paulo, registrada pela estação meteorológica do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, localizada no Parque da Água Funda. Apesar deste sistema estar associado com altos acumulados de chuva e algumas vezes eventos severos sobre a região de atuação, tal sistema pode induzir movimentos descendentes intensos no sul do Brasil (CASARIN E KOUSKY, 1986), inibindo a formação de nuvens e precipitação. Quadro (1994), também relata tal informação, encontrando valores de  $\omega$  (velocidade vertical em coordenadas de pressão) positivo sobre o URU e Norte da ARG, significando forte subsidência de ar que pode estar associada com a escassez de precipitação na região Sul do Brasil durante a ocorrência de ZCAS.

É de grande interesse – principalmente para centros de previsão – o estudo aprofundado dos sistemas atmosféricos que são responsáveis pela pluviometria de uma certa região. Para realizar uma previsão do tempo mais precisa, é necessário o conhecimento do local de estudo, saber quais eventos meteorológicos normalmente atuam em cada estação, e quais as suas variações. Dessa forma, tais sistemas podem ser previstos com maior antecedência e precisão, podendo diminuir a ocorrência de danos associados a passagem dos sistemas.

## 2.2 Eventos de Mesoescala

Associado aos citados anteriormente, a Região Sul do Brasil também é influenciada por eventos de mesoescala. Como já mencionado, de acordo com a classificação de Orlanski (1975), os fenômenos de mesoescala são classificados como sistemas que possuem extensão entre 2 e 2000 km, como por exemplo: as circulações de brisa e os sistemas convectivos de mesoescala (SCMs). A seguir, será feita uma revisão sobre tais sistemas, a fim de melhor compreender seus significados e suas influências na região em questão.

### 2.2.1 Brisa Marítima/Terrestre e Vale/Montanha

Um fenômeno comum de mesoescala que é responsável por parte da precipitação que ocorre na Região Sul do Brasil, é o sistema denominado Brisa. Segundo Atkinson (1981), a brisa é causada por um aquecimento diferenciado entre duas superfícies vizinhas que ocasiona fluxos de energia diferentes para a atmosfera causando gradientes de pressão em diferentes níveis acima da superfície, os quais impulsionam o movimento. Na literatura, é bem conhecido os termos brisa marítima/terrestre e brisa vale/montanha. O mesmo autor descreve que a brisa marítima/terrestre sopra do mar em direção ao continente durante o dia, e do continente ao mar durante a noite. Isso acontece devido ao fato da temperatura da terra se elevar mais rapidamente que a da água, tendo em vista que o calor específico da água é maior que o da terra. As camadas de ar que estão em contato com a superfície terrestre se aquecem mais rapidamente, causando uma ascensão das massas de ar devido à diminuição de sua densidade, isto gera uma diminuição da pressão atmosférica neste local (LEITE, 2013). Sobre o oceano, o ar é mais frio e conseqüentemente mais denso, caracterizando uma região de maior pressão atmosférica e um gradiente de pressão é formado resultando em um deslocamento do ar em direção ao continente. Este movimento é conhecido como brisa marítima. À noite, o movimento inverte-se, uma vez que a superfície terrestre resfria-se mais rapidamente que o oceano e portanto, o processo repete-se desta vez com o deslocamento ocorrendo em direção ao oceano, gerando assim a brisa terrestre (ATKINSON, 1981; LEITE 2013). Já a brisa Vale/Montanha, ocorre em regiões de vales circundados por topografia elevada, onde há geralmente um escoamento que se dirige do vale para a montanha durante o dia e da montanha para o vale durante a noite. Durante o dia, o ar sobre a face das montanhas que estão voltadas para o sol, aquece mais rapidamente do que o ar sobre o vale. Nesse caso, surge um gradiente de pressão que aponta do vale para a montanha e origina as chamadas

brisas de vale (ventos anabáticos). À noite, o ar da montanha se resfria mais rapidamente do que o ar sobre o vale. Dessa forma, o escoamento se dirigirá da montanha para o vale gerando brisas de montanhas (ventos catabáticos) (REBOITA, M. et al, 2014).

### 2.2.2 Sistemas Convectivos de Mesoescala

O termo Sistemas Convectivos de Mesoescala (SCMs), refere-se a um grupo de fenômenos meteorológicos precipitantes que podem possuir dimensões espaciais e tempos de duração tão variados quantos forem os fenômenos possíveis dentro da escala meteorológica conhecida como mesoescala (ANABOR E FERREIRA, 2012). Segundo a divisão das escalas atmosféricas proposta por Orlanski (1975), a mesoescala, e consequentemente os SCMs, pode ser subdividida em: meso- $\gamma$  (2-20km), meso- $\beta$  (20-200km) e meso- $\alpha$  (200-2000km). Dentre os SCMs, os mais conhecidos são os de escala meso- $\alpha$ . Desde os anos 80, um grande número de artigos científicos têm documentado ambientes, ciclos de vida e características observacionais dos SCMs (ANABOR, 2008). Tais sistemas, são eventos que atingem com frequência o sul do Brasil e tem um papel importante nos totais de chuva da região.

Os SCMs são sistemas constituídos por um aglomerado de nuvens convectivas e que apresentam área com contínua precipitação, que pode ser parcialmente estratiforme e parcialmente convectiva e possuem formas variadas (HOUZE, 1993). Houze et al. (1990) mostraram que os SCMs possuem duas regiões com regime de precipitação distinta, a primeira na dianteira do SCM, denominada linha principal convectiva, com células alongadas nesta região, causando precipitação convectiva. Na retaguarda da linha principal ocorre uma região com menor refletividade do radar, que é devida à predominância de uma grande área com regime de precipitação de caráter mais estratiforme.

Ferreira e Anabor (2015) fizeram uma curta climatologia para identificar SCMS ocorridos no Sul da AS entre 2005-2006 e documentaram sua frequência e morfologia. A análise mostra que 75% dos SCMs alongados e 85% dos CCMs ocorrem na estação de maior aquecimento (de outubro e março), e são sistemas de longa duração, onde os SCMs tem duração média de 44 horas e os CCMs de 26 horas. Os autores também concluíram que os SCMs alongados atingem áreas máximas maiores e possuem duração maior que os CCMs. O predomínio de SCM durante os períodos quentes do ano, pode ser explicado pelo estabelecimento de condições ambientais favoráveis ao seu desenvolvimento, tais como, condições sinóticas de grande escala, influência da topografia e processos dinâmicos e

termodinâmicos que ocorrem em suas proximidades (CAMPOS E EICHHOLZ, 2011).

Com o passar dos anos, o estudo de tais sistemas se ampliou, devido a difícil previsão dos SCMs e por normalmente estarem associados a eventos com temporais, incluindo vendavais e altos acumulados de chuva, o que traz muitos prejuízos tanto morais quanto financeiros a população.

### **2.2.2.1 Classificação**

Na literatura, existem diferentes classificações dos SCMs, que levam em consideração critérios como tamanho, excentricidade do seu formato e duração. As mesmas são descritas a seguir.

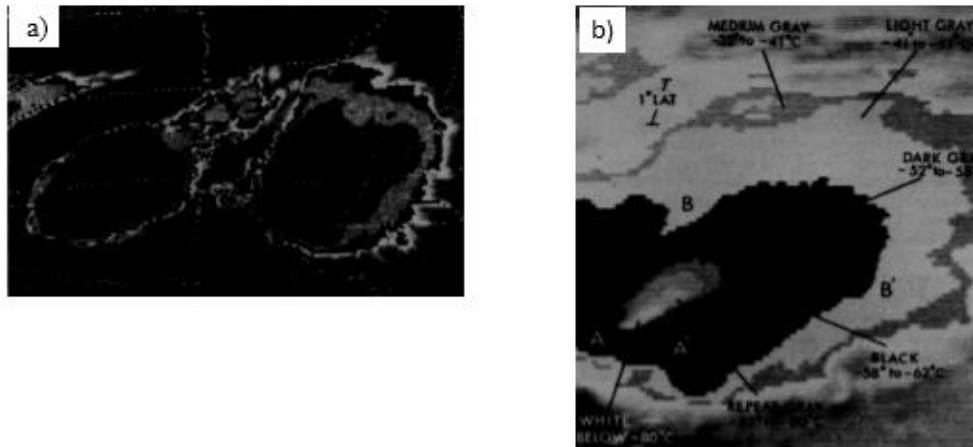
#### **2.2.2.1.1 Complexos Convectivos de Mesoescala (CCMs)**

Um dos primeiros estudos sobre SCMs, ocorreram nos Estados Unidos (EUA) em que Maddox (1980) denominou estes sistemas como Complexos Convectivos de Mesoescala (CCMs) e classifica os mesmos em dois critérios de tamanho. Para ser classificado como um CCM, o sistema precisa possuir um escudo de nuvem de área maior ou igual a 100000 km<sup>2</sup> com uma temperatura IR  $\leq -32^{\circ}\text{C}$  e região de nuvem fria interior de área maior ou igual a 50000 km<sup>2</sup> com temperatura IR  $\leq -52^{\circ}\text{C}$  e também, excentricidade (eixo maior/ eixo menor)  $\geq 0,7$  no seu período de máxima extensão. Sua iniciação é válida quando os critérios de tamanho forem satisfeitos e sua duração é considerada quando as definições de tamanho perdurarem por 6h ou mais. A extensão máxima é dada quando o escudo de 100000 km<sup>2</sup> atinge o tamanho máximo, e por fim, sua dissipação é caracterizada quando os critérios de tamanho não forem mais atendidos. O escudo de nuvens quase-circular é a principal característica utilizada para identificá-los através de imagens de satélite no comprimento de onda no infravermelho, como mostrado na figura 4 (ANABOR, 2008).

Na AS estes sistemas começaram a ser documentados por Velasco e Fritsch (1987), também dentro dessa mesma classificação. Segundo Silva Dias (1987), os CCMs são aglomerados de nuvens com forma circular, que possuem curto tempo de vida (em média 12 horas) e causam precipitação intensa. Os CCMs que influenciam na Região Sul podem se formar sobre a própria região ou migrarem da Argentina para o sul do Brasil. (VELASCO E FRITSCH 1987, FIGUEIREDO E SCOLAR 1996).



Figura 4 - Imagens do satélite Goes 7. a) Dois CCMs às 06:30 UTC de 20/05/1979; b) Imagem realçada em que identifica o sistema dentro dos critérios definidos.



Fonte: Adaptado de Maddox (1980)

#### 2.2.2.1.2 Sistemas Convectivos Persistentes e Alongados (PECS)

Anderson e Arritt (1998) descrevem Sistemas Convectivos Persistentes e Alongados (PECS) que possuem praticamente as mesmas características dos CCMs, porém é utilizado um limiar único de área maior ou igual à 50000 km<sup>2</sup> com temperatura de topo de nuvem  $\leq -52^{\circ}\text{C}$  para ser considerado um PECS, além de que, os sistemas possuem um escudo de nuvens com forma mais alongada (eixo menor/eixo maior  $\leq 0,7$ ). De acordo com Anabor, (2008), estes sistemas alongados são observados mais frequentemente sobre os Estados Unidos do que os CCMs, e tipicamente iniciam sua atividade convectiva em ambiente com movimentos ascendentes em escala sinótica associados com ondas baroclínicas de escala continental.

Jirak et al. (2003) usa três anos de climatologia na estação quente para mostrar que os PECSs são altamente correlacionados com índice levantamento negativo, produzem volumes de precipitação mais elevados e estão mais correlacionados a tempo severo que os CCMs. A análise de dados de radar no mesmo estudo indica que mais da metade dos PECSs se desenvolvem fundidos em uma área de nuvens médias ou através da confluência de sistemas convectivos menores (meso- $\beta$  e meso- $\gamma$ ). A confluência de áreas convectivas ocorre em 70% dos PECSs observados (JIRAK et al. 2003).

### 2.2.2.2 Características de formação

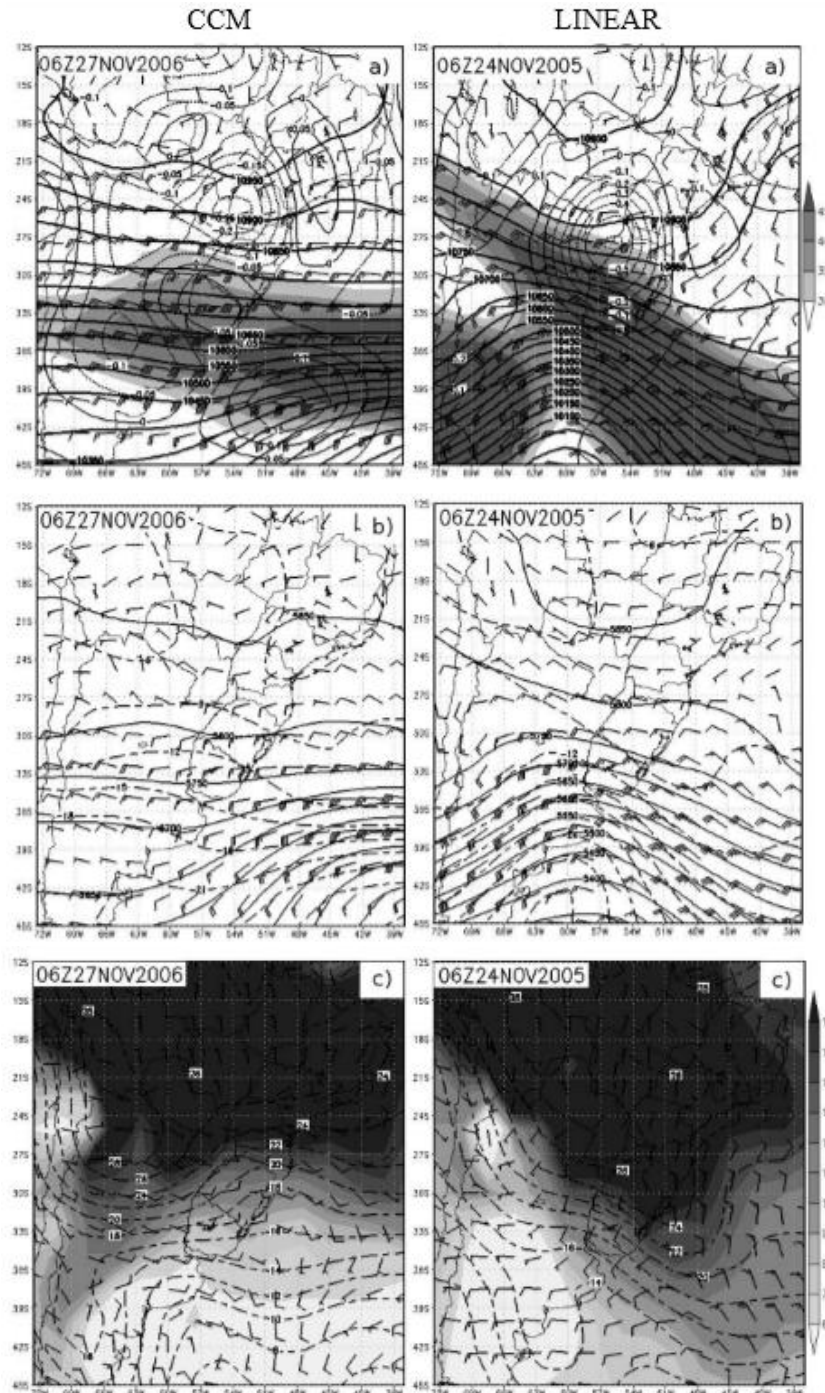
De acordo com (Velasco e Fritsch, 1986), a maior diferença entre os SCM lineares e circulares é a forma do escudo de nuvens e advecção quente e úmida em baixos níveis promovida pelo JBN (Jato de Baixos Níveis). Anabor e Ferreira (2012) descrevem as diferenças sinóticas entre os PECS e os CCMs, como mostrado na Figura 5.

Com a utilização de dados de reanálise NCEP/NCAR para a caracterização sinótica, obtiveram que o CCM apresenta fluxo zonal e mantém-se na entrada equatorial do jato, e este por sua vez apresenta um núcleo reto (Figura 5a CCM). Em baixos níveis a atmosfera mantém-se quente e úmida em um ambiente de fraco cisalhamento (Figura 5a CCM). É evidente uma atmosfera predominantemente barotrópica, onde a estrutura circular reflete a dominância do fluxo vertical de massa em uma região de grande escala com grande deformação e cisalhamento (VELASCO E FRITSH, 1986).

Já o SCM linear (Figura 5a, LINEAR) forma-se em um ambiente com fortes características baroclínicas. Em altos níveis o mesmo se desenvolve no lado anticiclônico da entrada do núcleo do jato. A circulação ageostrofica gerada pela presença do SCM intensifica e inclina o jato em altos níveis (Maddox, 1981) (Figura 5a, LINEAR). A posição SCM corrente abaixo de uma onda curta (Figura 5b LINEAR) e o forte gradiente térmico em baixos níveis (Figura 5b LINEAR) reforça a ideia de um ambiente sinótico baroclínico.

Em resumo, a existência de SCMs circulares (CCM) depende de um ambiente sinótico com fortes características mais barotrópicas enquanto os lineares (PECS) dependem de um ambiente com características de forte baroclinicidade em uma situação sinótica similar a situação clássica frontal. Anderson e Arrit (1998) em seu estudo concluem que o JBN foi responsável pelo transporte de umidade para a região de iniciação para as ocorrências tanto de CCM quanto de PECS e a distribuição espacial das ocorrências do PECS apresentou um desvio sazonal médio semelhante à distribuição climatológica das ocorrências de CCM, mas mostrou uma maior variabilidade e uma tendência para o PECS iniciar e se desenvolver mais a leste do que os CCMs.

Figura 5 - Diferenças sinóticas entre SCMs circulares (CCMs coluna 1) e lineares (PECS coluna 2). a) Omega (Pa/s, linha fina), Altura geopotencial (dam, linha cheia) e Vento em 250mb. b) Altura geopotencial (dam, linha cheia) e Vento (barbelas) em 500mb. c) Temp. (°C, linha pontilhada), Vento, umidade específica (g/kg) em 500mb.



Fonte: Adaptado de Anabor e Ferreira (2012)

### 2.2.2.3 Métodos de identificação

Alguns métodos são utilizados na literatura para a identificação da ocorrência dos

SCMs para fim de pesquisa. Por exemplo, Ferreira e Anabor (2015), utilizam um rastreador automático de tempestades denominado *PyStormTracker*, que utiliza imagens do satélite GOES e de uma biblioteca de visão computacional chamada OpenCV, que é utilizada em computação para rastreamento geométrico de objetos em imagens, jogos e aplicações de realidade aumentada, permite o cálculo de trajetórias, áreas e pode ser facilmente adaptada, sendo aplicável ao rastreamento de tempestades, e portanto, torna o processo de classificação e rastreamento dos SCMs eficaz. Anabor (2008) também desenvolveu um processamento semiautomático de identificação de SCMs que se baseia nos diferentes limiares de temperaturas abordados na literatura, que serão discutidos mais adiante.

Também é bastante utilizado o sistema de Previsão a Curto Prazo e Evolução de Sistemas Convectivos (FORTRACC) da Divisão de Satélites Ambientais/INPE. Este aplicativo é um método de identificação e acompanhamento de SCM, que fornece informações sobre as características físicas e morfológicas dos SCM identificados, durante o seu ciclo de vida.

O processo de identificação dos SCMs pelo FORTRACC, utiliza imagens brutas do satélite GOES e é baseado em limiares de tamanho (150 pixels) e temperatura de brilho do topo das nuvens (235K para identificar os SCM e 210K para identificar as células convectivas imersas nos SCM) (CAMPOS E EICHHOLZ 2011). Existe também, outro sistema de classificação e rastreamento de SCMs, conhecido como MASCOTTE (Técnica de Máxima Correlação Espacial e Rastreamento) de Carvalho e Jones (2001).

Existem algumas diferenças na literatura em relação aos limiares de temperatura usados para definir SCMs de satélites, mas a maioria dos pesquisadores concorda que limiares de temperatura infravermelho inferiores a  $-30^{\circ}\text{C}$  representam regiões convectivas profundas (MADDOX 1983; VELASCO E FRITSCH 1987; MACHADO E ROSSOW 1993; JIRAK et al 2003; SIQUEIRA E MACHADO 2004; ZIPSER et al. 2006). Maddox (1980) usa limiares de  $-32^{\circ}$  e  $-52^{\circ}$  C para determinar CCMs nos Estados Unidos, Velasco e Fritsch (1987) usam  $-40^{\circ}$  e  $-62^{\circ}$  C para CCMs na América do Sul e Anderson e Arritt (1998) usam uma temperatura de limiar único de  $-52^{\circ}$  C para o PECS. Machado et al. (1998) e Machado e Rossow (1993) exploram o uso de limiares de temperatura de  $-21^{\circ}$  a  $-67^{\circ}$  C e descobrem que sistemas de nuvens convectivas profundas estão associados a uma região de temperaturas de brilho infravermelho  $<-28^{\circ}$  C que em algum momento já incorporaram áreas com temperaturas de brilho infravermelho  $<-55^{\circ}$  C. (ANABOR, 2008).

Dessa forma, Anabor (2008) desenvolveu um processamento semi-automático para identificação e rastreamento de SCMs, desenvolvido em IDL (*Interactive Data Language*) que

utiliza três limiares de temperatura,  $-38^{\circ}$ ,  $-45^{\circ}$  e  $-50^{\circ}\text{C}$ , que foram escolhidos para identificar SCMs a partir dos dados do GOES-12 nas latitudes médias da AS. Através de alguns testes de sensibilidade para os dados analisados, o autor obteve que a identificação dos SCMs não é muito sensível a alterações em alguns graus nos limites de temperatura.

O método utiliza um polígono que é usado para selecionar a área dos SCMs em cada imagem de satélite. A cada imagem processada, um valor de área respectiva a temperatura pré-definida (nesse caso,  $-38^{\circ}\text{C}$ ,  $-45^{\circ}\text{C}$  e  $-50^{\circ}\text{C}$ ) é obtido (Figura 6). Isso é possível pois o sistema conta a quantidade de pixels (2x2 por exemplo) que possuem a respectiva temperatura. Se 20 pixels foram identificados com uma temperatura de  $-38^{\circ}\text{C}$  por exemplo, então existe uma área de  $80\text{ km}^2$  (área do pixel x número de pixels) que possui tal valor de temperatura. O sistema também é capaz de calcular o centro geométrico da tempestade para objetivo de rastreamento. Para isso, considera as seguintes regras:

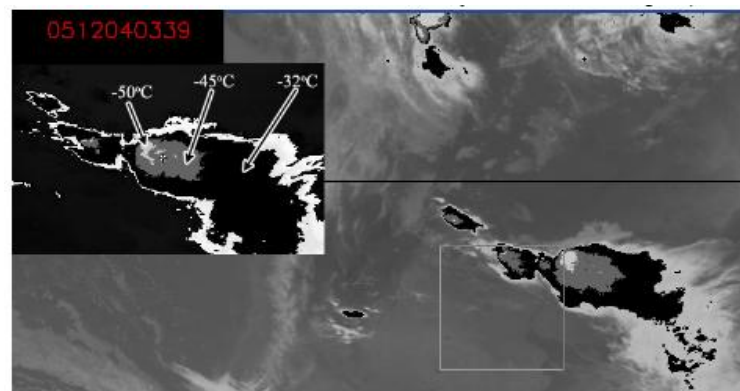
1) Se temperaturas infravermelhas inferiores a  $-40^{\circ}\text{C}$  não estiverem presentes (como ocorre nos estágios iniciais da tempestade), o centro da região convectiva é o centro geométrico dos pixels de  $-38^{\circ}\text{C}$ .

2) Quando uma temperatura inferior ao limiar de  $-45^{\circ}\text{C}$  estiver presente, o centro da região convectiva será o centro geométrico dos pixels de  $-45^{\circ}\text{C}$ .

3) Se a área dos pixels de  $-50^{\circ}\text{C}$  ocupar pelo menos 25% da área dos pixels de  $-45^{\circ}\text{C}$ , o centro da região convectiva será calculado usando o centro geométrico dos pixels de  $-50^{\circ}\text{C}$ .

O presente trabalho aborda a mesma metodologia utilizada por Anabor (2008), por ser um método eficaz e por ter sido desenvolvido e testado nas proximidades da região de interesse, o que torna os resultados mais confiáveis, devido a escolha de limiares que representam bem as características dos SCMs do sul da AS.

Figura 6 - Exemplo da interface do método desenvolvido por Anabor (2008).



#### 2.2.2.4 SA-MCS Index

Jirak e Cotton (2007) obtiveram um índice (MCS Index) que considera os SCMs durante a estação quente (abril a agosto) de 1996 a 1998. Utiliza como variáveis de entrada, a advecção de temperatura em 700 hPa, o CVV entre 0 e 4 km e o LI. Contudo, Rasmussen e Houze (2011) encontraram diferenças com relação ao disparo convectivo dos SCMs terem uma contribuição maior do relevo na região subtropical da AS em relação aos ocorridos nos EUA, além de diferenças físicas entre os continentes envolvendo proporções de água e terra que influenciam na dinâmica da atmosfera. (RASERA, 2017). Porém, como tal índice foi desenvolvido baseado na climatologia norte-americana, fatores geográficos e diferentes padrões atmosféricos observados sobre a AS podem modificar os parâmetros utilizados no cálculo do índice e obter um resultado insatisfatório. Levando isso em consideração, Rasera (2017) teve como objetivo criar um índice preditivo de SCM para a região subtropical da AS (*SA-MCS Index*), considerando as condições atmosféricas de até 6 horas antes do instante de iniciação do SCM. Tal índice pode ser aplicado em um ambiente operacional e dessa forma facilitar as tomadas de decisão relacionadas a prevenção da ocorrência dos SCMs.

O autor selecionou casos de SCMs no período de maio de 2005 à dezembro de 2010, através do *PyStormTracker* anteriormente citado na literatura. Com isso, selecionou 130 SCMs, e 115 com ciclo de vida superior a 6 horas para uma melhor avaliação com os dados de reanálise, que possuem uma escala temporal de 6 horas, e também para atender ao critério de CCM (MADDOX, 1983). Para aqueles que em nenhum momento de seus ciclos de vida alcançaram a condição de um SCM, foram classificados como convecção não-organizada, obtendo-se 382 casos para o mesmo domínio e período.

Após a obtenção dos episódios de SCM, extraiu as variáveis meteorológicas de cada um dos casos para a obtenção do padrão sinótico e também para gerar o índice preditor de SCMs. Para isso, utilizou dados de reanálise do NCEP, *Climate Forecast System Reanalysis* (CFSR) com resolução espacial de  $0,5^\circ \times 0,5^\circ$ , obtidos no tempo imediatamente anterior ao momento de iniciação.

A fim de manter as características físicas da região em torno do SCM e dos sistemas não-organizados, independentemente da sua posição geográfica, uma grade móvel de  $60^\circ \times 60^\circ$  foi centrada nos centros de massa (obtidos pelo *PyStormTracker*) de cada SCM nas fases de iniciação, maturação e dissipação e para os casos de convecção não-organizada no instante de máxima atividade convectiva. Para a obtenção do SA-MCS Index foram selecionadas grades móveis de  $2,5^\circ \times 2,5^\circ$  centradas na latitude e longitude mais próximas do centro de

massa de cada SCM. Essa grade foi utilizada para a obtenção dos valores característicos do entorno da região de disparo convectivo. Através disso, calculou as médias para os seguintes parâmetros: advecção de temperatura (700, 750, 775, 800, 825 e 850 hPa), advecção de vorticidade (450, 500 e 550 hPa), CAPE (superfície), CIN (superfície), taxa de variação vertical da temperatura (lapse rate) média entre 500-700 hPa, umidade verticalmente integrada de 0 a 3 km de altura, umidade específica (700, 750, 775, 800, 825 e 850 hPa), convergência de umidade (750, 775, 800, 825, 850, 875 e 900 hPa), cisalhamento vertical do vento (0 a 1 km, 0 a 3 km e 0 a 6 km), divergência (200, 225, 250 e 300 hPa), LI, LI+, Ômega (450, 500, 550, 600, 650, 700, 750, 775, 800 e 825 hPa), Pressão ao nível do Mar (PNM), vento (200, 225, 250, 300, 450, 500, 550, 700, 750, 775, 800, 825 e 850 hPa). Desta maneira, 115 valores médios foram obtidos para os SCMs.

A partir da utilização de alguns métodos estatísticos, que avaliou o número de SCMs observados, não observados, previstos e não previstos em uma tabela de contingência, foi obtido o parâmetro Heidke Skill Score (HSS - WILKS, 2006). Além do HSS, que foi um fator preponderante na escolha das variáveis usadas no índice, o autor também considerou a natureza física dos termos para efeitos convectivos, tais como parâmetros de estabilidade, variáveis cinéticas e termodinâmicas. O índice foi gerado a partir da metodologia aplicada por Jirak e Cotton (2007), levando em consideração a média e o desvio padrão das variáveis mais relevantes, para que assim o índice se torne adimensional e normalizado.

Para avaliar as características principais dos SCMs, foram analisados alguns aspectos como horário de iniciação, posição do centro de massa e sazonalidade. Com isso, obteve-se que os centroides dos SCMs distribuíram-se entre 22°S e 40°S – 49°W e 67°W e mostraram um padrão de desenvolvimento mais noturno em que estiveram preferencialmente situados na primavera (63,5% ocorreram entre outubro e janeiro). A BNA também foi observada nos casos analisados, contribuindo para o aumento do gradiente horizontal de PNM entre a BNA e a ASAS, intensificando o transporte de calor e umidade de norte, proveniente da Bacia Amazônica. Além disso, os parâmetros de estabilidade CAPE (*Convective Available Potential Energy* - de superfície e mais instável), LI (*Lifted Index*) mais instável e CIN (*Convective Inhibition*) de superfície apresentaram valores mais elevados durante os horários de maior frequência de SCMs neste período avaliado. (Rasera, 2017).

A partir das grades móveis obtidas para cada um dos 382 casos de convecção não-organizada nos momentos de máxima atividade convectiva, e dos 115 SCMs (no horário de reanálise imediatamente anterior ao momento de iniciação), foram elaborados os campos sinóticos médios para os níveis de 250 hPa, 500 hPa, 850 hPa, 1000 hPa e de superfície. Para

avaliar o grau de significância que diferencia alguns campos importantes entre SCMs e convecção não-organizada, o autor utilizou o Teste t de *Student*, em que comparou as médias de 25 células de  $2,5^\circ \times 2,5^\circ$  pertencentes ao domínio de  $12,5^\circ \times 12,5^\circ$  centrado no centroide dos SCMs em seus momentos de iniciação. Através de uma escala de cinza indicando limiares de 50%, 75% e 95% de níveis de significância entre os dois tipos de sistemas em questão e analisou alguns campos atmosféricos em diferentes níveis, com as principais características descritas a seguir:

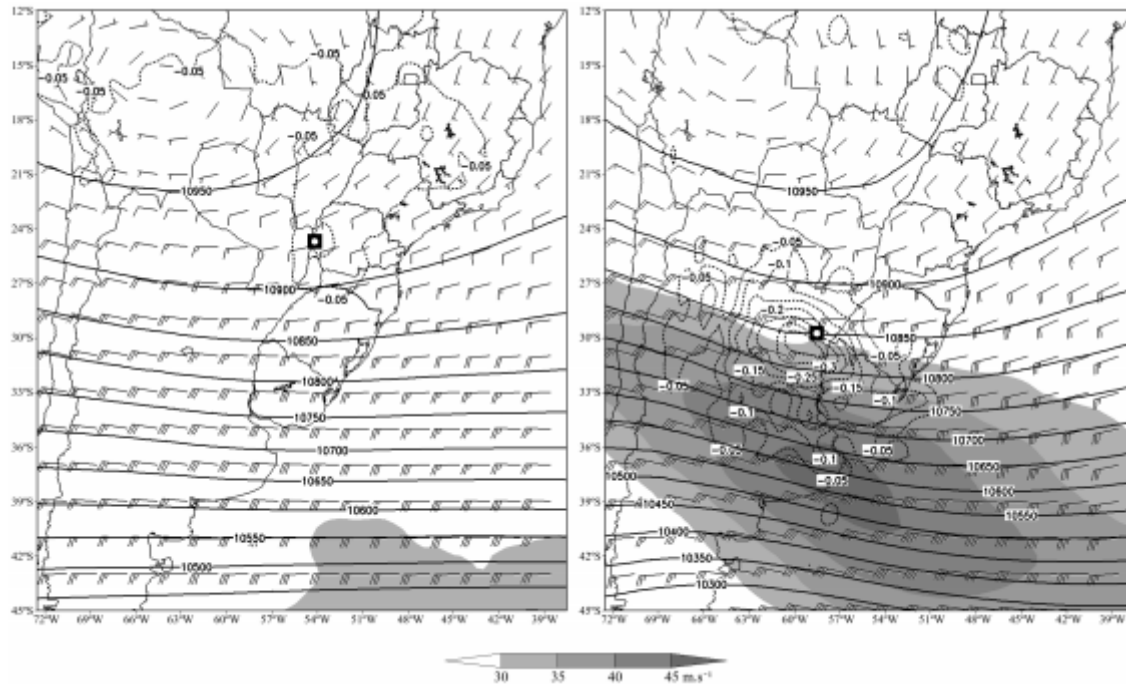
**Campo médio do nível de 250 hPa (Figura 7):** a ocorrência do núcleo do Jato de Altos Níveis (JAN) não é observado no campo médio dos casos de convecção não-organizada, as linhas de altura geopotencial tem um padrão quase zonal e o centroide da média dos casos de convecção não-organizada está localizado numa região de fraco movimento ascendente em 500 hPa; o centroide médio dos SCMs nos momentos imediatamente anteriores à fase de iniciação está localizado na entrada equatorial do núcleo do JAN, uma região favorável para a geração e manutenção de sistemas convectivos observados por outros autores (SALIO et al., 2007; ANABOR et al., 2008); no campo médio dos SCMs a velocidade vertical  $\hat{\Omega}$  em 500 hPa é muito mais intensa e as linhas de altura geopotencial denotam um cavado suave localizado na retaguarda do centroide, que é refletido também no nível de 500 hPa. (RASERA, 2017).

**500 hPa (Figura 8):** os cavados se tornaram mais evidentes na retaguarda dos centroides dos SCMs, isso faz com que a advecção de vorticidade ciclônica aumente a leste dos cavados e contribua para a formação dos SCMs; os casos de convecção não-organizada mais uma vez apresentou as linhas de altura geopotencial bastante zonais, resultando numa advecção de vorticidade ciclônica foi praticamente nula para este tipo de sistema.

**850 hPa (Figura 9):** os SCMs apresentaram um cavado evidente na retaguarda de seus centroides no momento de sua iniciação, enquanto que nos casos de convecção não-organizada, novamente as linhas de altura geopotencial tiveram uma amplitude menor quando comparados aos eventos de SCMs. Esse cavado explica o maior gradiente térmico e o escoamento em baixos níveis vindo de norte que pode ser observado, produzindo, desta forma, uma advecção horizontal de temperatura mais efetiva que nos casos de convecção não-organizada. (RASERA 2017).

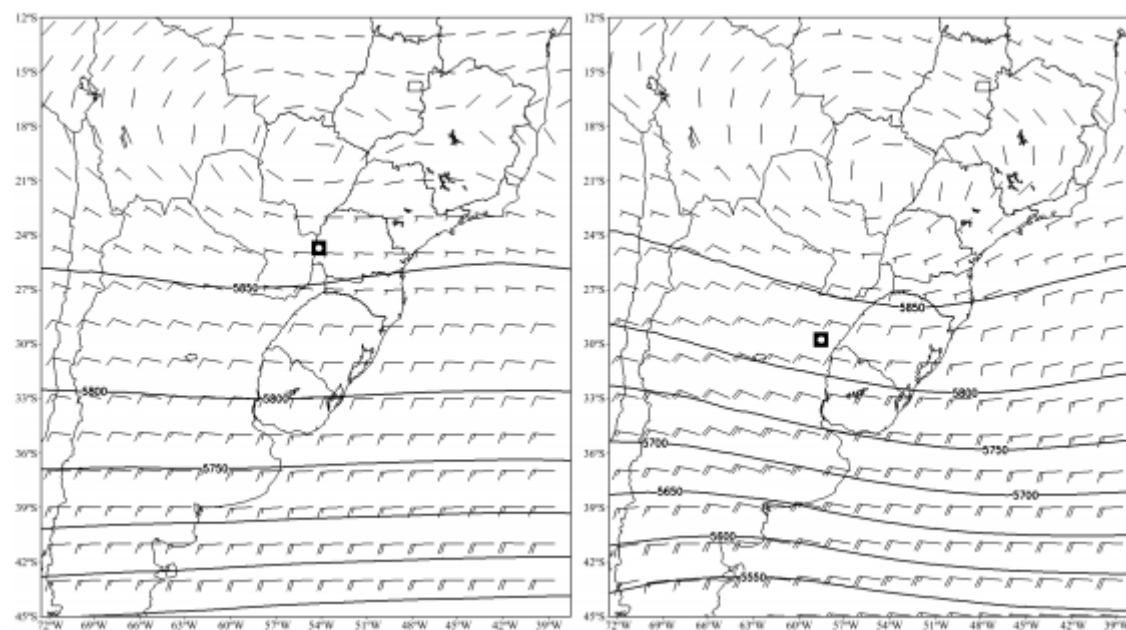


Figura 7- Campos médios em 250 hPa para o vento (m.s-1; barbelas e área hachurada para o núcleo do jato acima de 30 m.s-1) e altura geopotencial (mgp; linhas contínuas), acrescido da velocidade vertical  $\hat{\Omega}$  em 500 hPa (Pa.s-1; linhas tracejadas). Convecção não-organizada durante a máxima atividade (esquerda) e SCMs durante o momento imediatamente anterior ao estágio de iniciação (direita).



Fonte: Rasera (2017)

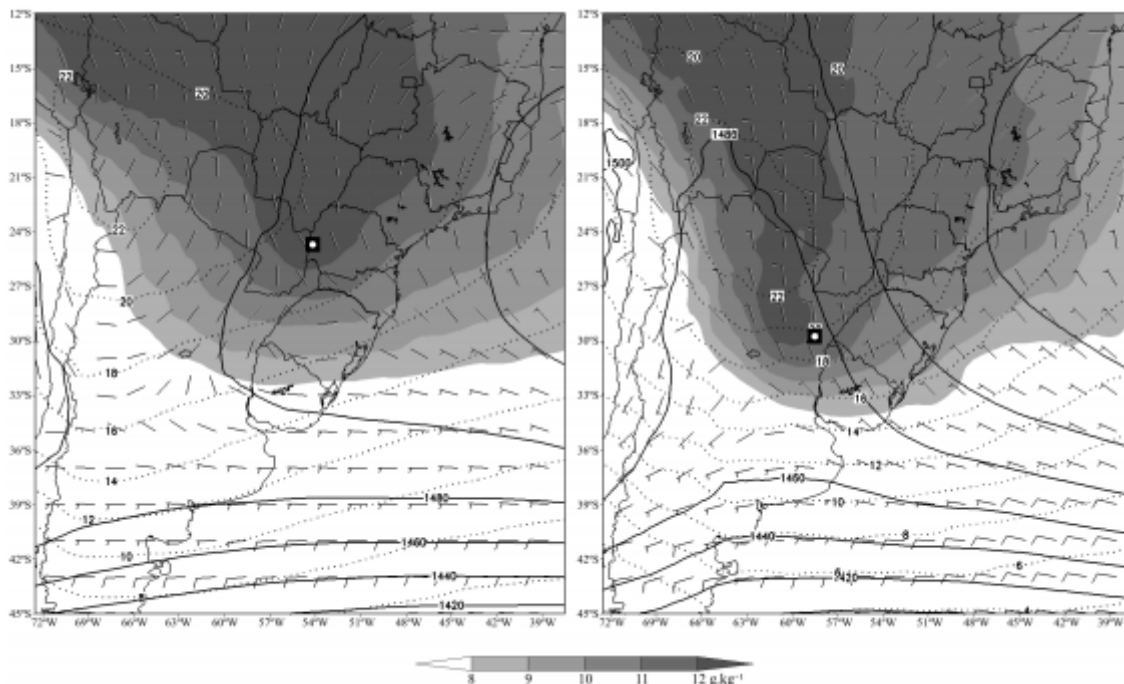
Figura 8 – Campos médios em 500 hPa do vento (m.s 1, barbelas) e altura geopotencial (mgp, linhas contínuas). – Convecção não-organizada durante a máxima atividade (esquerda) e SCMs durante o momento imediatamente anterior ao estágio de iniciação (direita).



Fonte: Rasera (2017)

**1000 hPa (Figura 10):** a PNM para os casos de convecção não-organizada, apresentou um gradiente muito mais fraco que os observados nos episódios de SCMs, situado entre o centro de baixa pressão no norte da Argentina e a ASAS, que é consistente com o observado por Anabor et al. (2008) para SCMs que se desenvolveram corrente acima sobre a América do Sul. Como esse padrão não é observado nos casos de convecção não-organizada, os ventos em 1000 hPa se tornam mais fracos, que resulta num transporte de calor e umidade oriundos de norte menos eficiente sobre a superfície; nos casos de SCMs, ventos mais intensos com componente de norte são observados e o centroide médio fica posicionado sobre a região de mudança da direção do vento de nordeste para leste, aumentando o cisalhamento vertical do vento o que contribui para distúrbios de pressão dentro de células convectivas (WEISMAN, 1993) o que favorece a organização e manutenção dos SCMs. (RASERA, 2017).

Figura 9 - Campos médios em 850 hPa do vento (m.s 1, barbelas), altura geopotencial (mcp, linhas contínuas), temperatura do ar (°C, linhas pontilhadas) e umidade específica (área hachurada). Convecção não-organizada durante a máxima atividade (esquerda) e SCMs durante o momento imediatamente anterior ao estágio de iniciação (direita).



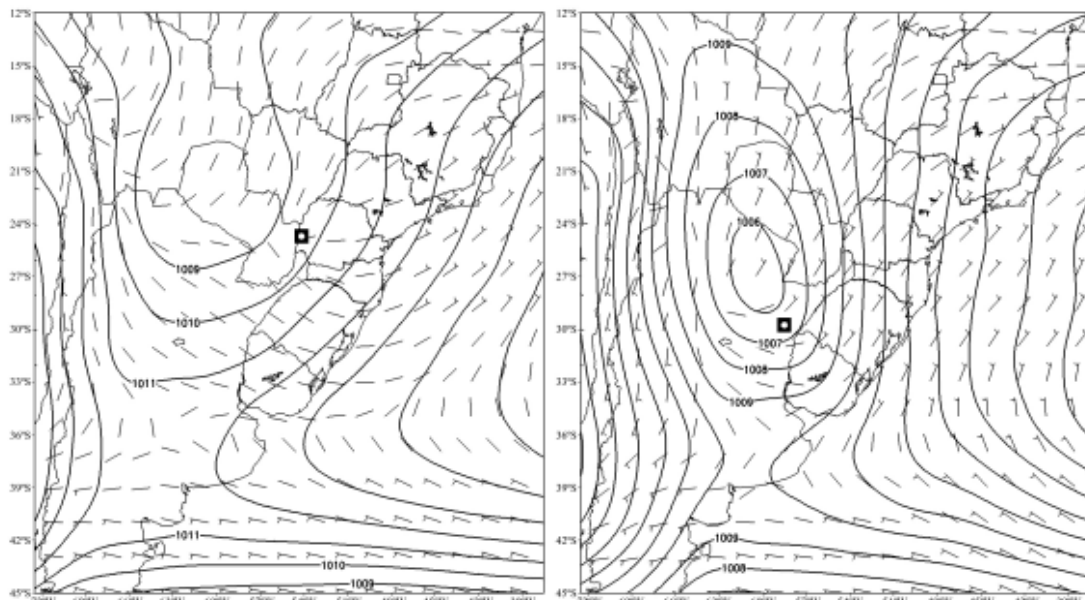
Fonte: Rasera (2017)

Por fim, Rasera (2017) também avaliou a instabilidade do ambiente, através dos campos médios de superfície com CAPE e para LI+, tanto para os casos de convecção não-organizada, como para os episódios de SCMs. Com isso, observou que para ambos os

sistemas o LI+ médio foi negativo (abaixo de -2 K), e com valores próximos (LI+ de -2,17 K para os SCMs e -2,04 K para convecção não-organizada); para o CAPE de superfície, os casos de convecção não-organizada apresentaram um valor mais alto em relação aos eventos de SCM, que pode ser explicado pelas diferenças nos ciclos de vida dos dois sistemas.

Para definir quais variáveis e níveis atmosféricos seriam usados no SA-MCS Index, Rasera (2017) buscou utilizar da metodologia estatística aplicada na elaboração do MCS Index existente composto por dados de sistemas convectivos ocorridos nos EUA (JIRAK; COTTON, 2007).

Figura 10 – Campos médios do vento (m.s-1; barbs) em 1000 hPa e pressão ao nível do mar (hPa, linhas contínuas). Convecção não-organizada durante a máxima atividade (esquerda) e SCMs durante o momento imediatamente anterior ao estágio de iniciação (direita).



Fonte: Rasera (2017)

Para cada parâmetro, foi calculado o Heidke Skill Score e uma tabela de contingência foi elaborada (Tabela 1) com os níveis de melhor performance mostrados. Os valores ótimos são aqueles que obtiveram os mais altos HSS entre todo conjunto de dados daquele parâmetro meteorológico e para este valor foi calculado seu Threat Score (TS), probabilidade de detecção (POD), razão de falso alarme (FAR) e seu viés. É importante destacar que o autor deixa claro em seu trabalho que a escolha destes parâmetros meteorológicos que seriam incorporados ao SA-MCS Index não considerou apenas a avaliação dos valores de HSS, mas também a natureza física dos parâmetros que melhor representam os processos físicos envolvidos no disparo convectivo e subsequente organização do sistema.

**Primeiro termo:** foi baseado no cisalhamento vertical do vento entre os níveis de 0 e 6 km de altura. Esta é uma variável dinâmica e atua na metade inferior da atmosfera. A camada de 0 a 6 km, em vez de 0 a 3 km encontrado no MCS Index, pode ter parte de sua relevância estatística devido à assimilação de dados de poucas radiossondas pelo CFSR sobre a AS. Não foram encontradas grandes diferenças entre as 2 camadas citadas, mas devido ao ligeiro melhor desempenho estatístico, o autor utilizou o cisalhamento vertical do vento entre 0 e 6 km. Esta é uma camada que também é usada como parâmetro para distinguir severidade de tempestades convectivas com o limiar de 15 m.s<sup>-1</sup> (BROOKS et al., 2003).

Tabela 1 - Variáveis meteorológicas com os mais altos Heidke Skill Score (HSS) na qualidade em distinguir SCMs de convecção não-organizada. Também são mostrados outros parâmetros estatísticos como o Threat Score (TS), probabilidade de detecção (POD), razão de falso alarme (FAR) e viés, todos também calculados para o valor ótimo. As variáveis meteorológicas destacadas em negrito foram utilizadas na avaliação dos 3 SA-MCS Index.

Variável	Valor ótimo	HSS	TS	POD	FAR	Viés
<b>Cisalhamento vertical do vento (0-6 km)</b>	<b>16,28 m.s<sup>-1</sup></b>	<b>0,64</b>	<b>0,57</b>	<b>0,71</b>	<b>0,26</b>	<b>0,97</b>
Magnitude do vento (250 hPa)	28,69 m.s <sup>-1</sup>	0,64	0,55	0,66	0,22	0,85
Cisalhamento vertical do vento (0-3 km)	10,06 m.s <sup>-1</sup>	0,63	0,55	0,71	0,29	1,00
Magnitude do vento (450 hPa)	16,39 m.s <sup>-1</sup>	0,62	0,54	0,63	0,21	0,79
<b>Advecção de temperatura (775 hPa)</b>	<b>3,69 x 10<sup>-5</sup> K.s<sup>-1</sup></b>	<b>0,59</b>	<b>0,50</b>	<b>0,55</b>	<b>0,15</b>	<b>0,64</b>
Magnitude do vento (850 hPa)	8,35 m.s <sup>-1</sup>	0,53	0,47	0,61	0,33	0,91
<b>Lapse rate (700hPa-500hPa)</b>	<b>5,76 K.km<sup>-1</sup></b>	<b>0,53</b>	<b>0,47</b>	<b>0,62</b>	<b>0,34</b>	<b>0,94</b>
<b>Velocidade vertical Ômega (800 hPa)</b>	<b>-0,26 Pa.s<sup>-1</sup></b>	<b>0,46</b>	<b>0,40</b>	<b>0,53</b>	<b>0,37</b>	<b>0,84</b>
Velocidade vertical (800 hPa)	2,70 cm.s <sup>-1</sup>	0,46	0,40	0,53	0,37	0,84
Magnitude do vento (10 m)	3,28 m.s <sup>-1</sup>	0,41	0,35	0,45	0,38	0,73
Cisalhamento vertical do vento (0-1 km)	7,56 m.s <sup>-1</sup>	0,39	0,33	0,40	0,34	0,61
Divergência (225 hPa)	1,52 x 10 <sup>-5</sup> s <sup>-1</sup>	0,38	0,36	0,54	0,48	1,04
CIN (superfície)	-47,20 J.kg <sup>-1</sup>	1,00	0,37	0,64	0,53	1,38
Convergência de umidade (825 hPa)	1,54 x 10 <sup>-4</sup> g.kg <sup>-1</sup> .s <sup>-1</sup>	0,36	0,33	0,45	0,45	0,83
Pressão reduzida ao nível médio do mar	1005,94 hPa	0,33	0,30	0,41	0,46	0,76
Advecção de vorticidade (450 hPa)	-9,74 x 10 <sup>-10</sup> s <sup>-2</sup>	0,28	0,24	0,30	0,41	0,50
Umidade específica (700 hPa)	9,85 g.kg <sup>-1</sup>	0,27	0,23	0,27	0,39	0,44
<b>Umidade Verticalm. Integrada (0-3 km)</b>	<b>34,50 g.kg<sup>-1</sup>.m<sup>-1</sup></b>	<b>0,24</b>	<b>0,22</b>	<b>0,29</b>	<b>0,50</b>	<b>0,57</b>
<b>LI mais instável (de até 1600 m)</b>	<b>-4,02 K</b>	<b>0,18</b>	<b>0,18</b>	<b>0,23</b>	<b>0,55</b>	<b>0,52</b>
CAPE (mais instável, acima de 1000 hPa)	767,28 J.kg <sup>-1</sup>	0,12	0,16	0,22	0,64	0,61

Fonte: Rasera, 2017.

**Segundo termo:** baseado na advecção de temperatura em 775 hPa, que é um resultado do levantamento isentrópico. Essa é uma variável termodinâmica responsável por prover calor, e conseqüentemente, energia para o sistema se desenvolver. Anteriormente, no cálculo do MCS Index, Jirak e Cotton (2007) encontraram o nível de 700 hPa como sendo a melhor variável, 75 hPa mais alto do que o encontrado por Rasera (2017). Tal redução do nível isobárico pode estar relacionado com o aumento da contribuição da orografia para o disparo convectivo de SCMs na AS observada por Rasmussen e Houze (2011) e também mais próximo ao nível onde geralmente o JBN ocorre nesse continente (~ 850 hPa), uma vez que esta é uma altura onde o transporte de calor se torna mais efetivo sobre esta região. (RASERA, 2017).

**Terceiro termo:** velocidade vertical  $\hat{\Omega}$  no nível de 800 hPa, uma variável dinâmica. É principalmente influenciada pelo levantamento isentrópico Além de possuir uma relevância estatística devido ao seu valor de HSS, sua importância também é explicada fisicamente por sua boa representação do disparo convectivo que ocorre próximo à superfície, e desta forma delimita melhor a área de iniciação dos SCMs.

**Quarto termo:** Relacionado ao LI+. Apesar de não ter resultado em um HSS elevado, é um parâmetro de estabilidade que fornece uma medida de flutuabilidade da parcela ascendente e possui papel fundamental no disparo convectivo (EMANUEL, 1994). Além disso, seus valores médios mais instáveis delimitam bem a região de convecção, especificando de forma mais efetiva a área com SA-MCS Index favorável. (RASERA, 2017)

Além do SA-MCS Index, o autor desenvolveu outros dois índices com o uso do lapse rate médio entre 500 e 700 hPa em um dos termos. O primeiro (SA-MCS Index 2) substituiu o termo de LI+ e o segundo (SA-MCS Index 3) além da mesma substituição do LI+ acrescentou um quinto termo relacionado à umidade verticalmente integrada nos primeiros 3 km. Tais alterações, foram avaliadas com o fim de testar qual dos índices iriam apresentar valores mais satisfatórios.

No cálculo, cada variável de cada termo, é subtraída da média desta mesma variável contida na amostragem de SCMs e em seguida dividida pelo desvio padrão. Esta metodologia é aplicada de modo a normalizar as variáveis e construir um índice adimensional, além de calibrar os termos de modo que eles possuam o mesmo peso. O valor ótimo é definido como o que melhor discrimina os eventos de SCMs dos casos de convecção não-organizada.

SA-MCS Index:

$$\frac{[V_{6km} - V_{0km}] - 20,01}{7,87} + \frac{[-V \cdot \nabla T_{775hPa}] - 4,84 \times 10^{-5}}{5,65 \times 10^{-5}} + \frac{-LI_{inst} + 2,17}{2,23} + \frac{-\omega_{800hPa} + 0,27}{0,29}$$

SA- MCS Index 2:

$$\frac{[V_{6km} - V_{0km}] - 20,01}{7,87} + \frac{[-V \cdot \nabla T_{775hPa}] - 4,84 \times 10^{-5}}{5,65 \times 10^{-5}} + \frac{dT/dz_{700-500hPa} - 5,93}{0,59} + \frac{-\omega_{800hPa} + 0,27}{0,29}$$

SA- MCS Index 3:

$$\frac{[V_{6km} - V_{0km}] - 20,01}{7,87} + \frac{[-V \cdot \nabla T_{775hPa}] - 4,84 \times 10^{-5}}{5,65 \times 10^{-5}} + \frac{dT/dz_{700-500hPa} - 5,93}{0,59} + \frac{-\omega_{800hPa} + 0,27}{0,29} + \frac{\int_0^{3km} U_{esp} - 30,99}{5,46}$$

Os 3 índices desenvolvidos para a AS (SA-MCS Index, SA- MCS Index 2 e SA-MCS Index 3) foram comparados também ao MCS Index e ao MCS Index melhorado para a AS, a partir da mesma metodologia estatística aplicada anteriormente na obtenção dos termos relevantes aos índices. Como resultado, o autor obteve uma melhora nos valores de HSS (Tabela 2) dos 3 índices desenvolvidos para a AS em relação ao MCS Index e quando este foi calibrado para a AS. Além disso, os 3 SA-MCS Index obtiveram melhores taxas de detecção, considerando TS e POD. Isto é de grande importância, visto que é muito relevante descartar o menor número possível de SCMs ocorridos sem serem previstos, devido ao seu potencial de geração de tempo severo.

Para confirmar a utilização do índice, foram avaliados para 2 casos de SCM (um circular e outro linear) comparando os valores do MCS Index (JIRAK; COTTON, 2007) e o

SA-MCS Index com o termo de  $\hat{\Omega}$  em 800 hPa e com a ausência dele. Em ambos os episódios foi notado que o SA-MCS Index possuiu valores mais elevados na região de ocorrência de SCM, indicando mais certeza quanto a área de desenvolvimento dos sistemas.

Tabela 2 – Avaliação estatística dos 5 índices de SCM. Os valores ótimos são os que possuíram os maiores Heidke Skill Score. Também são mostrados outros parâmetros estatísticos como o Threat Score (TS), probabilidade de detecção (POD), razão de falso alarme (FAR) e viés, todos também calculados para o valor ótimo.

<b>Índice</b>	<b>Valor ótimo</b>	<b>HSS</b>	<b>TS</b>	<b>POD</b>	<b>FAR</b>	<b>Viés</b>
MCS Index	-1,29	0,69	0,61	0,73	0,21	0,92
Modified MCS Index	-0,70	0,68	0,60	0,71	0,21	0,90
SA-MCS Index	-1,40	0,71	0,64	0,77	0,22	0,99
SA-MCS Index 2	-1,74	0,76	0,69	0,80	0,17	0,97
SA-MCS Index 3	-1,71	0,79	0,71	0,78	0,11	0,88

Fonte: Rasera (2017).

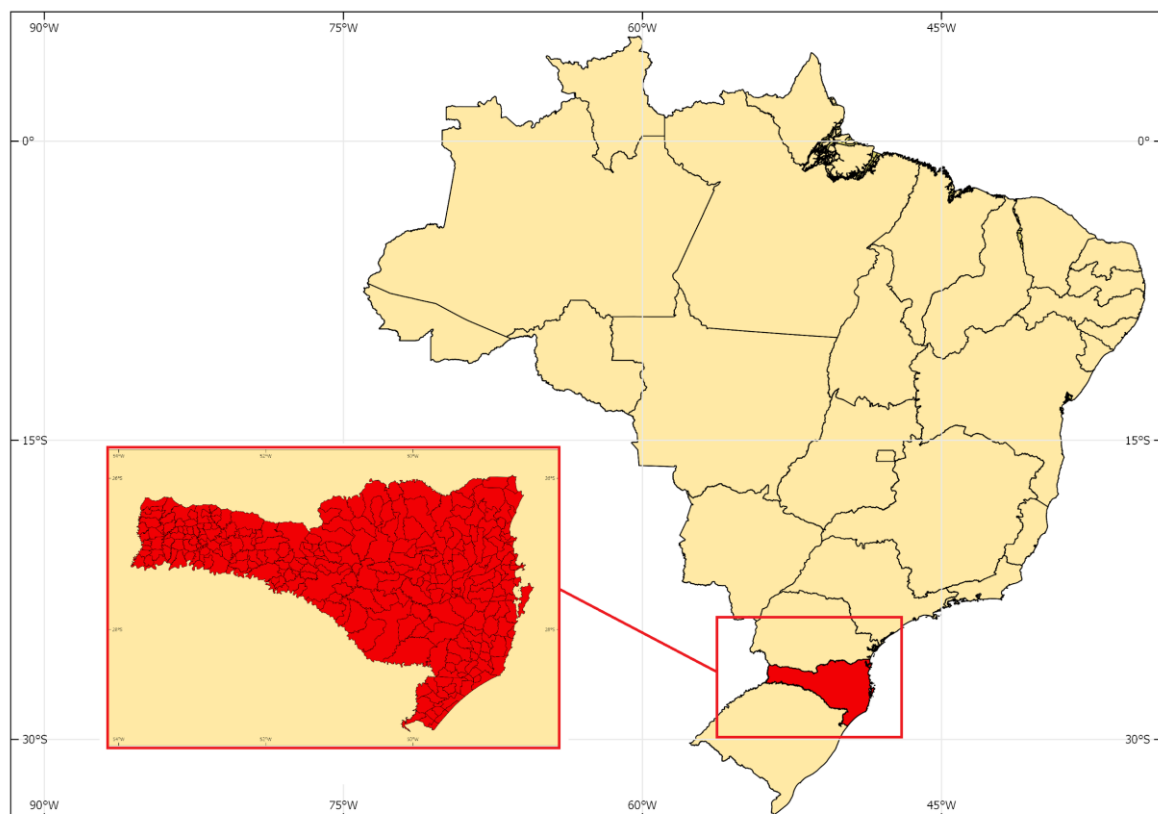
Também observou que as áreas com falso alarme de SCM diminuíram com a introdução do termo relacionado ao  $\hat{\Omega}$  e verificou que o centroide relacionado aos maiores valores do SA-MCS Index esteve posicionado mais próximo do centroide referente a posição de iniciação do sistema que desenvolveu posteriormente. Por fim, algumas outras avaliações foram realizadas em relação a distribuição espacial de modo a medir a distância entre os máximos valores dos índices com o local de iniciação do SCM. Dentre todas as avaliações realizadas, o autor concluiu que o SA-MCS Index se mostrou mais eficiente que o MCS Index desenvolvido por Jirak e Cotton (2007), quando considerados os eventos de SCMs na região subtropical da América do Sul. Este novo índice desenvolvido possuiu uma melhor qualidade de diferenciação entre os casos de convecção não-organizada e SCMs, demonstrado pelo valor mais alto do Heidke Skill Score. Também teve uma melhor performance na detecção de regiões dos valores máximos dos índices mais próximos aos centroides dos SCMs (RASERA, 2017).

### 3. DADOS E METODOLOGIA

#### 3.1 Área de estudo

Santa Catarina é um dos estados brasileiros que pertence a região sul do país (Figura 11) juntamente com o RS e o PR. Localiza-se entre os paralelos  $26^{\circ}00'08''\text{S}$  e  $29^{\circ}21'03''\text{S}$  e os meridianos  $48^{\circ}21'30''\text{W}$  e  $53^{\circ}50'09''\text{W}$  (IBGE, 2010). Faz divisa ao sul com o RS, ao norte com PR a leste com o oceano Atlântico e a oeste com a ARG. Possui 295 municípios, 95.730,921 km<sup>2</sup> de extensão territorial, 6.248.436 habitantes de acordo com o último censo demográfico realizado pelo IBGE em 2010 e capital em Florianópolis, localizada na região litorânea do estado.

Figura 11 - Mapa geográfico do Estado de Santa Catarina, localizado na região Sul do Brasil. Faz divisa ao sul com Rio Grande do Sul, ao norte com Paraná, à leste com o oceano Atlântico e a oeste com a Argentina. O Estado possui 295 municípios.



De acordo com o Atlas Brasileiro de Desastres Naturais (2013), Santa Catarina é um estado bastante atingido por diversos desastres naturais, dentre eles encontram-se: enxurradas, inundações, secas, granizo, vendavais, movimentos de massa e tornados. Na



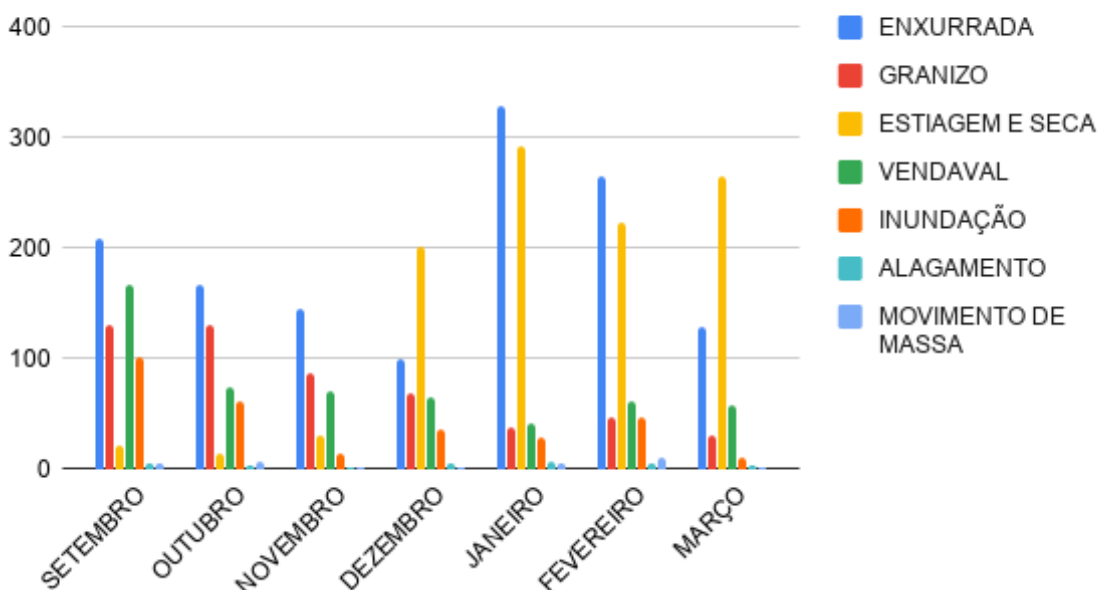
figura 12 é apresentada a frequência mensal de ocorrência de desastres naturais registradas de 1991 até 2012 nos meses de setembro a março, que engloba as estações de interesse no presente trabalho.

Nota-se que há um alto número de enxurradas em todos os meses, todos apresentando valores maiores ou iguais a 100 ocorrências. Também há destaque para vendavais, principalmente no mês de setembro. Vale ressaltar que a primavera é uma estação de transição, em que a atmosfera ainda apresenta características de inverno, mas começa ter a presença de maior calor disponível, devido à aproximação do verão. Essas diferenças de padrões, em muitas ocasiões fortalecem os gradientes de temperatura e pressão, que propiciam a formação de sistemas de tempestades, ocasionando em vendavais, aguaceiros, etc.

Devido ao alto número de ocorrências, o presente estudo se torna relevante em questão da análise de desempenho do índice que prevê SCMs e no aprimoramento do conhecimento aos eventos que são associados aos SCMs, levando em consideração que tais sistemas ocorrem na primavera e no verão.

Figura 12. Frequência mensal de ocorrência de desastres naturais no estado de Santa Catarina de 1991 à 2012, englobando as estações de primavera-verão dos respectivos anos.

**Frequência mensal de ocorrência de desastres nos meses de primavera-verão em Santa Catarina no período de 1991 a 2012**



Fonte: Adaptado de Atlas Brasileiro de Desastres Naturais (2013).

## 3.2 Satélite

Foram utilizadas imagens do infravermelho (IR) (canal 13) do satélite GOES-16 pertencente a *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA), com resolução de 2 km. A banda 13 do GOES-16 corresponde aproximadamente ao antigo canal de nuvem IR GOES-13 e refere-se ao comprimento de onda de 10.3  $\mu\text{m}$ . É uma faixa de janela de IR "limpa" que é menos sensível do que outras faixas de janela de IR à absorção de vapor de água e, portanto, melhora as correções de umidade atmosférica, auxilia na identificação e classificação de nuvens e outras características atmosféricas, estima a temperatura de brilho do topo da nuvem e o tamanho da partícula da nuvem e caracteriza as propriedades da superfície em produtos derivados. Através de um script desenvolvido em GRADS (Grid Analysis and Display System) foram baixadas imagens do satélite disponíveis no site do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos/ Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (CPTEC/INPE) no período de 01/09/2018 à 31/03/2019 nos horários das 00, 06, 12 e 18 UTC a fim fazer uma avaliação visual das imagens com intuito de separar possíveis casos de SCMs que atingiram SC no período estudado. Para uma caracterização mais objetiva na escolha dos casos de SCMs que atingiram a região, utilizou-se a mesma metodologia desenvolvida por Anabor (2008), anteriormente discutida na revisão bibliográfica (Seção 2.2.2.3). As imagens utilizadas para aplicação do sistema de identificação, foram obtidas pelo arquivo FTP do CPTEC/INPE, disponível no site (<http://ftp.cptec.inpe.br/goes/goes16/>). Tais dados, estão disponíveis no formato netcdf, de hora em hora. Para aplicação da metodologia utilizada para identificação dos SCMs, foi preciso converter os respectivos dados para imagens .tiff (que é a extensão que o sistema lê). Para isso, utilizou-se o GRADS. Após a obtenção das imagens, cada caso de SCM (previamente escolhidos de forma visual) foi analisado pelo rastreador, que forneceu os valores das áreas respectivas aos limiares de temperatura de -38 e -50 de hora em hora. Dessa forma, foi possível obter o horário que o sistema se formou, seu tempo de duração e se quando ele atingiu SC, o evento já era considerado um SCM. Assim, os eventos de SCMs que atingiram SC no período primavera/verão 2018/2019, foram selecionados.

### 3.2.1 Critérios de escolha e seleção dos casos

O critério de identificação dos SCMs foi o mesmo utilizado por Anabor (2008), em que os valores de temperatura de brilho -38, -45 e -50°C foram os limiares utilizados para

uma melhor representação dos sistemas. Devido o foco do trabalho ser apenas sobre os CCMs e os PECS, e a região de interesse ser apenas o estado de SC, foram adotados alguns critérios para a seleção dos casos, descritos a seguir:

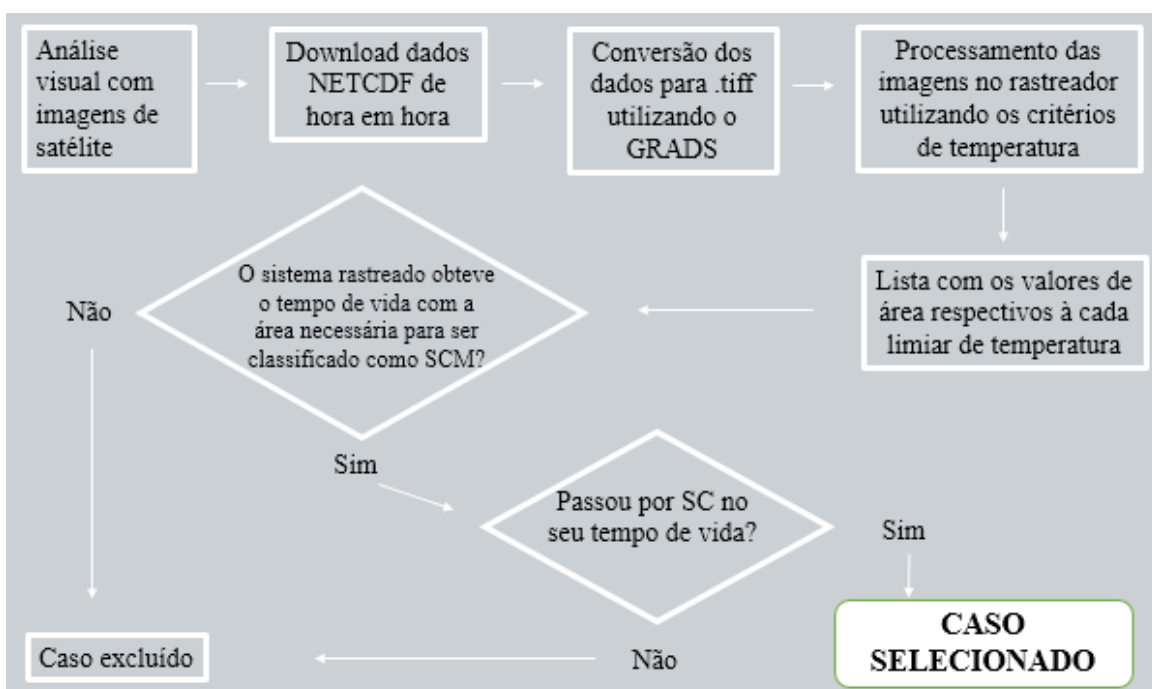
1. Possuir uma área de 100 000 km<sup>2</sup> no limiar de temperatura de -38°C, uma área de 50 000 km<sup>2</sup> no limiar de temperatura de -50°C e possuir tempo de vida de no mínimo 6 horas. O limiar de -45°C foi obtido mas não foi utilizado como um critério de escolha, pois o mesmo representa a fase de crescimento e decaimento do sistema, o que não apresenta importância para o objetivo, uma vez que o interesse é apenas descobrir se o mesmo obteve a área e a duração suficiente para obedecer os critérios.

2. Em algum momento do ciclo de vida do SCM, ele tenha atingido SC, excluindo os que influenciam apenas as regiões vizinhas.

3. Os SCMs que atingiram o estado apenas em pequenas regiões de divisa com a parte mais fraca do sistema e que não apresentaram precipitação ou rajadas de vento mais significativas, não foram considerados.

O procedimento realizado para a seleção dos casos de SCMs que atingiram SC, são resumidos no fluxograma representado na figura 13.

Figura 13: Fluxograma representando o passo a passo realizado para a seleção dos casos de SCMs que influenciaram SC.

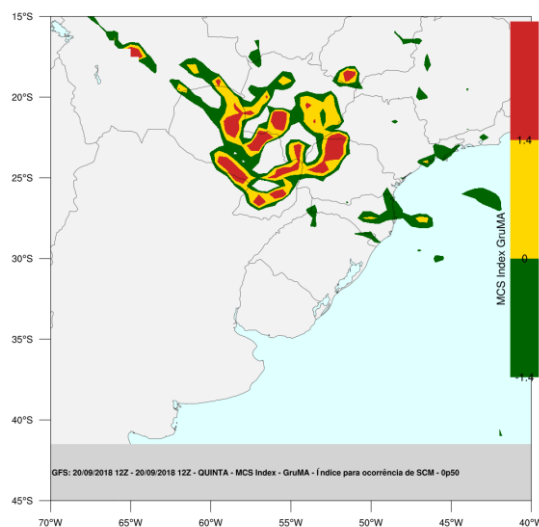


### 3.3 Cálculo do Índice

Através de um *script* desenvolvido por Rasera (2017) em NCL (*NCAR Command Language*), que é uma linguagem computacional voltada especificamente para análise de dados científicos e visualização, o índice preditivo de SCMs voltado para a AS foi calculado para todos os casos de SCMs encontrados no período de estudo, através de dados de análise do modelo GFS (Global Forecast System), com resolução de  $0,5^\circ$  pertencente ao NCEP.

A Figura 14 apresenta um exemplo do resultado do cálculo do índice, em que são mostrados três (03) limiares de cores, cada um deles fixado com o limiar de -1,4, 0 e +1,4, respectivamente. Tais limiares, são referentes ao valor ótimo (ou crítico) calculado a partir do do HSS para o SA-MCS Index, e descrito anteriormente na Tabela 2. O limiar de -1,4 (negativo) foi o valor crítico encontrado pelo autor, valor esse que diferencia SCMs de convecção não organizada. Com isso, os valores em verde, indicam um risco baixo, representando os sistemas que possuem valores abaixo da média das variáveis coletadas no período de amostragem do trabalho do autor (6 anos). A cor amarela, indica um risco médio, sendo que indica os sistemas que apresentaram os valores dentro da média estipulada. E por fim, o limiar em vermelho, indica os sistemas que têm valores acima da média calculada, ou seja, indicam as regiões mais intensas e prováveis da ocorrência de SCMs.

Figura 14 - Exemplo do cálculo do SA-MCS Index, indicando uma região intensa, de provável ocorrência de SCMs entre o Paraguai (PAR), Mato Grosso do Sul (MS) e norte do PR.



A maneira com que o índice foi estimado, bem como as variáveis que o mesmo utiliza em sua fórmula, foram descritos com maiores detalhes na revisão bibliográfica do presente estudo, mais especificamente na seção 2.2.2.4.

Para cada caso de SCMs que atingiram SC foi realizado o cálculo do índice para o horário em que o sistema começou formar e em que o mesmo já estava em seu estágio maduro. Dessa forma, é possível avaliar se o índice indicava valores de alto risco de SCMs para os casos estudados, a fim de avaliar seu desempenho para os sistemas que atingiram a área de estudo.

### **3.4 Levantamento de dados**

Através de dados das estações pluviométricas da Epagri/Ciram e do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), foi feito um levantamento de dados com os municípios que registraram os maiores acumulados de precipitação e rajadas de vento, para cada um dos casos selecionados. Além disso, através da disponibilização de dados da Defesa Civil de SC (DC/SC) foi possível verificar o caso que causou maiores registros de ocorrência (alagamentos, destelhamento, interdição de ruas, etc).

Com o auxílio de cartas sinóticas do CPTEC foi obtido também, qual o sistema sinótico atuante no período de formação do SCM, em baixos níveis.

Com todas as informações obtidas, do rastreador, do cálculo do índice, das imagens de satélite, das cartas sinóticas e dos dados de acumulados de chuva e rajadas de vento, foi possível criar um levantamento de dados de todas essas variáveis para cada SCM que influenciou SC.

### **3.5 Estudo de caso**

Com o intuito de fazer uma maior caracterização dos SCMs, foi escolhido a partir do levantamento de dados, o caso em que apresentou os maiores valores de precipitação e rajadas de vento no Estado, e que teve o maior número de danos socioeconômicos registrados pela DC/SC, para dessa forma, fazer uma avaliação do ambiente sinótico e de mesoescala do evento, e obter as principais características atmosféricas associadas a formação, desenvolvimento e dissipação do sistema.

Primeiramente, com o auxílio de notícias e reportagens divulgadas por jornais e revistas, e um levantamento de danos gerados pela passagem do sistema e

disponibilizados pela DC/SC, foi feita uma caracterização do evento.

Feito isso, através de dados de reanálise do GFS (Global Forecast System) de 0,5° de resolução, pertencente a National Centers for Environmental Prediction (NCEP), de 6 em 6 horas, e através de um script desenvolvido na plataforma GRADS (Grid Analysis and Display System), tais campos foram gerados para a realização de uma análise sinótica e de mesoescala: Linhas de Corrente e magnitude do vento em 200 hPa, divergência em 200 hPa; Vento, vorticidade e altura geopotencial em 500 hPa; Vento, magnitude do vento e altura geopotencial em 850 hPa, Pressão ao nível do mar e espessura em superfície; Água precipitável. Dessa forma, as principais características atmosféricas do sistema podem ser estudadas, podendo assim, entender os processos que foram determinantes para a geração e manutenção do sistema.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Análise dos casos

A partir do rastreador semi-automático desenvolvido por Anabor (2008), foram selecionados nove (09) casos de Sistemas Convectivos de Mesoescala (CCMs e PECS) no estado de Santa Catarina, no período que engloba a primavera de 2018 e o verão de 2019.

A Tabela 3 mostra a relação dos casos selecionados para estudo, que inclui a data de ocorrência, os horários em que o sistema entrou nos critérios para ser considerado um SCM e quando o sistema começou e deixou de influenciar SC. Posteriormente, a partir do levantamento de dados realizado e do cálculo do SA-MCS Index, foi gerado uma tabela, apresentada no ANEXO 1 que contém os 5 municípios com maiores acumulados de precipitação (acima de 5 mm) e rajadas de vento (acima de 50 km/h) nos respectivos dias em que o sistema influenciou a região. Além disso, contém informações sobre a estimativa do cálculo do índice preditivo de SCMs para o horário de formação e para o qual o sistema já estava em seu estágio maduro, e por fim, o sistema que atuou em baixos níveis em cada caso juntamente com a região em que o sistema começou se formar. Os valores do acumulado de chuva, foram somados apenas no período e na região em que o sistema influenciou o estado, pois alguns sistemas vinham acompanhados de outros eventos que atuavam em uma região próxima e que não faziam parte do SCM.

É possível observar na Tabela 3 que grande parte dos sistemas selecionados se formaram durante a noite e madrugada e, após isso, deslocaram-se para o Estado. Decorrente desse horário de formação, a maioria dos sistemas atingiu SC no fim da madrugada e início da manhã.

Apesar de alguns sistemas terem atingido apenas uma região de SC (na maioria dos casos o oeste) com sua parte convectiva, os sistemas trouxeram bastante nebulosidade para o restante do Estado, o que muitas vezes causou acumulados de chuva em municípios que não estavam sendo afetados diretamente pelo sistema, mas de qualquer forma, tal nebulosidade era gerada pelo SCM, então tais valores de precipitação foram considerados. Os eventos que mais geraram precipitação, foram os casos 03, 05 e 06, em que acumularam em vários municípios, mais que 60 mm em um dia.

Analisando os valores de rajadas de vento, percebe-se que a passagem dos SCMs pelo estado causaram rajadas intensas de vento em muitas regiões. É preciso levar em consideração, que

mesmo que o sistema não esteja atuando exatamente na região em que a rajada tenha sido registrada, a região de influência do SCM possui baixa pressão, que em comparação a regiões próximas, causa um gradiente de pressão, resultando nas fortes rajadas.

Tabela 3. Relação dos casos de SCMs selecionados no período primavera/verão (2018/2019), juntamente com os horários em que os sistemas atingiram o critério para serem considerados SCMs, começaram e deixaram de influenciar SC.

<b>CASO</b>	<b>TORNOU-SE SCM</b>	<b>ATINGIU SC</b>	<b>DEIXOU DE INFLUENCIAR SC</b>
<b>CASO 1:</b> 13-14/09/2018	04 UTC 13/09	09 UTC 13/09	13 UTC 14/09
<b>CASO 2:</b> 19-20/09/2018	17 UTC 19/09	13 UTC 19/09	20 UTC 20/09
<b>CASO 3:</b> 16-17-18/10/2018	14 UTC 17/10	13 UTC 17/10	13 UTC 19/10
<b>CASO 4:</b> 23/10/2018	02 UTC 23/10	08 UTC 20/10	23 UTC 20/10
<b>CASO 5:</b> 31/10 - 01/11	02 UTC 31/10	00 UTC 31/10	20 UTC 01/11
<b>CASO 6:</b> 23-24/01/2019	08 UTC 23/01	19 UTC 23/01	09 UTC 24/01
<b>CASO 7:</b> 09-10/02/2019	20 UTC 09/02	00 UTC 10/02	15 UTC 10/02
<b>CASO 8:</b> 20/03/2019	04 UTC 20/03	08 UTC 20/03	20 UTC 20/03
<b>CASO 9:</b> 31/03/2019	01 UTC 31/03	08 UTC 31/03	23 UTC 31/03

Destaque para o caso 03 e para o caso 05 (esse posteriormente estudado com maiores detalhes) em que foram os casos que registraram as maiores rajadas (87 km/h em Tangará e Água Doce no caso 03, e 105 km/h em Água Doce e 99 km/h em São Miguel do Oeste no caso 05).

O SA-MCS Index foi calculado para os 09 casos com a intenção de identificar a capacidade do índice em estimar o risco de SCMs daqueles que se formaram e atingiram o estado catarinense. O mesmo foi analisado nos horários em que os sistemas começaram se formar e no seu estágio maduro. Como o índice foi calculado a cada seis horas, não foi possível representar o momento exato do início das tempestades, a origem do sistema, bem como seu estágio maduro. No entanto, as tempestades inicialmente isoladas que se formaram, não se deslocavam muito, o que permitiu avaliar o índice nas regiões de formação para os horários mais próximos ao momento em que as mesmas surgiram.

O índice foi avaliado de forma comparativa, em que foi observado a área das tempestades formadas e analisado se o índice apontava uma região de baixo, médio ou alto risco de ocorrência de SCMs. Nota-se que na fase de formação, a maioria dos sistemas apresentavam risco amarelo, ou seja, eram tempestades que indicavam as características



médias encontradas por (Rasera, 2017) e, apesar do sistema ainda não estar desenvolvido, já continha os ingredientes necessários para a formação do mesmo. No estágio em que o sistema já estava formado, o índice apresentou um desempenho satisfatório, indicando as regiões em que o sistema se encontrava com risco vermelho, indicando que tais áreas apresentavam um potencial alto de ocorrência de SCMs. Ressalta-se que a análise das imagens de satélite realizadas no canal infravermelho apresentou compatibilidade com o índice avaliado.

Através das cartas sinóticas do CPTEC, foi analisado para o horário de formação do sistema, qual o sistema que influenciava a região. Na última coluna da tabela do ANEXO 1, observa-se que a presença de uma baixa pressão localizada nas proximidades do norte da ARG esteve presente em praticamente todos os casos. Esse resultado corrobora o encontrado por Anabor (2008) e Rasera (2010). Além disso, a presença de um cavado entre as regiões do centro do RS e norte da ARG, foram observados no caso 3 e 5, eventos esses que causaram altos acumulados de precipitação e fortes rajadas de vento em SC.

## **4.2 Estudo de caso**

### **4.2.1 Caracterização do evento**

No dia 31 de outubro de 2018, a DC/SC recebeu diversas chamadas para atendimento de casos relacionados a chuvas intensas e fortes rajadas de vento. Um SCM se desenvolveu durante a noite e atingiu o estado catarinense na madrugada, inicialmente, pela região do Extremo Oeste, influenciando o restante do estado no decorrer do dia. Segundo dados disponibilizados pela DC/SC, o evento gerou danos em 15 municípios de SC, sendo eles: Xaxim, Passos Maia, São Lourenço do Oeste, Ponte Serrada, Ipuçu, Chapecó, Itapiranga, Belmonte, São Miguel do Oeste, São Domingos, Abelardo Luz, Ipumirim, Catanduvas, Vargeão e Seara. Ao todo, foram registradas 264 residências com danos materiais e, além disso, 23 estruturas rurais foram prejudicadas.

O município de Xaxim, um dos que mais sofreu danos (205 das 264 residências danificadas), foi atingido por um vendaval acompanhado de granizo por volta das 6h da manhã. Associado a tempestade, foi registrado 42 mm de precipitação, acumulada em menos de uma hora no município. Conforme a Coordenadora Municipal da Defesa Civil, Eliane de Marco:

*“Desde cedo, já atendemos mais de 100 famílias que necessitaram de lonas para cobrir os móveis. Nossa orientação é para que as pessoas não subam nas casas, devido ao risco de*

*queda neste momento em que a chuva persiste. Este é a quarta ocorrência de dano causado pela chuva em nosso município em menos de um mês e estamos, junto com a Assistência Social, Infraestrutura e Serviços Urbanos ofertando resposta aos municípios afetados”.*

Segundo a Celesc, pelo menos 79 mil unidades consumidoras ficaram sem energia elétrica no início do dia, sendo que as ocorrências mais graves foram registradas em Faxinal dos Guedes, Arabutã, Ipumirim, São Miguel do Oeste, Chapecó, Treze Tílias e Herval do Oeste.

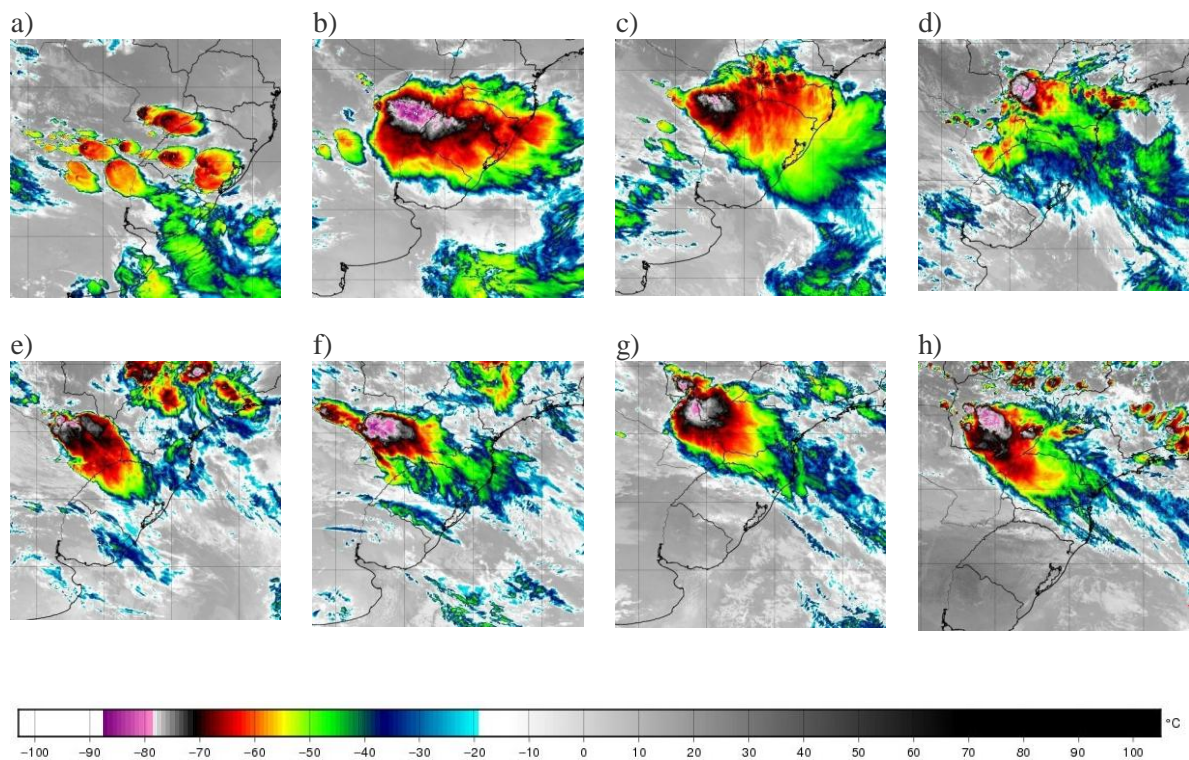
Além de todo o prejuízo nas residências, os temporais associados ainda causaram diversos transtornos em rodovias do estado, devido a quedas de árvores e desmoronamento de barreiras. As rodovias entre Seara e Itá, entre Iporã do Oeste e Itapiranga e entre Iporã do Oeste e Mondaí (SC-155, SC-163 e SC-386, respectivamente) foram parcialmente interditadas por quedas de árvores. Também foi registrado queda de árvores na SC-459, entre Xaxim e Lajeado Grande, e em São João do Oeste, cinco árvores caíram na SC-163.

Na figura 15, as imagens de satélite no canal do infravermelho mostram a temperatura de topo das nuvens. Uma temperatura muito fria (cores mais quentes na escala), indica nuvens que possuem um desenvolvimento vertical grande, chegando a altas altitudes, fazendo com que a temperatura atinja valores bem negativos. Devido tais nuvens possuírem grande desenvolvimento vertical, podem ser ditas nuvens convectivas, e portanto, associadas a tempo severo. Nota-se que áreas de convecção isolada começaram a se desenvolver no nordeste da ARG às 00 UTC do dia 31. Em 6 horas, um grande sistema se desenvolveu, com a parte mais convectiva ainda sobre a ARG mas influenciando praticamente todo estado do RS e SC com a parte mais fraca do sistema (que mesmo assim é considerado uma área convectiva). Às 12 UTC (15c), horário respectivo às 9h da manhã (horário local), o sistema já havia avançado e atingido todo estado de SC. Nas 6 horas seguintes, entrou em fase de dissipação. Porém, as 18 UTC ainda do dia 31 (15d), novas tempestades isoladas começaram se formar no nordeste da ARG, e nos horários seguintes, se desenvolveram, dando origem a um segundo SCM mais ao norte (15e, 15f, 15g). Por fim, o sistema se deslocou e deixou de influenciar o estado catarinense.

Analisando as cartas sinóticas do CPTEC/INPE (Figura 16), notamos a presença de um cavado no RS e nordeste da ARG, com núcleo mais ao norte da ARG, às 00 UTC de 31/10 (16a - horário em que as primeiras tempestades estavam desenvolvendo). Um sistema frontal no oceano Atlântico também já estava formado, mas ainda não influenciava diretamente a região sul do Brasil. No horário que o primeiro sistema estava em seu estágio maduro, um novo sistema frontal se forma na costa leste da AS, com seu ramo frio (frente

fria), influenciando o URU e o nordeste da ARG. Na formação do segundo sistema, a região em que formou as tempestades, estava sobre uma área de baixa pressão, que devido o avançar da frente fria, desenvolveu o segundo sistema, mais ao norte, influenciando principalmente a ARG, PR e MS, mas também, SC. Os dois sistemas trouxeram altos acumulados de chuva e vento para o Estado, que foram os responsáveis pelos diversos estragos citados anteriormente. A figura 17 apresenta os principais acumulados e os valores das rajadas de vento do dia 31/10 e 01/11.

Figura 15 - Imagens do canal infravermelho do satélite GOES -16 às: a) 00 UTC 31/10, b) 06 UTC 31/10, c) 12 UTC 31/10, d) 18 UTC 31/10, e) 00 UTC 01/11, d) 06 UTC 01/11, e) 12 UTC 01/11, f) 18 UTC 01/11.



Fonte: CPTEC

O segundo sistema influenciou SC de forma menos intensa que o primeiro, mas de qualquer forma, como o primeiro sistema acumulou bastante precipitação, qualquer valor a mais, somado ao do dia anterior, também é significativo. A figura 18 mostra alguns registros divulgados pela DC/SC e PRF, dos estragos causados pela passagem do sistema.

Figura 16 - Cartas sinóticas do CPTEC/INPE às: a) 00 UTC 31/10, b) 06 UTC 31/10, c) 18 UTC 31/10, d) 12 UTC 01/11

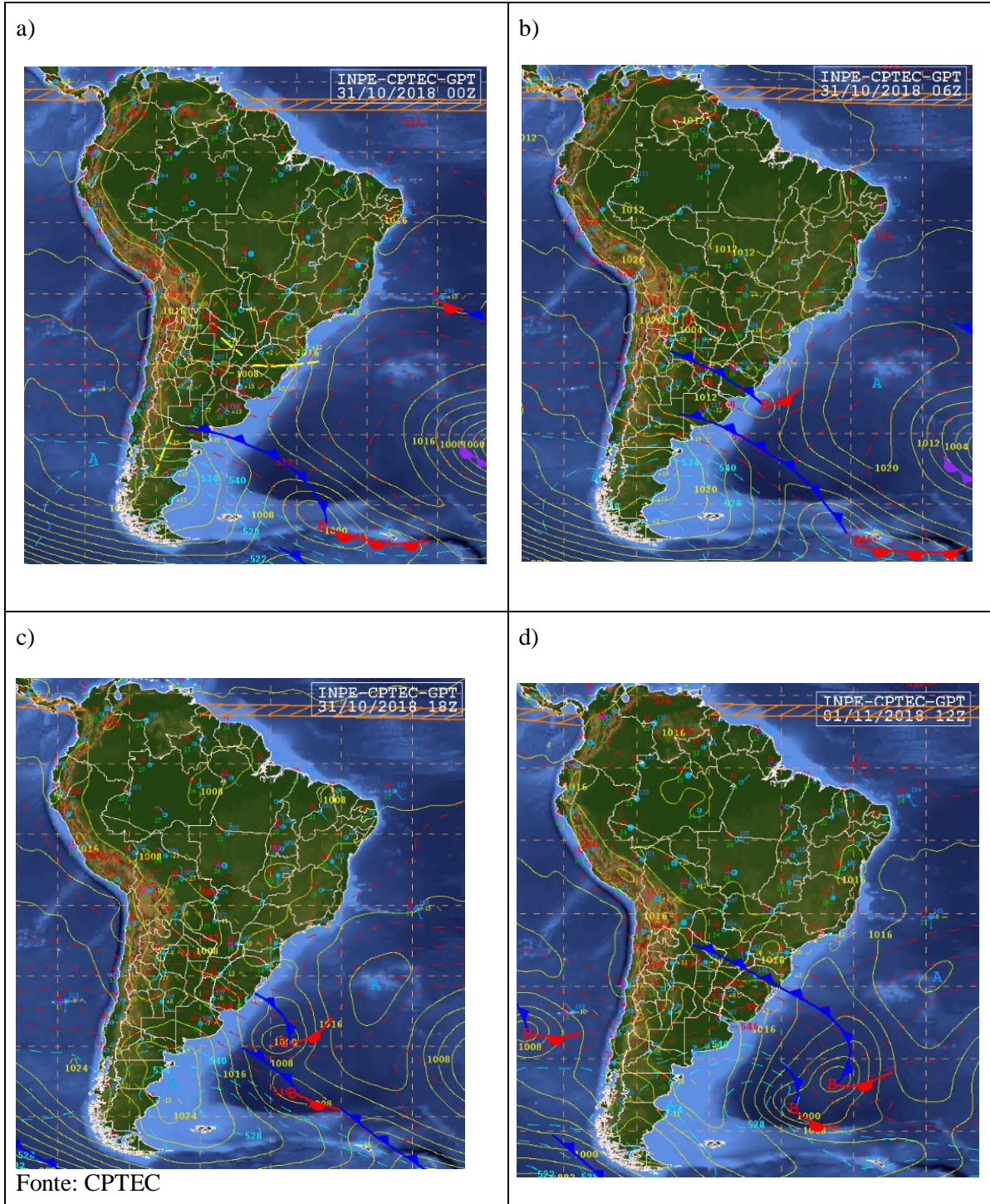
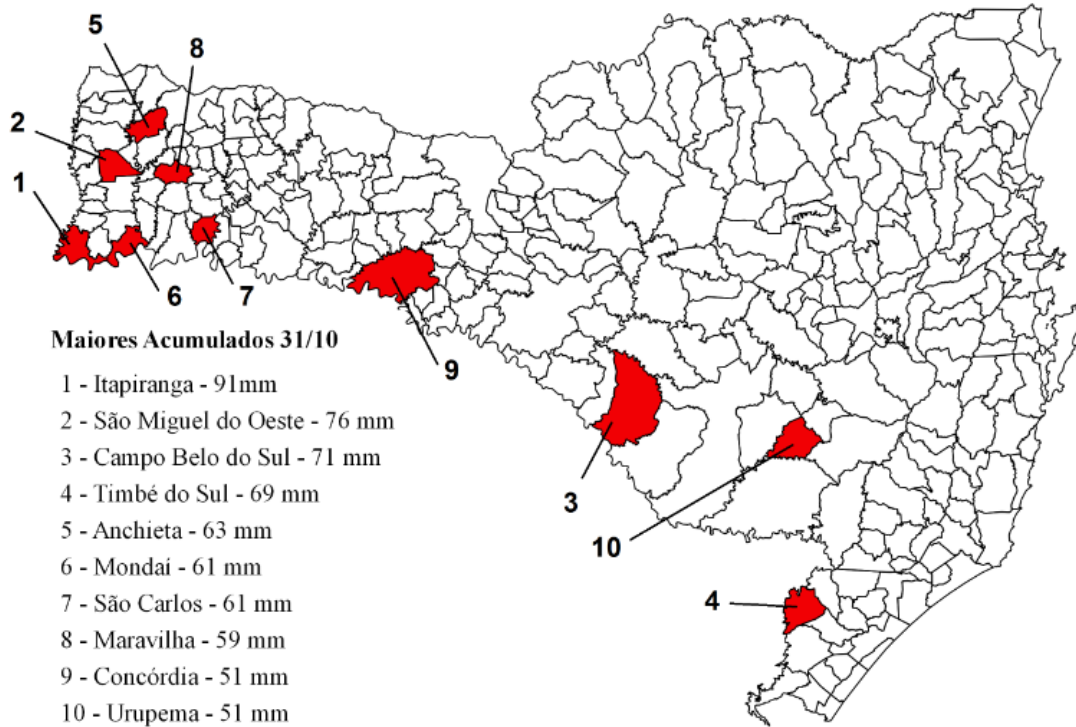
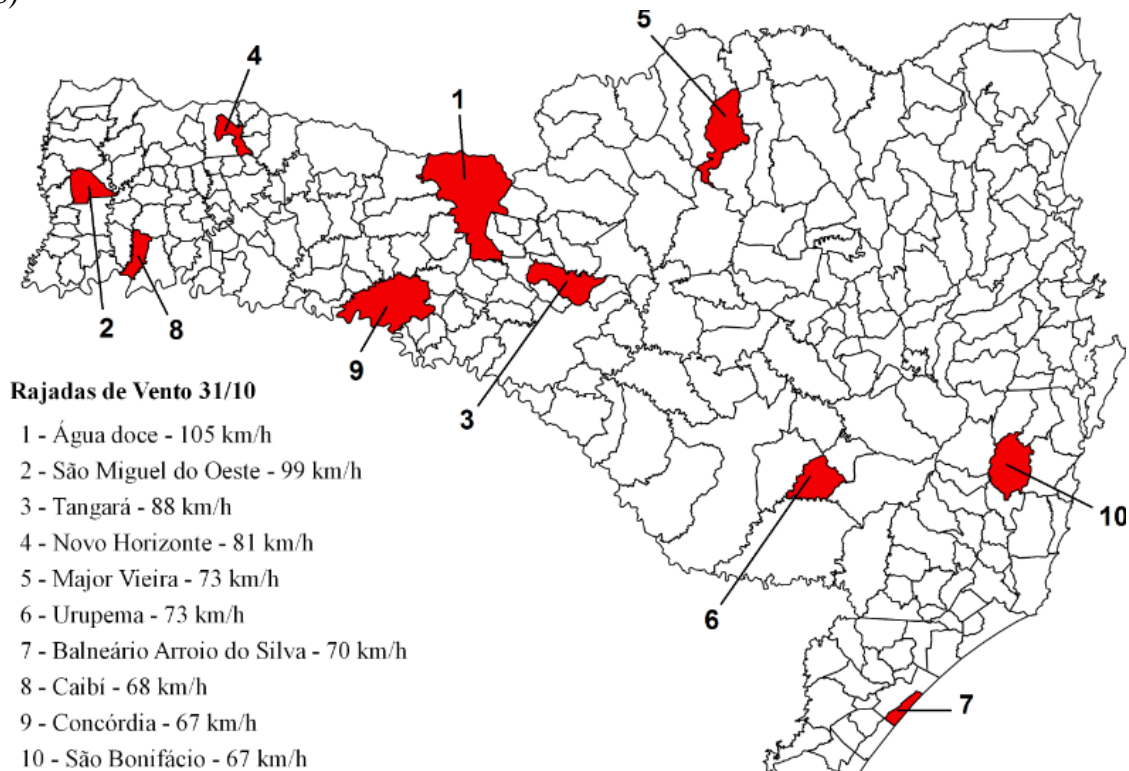


Figura 17 - Registros mais significativos de acumulado de precipitação em 31/10 e 01/11 (a e c, respectivamente; e de rajadas de vento em 31/10 e 11/01 (b e d, respectivamente).

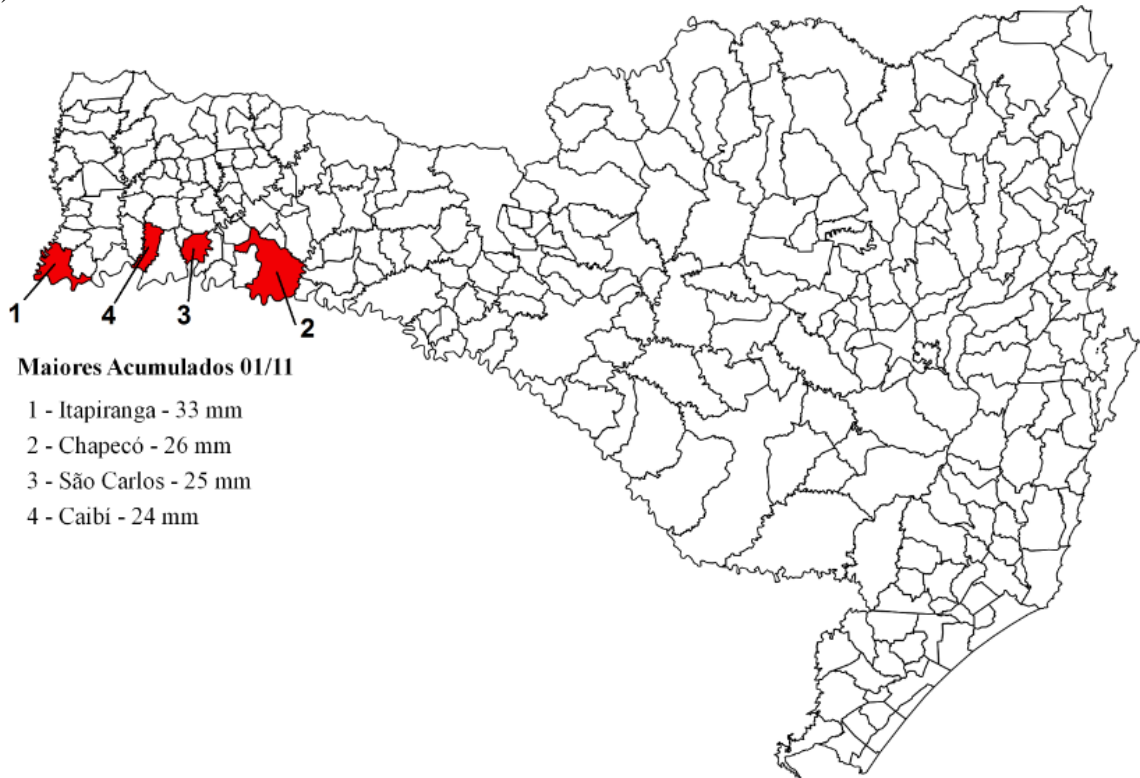
a)



b)



c)



d)

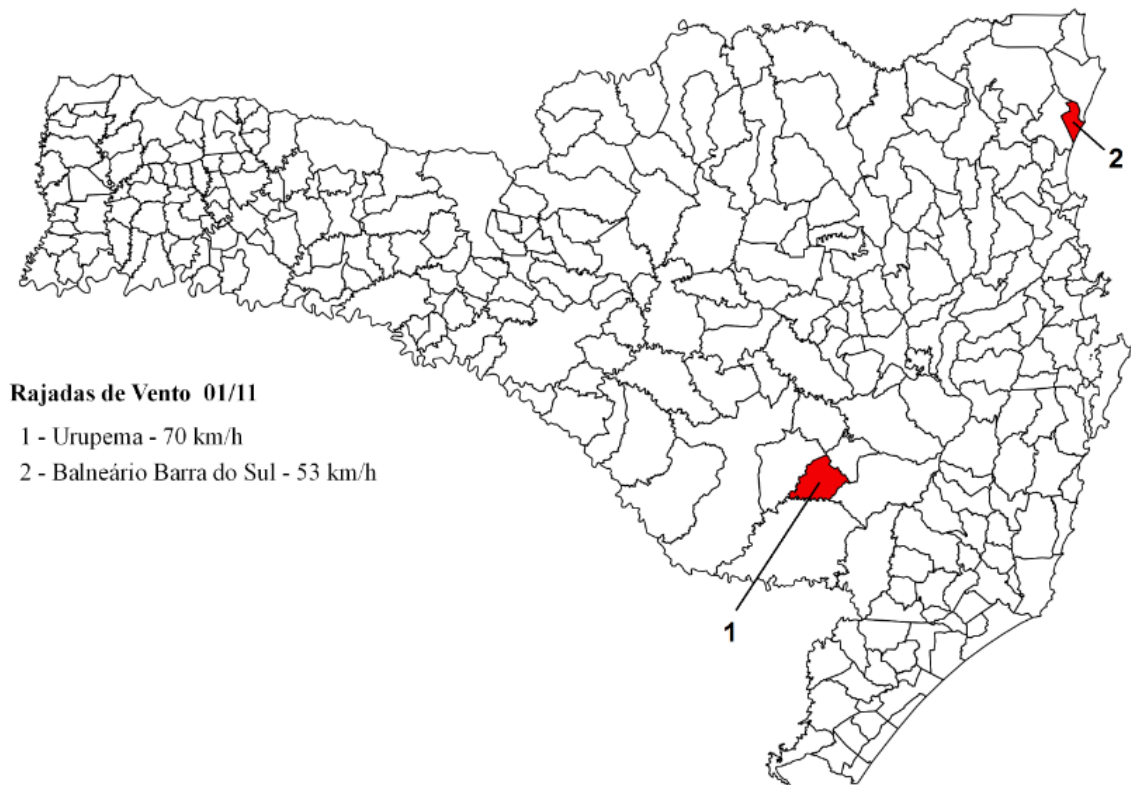


Figura 18 - Registros de danos em residências e rodovias, divulgados pela DC/SC e PRF.



Casa destelhada em Xaxim  
Foto: Defesa Civil/ Divulgação



Casa prejudicada em Ponte Serrada  
Foto: Defesa Civil/Divulgação



Queda de Barreira na BR-282 em Rancho Queimado.  
Foto: PRF/Divulgação

#### 4.2.2 Análise Sinótica

Analisando as imagens de satélite, as primeiras tempestades responsáveis pela geração do SCM, surgiram as 21 UTC do dia 30/10 (figura não mostrada), na região entre o nordeste da ARG e o sul do Paraguai (PAR). Como mostrado na figura 19a, às 00 UTC do dia 31/10, as primeiras células já estavam mais desenvolvidas e em fase de crescimento sobre o estado do Rio Grande do Sul (RS) e próximo a divisa com Santa Catarina. Visando contribuir com a análise de formação dos SCMs, foi calculado o SA-MCS Index, para avaliar seu desempenho na estimativa de tais sistemas nos seus estágios de vida (Figura 19b). Comparando-o com a imagem de satélite, nota-se que o índice se adequa bem a posição das tempestades. Na região de formação (nordeste da ARG), o índice coloca um risco amarelo

com pontual região de risco vermelho, que indica um alto risco de presença de SCM. A região em que o risco é maior, é no sul do RS, que corrobora com a convecção presente, indicando que tais tempestades, possuem os critérios necessários para que se desenvolvam como um SCM.

Através da análise do modelo GFS, percebe-se, para o mesmo horário, que no campo de linhas de corrente em 200 hPa (Figura 19c) o Jato Subtropical (JS) presente, com magnitude entre 50 e 60 m/s, na região em que as primeiras tempestades surgiram, o que corrobora com os dados de divergência em altos níveis (Figura 19d). Nesta figura, é possível observar a região sul do Paraguai como sendo a região de divergência mais intensa, seguida do leste da ARG e RS. Em 500 hPa (Figura 19e) é possível observar o escoamento preferencialmente de oeste e núcleos de vorticidade negativa exatamente na região em que surgiram as primeiras tempestades. A vorticidade negativa mais intensa no sul do Uruguai (URU) está associada com a convecção que havia em tal região nessa hora. O campo de vorticidade em 500 hPa, mostra áreas de vorticidade negativa na região de formação, que associado à um escoamento do vento é associado à geração de vorticidade ciclônica em baixos níveis, que indica uma forte área de convergência de baixos níveis, sendo inversamente proporcional ao valor da vorticidade, ou seja, quanto mais advecção de vorticidade negativa (mais negativo), maior a convergência em baixos níveis. Também é possível notar pelas linhas de geopotencial, que havia a presença de cavados de onda curta (bem visível no sul do RS), que também são causadores de convergência em baixos níveis.

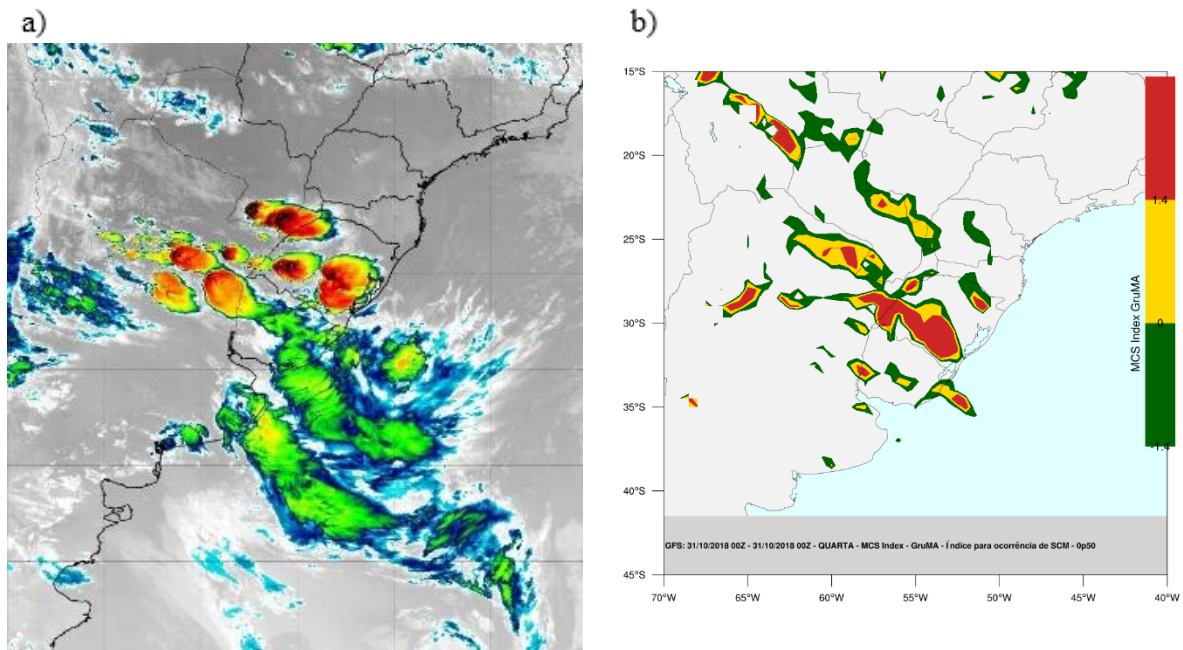
Outro campo de extrema importância para análise e formação de SCMs, é o campo de direção e magnitude do vento em 850 hPa (Figura 19f). Como já é bem descrito na literatura e também citado na revisão bibliográfica deste trabalho, o JBN tem um papel determinante na formação e manutenção dos SCMs, pelo fato de transportar calor de regiões mais ao norte, e assim, “alimentar” o sistema. Analisando a figura 19f, nota-se um escoamento vindo de norte muito bem caracterizado com intensidade de ~15m/s, que provavelmente atuou como papel determinante para o crescimento do sistema posteriormente. O escoamento de norte, também pode ser visto pelas linhas de geopotencial, levando em consideração que o vento sopra na direção paralela às linhas de mesma pressão. Com o intuito de analisar se havia presença de algum sistema meteorológico já atuante no horário de formação das primeiras células, foi gerado o campo de pressão ao nível do mar (PNM) e espessura (Fig. 19g). Nesta figura é possível observar a presença de um cavado no nordeste da ARG até o centro do RS, alinhado entre o norte da ARG e oeste do PAR. Também

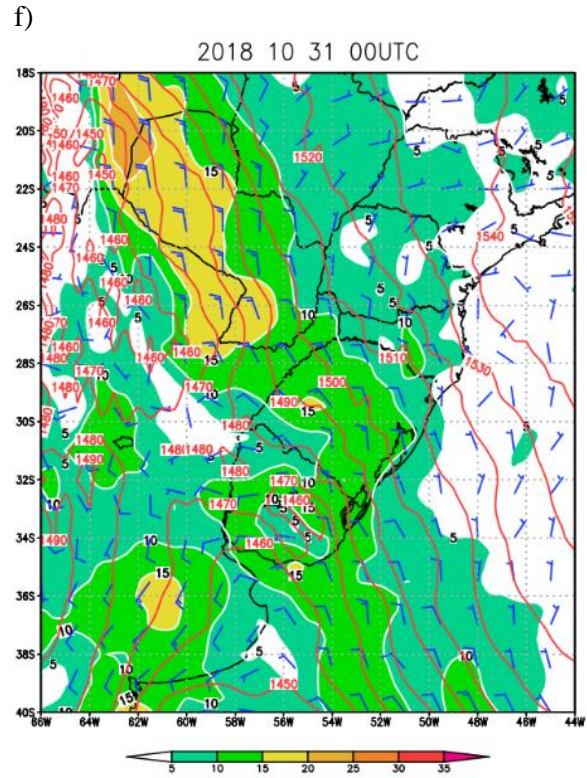
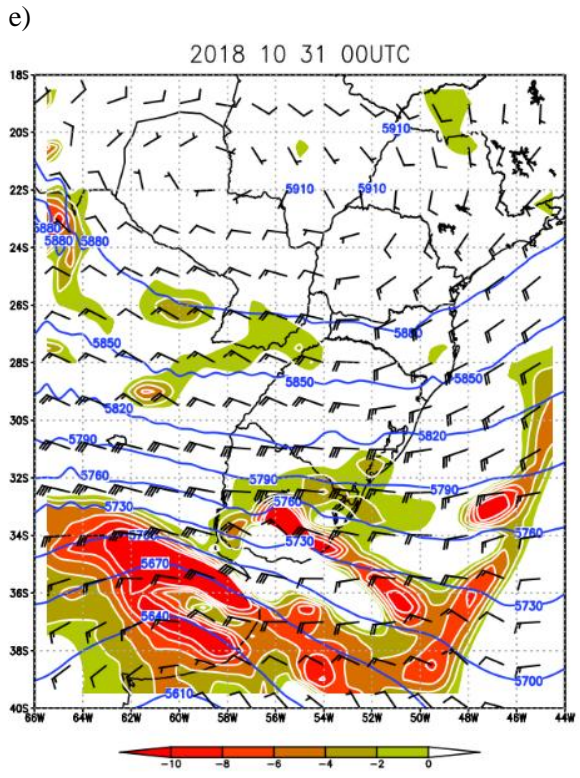
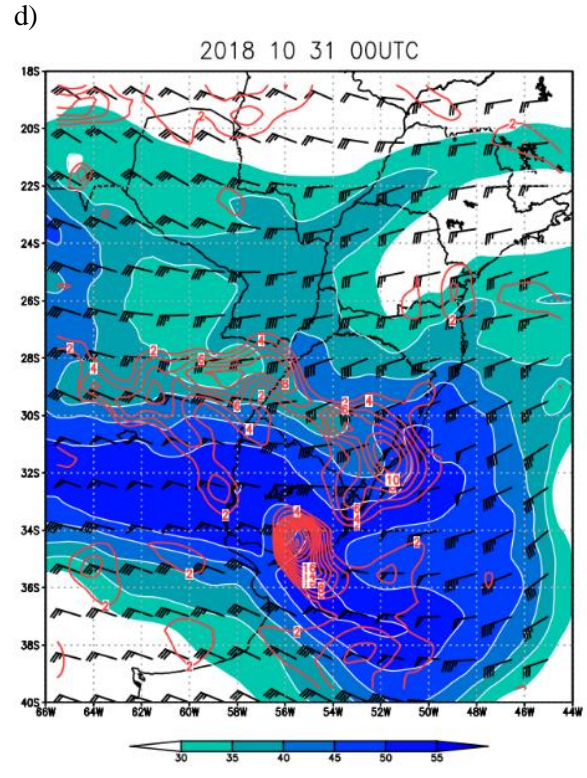
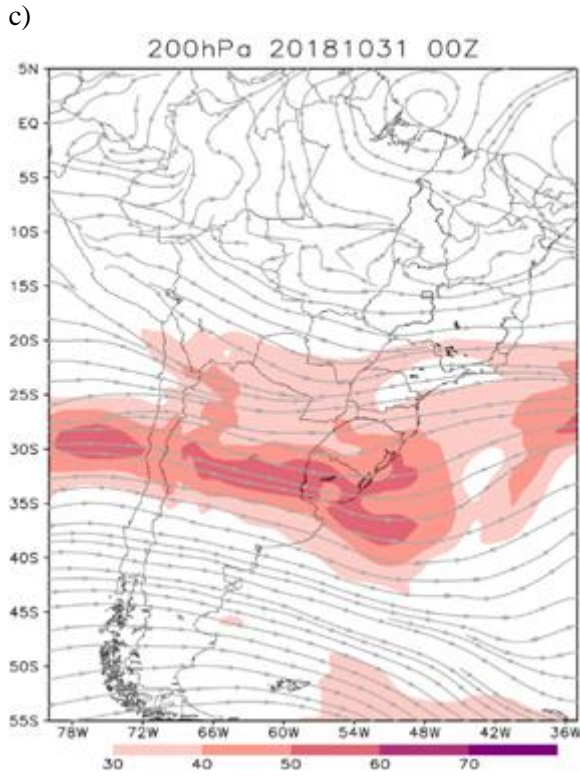


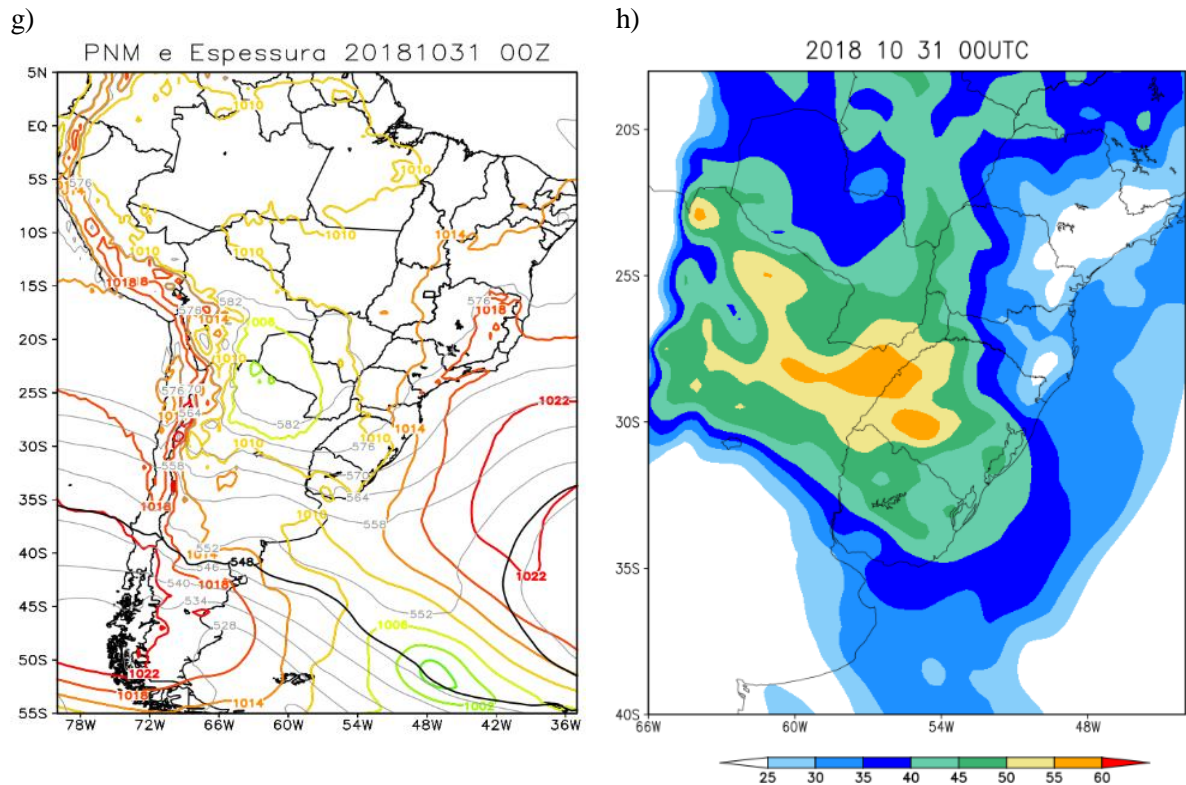
nota-se a presença de um ciclone no oceano Atlântico, com o ramo da frente fria ao sul da AS. Por ele estar muito distante, o ciclone, bem como a frente associada, não exerceram influência na geração das primeiras tempestades.

O campo de água precipitável (Fig. 19h), por sua vez, mostra a quantidade de água presente na atmosfera disponível para precipitar. Percebe-se que a região de formação das tempestades, apresentava um alto valor de água precipitável, entre 50 e 60 kg/m<sup>2</sup>.

Figura 19: 00 UTC 31/10/2018 - a) Imagem de satélite no canal infravermelho; b) SA-MCS Index; c) Linhas de corrente e magnitude do vento em 200 hPa; d) Vento e divergência em 200 hPa; e) Vento, vorticidade e altura geopotencial em 500 hPa; f) Magnitude e direção do vento e altura geopotencial em 850 hPa; g) PNM e espessura em superfície; h) Água precipitável.







Num período de 6h, às tempestades que inicialmente estavam entre o RS e a ARG se agruparam e desenvolveram o SCM até sua fase madura, com uma característica bem linear, como mostrado na figura 20a. Às 06 UTC do dia 31/10, o sistema atua principalmente sobre o RS e a ARG, onde apresenta o núcleo mais intenso (de menor temperatura), e atinge todo estado catarinense com sua parte menos intensa, exceto nas regiões de divisa com RS e com a ARG, onde apresenta valores de temperatura de brilho bem menores. No decorrer da madrugada e manhã, o sistema avança para SC (imagens não mostradas), onde foi o responsável pelas ocorrências registradas pela DC/SC no dia 31/10, citadas na seção anterior. O SA-MCS Index (Figura 20b), coloca de forma adequada um risco alto de SCMs para a região entre a ARG, RS e a divisa com SC, que comparando com a imagem de satélite, é visível a boa coerência da informação.

Nos campos sinóticos, ao analisar as linhas de corrente em 200 hPa, nota-se que o jato atua com maior magnitude sobre o Uruguai, porém já é visível uma extensa área de divergência exatamente na região em que o sistema se encontra (Figura 20c). Isso é possível concluir, pelo fato de que uma difluência nas linhas de corrente, acompanhadas de uma diminuição na velocidade do jato, implica numa área de divergência. Tal informação é confirmada pelo cálculo do campo de divergência em altos níveis, que aponta a mesma região

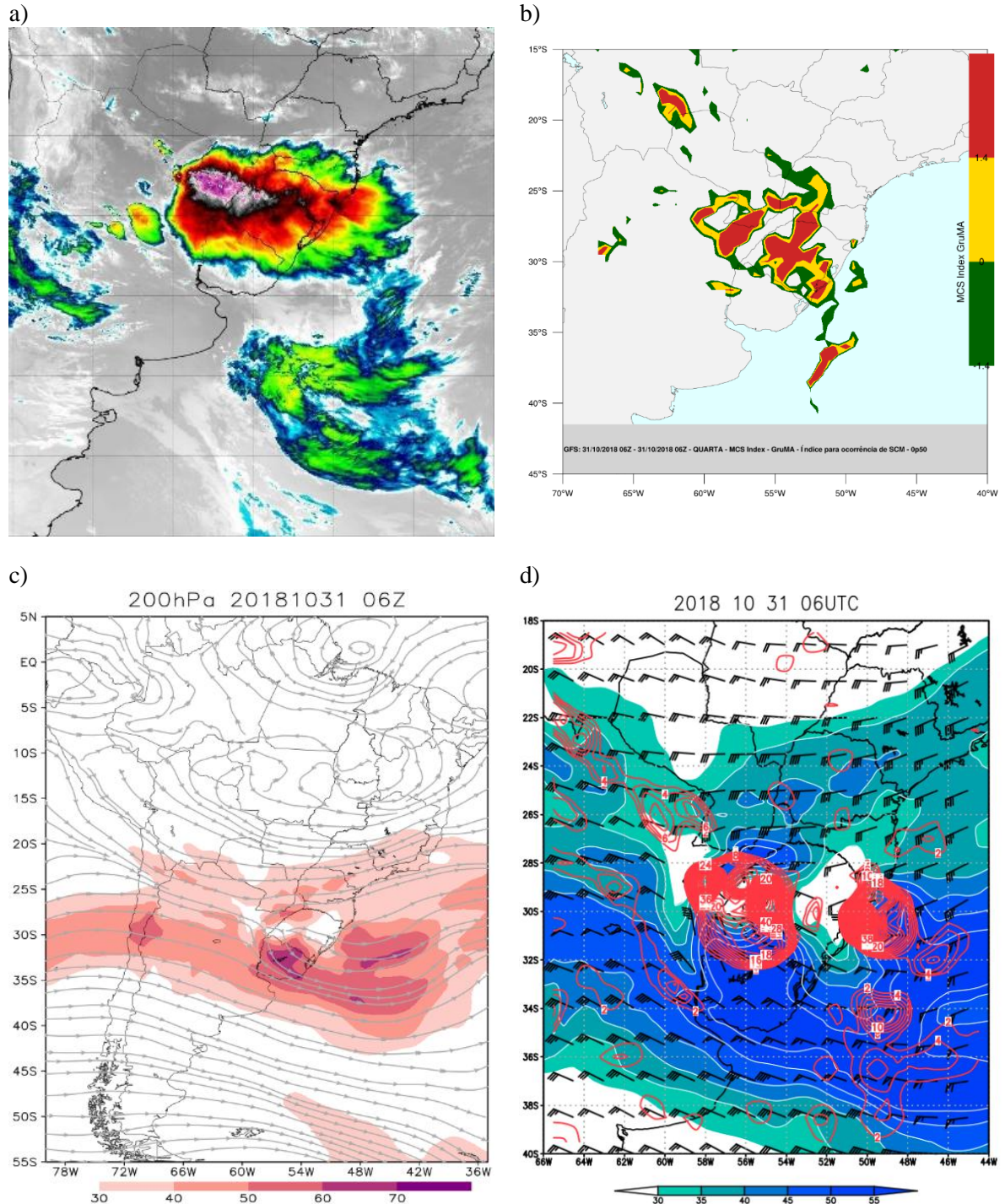
com forte divergência (Figura 20d). Na Figura 20e, em 500 hPa, as linhas de altura geopotencial apresentam diversos cavados de onda curta, em praticamente todo estado do RS, que resultam em núcleos de vorticidade negativa na região, induzindo circulação ciclônica em baixos níveis e portanto, convergência.

Comparando o campo de 850 hPa no período de formação (Figura 19f) com o estágio maduro do sistema (Figura 20f), percebem-se mudanças substanciais, que provavelmente foram determinantes para a manutenção do sistema. O escoamento de norte, apresenta maior magnitude, chegando a ~30 m/s, transportando uma massa quente úmida na direção do sistema. Além disso, as linhas de altura geopotencial exibem uma característica mais circular, o que indica uma região com baixa pressão e intensa convergência de massa.

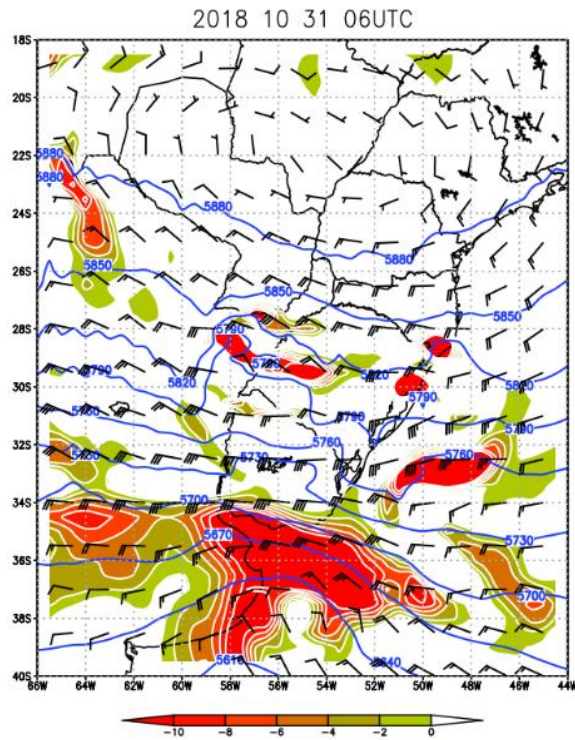
Em superfície, é observado que toda a região em que o sistema se encontra, está sobre a influência de uma baixa pressão bem alongada (linhas mais claras, Figura 20g). O núcleo de baixa pressão ainda se faz presente no norte da ARG, e há formação de um segundo núcleo de baixa pressão, em que apresenta um ramo frio (frente fria) sobre o URU e o leste da ARG, que atua como forçante mecânica para um maior levantamento em baixos níveis.

É também observado uma elevação na quantidade de água precipitável na camada, em comparação com o horário em que ainda só haviam as primeiras tempestades. Altos valores, de aproximadamente 60 kg/m<sup>2</sup> são mostrados na figura 20h em toda parte nordeste na ARG e RS, que confirma o sistema como um evento com um provável potencial de altos acumulados de chuva.

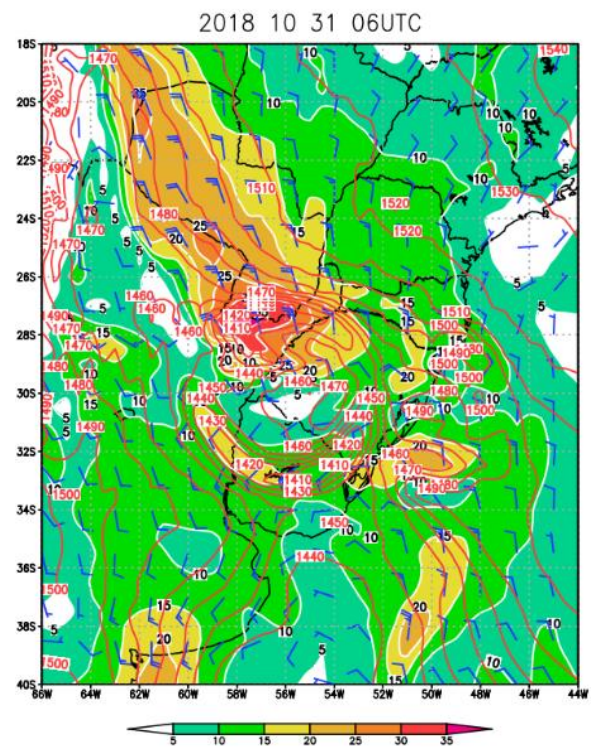
Figura 20: 06 UTC 31/10/2018 - a) Imagem de satélite no canal infravermelho; b) SA-MCS Index; c) Linhas de corrente e magnitude do vento em 200 hPa; d) Vento e divergência em 200 hPa; e) Vento, vorticidade e altura geopotencial em 500 hPa; f) Magnitude e direção do vento e altura geopotencial em 850 hPa; g) PNM e espessura em superfície; h) Água precipitável.



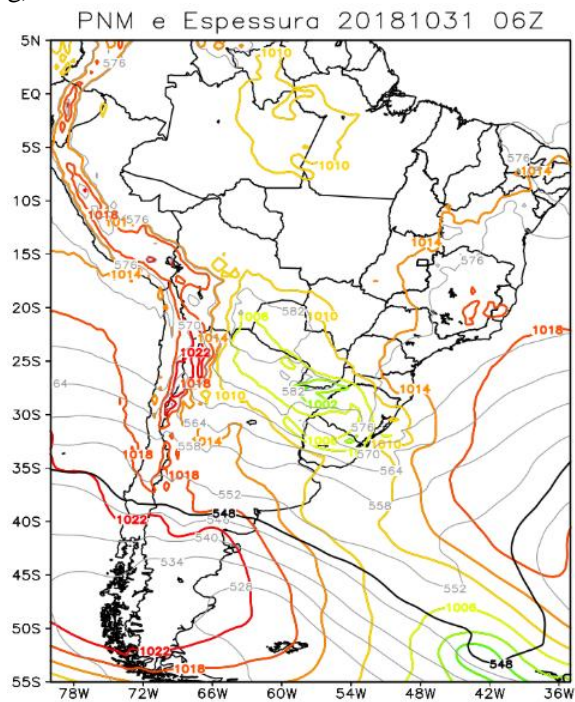
e)



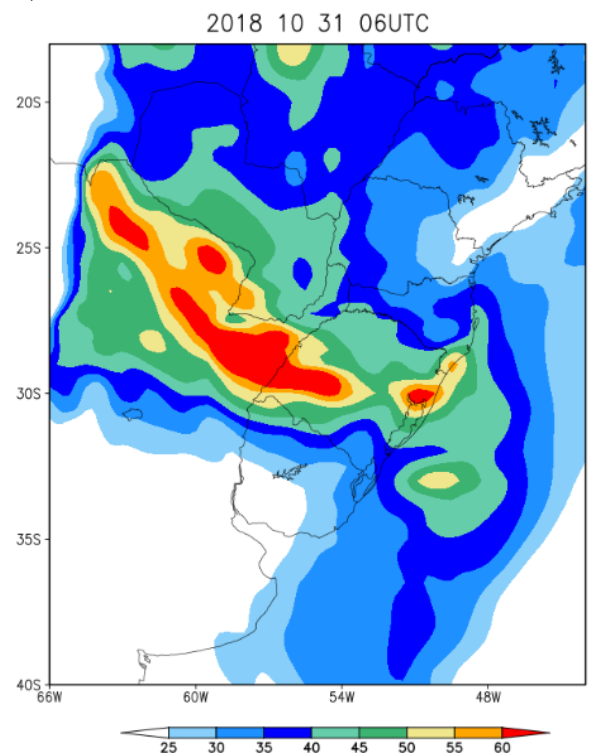
f)



g)



h)



Às 18 UTC do dia 31/10, o sistema já estava em sua fase de dissipação como mostra a imagem de satélite (Figura 21a), com várias tempestades desorganizadas embebidas no mesmo ambiente convectivo, e com o núcleo mais intenso a oeste do PR e sul do MS.

O sistema ainda atua sobre o estado catarinense, mas de forma menos intensa. O detalhe que deve-se atentar nesse horário, é a formação de novas células convectivas entre o nordeste da ARG e o sul do PAR, que posteriormente irão se desenvolver e formar um novo SCM. O SA-MCS Index, já coloca valores bem mal distribuídos para as regiões, superestimando para algumas regiões, mas aponta de maneira correta o maior risco à região de maior intensidade do sistema, o Paraná. Além disso, indica com risco médio/alto a região do nordeste da ARG e sul do PAR, região de formação das novas células que darão origem a um segundo sistema.

Neste instante de dissipação do sistema anterior, e formação de um novo SCM, observa-se que o núcleo mais intenso do jato em 200 hPa, encontra-se mais deslocado em direção ao oceano do que em comparação ao estágio maduro do sistema. Porém, apesar de tal deslocamento, a característica anteriormente encontrada neste campo de linhas de corrente, também se concretizou neste horário, apontando uma difluência nas linhas de corrente, acompanhada de diminuição na magnitude do jato (Figura 21c), que indica divergência em altos níveis para a região principalmente de divisa entre o RS e SC. Para analisar com maiores detalhes a região, o campo de divergência em 200 hPa (Figura 21d) mostra como já esperado, uma região de forte divergência entre o nordeste da ARG e a região de divisa entre RS e SC. O campo indica também, bastante divergência no oeste do PR e sul do MS, mesma região em que o núcleo mais intenso do SCM em dissipação se encontra.

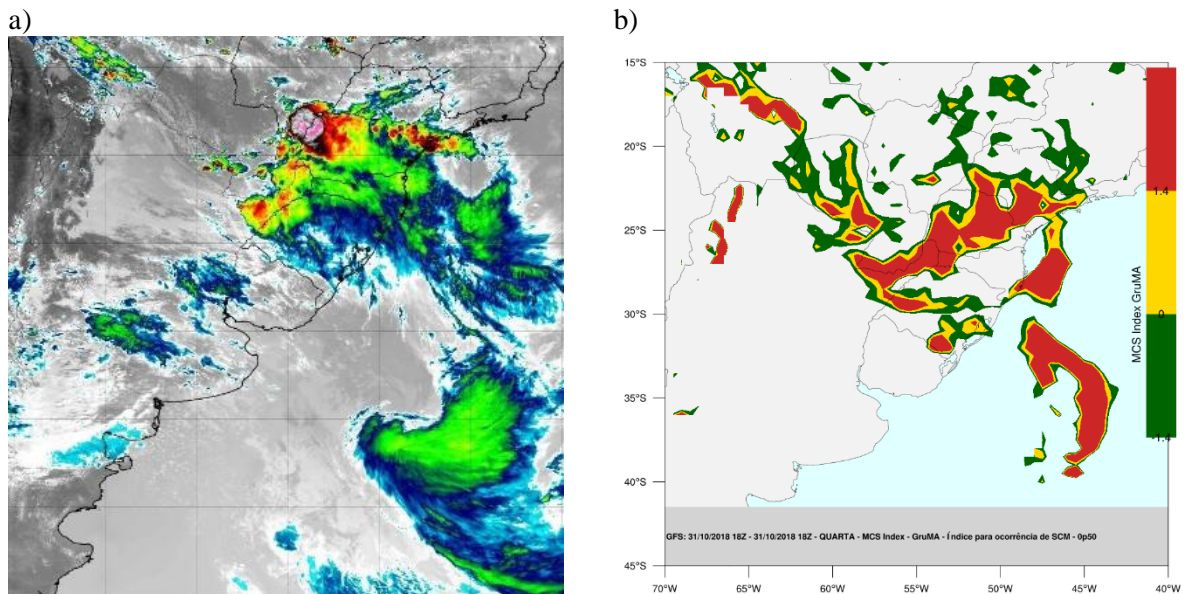
Em médios níveis, novamente percebe-se a presença de cavados de onda curta. Localizados entre a divisa da ARG e a divisa do RS com SC, produzem núcleos de intensa vortacidade negativa na área (Figura 21e). Em 850 hPa (Figura 21f), o escoamento persiste de norte, mas agora com intensidade bem menor sobre a região de formação das tempestades do segundo sistema.

Analisando o campo em superfície, nota-se a presença do ciclone em alto mar, anteriormente citado na análise (Figura 21g). Sua presença, também favorece o escoamento de norte vindo da Amazônia. Porém, por estar bem deslocado da costa, não atua como forçante mecânica para o levantamento em baixos níveis. Também nota-se um deslocamento da baixa pressão anteriormente localizada no norte da ARG, agora sobre o PAR, que também favorece o escoamento de norte em 850 hPa. O campo de água precipitável ainda indica bastante água disponível na coluna, tanto na região de dissipação do sistema, quanto na de formação das novas células (Figura 21h).

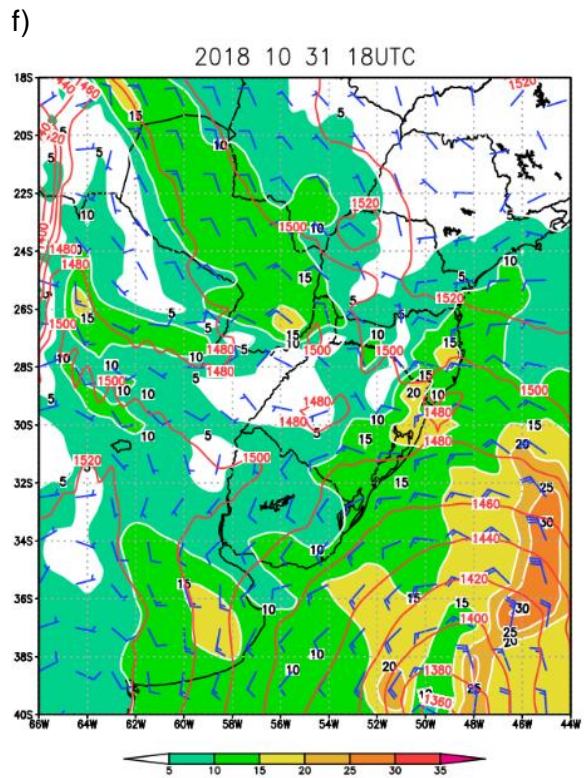
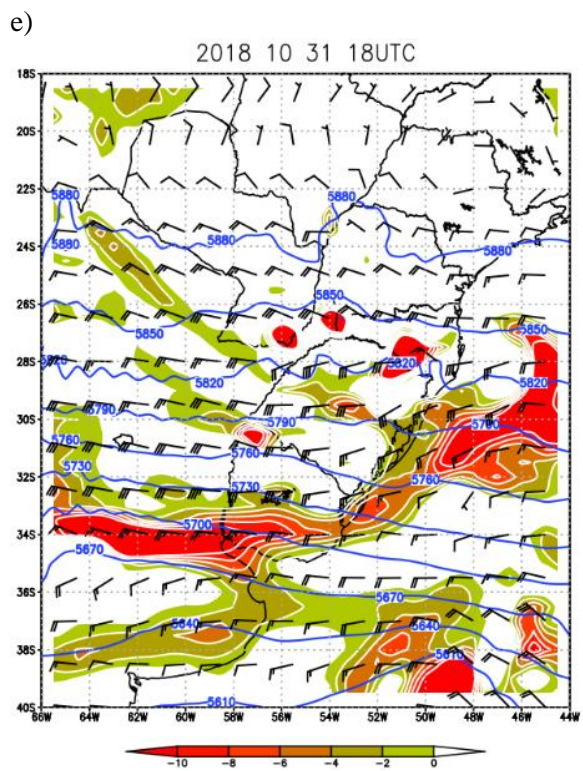
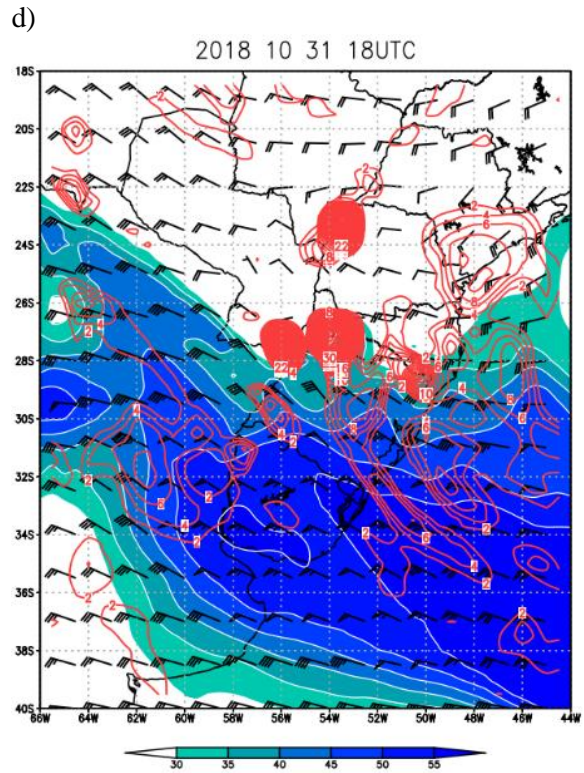
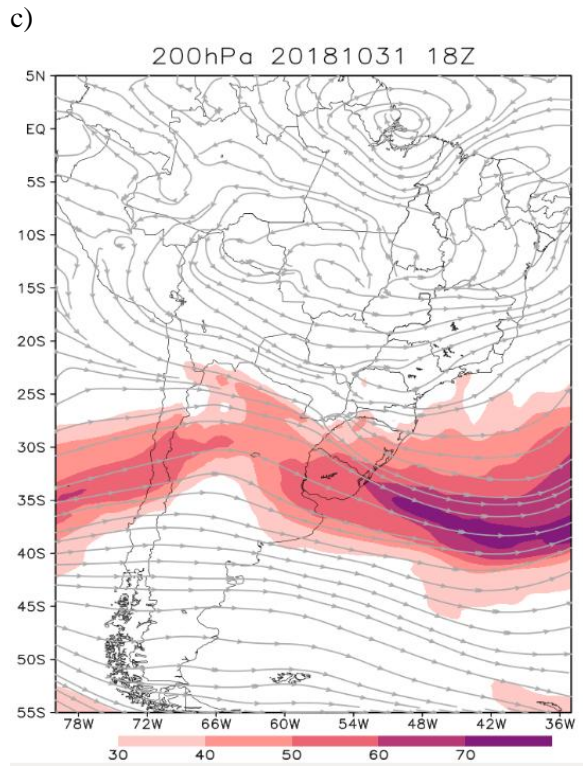
Neste estágio, percebe-se que diferentemente dos horários de formação e maturação do primeiro sistema, o escoamento vindo de norte, apesar de existente, não era muito intenso. A presença de forte divergência em altos níveis, e dos cavados de onda curta geradores de

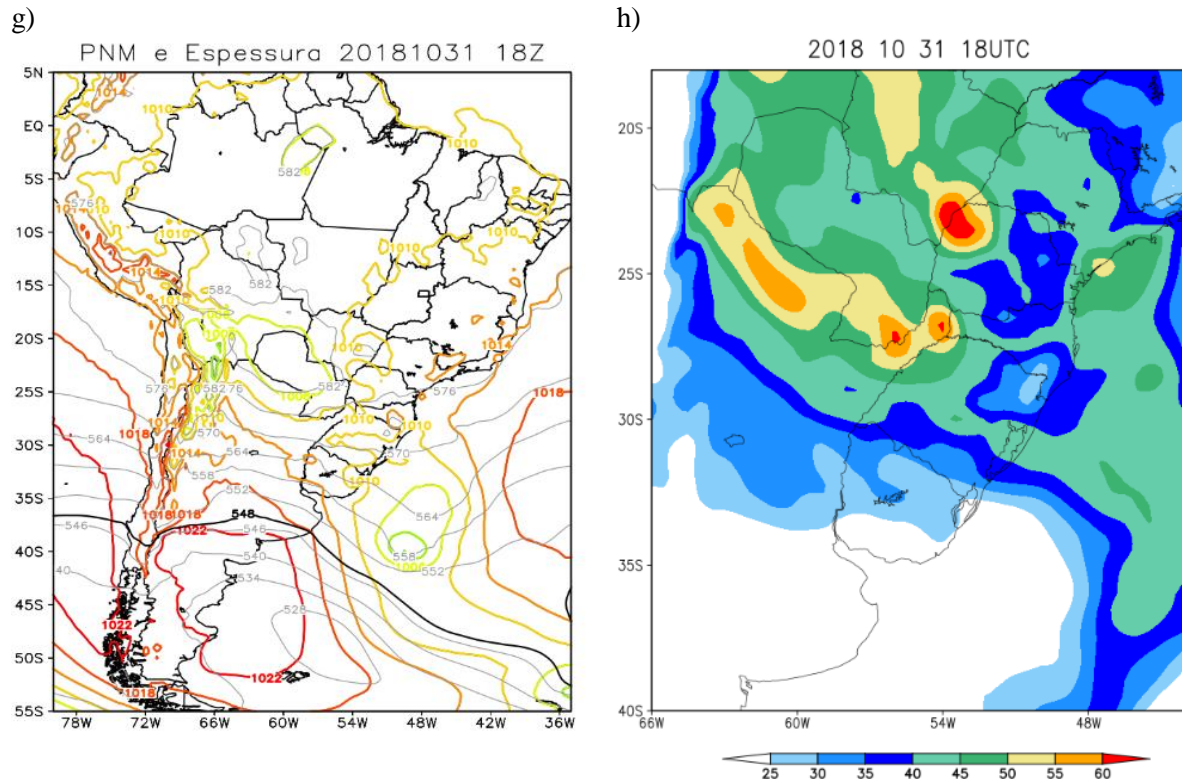
vorticidade negativa em médios níveis, foram essenciais para a formação de novas tempestades. Esse deslocamento da parte mais intensa do jato, e a diminuição da magnitude do escoamento de norte, determinaram o início de dissipação do SCM presente nos horários anteriores.

Figura 21: 18 UTC 31/10/2018 - a) Imagem de satélite no canal infravermelho; b) SA-MCS Index; c) Linhas de corrente e magnitude do vento em 200 hPa; d) Vento e divergência em 200 hPa; e) Vento, vorticidade e altura geopotencial em 500 hPa; f) Magnitude e direção do vento e altura geopotencial em 850 hPa; g) PNM e espessura em superfície; h) Água precipitável.









O sistema já em seu estágio maduro, que começou suas primeiras tempestades ao sul do PAR às 18 UTC do dia 31/08, apresenta seu núcleo mais intenso a oeste do PR e sul do MS, como mostrado na figura 22a. Diferente do primeiro sistema, esse SCM possui um tamanho bem menor em comparação ao primeiro, e também um aspecto mais arredondado. O SA-MCS Index (Figura 22b) aponta um risco alto de SCMs na região correta em que o sistema se encontra.

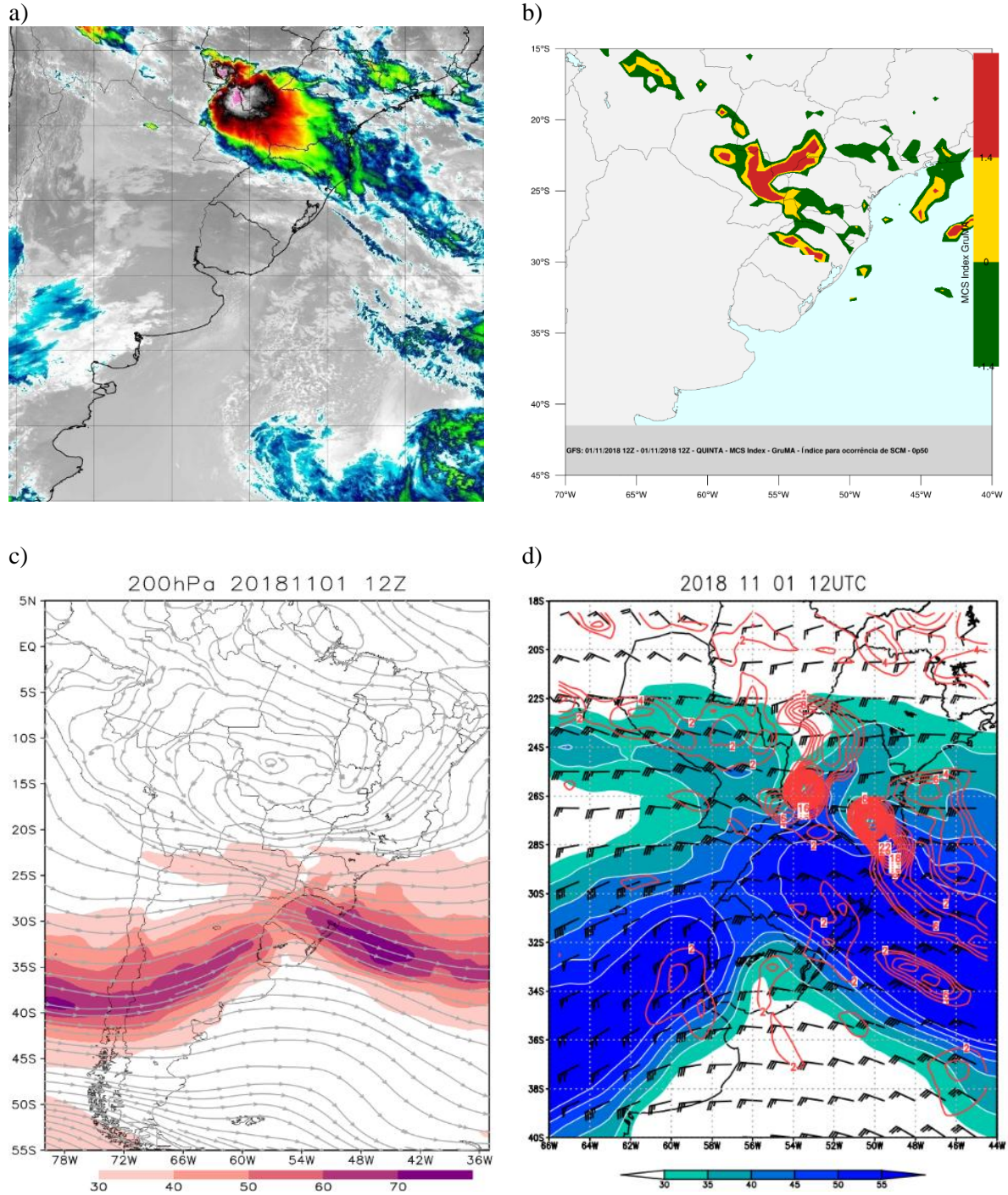
Em altos níveis, nota-se que parte do núcleo do jato volta a influenciar a Região Sul do Brasil e novamente apresenta características de difluência e diminuição na magnitude do vento, principalmente sobre SC e oeste do PR (Figura 22c), que corrobora com o cálculo da divergência na figura 22d. A presença de novos cavados de onda curta vistos pelas linhas de altura geopotencial, agora sobre o estado catarinense (Figura 22e), resultam em 3 núcleos de intensa vorticidade negativa, um ao norte de SC e os outros dois entre o PAR e o oeste do PR, região exata em que o sistema formado abrange. No nível de 850 hPa, observa-se um núcleo na saída do escoamento vindo de norte entre 20 e 25 m/s (Figura 22f), valores esses bem menores em comparação com o estágio maduro do primeiro sistema, mas ainda assim, essencial para a manutenção desse segundo SCM. Em superfície, observa-se um sistema frontal bem formado no oceano Atlântico, com seu ramo frio com característica bem continental, passando pelo norte do RS, alcançando o nordeste da ARG e sul do PR (Figura

22g). Tal sistema frontal, explica os valores de vorticidade negativa nas proximidades do Uruguai, e também a presença do jato em altos níveis nessa região, já que o mesmo normalmente acompanha a posição das frentes frias. Por fim, analisa-se o campo de água precipitável (figura 22h) que aponta valores ainda altos para a região em que o sistema está presente, mas ainda assim, menores em comparação ao estágio maduro do primeiro sistema que atingiu o sul do Brasil.

Analisando o campo de CAPE e LI (Figura 23), observa-se que nos horários de formação dos dois sistemas que passaram seguidos um ao outro (23 a e c), tinham-se valores de de CAPE e LI bem elevados (em magnitude), indicando que havia bastante energia na atmosfera para ser utilizada em convecção e bastante levantamento. Nota-se também, que em comparação ao momento de formação dos sistemas, os valores de CAPE e LI quando o sistema já estava formado, eram bem menos significantes, o que indica que os sistemas consumiram grande parte daquela energia que estava disponível, para o seu desenvolvimento. É preciso levar em consideração que tais valores são extraídos de modelo, que normalmente superestimam tais valores.

Normalmente, os valores de CAPE para convecção desorganizada são maiores em comparação aos de SCMs, como abordado por Rasera (2017), devido ao seu ciclo de vida. Tempestades normalmente tem formação no período vespertino, em que há maior aquecimento. SCMs em contrapartida, tem formação média noturna, resultando numa atmosfera menos aquecida, e portanto com menor energia disponível. Porém, como observado na figura 23, os valores dos índices de instabilidade, mostravam a atmosfera com grande potencial de convecção mesmo durante a noite, fator que provavelmente contribuiu para o sistema ganhar a extensão tomada.

Figura 22: 12 UTC 01/11/2018 - a) Imagem de satélite no canal infravermelho; b) SA-MCS Index; c) Linhas de corrente e magnitude do vento em 200 hPa; d) Vento e divergência em 200 hPa; e) Vento, vorticidade e altura geopotencial em 500 hPa; f) Magnitude e direção do vento e altura geopotencial em 850 hPa; g) PNM e espessura em superfície; h) Água precipitável.



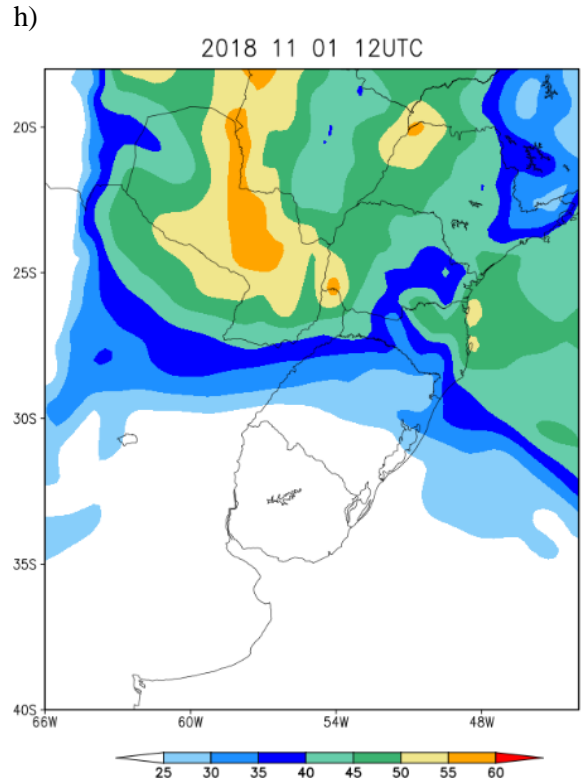
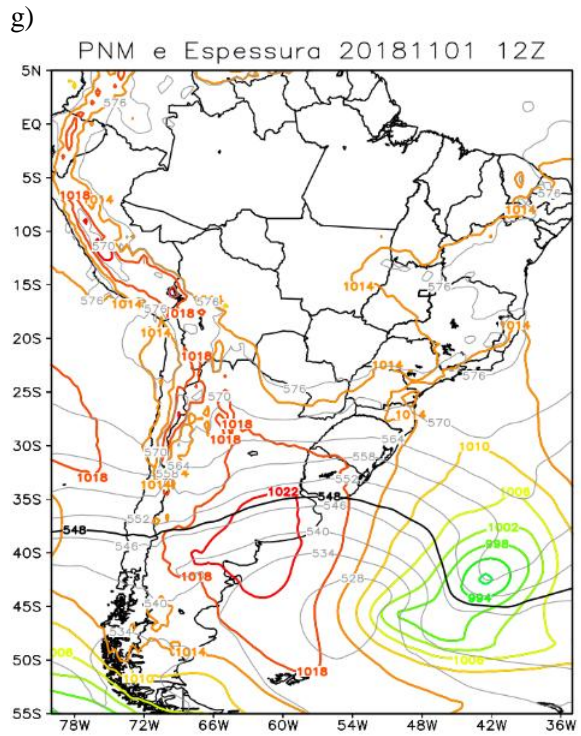
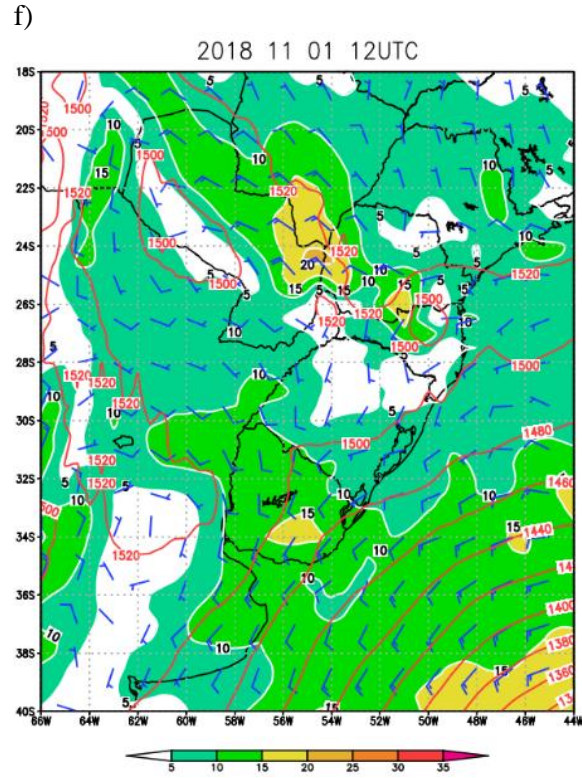
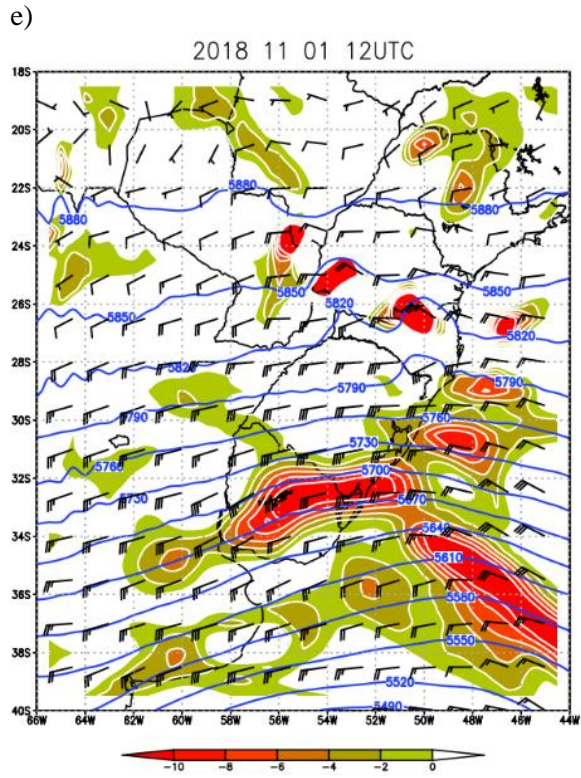
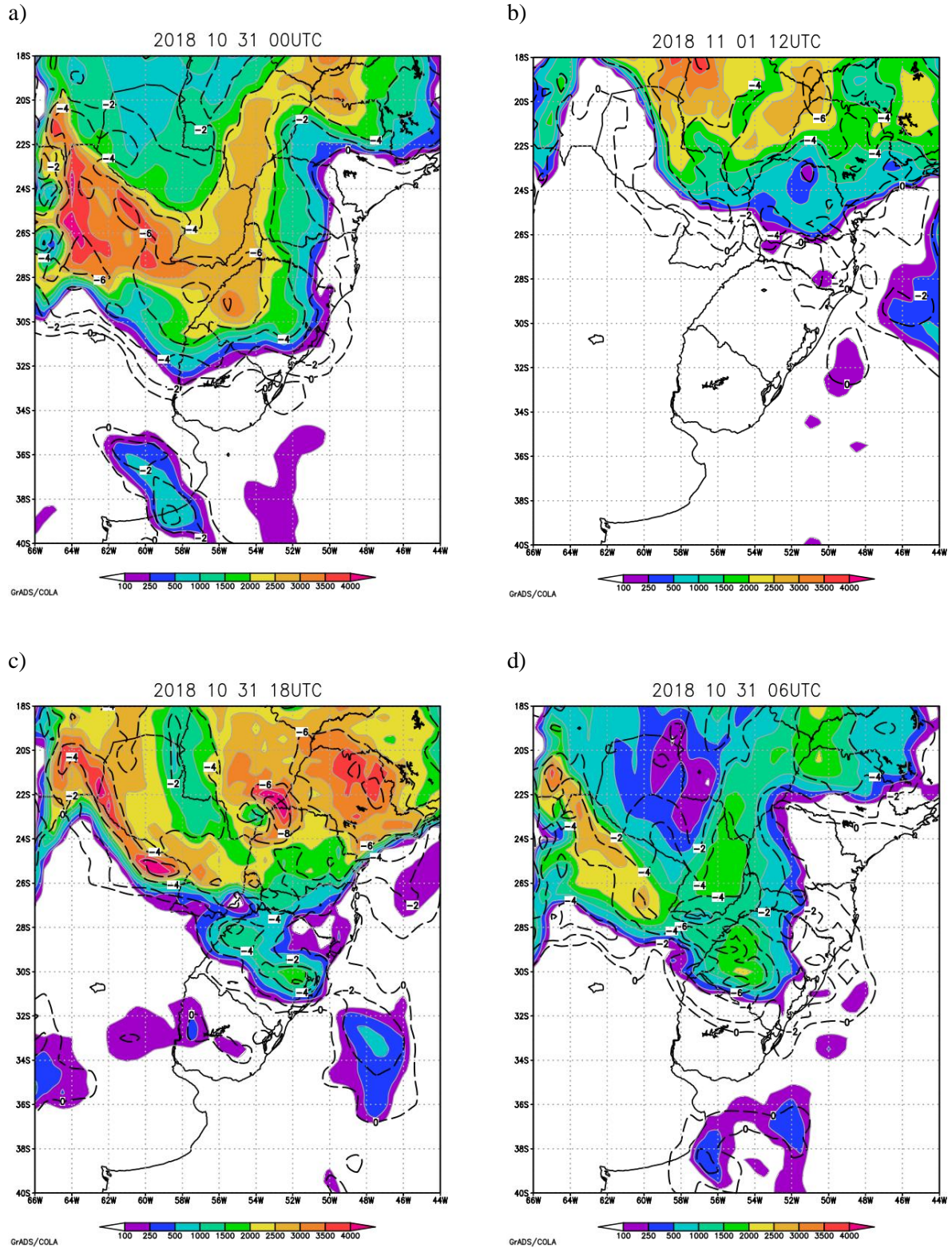


Figura 23: Campo de CAPE e LI, calculado às: a) 00 UTC 31/10, b) 06 UTC 31/10, c) 18 UTC 31/10, d) 12 UTC 01/11.



## 5. CONCLUSÃO

O presente trabalho teve como objetivo principal fazer um levantamento de Sistemas Convectivos de Mesoescala que atingiram o estado de SC entre o período da primavera de 2018 e o verão de 2019. Tal objetivo foi escolhido com o intuito de realizar um estudo para verificar a frequência que tal sistema atinge SC, e dessa forma, identificar as principais características atmosféricas e ambientes sinóticos em que o mesmo se forma e, também, os eventos adversos que a passagem de um SCM pode causar.

Ao todo, foram rastreados 9 casos que atingiram o estado, baseado em critérios abordados também por Anabor (2008), em que foram utilizados limiares de temperatura de -38 e -50°C para a seleção dos casos, e também o critério de posição do sistema, onde o mesmo deveria ter atingido SC em algum momento de seu ciclo de vida. A partir do levantamento realizado, foi possível notar que grande parte dos sistemas que atingiram o Estado, se formaram durante a noite e madrugada e, após isso, deslocaram-se para SC. Decorrente desse horário de formação, a maioria dos sistemas atingiu o Estado no fim da madrugada e início da manhã. Os eventos que mais geraram precipitação foram os casos 03, 05 ambos em outubro de 2018, e o caso 06 ocorrido em janeiro de 2019. Enquanto exerciam influência sobre SC, acumularam 60 mm em 24h em diversos municípios do estado. Além disso, analisando os valores de rajadas de vento, percebe-se que a passagem dos SCMs pelo Estado causaram rajadas intensas de vento em muitas regiões. Destaque para o caso 03 e 05, em que foram os que registraram as maiores rajadas (87 km/h em Tangará e Água Doce no caso 03, e 105 km/h em Água Doce e 99 km/h em São Miguel do Oeste no caso 05).

Além do levantamento realizado com os dados das estações, foi calculado o SA-MCS Index desenvolvido por Rasera (2017), que apresentou um desempenho visual satisfatório em relação a área e a intensidade de risco na mesma, indicando para a maioria dos casos estudados, risco vermelho de SCM. Nesse sentido, o índice apontou que tais áreas e apresentavam um potencial alto de ocorrência de SCMs, que comparando com as imagens de satélite nos horários estudados, havia compatibilidade.

A fim de fazer um estudo um pouco mais aprofundado sobre os sistemas, foi escolhido o caso de SCM que apresentou os maiores acumulados de chuva e rajadas de vento no período em que influenciou o Estado. Através dos dados disponibilizados pela DC/SC, foi realizado o levantamento de registros de ocorrência relatados no dia respectivo a passagem do SCM. Com isso, o sistema selecionado foi o caso 05, que ocorreu nos dias 31/10/2018 e 01/11/2018. A análise sinótica do evento ressaltou as principais características atmosféricas que permitiram a formação e a manutenção do sistema. Em níveis médios (500 hPa), nos

horários de formação, foi notada a presença de cavados de onda curta, que foram responsáveis por geração de vorticidade negativa que induz geração de vorticidade ciclônica em baixos níveis e, portanto, causa convergência. Tal resultado corrobora com o encontrado por Anabor (2004), que cita ondas curtas na formação de SCMs lineares, o que propicia uma atmosfera mais baroclínica. Em 850 hPa, foi observada a presença de um escoamento de norte muito bem caracterizado. Em 200 hPa, observou-se que o JS estava sobre a região de formação, o que por conservação de massa, contribui para maior convergência em baixos níveis. Este episódio, em especial, foi caracterizado pela formação de dois SCMSs seguidos. O primeiro e de maior extensão, responsável pela geração dos danos, se formou às 00 UTC do dia 31/10 e entrou em fase de dissipação às 18 UTC do mesmo dia. Já o segundo, iniciou suas primeiras tempestades ainda quando o primeiro sistema estava se dissipando, e atingiu seu estágio maduro às 12 UTC do dia 01/11. Neste trabalho não foi realizado nenhum tipo de teste para verificar se o escoamento de norte observado, é caracterizado como Jato de Baixos Níveis, portanto foi utilizado o termo de escoamento para caracterizar sua influência. Percebe-se que no período de formação, a magnitude de tal escoamento era menor (mas existente) do que no período de maturação do sistema, o que indica que esse aumento na magnitude é diretamente proporcional ao crescimento do SCM, alimentando-o e permitindo que o sistema se mantivesse.

A magnitude do escoamento de norte associada ao primeiro sistema apresentou-se mais significativa em comparação à fase de maturação do segundo, o que resultou num sistema maior em extensão do que o sistema seguinte. Em superfície, foi observada a presença de um cavado no RS e a baixa no norte da Argentina, sistemas já citados na literatura anteriormente. No desenvolver do sistema, estavam associados ramos frios de sistemas frontais, o que também serviram como forçante mecânica para que houvesse maior levantamento e portanto convergência, em baixos níveis. Nas fases de maturação, observa-se uma difluência nas linhas de corrente, acompanhada de uma diminuição da magnitude do jato, que resulta em divergência em altos níveis. No cálculo do campo de divergência da análise, percebem-se intensas regiões de divergência nos horários de maturação do sistema, que é resultado do modelo “enxergar” bastante convergência em baixos níveis.

Por fim, com a realização deste trabalho, verifica-se que o método desenvolvido por Anabor (2008) foi eficaz para a seleção dos casos que atingiram SC no período de estudo. Além disso, o índice preditivo de SCMs teve um desempenho visual satisfatório na indicação da região com risco potencial de SCMs. A maioria dos sistemas rastreados, tiveram sua formação durante a noite e madrugada, mas decorrente de sua região de formação e do tempo



de deslocamento, atingiram SC no início da manhã e do decorrer do período diurno. Os SCMs, apesar de estarem associados à eventos de tempo adverso, como altos índices de precipitação que causam enxurradas e alagamentos, fortes vendavais e granizo, são um dos sistemas responsáveis pelo regime pluviométrico da região sul, sendo de extrema importância para a área nas estações da primavera e verão. Um maior conhecimento sobre as condições atmosféricas necessárias para a formação e desenvolvimento dos mesmos, e sobre os sistemas que normalmente atingem a região, podem auxiliar centros de previsão bem como órgãos de proteção civil, a prever os sistemas com maior antecedência, baseado no ambiente atmosférico, e assim, criar planos de contingência de potenciais eventos severos que podem estar associados com a passagem dos SCMs pela região.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALLABY, M. **Atmosphere. A Scientific History of Air, Weather, and Climate.** FactsOn File, 258 p, 2009.

ANABOR, V; FERREIRA, V. “**Sistemas Convectivos de Mesoescala: Serão todos CCMs?**” Anais XVII Congresso Brasileiro de Meteorologia v 91 n 1975, p.399–404, 2012.

ANABOR, V., STENSRUD, D.J., MORAES, O.L.L.: Serial upstream-propagating mesoscale convective system events over south-eastern South America. **Monthly Weather Review**, v.136, p 3087–3105, 2008.

ANDERSON, C.J., ARRITT, R.W..**Mesoscale convective complexes and persistent elongated convective systems over the United States during 1992 and 1993.** Mon. Wea. Rev., v126, p.578– 599, 1998.

ANDRADE, K. M. **Climatologia e comportamento dos sistemas frontais sobre a América do Sul.**Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais -INPE - São José dos Campos, 185 p, 2005.

ATKINSON B.W. **Mesoescala Atmospheric Circulations.** London Acad. Press. 495, 1981.

ATLAS BRASILEIRO DE DESASTRES NATURAIS: 1991 a 2012 / Centro Universitário de Estudos e Pesquisas sobre Desastres. 2ed. rev. ampl. – Florianópolis: CEPED UFSC, 168 p. 2013.

BITENCOURT, D. P; FUENTES, M. V; CARDOSO, C. S. **Climatologia de ciclones explosivos para a área ciclogênica da América do Sul.** Rev. bras. meteorol.. vol.28, n.1, p.43-56, 2013.

BJERKNES, J. On the structure of moving cyclones. **Geofysiske Publikationer**, v.1, n.2, p.1-8, 1919.

BJERKNES, J. E SOLBERG, H., **Life Cycles of Cyclones and Polar Front Theory of Atmospheric Circulation.** Geofys. Publ. v.3 n.1, p. 3-18., 1922.

BROOKS, H. E.; LEEB J. W.; CRAVENC, J. P. The spatial distribution of severe thunderstorm and tornado environments from global reanalysis data. **Atmospheric Research**, v.67-68, 73-94. 2003.

CAMPOS, C. R. J. EICHHOLZ, C. W., Características físicas dos sistemas convectivos de mesoescala que afetaram o rio grande do sul no período de 2004 a 2008.” **Revista Brasileira de Geofísica.** v29 n.2, 2011.

CARDOSO, C. S., BITENCOURT D. P., MENDONÇA, M, AND **Comportamento do vento no setor leste de Santa Catarina sob influência de ciclones extratropicais.** Rev. bras. meteorol. v.27, n.1, p.39-48, 2012.

CARLSON, T.N. **Mid-latitude weather systems.** London: Harper Collins Academic.

1991.

CARVALHO L.M.V e JONES C. A satellite method to identify structural properties of mesoscale convective systems based on the maximum spatial correlation tracking technique (MASCOTTE). **Journal of Applied Meteorology**, v40: p.1683–1701, 2001.

CASARIN D. P., KOUSKY V. E..Anomalias de precipitação no sul do Brasil e variações na circulação atmosférica. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v1 p.83-90, 1986.

CAVALCANTI, I. F. A., et al. Global climatological features in a simulation using the CPTEC–COLA AGCM. *J.Climate*, 15, 2965–2988. 2002.

CAVALCANTI, I.F.A.; KOUSKY, V. E. Climatology of South American cold fronts. In: VII International Conference On Southern Hemisphere Meteorology And Oceanography, Wellington, New Zealand. Proceedings. Wellington: **Amer. Meteor. Soc.**, 2003.

CAVALCANTI, I. F. A., KOUSKY, V. E. **Frentes Frias sobre o Brasil**. Tempo e clima no Brasil. São Paulo: Oficina de textos. Cap. 9, p. 133-147, 2009.

CAVALCANTI I. F. A. et al. **Tempo e Clima no Brasil**. 1 ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2009. 464 p, 2009.

CHARNEY, J. G. The Dynamics of Long Waves in a Baroclinic Westerly Currents. **Journal of Meteorology**, v. 4 n.5, p. 135-162, 1947.

CHARNEY, J. G. E ELIASSEN, A. On the growth of hurricane depression. **Journal of Atmospheric Sciences**, v. 21, p. 68-75, 1964.

CLIMANÁLISE: Boletim de Monitoramento e Análise Climática **INPE/CPTEC**. Número especial. CPTEC-INPE, 125p., 1996.

CLIMANÁLISE: Boletim de Monitoramento e Análise Climática **INPE/CPTEC**. Vórtices Ciclônicos Em Altos Níveis De Origem Subtropical. CPTEC-INPE, v29, 2014.

CONIGLIO, M. C. et al. Effects of upper-level shear on the structure and maintenance of strong quasi-linear mesoscale convective systems. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v.63, p.1231-1252, 2006.

COHEN, A. E., M. C. CONIGLIO, S. F. et. al. Discrimination of mesoscale convective system environments using sounding observations. *Weather Forecasting*, 22, 1045–1062, 2007.

COSTA, S. B. **Balances de vorticidade e energia aplicados aos vórtices ciclônicos de altos níveis atuantes no oceano Atlântico tropical sul e adjacências**. (Mestrado Meteorologia) Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas - IAG. Universidade de São Paulo- SP, 2009.

COUTINHO M.D.L, GAN M. A, RAO V.B. **Método objetivo de identificação dos vórtices ciclônicos de altos níveis na região Tropical Sul: validação**. *Revista Brasileira de Meteorologia* v 25, p.311-323, 2010.

DUTRA, L. M. M. **Ciclones Subtropicais Sobre o Atlântico Sul: Análise da Estrutura Dinâmica de Eventos**. (Mestrado Meteorologia) Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas - IAG. Universidade de São Paulo- SP, 2012.

EADY, E. T. **Long Waves and Cyclones Waves**. Tellus, v. 1, n.3, p. 35-52, 1949.

EMANUEL, K. **Atmospheric Convection**. Oxford University Press, 580 p, 1994.

FERREIRA, V; ANABOR, V. **Climatologia De Sistemas Convectivos De Mesoescala Ocorridos Sobre a América Do Sul No Período De 2005 a 2006**. *Ciência e Natura* vol. 37, n. 1, p. 17-21, 2015.

FIGUEIREDO J.C., SCOLAR J. O Tempo de Vida Médio dos Sistemas Convectivos de Mesoescala na América do Sul. **Anais Congresso Brasileiro de Meteorologia**. Anais Campos do Jordão, SP, p. 984-986, 1996.

GAN M. A. **Um estudo observacional sobre as baixas frias da alta troposfera, nas latitudes subtropicais do Atlântico sul e leste do Brasil**. Dissertação, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE, 1982.

GAN, M. A. **Ciclone catarina: análise sinótica**. In: III Simpósio Internacional de Climatologia, Canela. v. 1. p. 1-5, 2009.

HAKIM, G. J. **Cyclogenesis**. Encyclopedia of Atmospheric Science. Edited by James R. Holton, Judith A. Curry and John A. Pyle, Academic Press, San Diego, v. 6, p. 589-594, 2003.

HOUZE, R. A., JR., SMULL B. F., DODGE P. **Mesoscale organization of springtime rainstorms in Oklahoma**, Mon. Weather Rev., v118 p. 613–654, 1990.

HOUZE, R.A. Cloud dynamics. Academic Press, Inc., v53 p.334-404, 1993.

HOUZE JR, R A. “**Mesoscale Convective Systems**.” *Reviews of Geophysics* v42 p. 1-43, 2004.

IBGE -INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA: **Mapa climático do Brasil**. 2002.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Anuário estatístico do Brasil. Rio de Janeiro: IBGE, 2010. v. 70. Disponível em:<<http://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/monografias/GEBIS%20-%20RJ/>>. Acesso em: 26/09/2019.

JIRAK, I. L.; COTTON, W. R., MCANELLY, R.L. Satellite and radar survey of mesoscale convective system development. **Monthly Weather Review**, v.131 n.10 p.2428–2449. 2003.

JIRAK, I. L.; COTTON, W. R. Observational analysis of the predictability of mesoscale convective systems. **Weather Forecasting**, v.22, 813–838, 2007.

JUSTI DA SILVA, M.G.A.; SILVA DIAS, M. A. F. A frequência de fenômenos meteorológicos na América do Sul: uma climatologia. In: **CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA**, 11, 2002, Foz do Iguaçu-PR. *Anais...* Foz do Iguaçu: SBMet, 2002. CD-ROM.

JOHNS, R. H.; HIRT, W. D. DERECHOS: Widespread Convectively Induced Windstorms. **Weather and Forecasting**, v. 2, n. 1, p. 32–49, 1987.

KODAMA, Y. a. Large-Scale Common Features of Subtropical Precipitation Zones (the

Baiu Frontal Zone, the SPCZ, and the SACZ). Part I: Characteristics os Subtropical Frontal Zones. *J. Meteor. Soc. Japan*, v. 70, p. 813-836, 1992a.

KODAMA, Y. b. Large-Scale Common Features of Subtropical Precipitation Zones (the

Baiu Frontal Zone, the SPCZ, and the SACZ). Part II: Conditions of the circulations for generating the STCZs. *J. Meteor. Soc. Japan*, v. 71, p. 581-610, 1992b.

KOUSKY V.E. Pentad outgoing longwave radiation climatology for the South American sector. *Revista Brasileira de Meteorologia*, n 3 p.217-231, 1988.

KOUSKY, V.E.; GAN, M.A. Upper tropospheric cyclonic vortices in the tropical South Atlantic. *Tellus*, 36(6):538-551, Dec., 1981.

LEITE, M. S. G. **Circulações locais no Rio Grande do Sul: brisas marítima/terrestre e sua interação com as brisas lacustres/terrestres**. 105f. Dissertação (Mestrado em Modelagem Computacional). Universidade Federal do Rio Grande - UFRG, 2013.

LEMOS C. F; CALBETE N. O. Sistemas Frontais que atuaram no Brasil de 1987 a 1995. *Climanalise Especial*, Edição comemorativa de 10 anos. MCT/INPE-CPTEC. 1996.

LOURENÇO, M. C. M. **Vórtices ciclônicos em altos níveis que atuam no sul da América do Sul**. 77p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 1996.

MACHADO, L. A. T., e W. B. ROSSOW. Structural characteristics and radiative properties of tropical cloud clusters. *Mon. Wea. Rev.*, 121, 3234–3260, 1993.

MACHADO, L. A. T.; ROSSOW, W. B. Life cycle variations of mesoscale convective systems over the Americas. *Monthly Weather Review*, v.126, 1630-1654. 1998.

MADDOX, R. A. **Mesoscale convective complexes**. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 61, 1374– 1387, 1980.

MADDOX, R. A. Large-scale meteorological conditions associated with midlatitude, mesoscale convective complexes. *Mon. Wea. Rev.*, 111, 126–140. 1983.

MARCELINO, E. V. et al. **Mapeamento de risco de desastres naturais do Estado de Santa Catarina**. *Caminhos de Geografia*, Uberlândia, n. 8, v. 17, p. 72-89, fev. 2006.

MARKS, F. D. Hurricanes. **Encyclopedia of Atmospheric Science**. Academic Press, San Diego, v. 6, p. 942-966, 2002.

ORLANSKI, I. A rational subdivision of scales for atmospheric processes. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v 56 n.5, p. 527-530, 1975.

PALMER, C.E. **On high-level cyclones originating in the tropics**. *Transactions of American Geophysics Union*, v32 n.5 p. 683-695, 1951.

PAMPUCH, L.A; AMBRIZZI, T.: Sistemas Frontais sobre a América do Sul Parte II: Monitoramento Mensal em dados da Reanálise I do NCEP/NCAR. **Ciência e Natura**. Brasil. v38. p. 105-110, 2016.

QUADRO M.F.L. **Estudo de Episódios de Zona de Convergência do Atlântico Sul**

**ZCAS sobre a América do Sul.** Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, INPE - São José dos Campos- SP, 1994.

QUADRO, M. F. L.; MACHADO, L. H. R.; CALBETE, S.; BATISTA, N. N. M.; SAMPAIO, G. Climatologia, precipitação e temperatura no período de 1986 a 1996. **Revista Climanálise, Edição comemorativa de 10 anos, CPTEC/INPE.** 1996.

RAMÍREZ, M. C. V., FERREIRA, N. J., GAN, M. A. “**Vórtices ciclônicos desprendidos em altos níveis que originam-se no leste do pacífico tropical sul - Parte I : aspectos sinóticos relacionados a sua formação.**”, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, INPE - São José dos Campos- SP, 2014.

RASERA, G. “**Desenvolvimento de um Índice de Sistemas Convectivos de Mesoescala para a América do Sul e suas aplicações num ambiente operacional**”, 2017.

RASMUSSEN, K. L.; HOUZE Jr, R.A. Orographic Convection in Subtropical South America as Seen by the TRMM Satellite. **Monthly Weather Review**, v.139, 2399-2420. 2011.

REBOITA M.S., IWABE C.M.N., DA ROCHA R.P., AMBRIZZI T. Análise de um Ciclone Semi-Estacionário na Costa Sul do Brasil Associado a Bloqueio Atmosférico. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v 24 n.4 p 407-422, 2009.

REBOITA, M; KRUSCHE, N; AMBRIZZI, T; ROCHA, R. Entendendo o tempo e o clima na América do Sul. **Terra e Didática**, Campinas, v. 8, p. 34-50, 2012.

REBOITA et al. Evidências de circulação de brisa vale-montanha na serra da Mantiqueira: cidade de Itajubá – mg. **Ciência e Natura**. v 36. n.1, 2014.

REBOITA, M. S., KRUSCHE, N., AMBRIZZI, T., DA ROCHA R.P., Entendendo o tempo e o clima na América do Sul. **Terrae Didática**, v8 n.1, 34-50, 2015.

RODRIGUES M.L.G, et.al. Climatologia de frentes frias no litoral de Santa Catarina. **Revista Brasileira de Geofísica**. 22:135-51, 2004.

SALIO, P.; NICOLINI, M.; ZIPSER, E. J. Mesoscale convective systems over southeastern South America and their relationship with the South American low-level jet. **Monthly Weather Review** v.135, 1290–1309. 2007.

SAKAMOTO M. **Sistemas Convectivos de Mesoescala observados na Região Subtropical da América do Sul durante o SALLJEX.** São Paulo: Inst. Astron., Geof. e C. Atmosf., IAG-USP. 281 p, 2009.

SATYAMURTY, P., MATTOS, L. F. Climatological lower tropospheric frontogenesis in the midlatitudes due to horizontal deformation and divergence. **Monthly Weather Review**, v.117, n. 6, p. 1355- 1364, 1989.

SEVERO, D. L., CAMPIGOTTO A. P, REFOSCO. J.C. “Climatologia dos vórtices ciclônicos de altos níveis que afetam o sul do Brasil.” **XVI Congresso Brasileiro de Meteorologia**, 1–16, 2010.

SILVA DIAS M.A.F. Sistemas de Mesoescala e Previsão de Tempo a Curto Prazo. **Revista Brasileira de Meteorologia**, 2:133-150, 1987.

SIMMONDS, I.; KEAY, K.. Mean Southern Hemisphere extratropical cyclone behavior in the 40-Year NCEP-NCAR reanalysis. **Journal of Climate**, v. 13, n. 5, p.873-885, 2000. SINCLAIR, M.R.. An Objective cyclone climatology for the Southern Hemisphere. **Monthly Weather Review**, v. 122, n. 10, p.2239-2256, 1994.

SIQUEIRA, J. R., e L. A. T. MACHADO. Influence of the frontal systems on the day-to-day convection variability over South America. **J. Climate**, 17, 1754–1766, 2004.

VELASCO, I. Y.; FRITSCH, J. M. Mesoscale convective complexes in the Americas. **Journal of Geophysical Research**, v.92, 9591–9613. 1987.

WAKIMOTO, R. M. Convectively Driven High Wind Events. **Meteorological Monographs, American Meteorological Society**, v. 28, n. 50, p. 255–298, ISSN 0065-9401, 2001.

WEISMAN, M. L. Bow Echoes: A Tribute to T. T. Fujita. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 82, n. 1, p. 97–116, ISSN 0003-0007, 2001.

WEISMAN M. The genesis of severe, long-lived bow echoes. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v.50, 645-670. 1993

WILKS, D. S. **Statistical Methods in the Atmospheric Sciences**. Second Edition. Academic Press, 630p, 2006.

ZIPSER, J. E. et al. Where are the most intense thunderstorms on earth? **Bull. Amer. Meteor. Soc.**, 87, 1057–1071, 2006.

ANEXO 1 - Levantamento de dados referente aos 9 casos de SCMs que influenciaram SC. São consideradas rajadas de vento acima de 50 km/h e acumulados de chuva acima de 5 mm, para os 5 municípios que tiveram os maiores registros dentro de tais limiares. A coluna referente ao SA - MCS Index, indica o resultado do índice no horário em que o SCM começou formar, e que já estava formado. Os limiares verde, amarelo e vermelho, indicam os sistemas abaixo da média amostral do autor do SA MCS Index, sistemas na média, e sistemas acima da média amostral, respectivamente, ou seja, o risco em vermelho é o que apresenta as regiões mais intensas e prováveis de ocorrência de SCMs. A última coluna apresenta o sistema que estava atuando em superfície no momento em que o SCM começou sua formação, bem como a região em que o sistema começou se formar.

CASO	MAIORES RAJADAS DE VENTO	MAIORES ACUMULADOS DE PRECIPITAÇÃO	OBSERVAÇÕES SA - MCS Index	SISTEMA EM SUPERFÍCIE NA HORA DE FORMAÇÃO DO SCM
CASO 1 13-14/09/2018	ÁGUA DOCE (13/09) - 53 km/h	JOINVILLE (13/09) - 34 mm	<b>FORMAÇÃO:</b> 00 UTC 13/09 - Sem risco <b>SCM FORMADO:</b> 06 UTC 13/09 - Risco vermelho, bem isolado.	Cavado entre as regiões do centro do RS, sul do Paraguai e norte da Argentina (primeiras tempestades começaram no nordeste da ARG)
	URUPEMA (13/09) - 60 km/h	JOAÇABA (14/09) - 47 mm		
	JAGUARUNA (13/09) - 55 km/h	OURO (14/09) - 35 mm		
	BALNEÁRIO ARROIO DO SILVA (13/09) - 57 km/h	CAMPOS NOVOS (14/09) - 34 mm		
	BALNEÁRIO ARROIO DO SILVA (14/09) - 52 km/h			
CASO 2 19-20/09/2018	SÃO MIGUEL DO OESTE (19/09) - 71 km/h	SÃO MIGUEL DO OESTE (19/09) - 12 mm	<b>FORMAÇÃO:</b> 12 UTC 19/09 - Risco amarelo; 00 UTC 20/09 - Risco vermelho <b>SCM FORMADO:</b> 18 UTC 19/09 e 06 UTC 20/09 - risco vermelho	Núcleo de baixa pressão entre o Paraguai e norte da Argentina e frente fria no sul do RS (primeiras tempestades começaram no da divisa do sul do PAR com ARG)
	SÃO MIGUEL DO OESTE (20/09) - 84 km/h	CAÇADOR (19/09) - 09 mm		
	NOVO HORIZONTE (19/09) - 64 km/h	DIONÍSIO CERQUEIRA (20/09) - 15 mm		
	NOVO HORIZONTE (20/09) - 76 km/h	NOVO HORIZONTE (20/09) - 15 mm		
	ÁGUA DOCE (14/09) - 82 km/h			



CASO 3 17-18-19/10/2018	TANGARÁ (17/09) - 70 km/h	OURO (17/09) - 62 mm	<b>FORMAÇÃO:</b> 06 UTC 17/10 - Risco verde, pontual amarelo; 06 UTC 18/10 - Risco amarelo, pontual vermelho. <b>SCM FORMADO:</b> 18 UTC 17/10 e 12 UTC 18/10 - Risco vermelho	Cavado entre as regiões do centro do RS e norte da Argentina e núcleo de baixa pressão no norte da Argentina (formação entre sul do PAR e nordeste da ARG)
	JOAÇABA (17/09) - 70 km/h	TANGARÁ (17/09) - 54 mm		
	TANGARÁ (18/09) - 87 km/h	XANXERÊ (18/09) - 61 mm		
	ÁGUA DOCE (18/09) - 87 km/h	PASSOS MAIA (18/09) - 59 mm		
	URUPEMA (18/09) - 67 km/h	SÃO MIGUEL DO OESTE (18/09) - 57 mm		

CASO 4 23/10/2018	Não causou rajadas acima de 50 km/h	SIDERÓPOLIS (23/10) - 16 mm	<b>FORMAÇÃO:</b> 00 UTC 23/10 - Risco vermelho <b>SCM FORMADO:</b> 06 UTC 23/10 - risco amarelo, pontual vermelho.	Núcleo de baixa pressão entre o Paraguai e o norte da Argentina e frente fria no Uruguai (primeiras tempestades iniciaram no Norte da ARG)
		TIMBÉ DO SUL (23/10) 12 mm		
		DIONÍSIO CERQUEIRA (23/10) 9,2 mm		
		CHAPECÓ (23/10) - 7,6 mm		
		SEARA (23/10) - 6,4 mm		
CASO 5 31/10 - 01/11/2018	ÁGUA DOCE (31/10) - 105 km/h	ITAPIRANGA (31/10) - 91 mm	<b>FORMAÇÃO:</b> 00 UTC 31/10 - Risco amarelo, pontual vermelho; 18 UTC 31/10 - risco vermelho.	Cavado entre as regiões do centro do RS e norte da Argentina e núcleo de baixa pressão entre o Paraguai e o norte da Argentina (primeiras
	SÃO MIGUEL DO OESTE (31/10) - 99 km/h	SÃO MIGUEL DO OESTE (31/10) - 76 mm		

	TANGARÁ (31/10) - 88 km/h	CAMPO BELO DO SUL (31/10) - 71 mm	<b>SCM FORMADO:</b> 06 UTC 31/10 e 12 UTC 01/11 - Risco vermelho	tempestades entre o sul do PAR e nordeste da ARG)
	NOVO HORIZONTE (31/10) - 81 km/h	TIMBÉ DO SUL (31/10) - 69 mm		
	MAJOR VIEIRA (31/10) - 73 km/h	ANCHIETA (31/10) - 66 mm		
CASO 6 23-24/01/2019	CAIBÍ (23/01) - 77 km/h	SÃO CARLOS (23/01) - 72 mm	<b>FORMAÇÃO:</b> 06 UTC 23/01 - Risco Amarelo <b>SCM FORMADO:</b> 12 UTC 23/01 - Risco vermelho.	Núcleo de baixa pressão no norte da Argentina e frente fria oceânica na altura do Uruguai (formação no leste da ARG)
	JOAÇABA (23/01) - 71 km/h	MONDAÍ (23/01) - 60 mm		
	DIONÍSIO CERQUEIRA (23/01) - 66 km/h	CURITIBANOS (23/01) - 57 mm		
	SÃO MIGUEL DO OESTE (23/01) - 65 km/h	ARROIO TRINTA - (24/01) - 65 mm		
	CAMPO BELO DO SUL (24/01) - 58 km/h	SÃO JOAQUIM - (24/01) - 45 mm		
CASO 7 09-10/02/2019	CHAPECÓ (10/02) - 77 km/h	ITAPIRANGA (10/02) - 7 mm	<b>FORMAÇÃO:</b> 06 UTC 09/02 - Risco amarelo, pontual vermelho. <b>SCM FORMADO:</b> 00 UTC 10/02 - risco amarelo, pontual vermelho bem isolado.	Núcleo de baixa pressão no norte da Argentina e linhas de pressão indicando escoamento de norte (formação no nordeste da ARG)
	ÁGUA DOCE (10/02) - 62 km/h			
	NOVO HORIZONTE (10/02) - 55 km/h			

CASO 8 20/03/2019	BOM JARDIM DA SERRA - 69 km/h	BOM RETIRO - 16 mm	<b>FORMAÇÃO:</b> 00 UTC 20/03 - Risco amarelo <b>SCM FORMADO:</b> 06 UTC 20/03 - Risco amarelo e vermelho.	Frente fria no centro norte do RS com ramo quente no norte da Argentina (Formação na região central do PAR)
	LAGUNA - 69 km/h	BOM JARDIM DA SERRA - 15 mm		
	BALNEÁRIO BARRA DO SUL - 58 km/h	ITAIÓPOLIS - 14 mm		
	URUPEMA - 57 km/h	JARAGUÁ DO SUL - 12 mm		
	BALNEÁRIO ARROIO DO SILVA - 56 km/h			
CASO 9 31/03/2019	LAGUNA - 54 km/h	LEBON RÉGIS - 15 mm	<b>FORMAÇÃO:</b> 00 UTC 31/03 - Risco amarelo, com pontua vermelho. <b>SCM FORMADO:</b> 06 UTC 31/03 - Risco Verde	Região de baixa pressão (sem núcleo formado) e linhas de pressão indicando escoamento de norte (formação na região centro/norte da ARG)
		ALFREDO WAGNER - 13 mm		
		MONTE CARLO - 10 mm		