



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

sid.inpe.br/mtc-m21c/2019/07.15.15.50-TDI

**ESTUDO DE NOVAS TÉCNICAS PARA PREVISÃO A  
CURTO PRAZO DO DESLOCAMENTO DO CAMPO  
HORIZONTAL DA ATIVIDADE ELÉTRICA EM  
TEMPESTADES**

Ernani Luiz Fazolo

Dissertação de Mestrado do  
Curso de Pós-Graduação em  
Meteorologia, orientada pelos Drs.  
Alan James Peixoto Calheiros, e  
Daniel Alejandro Vila, aprovada  
em 05 de setembro de 2019.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34R/3TLF9M5>>

INPE  
São José dos Campos  
2019

## **PUBLICADO POR:**

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

Gabinete do Diretor (GBDIR)

Serviço de Informação e Documentação (SESID)

CEP 12.227-010

São José dos Campos - SP - Brasil

Tel.:(012) 3208-6923/7348

E-mail: pubtc@inpe.br

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

### **Presidente:**

Dra. Marley Cavalcante de Lima Moscati - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CGCPT)

### **Membros:**

Dra. Carina Barros Mello - Coordenação de Laboratórios Associados (COCTE)

Dr. Alisson Dal Lago - Coordenação-Geral de Ciências Espaciais e Atmosféricas (CGCEA)

Dr. Evandro Albiach Branco - Centro de Ciência do Sistema Terrestre (COCST)

Dr. Evandro Marconi Rocco - Coordenação-Geral de Engenharia e Tecnologia Espacial (CGETE)

Dr. Hermann Johann Heinrich Kux - Coordenação-Geral de Observação da Terra (CGOBT)

Dra. Ieda Del Arco Sanches - Conselho de Pós-Graduação - (CPG)

Silvia Castro Marcelino - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

### **BIBLIOTECA DIGITAL:**

Dr. Gerald Jean Francis Banon

Clayton Martins Pereira - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

### **REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:**

Simone Angélica Del Ducca Barbedo - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

André Luis Dias Fernandes - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

### **EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:**

Ivone Martins - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

Cauê Silva Fróes - Serviço de Informação e Documentação (SESID)



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

sid.inpe.br/mtc-m21c/2019/07.15.15.50-TDI

**ESTUDO DE NOVAS TÉCNICAS PARA PREVISÃO A  
CURTO PRAZO DO DESLOCAMENTO DO CAMPO  
HORIZONTAL DA ATIVIDADE ELÉTRICA EM  
TEMPESTADES**

Ernani Luiz Fazolo

Dissertação de Mestrado do  
Curso de Pós-Graduação em  
Meteorologia, orientada pelos Drs.  
Alan James Peixoto Calheiros, e  
Daniel Alejandro Vila, aprovada  
em 05 de setembro de 2019.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34R/3TLF9M5>>

INPE  
São José dos Campos  
2019

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

---

Fazolo, Ernani Luiz.

F298e      Estudo de novas técnicas para previsão a curto prazo do deslocamento do campo horizontal da atividade elétrica em tempestades / Ernani Luiz Fazolo. – São José dos Campos : INPE, 2019.

xxii + 131 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m21c/2019/07.15.15.50-TDI)

Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2019.

Orientadores : Drs. Alan James Peixoto Calheiros, e Daniel Alejandro Vila.

1. Descargas elétricas. 2. Sistema eletricamente ativo.  
3. Previsão imediata. 4. ForTraLC. I.Título.

CDU 551.594.22

---



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

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



Aluno (a): *Emani Luiz Fazolo*

**Título: "ESTUDO DE NOVAS TÉCNICAS PARA A PREVISÃO A CURTO PRAZO DO DESLOCAMENTO DO CAMPO HORIZONTAL DA ATIVIDADE ELÉTRICA EM TEMPESTADES"**

Aprovado (a) pela Banca Examinadora em cumprimento ao requisito exigido para obtenção do Título de **Mestre** em **Meteorologia**

Dra. Simone Marilene Sievert da Costa  
Coeelho

  
\_\_\_\_\_  
Presidente / INPE / Cachoeira Paulista - SP

Participação por Vídeo - Conferência

Aprovado  Reprovado

Dr. Alan James Peixoto Catheiros

  
\_\_\_\_\_  
Orientador(a) / INPE / São José dos Campos - SP

Participação por Vídeo - Conferência

Aprovado  Reprovado

Dr. Daniel Alejandro Vila

  
\_\_\_\_\_  
Orientador(a) / INPE / Cachoeira Paulista - SP

Participação por Vídeo - Conferência

Aprovado  Reprovado

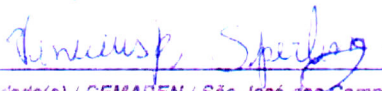
Dr. Renato Galante Negri

  
\_\_\_\_\_  
Membro da Banca / OPTEC / Cachoeira Paulista - SP

Participação por Vídeo - Conferência

Aprovado  Reprovado

Dr. Vinicius Banda Sperling

  
\_\_\_\_\_  
Convidado(a) / CEMADEN / São José dos Campos - SP

Participação por Vídeo - Conferência

Aprovado  Reprovado

Este trabalho foi aprovado por:

maioria simples

unanimidade



*“Entre nós revive Atenas, para assombro dos tiranos; sejamos Gregos na glória e na virtude Romanos”.*

*Francisco Pinto da Fontoura*



*A meus pais, Laudair e Aquesires, à minha namorada Adriana e ao meu colega e amigo Joao.*



## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, por conceder-me oportunidades de evolução intelectual nessa existência.

À minha namora Adriana, pelo incentivo, compreensão e paciência durante a realização do mestrado.

À minha família, pelo apoio e assistência recebida no período de estudo.

Ao Dr. Alan James Peixoto Calheiros e Dr. Daniel Alejandro Vila, orientadores nesta trajetória acadêmica, pela atenção, dedicação e compreensão perante as dificuldades encontradas, bem como, pelo conhecimento compartilhado nesses dois anos de trabalho.

Ao colega e amigo Joao Chinchay por não medir esforços para esclarecer minhas dúvidas na construção da lógica computacional para realização deste trabalho. Também, aos colegas pós-graduandos em meteorologia, em especial, ao Sildiscley, Tamires e Raphael, pela amizade cultivada ao longo do curso.

À Professora Dr. Simone, por guiar-me e intuir-me a novos horizontes.

Ao Projeto SOS-CHUVA por disponibilizar os dados, bem como à equipe da DSA do CPTEC, em especial ao Douglas, Rogério, Silvia e Thiago por toda a ajuda fornecida para o tratamento desses.

Aos membros da banca, por prontamente avaliarem esse trabalho.

Ao CNPq pela concessão da bolsa de mestrado, oportunizando-me condição financeira para realizar a pesquisa.





## RESUMO

O Brasil é um dos países com a maior incidência de descargas elétricas da Terra e conseqüentemente detém um significativo número de vítimas e elevados prejuízos em diversos setores de sua economia todos os anos. Monitorar e prever com confiabilidade a atividade elétrica de uma tempestade é um fator preponderante quando o objetivo é diminuir essas avarias. Com base nessa premissa, propôs-se a esse trabalho o objetivo de prever a propagação horizontal da atividade elétrica, através da implementação de dados de descargas elétricas oriundos da rede de detecção de raios em solo BrasilDAT, acumulados em campos de densidade, no algoritmo *Forecasting and Tracking the Evolution of Cloud Clusters* - ForTraCC, convertendo-o em *Forecasting and Tracking the Evolution of Lightning Clusters* - ForTraLC. Investigaram-se dessa forma, qual a metodologia de deslocamento melhor representa o vetor velocidade de um *cluster* de raios, a área mínima a ser monitorada e o melhor limiar de densidade de descargas elétricas, conjunto esse de parâmetros adotados para a validação do sistema de previsão. Certificaram-se com essa análise, os melhores resultados para os limiares de densidade de raios e de tamanho (área mínima do *cluster* de raios) como 1l/pixel/15min e 5 píxeis (320 km<sup>2</sup>), respectivamente, ao se deslocar o sistema eletricamente ativo a partir de uma média temporal do seu vetor velocidade derivado de dois passos de tempo de 15 minutos. Verificou-se ao final desse trabalho, que a nova técnica apresentou para a primeira previsão uma probabilidade de detecção de 51.4%, um índice de falso alarme de 48.7%, um *bias* igual a 1, em termos de distância, um erro de posicionamento do *cluster* previsto de 1.6 píxeis (12,8 km), bem como, os sistemas que apresentaram melhor previsão foram aqueles associados a uma condição atmosférica favorável à convecção organizada e com ciclo de vida bem definido, que por essa razão desenvolveram uma atividade elétrica mais intensa e consistente (*cluster* com maior tamanho e tempo de vida).

Palavras-chave: Descargas elétricas. Sistema eletricamente ativo. Previsão imediata. ForTraLC.



# STUDY OF NEW METHODS FOR HORIZONTAL FIELD DISPLACEMENT NOWCASTING OF ELECTRICAL ACTIVITY IN STORMS

## ABSTRACT

Brazil is one of the countries with the highest lightning incidence of the planet, consequently it holds considerable number of victims and costly losses in several areas of its economy every year. It is a preponderant factor to monitor and forecast with reliability the electrical activity of a thunderstorm when the main aim is to decrease these damages. Thus, based on this assumption, it was proposed in this research the objective to forecast the of electrical activity horizontal displacement, through implementation of discharges datas from BrasilDAT lightning detection network in land, and accumulated in density fields, in the Forecasting and Tracking the Evolution of Cloud Clusters - ForTraCC algorithm, converting them to Forecasting and Tracking the Evolution of Lightning Clusters - ForTraLC. This way it was investigated which displacement methodology better represents the velocity vector of a lightning cluster, the minimum area to monitor and the best threshold of electric discharge density, these parameters were adopted to validate the forecast system. It was confirmed through this analysis the best results in the lightning density threshold of 1l/pixel/15min, in a minimum area of 5 pixels (320 km<sup>2</sup>) when the system electrically activated is displaced from a temporal average of its velocity vector derived from two step time of 15 minutes. It was verified, at the end of this research, that the new technique presented for the first forecast a detection probability of 51,4%, a false alarm index of 48,7%, a bias of 1 and in length terms , a position error of the forecasted cluster of 1.6 pixels, as well as, the systems with the best forecast were those associated to atmospheric conditions favorable to organized convection and well defined convection's life cycle and therefore develop a more consistent electrical activity (larger cluster and life time).

Keywords: Lightning. Nowcasting. Electrically active system. ForTraLC



## LISTA DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| Figura 2.1 – Estrutura elétrica de uma <i>Cumulonimbus</i> .....            | 11 |
| Figura 2.2 – Incidência de raios no planeta.....                            | 13 |
| Figura 2.3 – Distribuição dos sensores da rede BrasilDAT.....               | 15 |
| Figura 2.4 – Campos de refletividade e previsão de atividade elétrica.....  | 25 |
| Figura 3.1 – Delimitação da área de estudo.....                             | 31 |
| Figura 4.1 – Fluxograma para implementação do ForTraLC.....                 | 36 |
| Figura 4.2 - Velocidade prevista - método conservativo.....                 | 41 |
| Figura 4.3 - Velocidade prevista - método da média temporal.....            | 42 |
| Figura 4.4 - Velocidade prevista - método do deslocamento médio.....        | 43 |
| Figura 4.5 - Velocidade prevista - método de autocorreção de vetores.....   | 43 |
| Figura 5.1 - Erro da distância para os 4 métodos de deslocamento.....       | 51 |
| Figura 5.2 - Erro da distância para os limiares de tamanho mínimo.....      | 54 |
| Figura 5.3 - Famílias analisadas - contínuas e não contínuas.....           | 56 |
| Figura 5.4 - Tamanho médio das famílias analisadas.....                     | 57 |
| Figura 5.5 - Tempo de vida das famílias analisadas.....                     | 58 |
| Figura 5.6 - Destreza do algoritmo para a primeira previsão.....            | 60 |
| Figura 5.7 – Erro da distância e densidade para a primeira previsão.....    | 60 |
| Figura 5.8 - POD, FAR e BIAS para todos os casos.....                       | 62 |
| Figura 5.9 - Histogramas para o erro da distância e densidade.....          | 64 |
| Figura 5.10 - Ciclo de vida das famílias - melhores e piores previsões..... | 65 |
| Figura 5.11 - Tamanho médio das famílias - melhores e piores previsões..... | 66 |
| Figura 5.12 – Atividade elétrica total - melhores e piores previsões.....   | 67 |
| Figura 5.13 - Tipificação dos sistemas.....                                 | 69 |
| Figura 5.14 - Tempo de vida das famílias para o tipo de sistema.....        | 70 |
| Figura 5.15 - Tamanho das famílias para o tipo de sistema.....              | 71 |
| Figura 5.16 - Densidade média de raios para o tipo de sistema.....          | 72 |
| Figura 5.17 – Características das famílias para todos os casos.....         | 73 |
| Figura 5.18 - Índice de falso alarme para todos os casos.....               | 75 |
| Figura 5.19 - Caracterização das famílias para o caso de 30/01/2017.....    | 78 |
| Figura 5.20 - Atividade elétrica total para o caso de 30/01/2017.....       | 79 |
| Figura 5.21 - Imagens de satélite, radar e raios - caso 30/01/2017.....     | 81 |
| Figura 5.22 - Classificação dos sistemas para o caso de 17/01/2017.....     | 84 |
| Figura 5.23 - Atividade elétrica total para o caso de 17/01/2017.....       | 85 |
| Figura 5.24 - Imagens de satélite, radar e raios - caso 17/01/2017.....     | 87 |



## LISTA DE TABELAS

|  |    |
|--|----|
| Tabela 2.1 – Atividade elétrica e produtos de radar, Metzger e Nuss (2013).... | 18 |
| Tabela 2.2 – Avaliação estatística para a estimação unificada.....             | 23 |
| Tabela 2.3 – Avaliação estatística da previsão - método PLR.....               | 27 |
| Tabela 3.1 - Especificações dos 39 casos analisados.....                       | 31 |
| Tabela 4.1 – Contingência 2 x 2.....   | 45 |
| Tabela 5.1 - Avaliação das quatro técnicas de deslocamento.....                | 50 |
| Tabela 5.2 - Comparação dos resultados com a bibliografia.....                 | 62 |
| Tabela 5.3 – Avaliação da previsão em relação a atividade elétrica total.....  | 68 |
| Tabela 5.4- Descrição do evento - 30/01/2017.....                              | 76 |
| Tabela 5.5 - <i>Skill</i> do algoritmo para o caso de 30/01/2017.....          | 82 |
| Tabela 5.6 - <i>Skill</i> do algoritmo para o caso de 17/01/2017.....          | 88 |





## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

|           |   |
|-----------|---|
| ABI       | <i>Advanced Baseline Imager</i>                                     |
| AE        | Atividade elétrica total  |
| Acv       | Autocorreção dos vetores  |
| BrasilDAT | <i>Brazilian Total Lightning Network</i>                            |
| CAPE      | <i>Convective Available Potential Energy</i>                        |
| CAPPI     | <i>Constant Altitude Plan Position</i>                              |
| CCST      | Centro de Ciência do Sistema Terrestre                              |
| CG        | Descarga nuvem solo   |
| ci        | Chuva intensa   |
| CL        | Nível de certeza  |
| CPTEC     | Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos                    |
| CSI       | Índice crítico de acerto  |
| Ctvo      | Método conservativo   |
| dBZ       | Decibéis  |
| ED        | Erro da distância   |
| EL        | Erro da densidade   |
| ELAT      | Grupo de Eletricidade Atmosférica                                   |
| ENLS      | <i>Earth Networks Lightning Sensors</i>                             |
| FAR       | Falso alarme  |
| ForTraCC  | <i>Forecast and Track the evolution of Cloud Cluster</i>            |
| ForTaLC   | <i>Forecasting and Tracking the Evolution of Lightning Clusters</i> |
| GLM       | <i>Geostationary Lightning Mapper</i>                               |
| GOES      | <i>Geostationary Operational Environmental Satellite</i>            |
| gr        | Granizo   |
| h         | Hora  |
| IC        | Descarga intranuvem   |
| IE        | Indicadores estatísticos  |
| INPE      | Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais                           |
| IR        | Infravermelho   |
| K         | Kelvin  |

|                  |   |
|------------------|---|
| kA               | Quiloampere   |
| km               | Quilômetro  |
| LI               | Índice de levantamento  |
| Imed             | Densidade média de raios  |
| I/pixel/15min    | Raios por pixel em intervalos de 15 minutos                     |
| Md               | Deslocamento médio  |
| Mdd              | Média de dois deslocamentos                                     |
| min              | Minuto  |
| POD              | Probabilidade de detecção                                       |
| $\rho$ (raios)   | Densidade de raios  |
| rv               | Rajadas de vento  |
| SEA              | Sistema eletricamente ativo                                     |
| tam              | Tamanho   |
| TB <sub>ir</sub> | Temperatura de brilho do canal infravermelho                    |
| tlc              | Tempo de via  |
| TOA              | <i>time of arrival</i>  |
| UTC              | Tempo universal coordenado                                      |
| VDD              | Variação da densidade de descargas                              |
| VE               | Velocidade estimada   |
| VIL              | Volume de água líquida integrado                                |
| VP               | Velocidade prevista   |
| WDSS-II          | <i>Warning Decision Support System - Integrated Information</i> |
| WTLN             | <i>WeatherBug Total Lightning Network</i>                       |

## SUMÁRIO

|       |   |     |
|-------|---|-----|
| 1     | INTRODUÇÃO.....   | 1   |
| 2     | REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....  | 7   |
| 2.1   | Eletrificação de nuvens convectivas.....  | 7   |
| 2.2   | Incidência de raios sobre o planeta.....  | 12  |
| 2.3   | Detecção de descargas elétricas.....  | 14  |
| 2.4   | Monitoramento e <i>nowcasting</i> de tempestades utilizando dados de descargas elétricas..... | 19  |
| 2.5   | Previsão de descargas elétricas.....  | 22  |
| 3     | DADOS.....  | 29  |
| 3.1   | Definição do campo de estudo.....   | 30  |
| 4     | METODOLOGIA.....  | 35  |
| 4.1   | Assimilação de dados de raios no ForTraCC.....  | 35  |
| 4.2   | Definição dos limiares de rastreio.....   | 36  |
| 4.3   | Classificação dos sistemas eletricamente ativos.....  | 38  |
| 4.4   | Previsão do deslocamento dos sistemas eletricamente ativos.....                               | 40  |
| 4.5   | Avaliação.....  | 44  |
| 5     | RESULTADOS.....   | 49  |
| 5.1   | Avaliação das metodologias de deslocamento.....   | 49  |
| 5.2   | Análise dos limiares de tamanho mínimo.....   | 54  |
| 5.3   | Comparação entre os limiares de densidade de raios.....                                       | 55  |
| 5.4   | Contraste entre as melhores e piores previsões.....   | 65  |
| 5.5   | Análise dos sistemas a partir de sua classificação.....                                       | 68  |
| 5.6   | Estudo de caso.....   | 76  |
| 5.6.1 | Caso nº 12 – 30/01/2017 (o melhor caso).....  | 76  |
| 5.6.2 | Caso nº 10 – 17012017 (o pior caso).....  | 83  |
| 6     | CONSIDERAÇÕES FINAIS.....   | 91  |
|       | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....   | 95  |
|       | APÊNDICES.....  | 103 |



## 1 INTRODUÇÃO

Discorre-se nesta dissertação, acerca do estudo e validação de diferentes técnicas para previsão a curto prazo (até uma hora) do deslocamento horizontal da atividade elétrica de uma tempestade. As descargas atmosféricas originadas em tempestades convectivas causam perdas significativas à sociedade. Além de vítimas fatais e impactos ambientais, raios também ocasionam prejuízos aos sistemas de distribuição e transmissão de energia elétrica e comunicação, e aos setores aeroespacial, de construção civil e agropecuário. Associado à sua ocorrência, encontram-se também altas taxas de precipitação, queda de granizo e vendavais que concomitantemente intensificam os danos.

O Brasil é um dos países que apresentam uma das maiores incidências de descargas elétricas do mundo, conforme apontam Pinto e Pinto Junior. (2003). De acordo com o Grupo de Eletricidade Atmosférica do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (ELAT/INPE), um estudo realizado em 2017 revelou um aumento na ocorrência de raios sobre o país, obtendo para os últimos seis anos um valor médio anual de 77,8 milhões de raios. Além disso, cerca de 300 pessoas são atingidas todos os anos por descargas elétricas no país e dessas, aproximadamente 100 vão a óbito. Cardoso et al. (2014) mostraram que para o período compreendido entre os anos de 2000 e 2009 as descargas atmosféricas vitimaram 1321 pessoas, o que gerou uma taxa anual de 0,8 mortes por milhão de habitantes. A taxa anual brasileira representa um valor mais elevado do que o observado em países desenvolvidos (HOLLE, 2016).

Cardoso et al. (2014) apontam que o Estado de São Paulo apresentou o maior número de fatalidades e que isso se deve ao fato de ser o mais populoso do país. Associado ao fator população, no Estado encontram-se três grandes regiões metropolitanas compreendidas pelas cidades de Campinas, São José dos Campos e São Paulo, que se comparadas aos seus entornos,

apresentaram um incremento médio de 60% a 100% no número de descargas elétricas que atingiram o solo nas estações quentes de 1999-2002 (NACCARATO; PINTO JUNIOR; PINTO, 2003). Segundo os autores, as hipóteses que podem explicar esse fato estão associadas a ilha de calor formada sobre as cidades (hipótese termal) e os efeitos da emissão antropogênica de partículas (hipótese de aerossol) e como elas podem influenciar no desenvolvimento de tempestades.

O grau de severidade de uma tempestade pode ser definido pelo monitoramento de sua atividade elétrica, o que torna-se um parâmetro com possibilidade de implementação nos sistemas de previsão de tempo a curto prazo (*nowcasting*) para avaliar o desenvolvimento de eventos extremos (BETZ et al. 2008; LIU; HECKMAN, 2010; NACCARATO; PINTO JUNIOR, 2012; METZGER; NUSS, 2013; MEYER; HÖLLER; BETZ, 2013a; MEYER; HÖLLER; BETZ, 2013b). Mitigar os desastres ocasionados por eventos severos dependerá, além de outros fatores, do aprimoramento das técnicas de previsão de descargas elétricas. A previsão imediata de tempo utiliza uma combinação de dados meteorológicos com intuito de detectar, monitorar e prever situações de tempo severo, e no que tange ao *nowcasting* de raios, os dados de atividade elétrica da atmosfera são originários de satélites e redes de sensores em superfície.

Desenvolver pesquisas e produtos em previsão a curto prazo de tempo sensibilizam os principais centros meteorológicos e órgãos de defesa no mundo. Os algoritmos para *nowcasting*, apesar de suas peculiaridades, utilizam de modo geral informações atualizadas de um estado de tempo com possibilidades de intensificação, e através de métodos de extrapolação, estimam sua evolução no tempo e no espaço para que desta forma forneçam a previsão como um produto. Podem-se citar como exemplo, o *Warning Decision Support System - Integrated Information* (WDSS-II) utilizado pelo *National Weather Service* americano, o *Short Term Ensemble Prediction System* desenvolvido pelo MET-OFFICE no Reino Unido, entre outros.

No Brasil, o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais através do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC/INPE), conta com um sistema de rastreamento e previsão de tempo a curto prazo que utiliza dados de radares e satélites meteorológicos e permite o monitoramento das tempestades ao longo do seu ciclo de vida, bem como sua previsão, chamado de *Forecast and Track of Cloud Cluster - ForTraCC* (VILA et al., 2008). Desenvolvido na própria instituição, o ForTraCC tem por finalidade monitorar sistemas convectivos e não possui um método de assimilação de dados de descargas atmosféricas para a previsão. O CPTEC coordena ainda o projeto “Previsão Imediata de Tempestades Intensas e Entendimento dos Processos Físicos no Interior das Nuvens: Sistema de Observação e Previsão de Tempo Severo” (SOS-CHUVA), que de acordo com Machado (2015), utiliza dados de satélites e radares de dupla polarização para compreender os processos de microfísica de nuvens e sua evolução, e desta forma desenvolver conhecimento em *nowcasting* que pode ser aplicado à previsão de descargas.

Tratando-se de raios, o SOS-CHUVA disponibiliza dados de radar, que combinados com dados de descargas atmosféricas, permitem modelar os processos de eletrificação de nuvens convectivas e melhorar assim a previsão de tempestades severas. Nesta perspectiva, considera-se também sua concordância com o *Remote Sensing of Electrification, Lightning and Meso-scale/Micro-scale Processes with Adaptive Ground Observations* (RELÂMPAGO), projeto de cooperação científica internacional para estudos de situações de eventos extremos (MACHADO, 2015). Além disso, informações de descargas elétricas podem ser obtidas com sensor *Geostationary Lightning Mapper* (GLM) a bordo do satélite GOES 16 (*Geostationary Operational Environmental Satellite*), que permite operacionalmente o monitoramento em tempo real da ocorrência de raios sobre a América do Sul.

Frente ao significativo número de vítimas e os constantes prejuízos pós-tempestades e descargas atmosféricas, associados às novas ferramentas funcionais, evidencia-se a necessidade de expandir o conhecimento e superar

óbices para melhorar os sistemas de monitoramento e previsão a curtíssimo prazo. As dificuldades associam-se inicialmente à complexa dinâmica dos sistemas convectivos correlacionadas à evolução da atividade elétrica, sua tendência e as limitações, sejam por imprecisão dos aparelhos, no processamento dos dados ou de ambas, em extrair parâmetros morfológicos a serem convertidos em índices empregados nas técnicas de previsão operacional. Não obstante, o curto ciclo de vida característico faz com que esses padrões modifiquem-se rapidamente no tempo, o que torna necessário recalculá-los amiudadamente. Outro fator preponderante, refere-se ao período em que a previsão permanece confiável à ocorrência do evento, o que se acredita ser de algumas dezenas de minutos.

Considerando-se os elevados prejuízos da significativa ocorrência de descargas sobre o Brasil e a necessidade de melhorar as técnicas operacionais de nowcasting para raios a fim de superar os empecilhos aludidos, objetiva-se com este trabalho prever a propagação horizontal da atividade elétrica com base em *clusters* de raios acumulados a partir de dados de redes de detecção de descargas elétricas em superfície, utilizando-se uma versão modificada do algoritmo *Forecasting and Tracking the Evolution of Cloud Cluster* - ForTraCC através da implementação de dados de descargas atmosféricas.

Para tanto, os objetivos específicos e as perguntas a serem respondidas são:

- A partir da implementação de dados de descargas elétricas no algoritmo ForTraCC, converter-lo a ForTraLC (*Forecasting and Tracking the Evolution of Lightning Clusters*);
- Definir a melhor metodologia de representação do vetor velocidade da atividade elétrica em uma tempestade e assim prever a posição dos *clusters* de raios com o ForTraLC;
  - *Questão*: Qual a melhor forma matemática de modelar a variação espacial (posição em função do tempo) de um aglomerado de raios?



- Determinar a área mínima (limiar de tamanho) com presença de atividade elétrica que exprima maior eficiência para seu rastreamento e previsão no algoritmo ForTraLC;
  - *Questão:* Qual a área mínima de um *cluster* de descargas elétricas pode ser detectada, monitorada e prevista com destreza?
- Precisar limiares de densidade de raios adequados ao monitoramento e previsão de atividade elétrica para a área de abrangência do projeto SOS-CHUVA a partir de dados de redes de detecção de raios em solo;
  - *Questão:* Qual a quantidade de raios acumulados no tempo e no espaço é ideal para detectar e prever atividade elétrica?
- Avaliar a eficiência do sistema de previsão a partir das diferentes técnicas e parâmetros preditores, bem como para diferentes intensidades de atividade elétrica;
  - *Questões:* É possível fazer previsão de sistemas que sofrem processos de “junção” e “separação”? Qual o tempo máximo a previsão do deslocamento da atividade elétrica mantém um grau de confiabilidade aceitável? Há alguma relação entre a atividade elétrica total e o *skill* das previsões? Qual a eficiência da previsão apresentada para tempestades mais organizadas e isoladas? O que se pode aprender com os erros observados para melhorar a previsão da atividade elétrica?

Com o propósito de facilitar as discussões metodológicas e textuais deste trabalho, conceituam-se:

- Representados (as) pela letra “I”, raios, descargas atmosféricas e descargas elétricas como todo o registro de transferência de carga elétrica de certa região x em uma nuvem para a região y, sendo essa, localizada em nuvens (descarga elétrica intranuvem - IC) ou no solo (descarga elétrica nuvem solo – CG), através da rede de Detecção de Raios em superfície BrasilDAT;

- Descargas elétricas acumuladas no tempo e no espaço como “densidade de descargas elétricas ou densidade de raios ou densidade de descargas atmosféricas”, representada por “ $\rho(\text{raios})$ ”. A unidade da densidade de raios para **esse objeto** é “raios/pixel/15minutos” (l/pixel/15min), em que 1 (um) pixel equivale uma área de 64 km<sup>2</sup>;
- Atividade Elétrica Total (AE), como o número de raios registrados pela rede de detecção de descargas elétricas em solo BrasilDAT em cada caso, referindo-se à ela, a unidade de medida “raios/dia” (raios por dia). As descargas elétricas são contadas a partir das 00h até às 23h59minutos do referido caso;
- “Um caso”, a partir da definição adotada nos registros do Projeto SOS-CHUVA, como 1 dia (00h às 23h59minutos) a qual se registrou tempestades com apontamentos de ventos fortes, chuva intensa e granizo;
- Sistema Eletricamente Ativo (SEA) como um *cluster* espacial - temporal de descargas elétricas através de um identificador individual.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Eletrificação de nuvens convectivas

O início de uma nuvem convectiva ocorre basicamente a partir do instante que uma porção de ar quente e úmido ascende e resfria-se adiabaticamente até atingir a supersaturação, de modo que o vapor d'água ao se condensar forma um aglomerado de gotículas e conseqüentemente uma nuvem *cúmulus*. No caso de uma atmosfera com condições termodinâmicas favoráveis, mais parcelas são forçadas a subir e a *cúmulus* tende a desenvolver-se até tornar-se uma *cumulonimbus*, também conhecida como nuvem de tempestade. Quando as parcelas superam a isoterma de 273,15 K uma fração das maiores gotículas de água congelam-se, as demais líquidas, são caracterizadas como partículas de água super-resfriadas, e em regiões acima da isoterma de 233,15 K consideram-se que todas as gotículas estão congeladas. Na área entre as duas isotermas encontra-se a fase mista em que água líquida e partículas de gelo são encontradas (RAKOV; UMAN, 2003).

Uma nuvem *cumulonimbus* tem duração de poucas horas e seu ciclo de vida é dividido em 3 estágios: **i)** Estágio de crescimento; **ii)** Estágio maduro e **iii)** Estágio de decaimento. Em estágio maduro, uma célula tem dimensões horizontais de cerca de 1 - 8 km, e na vertical, estende-se por aproximadamente 8 km a partir da base (MASON; MASON, 2003). Rakov e Uman (2003) afirmam que a convecção é inibida na tropopausa pela inversão térmica que ocorre na estratosfera (a uma altitude de ~18 km em regiões tropicais) e conseqüentemente apenas nuvens com fortes correntes ascendentes ( $\geq 10 \text{ ms}^{-1}$ ) conseguem penetrá-la atingindo altitudes de topo de aproximadamente 20 km. Segundo os autores, a atividade elétrica está presente geralmente em nuvens convectivas com desenvolvimento vertical a partir de 3 km.

Os movimentos verticais que estão presentes no interior de uma tempestade

são importantes para o seu desenvolvimento, e contribuem também, para os processos de separação de cargas e eletrificação das nuvens através da interação (colisões) de partículas na fase mista (MASON; MASON, 2003), (RAKOV; UMAN, 2003) e (PEREIRA; ALBRECHT, 2016). A eletrificação de uma nuvem convectiva pode ser descrita por três mecanismos de separação de cargas: **i) Carregamento não-indutivo, ii) Carregamento indutivo e iii) Carregamento convectivo.**

O mecanismo de carregamento não-indutivo tem boa aceitação entre a comunidade científica por representar a formação da estrutura elétrica tripolar de uma tempestade. Esta teoria não considera a existência de um campo elétrico inicial e partículas polarizadas, mas que a geração de cargas elétricas ocorre através de colisões entre *graupel* e cristais de gelo na presença de gotículas de água super-resfriadas (RAKOV; UMAN, 2003). O mesmo ambiente de geração de cargas (colisão entre partículas de gelo na presença de gotículas super-resfriadas) é atestado por Stolzenburg, Marshall e Krehbiel (2015), utilizando medidas *in situ* e remotas feitas em tempestades.

As colisões ocorrem quando *graupel* cai e encontra cristais de gelo e gotículas de água super-resfriadas (formação de *rimel*) em suspensão ou movimento vertical. Na ausência de cristais não há transferência de carga ao *rimel*. A velocidade relativa entre os hidrometeoros e o tamanho dos cristais ponderam significativamente a quantidade de carga transferida. A magnitude e o sinal da carga transpassada durante as colisões têm dependência direta da temperatura, conteúdo de água líquida e do núcleo de condensação (impureza). Quando o conteúdo de água líquida é elevado e a temperatura ultrapassa um certo limiar (temperatura crítica) o *rimel* adquire carga positiva, caso contrário fica carregado negativamente. A exemplo, para um conteúdo de água líquida de  $1 \text{ gm}^{-3}$  a temperatura crítica é da ordem de 253,15 K (JAYARATNE; SAUNDERS; HALLETT, 1983). Em estudos mais recentes, Jayaratne e Saunders (2016) afirmam que o granizo adquire carga positiva para qualquer temperatura entre 273,15 K e 259,15 K em colisões com cristais

de gelo no interior da nuvem.

Vários trabalhos trazem resultados consistentes com o método de carregamento não-indutivo, como por exemplo: Macgorman et al. (2005) através da análise da estrutura elétrica de duas supercélulas; Stolzenburg, Marshall e Krehbiel (2015) ao examinarem a eletrificação inicial de três tempestades, e Li et al. (2017), em observações a tempestades ocorridas sobre o Qinghai-Tibet Plateau. Fundamentado no trabalho de Mattos (2015), reportam-se resumidamente os mecanismos de carregamento indutivo e convectivo, uma vez que respectivamente não satisfazem o início da transferência de cargas e a eletrificação nas tempestades e, portanto, são considerados processos de carregamento secundários.

O carregamento convectivo deve-se ao fato de que as correntes ascendentes carregam para o interior da nuvem em desenvolvimento íons positivos que são capturados por gotículas de água e assim transportados até o topo da nuvem. Por interação eletrostática, as partículas com cargas positivas localizadas na parte superior atraem íons negativos e os aprisionam na fronteira nuvem atmosfera onde se forma uma camada de blindagem. A medida que a nuvem se desenvolve, correntes descendentes começam a existir e deslocam a camada de blindagem para a base da nuvem, dando origem aos centros de cargas. Continuamente íons positivos adentram na nuvem e realimentam o processo.

No mecanismo de carregamento indutivo considera-se que os hidrometeoros em movimento vertical no interior da nuvem polarizam-se por indução do campo elétrico de tempo bom ( $\sim 100 \text{ V.m}^{-1}$ ) ou pelo campo elétrico existente no ambiente, tornando-se a parte superior da partícula polarizada com carga negativa e a parte inferior com carga positiva. Em decorrência do movimento a que estão submetidos, os hidrometeoros colidem e conseqüentemente transferem cargas entre si (há separação de cargas). A posterior formação dos centros de carga na nuvem deve-se à segregação gravitacional dos fragmentos

mais massivos portadores de carga elétrica.

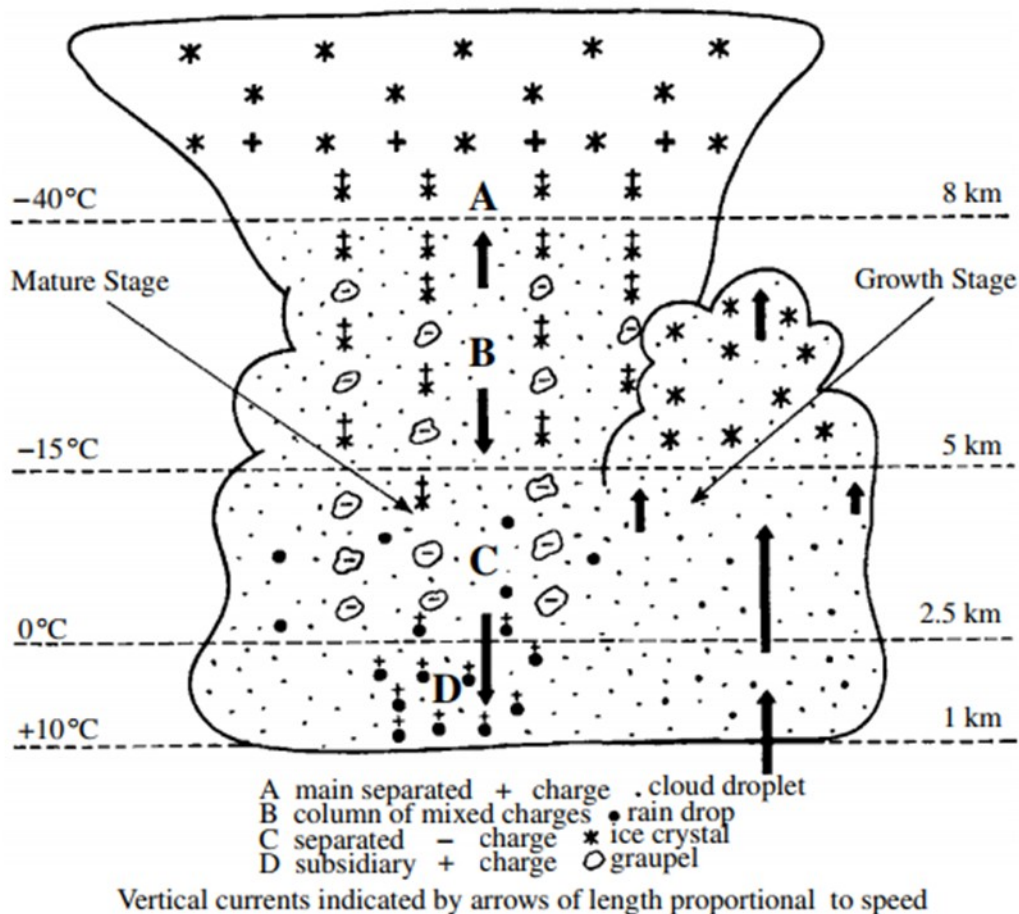
A ação contínua de um ou mais mecanismos de eletrificação forma no interior da nuvem arranjos de partículas com cargas de mesmo sinal. Descreve-se a estrutura elétrica de uma tempestade através de diferentes representações teóricas, desde a mais simples, que considera a existência de dois centros de carga elétrica - arranjo dipolar - bem como a que traz a presença de várias regiões carregadas eletricamente - estrutura multipolar. Os primeiros estudos acerca da distribuição de carga em nuvens convectivas foram realizados por Wilson (1921) e Simpson (1927), que descreveram uma estrutura elétrica dipolar, na qual consideraram que a polaridade de uma nuvem de chuva é positiva quando o centro de carga superior é positivo e negativa quando a mesma região de carga é negativa, e que predominantemente, há um acúmulo de cargas negativas na parte superior da nuvem e uma região abaixo, onde concentram-se as cargas positivas, respectivamente. Em conformidade, Li et al. (2017) reportam e corroboram os resultados de outras pesquisas recentes que relatam a estrutura elétrica de tempestades que ocorrem em regiões de planícies na China como dipolar, durante os estágios inicial e maduro.

Krehbiel (1986) representa a estrutura dipolar de uma tempestade considerando que há um acúmulo de cargas positivas na parte superior da nuvem (centro de carga positivo superior) e uma região abaixo onde concentram-se as cargas negativas (centro de carga negativa inferior). Como a nuvem desenvolve-se verticalmente, o centro de cargas positivas aumenta sua altitude na mesma proporção, e por sua vez, a carga líquida negativa distribuída horizontalmente permanece em uma posição praticamente constante, durante toda atividade elétrica.

Por outro lado, o autor afirma que a disposição dipolar é simplificada e que a distribuição de cargas é mais complexa e precisa ser mais bem compreendida. Mason e Mason (2003) em concórdia, relatam que além da existência das principais regiões de cargas (positiva superior e negativa inferior), abaixo do

centro de cargas negativas encontram-se uma - formando o tripolo - ou mais, restritas regiões de cargas positivas. Para Williams (1989, p.1351) “o tripolo consiste em uma região dominante de cargas negativas com cargas positivas acima e outra região de cargas positivas localizada abaixo com aproximadamente a mesma ordem de magnitude de carga”. A figura porvir ilustra a distribuição de cargas no interior de uma nuvem.

Figura 2.1 – Representação da estrutura elétrica (tripolo) em uma *Cumulonimbus*.



Nuvem de tempestade e as regiões de carga dispostas em um tripolo elétrico.

Fonte: Mason e Mason (2003).

A origem das cargas positivas que se acumulam na parte inferior deve-se à existência de íons positivos na atmosfera. Estes, são transportados para dentro da nuvem pelas correntes ascendentes e pela precipitação que ocorre em

determinadas regiões intranuvem denominadas *lower positive charge centers* - LPCCs (MASON; MASON, 2003). O centro superior de carga positiva atrai da vizinhança cargas negativas para a borda da nuvem que neutralizam seu efeito eletrostático para um observador externo, enquanto que descargas elétricas ocorrem entre o centro de cargas negativas e a superfície terrestre através de um ou mais canais distintos (KREHBIEL, 1986). A existência de um tripolo elétrico em uma tempestade é também retratada por Zheng et al. (2010) em uma tempestade que continuou por mais de 24 horas e Li et al. (2017), na qual o identificaram no estágio dissipativo de uma tempestade, ambas na China.

Através de experimentos *in situ*, Marshall e Rust (1991) corroboram os trabalhos supracitados, porém identificam uma distribuição de cargas mais complexa (maior número de centros) e descrevem uma estrutura elétrica multipolar, com a existência de 4 a 10 regiões de cargas em uma nuvem. A estrutura multipolar também foi discutida por Stolzenburg, Rust e Marshall (1998) ao verificarem a presença de aproximadamente quatro e seis regiões de carga com polaridades alternadas, dentro e fora do núcleo convectivo, respectivamente. Em veracidade com a existência de uma estrutura de cargas mais complexa, têm-se por exemplo, os trabalhos de Macgorman et al. (2005); Li et al. (2013) e Pineda et al. (2016).

## **2.2 Incidência de raios sobre o planeta**

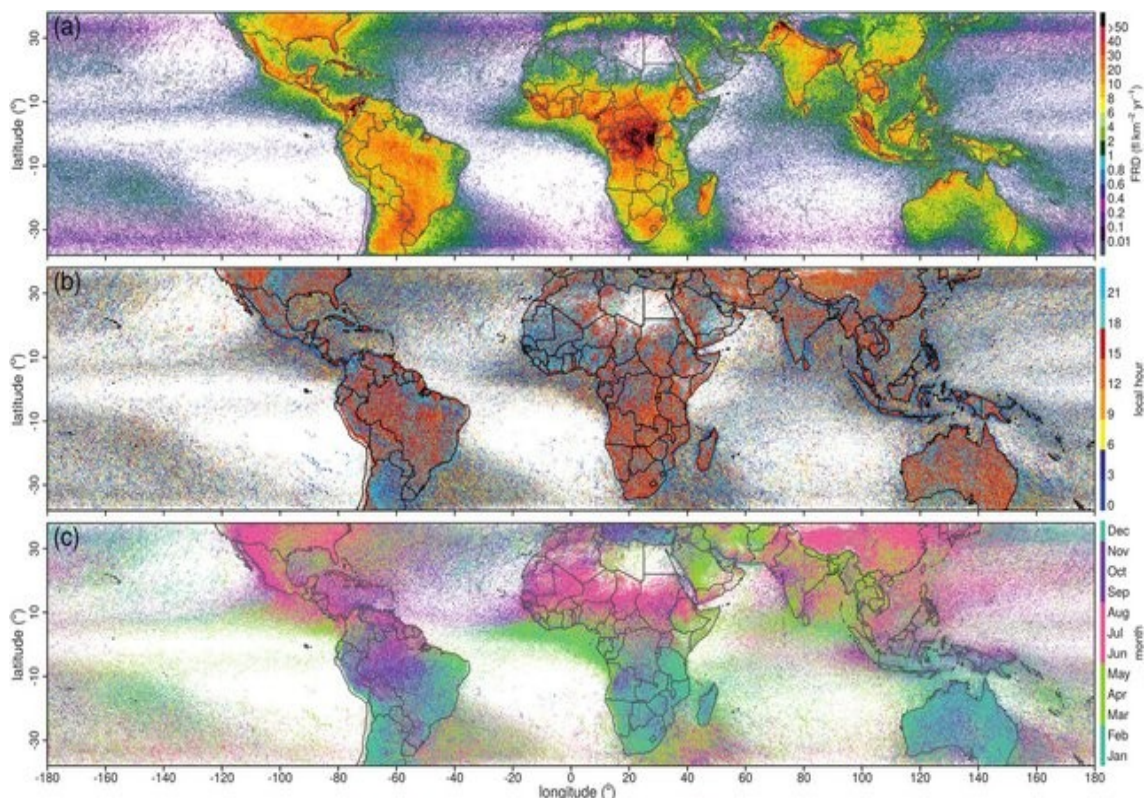
A frequência da presença de atividade elétrica em tempestades é dependente de fatores meteorológicos regionais, tais como: Brisa nas regiões costeiras, eventos de escala sinótica, relevo montanhoso, regiões de monções, diferentes capacidades térmicas da superfície, entre outros. Em tese, a maior ocorrência de raios no planeta concentra-se sobre os continentes e o pico anual de incidência decorre nos períodos vespertinos das estações quentes. Porém, a mesma característica não é observada em locais que sofrem influência de alguma das causas susoditas (ALBRECHT et al., 2016). Da compilação dos 16 anos (1998 - 2013) de medidas do sensor *Lightning Imaging Sensor* - LIS,



esses autores obtiveram uma climatologia de descargas elétricas para a região da Terra compreendida entre as latitudes de 30° e -30°, conforme pode-se observar na figura abaixo.

Na Figura 2.2.a, têm-se taxa da densidade de raios em *flashes.km<sup>-2</sup>.ano<sup>-1</sup>*. Percebe-se que a região central da África, uma extensão norte das Américas do Sul e Central e a região do Himalaia exibem os maiores montantes por área, superando os 50 *flashes.km<sup>-2</sup>.ano<sup>-1</sup>*. A Figura 2.2b indica-nos as mais elevadas densidades por hora local e a Figura 2.2c apresenta-nos a quantidade de descargas por área mensal.

Figura 2.2 – Incidência de raios no planeta.



Climatologia para a ocorrência de descargas elétricas no período compreendido entre os anos de 1998 a 2013. **2.2a)** Taxa da densidade de raios (*flashes.km<sup>-2</sup>.ano<sup>-1</sup>*) **2.2b)** Hora local do máximo de atividade elétrica; **2.2c)** Mês do ano do máximo de atividade elétrica.

Fonte: Albrecht et al. (2016).

Para a seção territorial em estudo (região de Campinas-SP), depreende-se

pelo trabalho de Chronis et al. (2015) corroborado por Albrecht et al. (2016), que a atividade elétrica mais significativa ocorre nos meses de verão, ao final da tarde, instante esse na qual atinge seu pico e passa a diminuir no transcorrer da noite. Este comportamento observado é decorrente do ciclo diurno da convecção e contabiliza anualmente, valores superiores a 30 *flashes.km<sup>-2</sup>*.

### **2.3 Detecção de descargas elétricas**

“Uma descarga elétrica consiste na transferência de carga elétrica de uma determinada região A da atmosfera (nuvem) para a Terra, ou a partir de uma região A1 para outra A2, ambas na atmosfera” (WILSON, 1921 p. 87). Baseado na polaridade observada, identificam-se quatro diferentes tipos de descargas entre a nuvem e o solo, conforme Rakov e Uman (2003): **i)** Descarga nuvem solo negativa; **ii)** Descarga nuvem solo positiva; **iii)** Descarga solo nuvem negativa e **iv)** Descarga solo nuvem positiva. Os autores confirmam que cerca de  $\frac{3}{4}$  do total de raios ocorrem entre duas regiões da atmosfera e não envolvem a superfície terrestre. Essas descargas que não envolvem a superfície e objetos adjacentes são classificadas como **i)** Intranuvem, **ii)** Entre nuvens e **iii)** Nuvem atmosfera.

A partir da ocorrência de uma descarga elétrica, significativa quantidade de energia é emitida através de ondas mecânicas e ondas eletromagnéticas em um amplo espectro de frequências, que compreende desde  $< 1$  Hz a  $\sim 300$  MHz (baixa frequência), de 300 MHz a 300 GHz (alta frequência) e nas frequências visíveis entre  $10^{14}$  Hz e  $10^{15}$  Hz (RAKOV; UMAN, 2003). As ondas eletromagnéticas são emitidas em todas as direções e podem ser detectadas com significativa acurácia e precisão em duas ou três dimensões, por sensores - de acordo com a sua engenharia - distribuídos na superfície terrestre em redes de detecção de raios. As ondas emitidas propagam-se por milhares de quilômetros e devido a isso normalmente são detectadas por vários sensores da mesma malha, o que garante maior precisão na localização da descarga. Através da correlação entre a forma de onda e a amplitude, pode-se derivar o

pico de corrente e a polaridade do raio (KOHN et al., 2011; LIU; HECKMAN, 2010).

A *Brazilian Total Lightning Network* (BrasilDAT), rede de detecção de descargas elétricas utilizada no Projeto SOS-CHUVA, da qual provém os dados deste trabalho, opera no intervalo de frequência de 1 Hz a 12 MHz e é sensível a descargas Intranuvem (IC) e nuvem solo (CG) simultaneamente. A detecção é baseada no método *time of arrival* (TOA) - múltiplos sensores são admitidos para localização dos raios - e cada forma de onda experimentada em campo é reportada à uma central de processamento de dados. A BrasilDAT é composta por 58 sensores (em 2017) operacionais do tipo *Earth Networks Lightning Sensors* (ENLS) distribuídos em todas as regiões do país exceto na amazônica (NACCARATO; PINTO JUNIOR, 2012). A disposição dos sensores em operação na superfície é representada pela a figura abaixo.

Figura 2.3 – Distribuição dos sensores da rede BrasilDAT.



Fonte: Naccarato (2019).

Segundo o Centro de Ciência do Sistema Terrestre (CCST) do INPE parceiro do Grupo de Pesquisa em Eletricidade Atmosférica (ELAT), a eficiência de

detecção de descargas nuvem solo para as regiões cobertas por sensores é de 90% e a localização é feita diferindo de no máximo 1 km do ponto de ocorrência do raio. Para áreas sem cobertura de sensores, a eficiência de detecção cai em aproximadamente 50% e o local de incidência do raio pode divergir em até 10 km. A partir da detecção das descargas, calculam-se na central de processamento os parâmetros que as caracterizam.

Uma das desvantagens das redes de detecção é que uma parcela dos raios não é identificada e distinta se intranuvem ou nuvem solo com precisão, principalmente nos eventos que apresentam baixos e altíssimos picos de corrente (CUMMINS et al., 1998; ORVILLE et al., 2002; JACOBSON et al., 2000) - apud BETZ et al. 2004. Além do mais, Meyer, Höler e Betz (2013b) apontam que a distribuição desuniforme dos sensores das redes na superfície terrestre ocasiona incertezas na identificação espacial das descargas elétricas, e, por conseguinte, podem originar imprecisão no monitoramento de tempestades.

Com o desenvolvimento da ciência espacial, tornou-se viável o desenvolvimento de sensores remotos para detectar descargas elétricas a bordo de satélites geoestacionários e de órbita baixa (detecção limitada), uma vez que radiação eletromagnética é emitida em direção ao espaço quando uma descarga elétrica ocorre. Além do mais, o uso de imagens de satélites meteorológicos permitem avaliar parâmetros de profundidade e topo de nuvem, dos quais podem-se obter informações associadas a eletrificação das nuvens. Atualmente, a detecção da ocorrência de raios via satélite conta com o moderno *Geostationary Lightning Mapper* (GLM) a bordo do satélite GOES-16 (*Geostationary Operational Environmental Satellite*), um sensor óptico que é capaz de detectar descargas elétricas durante o dia e a noite.

O fotossensor GLM é sensível ao comprimento de onda de 777,4 nm e tem capacidade contínua de identificar descargas intranuvem e nuvem solo a taxa de uma imagem a cada 2 ms. Uma imagem gerada leva cerca de 20 segundos

para ser disponibilizada ao usuário final. Sua resolução espacial é de 8 km sobre o equador (nadir) e de 14 km nas extremidades do campo de visada, que lhe confere ampla cobertura na maior parte do hemisfério ocidental. Apesar da significativa cobertura, o aparato tem eficiência de detecção mínima de 70% (GOODMAN et al., 2010).

Outra forma de avaliar o desenvolvimento da atividade elétrica em uma tempestade é através do uso de informações de radares meteorológicos devido a sua capacidade de diferenciar os hidrometeoros no interior da nuvem. O sensoriamento por radar descreve a microfísica e estrutura interna da célula convectiva e suas variações, isto posto, torna-se possível inferir a presença de atividade elétrica (LÓPEZ; AUBAGNAC, 1997). Uma relação entre as flutuações do total de raios e o comportamento de parâmetros de radar é apresentado por Metzger e Nuss (2013), que perceberam estreita ligação entre as rápidas variações na taxa de raios e as variações no *vertically integrated liquid* (VIL), densidade de VIL e altura da refletividade de 55 dBZ derivados de radar, que favorecem assim, através do seu monitoramento a previsão de tempo severo. A relação é sumarizada na Tabela 2.1.

Constata-se pela tabela, que para os casos de granizo severo (>19 mm) as assinaturas de radar de pelo menos dois parâmetros devem aumentar, e a atividade elétrica, comporta-se com incremento nas descargas intranuvem (IC), enquanto que descargas nuvem solo (CG) tendem a diminuir ou permanecerem constantes. No caso de vendavais, nota-se um comportamento inverso das assinaturas, ou seja, um rápido decréscimo em dois dos parâmetros delimitados, ao passo que o número de descargas que atingem a superfície terrestre aumenta e as descargas que ocorrem no interior da nuvem usualmente crescem. A pesquisa apontou também, que a presença de *lightning jump* é observada em tempestades severas e não severas e que poucos minutos antes da detecção dos *jumps* presencia-se as variações dos índices.

Tabela 2.1 – Relação entre atividade elétrica e produtos de radar de acordo com Metzger e Nuss, (2013) .

| <b>Assinatura de radar</b>   | <b>Granizo severo</b>   | <b>Vento Severo</b>  |
|--|---|--|
| Varição do limiar de VIL (10 Kg.m <sup>-2</sup> ) a cada varredura volumétrica             | VIL, densidade de VIL ou altura de 55 dBZ   | VIL, densidade de VIL ou altura de 55 dBZ  |
| Varição do limiar de densidade de VIL (0.5 g.m <sup>-3</sup> a cada varredura volumétrica) | Dois parâmetros devem aumentar pelos limiares considerados                                  | Dois parâmetros devem diminuir pelos limiares considerados   |
| Varição do limiar de altura de 55 dBZ (305 m a cada varredura volumétrica)                 |   |  |
| Comportamento das descargas elétricas  | Descargas intranuvem aumentam, enquanto que as nuvem solo permanecem constantes ou diminuem | Descargas nuvem solo aumentam; descargas intranuvem aumentam (na maioria dos casos) ou permanecem constantes/diminuem. |

Fonte: Adaptada de Metzger e Nuss (2013). Tradução: Produção do Autor.

Corroborando Metzger e Nuss (2013), Sperling (2018) observa que os picos de descargas elétricas manifestam-se minutos após o súbito aumento na produção de hidrometeoros, que está diretamente relacionada à intensidade das correntes ascendentes, e conseqüentemente essas, governam a atividade elétrica da tempestade. O autor também afirma que uma característica peculiar de uma tempestade severa é a grande produção de hidrometeoros, e por essa razão, intensa atividade elétrica. Ainda, segundo Sperling (2018), esse padrão torna-se passível de ser descrito a partir das informações morfológicas fornecidas por radares meteorológicos durante o ciclo de vida das tempestades, avaliando-se as variações do volume de água líquida integrado (VIL), e proporcionalmente, do conteúdo integrado de gelo no interior da nuvem.

## 2.4 Monitoramento e *nowcasting* de tempestades utilizando dados de descargas elétricas

Melhorias nas técnicas de *nowcasting* podem ocorrer através do rastreamento direto de células e de processos de modelagem baseados em diversas fontes de dados (BETZ et al., 2008). O monitoramento de sistemas de tempo severo normalmente é realizado através de imagens de satélites ou de radares meteorológicos ou ambos. O uso de dados de descargas atmosféricas para esse propósito, independentemente da sua fonte, também pode ser utilizado, em conformidade ao propósito deste trabalho.

Uma metodologia de rastreamento de tempestades que utiliza apenas dados de descargas elétricas oriundos da *New Lightning Detection Network* (LINET) foi desenvolvida por pesquisadores em Munique. Descrito por Betz et al. (2008), o simples e praticável método de rastreamento “busca” em intervalos de 10 minutos por *clusters* (aglomerados de píxeis) de raios (célula) que são representados através de polígonos. Uma célula possivelmente existe quando o número de descargas por área ( $1 \times 1 \text{ km}^2$ ) detectado supera um limiar mínimo e sua borda é definida quando a densidade de descargas se torna menor que este limiar. Considerou-se, sem utilizar a sobreposição de dados, que o sistema continua, quando um novo *cluster* é encontrado em  $t_1$  (tempo final) e sua localização e velocidade satisfazem os limites selecionados para a célula considerada em  $t_0$  (tempo inicial). Apesar das dificuldades encontradas na identificação de casos que ocorrem *Split* e *merge* e da necessidade de estudos continuados para superar os empecilhos, os autores verificaram que uso dos dados fornecidos pelas redes são extremamente úteis, aplicáveis operacionalmente e tornam-se uma alternativa para monitorar tempestades - mais significativos àquelas com longo ciclo de vida - em tempo real quando outros dados não estão disponíveis.

Liu e Heckman (2010) realizaram um trabalho para previsão de tempo severo e emissão de avisos meteorológicos, baseado em dados de descargas elétricas



da rede *WeatherBug Total Lightning Network* (WTLN). Semelhantemente ao trabalho realizado em Munique, a determinação da célula e suas fronteiras fundamenta-se na densidade de raios, sua representatividade consiste em um polígono, e o rastreamento neste caso, dar-se-á pela correlação entre “polígonos sucessivos”. Desde que é possível acompanhar um *cluster* no tempo, torna-se praticável o cálculo de sua velocidade, área e de índices como a taxa e o total de raios, e através da vigilância da variação destes parâmetros, pode-se derivar o potencial de severidade da tempestade. Segundo os autores, os limiares que permitem identificar e seguir uma célula variam para diferentes regiões e tipos de tempestades. Para a validação deste estudo o limiar de 25 *flashes.min<sup>-1</sup>* foi determinado, porém avaliou-se a necessidade de continuidade das pesquisas para associá-lo ao tipo de tempestade. Os pesquisadores relacionaram ainda a taxa de raios com tempo severo e verificaram que a taxa de descargas IC e a presença de *jumps* podem ser indicadores de tempestades associadas a granizo, vendavais e tornados.

Kohn et al. (2011) corroboram os benefícios do uso de dados de descargas elétricas associados à *nowcasting* de tempestades referenciados, e reforçam que, uma de suas maiores vantagens é o fato que são dados quase que em tempo real, além do mais, sua capacidade de detecção de eventos a milhares de quilômetros de distância da fonte pode ser aplicada em áreas sem cobertura de radar. Depreendem ainda, que os sistemas definidos por um radar também podem ser obtidos com dados de raios, e, associando as duas fontes, pode-se avaliar o estágio do ciclo de vida da tempestade.

Um método híbrido de rastreamento de tempestades que associa dados de descargas elétricas e de radar é apresentado por Meyer, Höler e Betz (2013b). Na técnica, as duas fontes de dados são trabalhadas separadamente em duas rotinas e fornecem a mesma informação (rastreamento), que ao final são vinculadas para obter o monitoramento pelo método híbrido. A partir dos dados de descargas (*clusters*), representaram-se por pontos circulares com diâmetro de 7 píxeis (~4,5 km) as regiões com atividade elétrica e agruparam-se os



pontos em mapas de frequência de descargas elétricas. Os mapas são analisados e as regiões com o limiar mínimo de 1 evento a cada 3 minutos é selecionada e classificada como um objeto, que é então rastreado no tempo por sobreposição espacial. O passo de tempo entre cada objeto identificado com dados de descargas elétricas e radar é de 2,5 e 5 minutos, respectivamente, permitindo assim, comparar e vincular ambas as células em tempos coincidentes com o produto. Os resultados nos dois casos são afins, logo, evidenciou-se positivamente a utilidade de dados de descargas elétricas como uma fonte independente para rastreamento de tempestades, bem como, monitorar a atividade elétrica presente.

A variação da densidade de descargas (VDD) associada ao *vertically integrated liquid* derivado de radar foi utilizada por Schultz et al. (2016) para rastrear tempestades. O VIL foi calculado a partir da fusão das informações para a mesma área dos 5 radares empregados e os dados de descargas elétricas eram um *proxy* do que é oferecido hoje pelo GLM, com resolução de grade de  $0.08^\circ \times 0.08^\circ$ . A taxa da densidade foi calculada a cada minuto, baseada no total de raios estimado minuto a minuto e a cada 5 minutos. Ambos os dados foram combinados a cada 5 minutos para monitorar os *clusters* de tempestades em um produto a qual denominaram VILFRD. Os limiares de  $\sim 45 \text{ kg.m}^{-1}$  e taxas de  $\geq 45 \text{ flashes.min}^{-1}$  estabelecidos para VIL e VDD, respectivamente, se superados, individualmente, recebem ponderação maior, o que garante maior confiabilidade no rastreamento.

Em análise preliminar, Schultz et al. (2016) notaram maior consistência no rastreamento do núcleo da tempestade e da região das correntes ascendentes quando dados de descargas são assimilados, em comparação com uso exclusivo de dados de radar. Perceberam também, que o VILFRD por identificar as porções da tempestade onde ocorrem grande produção de gelo e atividade elétrica (partes mais intensas), auxilia em seu rastreamento. Além do mais, os dados de descargas fornecidos pelo GLM podem ser utilizados no desenvolvimento de ferramentas de rastreamento de tempestades para regiões

onde outras fontes de dados são esparsas, como por exemplo, os oceanos.

Um estudo cujo objetivo foi caracterizar os processos físicos e elétricos em tempestades severas com precipitação de granizo que ocorreram sobre a região sul do Brasil, desenvolvido por Sperling (2018), também realça as vantagens do uso dos dados de descargas elétricas para monitoramento de sistemas meteorológicos de alto impacto. Não apenas pela ampla cobertura oferecida pelas redes de detecção em superfície, principalmente em regiões com menor disponibilidade de dados, mas também pelas relações obtidas entre a variação da atividade elétrica e o desenvolvimento dos sistemas convectivos desse tipo de tempestade.

## **2.5 Previsão de descargas elétricas**

Entre as várias fontes e formatos de dados, a metodologia empregada na previsão de raios pode utilizar somente uma ou a combinação de múltiplas, de acordo com o objetivo do trabalho. Atualmente, funções como a *Total Membership Function*, *Radial Basis Functions*, redes neurais e funções baseadas em Lógica *Fuzzy* podem ser utilizadas no desenvolvimento de algoritmos para *nowcasting* de raios que realizam detecção e monitoramento de *clusters* e previsão de descargas elétricas, como por exemplo o *Warning Decision Support System - Integrated Information (WDSS-II)*, *WeatherBug Dangerous Alert (WDTA)* e o *Total Membership Function for Lightning (TMF)*.

A partir da premissa que é possível fazer *nowcasting* de raios com dados de descargas elétricas e imagens no infravermelho de satélite sem qualquer outra informação, Karagiannidis, Lagouvardos e Kotroni (2016) desenvolveram uma ferramenta de previsão de raios para até 1 hora na Grécia. Consideraram-se indicadores de atividade elétrica o grau de glaciação do topo, a profundidade e a taxa de crescimento da nuvem, derivados da temperatura de brilho fornecida pelos canais infravermelho 6.2  $\mu\text{m}$  e 10.8  $\mu\text{m}$  de um satélite meteorológico

geoestacionário. Realizou-se a *nowcast* separadamente de cada indicador e inferiu-se um nível de certeza (CL) final através de uma soma algébrica decorrente de cada previsão, que foi denominada de estimaco unificada. Os dados de descarga são assimilados apenas para melhorar a habilidade da previsão ao final da estimaco unificada.

Para a área de previsão, considerou-se presença de atividade elétrica se pelo menos 10% dos píxeis apresentaram valores aceitáveis para os índices previso-res limiarizados. Satisfeita essa condio, examinaram-se para a mesma localidade os dados de descargas elétricas, que no caso de excederem o limiar de 2 raios no intervalo de 15 minutos, considerou-se a previsão para ocorrência de descargas para a próxima hora naquela área como positiva. O nível de certeza da previsão varia de 0 a 3, sendo 0 quando nenhuma atividade elétrica é esperada e 3 a maior probabilidade de incidência. Realizaram-se avaliaes estatísticas da probabilidade de deteco (POD), taxa de alarme falso (FAR) e ndice crítico de acerto (CSI) para cada preditor separadamente e para a estimaco unificada, sem e com a incorporao dos dados de descargas atmosféricas. Exibem-se na Tabela 2.2, os três indicadores estatísticos (IE) para a estimaco unificada, além do BIAS.

Tabela 2.2 – Avaliao estatística para a estimaco unificada.

| <b>IE</b>   | <b>CL<sub>1</sub></b> | <b>CL<sub>1</sub>*</b> | <b>CL<sub>2</sub></b> | <b>CL<sub>2</sub>*</b> | <b>CL<sub>3</sub></b> | <b>CL<sub>3</sub>*</b> |
|-------------|-----------------------|------------------------|-----------------------|------------------------|-----------------------|------------------------|
| <b>POD</b>  | 0,88                  | 0,81                   | 0,72                  | 0,7                    | 0,58                  | 0,5                    |
| <b>FAR</b>  | 0,55                  | 0,44                   | 0,46                  | 0,37                   | 0,4                   | 0,08                   |
| <b>CSI</b>  | 0,43                  | 0,5                    | 0,45                  | 0,5                    | 0,42                  | 0,47                   |
| <b>BIAS</b> | 1,97                  | 1,44                   | 1,35                  | 1,11                   | 0,96                  | 0,54                   |

Estimaco unificada sem (CL) e com (CL\*) dados de descargas elétricas.

Fonte: Adaptado de Karagiannidis; Lagouvardos; Kotroni (2016).

Observa-se pela Tabela 2.2 o quão importante tornou-se a inserção dos dados de descargas na ferramenta de previsão, ao passo que o índice crítico de acertos aumentou e o número de casos de falso alarme foi reduzido significativamente. Em conformidade, os autores salientam que houve diminuição da superestimação da previsão, porém as necessidades de aperfeiçoamento nas técnicas operadas transfiguram-se indispensáveis para melhorar a performance da ferramenta.

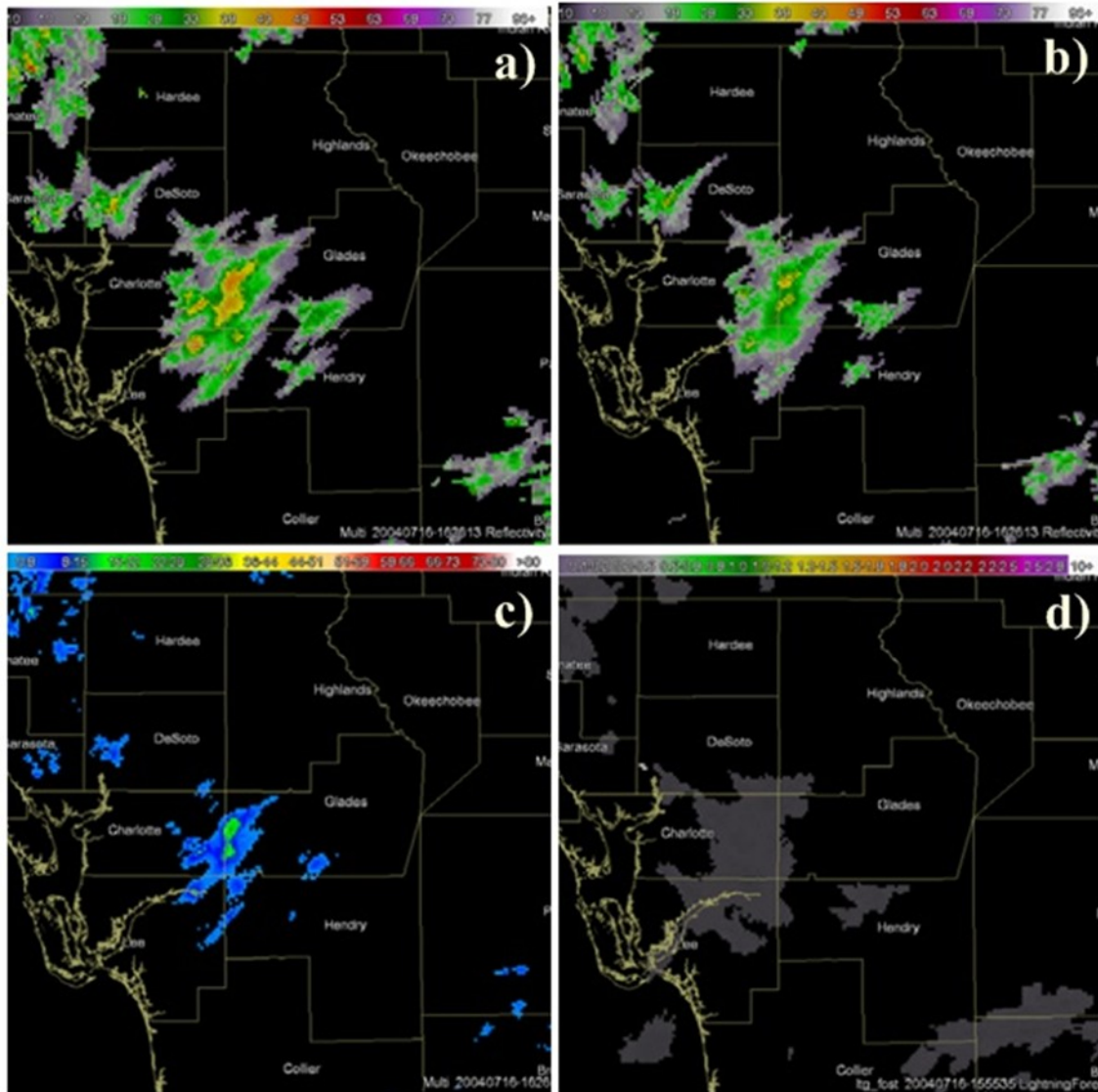
A previsão imediata de descargas elétricas que associa dados de radar e redes de detecção em superfície torna-se também uma possibilidade. Para estimar a probabilidade de existência de atividade elétrica em uma região com precessão de 30 minutos, Lakshmanan e Stumpf (2005) combinaram dados de refletividade de radar integradas a informações do ambiente próximo e dados de descargas elétricas, assimilados em uma *Radial Basis Functions* (redes neurais). Os parâmetros preditores de radar considerados são: **i)** Refletividade nas isotermas de 273,15 K, 263,15 K e 253,15 K; **ii)** Altura de pico de eco; **iii)** *Vertically Integrated Liquid* (VIL); **iv)** Refletividade vertical integrada e **v)** Áreas de eco nas isotermas.

A determinação no tempo e no espaço da atividade elétrica dá-se por uma grade de densidade de raios em 2D com resolução horizontal de 0,01°. A atualização desta grade é feita através de uma média temporal espacial suavizada no espaço em intervalos que variam de 1 a 15 minutos. A estimativa do movimento da tempestade é obtida pelo *K-means clustering* da refletividade e o filtro de *Kalman* é empregado para o rastreamento dos *clusters*. Pode-se inquirir a previsão de descargas elétricas realizada por essa ferramenta comparada aos campos de refletividade de radar pela Figura 2.4.

Os dados (Figuras 2.4.a, 2.4.b e 2.4.c) efluem da refletividade integrada a partir de múltiplos radares. A previsão da densidade de descargas mostrada é para um período de 5 minutos. Nota-se pela figura, que a refletividade para as duas isotermas supera os 40 dBZ em regiões coerentes e que o VIL para o mesmo

caso, atinge seu valor máximo ( $\sim 30 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ ). A previsão para os próximos 5 minutos (Figura 4.d) indica boa correlação espacial e prenuncia uma densidade de descargas de  $\sim 0,5 \text{ flashes}\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ . Os pesquisadores ressaltam ao final que a validação da técnica terá continuidade

Figura 2.4 – Campos de refletividade e previsão de atividade elétrica.



Observa-se: **2.4a)** Campo de refletividade na isoterma de 263,15 K; **2.4b)** Idem “a”, porém para isoterma de 253,15 K; **2.4c)** VIL; **2.4d)** Previsão da densidade de descargas.

Fonte: Lakshmanan e Stumpf (2005).

Emprega-se atualmente para um sistema de previsão de descargas elétricas no Brasil, um método conhecido como *Potential Lightning Region* (PLR) que calcula a probabilidade da ocorrência de raios sobre uma área de interesse com até 24 horas de antecedência. A ferramenta desenvolvida e apresentada por Zepka, Pinto Junior e Saraiva (2014) é a pioneira no país e diferentemente da investigação proposta neste trabalho, utiliza uma combinação de variáveis meteorológicas (*Surface-Based Convective Available Potential Energy* - SBCAPE), índice de levantamento (LI), índice K (KI), média da velocidade vertical entre os níveis de 850 hPa e 700 hPa ( $w$ ) e a razão de mistura integrada de 700 hPa até 500 hPa provenientes de simulações em alta resolução do modelo *Weather Research and Forecasting* (WRF), este que recentemente foi definido como modelo operacional para previsão de tempo do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC). Utilizaram-se dados de descargas elétricas para selecionar os pontos de grade em uma resolução de 3 km a serem descartados. Para tal, desconsideraram-se os píxeis que não apresentaram ao menos 1 *flash* para uma área com 16 km de raio. Os dados procedem da rede BrasilDAT, da qual, adotaram-se para garantir a homogeneidade dos padrões meteorológicos associados à ocorrência de raios, os casos que apresentaram o limiar mínimo de 4h de atividade elétrica ininterrupta e com mais de 400 *flashes.h*<sup>-1</sup>.

O cálculo das variáveis combinadas seguiu duas estratégias: **i)** a PLR linear (não considera dados de descarga) e **ii)** a PLR normalizada (considera dados de descarga), sendo que para os dois casos testaram-se diversas parametrizações de convecção e microfísica combinadas. Apresenta-se a análise estatística para as combinações por meio de intervalos de eficiência na Tabela 2.3, conscientes de que o melhor resultado possível de ser alcançado é 1. Ao final, a equipe de pesquisadores verificou que o método PLR normalizado sobressaiu-se em relação ao PLR linear e que se obterão melhores resultados a partir da evolução das técnicas de assimilação de dados e inserção de condições iniciais no modelo em alta resolução.

Tabela 2.3 – Avaliação estatística para a eficiência da previsão para o método PLR.

| <b>Teste</b> | <b>Intervalos de eficiência</b> |
|--------------|---------------------------------|
| <b>POD</b>   | 0,56 - 0,97                     |
| <b>FAR</b>   | 0,32 - 0,39                     |
| <b>CSI</b>   | 0,41 - 0,63                     |

Fonte: Adaptado de Zepka, Pinto Junior e Saraiva (2014).

Ainda no Brasil, Chinchay (2018) serviu-se dos sensores *Advanced Baseline Imager* (ABI) e *Geostationary Lightning Mapper* (GLM) a bordo do Satélite GOES-16, e da técnica do uso de multicanais, para a partir da resposta radiativa dos parâmetros físicos associados à nuvens convectivas, que geram situações de tempo severo, inferir a previsão da densidade de descargas elétricas sobre a região amazônica. O Autor avaliou o tamanho das partículas (pred-1), glaciação do topo da nuvem (pred-2 e pred-3, a partir de diferentes dados), profundidade da nuvem (pred-4) e a intensidade de fluxo ascendente (pred-5), para 3 momentos de previsão: **i)** 0-5 minutos; **ii)** 5-10 minutos, e **iii)** 10-15 minutos. Os resultados deste estudo demonstraram que o melhor intervalo de previsão é entre 5 a 10 minutos e o melhor preditor é o 4 (canal 10.35  $\mu\text{m}$ ), esse, com probabilidade de detecção diurna e noturna de 0,52 e 0,61, respectivamente, e por essa ordem, um falso alarme de 0,20 e 0,31. Em acréscimo, para a previsão de 5 a 10 minutos, o autor verificou que esse preditor apresenta boa relação com o incremento dos *flashes* nas temperaturas de brilho abaixo de 200 K, e, considerando temperaturas abaixo de 195 K, a correspondência permanece válida para a previsão de até 15 minutos.





### 3 DADOS

Para o desenvolvimento do sistema de previsão de descargas elétricas baseado no algoritmo ForTraCC (agora denominado *Forecasting and Tracking the Evolution of Lightning Clusters* [ForTraLC]), utilizaram-se dados de:

- Descargas elétricas da rede BrasilDAT<sup>1</sup>:
  - Os dados oriundos dos sensores da rede de detecção de raios em solo BrasilDAT são dispostos em arquivos texto (".dat"), em que cada linha corresponde a uma descarga elétrica (um evento), e por sua vez, cada coluna identifica respectivamente: o tempo do evento (formato: ano-mês-dia hora:minuto:segundo), alusivo ao Tempo Universal Coordenado (UTC); latitude (graus decimais); longitude (graus decimais); altura estimada em caso de IC (quilômetros); pico de corrente estimado (kA); indicador do tipo de evento (0 = CG; 1 = IC); elipse de confiança - semieixo maior (quilômetros); elipse de confiança - semieixo menor (quilômetros); ângulo da elipse de confiança em relação ao norte verdadeiro (graus); e, número de sensores participantes na detecção do evento. Dos elementos mencionados, utilizaram-se para a pesquisa o número de eventos e as informações da primeira, segunda e terceira coluna (tempo e localização do evento);
  - São adotados para determinar a densidade de descargas e então identificar os *clusters*; verificar a intensidade dos sistemas; aplicar as técnicas de previsão e avaliar a performance do modelo ForTraLC.
  
- Temperatura de brilho (K) do canal IR (~11  $\mu\text{m}$ ) do sensor *IMAGER*:

---

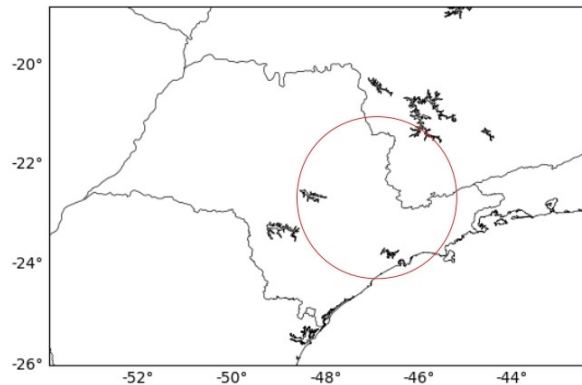
<sup>1</sup> Especificações sobre a rede de detecção de raios BrasilDAT são descritas na Seção 2.3.

- O *IMAGER* é um dos sensores componentes do *Geostationary Operational Environmental Satellite* (GOES – 13) e é sensível à radiação visível e IR. Possui resolução temporal de 30 minutos e espacial de 4 km em seu ponto sub-satélite, além do mais, seus arquivos foram disponibilizados em formato binário;
  - Empregados para os estudos de caso com objetivo de verificar as características morfológicas e intensidade das tempestades, bem como, identificar processos físicos ali presentes a fim de compreender sua possível relação com os resultados da previsão.
- Campos de Refletividade do Radar Meteorológico de São Roque:
  - O Radar Meteorológico de São Roque opera com comprimento de onda na ordem 10,9 centímetros, alcance máximo de 250 km e uma largura de feixe de 1,9°. Seus arquivos foram gerados em forma de matriz quadrada de 500 km x 500 km, cuja resolução espacial e temporal são 1 x 1 km e 10 minutos, respectivamente.
  - Aplicam-se através da variável *Vertically Integrated Liquid Water* (VIL) (GREENE; CLARK, 1972) com o mesmo intuito dos dados de satélite do item anterior.

### 3.1 Definição do campo de estudo

O campo de pesquisa refere-se a área de atuação do Projeto SOS-CHUVA, que compreende a região de Campinas e é representada pelo círculo vermelho na Figura 3.1 à frente do texto. Especificamente, as fronteiras regionais foram definidas com base na disponibilidade dos dados da rede de detecção de raios em superfície BrasilDAT para o projeto supracitado, limitando-se a um círculo com 180 km de raio a contar do Radar Banda - X instalado nas coordenadas geográficas -22°48'52.22" (latitude) e -47° 3'23.99" (longitude).

Figura 3.1 – Delimitação da área de estudo.



Fonte: Produção do Autor.

As análises são realizadas para os 39 casos destacados pelo projeto ocorridos no período entre dezembro de 2016 à março de 2018, que corresponde ao intervalo de coleta de dados do experimento SOS-CHUVA. Esses casos foram selecionados com base no conhecimento dos meteorologistas envolvidos no projeto sobre a severidade dos sistemas atuantes na região de estudo. As datas específicas, o fenômeno observado e a atividade elétrica total (número de raios totais) associado a cada caso encontram-se na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Especificações dos 39 casos analisados.

| <b>Casos</b> | <b>Data</b> | <b>Fenômenos Observados *</b> | <b>Atividade Elétrica Total (raios/dia)</b> |
|--------------|-------------|-------------------------------|---|
| <b>1</b>     | 03/12/2016  | gr; rv                        | 20240                                       |
| <b>2</b>     | 18/12/2016  | gr; ci                        | 39603                                       |
| <b>3</b>     | 19/12/2016  | gr;                           | 31607                                       |
| <b>4</b>     | 25/12/2016  | gr; rv                        | 55121                                       |
| <b>5</b>     | 28/12/2016  | rv; ci                        | 35654                                       |
| <b>6</b>     | 03/01/2017  | rv                            | 52705                                       |

(continua)

Tabela 3.1 – Continuação.

|           |            |            |        |
|-----------|------------|------------|--------|
| <b>7</b>  | 07/01/2017 | ci; rv     | 27945  |
| <b>8</b>  | 15/01/2017 | ci         | 14788  |
| <b>9</b>  | 16/01/2017 | ci         | 46119  |
| <b>10</b> | 17/01/2017 | ci         | 2564   |
| <b>11</b> | 26/01/2017 | ci; rv     | 7398   |
| <b>12</b> | 30/01/2017 | gr; ci     | 50362  |
| <b>13</b> | 02/02/2017 | ci         | 16917  |
| <b>14</b> | 04/02/2017 | ci         | 18332  |
| <b>15</b> | 06/02/2017 | gr; rv     | 134184 |
| <b>16</b> | 22/02/2017 | gr; rv     | 4537   |
| <b>17</b> | 24/02/2017 | gr         | 51225  |
| <b>18</b> | 05/03/2017 | ci; rv     | 19298  |
| <b>19</b> | 06/03/2017 | ci; rv; gr | 35645  |
| <b>20</b> | 07/03/2017 | ci; rv     | 34105  |
| <b>21</b> | 08/03/2017 | ci; rv     | 51421  |
| <b>22</b> | 13/03/2017 | gr         | 9791   |
| <b>23</b> | 14/03/2017 | gr         | 59306  |
| <b>24</b> | 05/05/2017 | gr         | 9089   |
| <b>25</b> | 27/10/2017 | rv         | 18109  |
| <b>26</b> | 18/12/2017 | ci         | 7837   |
| <b>27</b> | 25/12/2017 | ci; rv     | 13068  |
| <b>28</b> | 18/01/2018 | ci; rv     | 7577   |
| <b>29</b> | 20/01/2018 | ci; rv     | 17798  |
| <b>30</b> | 21/01/2018 | ci; rv     | 12948  |
| <b>31</b> | 24/01/2018 | rv         | 28394  |
| <b>32</b> | 26/02/2018 | ci         | 1692   |

(continua)

Tabela 3.1 – Conclusão.

|           |            |            |       |
|-----------|------------|------------|-------|
| <b>33</b> | 05/03/2018 | rv         | 5272  |
| <b>34</b> | 14/03/2018 | ci; rv     | 30140 |
| <b>35</b> | 20/03/2018 | ci; gr; rv | 55865 |
| <b>36</b> | 26/03/2018 | ci         | 6517  |
| <b>37</b> | 28/03/2018 | ci         | 4578  |
| <b>38</b> | 30/03/2018 | ci         | 5023  |
| <b>39</b> | 31/03/2018 | ci         | 5324  |

---

\* Granizo (gr); Chuva intensa (ci); Rajadas de vento (rv).

Fonte: Adaptado de SOS-CHUVA (2018).



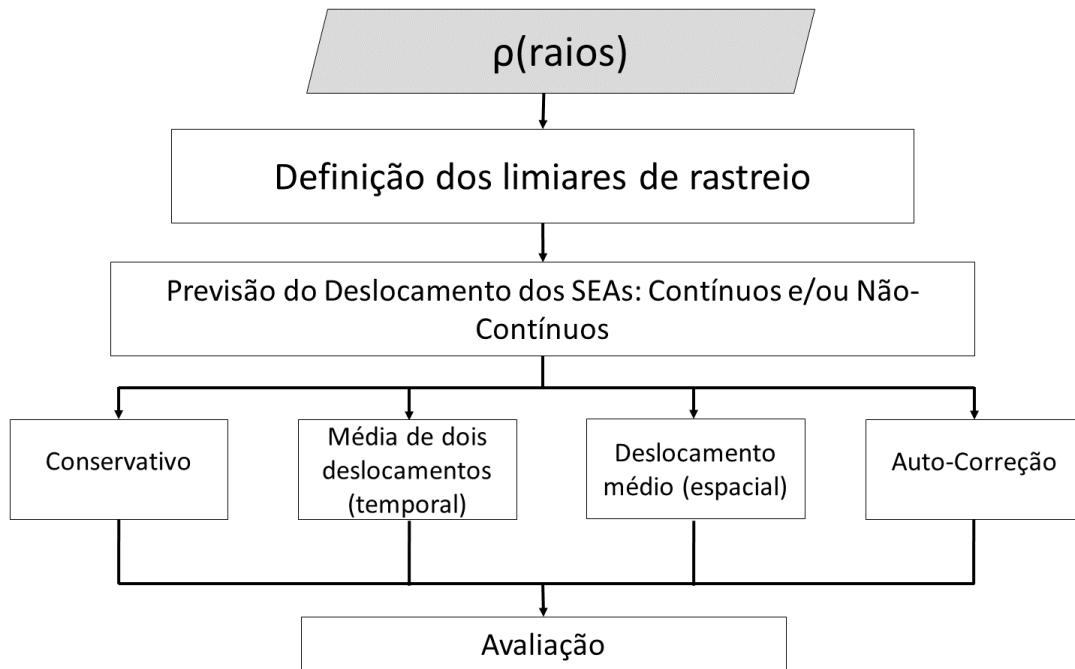
## 4 METODOLOGIA

### 4.1 Assimilação de dados de descargas elétricas no ForTraCC

Desenvolveu-se inicialmente a técnica ForTraCC (Vila et al., 2008) para determinar a trajetória e fazer a previsão de sistemas convectivos, a partir da temperatura de brilho do canal infravermelho ( $Tb_{IR}$ ) da janela atmosférica obtida com satélites geoestacionários, e.g., GOES e METEOSAT. Contudo, outros formatos de dados podem ser incorporados no algoritmo a fim de obter-se novos produtos, como por exemplo, o *Hydrotrack* proposto por Calheiros (2008) para previsão imediata de precipitação; o ForTraCC-radar para previsão de tempestades severas efetivado por Queiroz (2008); o rastreamento de células de chuva efetuado por Eichholz (2017), e o ForTraCC-raios, para o diagnóstico da propagação de sistemas convectivos elétricos a partir de mapas da densidade da taxa de raios totais, a fim de obter uma relação entre atividade elétrica e a ocorrência de granizo, apresentado por Sperling (2018).

O ForTraCC constitui-se de componentes básicas, das quais destacam-se: o método de detecção dos *clusters* (aglomerado de píxeis) de nuvens baseado em um limiar de temperatura ( $Tb_{IR} < 235$  K); o cálculo de parâmetros morfológicos e radiativos a partir da  $Tb_{IR}$  do topo das nuvens; a sobreposição de imagens sucessivas de acordo com um limiar (e.g. para as  $Tb_{IR}$  é de 150 píxeis); a determinação do ciclo de vida de cada sistema; e a extrapolação espaço-temporal dos aglomerados (i.e. Previsão). Para criar o sistema de previsão de descargas elétricas realizaram-se os passos referidos no fluxograma a frente (Figura 4.1) e detalhados nas seções posteriores. As análises e procedimentos mencionados, são aplicados para eventos contínuos e não-contínuos, da mesma forma que para investigar as características dos sistemas eletricamente ativos previstos.

Figura 4.1 – Fluxograma da metodologia de implementação do ForTraLC.



Fonte: Produção do Autor.

## 4.2 Definição dos limiares de rastreio

Como uma das finalidades deste estudo é utilizar apenas dados de descargas elétricas para realizar previsão de atividade elétrica sobre uma determinada região através do algoritmo ForTraLC, um dos desafios a serem superados é justamente a definição dos limiares de detecção e tamanho dos sistemas que serão rastreados e previstos. Neste contexto, realizaram-se estudos a fim de se obter o melhor método de deslocamento para previsão da posição do SEA (Seção 4.4), a área mínima a ser rastreada e prevista, e, o limiar mais representativo de densidade de raios para o agrupamento dos píxeis, com o propósito de determinar o melhor conjunto de parâmetros de previsão. Perante a dificuldade exposta, fundamentou-se nos trabalhos de:

- Kohn et al. (2011), que empregaram os limiares  $1 \text{ flash} \cdot 15\text{min}^{-1} \cdot \text{pixel}^{-1}$  e 5



- flashes*.15min<sup>-1</sup>.pixel<sup>-1</sup>, mínimo e para sistemas mais intensos, por esta ordem, para a previsão de tempestades sobre a região Mediterrânea;
- Strauss (2013), para correlacionar descargas elétricas e atividade convectiva com resolução de grade de 0,02°, agrupou células que apresentaram o mínimo de 3 descargas/célula em passos de tempo de 5 minutos. Outra equiparação realizada pelo pesquisador foi a de *clusters* de raios com células de precipitação, na qual, somente células que superaram o limiar de 10 descargas.10 min<sup>-1</sup> foram consideradas;
  - Metzger e Nuss (2013) admitem que o limiar mínimo para detectar e rastrear *jumps* é de 10 *flashes*.min<sup>-2</sup>;
  - Schultz et al. (2016), rastrearam tempestades com um algoritmo assente em *Lightning Jump* experimentando limiares que variam de 1 *flash*.min<sup>-1</sup> a 20 *flashes*.min<sup>-1</sup> e constataram que a escala temporal e a probabilidade de detecção são diretamente proporcionais, e para escalas de até 32 km<sup>2</sup>, os grupos rastreados dificilmente superaram a taxa de 10 *flashes*.min<sup>-1</sup>;
  - Sperling (2018) que considerou o limiar mínimo de 1 raio.10min<sup>-1</sup>.pixel<sup>-1</sup> para seguir tempestades de granizo na região sul do Brasil.

À face do exposto, os dados de descargas elétricas da Rede BrasilDAT foram acumulados a cada 15 minutos em pontos de grade com resolução espacial de (8 x 8) km e são empregados para *input* no algoritmo preditor. A escolha do intervalo de tempo (15 minutos) para o agrupamento das descargas elétricas, deu-se a partir de testes (não mostrados) baseados no rastreamento dos *clusters*, na qual, verificou-se que para intervalos menores a esse, 5 e 10 minutos, na maior parte dos casos, o critério de mínima superposição<sup>2</sup> não era atendido, e por consequência, o algoritmo apresentou limitação na confiabilidade do rastreamento da mesma família, uma vez que essas apresentaram-se com menor consistência. Adiante, conceituou-se a densidade de raios mínima de 1/ pixel/15min à considerar a presença de um *cluster* na área de interesse para

---

2 O critério de mínima sobreposição considerado é o mesmo que o algoritmo original (ForTraCC) utiliza, ou seja, para imagens consecutivas, um pixel em comum deve existir entre os SEAs das imagens.

avaliação de ocorrência, valor esse que permite detectar e rastrear não somente SEAs mais intensos, mas também atividade elétrica de menor intensidade, presente em tempestades menos organizadas<sup>3</sup>. Da mesma maneira, propuseram-se os valores de 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 e 9 l/pixel/15min a serem experimentados como limiares de  $\rho$ (raios), a fim de identificar qual indicador sobressair-se-ia nos sistemas observados. O confronto entre os limiares de densidade de raios é apresentado na Seção 5.3.

Não menos importante, outra definição necessária refere-se ao limiar de tamanho, que concerne na área mínima do sistema eletricamente ativo a ser detectada e monitorada pelo algoritmo, ou seja o número mínimo de píxeis adjacentes que contém registros de descargas elétricas igual ou superior aos limiares de  $\rho$ (raios) pré-definidos para esse ensaio, ou seja, 1, 5 e 9 l/pixel/15min . Aferiram-se à esse propósito as quantidades de 5 e 10 píxeis, que por essa ordem equivalem a 320 km<sup>2</sup> e 640 km<sup>2</sup> de área, acreditando-se de que o maior limiar detectará apenas tempestades mais intensas. Os resultados e as comparações entre os limiares de tamanho mínimo são discutidos na seção 5.2.

#### **4.3 Classificação dos Sistemas Eletricamente Ativos (SEA)**

Delineadas as metodologias para se obter os limiares de detecção ( $\rho$ (raios) e tamanho mínimo), descrevem-se agora as quatro classificações adotadas para os sistemas eletricamente ativos. Dessarte, tipificam-se os eventos (SEA) em:

- Novo (N): quando se identifica um SEA no instante “t” e não estava presente em “t- $\delta t$ ”, ou supostamente não cumpria com o critério de mínima superposição;
- Contínuo (C): é aquele SEA observado no tempo “t” e estava presente em “t- $\delta t$ ”, cumprindo assim o critério de mínima superposição;

---

<sup>3</sup> Discutido em Meyer, Höler e Betz (2013).

- *Split* (S) ou Divisão: quando no instante “ $t-\delta t$ ” há um sistema e, em “ $t$ ” existem dois ou mais que cumprem o critério de mínima superposição. Diante disso, considera-se para “ $t$ ” como a continuidade do SEA do instante “ $t-\delta t$ ”, o sistema com a maior densidade de descargas;
- *Merge* (M) ou Adesão: se no instante “ $t-\delta t$ ” existem dois ou mais SEAs, que cumprem com o critério de mínima superposição, e, no instante “ $t$ ” apenas um é identificado. Nesse caso, cada um dos SEA no instante “ $t-\delta t$ ” é considerado como a continuidade de diferentes famílias.

A partir da categorização definida, entre as limitações a serem superadas com e a partir desse trabalho, certamente a maior será melhorar a performance do modelo de previsão com relação aos eventos em que ocorrem a divisão ou a fusão do sistema (*Split* e *Merge*). Dessarte, realizou-se entre as análises da Seção 5, uma que trata especificamente das previsões, separado-as em eventos contínuos e não-contínuos (i.e., *split* e *merge*).

Acerca do vetor velocidade de deslocamento do sistema (Seção 4.4), o ForTraCC apresenta algumas soluções para resolver problema apresentado no parágrafo anterior. Nos casos de *split* ou *merge*, em algumas situações, a velocidade calculada não será realista, pois a mesma é baseada no centro de massa, que possivelmente modificar-se-á devido a junção ou perda de um novo *cluster*. Portanto, para esses casos, calculou-se a velocidade do SEA como a média das velocidades dos sistemas circunvizinhos ao *cluster* que se pretende definir o parâmetro de deslocamento. Para tal, considerou-se como parâmetro de proximidade um círculo de  $2,5^\circ$  de raio a partir do centro de massa do sistema, ou 4 vezes o raio efetivo do mesmo, ou a àquele que for maior. Em situações de detecção de novos eventos contíguos, empregou-se o mesmo critério de vizinhança para a definição da velocidade inicial do SEA.

#### 4.4 Previsão do deslocamento dos sistemas eletricamente ativos (SEA)

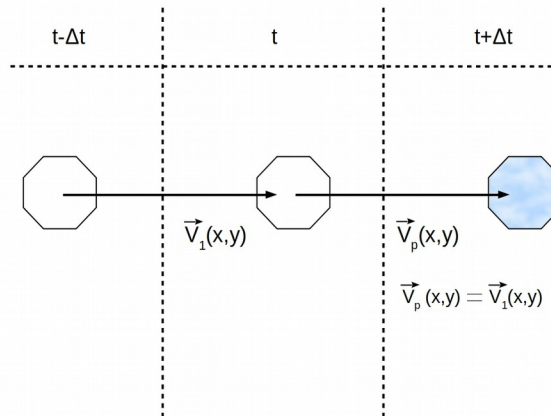
O deslocamento do Sistema Eletricamente Ativo (SEA), ou seja, núcleo de atividade elétrica associado à nuvem, baseou-se - de acordo com o método - em duas ou três imagens consecutivas, geradas a partir de  $\rho(\text{raios})$  em intervalos de 15 minutos. Não menos importante, definiu-se também o limiar de tamanho mínimo. Nesse caso, o valor adotado esteou-se no erro da distância (descrito em 4.5) derivado de testes de sensibilidade, considerando a distribuição estatística dos eventos observados durante o SOS-CHUVA que apresentaram sobreposição entre imagens consecutivas e os acumulados de descargas no tempo supracitado (15 minutos).

Sublinha-se, que para as quatro metodologias de deslocamento, ponderam-se os SEAs com a área e o valor de densidade de raios constantes, ou seja, desconsideraram-se as tendências de crescimento e decaimento dos sistemas para a previsão. A partir da avaliação (descrita no próximo item) individual dos quatro métodos, fez-se a comparação entre eles a fim de encontrar a melhor maneira de representar o deslocamento de um núcleo de atividade elétrica embebido em uma nuvem convectiva para uma previsão de curto prazo. Sabe-se que além das limitações já mencionadas, extrapolar as futuras posições de um campo que apresenta significativa variação espaço-temporal com precisão, é de suma importância, uma vez que o erro de localização está diretamente proporcional à taxa de falso alarme.

Isto posto, descrevem-se as quatro metodologias de extrapolação do vetor deslocamento aplicadas a cada uma das análises anteriores. A primeira delas é aqui nomeada como “método conservativo” (Ctvo) e considera que as características dos sistemas entre “ $t-\delta t$ ” e “ $t$ ”, como velocidade, direção e sentido são conservadas na previsão, de acordo com a representação da Figura 4.2. Essa metodologia, assim como as posteriores, pode ser aplicada para os *clusters* de nuvens, de chuva e descargas elétricas. Desta forma, “Ctvo” foi o primeiro método de deslocamento a ser testado, por apresentar

menor complexidade à implementação e análise física do comportamento dos sistemas previstos.

Figura 4.2 - Vetor velocidade prevista para o instante “ $t+\delta t$ ” pelo método conservativo.



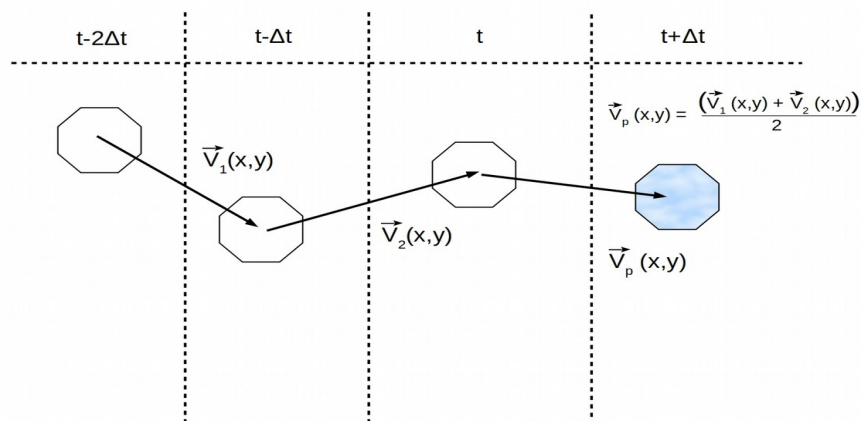
Fonte: Produção do Autor.

A segunda metodologia representa a média temporal do deslocamento, foi denominada como “média de dois deslocamentos” (Mdd) e consiste simplesmente na média entre dois vetores velocidade obtidos a partir três imagens consecutivas. O primeiro passo é obter os vetores velocidade  $V_1$ , entre as imagens dos instantes “ $t-2\delta t$ ” e “ $t-\delta t$ ”, e  $V_2$ , a meio das imagens em “ $t-\delta t$ ” e “ $t$ ”, e em seguida, calcular o Vetor  $V_p$  através da média entre  $V_1$  e  $V_2$ . Por fim, utiliza-se  $V_p$  (velocidade prevista) para estabelecer a posição prevista do *cluster* em “ $t+\delta t$ ”. A Figura 4.3 representa a obtenção do vetor  $V_p$  para um sistema, com base na média de dois deslocamentos.

Outra técnica de extrapolação da posição que foi avaliada é o “campo médio das velocidades” (Dm), que está representada na Figura 4.4. Para tal, a partir de duas imagens consecutivas, toma-se o deslocamento de todos os SEAs identificados e calcula-se a média entre suas as velocidades. Nesse caso,

todos eventos a serem previstos que se encontram na imagem terão o mesmo vetor velocidade. Espera-se com essa abordagem, corrigir os erros associados ao posicionamento inadequado do centroide do SEA. Por se tratar de uma metodologia que representa a média espacial do deslocamento, espera-se que os sistemas menores, a maioria na amostra analisada, sigam o fluxo médio na camada de nuvens, possibilitando assim, representar de forma mais realista a sua propagação.

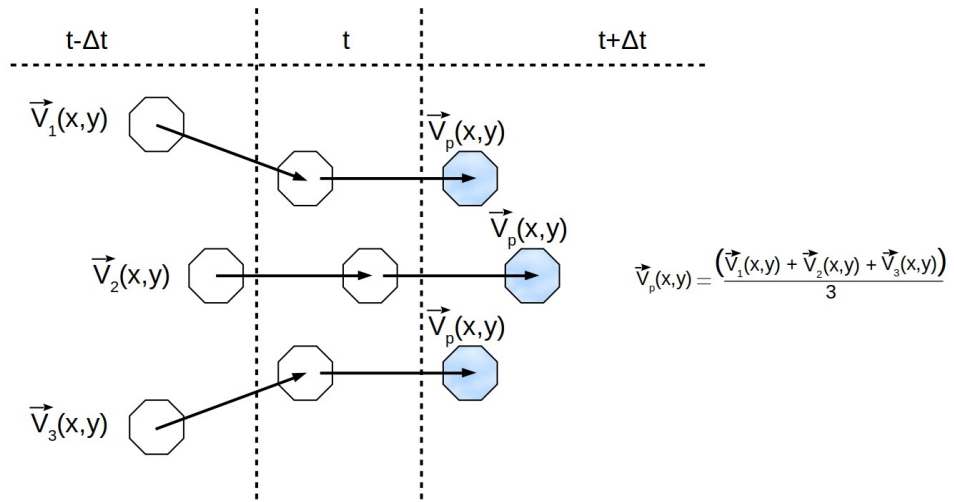
Figura 4.3 - Vetor deslocamento previsto para o instante “t+δt” derivado da média temporal.



Fonte: Produção do Autor.

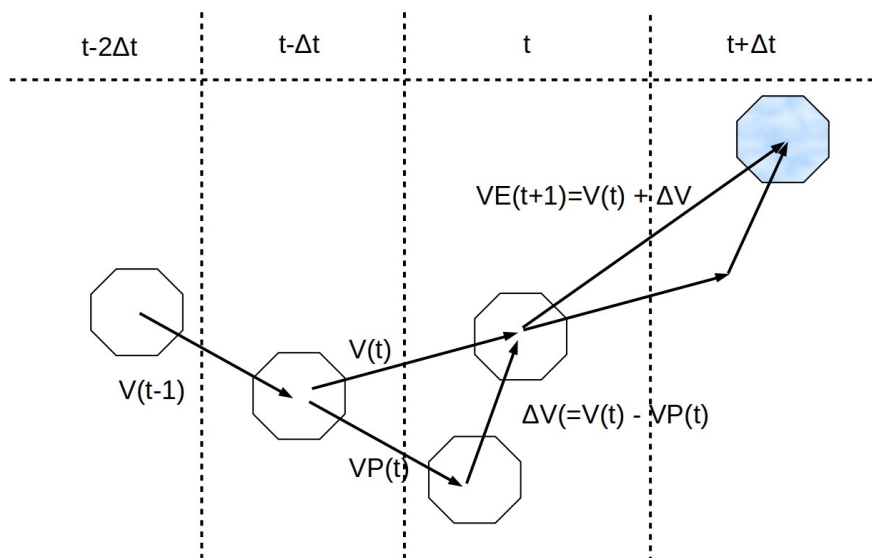
Por fim, o quarto método é o da Autocorreção dos vetores (Acv), discriminado por Vila et al. (2008), que se baseia em três imagens sucessivas. Estima-se inicialmente uma velocidade  $V(t-1)$  do sistema pelo deslocamento do centro de massa entre duas imagens no intervalo entre os instantes  $t-2\delta t$  e  $t-\delta t$ . Trata-se este vetor velocidade constante e determina-se a velocidade prevista para o instante  $t$  ( $VP(t)$ ). Dada a velocidade real entre os instantes “ $t-\delta t$ ” e “ $t$ ” ( $V(t)$ ), deriva-se a velocidade de previsão de deslocamento  $VE(t+1)$  pela soma vetorial de  $V(t)$  com a diferença entre os vetores  $V(t)$  e  $VP(t)$ , como pode ser visto na Figura 4.5.

Figura 4.4 - Vetor velocidade prevista para o instante “t+δt” com o método do deslocamento médio (Dm).



Fonte: Produção do Autor.

Figura 4.5 - Deslocamento previsto para o instante “t+δt” pelo método de autocorreção.



Fonte: Adaptado de Vila et al. (2008).

## 4.5 Avaliação

Avaliam-se os métodos de previsão imediata descritos nessa seção de maneira relativamente simples, pois, ao acompanhar os SEA, comparam-se o previsto com o observado através de técnicas já conhecidas pela comunidade científica. Como os processos de determinação do vetor deslocamento tendem a influenciar diretamente a destreza do algoritmo, validou-se inicialmente qual método de deslocamento pode melhorar o prognóstico da propagação dos SEA. Em seguida, ponderou-se a área mínima (agrupamento mínimo de píxeis) com presença de atividade elétrica a ser detectada e a determinação do limiar de densidade de raios, respectivamente, e por fim, quantificou-se o *skill* do ForTraLC para o melhor conjunto de parâmetros iniciais (metodologia de deslocamento e limiares de rastreio).

Deste modo, avaliaram-se as seguintes variáveis:

- **Erro da distância (ED):** A diferença (km) entre os centroides dos sistemas baseia-se na distância do ponto central do complexo observado e do sistema previsto em coordenadas geográficas:

$$ED = (\sqrt{(Latp - Lato)^2 + (Lonp - Lono)^2}) \cdot K \quad (4.1)$$

- Em que:
  - *Latp* - latitude do centro do sistema previsto;
  - *Lato* - latitude do centro do sistema observado;
  - *Lonp* - longitude do centro do sistema previsto;
  - *Lono* - longitude do centro do sistema observado;
  - *K* - Fator de conversão da distância em graus para quilômetros, cujo valor é 111,2.
- **Erro da densidade (EL):** Equacionou-se essa variável com intuito de compreender uma possível superestimação ou subestimação da



previsão do algoritmo. Obtém-se o erro da densidade através da diferença entre a densidade média de raios do *cluster* previsto e o *cluster* observado:

$$EL = l_{medp} - l_{medo} \quad (4.2)$$

- Na qual:
  - *l<sub>medp</sub>* - Densidade média de raios do SEA previsto;
  - *l<sub>medo</sub>* - Densidade média de raios do SEA observado;

Além disso, investigou-se a destreza do modelo de previsão em que se considerou área de atuação dos sistemas. Segundo Wilks (2006) a avaliação da destreza de um modelo de previsão pode basear-se na aplicação de uma tabela de contingência (Tabela 4.1), conforme segue:

- Consideram-se:
  - a – O raio foi previsto e observado;
  - b – O raio foi previsto, mas não observado;
  - c – O raio não foi previsto, mas foi observado;
  - d – O raio não foi previsto nem observado.

Tabela 4.1 – Contingência 2 x 2 para avaliação da previsão.

|   |   |
|---|---|
| a | b |
| c | d |

Fonte: Wilks (2006).

O número de acertos ou não da previsão, fornecem-nos índices que representam o desempenho do sistema, tais como:

- **Falso alarme (FAR):** Um falso alarme ocorre quando uma descarga é prevista, mas não é observada. A FAR é calculada pela razão entre o número de alarmes falsos e o número total de eventos previstos. O

índice 1 equivale-se à situação em que todas as previsões positivas estão erradas e 0 para o caso contrário.

$$FAR = \frac{b}{a+b} \quad (4.3)$$

- **Probabilidade de detecção (POD):** Razão entre o número de acertos e o número total de eventos observados, sendo 1 quando todas as estimações são corretas e 0 para o caso de todas as previsões estarem erradas.

$$POD = \frac{a}{a+c} \quad (4.4)$$

- **Índice crítico de acerto (CSI):** Representa a fração dos casos de previsão bem-sucedida em relação ao número total de casos. Valor igual a 1 simboliza uma perfeita previsão e, 0, falha total do estimador.

$$CSI = \frac{a+d}{total} \quad (4.5)$$

- **Bias:** É a razão entre a média prevista e a média observada. O valor ideal é 1. Valores maiores e menores que 1, refletem nesta ordem, a superestimação e a subestimação da previsão de descargas elétricas.

$$BIAS = \frac{a+b}{a+c} \quad (4.6)$$

A título de validação do algoritmo e intento a compreender algumas das características associadas aos sistemas que apresentaram prognósticos superiores, qualificaram-se com base na probabilidade de detecção e no falso alarme as melhores e piores previsões. Para tal, relacionaram-se as à atividade elétrica total e à classificação da tempestade, sendo essa, em tempestades isoladas e tempestades organizadas. No tocante a atividade

elétrica total para esse ensaio, decompõem-se os 39 casos em 3 grupos: **i)** Atividade elétrica fraca (casos em que se compilou até 10000 raios/dia); **ii)** Atividade elétrica moderada (compreendendo os eventos que assinalaram entre 10000 e 32000 raios/dia), e, **iii)** Atividade elétrica intensa (para os cenários fichados com mais de 32000 raios/dia). Por sua vez, para classificar as tempestades principiouse nas orientações de alguns meteorologistas da equipe envolvida no Projeto SOS-CHUVA, e com base nos trabalhos de Mattos (2015) e Mulholland et al. (2018), definiu-se como tempestade toda a região que apresentasse refletividade de radar superior a 35 dBZ (CAPPI 3km). Assente ao deliberado, tipificaram-se manualmente os casos (não apresentado) em tempestades organizadas, aqueles em que se identificaram áreas vizinhas com a respectiva refletividade, para os horários nos quais se constataram descargas elétricas, e, como tempestades isoladas, as situações opostas.



## 5 RESULTADOS

Nesta seção discorre-se sobre os resultados obtidos com a pesquisa. Para esse fim, utilizaram-se apenas dados da rede de detecção em solo BrasilDAT, ou seja, trata-se do modo mais simples de se fazer a previsão de raios com o algoritmo ForTraLC, e desta forma, torna-se o ponto de partida para análises mais complexas sobre a previsão da atividade elétrica. Isto posto, definiram-se como parâmetros iniciais a serem testados o tamanho mínimo dos *clusters* de 5 píxeis e a densidade de descargas elétricas nos valores 1, 5, e 9 I/pixel/15min.

Em seguida, executou-se o algoritmo ForTraLC para cada um dos 39 casos detalhados na Tabela 3.1 da Seção 3, aplicando-se os parâmetros de acordo com o intuito da análise. A validação do sistema de previsão constituiu-se na comparação pixel a pixel entre a previsão e observação, para diferença de distância entre o centroide previsto e observado, na diferença entre a densidade média de descargas elétricas prevista e observada, e, na análise estatística (POD, FAR, BIAS e CIS, vide Seção 4.5), por essa ordem, para as previsões de 15, 30, 45 e 60 minutos. Apresentam-se os resultados em sequência de: **i)** Avaliação dos métodos de deslocamento do SEA; **ii)** Análise dos limiares de tamanho mínimo; **iii)** Comparação entre os limiares de densidade de raios, e, **iv)** Representação da melhor combinação de **i**, **ii** e **iii** para o propósito deste trabalho.

### 5.1 Avaliação das metodologias de deslocamento

Para estabelecer a melhor metodologia de deslocamento a ser considerada para as demais análises, ensaiaram-se os limiares de 1, 5 e 9 I/pixel/15min para os quatro métodos supracitados (Seção 4.3), com o tamanho mínimo para detecção de 5 píxeis. Serviram como critérios de avaliação o erro da distância entre o centroide previsto e observado e a taxa de falso alarme (FAR), uma vez que esses indicadores são diretamente influenciados pela localização do SEA

previsto, e a probabilidade de detecção (POD). A Tabela 5.1 comporta os indicadores estatísticos POD e FAR e a Figura 5.1 compara o erro da distância, ou seja, os resultados que assistiram a definição.

Tabela 5.1 - Avaliação das quatro técnicas de deslocamento testadas (Conservativo - Ctvo, Média de dois deslocamentos - Mdd, Deslocamento médio - Dm e Autocorreção de vetores - Acv) para a previsão de 15 minutos.

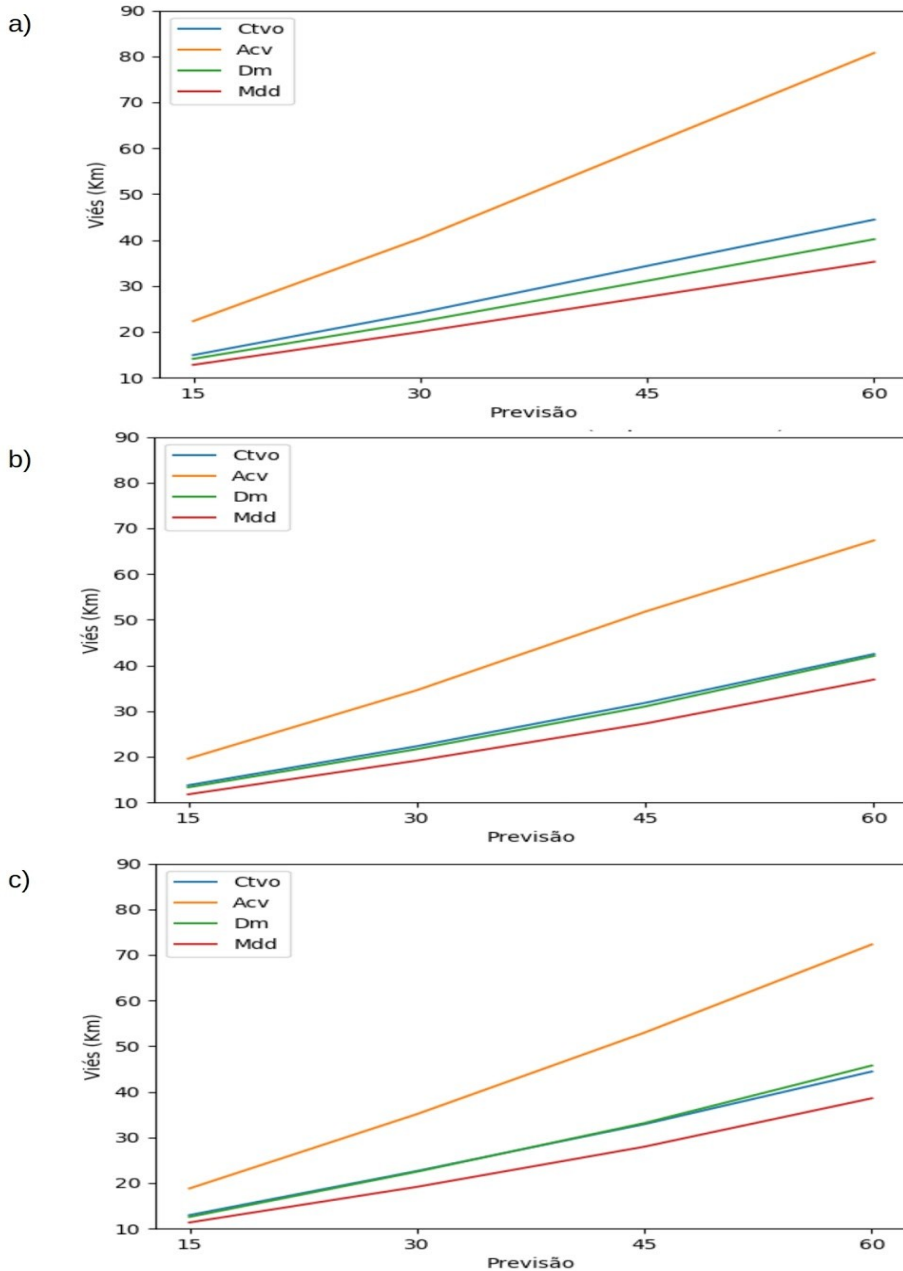
| <b>Método</b> | <b>Limiar (l/pixel/15 minutos)</b> | <b>POD</b> | <b>FAR</b> |
|---------------|------------------------------------|------------|------------|
| Ctvo          | 1                                  | 0.367      | 0.633      |
| Mdd           | 1                                  | 0.514      | 0.487      |
| Dm            | 1                                  | 0.434      | 0.567      |
| Acv           | 1                                  | 0.203      | 0.795      |
| Ctvo          | 5                                  | 0.344      | 0.656      |
| Mdd           | 5                                  | 0.458      | 0.544      |
| Dm            | 5                                  | 0.388      | 0.614      |
| Acv           | 5                                  | 0.170      | 0.829      |
| Ctvo          | 9                                  | 0.317      | 0.684      |
| Mdd           | 9                                  | 0.443      | 0.559      |
| Dm            | 9                                  | 0.369      | 0.631      |
| Acv           | 9                                  | 0.179      | 0.820      |

Fonte: Produção do Autor.

Referindo-se à diferença entre as posições previstas e observadas - erro da distância -, os resultados mais discrepantes ocorrem para o método de autocorreção dos vetores (VILA et al., 2004), e de modo geral, os outros três modos comportam-se com relativa afinidade. As hipóteses de deslocamento Dm e Ctvo apresentam praticamente os mesmos resultados para os limiares mais elevados. Compreende-se que tal similaridade esteja associada à lógica computacional da qual se obtém o vetor velocidade em cada situação: **i)** Faz-se necessário apenas um passo de tempo anterior ao instante atual, e, **ii)** ao se calcular a média das velocidades (Dm) para *clusters* próximos, acredita-se que esses possivelmente podem estar inseridos na mesma nuvem ou em nuvens

que sigam o mesmo fluxo, ou seja, apresentam vetores praticamente iguais, conservando assim, essa característica dinâmica para o passo de tempo atual e por assim dizer, na previsão.

Figura 5.1 - Erro da distância para os 4 métodos de deslocamento.



Avaliação para os limiares de densidade de descargas elétricas: **5.1a)** 1l/pixel/15min **5.1b)** 5l/pixel/15min **5.1c)** 9l/pixel/15min.

Fonte: Produção do Autor.

Verifica-se também, que o procedimento Mdd é o que apresenta maior precisão na previsão da posição dos *clusters*. Para todos os três limiares de densidade testados, a previsão de 15 minutos conteve um erro médio de distância de aproximadamente 1,5 píxeis (12 km) contra ~ 4,6 píxeis (36,8 km) para 60 minutos, também, a metodologia Mdd comporta-se com pequenas variações e apresenta para o maior valor os melhores resultados para os primeiros 30 minutos de previsão. Cabe destacar ainda, que a diferença entre as posições do centroide previsto e observado para tempos mais longos de previsão aumentou quando 5 e 9 l/pixel/15min, por outra forma, para os eventos mais intensos que conseqüentemente apresentam características físicas mais complexas. Além disso, o tamanho médio dos sistemas é menor para limiares maiores (vide Seção 5.3), e por essa razão, tornam-se mais difíceis de prever devido ao alto grau de fragmentação.

A partir do resultado acima e ao se comparar os índices estatísticos da Tabela 5.1, torna-se evidente que a técnica de autocorreção dos vetores (Vila et al., 2008) não é representativa às características dinâmicas dos SEAs. Isso se deve ao fato de que o sistema eletricamente ativo trata-se de um campo altamente variável no tempo e espaço, computacionalmente passa por uma correção vetorial, além do método necessitar de três imagens consecutivas para derivar o vetor previsão resultante.

Vê-se também na mesma tabela, que as melhores probabilidades de detecção e falsos alarmes estão para o menor limiar de  $p(\text{raios})$ , que torna-se a priori, um bom indicativo para as demais definições necessárias, discutidas na sequência do trabalho. Com base nesses índices, percebe-se que as duas metodologias de deslocamento que envolvem velocidades médias (temporal e espacial) sobressaem-se às demais, e a melhor performance nesse contexto, refere-se à “média (temporal) de dois deslocamentos” para os três limiares. Acredita-se, que um dos motivos para a melhor performance temporal, deve-se ao fato que para as outras três técnicas de deslocação a premissa é espacial, as descargas elétricas (um campo altamente variável) são agrupadas em píxeis



de 8 x 8 km, e dentro dessa área nem sempre a distribuição é homogênea.

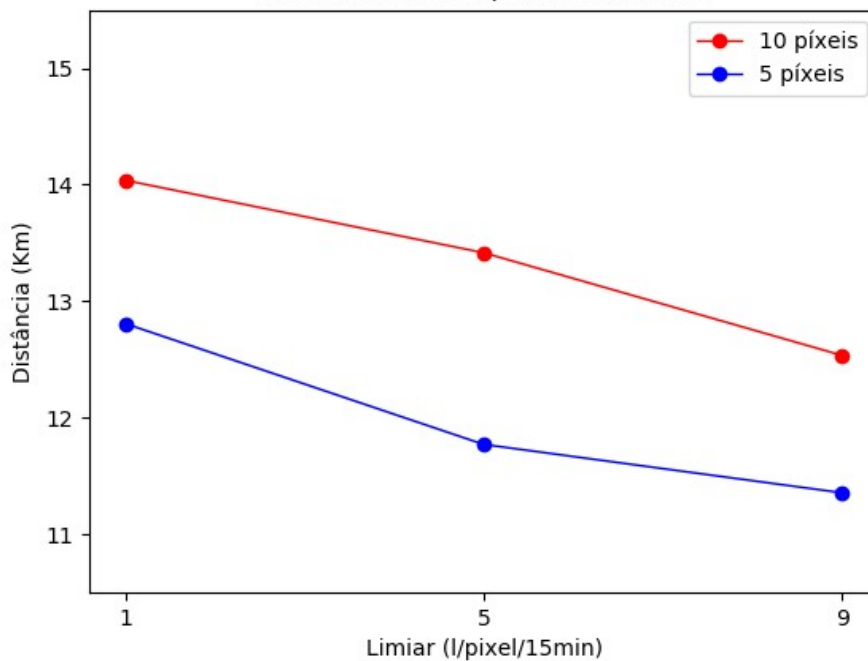
A partir do estudo do ciclo de vida de Sistemas Convectivos de Meso escala (SCM), Mattos e Machado (2011) discorrem sobre a significativa variação da atividade elétrica correlacionando-a aos diferentes estágios de vida do SCM. Com suporte, constataram o crescimento da taxa de ocorrência de raios a começar no início do ciclo de vida do sistema até atingir o máximo valor próximo ao estágio de maturação, enquanto que as maiores densidades de descargas elétricas registraram-se na fase inicial do ciclo de vida. Não obstante, sabe-se que a oscilação na atividade elétrica não se restringe apenas ao decorrer das tempestades, mas também, ao longo do dia. Frente a isso, relaciona-se à esse comportamento a intensa atividade elétrica registrada na área de estudo e exibida por Albrecht et al. (2016). O mesmo autor, Chronis et al. (2015) e Piper e Kunz (2017) afirmam que durante o dia, a atividade elétrica associa-se ao ciclo da convecção diário, que é favorecido além de outros, por fatores orográficos e termodinâmicos. Por essa ordem, o relevo local é caracterizado por regiões serranas, e como sugerido por Naccarato, Pinto Junior e Pinto (2003), a presença de três grandes cidades (São Paulo, Campinas e São José dos campos) contribuem para o aumento da temperatura local (hipótese termal) e emissão de partículas antropogênicas (hipótese de aerossol), fatores esses que favorecem o desenvolvimento de tempestades.

Outro fator a ser ressaltado com base nos primeiros resultados, é que ao se considerar limiares de tamanho e densidade mais baixos, serve-se não apenas dos sistemas mais severos, de maior complexidade dinâmica e microfísica para as análises, mas também dos eventos de menor intensidade. Logo, torna-se intuitivo que a técnica pode ser utilizada sem a necessidade de uma pré-seleção de eventos com características específicas, bem como, é possível simular seu funcionamento em modo operacional, sem maiores preocupações.

## 5.2 Análise dos limiares de tamanho mínimo

Uma vez definido a melhor metodologia para a prever a posição do SEA, fez-se necessário escolher a área mínima dos *clusters* de raios a ser detectada e rastreada pelo algoritmo, como minuciado na Seção 4.2. A escolha do melhor limite de tamanho mínimo baseou-se no erro da distância entre os centroides previsto e observado, cujos resultados são apresentados na Figura 5.2

Figura 5.2 - Comparação do erro da distância entre os limiares de tamanho mínimo para a previsão de 15 minutos.



Fonte: Produção do Autor.

O tamanho mínimo e o erro da distância entre os centroides mostraram-se diretamente proporcionais, isto é, o menor limiar de área apresentou-se com melhor efeito. Esperava-se tal comportamento, pois esse parâmetro influencia diretamente na definição do centro de massa do sistema, além do mais, ao se conceituarem maiores valores para o limiar de tamanho, eliminaram-se os menores sistemas. Ademais, tempestades maiores, mais organizadas e profundas, a exemplo de multicelulas, apresentam uma dinâmica de crescimento/decaimento mais complexa e conseqüentemente um considerável

incremento na atividade elétrica (PAKIAN; MAYBANK 1975, apud Cotton e Anthes 1989 p. 576). Estudos mais detalhados com o propósito de determinar como a tendência de crescimento desses sistemas pode ser modelada fazem-se necessários, dando importância às suas características físicas e dinâmicas.

Apesar de não se considerar  $\rho(\text{raios})$  como um índice a ser previsto, isto é, mantendo-o constante, contrastando-se para os três limiares as diferenças entre as densidades previstas e observadas para os dois indicadores de tamanho, o valor médio da desigualdade para os quatro intervalos de previsão é aproximadamente 1,27 vezes maior para a hipótese de 10 píxeis. Com base no exposto, manteve-se o mesmo patamar de tamanho mínimo para detecção dos sistemas eletricamente ativos, isto é, 5 píxeis .

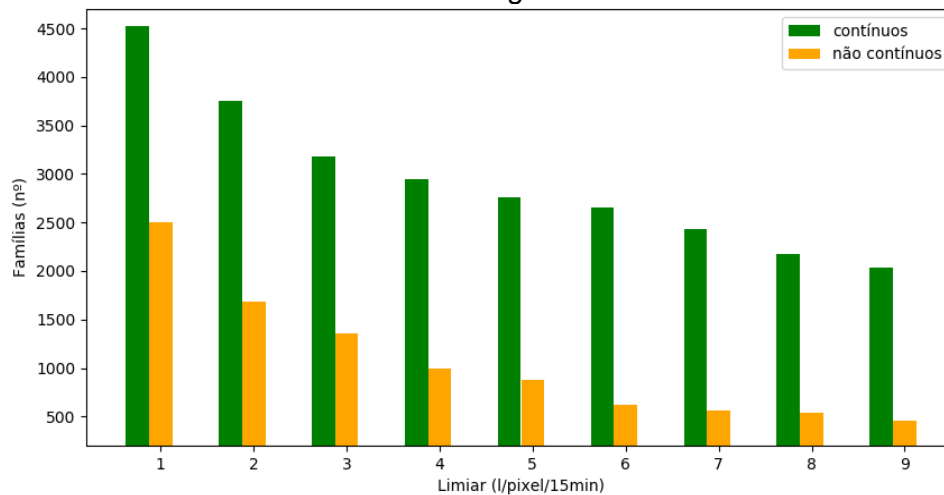
### **5.3 Comparação entre os limiares de densidade de raios**

Essencialmente fez-se necessário definir a melhor técnica de deslocamento para prever a posição do centroide e o tamanho mínimo do *cluster* de raios a ser detectado de maior eficácia, por se entender que a destreza da previsão está diretamente ligada às técnicas computacionais empregadas concomitante à boa representação das características físicas dos sistemas em estudo.

Como descrito na Seção 4.3, caracterizou-se o método da média de dois deslocamentos (Mdd) como aquele em que velocidade prevista é a média derivada das velocidades nos instantes -30min e -15min. Para essa investigação, considera-se nula sua variação durante os 4 intervalos de previsão, da mesma forma que o tamanho e a densidade permanecem constantes. Delinearam-se como parâmetros a serem investigados os limiares de densidade de descargas nos valores 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 e 9 l/pixel/15min. Isto posto, discutem-se os resultados para o melhor limiar de rastreio por esta ordem: **i)** sem considerar características dos sistemas; **ii)** contraste entre as melhores e piores previsões; **iii)** eventos classificados em contínuos e não contínuos, e, **iv)** cenário com o maior e menor valor de POD.

Primordialmente, tipificaram-se a porção de casos para cada um dos 9 limiares de densidade, de acordo com o tipo de evento (contínuo e não contínuo), tamanho e ciclo de vida. Para os 39 casos analisados percebeu-se uma significativa redução do número de famílias com o aumento do limiar, ao passo que nos limiares de 1 e 9 l/pixel/15min, computaram-se 7031 e 2489 famílias, respectivamente, em outras palavras, uma diminuição de aproximadamente 35% dos sistemas. A Figura 5.3 apresenta-nos a quantidade de sistemas computados, dividindo-os em contínuos e não contínuos.

Figura 5.3 - Número de famílias classificadas como contínuas e não contínuas em relação aos limiares de densidade de descargas elétricas.



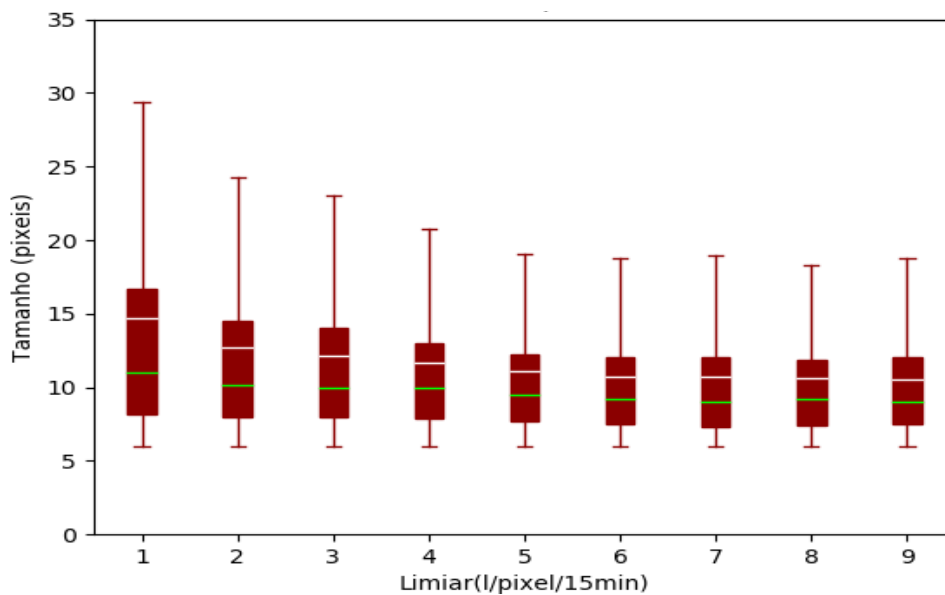
Fonte: Produção do Autor.

A Figura 5.4 mostra-nos os *boxplots* dos tamanhos dos sistemas em relação a cada limiar de acompanhamento, referindo-se a linha branca ao valor médio e a linha verde à mediana. Como esperado, constatou-se que quanto menor o limiar, maiores são os sistemas rastreados. Ainda, a média de tamanho dos sistemas foi de 12,102 píxeis (774,53 km<sup>2</sup>), apresentou-se inversamente proporcional, e, a diferença entre o menor e o maior valor médio tange 4,2 píxeis (268,8 km<sup>2</sup>). Nota-se na imagem que os valores médios, medianas e os quartis expostos apresentam-se similares a partir de 4 l/pixel/15min, para mais, constataram-se diferenças mais evidentes relacionadas aos *outliers*<sup>4</sup>. Por essa

4 Optou-se suprimir os *outliers* em todos os gráficos de caixa desta dissertação, para melhor visualizá-los.

razão, em relação ao tamanho, limiares acima de 4 l/pixel/15min são suficientes para representar sistemas mais intensos. Por sua vez, os limiares mais baixos (menores que 3 l/pixel/15 minutos) apresentam diferenças que podem ser significativas (nenhum teste de hipótese foi realizado para verificar se as médias são realmente diferentes), dada as mudanças apresentadas no gráfico de caixas.

Figura 5.4 - Tamanho médio das famílias obtidos para cada um dos 9 limiares de densidade de descargas atmosféricas.

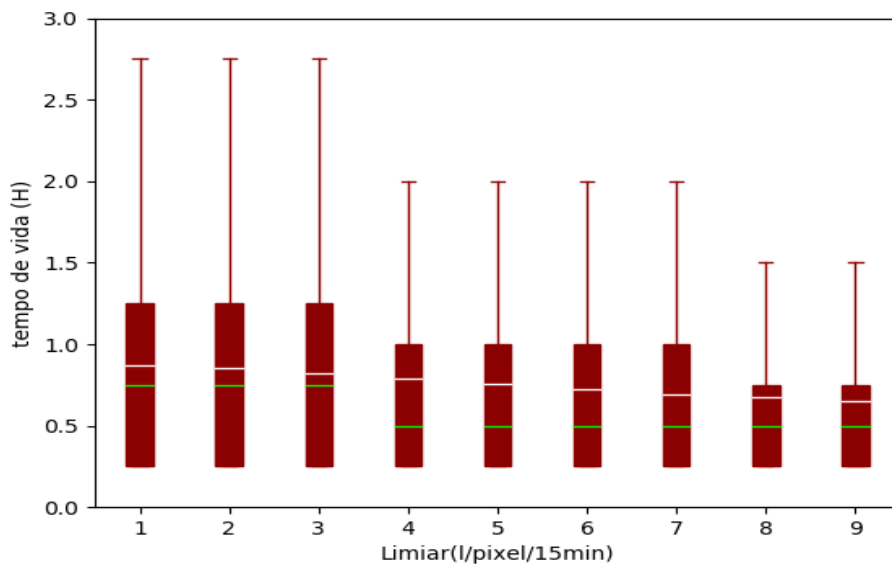


Fonte: Produção do Autor.

Percebe-se através das medianas da figura anterior, que a maior diferença consecutiva é observada entre os limiares de 1 e 2 l/pixel/15min e que a dessemelhança acentua-se entre os valores médios (decorrentes do cômputo dos *outliers*). Tal resultado mostra-nos que para melhor representar os sistemas, do ponto de vista do tamanho, limiares iniciais de 1 ou 2 l/pixel/15min aparentam ser bons candidatos. Com referência à caracterização de células mais intensas por intermédio de um segundo limiar, valores acima de 4 l/pixel/15min revelam-se eficazes. Ressalta-se que nenhuma análise sobre severidade foi executada, além do mais, tais resultados mostram apenas como representar os diferentes limiares de densidade dentro do sistema ForTraLC.

Exibem-se na Figura 5.5 para os diferentes limiares de  $\rho$ (raios) os *boxplots* correspondentes ao ciclo de vida observado para todos os sistemas analisados. Constata-se pela figura que a existência média dos sistemas para os 9 limiares foi de 0,783 horas (~47 minutos). À medida que se empregam os maiores limiares de densidade, sabe-se que a parte mais intensa da tempestade é rastreada, logo, um fator a ser observado é a diminuição do ciclo de vida médio das famílias. Corrobora-se tal comportamento com o da Figura anterior, contudo perceberam-se desigualdades entre os limiares de 4 l/pixel/15min, que se assemelha ao dos sistemas até o 7 l/pixel/15min, e o 8, que se diferencia sutilmente do limiar 9 l/pixel/15min, no tocante aos *outliers*.

Figura 5.5 - Tempo de vida das famílias em cada um dos 9 limiares de densidade de raios.



Fonte: Produção do Autor.

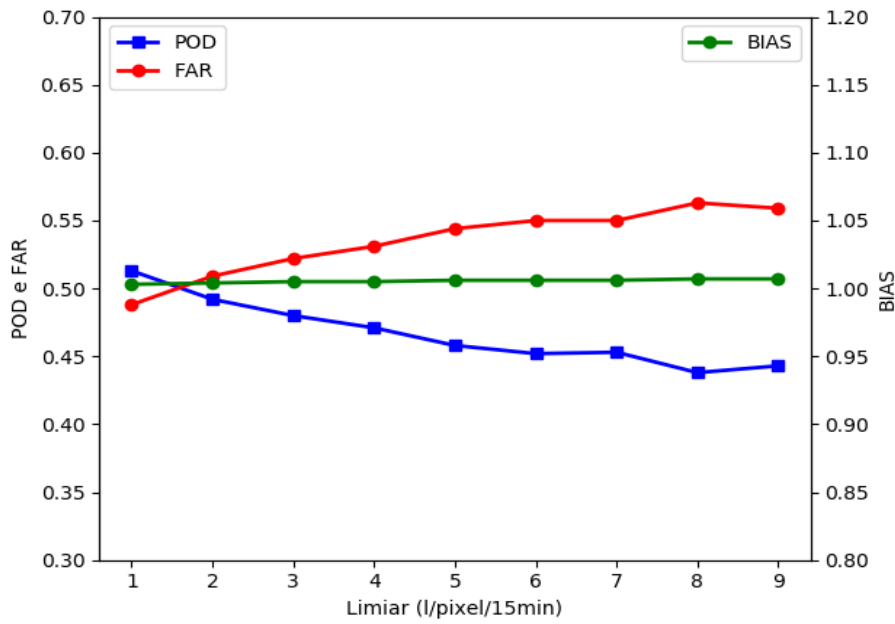
Por outra forma, em referência ao tempo de vida e tamanho do sistemas - parâmetros que são extremamente importantes a um sistema de rastreamento - não existem grandes diferenças entre os resultados apresentados. Salienta-se ainda, que essas duas propriedades possuem estreita ligação com a dinâmica interna da nuvem, que por sua vez, reflete diretamente em seu potencial de eletrificação. Sobre isso, verifica-se no trabalho de Mattos e Machado (2011), que a expansão da área nas fases iniciais de um sistema

convectivo de meso escala é um fator determinante ao seu tamanho e duração, e além do mais, torna-se um bom indicador de sua capacidade de eletrificação, ou seja, transcende às características dos sistemas eletricamente ativos aqui conceituados.

O índice crítico de acerto (CSI) variou de 0,344 à 0,283, do menor ao maior limiar respectivamente, fluando em maiores intervalos para  $\rho$ (raios) entre 1l/pixel/15min e 5l/pixel/15min. Na Figura 5.6 apresentam-se os valores dos demais índices estatísticos (POD, FAR e BIAS), que referem-se ao *skill* do sistema de previsão, para os diferentes limiares de rastreo. Os índices POD e FAR diminuíram e aumentaram, na devida ordem, enquanto o BIAS apresentou variação insignificante (flutuação na 3ª casa decimal), em relação ao aumento dos valores mínimos de densidade. Observou-se a mesma tendência em todos os limiares para os três índices a partir do prolongamento do tempo de previsão (não representado graficamente). Atenta-se pela figura, que o limiar de 1l/pixel/15min é aquele que apresenta o melhor desempenho com relação às previsões realizadas com a técnica de deslocamento Mdd, utilizando-se apenas dados de descargas elétricas.

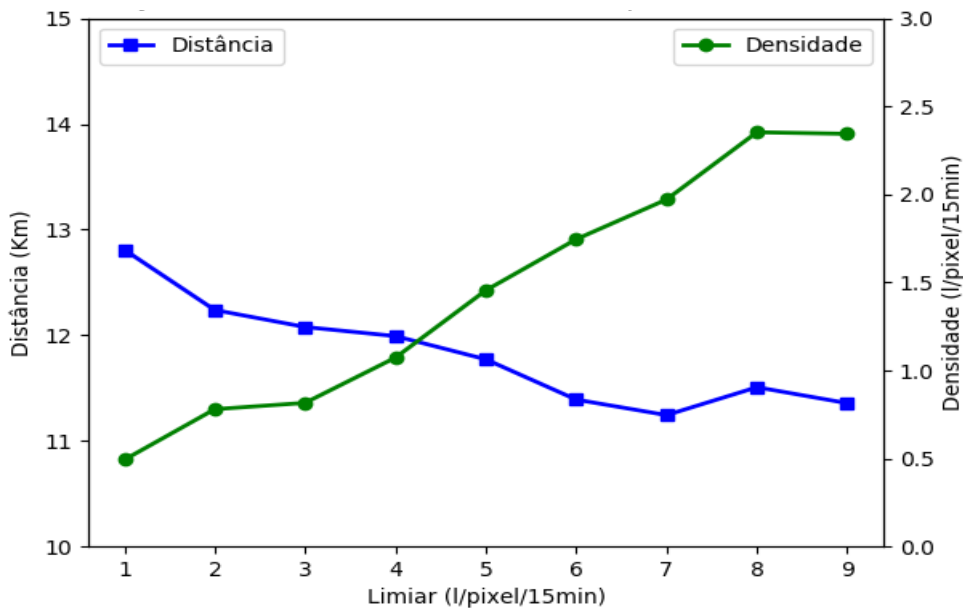
Expõem-se na Figura 5.7 para a previsão de 15 minutos as diferenças entre o previsto e o observado, com relação a densidade de descargas (l/pixel/15min, eixo secundário) e o centroide do sistemas (km). A diminuição da probabilidade de detecção (figura que segue) observada é considerada normal, pois ao aumentar o valor mínimo da densidade, os sistemas que são seguidos são os mais intensos, e assim, regidos por variações dinâmicas/microfísicas mais significativas. Trata-se pela mesma razão as diferenças entre as densidades prevista e observada, pois percebe-se o mesmo comportamento, em que os resultados inferiores apontam para os limiares mais elevados. Sob outra perspectiva, constatou-se o oposto ao descrito para a diferença entre as posições do centroide previsto e observado. A condição de que os limiares de densidade mais elevados forneceram menores erros, deve-se ao fato de que quanto maior o limiar menor será a área do *cluster* e o seu deslocamento, bem como o número de sistemas torna-se menor.

Figura 5.6 - Destreza do algoritmo previsão para os limiares de (praios) representada pelos índices de POD, FAR e BIAS, para a primeira previsão (15 minutos).



Fonte: Produção do Autor.

Figura 5.7 - Diferenças de distância e densidade, entre o previsto e observado, para a previsão de 15 minutos.



Fonte: Produção do Autor.



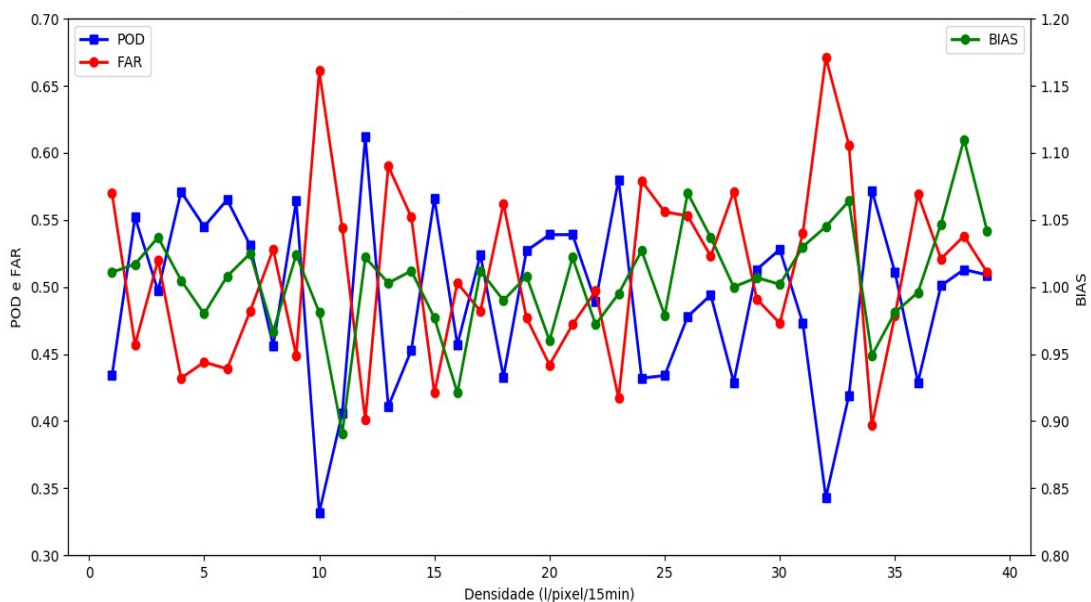
Desta forma, conclui-se que para o método da média de dois deslocamentos nas proporções aqui apresentadas, o melhor limiar de densidade de raios para o rastreamento e a previsão de atividade elétrica é o de 1l/pixel/15min (1 raio por pixel em 15 minutos). Para este limiar analisaram-se 7031 famílias, à proporção que 64,4% foram contínuas e 35,6% não contínuas. O tamanho médio dos sistemas foi de 14,721 píxeis (942,14 km<sup>2</sup>), e, inexistem ciclos de vida superiores a 3 horas, ao passo que estes permanecem em maioria com ciclo inferior a 1,5 horas. Além disso, para a definição de células mais intensas dentro do *cluster* rastreado, a densidade de 4 l/pixel/15min mostra-se a mais indicada, dada a pequena diferença em relação aos limiares mais intensos.

Ao considerar a previsão de 15 minutos (Figura 5.8), observa-se que os valores de POD variaram de 0,33 a 0,61, do FAR de 0,4 a 0,67 e do BIAS de 0,89 a 1,11 para os 39 casos analisados. Em todos os casos, os valores de POD e FAR diminuíram e aumentaram, por essa ordem, com o aumento do tempo de previsão (30, 45 e 60 minutos). A mesma tendência foi observada por Vila et al. (2008) no algoritmo original (ForTraCC), Kohn et al. (2011) e Chinchay (2018) em seus respectivos trabalhos. De modo a entender alguns fatores que podem influenciar na previsão dos sistemas, far-se-ão análises mais detalhadas sobre os melhores e os piores casos na próxima seção. Para tanto, partir-se-á de uma classificação fundamentada no POD, onde valores acima e abaixo de 0,5 indicaram as melhores e as piores previsões, respectivamente.

Confrontam-se na Tabela 5.2 os três índices da Figura 5.8 com a bibliografia exposta na Seção 5.2. Em termos de valores, a probabilidade de detecção (valor médio ~ 0,514) assemelhou-se às demais técnicas de previsão de raios e ao trabalho de Kohn et al. (2011), enquanto que o índice de falso alarme

(valor médio ~ 0,487) apresentou-se superior. Por sua vez, o BIAS (valor médio ~ 1) comporta-se com menores flutuações e sobressaiu-se aos contrapostos. Considera-se também, que os resultados obtidos com o presente trabalho são satisfatórios, uma vez que diferentemente dos demais autores, apenas dados de descargas elétricas são empregados.

Figura 5.8 - POD, FAR e BIAS para todos os 39 casos, no limiar de 11.



Fonte: Produção do Autor.

Tabela 5.2 – Comparação dos resultados de POD, FAR e BIAS com a literatura apresentada na Seção 2.5 , entre a primeira previsão de cada autor.

| <b>Autor</b>                                | <b>Dado</b>                    | <b>POD</b> | <b>FAR</b> | <b>BIAS</b> |
|---|--------------------------------|------------|------------|-------------|
| O Autor (2019)                              | Raios                          | 0,514      | 0,487      | 1           |
| Karagiannidis, Lagouvardos e Kotroni (2016) | Imagens IR de Satélite         | 0,58       | 0,40       | 0,96        |
| Karagiannidis, Lagouvardos e Kotroni (2016) | Imagens IR de Satélite + Raios | 0,50       | 0,08       | 0,54        |

(continua)

Tabela 5.2 - Conclusão

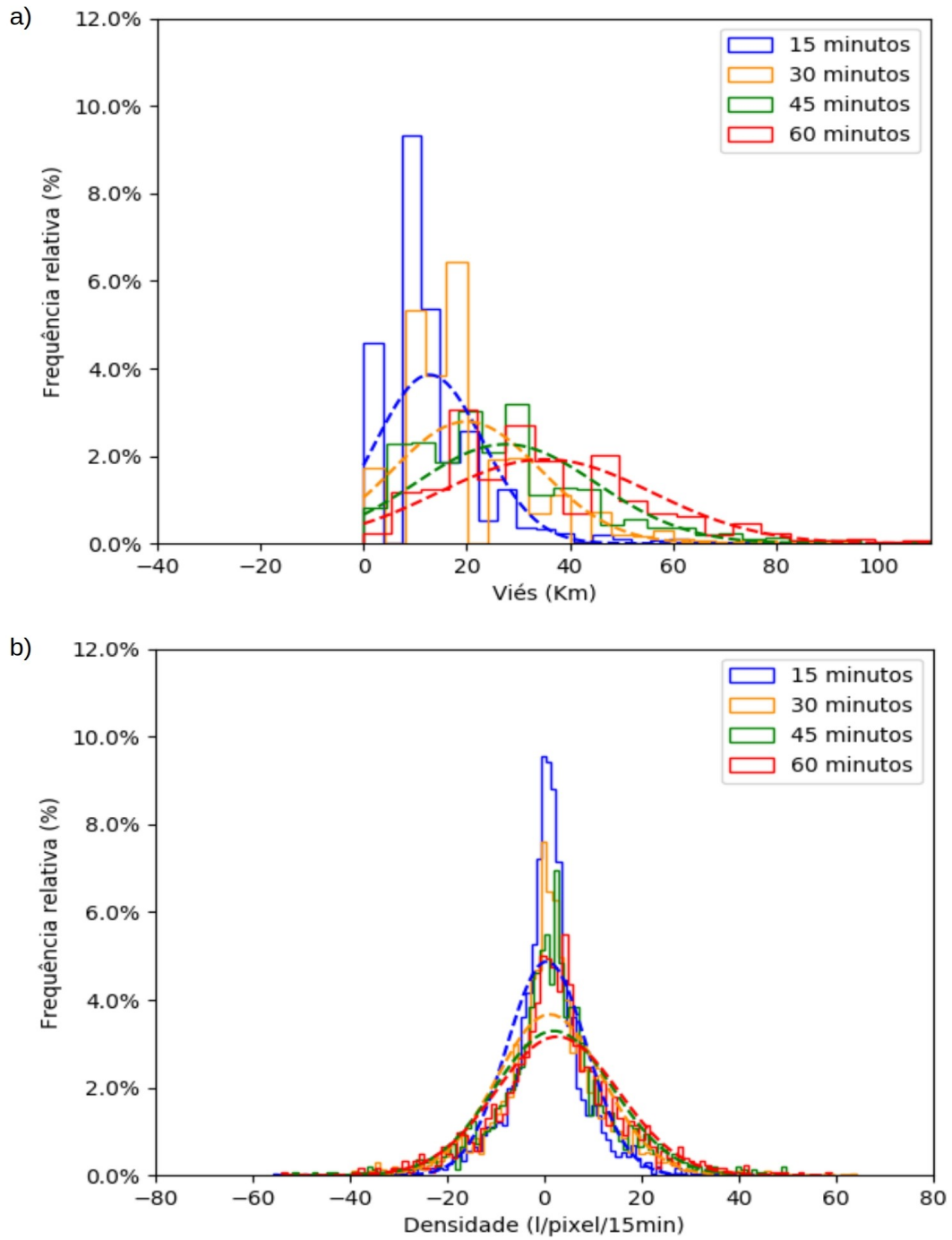
|                                       |                                  |             |             |               |
|---------------------------------------|----------------------------------|-------------|-------------|---------------|
| Zepka, Pinto Junior e Saraiva, (2014) | Modelo: Variáveis termodinâmicas | 0,56 – 0,97 | 0,32 – 0,39 | Não informado |
| Chinchay, (2018)                      | Imagens IR de Satélite           | 0,52 – 0,61 | 0,20 – 0,31 | Não informado |

Fonte: Produção do Autor.

Detalham-se na Figura 5.9 a partir de todos os casos no limiar de 1l/pixel/15min os vieses da distância e da densidade de descargas para cada previsão. Ambas variáveis asseguram maiores frequências relativas e vieses para previsões mais próximas e distantes, respectivamente, intuindo-nos, principalmente com base no viés da distância, que para intervalos de 30 ou mais minutos o algoritmo não apresenta destreza significativa. Tratando-se do erro médio de posicionamento do *cluster* predito (Figura 5.9a), 12,809 km (aproximadamente 1,6 píxeis) equivalem à previsão de 15 minutos e 35,259 km (~4,4 píxeis) à 60 minutos, em outras palavras, uma diferença de 22,45 km entre a primeira e a última previsão.

Referindo-se à densidade, parâmetro constante em todas as análises, na primeira previsão os sistemas retiveram um viés médio de 0,493 l/pixel/15min contra 2,654 l/pixel/15min para a última previsão. Apesar das maiores frequências referirem-se a baixas diferenças, nota-se em 5.9b, com menor frequência, vieses superiores a 40 l/pixel/15min nas previsões de 30, 45 e 60 minutos. Acredita-se que essas diferenças expressivas correlacionam-se às rápidas variações da atividade elétrica das tempestades, tanto no que tange à sua intensificação, quanto à situação oposta.

Figura 5.9 - Histogramas para o erro a) da distância e b) da densidade para o limiar de 1l/pixel/15min.

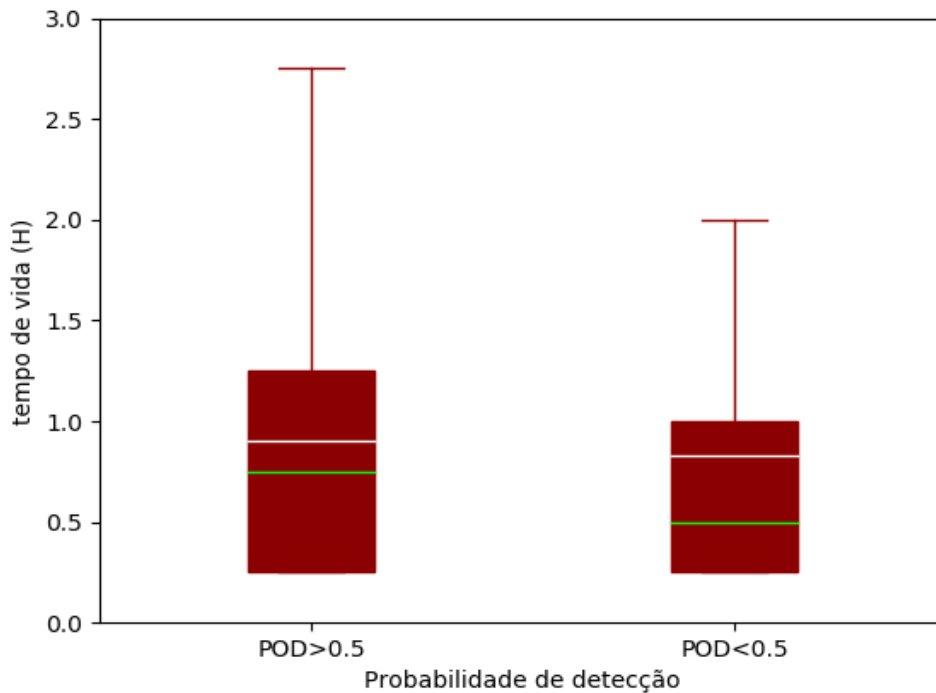


Fonte: Produção do Autor.

#### 5.4 Contraste entre as melhores e piores previsões

Comparam-se agora, os casos em que a probabilidade de detecção foi superior e inferior a 0,5 (50%). Observou-se na Figura 5.8, que da totalidade dos casos, 20 (60.2% das famílias) apresentaram indicadores acima de 0,5 e 19 (39.8% das famílias) abaixo. Na mesma ordem, a probabilidade de detecção média é de 0,54 e 0,44, e além do mais, as maiores variações para os índices POD e FAR são observados para as previsões com precisões íferas. A comparação entre o ciclo de vida dos sistemas eletricamente ativos para os dois padrões é apresentado através do *boxplot* na figura porvir (Figura 5.10), em que a linha branca representa a média e a linha verde a mediana. Percebe-se que o prognóstico da atividade elétrica torna-se melhor para SEAS que apresentam maiores ciclos de vida - associados à tempestades mais organizadas, como verificar-se-á nos próximos parágrafos -, neste caso, um tempo médio de vida de aproximadamente 0,9 horas (54 minutos).

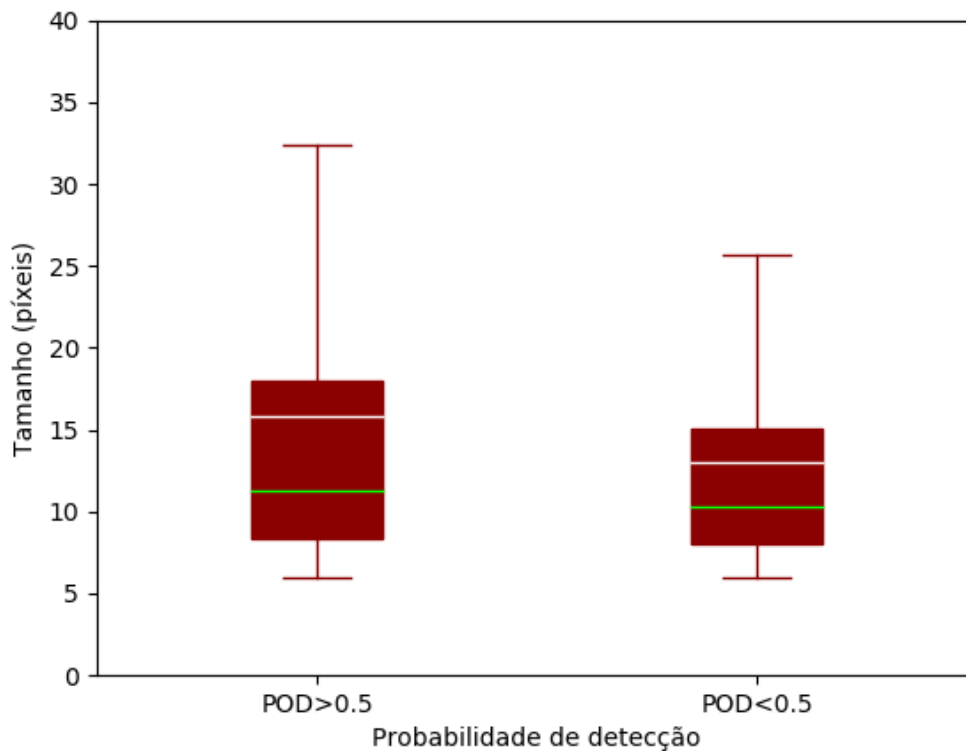
Figura 5.10 - Ciclo de vida das famílias para as melhores e piores previsões.



Fonte: Produção do Autor.

A Figura 5.11 reporta o tamanho médio das famílias para a análise susodita. Percebe-se o mesmo comportamento da figura anterior, dos quais, os melhores prognósticos apresentam-se para as maiores famílias, cujo tamanho médio é de 15,872 píxeis. (1015,81 km<sup>2</sup>) A diferença média de tamanho em relação às mais baixas probabilidades de detecção é de aproximadamente 3 píxeis, ou seja, o equivalente a 192 km<sup>2</sup>. Este resultado associado ao anterior, indica que os sistemas (SEA) mais jovens, i.e. com menor ciclo de vida e menor tamanho, de descargas elétricas apresentam maior variabilidade espaço-temporal, fator este, que pode prejudicar as previsões.

Figura 5.11 - Idem figura anterior, para o tamanho médio das famílias.

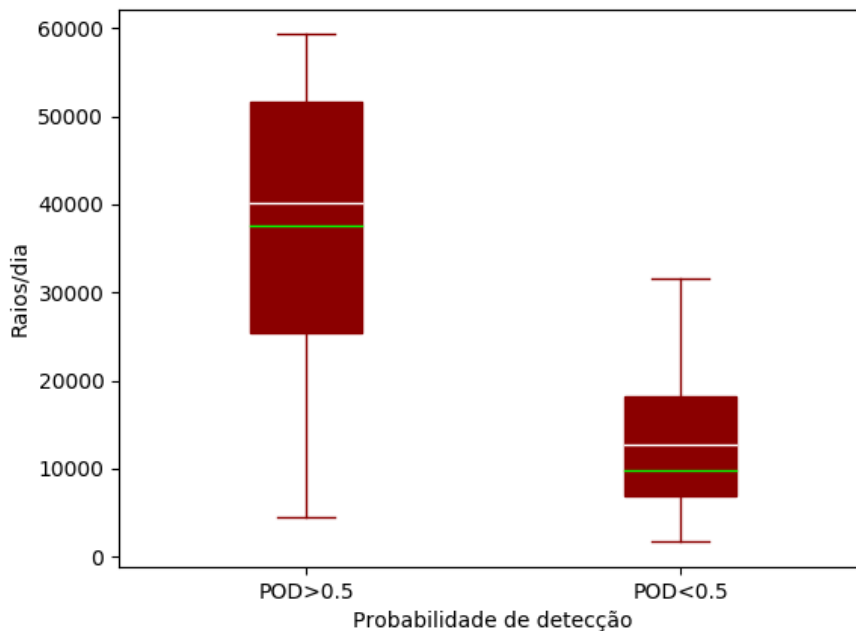


Fonte: Produção do Autor.

Com as mesmas significâncias, a Figura 5.12 mostra-nos os diagramas de caixa para a atividade elétrica total. Destacam-se de modo geral, os registros de maior atividade elétrica aos casos que apresentaram as melhores previsões (POD > 0,5), na qual, 70% desses apresentaram atividade elétrica total superior a 30000 descargas atmosféricas, enquanto que para a situação

contrária ( $POD < 0,5$ ), aproximadamente 63,2% dos eventos possuíram um total inferior a 15000 descargas elétricas. Mais, na mesma ordem de confronto, a atividade elétrica total média é de 40253 raios/dia contra 12791 raios dia. A discussão primorosa tangente à atividade elétrica, dar-se-á nos parágrafos consecutivos.

Figura 5.12 – Atividade elétrica total para a análise em referência.



Fonte:Produção do Autor.

Com alicerce na classificação da atividade elétrica total (AE) (Seção 4.5), confrontam-se para cada categoria a probabilidade de detecção (POD) e o índice de falso alarme (FAR) na tabela a seguir (Tabela 5.3). Notoriamente, as melhores e piores previsões ocorrem para os casos em que a atividade elétrica total é assumida como intensa e fraca, respectivamente. Ainda na devida ordem, valores de POD superiores a 0,5 estão presentes em 100% e 23,1% dos casos, e 30,1% para a série “moderada”.

Tabela 5.3 – Avaliação da previsão em relação a atividade elétrica total (AE) dos casos.

|            | <b>AE Fraca</b> | <b>AE Moderada</b> | <b>AE Intensa</b> |
|------------|-----------------|--------------------|-------------------|
| <b>POD</b> | 0,441           | 0,479              | 0,553             |
| <b>FAR</b> | 0,563           | 0,521              | 0,447             |

Fonte: Produção do Autor.

Com referência aos fenômenos observados para essa análise, evidenciam-se à precipitação de granizo 23,1% dos casos classificados com AE Fraca, 15,5% dos eventos organizados como AE moderada e 61,5% dos episódios descritos com AE intensa, concomitantemente, exceto para a situação de menor intensidade, as demais apresentaram em mais de 60% dos casos chuva intensa e rajadas de vento.

Destaca-se também com devida importância, que para ~38,4%, ~61,5% e ~92% das eventualidades, a AE fraca, moderada e intensa, por essa ordem, é consequência de tempestades organizadas, formadas em ambientes mais favoráveis ao desenvolvimento convectivo. Tal investigação corrobora os trabalhos de Meyer, Höller e Betz (2013a), no qual verificaram reduzida atividade elétrica em sistemas convectivos com características físicas e dinâmicas de menor intensidade (que são típicas ao verão para a área de estudo), a qual, moderam os mecanismos de eletrificação da nuvem, e da constatação oposta, Pakian e Maybank (1975), citado por Cotton e Anthes (1989 p. 576) e Sperling (2018).

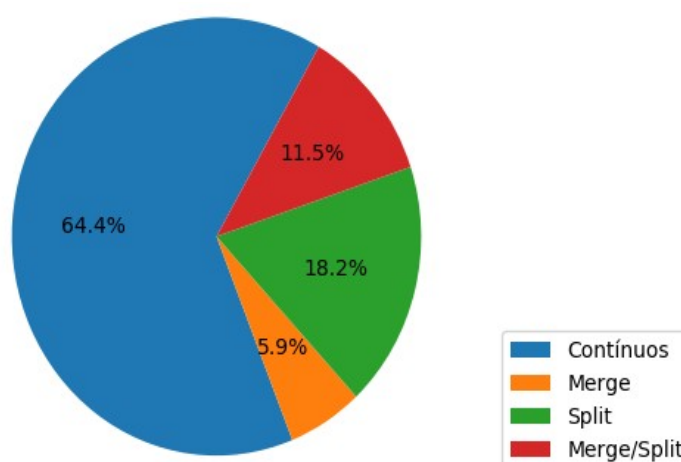
### **5.5 Análise dos sistemas a partir de sua classificação**

Esta subseção refere-se a análise dos resultados em que se considera a classificação (Seção 4.3) dos sistemas para o limiar de 1 l/pixel/15min. Para a primeira argumentação sobre o tipo de sistema, analisaram-se diagnosticamente todas as famílias separando-as em contínuas e não contínuas. Computaram-se neste trabalho (explícito na Seção 4.3) como sistemas contínuos, aqueles em que se verificou ininterruptão durante todo seu



ciclo de vida, e não contínuos, os que apresentaram divisão (*split*), fusão (*merge*) ou que fragmentaram-se e agruparam-se (*merge/split*) em instantes distintos durante toda a permanência do sistema em monitoramento. A partir da população, 7031 famílias, com base em todo o ciclo de vida, observa-se pela Figura 5.13 que 4526 (sensivelmente dois terços) foram contínuos, e da proporção inversa, mais de 50% equivalem aos casos em que houve a partição do sistema e 16,6% atribuem-se às conjunções entre sistemas vizinhos.

Figura 5.13 - Tipificação sistemas para o limiar de  $\rho$ (raios) 11/pixel/15min.

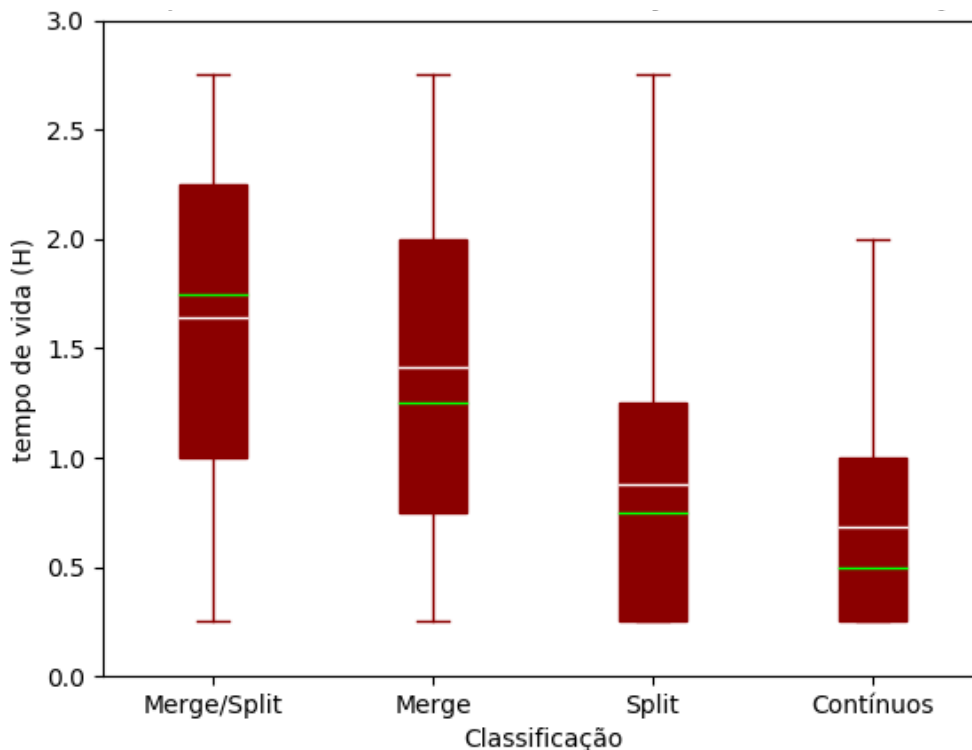


Fonte: Produção do Autor.

A respeito do tempo de vida das famílias, verifica-se pela Figura 5.14 que os maiores ciclos de vida (~1,64h, sendo ~ 98min) são para os sistemas em que ocorreram *merge* e *split* ao longo do rastreamento, valor este, muito próximo às situações em que se detectou apenas a fusão entre sistemas (média de vida e 1,41h, equivale a 84,6min). Semelhantes também são os tempos de vida dos sistemas classificados em *split* e contínuos, em que respectivamente preservaram-se em média 0.88h (~53 minutos) e 0.68h (~41 minutos). Acredita-se que este comportamento está associado a aglomerados de nuvens maiores e intensos, onde a atividade elétrica é dinâmica e pode acontecer em áreas mais ativas, favorecendo assim a junção e a separação dos núcleos dentro da nuvem (SEAs). Por outro lado, os núcleos que apresentam uma característica

contínua, apesar de mais frequentes, têm um tempo de vida mais curto, respeitando a dinâmica da atividade elétrica dentro da nuvem. Este resultado é um indício de que a previsão por extrapolação de campos de densidade de raios não devem exceder grandes períodos de tempo.

Figura 5.14 - Tempo de vida das famílias em relação as quatro classificações.

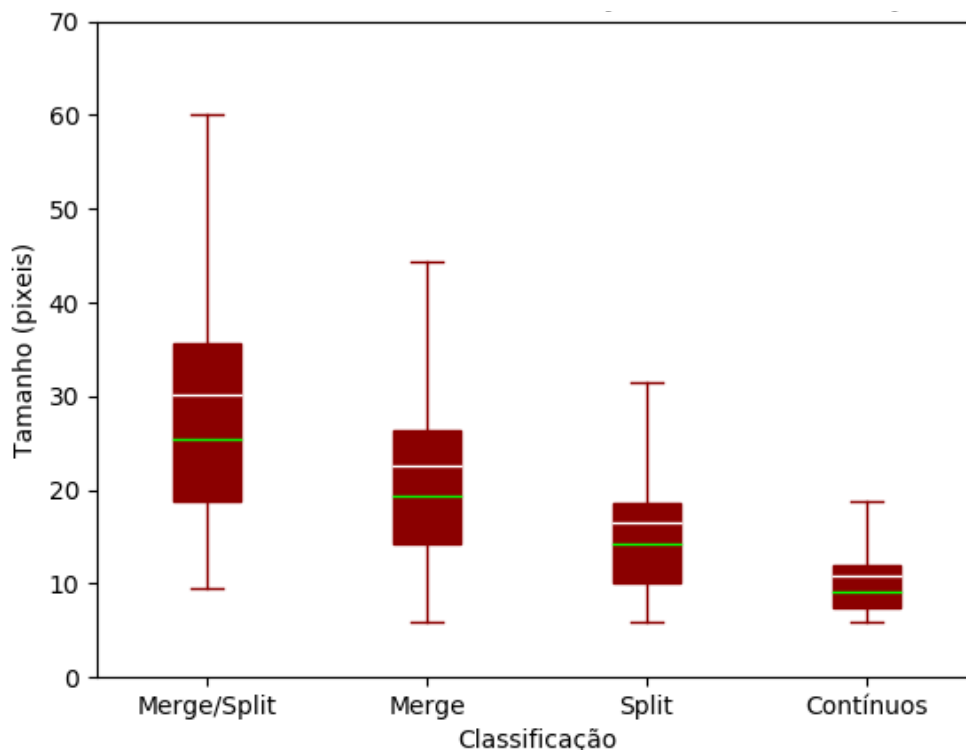


Fonte: Produção do Autor.

A Figura 5.15 exibe o tamanho das famílias associado à sua tipificação, e se comparada ao gráfico anterior (Figura 5.13), observa-se um comportamento afim. Os maiores sistemas - em número totalizaram 810 - apresentaram um tamanho médio de 30 píxeis (1920 km<sup>2</sup>) e relacionaram-se à ocorrência de partição e agrupamento (ou vice-versa) de sistemas cômplexos durante o tempo de vida monitorado. Em contrapartida, os menores sistemas foram contínuos e tiveram um tamanho médio de 10,7 píxeis (684,8 km<sup>2</sup>). Tomando esse valor como referência, o tamanho médio nos casos de *split* e *merge*, por essa ordem, foi de aproximadamente 6 e 12 píxeis (384 km<sup>2</sup> e 768 km<sup>2</sup>) maior. Isto posto, os sistemas classificados como contínuos apresentam-se com os menores

tamanhos e ciclos de vida, que robora Mattos e Machado (2011) conforme já discutido, comportamento este que se explica pela grande variabilidade da atividade elétrica.

Figura 5.15 - Igualmente a figura anterior, contudo para o tamanho das famílias.

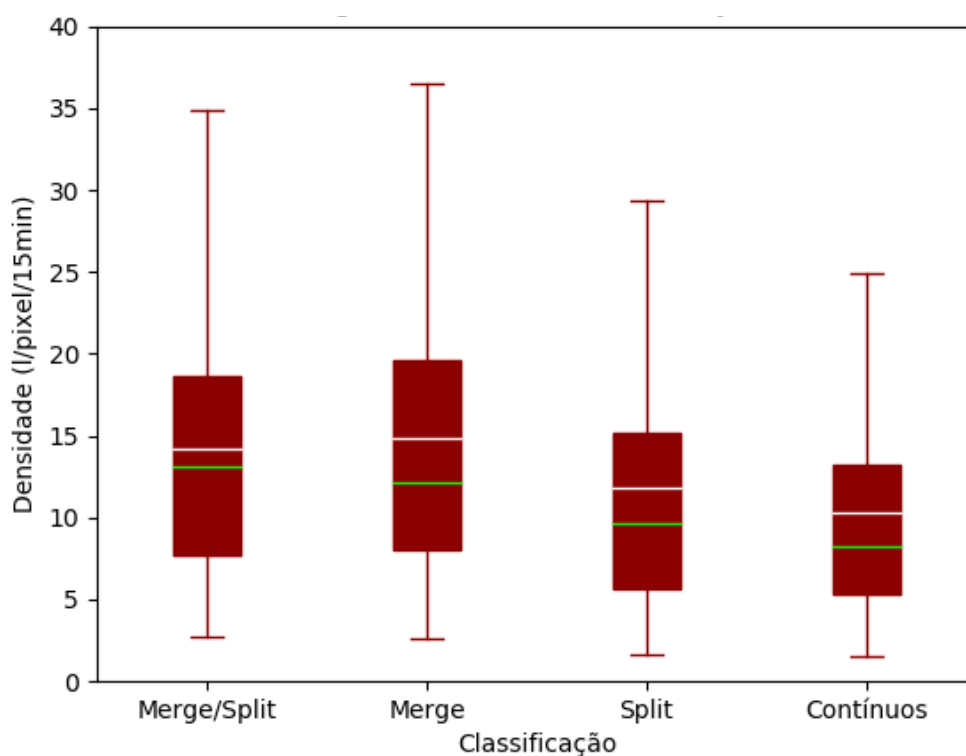


Fonte: Produção do Autor.

Igualmente, em termos da descrição das características dos sistemas sobre o ponto de vista de sua classificação, apresenta-se na Figura 5.16 os *boxplots* para a densidade média, em que da mesma forma, a linha branca refere-se à média e a linha verde a mediana. Sem especificar, a densidade média para todas as famílias foi de 11,32 raios por pixel no intervalo de 15 minutos, e na ordem contínuos, *split*, *merge*, *merge/split*, os números são 10,34, 11,8, 14,84 e 14,24 l/pixel/15min. Diferentemente das duas situações anteriores (Figuras 5.13 e 5.14), têm-se levemente maiores valores para os casos em que ocorreram a fusão entre sistemas, o que certamente deve ocorrer em tempestades mais intensas e organizadas, e reforça a hipótese de Sperling

(2018), da qual propõem que a estrutura interna dos sistemas convectivos de escala maior é influenciada durante os processos de realimentação, quando um novo núcleo convectivo intenso e profundo é embebido dentro desse sistema. Por outro lado, os sistemas contínuos apresentaram as menores densidades, e relacionando-os aos resultados discutidos nesta seção, presume-se que são alusivos à tempestades pouco organizadas e com núcleos convectivos menos vigorosos, que conseqüentemente apresentam menor atividade elétrica total, como destacam Meyer, Höller e Betz (2013(a)).

Figura 5.16 - Idem a Figura 5.14, porém para a densidade média das famílias.

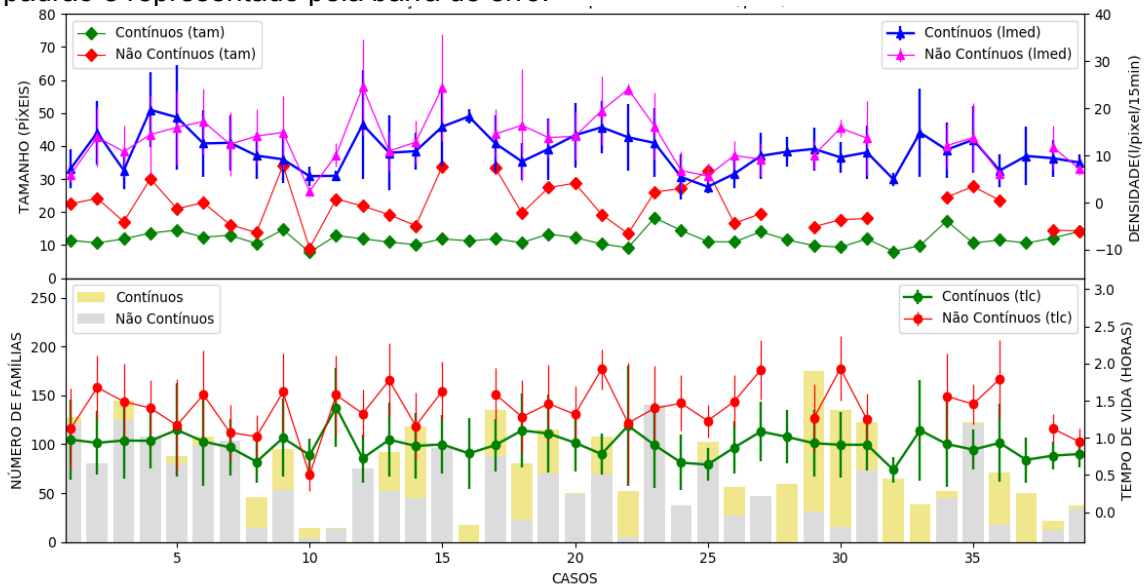


Fonte: Produção do Autor.

Analisaram-se também, caso a caso, os mesmos parâmetros para famílias cujo tempo de vida foi superior a 30 minutos. Os resultados são apresentados na Figura 5.17. Na parte inferior da referida figura, por meio do gráfico de barras demonstra-se o número total de famílias contínuas e não contínuas que atenderam a condição. Para significar o tempo de vida (tlc) e a densidade média de descargas elétricas (Imed) exibem-se igualmente os desvios padrões.

Todos os parâmetros (linhas na figura) alternam-se em cada ponto (caso) e disso evidenciam-se as distintas características dinâmicas e microfísicas desses, que por sua vez, dependem das condições atmosféricas da gênese e do desenvolvimento das nuvens convectivas. Anabor (2004) destaca que essas condições (atmosféricas) iniciais são particulares a cada tempestade, porém, comuns à todas elas a instabilidade, variações na velocidade e cisalhamento do vento, quantidade de vapor disponível para a convecção, advecção térmica e umidade.

Figura 5.17 - Densidade (lmed), tamanho (tam), tempo de vida (tlc) e número de famílias para todos os casos, considerando se contínuo ou não contínuo. O desvio padrão é representado pela barra de erro.



Fonte: Produção do Autor.

Sem especificar, as maiores suavidades nas linhas traduzem-se às continuidades, que estão presentes em todos os 39 casos, enquanto o antagônico é notável em 34 deles. O tempo de vida e o tamanho dos sistemas em cada caso testificam respectivamente com as Figuras 5.14 e 5.15 maiores variações e ciclos de vidas para os casos de não continuidade. Além do mais, para quase a totalidade das situações, os pontos de maior valor para o tamanho mínimo, tempo de existência, densidade e número de famílias coincidem com os eventos não contínuos. Esse comportamento é reflexo da

dinâmica das descargas elétricas ao longo do ciclo de vida dos SEAs. Sistemas contínuos em sua maioria apresentam menor tamanho e ciclo de vida, contudo ambos, contínuos e não contínuos, revelam alta variabilidade de descargas entre os eventos observados. Em consequência, esse resultado pode indicar que um sistema de previsão de descargas elétricas que não leve em consideração esta variação espaço-temporal, seja incapaz de prever com confiabilidade os valores de densidade.

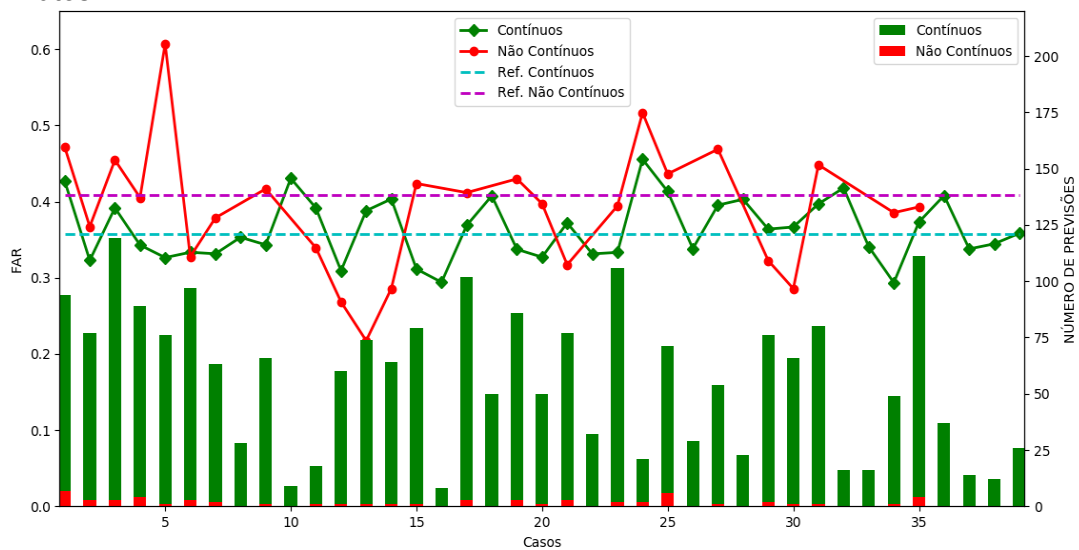
Reportando-se agora ao estudo e discussão dos resultados que tem por base os prognósticos, concentra-se a análise em previsões contínuas e não contínuas. Qualificaram-se aqui a porcentagem de previsões corretas, nas quais se consideraram acertadas as situações em que i) prognóstico e diagnóstico são contínuos, e, ii) prognóstico e diagnóstico são não contínuos, e, o índice de falso alarme, derivado a partir da comparação “*cluster a cluster*” entre previsto e observado. Definida essa conferência, com base nas equações da Seção 4.4 vê-se que o único indicador estatístico passível de cálculo é o FAR (equação 4.3), uma vez que ao se extrair inicialmente do prognóstico o *cluster* a ser confrontado, apenas as variáveis “a” e “b” da tabela de contingência (Tabela 4.1) podem ser obtidas.

Mostra-se no gráfico que segue o índice de falso alarme para todos os casos, identificando se contínuos ou não e os respectivos valores médios de referência, 0,358 e 0,408. Repara-se pela figura que a linha (em verde) qual representa os casos classificados como contínuos apresentam um comportamento mais estável em comparação à representação contrária (linha vermelha), tendo essa a maior parte dos valores abaixo da média guia (linha magenta) e com dois picos, máximo e mínimo bem definidos. Esses extremos concernem a dois eventos os quais o ForTraLC gerou apenas uma previsão não contínua para cada, e desta forma, sem grande representação estatística.

Torna-se evidente pela figura que os casos não contínuos apresentam em geral maior FAR que os contínuos, ademais, a presença de alguns eventos extremos

apontam para possíveis problemas que um sistema de previsão automático enfrentará. Além disso, nota-se na Figura 5.18 que o número de previsões de sistemas contínuos é muito maior do que os não contínuos (barra vermelha). Nesse sentido, um sistema de previsão a curto prazo que trate eventos contínuos de forma mais adequada que não contínuos apresentará melhores resultados, mesmo que esse, revele limitações para identificar essa variabilidade espacial das descargas atmosféricas. Isso mostra que em um sistema de monitoramento automático, o grau de eficácia pode ser alcançado devido a maior frequência dos eventos com melhor nível de acerto.

Figura 5.18 - Índice de falso alarme para todos os casos por *cluster*, de acordo com a classificação do prognóstico em contínuo ou não contínuo, para previsão de 15 minutos.



Fonte: Produção do Autor.

Conjuntamente a esse contexto, comparou-se também os produtos de tamanho mínimo (5 e 10 píxeis) (não mostrado) a ser considerado pelo algoritmo para seguir os *clusters*. O número de previsões foi significativamente menor para o maior tamanho, 1261 contra 2284, e, as maiores dessemelhanças entre os resultados estão para as ocorrências de previsões não contínuas. Para as previsões dos casos não contínuos, o limiar 5 píxeis apresentou margem superior de acertos de aproximadamente 6%, enquanto que para os contínuos, manifestou um índice de acertos de 2,8% inferior. Esse resultado corrobora a

ilação obtida na Seção 5.2, ou seja, para todos os testes aqui realizados, a área mínima de 320 km<sup>2</sup> para monitoramento dos SEAs é a mais expressiva para as metodologias de extrapolação espaciais do algoritmo ForTraLC.

## 5.6 Estudo de caso

Como visto anteriormente, existem casos que mostraram uma melhor previsão do que outros. Neste sentido, verificar-se-ão as condições físicas associadas aos extremos, ou seja, o pior e o melhor caso previsto, cujo objetivo, é identificar padrões que possam ser implementados para melhorar o algoritmo de previsão. Portanto, esta subseção destina-se ao estudo de 2 casos para o método da média de dois deslocamentos: o caso em que se obteve a maior e menor probabilidade de detecção, por esta ordem.

### 5.6.1 Caso nº 12 – 30/01/2017 (o melhor caso)

O caso do dia 30 de janeiro de 2017 é caracterizado pela ocorrência de granizo e chuva intensa ao final da tarde e início da noite, conforme reporta-se na Tabela 5.4.

Tabela 5.4- Descrição do evento.

| <b>Local</b> | <b>VIL Máximo (mm)</b> | <b>Ocorrência</b> |
|--------------|------------------------|-------------------|
| Jundiaí      | ~50                    | granizo           |
| Campinas     | ~40                    | granizo           |
| Sorocaba     | ~25                    | granizo           |
| Itú          | ~10                    | chuva intensa     |
| Araraquara   | ~50                    | chuva intensa     |

Fonte: SOS-CHUVA (2017).

A análise sinótica, segundo Picolo (2018), evidencia-nos que o principal fator de grande escala para ocorrência destes eventos foi um vórtice ciclônico em



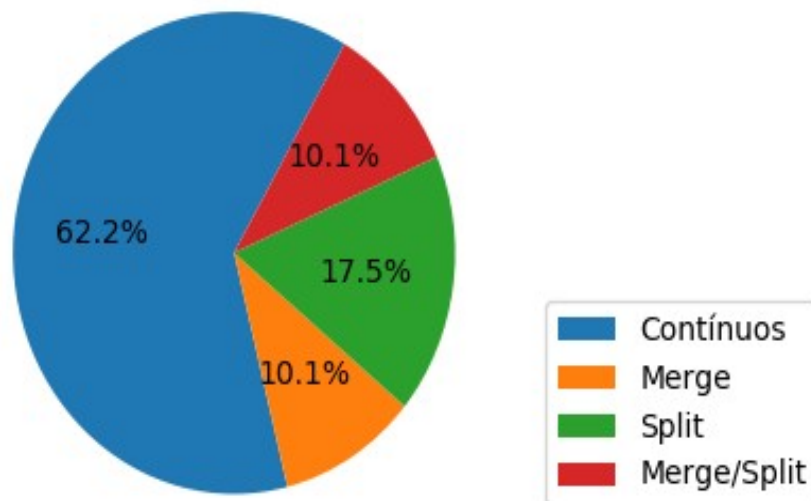
altos níveis (sistema de baixa pressão em 200 hPa), localizado sobre o Paraguai. Na média atmosfera observou-se esse sistema com vortacidade negativa associada e em baixos níveis instabilidade próximo às suas bordas, característica consequente da presença desse vórtice. Ainda sobre esses, constatou-se às 6, 9, 15 e 18 UTC ventos divergentes sobre a região de estudo, bem como, a respeito dessa, percebeu-se advecção quente pela carta de 850 hPa, o que pode ter auxiliado na manutenção da instabilidade em baixos níveis. No mesmo nível verificou-se fluxo de umidade proveniente da Amazônia, outro fator importante para formação de tempo severo.

Em termos termodinâmicos, baseia-se na sondagem disponível das 12 UTC. Percebe-se então, que a atmosfera encontra-se úmida em baixos níveis e muito seca acima do nível de 600 hPa (camada de inversão de subsidência). Quando se deriva da sondagem a razão de mistura, nota-se que seu indicador permanece abaixo de  $2 \text{ g.Kg}^{-1}$  para essa camada e com valores menores para o nível 500-400 hPa, que respectivamente, apresentam umidade relativa entre 10 e 20%, e, abaixo de 10%. O rápido declínio da temperatura potencial equivalente com a altura até a camada de inversão de subsidência observado também é fator preponderante para instabilidade convectiva. Os índices de instabilidade CAPE (ver lista de abreviaturas) ( $1042 \text{ J.Kg}^{-1}$ ) e *lifted index* ( $-2.69 \text{ K}$ ) são da mesma forma evidências de condições favoráveis à formação de tempestades severas. Em concórdia aos ensejos de instabilidade, os registros de 17 estações de superfície do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), apontam para alguns horários o aumento do ponto de orvalho e da umidade relativa, e em algumas delas, verificou-se também a diminuição da temperatura para o período vespertino (PICOLO, 2018).

Diagnosticaram-se nesta data 217 famílias, sendo 135 contínuas e 82 não contínuas, da qual a proporção mais significativa para essas é a situação em que se verifica *split*, como traz a Figura 5.19. O tamanho médio das famílias é de 14,25 píxeis ( $912 \text{ km}^2$ ), o menor tamanho (10 píxeis, ou seja,  $640 \text{ km}^2$ ) relaciona-se aos sistemas contínuos e o maior (25 píxeis, sendo  $1600 \text{ km}^2$ )

para o cenário em que houve *merge* e *split* na mesma família. Percebe-se idêntico comportamento para o ciclo de vida das famílias, correspondendo esse a um valor médio de 1,14 h (68,4 min) e cujos valores mais baixos associam-se às continuidades (0,5 h, que são 30 min) e os mais altos aos casos de divisão e fusão dos sistemas, ou vice versa (1,94 h, igual a 116,4 min).

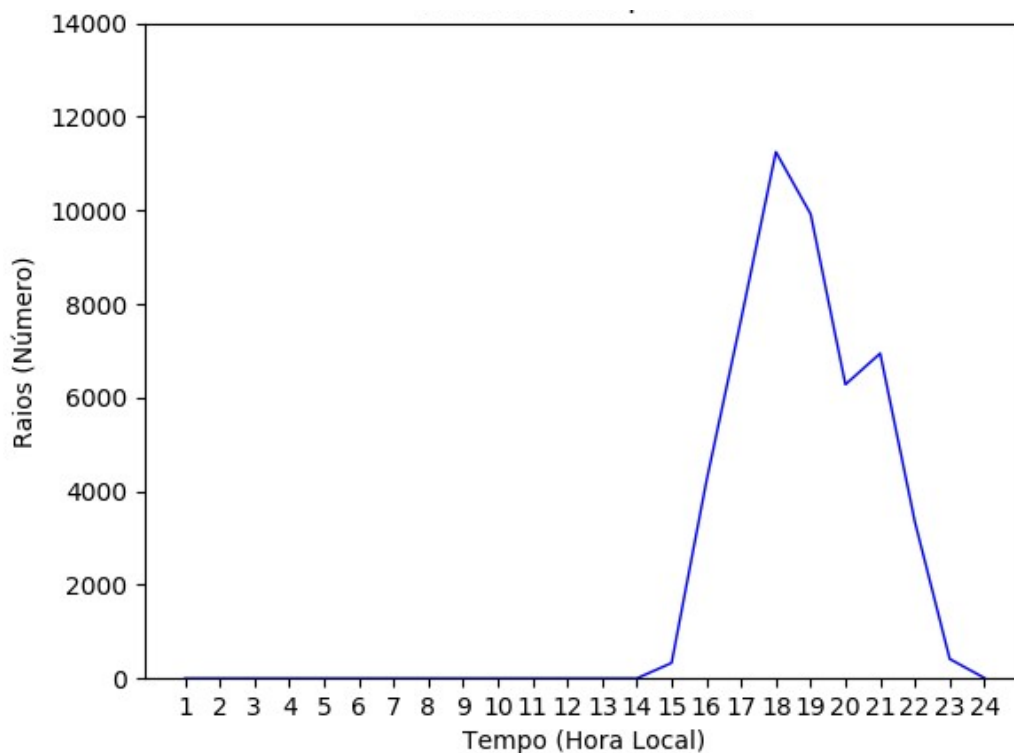
Figura 5.19 - Caracterização das famílias para o caso de 30/01/2017.



Fonte: Produção do Autor.

Com base em Sperling (2018), os resultados da Tabela 5.2 são significativos indicadores de intensos processos dinâmicos e microfísicos no interior das tempestades do dia 30 de janeiro, que por essa razão torna-se um ambiente favorável aos mecanismos de separação de cargas. A Figura 5.19 apresenta-nos a variação do número total de raios em função do tempo registrado através da rede de detecção de descargas elétricas em solo BrasilDAT. O comportamento da curva que representa a atividade elétrica obtida em 5.20 é característica da região de estudo para o período, conforme reportado por Chronis et al. (2015) e Albrecht et al. (2016), crescente no período vespertino devido à máxima convecção, atingindo seu ápice e diminuindo com o anoitecer, por outra forma, a atividade elétrica intensifica no período vespertino, alcança seu máximo ao meio/final da tarde e diminui no transcorrer da noite.

Figura 5.20 - Ciclo diurno da atividade elétrica total para o caso em análise.



Fonte: Produção do Autor.

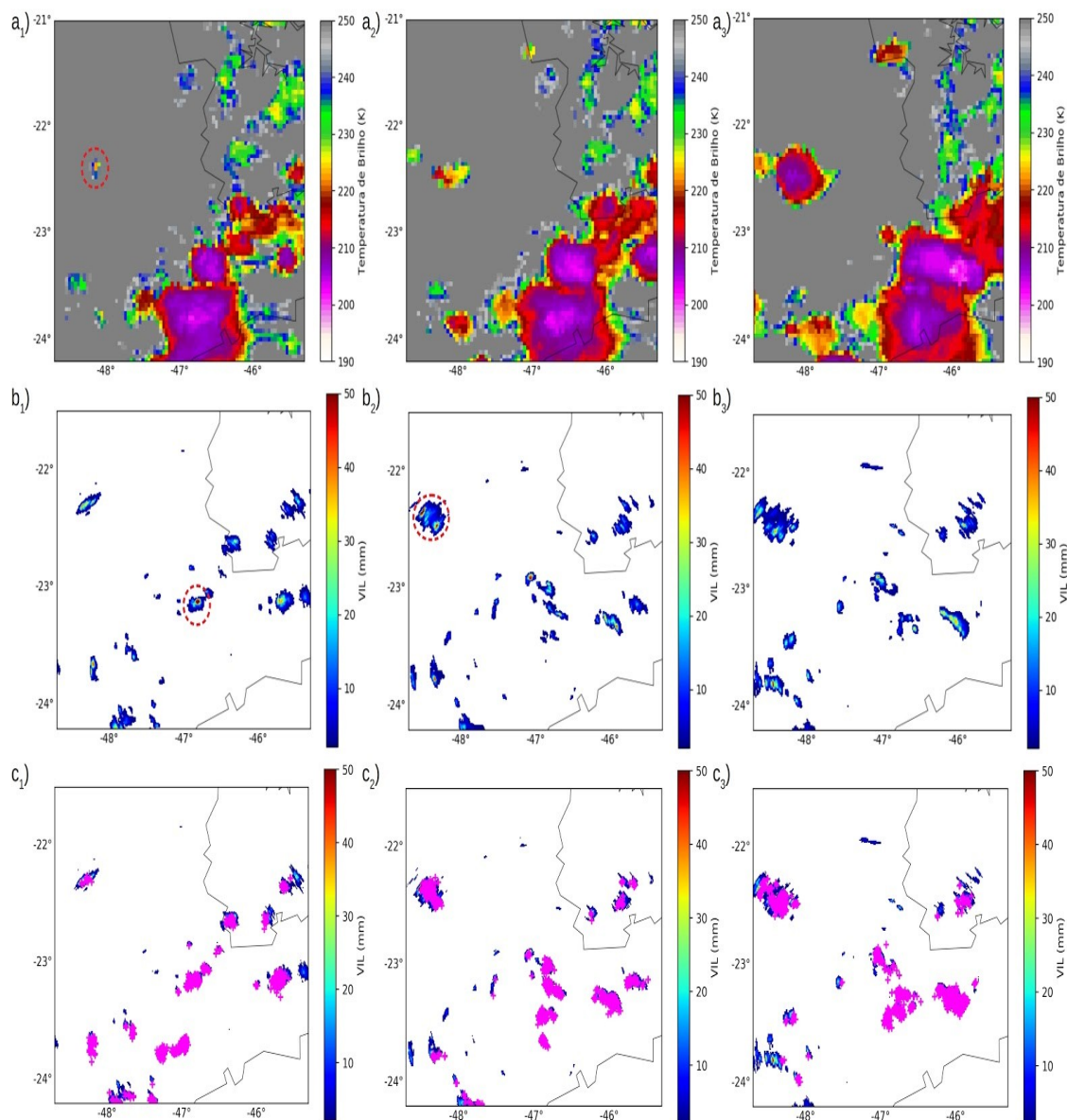
Analisam-se agora as características morfológicas das principais nuvens a partir das imagens de satélite e radar meteorológico associadas aos SEAs, com intento de melhor compreender os resultados do algoritmo de previsão para esse caso. A divisão “a” na Figura 5.21, refere-se às imagens de temperatura de brilho do satélite GOES-13 para o dia 30 de janeiro nos horários próximos à máxima presença de atividade elétrica. As imagens foram plotadas para temperaturas de brilho menores que 250 K, valor esse, inferior ao limiar de temperatura máximo definido no trabalho de Karagiannidis, Lagouvardos e Kotroni (2018) para que as nuvens apresentassem condições favoráveis à ocorrência de descargas elétricas. Para o mesmo intervalo, o segmento “b” da Figura 5.21 traz-nos o *Vertically Integrated Liquid Water* (VIL), e no setor “c” da referida figura, mostram-se as descargas pontuais

colocalizadas no tempo e no espaço com o *Vertically Integrated Liquid Water* (VIL). Para maiores esclarecimentos, expõem-se todas as figuras de satélite (Figura A1), VIL (Figura A2) e descargas elétricas colocalizadas com o VIL (Figura A3) no apêndice A ao final deste trabalho.

Pela Figura A1 do apêndice A, nota-se que para os horários das 15h (A1a) até aproximadamente 18h (A1f) há um sistema dominante que localiza-se próximo à costa, na qual é responsável pela parcela mais significativa da presença de atividade elétrica. Esse sistema atinge o menor valor de  $T_b$  (~200K) próximo das 17h30min (5.21a<sub>1</sub>), e 10 minutos depois, seu ápice de VIL (~50mm), representado pela região em destaque na Figura 5.21b<sub>1</sub>, momento em que assinala refletividade acima dos 60 dBZ (não mostrado). A partir desse instante, o núcleo convectivo em análise precipita, dado a diminuição do valor de VIL (A2q). Com base nas imagens de satélite apêndice (A1) e descargas sobrepostas ao VIL (A3), vê-se a continuidade desse sistema com atividade elétrica consistente e organizada até às 20h30min (A1k) e (A3z), quando se encontra em fase de dissipação e sua atividade elétrica cessa.

Para os mesmos horários recém discutidos, ressalta-se também que o sistema apreendido pela área em destaque na Figura 5.21a<sub>1</sub>, precipita e em seguida é realimentado, alcançando os mesmos padrões físicos, VIL ~50mm e refletividade >60 dBZ, (tracejado em 5.21b<sub>2</sub>) porém, por se tratar de um sistema com tamanho inferior, quer dizer, ambiente para separação de cargas menor, sua atividade elétrica foi menos significativa. Encontram-se também para o mesmo intervalo de tempo (17h30min às 18h30min) outras esparsas regiões de atividade elétrica que podem analisadas no apêndice A, todavia, com devida importância, ao passo que no horário das 18h registrou-se o maior número de raios para este dia, percebido na Figura 5.20 conforme os registros da rede BrasilDAT.

Figura 5.21 - Imagens de satélite (seção a), *Vertically Integrated Liquid Water* (VIL) (seção b) e raios colocados com VIL (seção c).



Representações para os horários locais, na mesma ordem: **a1)** 17h30min; **a2)** 18h; **a3)** 18h30min; **b1)** 17h40min; **b2)** 18h20min; **b3)** 18h40min; **c1)** 17h40min; **c2)** 18h20min; e **c3)** 18h40min.

Fonte: Produção do Autor.

A partir das 20h30 (Figura A1k), um sistema (à esquerda da imagem) intensifica, momento em que se atenta a um novo pico de raios (de menor amplitude). Os valores de VIL (de A2y em diante) e refletividade assemelham-se aos já detalhados e sua dissipação se dá após às 22h30min (A1o). De modo

geral, as regiões com descargas elétricas supracitadas, das quais originaram-se os *clusters* utilizados no ForTraLC, possuem uma distribuição espacial e temporal mais homogênea e as famílias mantêm-se organizadas por períodos mais longos em comparação aos demais (casos), fatores esses, que se acredita terem contribuído para o melhor desempenho nas previsões. Além disso, as tempestades que geraram estas atividades elétricas apresentaram um ciclo de vida bem definido, com prováveis correntes ascendentes intensas e núcleos convectivos bem definidos, como pode ser notado pelas figuras de VIL e imagens de satélite no infravermelho. As condições dinâmicas e termodinâmicas da atmosfera circundante deram suporte aos desenvolvimento destes eventos, como descrito por PICOLO (2018).

Apresenta-se na Tabela 5.5 o *skill* geral da previsão para os 4 intervalos de tempo avaliados. Notam-se valores praticamente iguais do indicador BIAS e seu ínfimo incremento com o aumento do tempo de previsão. Esse incremento pode significar uma possível superestimação da previsão. Visualiza-se também, que o falso alarme (FAR) cresce e a probabilidade de detecção (POD) decresce para o aumento do tempo de previsão. Comportamento esperável, por se tratar da previsão de um campo altamente variável no tempo e no espaço, e associado a isso, emprega-se um método de extrapolação dos campos em função das mesmas variáveis, o que favorece essa tendência.

Tabela 5.5 - *Skill* do algoritmo para todos os tempos de previsão.

| <b>Índice/Previsão</b> | <b>15 min</b> | <b>30 min</b> | <b>45 min</b> | <b>60 min</b> |
|------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| <b>POD</b>             | 0.612         | 0.442         | 0.306         | 0.204         |
| <b>FAR</b>             | 0.401         | 0.575         | 0.714         | 0.817         |
| <b>BIAS</b>            | 1.022         | 1.044         | 1.072         | 1.119         |

Fonte: Produção do Autor.

### **5.6.2 Caso nº 10 – 17012017 (o pior caso)**

O dia 17 de janeiro de 2017 é o último de 3 dias consecutivos (15, 16 e 17) com registro de tempo severo na área de abrangência do projeto, que ocasionaram significativos acumulados de precipitação e inundações na região da Grande São Paulo (SOS - CHUVA, 2017). Detalhadamente para o dia 17, reduzidas são as informações disponíveis sobre as localidades específicas, os respectivos danos bem como a caracterização meteorológica do caso.

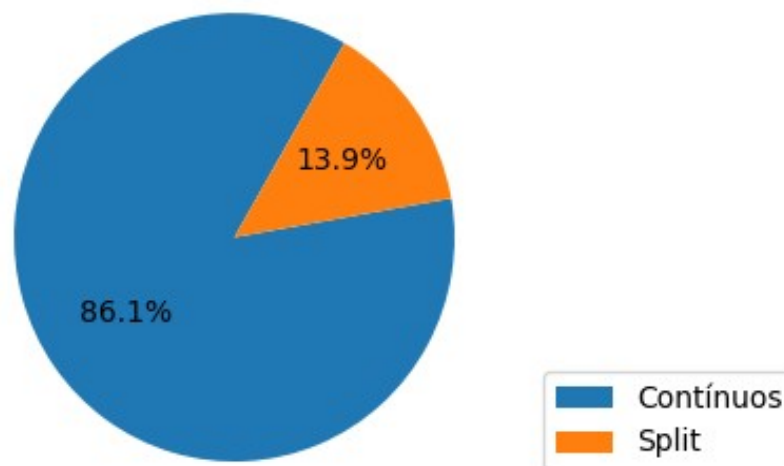
Esse caso originou-se principalmente da configuração da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) entre os estados do Mato Grosso e São Paulo (SOS - CHUVA, 2017). Em análise às cartas sinóticas Picolo (2018), expressa que se vê em altos níveis (200 hPa) a presença de um vórtex ciclônico próximo a costa do nordeste, sobre o Atlântico, e, um cavado mais afastado da costa do sul do Brasil, associado a frente em superfície nesse local. Destaca-se do nível de 500 hPa, para o dia 15, um sistema de baixa pressão com vorticidade negativa associada na região noroeste do estado que se estende pela região central no dia 16. Para essas datas, percebe-se na carta de 850 hPa a presença de dois sistemas de baixa pressão sobre o estado, um sobre a região nordeste e outro em noroeste, porém diferentemente da anterior, o sistema sobre a área noroeste do estado desloca-se para sudoeste durante o dia 16 e desaparece nas primeiras horas do dia 17, todas estas análises podem e devem ser observadas no trabalho de Picolo (2018).

Outro fator de importante destaque percebido para a mesma data e para os dias anteriores é o escoamento de noroeste com origem na região amazônica. Já o escoamento de oeste, ao adentrar continente é defletido pelos Andes em sentido ao sudeste brasileiro. Em termos de umidade relativa no mesmo nível atmosférico, registrou-se na maior porção do estado aumento do indicador durante o dia, com evidência para as tardes dos dias 15 e 16, cujos valores para algumas localidades superaram 95%. Ainda em 850 hPa, constata-se em maior intensidade para o dia 16 advecção quente nas regiões leste e noroeste,

ao passo que para essa, a transferência de calor deve-se à baixa pressão existente no local (PICOLO, 2018).

Na carta de superfície, encontra-se na costa do Rio Grande do Sul uma frente fria movendo-se para leste durante o dia, que favoreceu o desenvolvimento da tempestade dia 15. Aos demais dias, essa análise expôs a presença de ventos de noroeste em direção ao norte do estado no período vespertino. Para este caso não há dados disponíveis de radiossonda e a análise dos índices de instabilidade para o dia 16 foi baseada no modelo GFS. Os indicadores CAPE e *lifted index* apontaram uma atmosfera moderadamente instável. Os valores, respectivamente, demonstraram-se crescentes ao longo do dia para a parte leste do estado, estando entre  $1400 \text{ J.Kg}^{-1}$  à  $1800 \text{ J.Kg}^{-1}$  às 15 UTC, e, para o mesmo horário de aproximadamente  $-3 \text{ K}$ . Das 19 estações meteorológicas do INMET analisadas, evidencia-se o registro de ventos a partir de norte-nordeste e noroeste sobre a região (PICOLO, 2018).

Figura 5.22 - Classificação dos sistemas rastreados nesse caso.



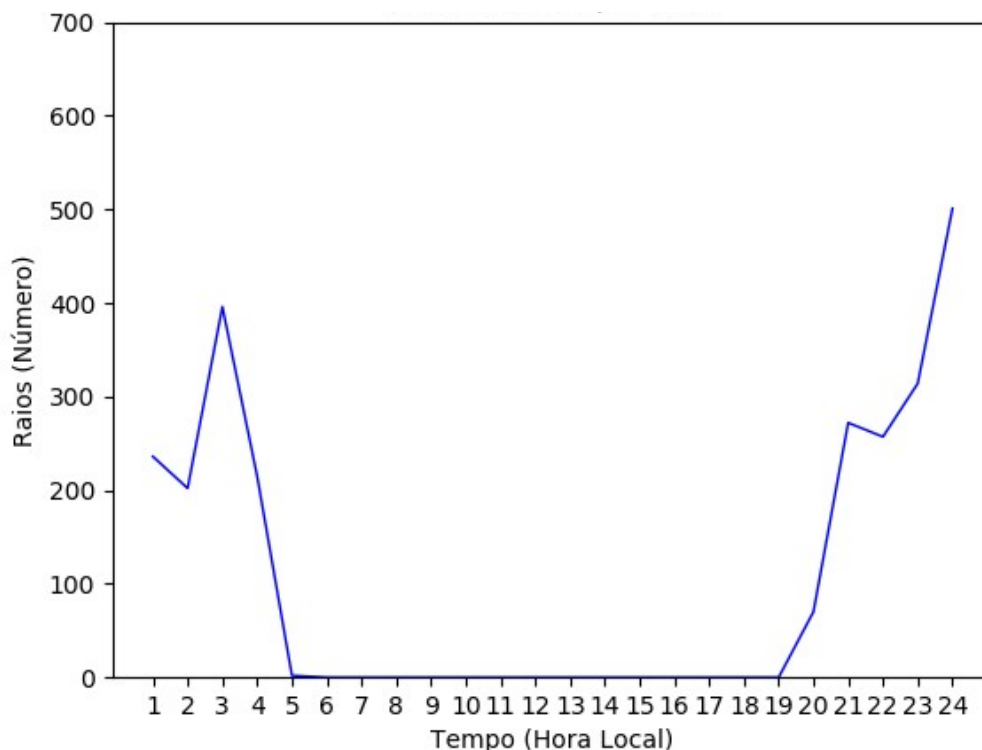
Fonte: Produção do Autor.

Para o caso do dia 17 foi rastreado um total de 36 famílias, dessas, 31 contínuas e 5 não contínuas, como se pode ver pela Figura 5.22 (acima). Diferentemente do comportamento geral e do caso anterior, o tamanho médio



de todas as famílias foi de aproximadamente 8,8 píxeis. Coincidentemente, o tempo de vida dos sistemas contínuos e não contínuos desse caso também são valores próximos, referindo-se 0,48 h (28,8 minutos) aos eventos de continuidade e 0,45 (27 minutos) à situação oposta.

Figura 5.23 - Variação do número de descargas elétricas durante o dia 17/01/2017.



Fonte: Produção do Autor.

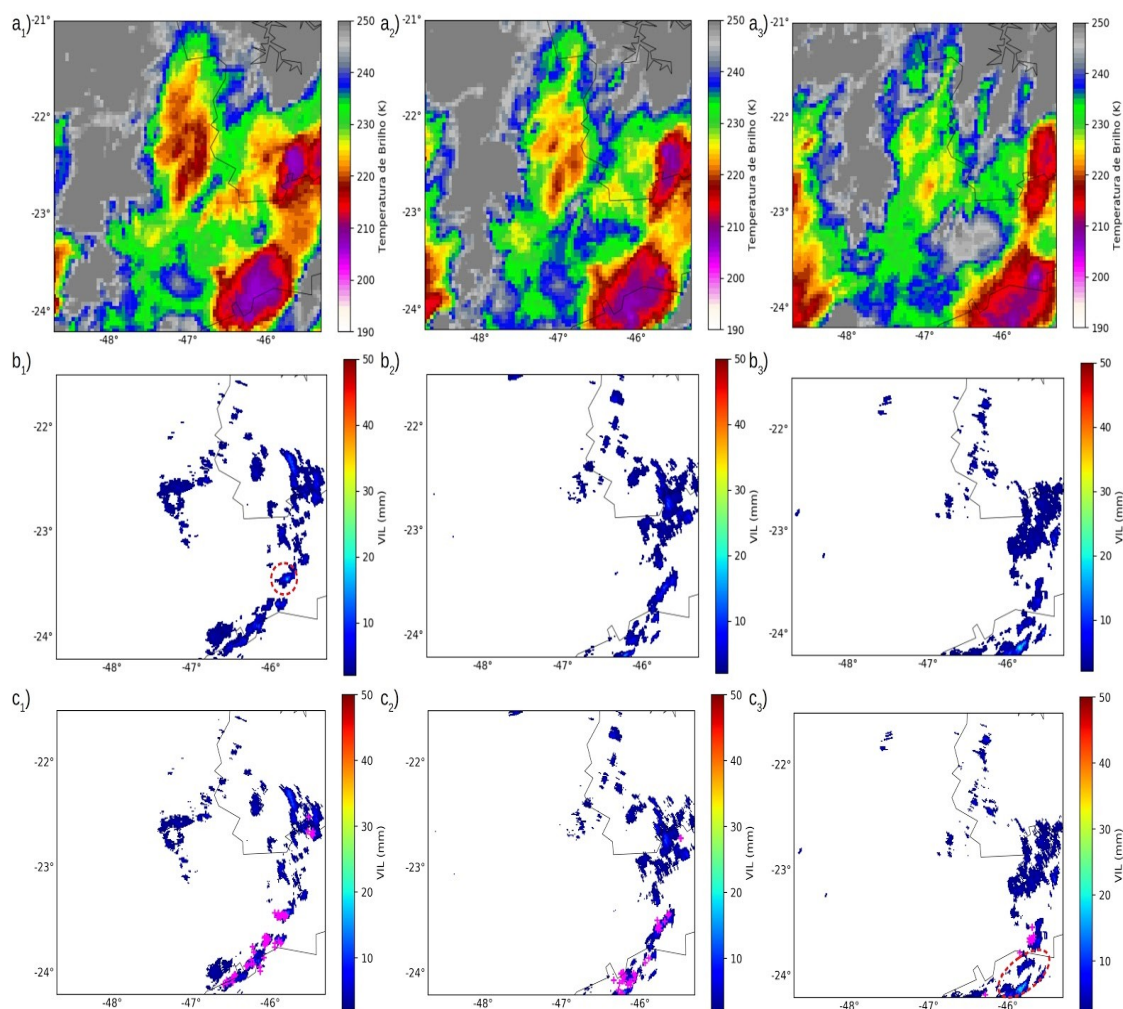
Investigou-se também a variação do número de raios no tempo para o caso em estudo. De acordo com a Figura anterior (5.23), observa-se a presença de atividade elétrica em dois momentos distintos, o primeiro, já nas primeiras horas dessa eventualidade, deve-se ao fato de que o dia 17 é sucessor de dois dias de eventos severos, e o segundo ao final da tarde, horário esse, segundo Chronis et al. (2015) e Albrecht et al. (2016), em que se registra a maior incidência de descargas elétricas sobre a região em estudo em decorrência do ciclo diurno da convecção. Para os horários do final do dia e início da noite, encontra-se um pico de descargas mais elevado do que o primeiro entre às 23h e 23h59min, momento esse em que não foi passível de previsão pois o pré-

requisito de número mínimo de imagens não foi cumprido. Importante destacar, que a atividade elétrica em discussão foi significativamente menor que ao caso anterior, onde aqui, o valor máximo de raios registrados pelos sensores foi levemente superior a 500 raios, enquanto que o pico em comparação ultrapassou 11000 descargas atmosféricas.

Para uma análise mais detalhada a respeito das primeiras horas do dia 17, mostram-se na Figura 5.24 as imagens de satélite competentes à temperatura de brilho a partir da banda espectral de 10,20 - 11,20  $\mu\text{m}$  (Infravermelho) na seção “a”, as representações para o VIL (setor “b”) e as descargas elétricas colocadas ao VIL (partição “c”). Encontram-se no apêndice B, as demais imagens com informações de satélite, radar e descargas elétricas associadas à radar, nas respectivas Figuras B1, B2 e B3.

Em regra, as características físicas dos sistemas assemelham-se para os dois períodos em que houveram registros de atividade elétrica, como reportado na Figura 5.23, e para tanto, descrevem-se-as para as primeiras horas do dia com evidência ao máximo de descargas atmosféricas, momento esse, em que o algoritmo apresentou-se com maior destreza. Nota-se pela Figura 5.24c<sub>1</sub>, que a principal região eletricamente ativa está embebida em um sistema cujo sua temperatura de brilho mínima é inferior a 220 K (Figura 5.24a<sub>1</sub>), o que segundo Karagiannidis, Lagouvardos e Kotroni (2016) são temperaturas favoráveis à ocorrência de descargas elétricas. Em seguida (Figuras 5.24a<sub>2</sub> e 5.24a<sub>3</sub>), observa-se que o sistema desloca-se para fora da área de cobertura dos dados (tracejado em 5.24c<sub>3</sub>), inicia sua dissipação e a atividade elétrica diminui no passar do tempo, até zerar (B3h). Os valores do VIL permanecem próximos a 10 mm, sua quantia máxima é de aproximadamente 30 mm e pode ser vista na Figura 5.24b<sub>1</sub> área em destaque, e respectivamente para esse espaço e horário, a refletividade do radar está em cerca de 50 dBZ (não demonstrado).

Figura 5.24 - Imagens de satélite (seção a), *Vertically Integrated Liquid Water* (VIL) (seção b) e raios colocalizados com VIL (seção c).



Imagens nos horários locais, na mesma ordem: **a1)** 2h30min; **a2)** 3h; **a3)** 3h30min; **b1)** 2h50min; **b2)** 3h20min; **b3)** 3h50min; **c1)** 2h50min; **c2)** 3h20min; e **c3)** 3h50min.

Fonte: Produção do Autor.

No tocante às imagens em 5.24c e B3, que referem-se a colocação dos dados de descargas elétricas e de radar, constata-se que as regiões eletricamente ativas são menores e menos consistentes em comparação ao caso anterior. Com base na Figura B3, comparam-se os dois períodos com registro de atividade elétrica do dia 17. Atenta-se para que nas primeiras horas do dia (Figura B3a à B3h), há maior congruência nas regiões que apresentam raios do que para o período noturno (Figura B3i à B3x), em que *clusters* menores, com menor duração e isolados são mais comuns, o que segundo

Meyer, Höller e Betz (2013a), é percebido em células menos organizadas e com curtos ciclos de vida, que geralmente ocorrem com menores áreas e exibem inferiores taxas de descargas. Essa inconstância percebida, reflete em campos de densidade com *clusters* de tamanhos e ciclos de vida menores, e por essa razão, tornam-se mais difíceis de serem previstos. Tal constatação corrobora com o trabalho de Kohn et al. (2011), da qual, afirmam que as maiores dificuldades de rastreamento de *clusters* computados assente à densidade de descargas elétricas associam-se aos menores e menos intensos.

Em termos de previsão, o algoritmo apresentou os melhores resultados (maior probabilidade de detecção e acertos) para as primeiras horas do dia, horário em que os sistemas eletricamente ativos (SEAs) apresentaram-se mais estáveis. Descreve-se na Tabela 5.6 o resultado da avaliação estatística geral do sistema de previsão para os 4 tempos avaliados. Observa-se que todos os índices apresentam a mesma tendência do caso anterior, e ampliando, verificou-se esse mesmo comportamento para todos os 39 casos. No entanto, o caso em evidência apresentou o valor mais baixo de probabilidade de detecção, que como pode ser visto na Tabela 5.5, para 45 e 60 minutos de previsão é praticamente zero, ao passo que a porcentagem de falso alarme permanece acima de 93% para os mesmos tempos. O BIAS aponta um incremento para as previsões mais longas e mesmo esse sendo suave, indica que o algoritmo superestima a previsão para esse dia.

Tabela 5.6 - Destreza geral do algoritmo para todos os tempos de previsão.

| <b>Índice/Previsão</b> | <b>15 min</b> | <b>30 min</b> | <b>45 min</b> | <b>60 min</b> |
|------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| <b>POD</b>             | 0.332         | 0.119         | 0.075         | 0.045         |
| <b>FAR</b>             | 0.661         | 0.882         | 0.931         | 0.961         |
| <b>BIAS</b>            | 0.981         | 1.011         | 1.095         | 1.184         |

Fonte: Produção do Autor.

Certamente esse caso tornou-se mais descritível que o anterior, pois aqui investigam-se tendências em 36 famílias ao passo que no antecessor

computaram-se 217. Apesar do reduzido número de famílias e da pouca existência de não continuidade, para o segundo caso descrito a técnica apresenta eficiência significativamente baixa. Ao se comparar as características morfológicas das famílias entre os dois casos, verifica-se que o tempo de vida médio para o segundo caso é aproximadamente 2,5 vezes menor que o primeiro, e em termos de tamanho, as famílias do primeiro caso foram cerca de 1,7 vezes maior que as do último. A partir do exposto e com base nas Figuras 5.8, 5.17 e 5.18, deriva-se que os maiores valores de FAR e menores de POD estão associados os casos em que as famílias são menores e têm curta duração. Isto posto, aponta-se que a razão para a pouca destreza do ForTraLC para este caso, se dá em parte, ao fato de que os sistemas observados estavam associados a nuvens em processo de dissipação e que se estabeleceram em um ambiente que já havia consumido significativa parcela da energia disponível na atmosfera. Como consequência, apenas núcleos pequenos de atividade elétrica foram observados e rastreados em curto período de tempo.



## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Como já mencionado, a ocorrência de tempestades severas sobre o Brasil torna-o um dos países com a maior incidência de raios do planeta e conseqüentemente elevadas perdas em capital social e físico. Monitorar e prever com confiabilidade a atividade elétrica de uma tempestade é um fator preponderante quando o objetivo é diminuir essas avarezas. Para tal, torna-se mister aprimorar os conhecimentos sobre os processos dinâmicos e microfísicos das tempestades a fim de melhor compreender o desenvolvimento da atividade elétrica, estudar novos métodos matemáticos para melhor modelar esses processos, bem como, implementá-los com eficiência computacional em sistemas de previsão a curto prazo de descargas elétricas.

Pode-se perceber pelos resultados desse trabalho, de forma similar ao supracitado no escopo, que o uso de dados de descargas elétricas torna-se uma opção para o monitoramento e previsão de tempestades, principalmente em regiões que outras fontes não estão disponíveis ou são esparsas, outro ponto positivo, é que são dados (quase) em tempo real. O *Forecasting and Tracking the Evolution of Cloud Cluster* - ForTraCC, inicialmente desenvolvido para reconhecer apenas dados de satélites meteorológicos, não apresentou maiores problemas quando se implementaram dados de descargas elétricas para rastrear e prever os sistemas eletricamente ativos.

Ao se comparar as quatro técnicas de deslocamento, obtiveram-se os melhores resultados para a metodologia denominada como média de dois deslocamentos, que em termos matemáticos baseia-se na média temporal do vetor velocidade. Enquanto os procedimentos conservativo e deslocamento médio apresentaram comportamento similar, o método de autocorreção vetorial desenvolvido por Vila et al. (2008) apresentou-se fisicamente pouco representativo para o vetor velocidade de um sistema eletricamente ativo. Acredita-se que algumas alternativas possam ser implementadas no ForTraLC

a fim de melhorar a posição do SEA previsto, como por exemplo, empregar o vetor velocidade do núcleo convectivo da nuvem (através de imagens de temperatura de brilho), ou da célula representativa do volume de água líquida (VIL).

Para a determinação do limiar de tamanho mínimo mais eficiente para detectar, monitorar e prever os sistemas, em concordância ao propósito em síntese, aferiram-se os valores de 5 e 10 píxeis como parâmetro inicial. Para tanto, verificou-se que o ForTraLC sobressaiu-se para o tamanho mínimo de 5 píxeis, que equivalem a uma área de 320 km<sup>2</sup>. A escolha do índice mais baixo engloba na análise não apenas sistemas maiores e mais intensos, mas também, células menores, muitas vezes isoladas, mas que igualmente possuem atividade elétrica, e mesmo que em menores proporções, oferecem riscos à sociedade.

Ensaíram-se também 9 limiares para a densidade de descargas elétricas com intuito de eleger o que melhor se adequaria ao propósito do trabalho. Observou-se com esta análise, que do menor (1l/pixel/15min) para o maior (9l/pixel/15min), o erro da distância foi o único indicador cujos resultados foram superiores a cada rodada, ou seja, as respostas mais satisfatórias vincularam-se ao limiar de  $\rho(\text{raios})$  1l/pixel/15min. Entendeu-se igualmente, que para identificar regiões com atividade elétrica mais intensa imersas em um sistema eletricamente ativo, a densidade de raios de 4l/pixel/15min revelou-se adequada, uma vez que a diferença dos resultados em comparação aos limiares sucessores é pouco representativa. Ressalta-se que não se realizaram testes de sensibilidade para validação do algoritmo para regiões mais intensas, a exemplo das que apresentaram densidades iguais ou superiores a essa.

A partir das diferentes técnicas e indicadores aqui testados, validaram-se a metodologia de deslocamento Mdd, a área mínima de 5 píxeis e o limiar de densidade de descargas elétricas de 1l/pixel/15min como o conjunto de parâmetros padrão do ForTraLC para monitorar e realizar a previsão dos raios, objetivo principal da pesquisa. Tratando-se da previsão de descargas elétricas,



verificou-se que o algoritmo foi mais preciso para a previsão de 15 minutos, da qual, apresentou probabilidade de detecção de 0,514, índice de falso alarme 0,487 e *bias* igual a 1.

Tomando por base todos os casos sem classificação, os resultados superiores prescrevem-se aos sistemas eletricamente ativos que apresentaram os maiores ciclos de vida (aproximadamente 0,9h ou 54 min) e tamanhos (~1015 km<sup>2</sup> de área), sendo esses, os valores médios. Cabe destacar, que apesar dos sistemas contínuos apresentarem na generalidade tamanho existência menores, exprimiram um comportamento mais estável em todas as análises, para mais, os maiores índices de falso alarme (FAR) veicularam-se aos casos de não continuidade.

Além disto, o diagnóstico para as previsões com resultados superiores e inferiores (Seção 5.4), apresentou-nos que os melhores resultados de previsão associaram-se aos casos em que se registraram os maiores valores de atividade elétrica total (raios/dia), e que estes relacionaram-se à tempestades organizadas e concebidas em ambientes favoráveis ao fortalecimento da convecção. No mesmo âmbito, as análises de casos (Seção 5.6), mostraram-nos que os eventos que se desenvolvem sob condições dinâmicas e termodinâmicas propícias a convecção, na qual geralmente apresentam fortes correntes ascendentes e maiores conteúdos de água líquida, são relativamente mais fáceis de se prever. Dessarte, para os propósitos acima descritos e aos critérios aqui experimentados, o algoritmo *Forecasting and Tracking the Evolution of Lightning Cluster* - ForTraLC, demonstrou maior destreza para os eventos contínuos.

As dificuldades a serem superadas a partir desse trabalho com finalidade de aprimorar os resultados, referem-se principalmente em buscar novas metodologias físicas/matemáticas e computacionais a fim de melhorar o *skill* do ForTraLC e não menos importante, aumentar o tempo de confiabilidade da previsão. Presume-se que a partir de uma melhor previsão da posição dos

*clusters* esses objetivos sejam alcançados, uma vez que a maior porção dos índices aqui avaliados possuem dependência do prognóstico da posição. Como alternativas, sugerem-se: **i)** Por se tratar de um campo ( $\rho(\text{raios})$ ) altamente variável, suavizar os dados de *input* através de técnicas estatísticas de distribuição; **ii)** Utilizar dados auxiliares de satélites e radares meteorológicos com o interesse de acompanhar o movimento geral da tempestade; **iii)** Implementar correções que se baseiam em curvas de tendência derivadas do ciclo de vida dos sistemas eletricamente ativos; e **iv)** Considerar as condições dinâmicas e termodinâmicas do ambiente circundante a partir do uso de dados de modelos de previsão numérica de tempo.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALBRECHT, R. I.; GOODMAN, S. J.; BUECHLER, D. E.; BLAKESLEE, R. J.; CHRISTIAN, H. J. Where are the lightning hotspots on earth? **American Meteorological Society**, p. 2051 - 2068, Nov 2016 . Disponível em: <<https://journals.ametsoc.org/doi/pdf/10.1175/BAMS-D-14-00193.1>>. Acesso em: 02 mar. 2018.
- ANABOR, V. **Análise descritiva dos sistemas de Meso- $\alpha$  através das imagens de Satélites GOES-8**. 2004. 78 p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul - Centro Estadual de Pesquisa em Sensoriamento Remoto e Meteorologia, Porto Alegre, 2004. Disponível em: <<http://www.bibliotecadigital.ufrgs.br/da.php?nrb=000528588&loc=2006&l=47b8c25c83148aa9>>. Acesso em: 01 jul. 2019.
- BETZ, H. D.; SCHIMIDT, K.; OETTINGER, W. P.; MONTAG, B. Cell – Tracking with lightning data from LINET. **Advances in Geosciences**, n. 17, p. 55 – 61, 2008. Disponível em: <<https://www.adv-geosci.net/17/55/2008/adgeo-17-55-2008.pdf>>. Acesso em: 15 jan. 2018.
- CALHEIROS, A. J. P. **Sistema de previsão imediata da precipitação: o hidrotrack**. 2008. 135 p. (INPE-15331-TDI/1371). Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2008. Disponível em: <<http://urlib.net/sid.inpe.br/mtc-m17@80/2008/06.04.19.56>>. Acesso em: 27 fev. 2018.
- CARDOSO, I.; PINTO JUNIOR, O.; PINTO, I, R, C, A.; HOLLE, R. Lightning casualty demographics in Brazil and their implications for safety rules. **Atmospheric Research**, n. 135, p. 374-379, Jan 2014. Disponível em: <[https://ac.els-cdn.com/S016980951200436X/1-s2.0-S016980951200436X-main.pdf?\\_tid=a2c14cd8-2646-410c-b6a2-35a332e8e324&acdnat=1525279085\\_6b555474e979dda4ffc747a786ac66fd](https://ac.els-cdn.com/S016980951200436X/1-s2.0-S016980951200436X-main.pdf?_tid=a2c14cd8-2646-410c-b6a2-35a332e8e324&acdnat=1525279085_6b555474e979dda4ffc747a786ac66fd)>. Acesso em: 18 fev. 2018.
- CHINCHAY, J. H. H. **Uso de multi-canais do GOES-16 para previsão imediata de densidade de descargas Elétricas**. 2018. 165 p (INPE - 05.18.14.22-TDI). Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2018. Disponível em: <<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34R/3R5M85H>>. Acesso em: 20 abr. 2019.
- COTTON, W. R.; ANTHES, R, A. **Storm and cloud dynamics**. San Diego, California: Academic Press, 1989. (International Geophysics Series, 44). Disponível em: <[https://books.google.com.br/books?id=gErgBAAAQBAJ&pg=PA576&lpg=PA576&dq=thunderstorm+multicell+system+dynamics&source=bl&ots=j37e\\_VN-u0&sig=ACfU3U1znivrLdmhi--T7ychVpowDWwuSA&hl=pt-BR&sa=X&ved=2ahUKewjnkIDSh-TiAhUDILkGHZzeAboQ6AEwAXoECAgQAQ#v=onepage&q=multicell](https://books.google.com.br/books?id=gErgBAAAQBAJ&pg=PA576&lpg=PA576&dq=thunderstorm+multicell+system+dynamics&source=bl&ots=j37e_VN-u0&sig=ACfU3U1znivrLdmhi--T7ychVpowDWwuSA&hl=pt-BR&sa=X&ved=2ahUKewjnkIDSh-TiAhUDILkGHZzeAboQ6AEwAXoECAgQAQ#v=onepage&q=multicell)>

%20&f=false>. Acesso em: 30 maio 2019.

CHRONIS, T.; LANG, W.; BLAKESLEE, R.; CHRISTIAN, H.; MCCAUL, E.; BAILEY, J. Diurnal characteristics of lightning flashes detected over the São Paulo lightning mapping array. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 120, n. 23, p. 11799-11808, 2015. Disponível em: <<https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/2015JD023960>>. Acesso em: 20 mar. 2018.

EICHHOLZ, C. W. **Análise cinemática e dinâmica da propagação de células de chuva e aglomerados de nuvens**. 2017. 134 p. (INPE - 04.28.15.17 - TDI). Tese (Doutorado em Meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2017. Disponível em: <<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34P/3NQ5D2P>>. Acesso em: 25 abr. 2018.

GOODMAN, S.; MACH, D.J.; KOSHAK, W.; BLAKESLEE, R. **GLM lightning cluster – filter algorithm: algorithm theoretical basis document**. 2.ed. NOAA, 2010. Disponível em: <[http://www.goes-r.gov/products/ATBDs/baseline/Lightning\\_v2.0\\_no\\_color.pdf](http://www.goes-r.gov/products/ATBDs/baseline/Lightning_v2.0_no_color.pdf)>. Acesso em: 25 jan. 2018.

GREENE, D. R.; CLARK, R. A. Vertically integrated liquid water - a new analysis tool. **Monthly Weather Review**, v. 100, n. 7, p. 548–552, Jul 1972. Disponível em: <<ftp://ftp.library.noaa.gov/docs.lib/htdocs/rescue/mwr/100/mwr-100-07-0548.pdf>>. Acesso em: 20 abr. 2018.

GRUPO DE ELETRICIDADE ATMOSFÉRICA (ELAT - INPE). **Nova rede de dados revela aumento da média anual de raios no Brasil e densidades de descargas com maior precisão para estados e municípios**. 2017. Disponível em: <<http://www.inpe.br/webelat/homepage/menu/noticias/release.php?id=72>>. Acesso em: 01 mar. 2018.

HOLLE, R. L. A summary of recent national-scale lightning fatality studies. **American Meteorological Society**, v. 8, p. 35 - 42, Jan 2016. Disponível em: <<https://journals.ametsoc.org/doi/pdf/10.1175/WCAS-D-15-0032.1>>. Acesso em: 01 mar. 2018.

JAYARATNE, E. R.; SAUNDERS, C. P. R.; HALLETT, J. Laboratory studies of the charging of soft-hail during ice crystal interactions. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 109, p. 609 - 630, Jul 1983. Disponível em: <<https://rmets.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/qj.49710946111>>. Acesso em: 09 abr. 2018.

JAYARATNE, E. R.; SAUNDERS, C. P. R. The interaction of ice crystals with hailstones in wet growth and its possible role in thunderstorm electrification. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 142, p. 1809 - 1815, Apr 2016. Disponível em:

<<https://rmets.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/qj.2777>>. Acesso em: 09 abr. 2018.

KARAGIANNIDIS, A.; LAGOUVARDOS, K.; KOTRONI, V. The use of lightning data and meteosat infrared imagery for the nowcasting of lightning activity. **Atmospheric Research**, v. 168, p. 57 – 69, Feb 2016. Disponível em: <[https://ac.els-cdn.com/S0169809515002562/1-s2.0-S0169809515002562-main.pdf?\\_tid=33b7296b-7ff9-43e5-b083-af9479028d93&acdnat=1523987685\\_2ccef360dc95a92ad90e4e02f8d0aa2f](https://ac.els-cdn.com/S0169809515002562/1-s2.0-S0169809515002562-main.pdf?_tid=33b7296b-7ff9-43e5-b083-af9479028d93&acdnat=1523987685_2ccef360dc95a92ad90e4e02f8d0aa2f)>. Acesso em: 27 jan. 2018.

KOHN, M.; GALANTI, E.; PRICE, C.; LAGOUVARDOS, K.; KOTRONI, V. Nowcasting thunderstorms in the Mediterranean region using lightning data. **Atmospheric Research**, n. 100, p. 489 – 502, 2011. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169809510002048>>. Acesso em: 25 jan. 2018.

KREHBIEL, P. R. The electrical structure of thunderstorms. In: NATIONAL RESEARCH COUNCIL (Cont.). **The Earth's electrical environment**. Washington, D.C.: National Academic, 1986. 263 p.

LAKSHMANAN, V.; STUMPF, G. J. **A real-time learning technique to predict cloud – to – ground lightning**, 2005. Disponível em: <<https://ams.confex.com/ams/pdfpapers/87206.pdf>>. Acesso em: 28 jan. 2018.

LI, Y.; ZHANG, G.; WEN, J.; WANG, D.; WANG, Y.; ZHANG, T.; FAN, X.; WU, B. Electrical structure of a Qinghai - Tibet Plateau thunderstorm based on three-dimensional lightning mapping. **Atmospheric Research**, n. 134, p. 137 – 149, 2013. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169809513002123?via%3Dihub>>. Acesso em: 21 mar. 2018.

LI, Y.; ZHANG, G.; WANG, Y.; WU, B.; LI, J. Observation and analysis of electrical structure change and diversity in thunderstorms on the Qinghai - Tibet Plateau. **Atmospheric Research**, n. 194, p. 130 – 141, 2017. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169809516304495?via%3Dihub>>. Acesso em: 21 mar. 2018.

LIU, C.; HECKMAN, S. **The application of total lightning detection and cell tracking for severe weather prediction**. AWS Convergence Technologies, 2010. Disponível em: <[https://www.wmo.int/pages/prog/www/IMOP/publications/IOM-104\\_TECO-2010/P2\\_7\\_Heckman\\_USA.pdf](https://www.wmo.int/pages/prog/www/IMOP/publications/IOM-104_TECO-2010/P2_7_Heckman_USA.pdf)>. Acesso em: 17 jan. 2018.

LÓPEZ, R. E.; AUBAGNAC, J. P. The lightning activity of a hailstorm as a function of charges in its microphysical characteristics inferres from polarimetric radar observations. **Journal of Geophysical Research**, v. 102, n. D14, p. 16799 – 16813, Jul 1997. Disponível em:

<<https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1029/97JD00645>>. Acesso em: 02 abr. 2018.

MACGORMAN, D. R.; RUST, W. D.; KREHBIEL, P.; RISON, W.; BRUNING, E.; WIENS, K. The electrical structure of two supercell storms during STEPS. **American Meteorological Society**, p. 2583 - 2607, Sep 2005. Disponível em: <<https://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/MWR2994.1>>. Acesso em: 20 mar. 2018.

MACHADO, L. T. A. **Previsão imediata de tempestades intensas e entendimento dos processos físicos no interior das nuvens: SOS - Chuva** (Sistema de Observação e Previsão de Tempo Severo). 2015. 49 p. Disponível em: <<http://soschuva.cptec.inpe.br/soschuva/pdf/projeto-soschuva.pdf>>. Acesso em: 03 mar. 2018.

MARSHALL, T. C.; RUST, W. D. Electric field soundings through thunderstorms. **Journal of Geophysical Research**, v. 96, Dec 1991. Disponível em: <<https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1029/91JD02486>>. Acesso em: 19 mar. 2018.

MASON, J.; MASON, N. The physics of a thunderstorm. **European Journal of Physics**, n. 24, p. 99 - 110, 2003. Disponível em: <<http://iopscience.iop.org/article/10.1088/0143-0807/24/5/305/pdf>>. Acesso em: 21 mar. 2018.

MATTOS, E. V. **Relação entre assinaturas polarimétricas de radar e atividade elétrica das tempestades**. 2015. 216 p. (INPE - 06.03.14.50 - TDI). Tese (Doutorado em Meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2015. Disponível em: <<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34P/3JK5HDP>>. Acesso em: 07 mar. 2018.

MATTOS, E. V.; MACHADO, L. A. T. Cloud-to-ground lightning and mesoscale convective systems. **Atmospheric Research**, v. 99, p. 377–390, 2011. Disponível em: <<https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S0169809510003108?token=2AA2695D2D324138C5B0EC46BAA968168D98AF5C6EBCDD7F4EF7CD09A712343850E09DEAF9D520A09EF33ADFAD568BFF>>. Acesso em: 07 jul. 2019.

METZGER, E.; NUSS, W. A. The relationship between total cloud lightning behavior and radar – derived thunderstorm structure. **Weather and Forecasting**, v. 28, p. 237 – 253, Feb 2013. Disponível em: <<https://journals.ametsoc.org/doi/pdf/10.1175/WAF-D-11-00157.1>>. Acesso em: 02 abr. 2018.

MEYER, V. K.; HÖLLER, H.; BETZ, H. D. The temporal evolution of three – dimensional lightning parameters and their suitability for thunderstorm tracking and nowcasting. **Atmospheric, Chemistry and Physics**, n. 13, p. 5151 – 5161, May 2013 (a). Disponível em:

<<https://www.atmos-chem-phys.net/13/5151/2013/acp-13-5151-2013.pdf>>. Acesso em: 10 abr. 2018.

\_\_\_\_\_. Automated thunderstorm tracking: utilization of three – dimensional lightning and radar data. **Atmospheric, Chemistry and Physics**, n. 13, p. 5137 – 5150, May 2013 (b). Disponível em: <<https://www.atmos-chem-phys.net/13/5137/2013/acp-13-5137-2013.pdf>>. Acesso em: 22 jan. 2018.

MULHOLLAND, J.; NESBITT, S. W.; TRAPP, R. J.; RASMUSSEN, K. L.; SALIO, P. V. Convective storm life cycle and environment near the Sierras de Córdoba, Argentina. **Monthly Weather Review**, v. 146, n. 8, p. 2541 – 2557, Aug 2018. Disponível em: <<https://journals.ametsoc.org/doi/full/10.1175/MWR-D-18-0081.1>>. Acesso em: 08 ago. 2019.

NACCARATO, K. P.; PINTO JUNIOR, O. Lightning detection in Southeastern Brazil from the new Brazilian Total Lightning Network (BrasilDAT): tracking severe storms using total lightning information. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON LIGHTNING PROTECTION, 2012, Viennam – Áustria. **Proceeding...** 2012. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6344294>>. Acesso em: 04 abr. 2018.

NACCARATO, K. P.; PINTO JUNIOR, O.; PINTO, I. R. C. A. Evidence of thermal and aerosol effects on the cloud-to-ground lightning density and polarity over large urban areas of Southeastern Brazil. **Geophysical Research Letters**, v. 30, n. 13. Jul 2003. Disponível em: <[http://www.inpe.br/webelat/docs/artigos/GRL\\_Naccarato2003.pdf](http://www.inpe.br/webelat/docs/artigos/GRL_Naccarato2003.pdf)> Acesso em: 02 mar. 2018.

NACCARATO, K. P. **Disposição dos sensores da rede BrasilDAT**. [Comunicação pessoal]. Mensagem recebida via e-mail por Ernani Luiz Fazolo em 03. jul. 2019.

PEREIRA, R. F. O.; ALBRECHT, R. Evolução temporal da precipitação e atividade elétrica de uma tempestade com ocorrência de tempo severo. **Ciência e Natura**, v. 38, p. 532-542, 2016. Disponível em: <[periodicos.ufsm.br/cienciaenatura/article/download/20291/pdf](http://periodicos.ufsm.br/cienciaenatura/article/download/20291/pdf)>. Acesso em: 30 jan. 2018.

PICOLO, M. F.; FREITAS, E. D. **Atmospheric conditions observed during severe weather occurrences in the area of the SOS-CHUVA project**. 2018. 307 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Universidade de São Paulo (USP), São Paulo, 2018. Disponível em: <<https://bdpi.usp.br/item/002932498>>. Acesso em: 16 fev. 2019.

PINEDA, N.; RIGO, T.; MONTANYÀ, J.; VAN DER VELDE, O. A. Charge structure analysis of a severe hailstorm with predominantly positive cloud-to-ground lightning. **Atmospheric Research**, v. 178 - 179, p. 31 - 44, Sep 2016. Disponível em:

<<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169809516300606>>. Acesso em: 21 mar. 2018.

PINTO, I. R.C.A.; PINTO JUNIOR, O. Cloud-to-ground lightning distribution in Brazil. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, n. 65, p. 733-737, Feb 2003. Disponível em: <[http://www.inpe.br/webelat/docs/artigos/JASTP\\_Pinto2003.pdf](http://www.inpe.br/webelat/docs/artigos/JASTP_Pinto2003.pdf)>. Acesso em: 26 fev. 2018.

PIPER, D.; KUNZ, M. Spatiotemporal variability of Lightning activity in Europe and the relation to the North Atlantic Oscillation teleconnection pattern. **Natural Hazards and Earth System Sciences**, n. 17, p. 1319-1336, Aug 2017. Disponível em: <<https://pdfs.semanticscholar.org/3151/d07c2b99d8e92104b6161ce2ebdce29c3886.pdf>>. Acesso em: 25 jun. 2018.

QUEIROZ, A. P. **Monitoramento e previsão imediata de tempestades severas usando dados de radar**. 2009. 128 p. (INPE - 14181 - TDI/1093). Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2009. Disponível em: <<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34P/3NQ5D2P>> . Acesso em: 25 abr. 2018.

RAKOV, V. A.; UMAN, M. A. **Lightning**: physics and effects. United Kingdom: Cambridge University Press, 2003. 706 p.

SCHULTZ, E. V.; SCHULTZ, C. J.; CECIL, D. J.; BATEMAN, M. Automated storm tracking and the lightning jump algorithm using GOES – R Geostationary Lightning Mapper (GLM) proxy data. **Journal of Operational Meteorology**, v. 4, n. 7, p. 92 – 107, Jun 2016. Disponível em: <<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5749929/>>. Acesso em: 14 abr. 2018.

SIMPSON, G. C. The mechanism of a thunderstorm. **Proceedings of the Royal Society of London**, v. 114, n. 768, p. 376 - 401, Apr. 1927. Disponível em: <<https://www.jstor.org/stable/pdf/94818.pdf?refreqid=excelsior%3Ad53aa6809abd743eda5c219854bf4a67>>. Acesso em: 20 mar. 2018.

SOS-CHUVA PROJECT. **Horário dos eventos nas cidades atingidas e disponibilidade de dados observacionais**. [Comunicação pessoal]. Mensagem recebida via e-mail por Ernani Luiz Fazolo em 22. mai. 2018.

SOS-CHUVA PROJECT. **Case studies**: January 15th to 17th 2017. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2017. Disponível em: <<https://topicssoschuva.blogspot.com/2017/01/6th-and-7th-cases-january-15th-to-17th.html>>. Acesso em: 16 fev. 2019.

SOS-CHUVA PROJECT. **Case studies**: January 30th 2017. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2017. Disponível em:



<<https://topicssoschuva.blogspot.com/2017/02/case-study-january-30th-2017.html>>. Acesso em: 16 fev. 2019.

SPERLING, V. B. **Processos físicos e elétricos das tempestades de granizo na Região Sul do Brasil**. 2018. 211p. (INPE-01.24.02.29-TDI). Tese (Doutorado em Meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2018. Disponível em: <<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34P/3QE4KB5>>. Acesso em: 20 abr. 2019.

STOLZENBURG, M.; RUST, W. D.; MARSHALL, T. C.; Electrical structure in thunderstorm convective regions: 3. synthesis. **Journal of Geophysical Research**, v. 103, Jun 1998. Disponível em: <<https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/97JD03545> >. Acesso em: 22 mar. 2018.

STOLZENBURG, M.; MARSHALL, T.; KREHBIEL, P. R. Initial electrification to the first lightning in New Mexico thunderstorms. **Journal of Geophysical Research**, v. 120, p. 11253 - 11276, Nov 2015. Disponível em: <<https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/2015JD023988>>. Acesso em: 03 abr. 2018.

STRAUSS, C. **Monitoramento e previsão de atividade convectiva usando abordagens de mineração de dados**. 2013. 111 p. (INPE - 11.28.14.11 - TDI). Tese (Doutorado em Computação Aplicada) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2013. Disponível em: <<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/3FACD25>>. Acesso em: 26 abr. 2018.

STRAUSS, C.; STEPHANY, S.; CAETANO, M. A ferramenta EDDA de geração de campos de densidade de descargas atmosféricas para mineração de dados meteorológicos. In: CONGRESSO NACIONAL DE MATEMÁTICA APLICADA E COMPUTACIONAL, 33., 2010, Águas de Lindóia, SP. **Anais...** São Carlos: SBMAC, 2010. v. 3, p. 269–275. ISBN 978-85-8215-040-5. Disponível em: <[https://www.researchgate.net/publication/47738079\\_A\\_ferramenta\\_EDDA\\_de\\_geracao\\_de\\_campos\\_de\\_densidade\\_de\\_descargas\\_atmosfericas\\_para\\_mineracao\\_de\\_dados\\_meteorologicos](https://www.researchgate.net/publication/47738079_A_ferramenta_EDDA_de_geracao_de_campos_de_densidade_de_descargas_atmosfericas_para_mineracao_de_dados_meteorologicos)>. Acesso em: 26 abr. 2018.

VILA, D. A.; MACHADO, L. A. T.; LAURENT, H.; VELASCO, I. Forecast and Tracking the Evolution of Cloud Clusters (ForTraCC) using satellite infrared imagery: methodology and validation. **American Meteorological Society**, v. 23, p. 233 – 245, Apr 2008. Disponível em: <[http://sigma.cptec.inpe.br/fortracc/pdf/ForTraCC\\_Published.pdf](http://sigma.cptec.inpe.br/fortracc/pdf/ForTraCC_Published.pdf)>. Acesso em: 03 fev. 2018.

WALLACE, J. M.; HOBBS, P. V. **Atmospheric science: an introductory survey**. 2.ed. New York: Academic Press, 2006. 488 p.

WILKS, D. S. **Statistical methods in the atmospheric sciences**. 2.ed. Estados Unidos da América: Academic Press, 2006. 627 p.

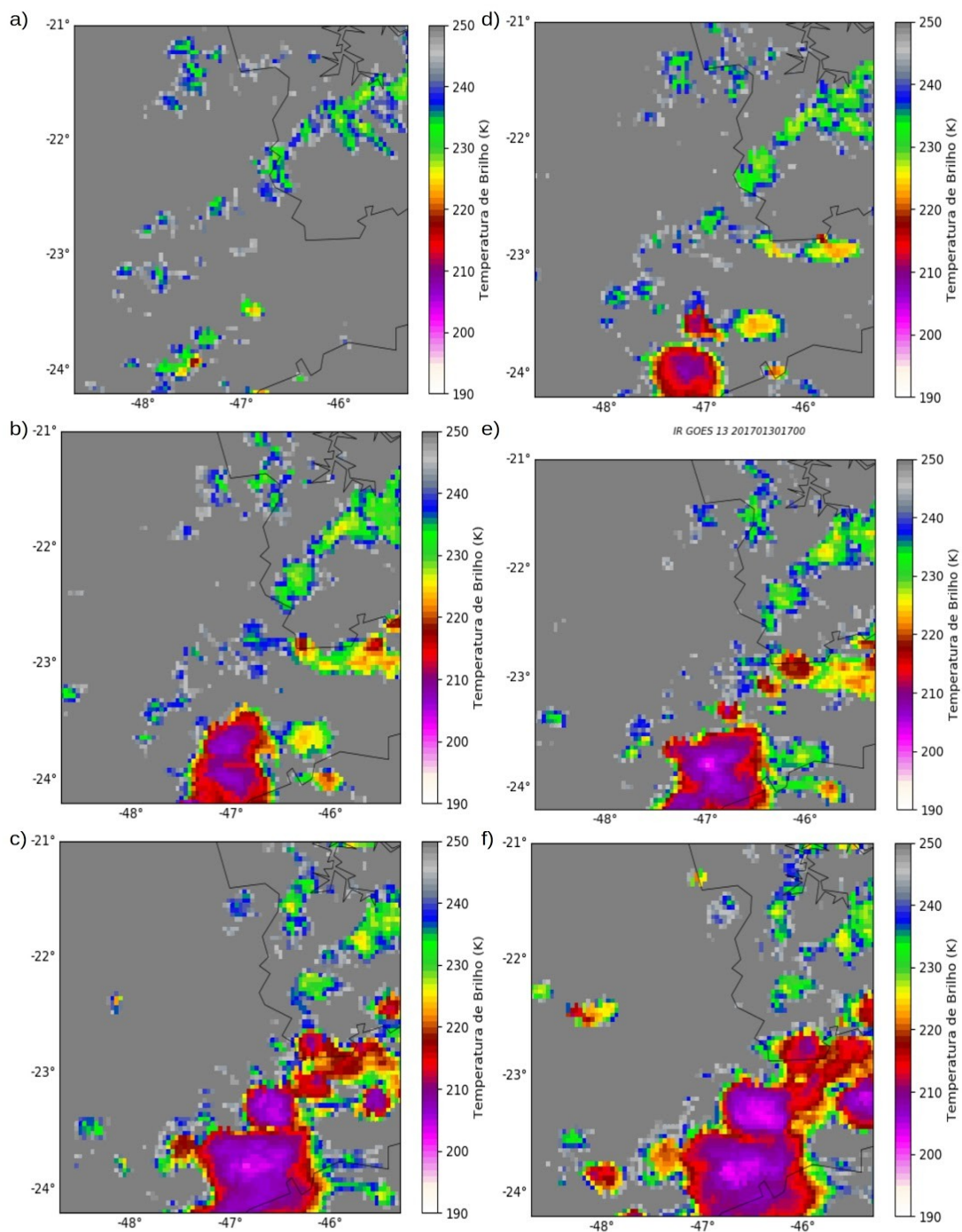
WILSON, C. T. R. Investigation on lightning discharges and on the electric field of thunderstorms. **Philosophical Transactions of the Royal Societe of London, Series A**, v. 221, p. 73 – 115, 1921. Disponível em: <[http://www.storm-t.iag.usp.br/pub/ACA0330/papers/wilson\\_lightningdischarges\\_and\\_ez\\_1921.pdf](http://www.storm-t.iag.usp.br/pub/ACA0330/papers/wilson_lightningdischarges_and_ez_1921.pdf)>. Acesso em: 10 mar. 2018.

ZEPKA, G. S.; PINTO JUNIOR, O.; SARAIVA, A. C. V. Lightning forecasting in southeastern Brazil using the WRF model. **Atmospheric Research**, v. 135 - 136, p. 344 – 362, Jan 2014. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169809513000458>>. Acesso em 24 mar. 2018.

ZHENG, D.; ZHANG, Y.; MENG, Q.; LU, W.; ZHONG, M. Lightning activity and electrical structure in a thunderstorm that continued for more than 24 h. **Atmospheric Research**, v. 97, p. 241 - 256, Jul 2010. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169809510001055>>. Acesso em: 21 mar. 2018.

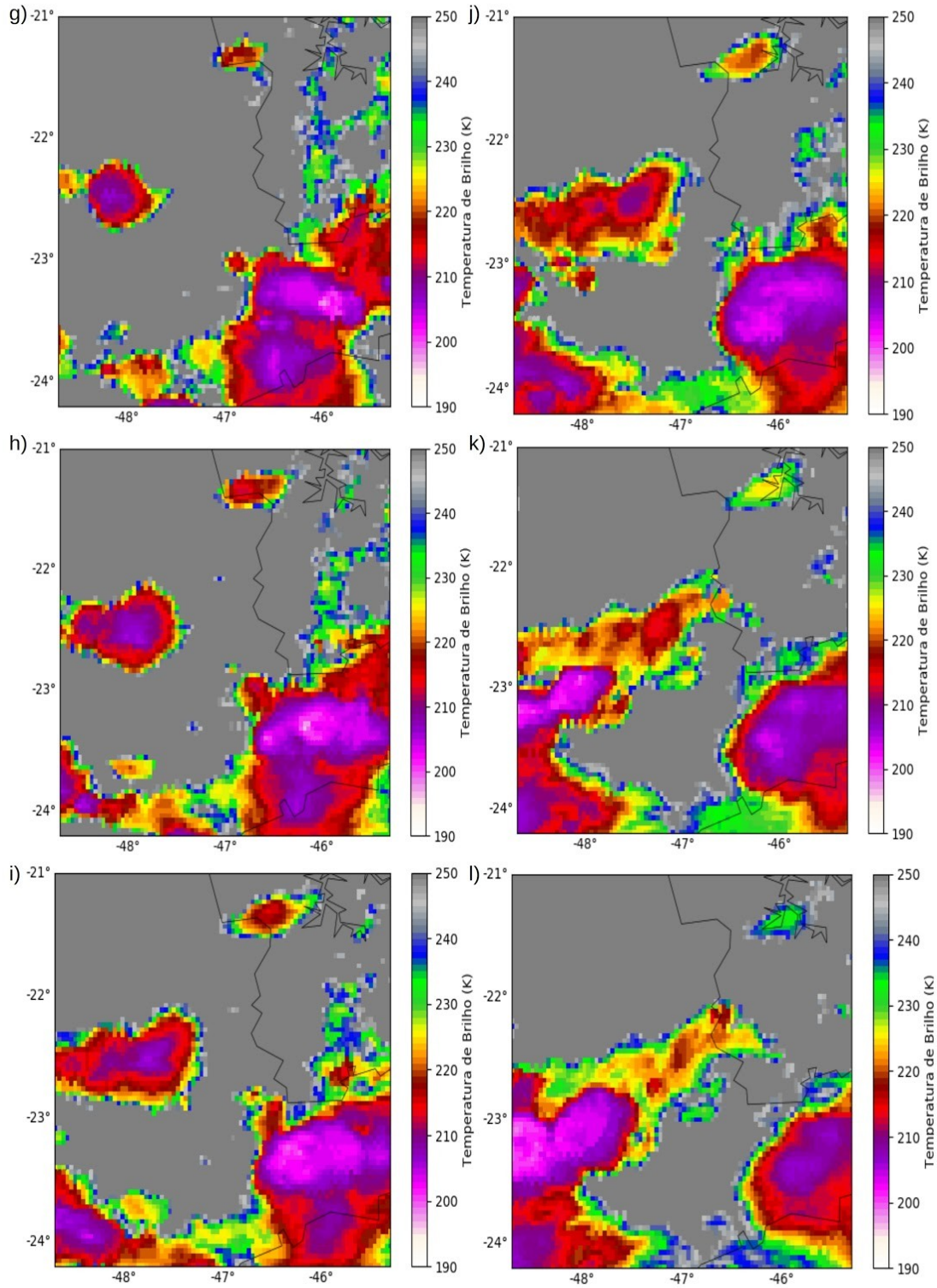
## APÊNDICE A – FIGURAS PARA O ESTUDO DE CASO - 30/01/2017

Figura A1 - Imagens de temperatura de brilho para o horário local: **a)** 15h; **b)** 16h; **c)** 16h30min; **d)** 17h; **e)** 17h30min; **f)** 18h; **g)** 18h30min; **h)** 19h; **i)** 19h30min; **j)** 20h; **k)** 20h30min; **l)** 21h; **m)** 21h30min; **n)** 22h; **o)** 22h30min; **p)** 23h; **q)** 23h30min.



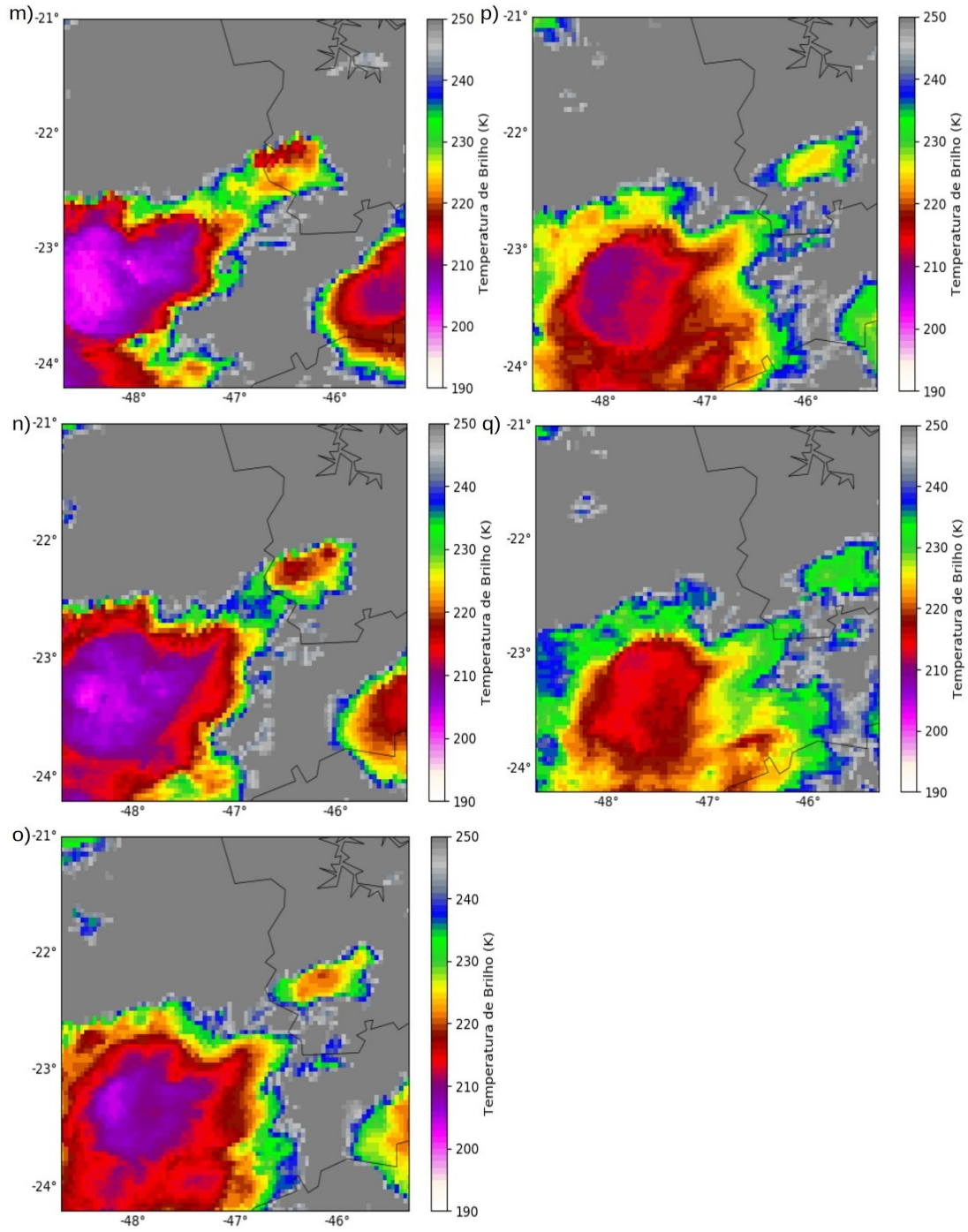
(continua)

Figura A1 – Continuação.



(continua)

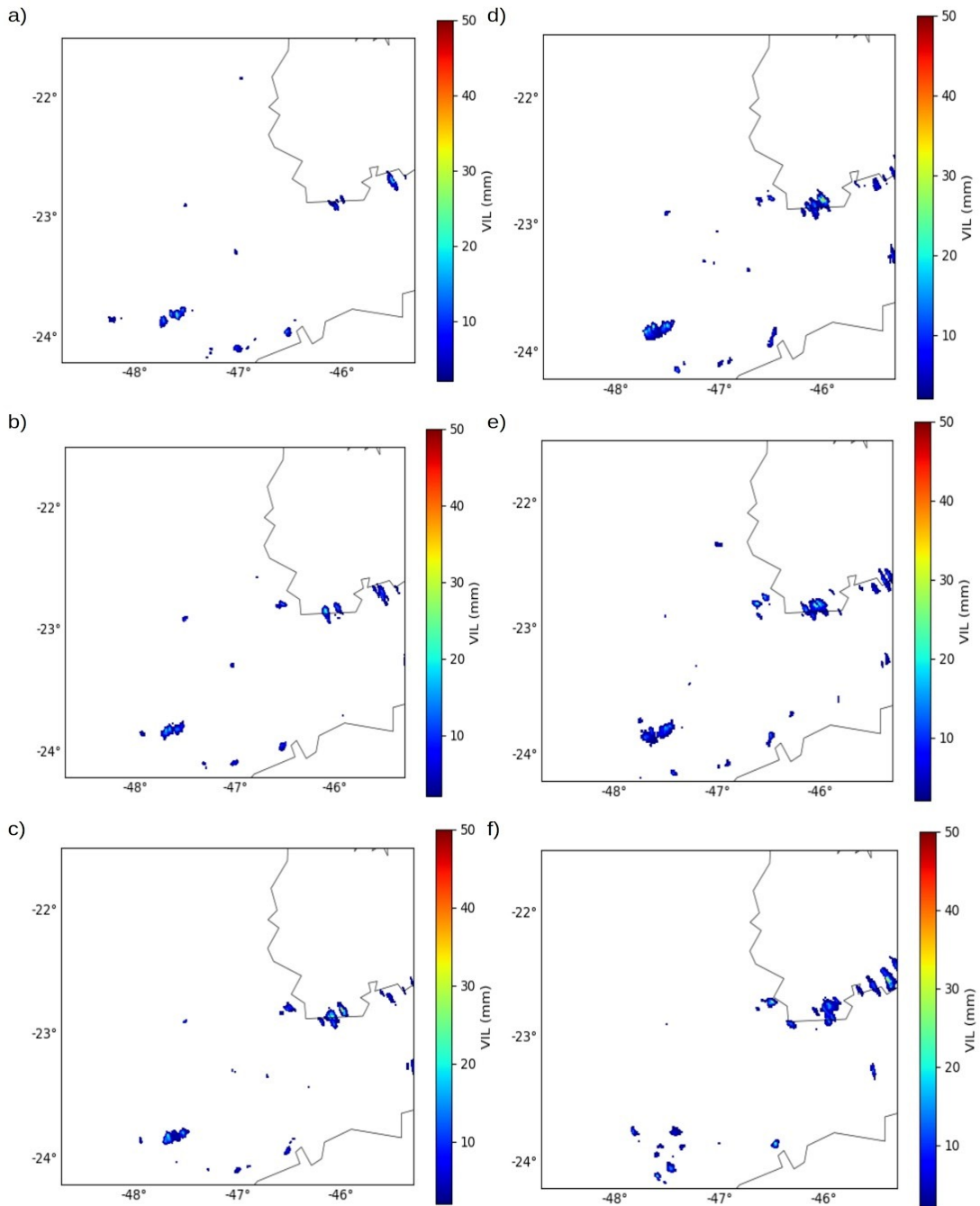
Figura A1 – Conclusão.



Fonte: Produção do Autor.

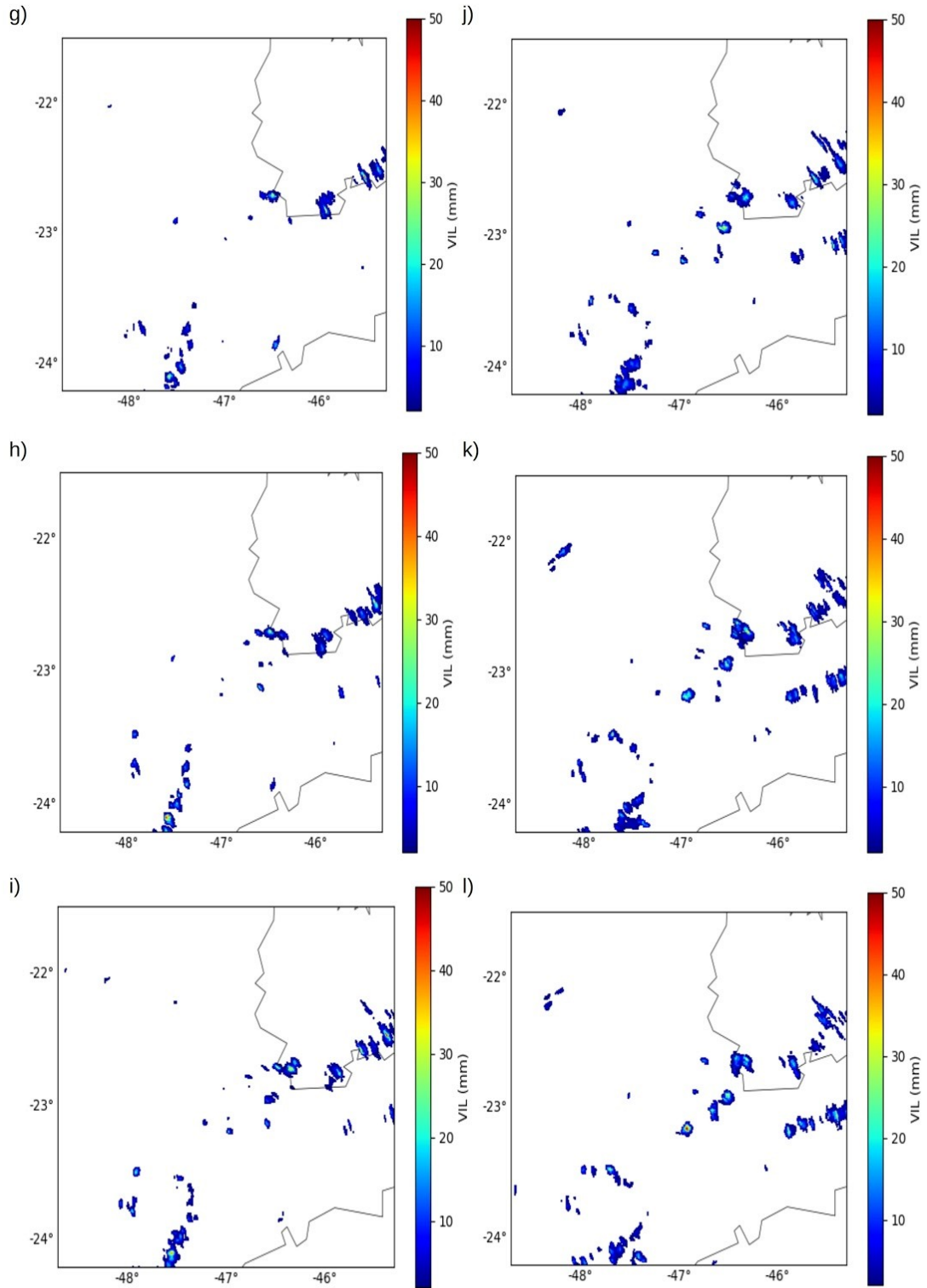


Figura A2 - *Vertically Integrated Liquid Water (VIL)* para o horário local: **a)** 15h; **b)** 15h10min; **c)** 15h20min; **d)** 15h30min; **e)** 15h40min; **f)** 16h10min; **g)** 16h20min; **h)** 16h20min; **i)** 16h40min; **j)** 16h50min; **k)** 17h; **l)** 17h10min; **m)** 17h20min; **n)** 17h30min; **o)** 17h40min; **p)** 18h; **q)** 18h20min; **r)** 18h40min; **s)** 19h; **t)** 19h20min; **u)** 19h30min; **v)** 19h40min; **w)** 19h50min; **x)** 20h; **y)** 20h40min; **z)** 20h50min; **aa)** 21h; **bb)** 21h10min; **cc)** 21h20min; **dd)** 21h40min; **ee)** 21h50min; **ff)** 22h; **gg)** 22h10min; **hh)** 22h20min; **ii)** 22h30min; **jj)** 22h40min; **kk)** 22h50min; e **ll)** 23h.



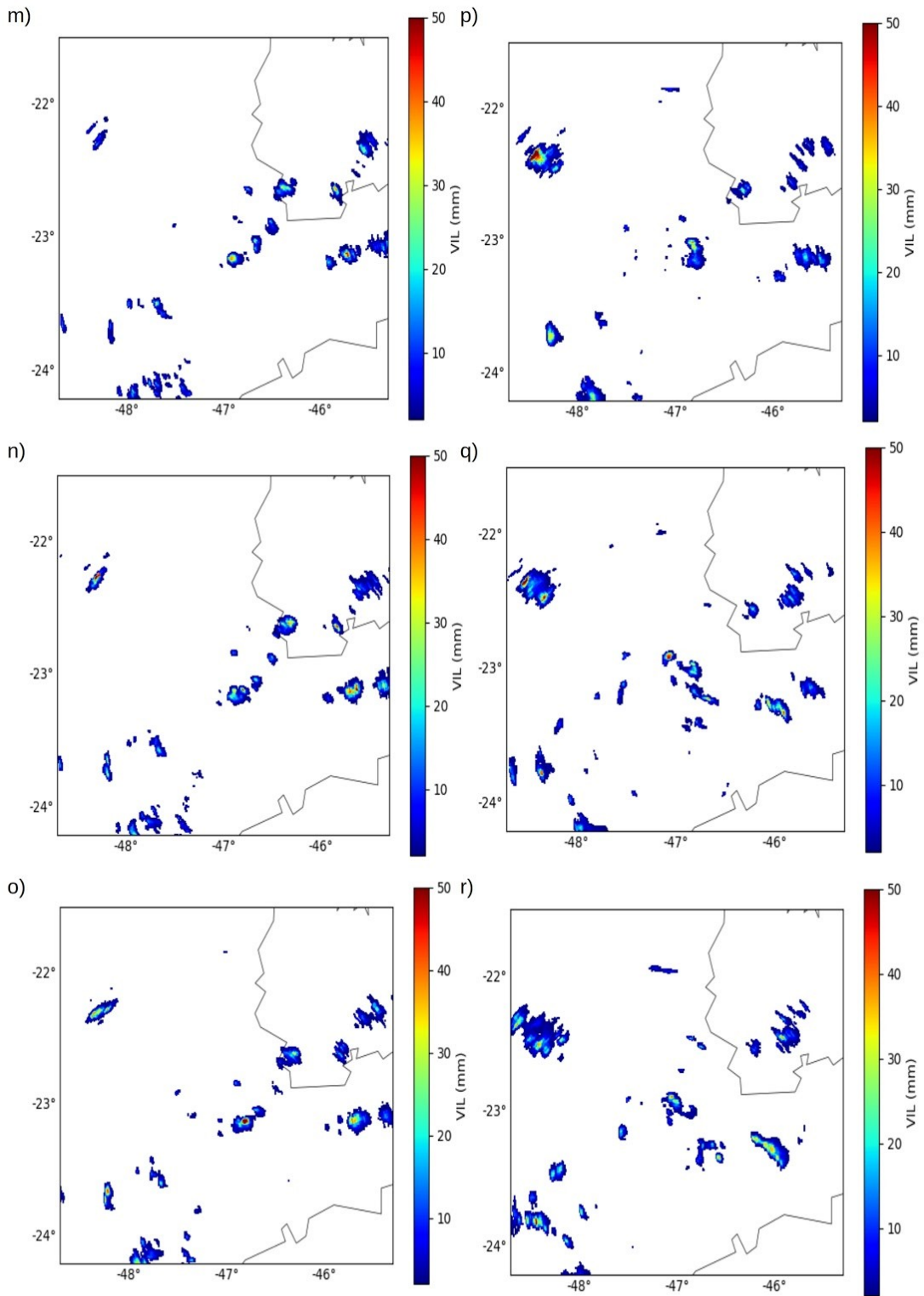
(continua)

Figura A2 – Continuação.



(continua)

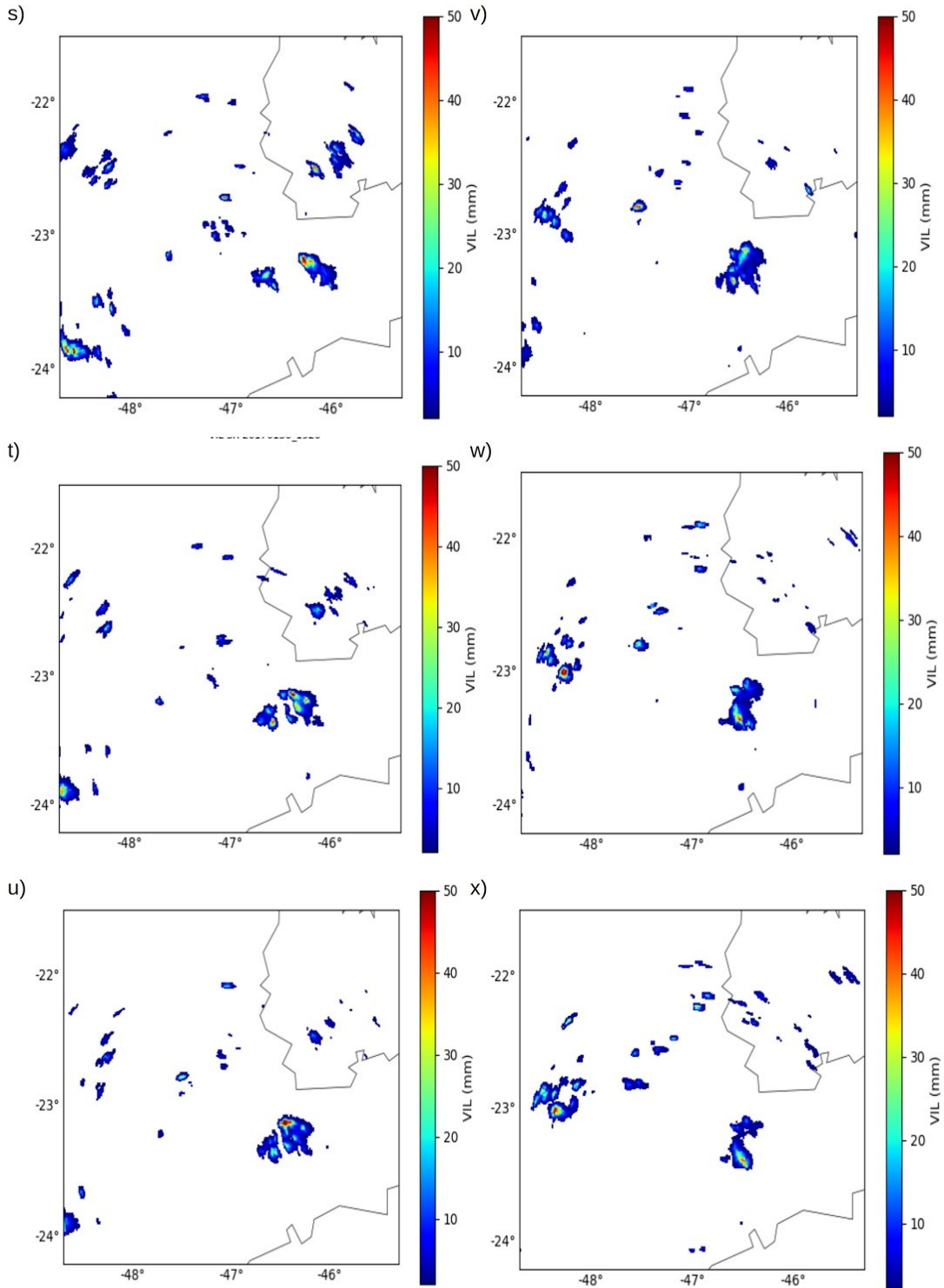
Figura A2 – Continuação.



(continua)

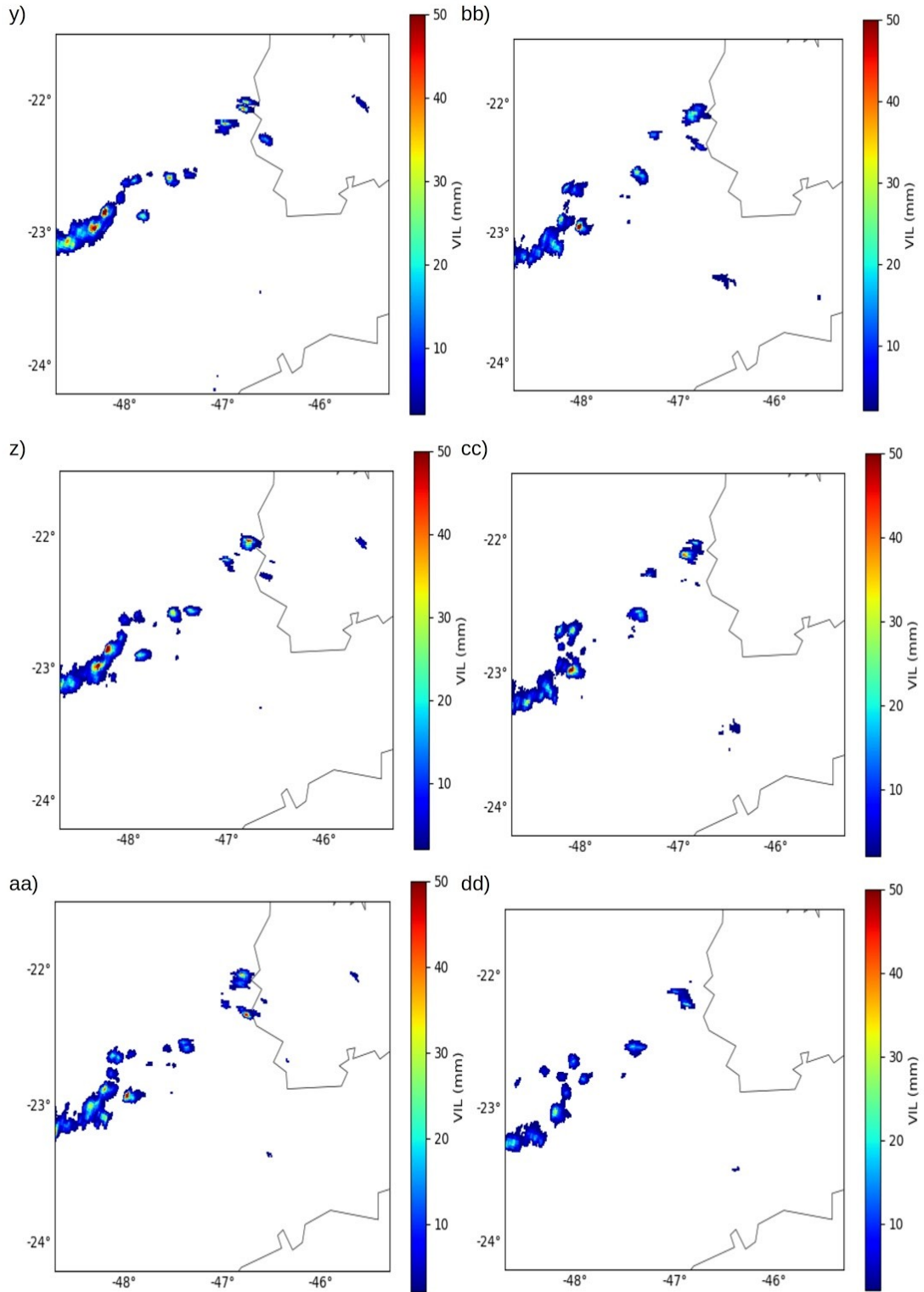


Figura A2 – Continuação.



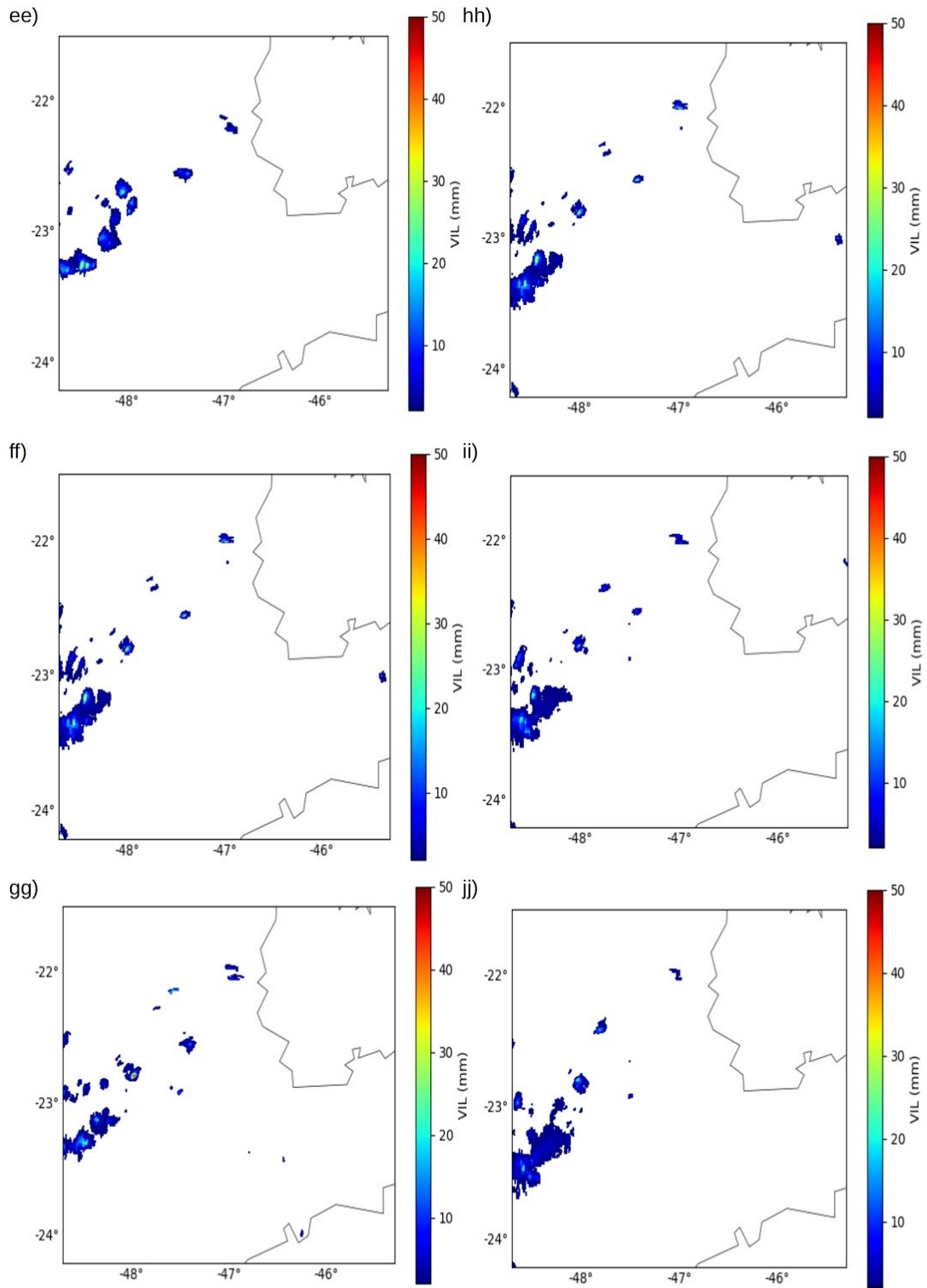
(continua)

Figura A2 – Continuação.



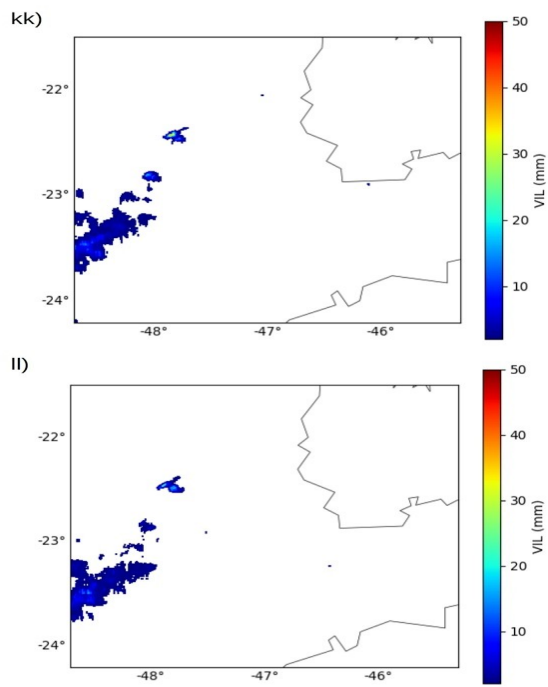
(continua)

Figura A2 – Continuação.



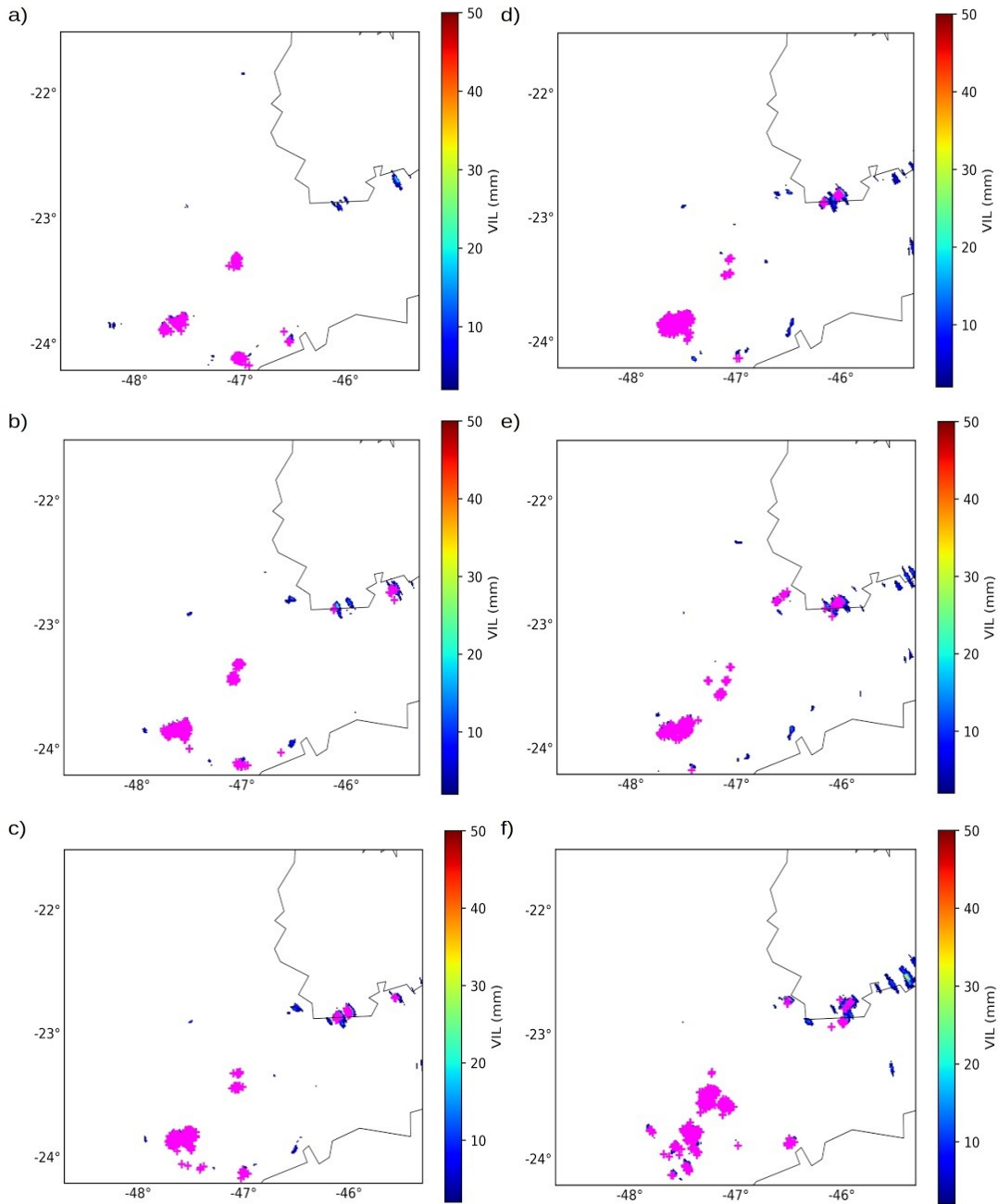
(continua)

Figura A2 – Conclusão.



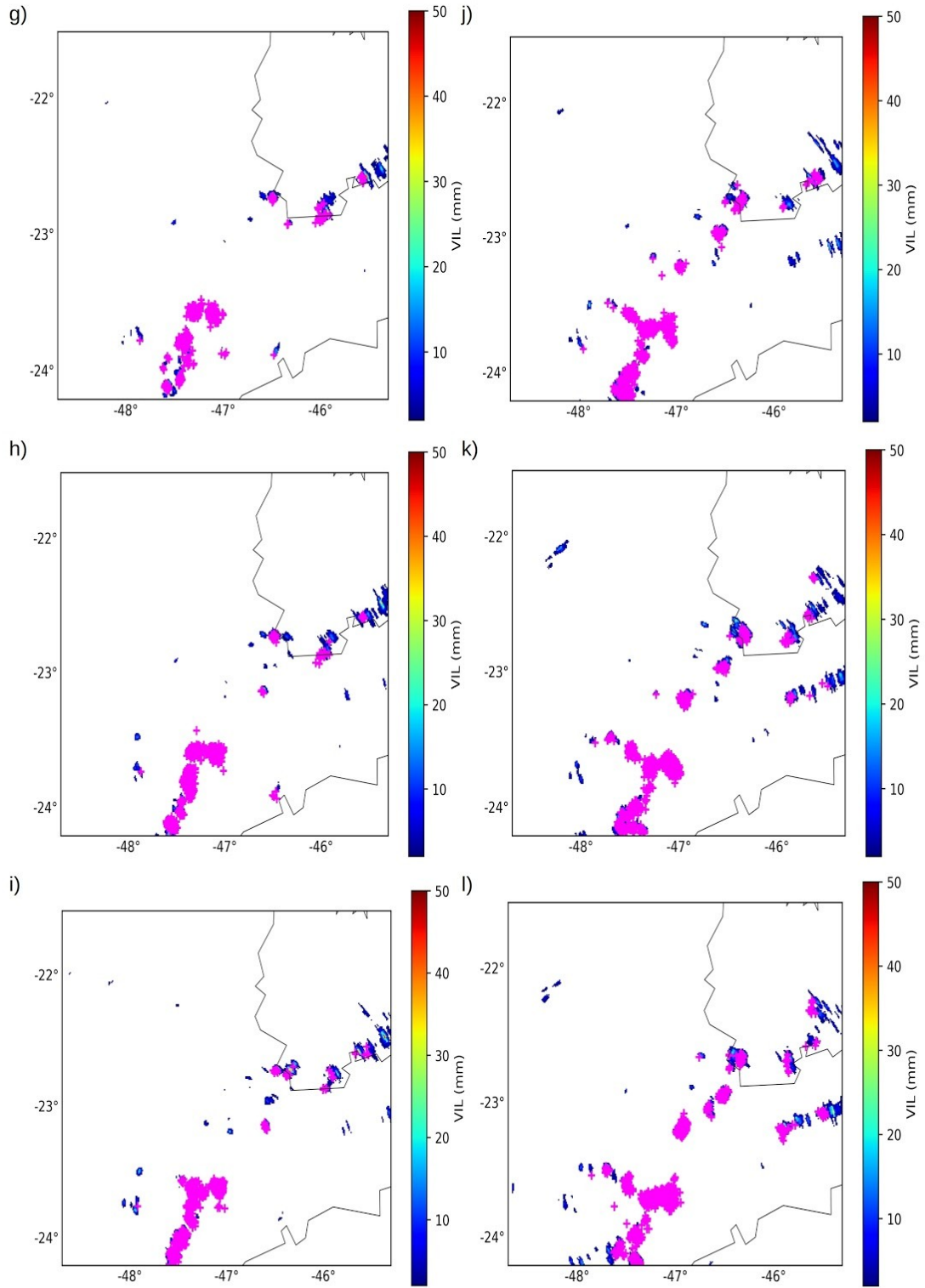
Fonte: Produção do Autor.

Figura A3 - Descargas elétricas colocadas com o *Vertically Integrated Liquid Water* (VIL) para o horário local: **a)** 15h; **b)** 15h10min; **c)** 15h20min; **d)** 15h30min; **e)** 15h40min; **f)** 16h10min; **g)** 16h20min; **h)** 16h20min; **i)** 16h40min; **j)** 16h50min; **k)** 17h; **l)** 17h10min; **m)** 17h20min; **n)** 17h30min; **o)** 17h40min; **p)** 18h; **q)** 18h20min; **r)** 18h40min; **s)** 19h; **t)** 19h20min; **u)** 19h30min; **v)** 19h40min; **w)** 19h50min; **x)** 20h; **y)** 20h40min; **z)** 20h50min; **aa)** 21h; **bb)** 21h10min; **cc)** 21h20min; **dd)** 21h40min; **ee)** 21h50min; **ff)** 22h; **gg)** 22h10min; **hh)** 22h20min; **ii)** 22h30min; **jj)** 22h40min; **kk)** 22h50min; e **ll)** 23h.



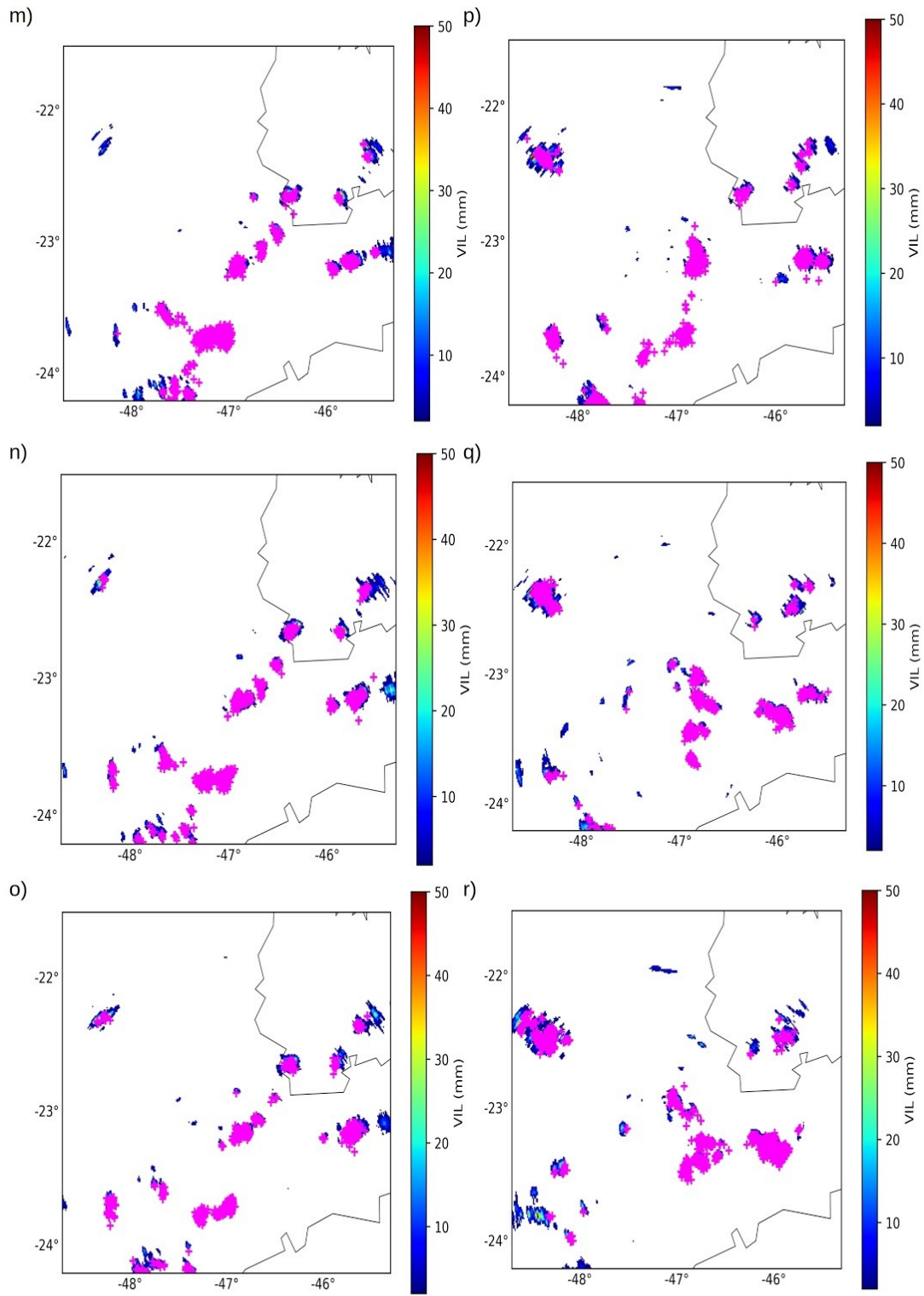
(continua)

Figura A3 – Continuação.



(continua)

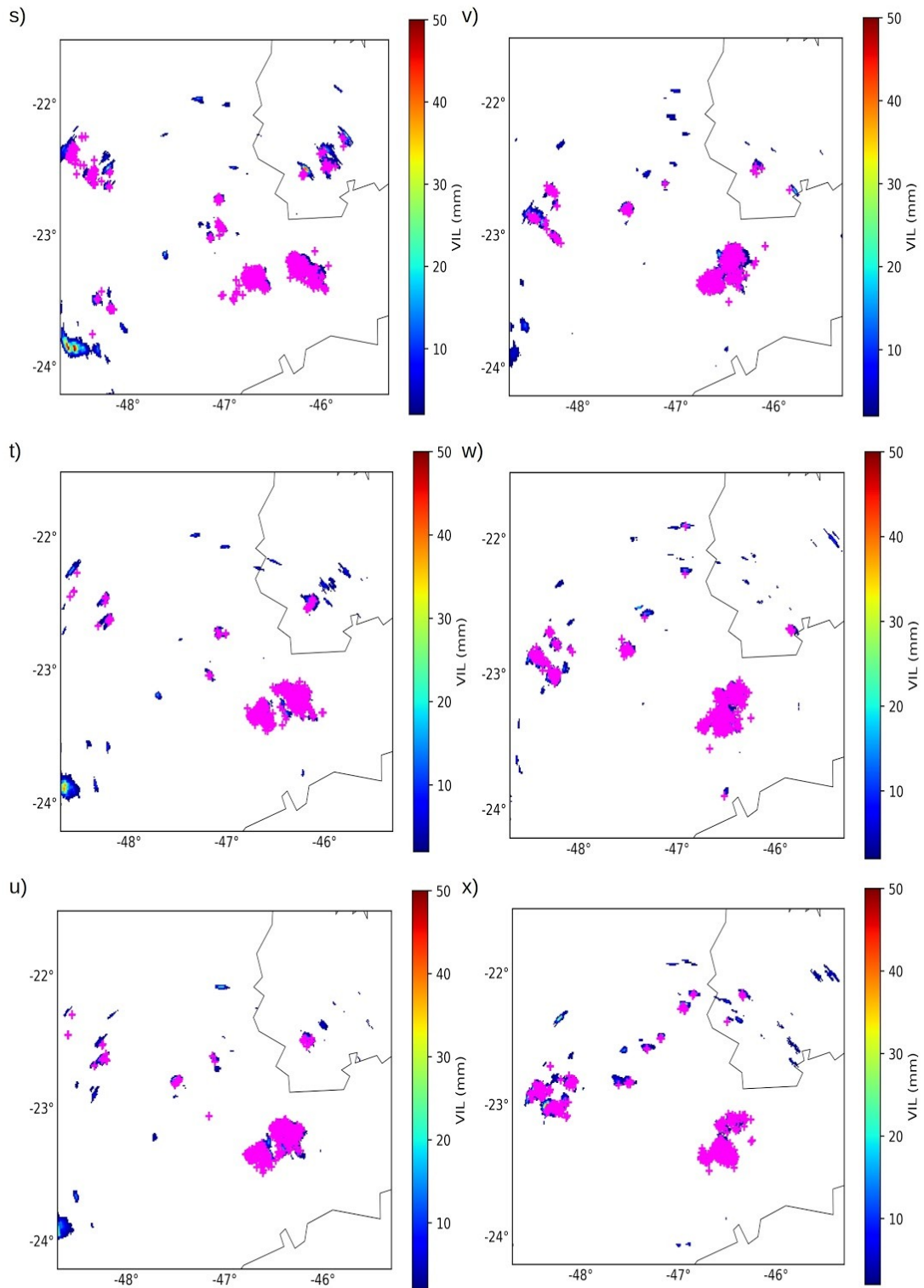
Figura A3 – Continuação.



(continua)



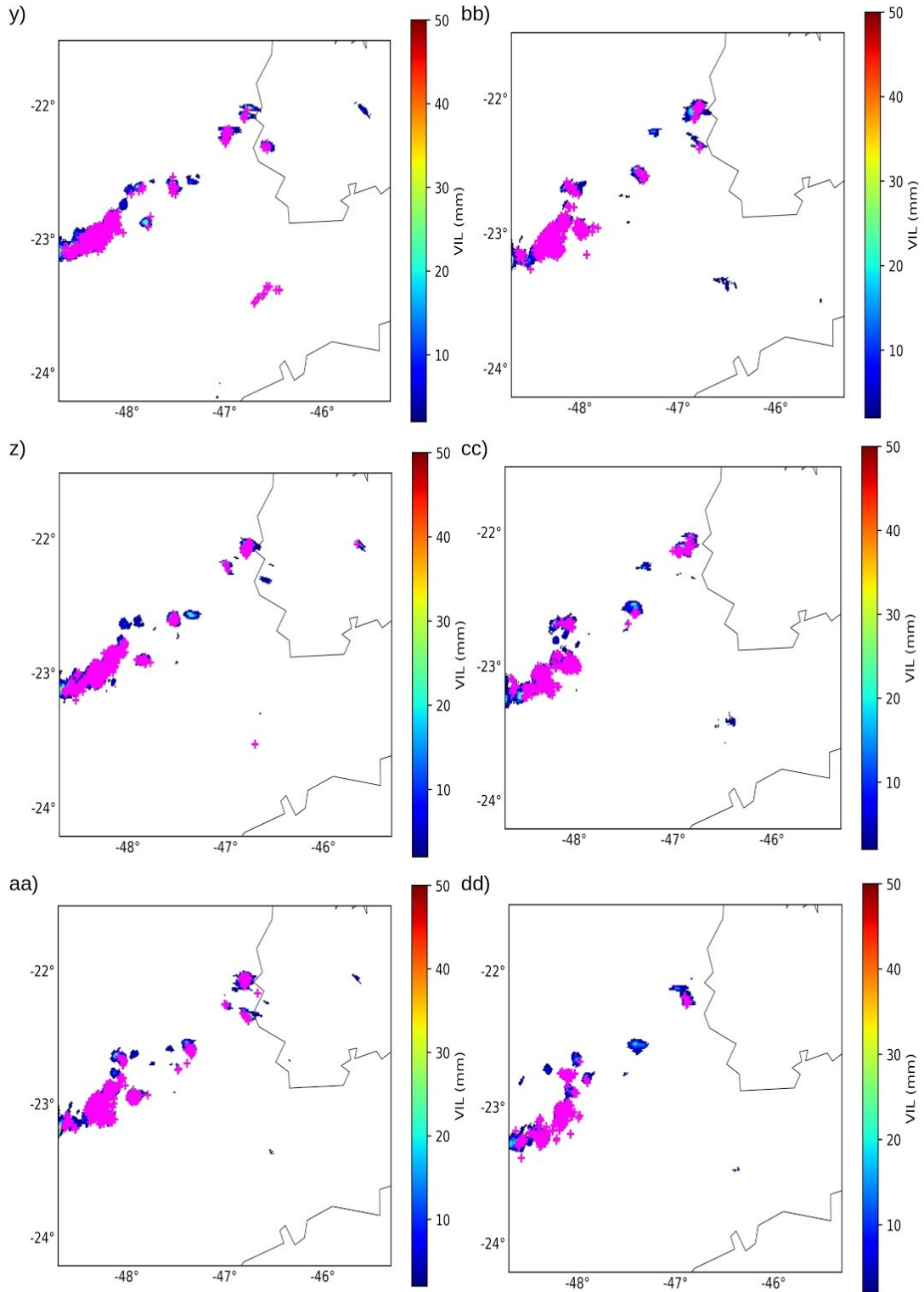
Figura A3 – Continuação.



(continua)

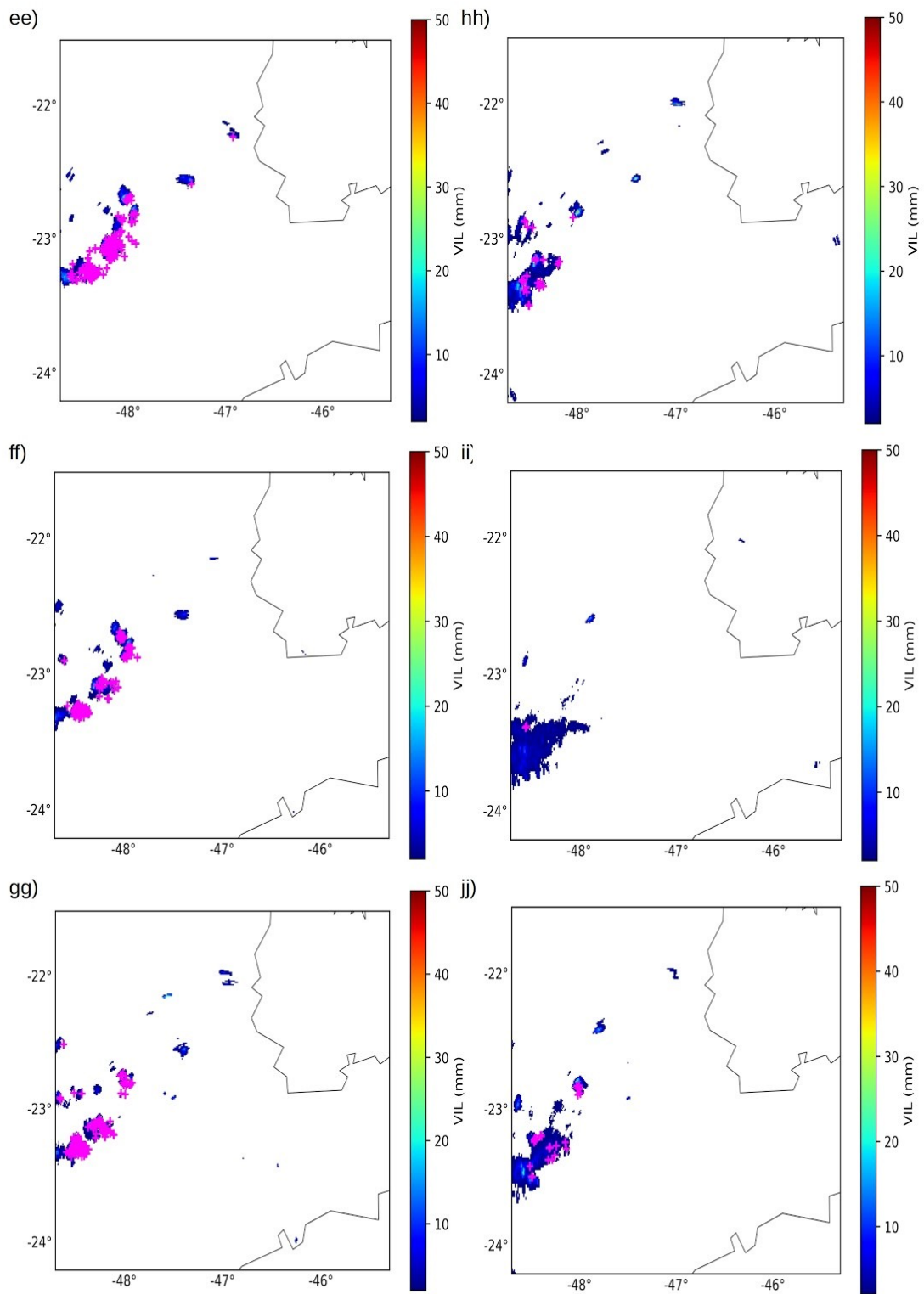


Figura A3 – Continuação.



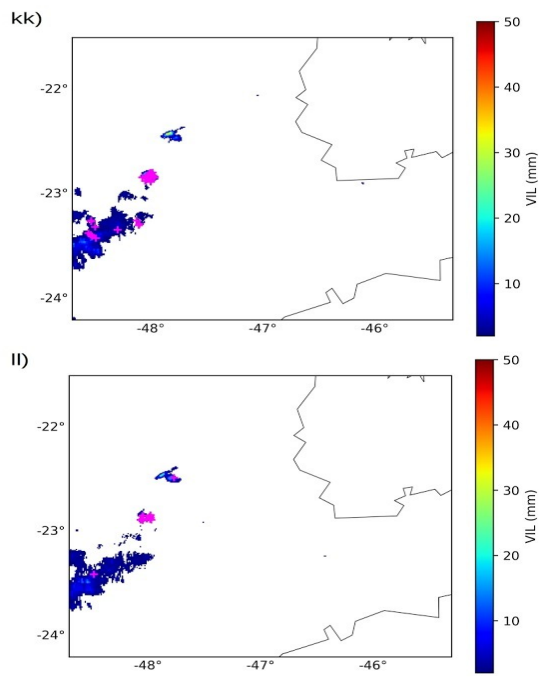
(continua)

Figura A3 – Continuação.



(continua)

Figura A3 – Conclusão.

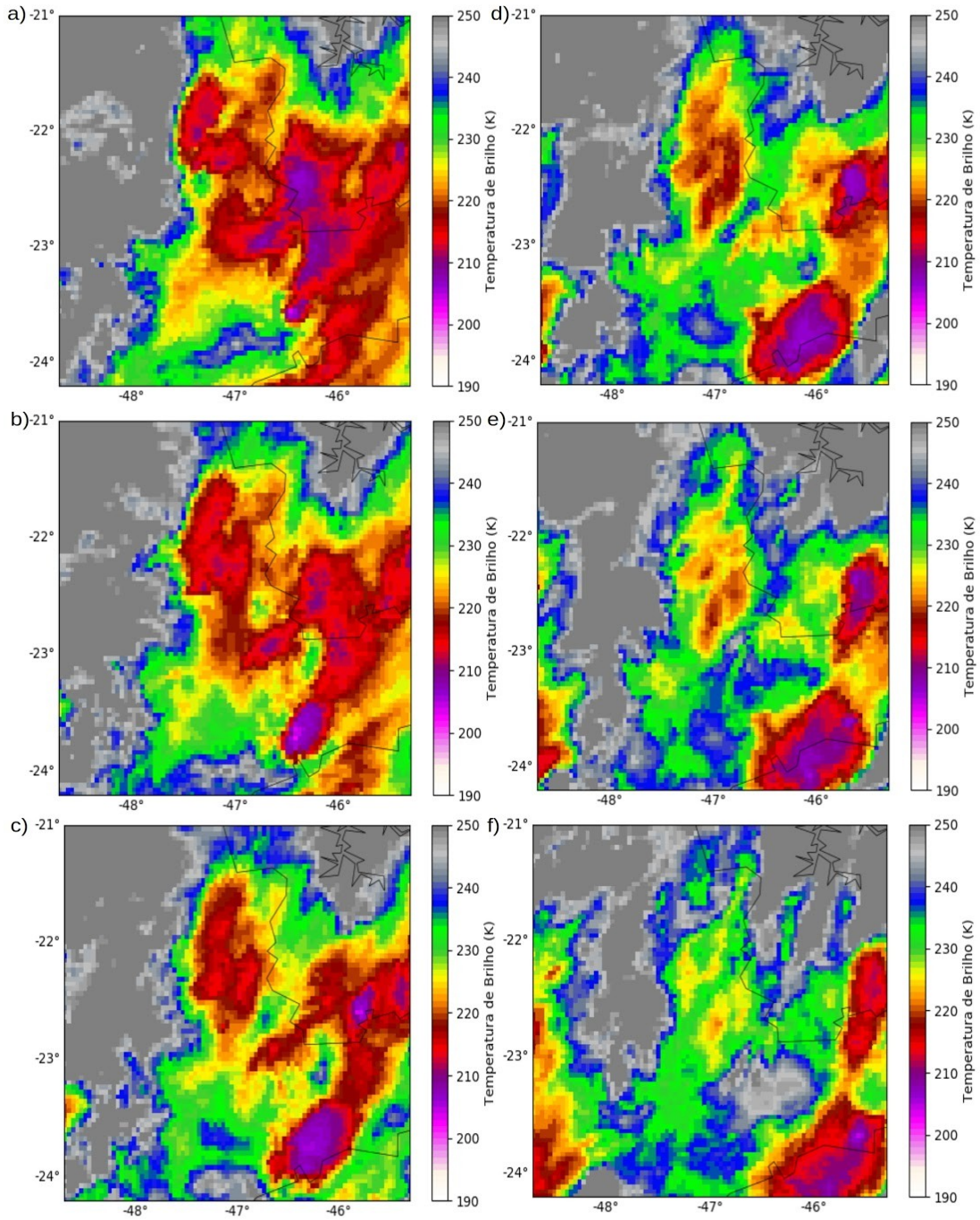


Fonte: Produção do Autor.



## APÊNDICE B - FIGURAS PARA O ESTUDO DE CASO - 17/01/2017

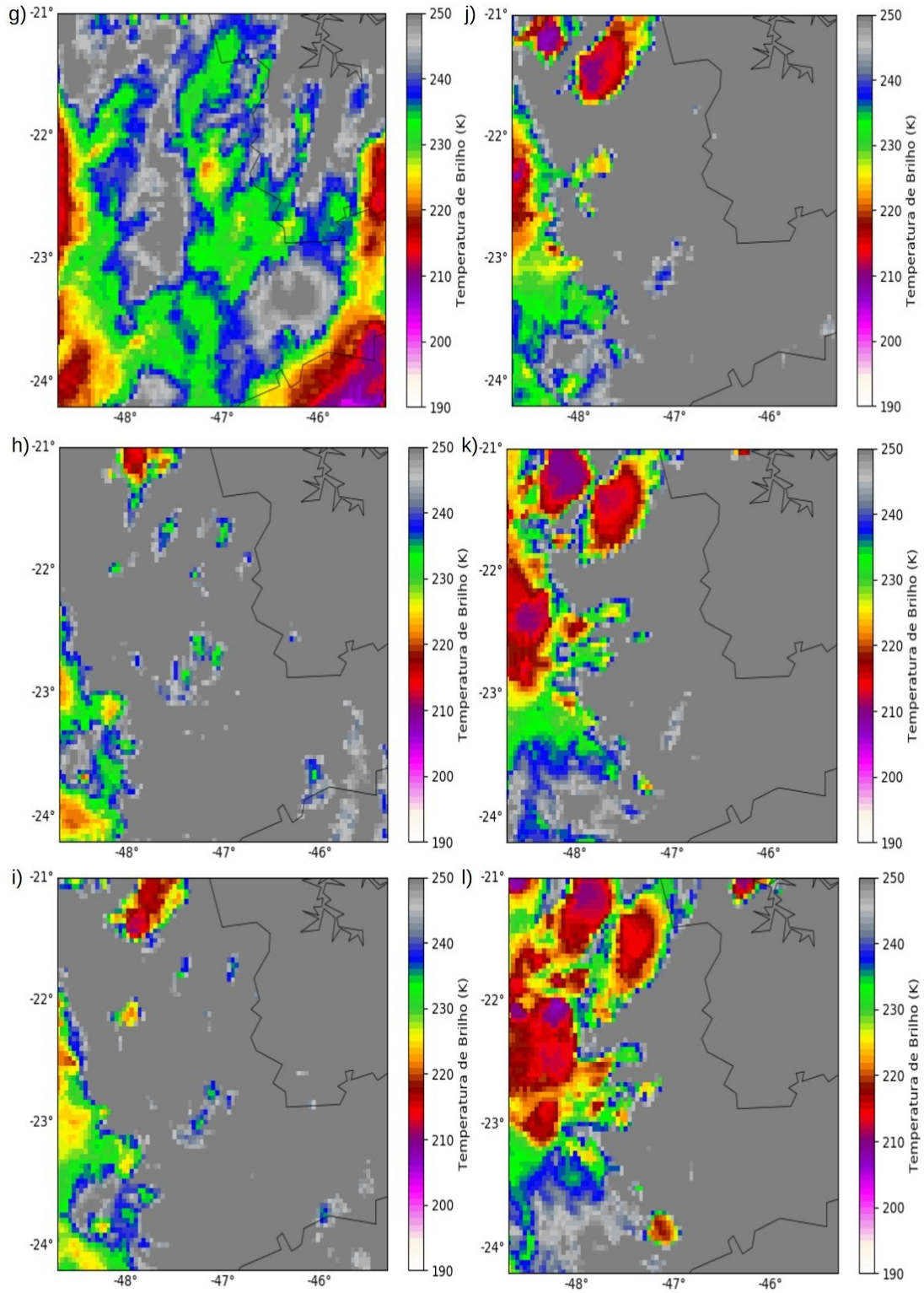
Figura B1 - Imagens de temperatura de brilho para o horário local: **a)** 1h; **b)** 1h30min; **c)** 2h; **d)** 2h30min; **e)** 3h; **f)** 3h30min; **g)** 4h; **h)** 18h30min; **i)** 19h; **j)** 19h30min; **k)** 20h; **l)** 20h30min; **m)** 21h; **n)** 21h30min; **o)** 22h; **p)** 22h30min; **q)** 23h; **r)** 23h30min.



(continua)

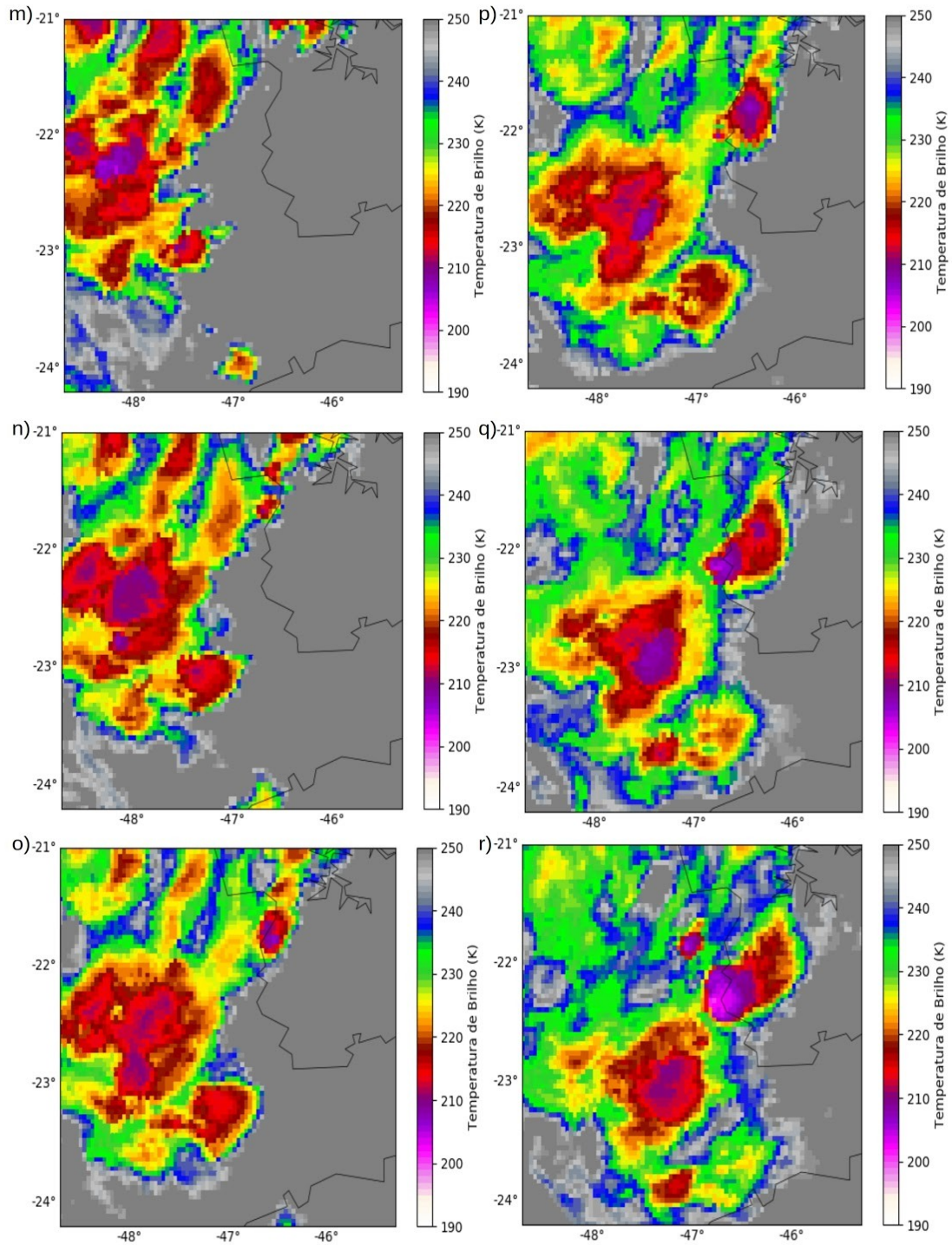


Figura B1 – Continuação.



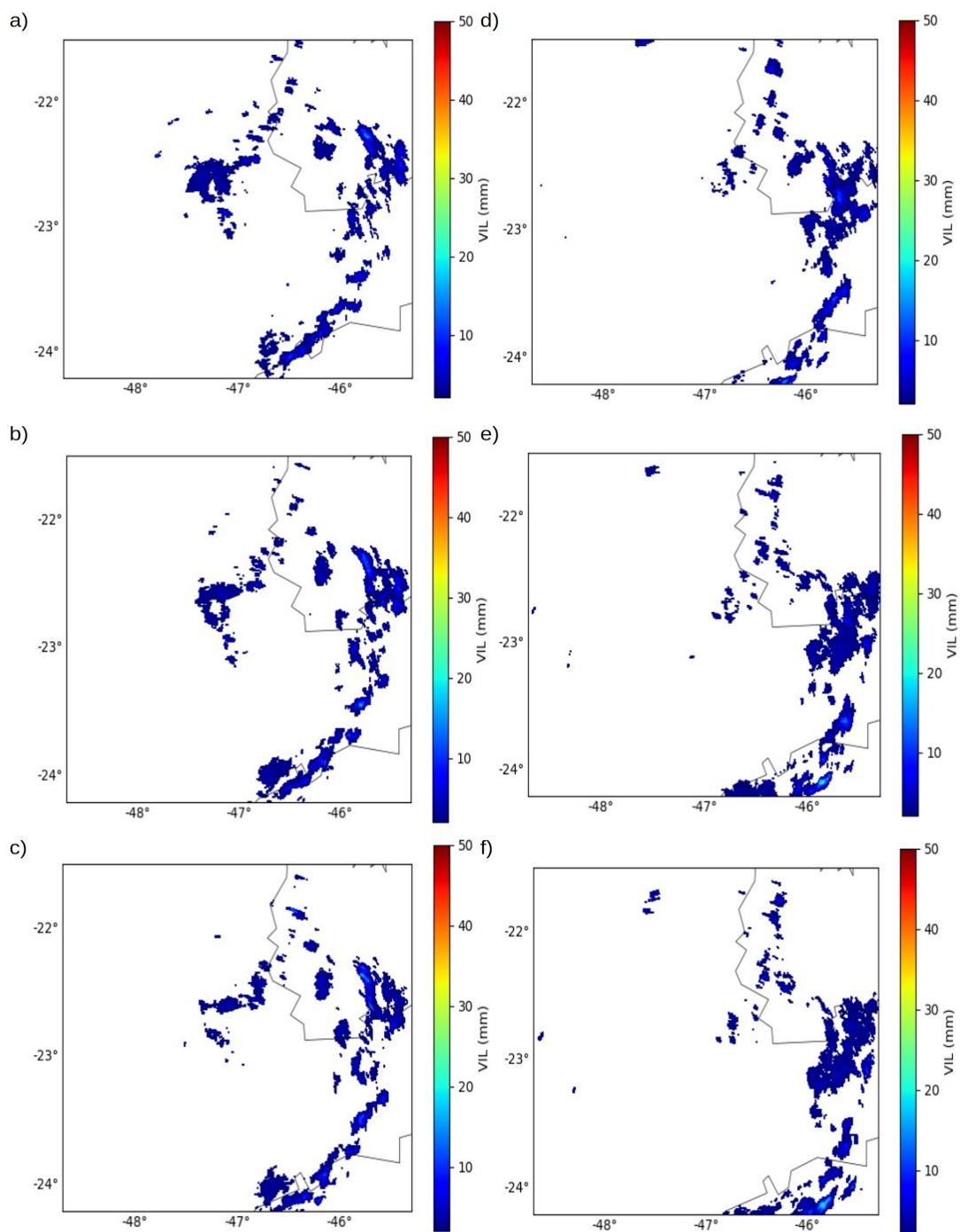
(continua)

Figura B1 – Continuação.



Fonte: Produção do Autor.

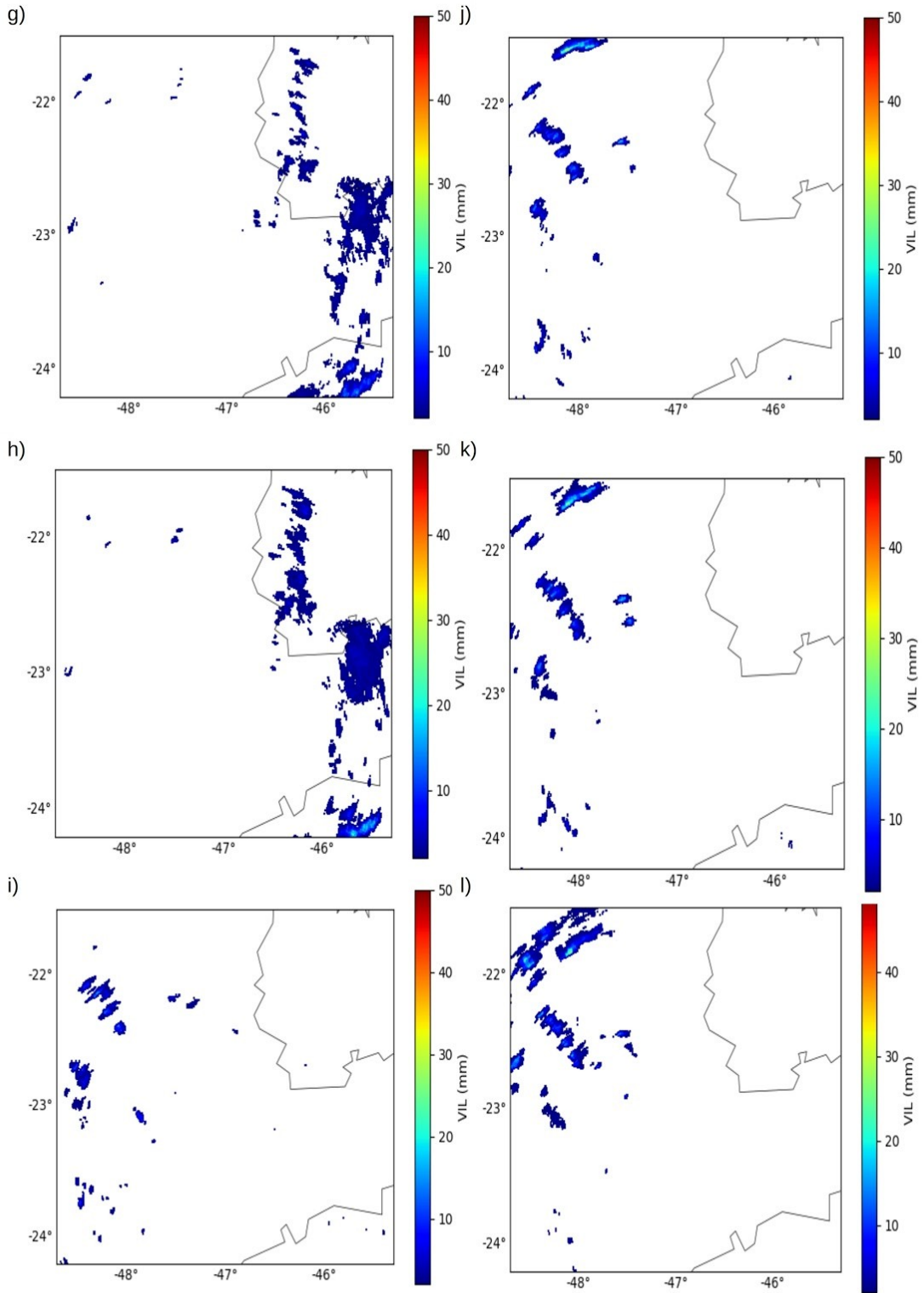
Figura B2 - Imagens do *Vertically Integrated Liquid Water* (VIL) para a hora local: **a)** 2h40min; **b)** 2h50min; **c)** 3h; **d)** 3h20min; **e)** 3h40min; **f)** 3h50min; **g)** 4h10min; **h)** 4h20min; **i)** 19h; **j)** 19h30min; **k)** 19h40min; **l)** 20h; **m)** 20h20min; **n)** 20h30min; **o)** 20h50min; **p)** 21h; **q)** 21h10min; **r)** 21h30min; **s)** 21h40min; **t)** 21h50min; **u)** 22h; **v)** 22h20min; **w)** 22h50min e **x)** 23h20min.



(continua)

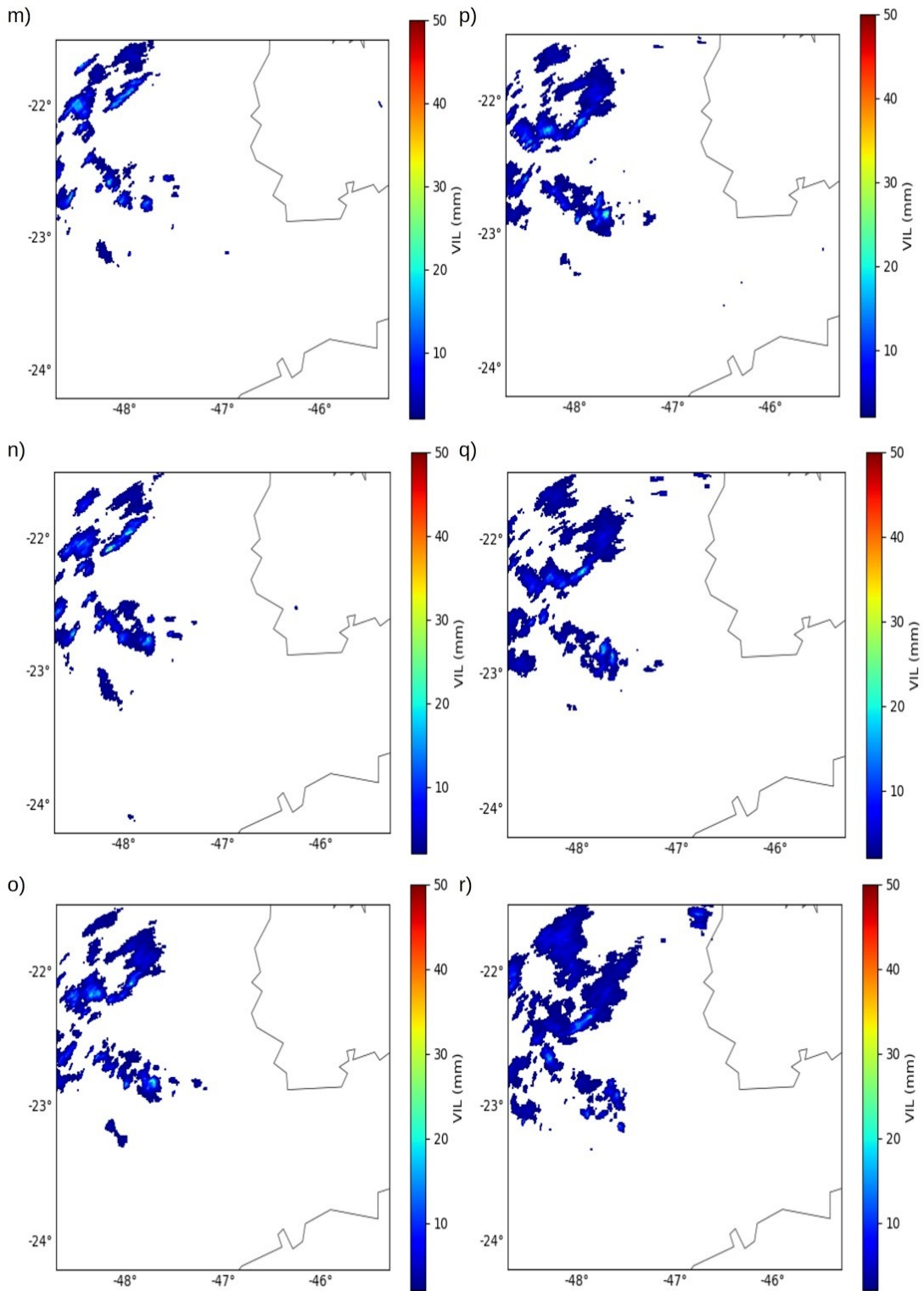


Figura B2 – Continuação.



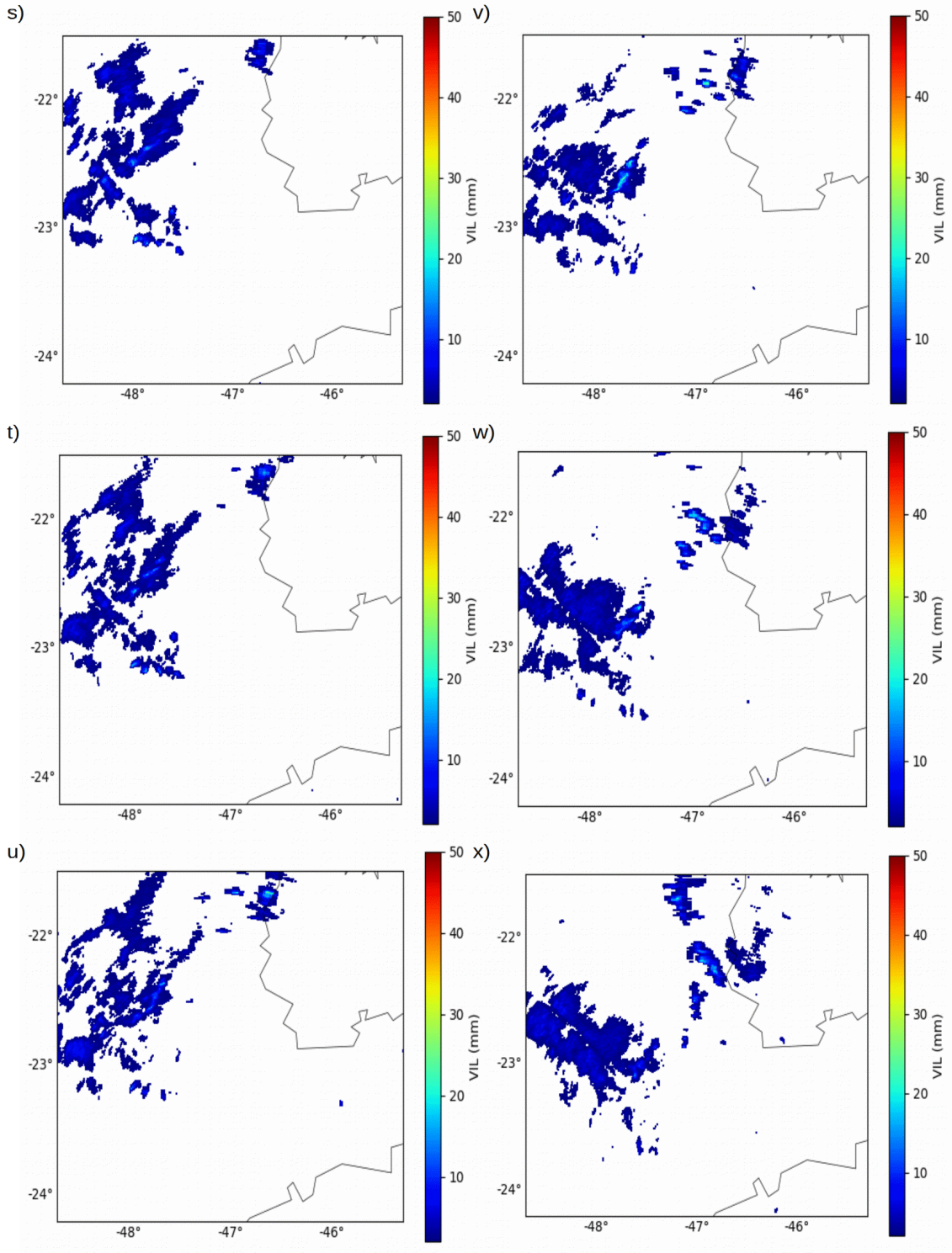
(continua)

Figura B2 – Continuação.



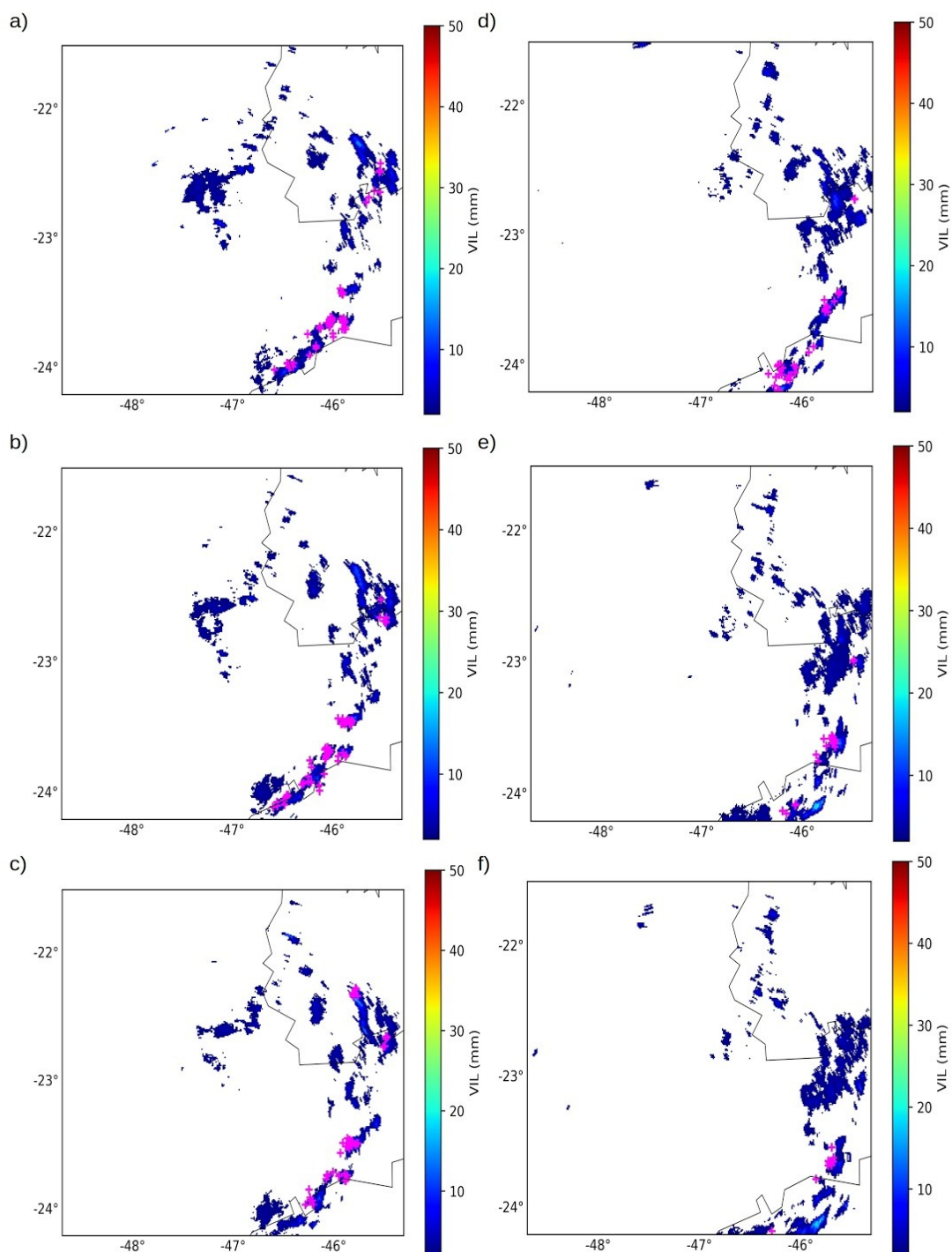
(continua)

Figura B2 – Continuação.



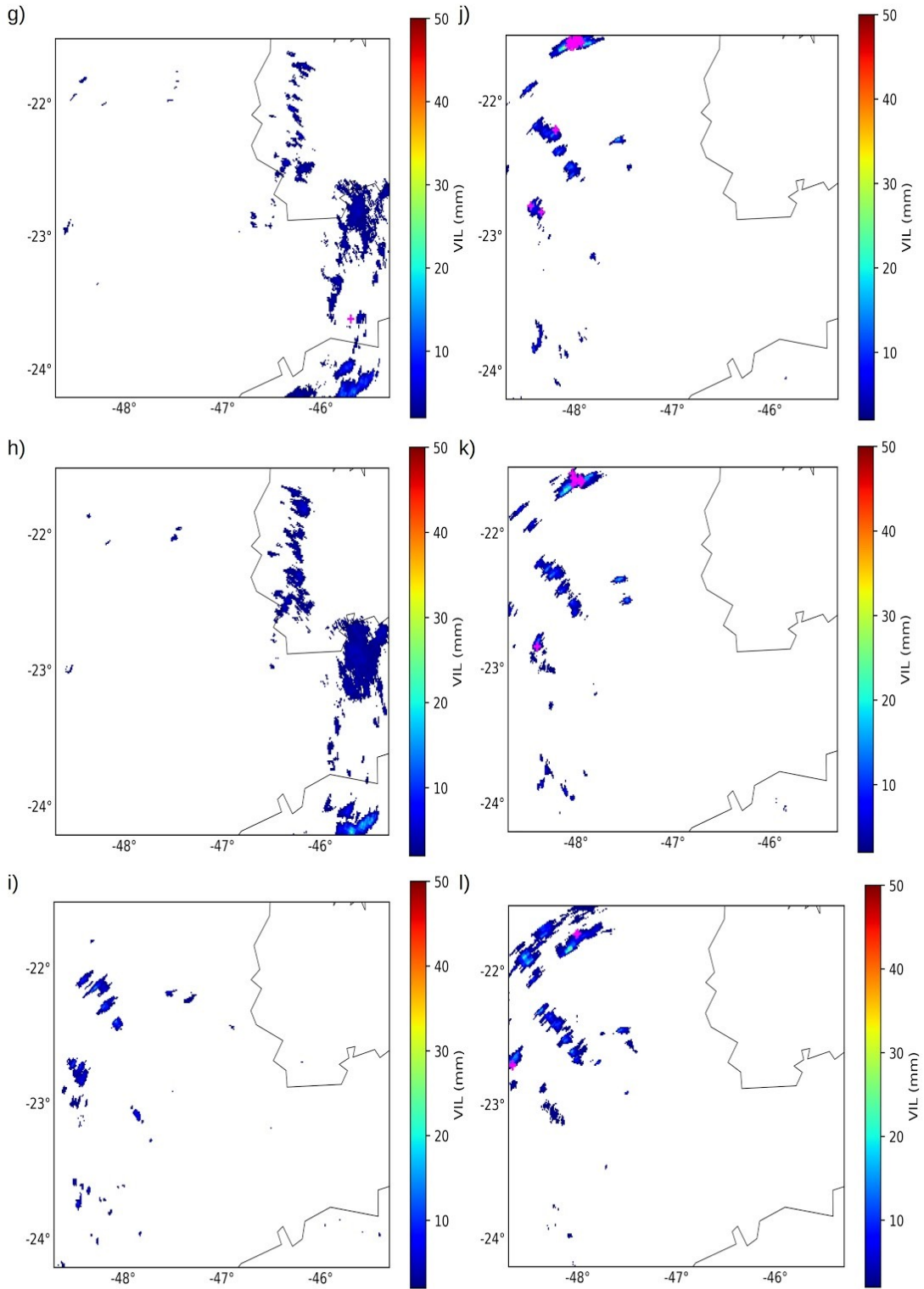
Fonte: Produção do Autor.

Figura B3 - Descargas eléctricas colocalizadas com o *Vertically Integrated Liquid Water* (VIL) para a hora local: **a)** 2h40min; **b)** 2h50min; **c)** 3h; **d)** 3h20min; **e)** 3h40min; **f)** 3h50min; **g)** 4h10min; **h)** 4h20min; **i)** 19h; **j)** 19h30min; **k)** 19h40min; **l)** 20h; **m)** 20h20min; **n)** 20h30min; **o)** 20h50min; **p)** 21h; **q)** 21h10min; **r)** 21h30min; **s)** 21h40min; **t)** 21h50min; **u)** 22h; **v)** 22h20min; **w)** 22h50min e **x)** 23h20min.



(continua)

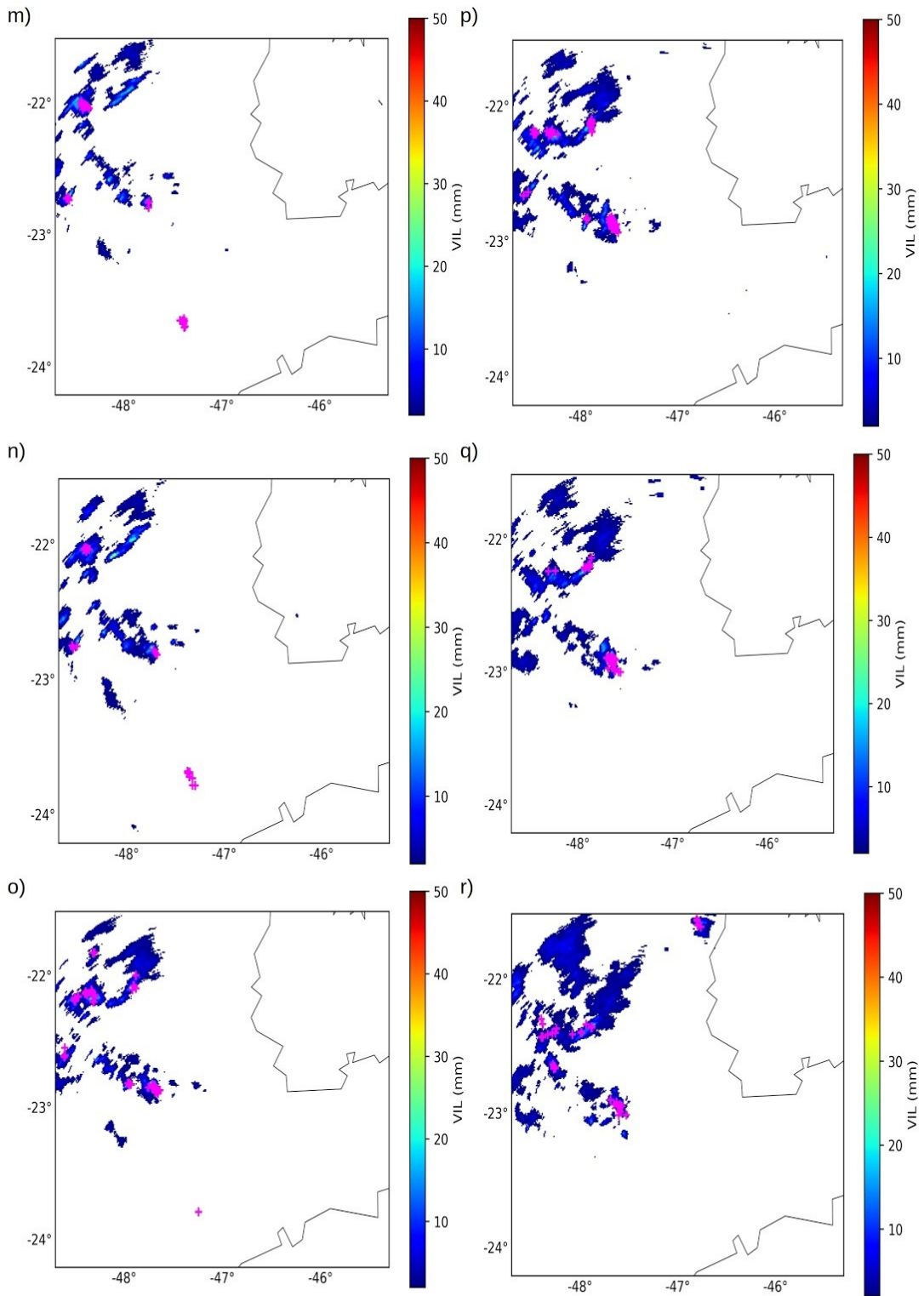
Figura B3 – Continuação.



(continua)

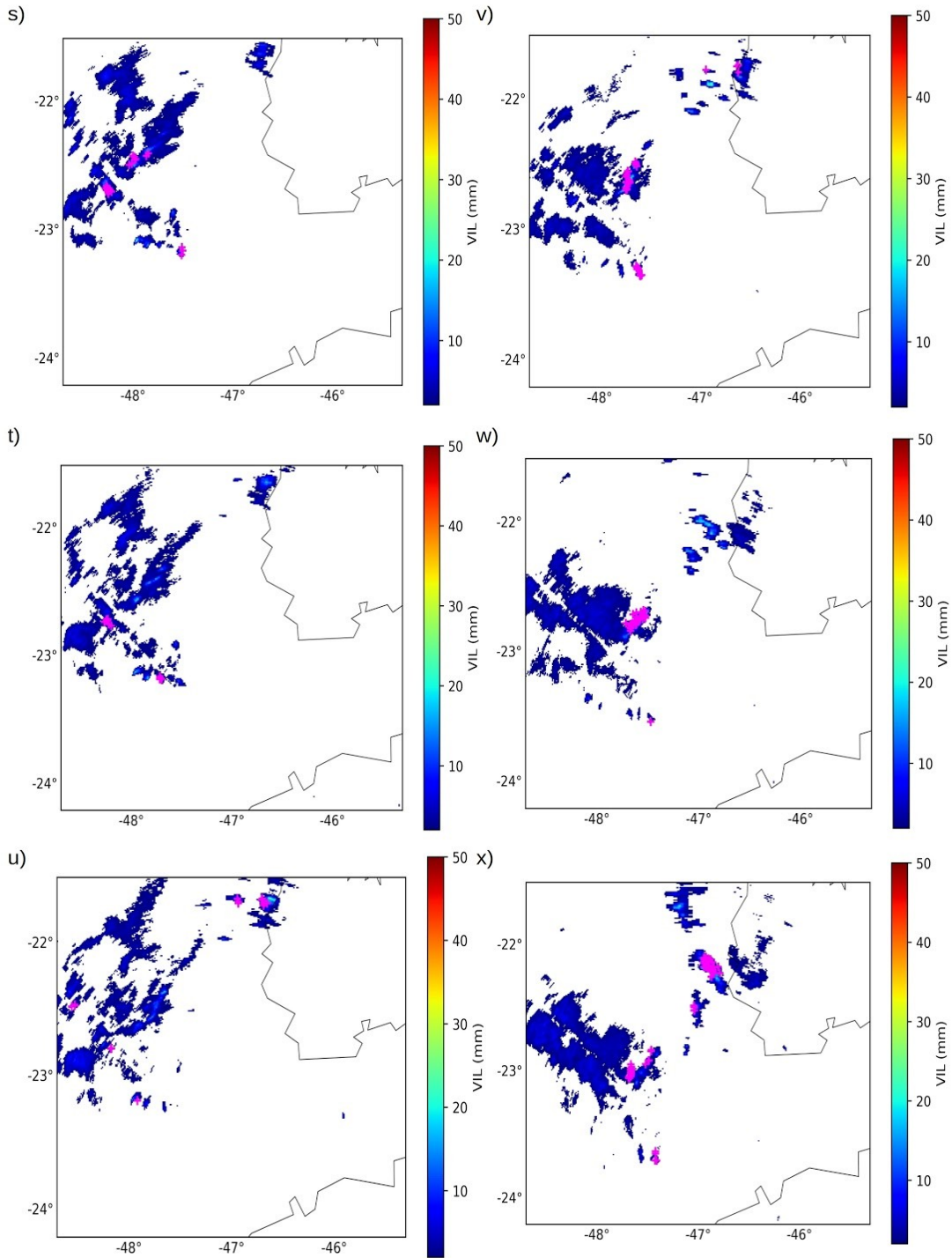


Figura B3 – Continuação.



(continua)

Figura B3 – Continuação.



Fonte: Produção do Autor.