



Ministério da  
**Ciência, Tecnologia  
e Inovação**



sid.inpe.br/mtc-m19/2012/03.13.23.12-TDI

## **SINGULARIDADE DA DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL E TEMPORAL DE RELÂMPAGOS NUVEM-SOLO A PARTIR DE DADOS DE SISTEMAS DE DETECÇÃO**

Vandoir Bourscheidt

Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Geofísica Espacial/Ciências Atmosféricas, orientada pelos Drs. Osmar Pinto Jr., e Kleber Pinheiro Naccarato, aprovada em 12 de abril de 2012.

URL do documento original:

<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/3BGQHEB>

INPE  
São José dos Campos  
2012

**PUBLICADO POR:**

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

Gabinete do Diretor (GB)

Serviço de Informação e Documentação (SID)

Caixa Postal 515 - CEP 12.245-970

São José dos Campos - SP - Brasil

Tel.:(012) 3208-6923/6921

Fax: (012) 3208-6919

E-mail: pubtc@sid.inpe.br

**CONSELHO DE EDITORAÇÃO E PRESERVAÇÃO DA PRODUÇÃO INTELLECTUAL DO INPE (RE/DIR-204):****Presidente:**

Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)

**Membros:**

Dr. Antonio Fernando Bertachini de Almeida Prado - Coordenação Engenharia e Tecnologia Espacial (ETE)

Dr<sup>a</sup> Inez Staciarini Batista - Coordenação Ciências Espaciais e Atmosféricas (CEA)

Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação Observação da Terra (OBT)

Dr. Germano de Souza Kienbaum - Centro de Tecnologias Especiais (CTE)

Dr. Manoel Alonso Gan - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPT)

Dr<sup>a</sup> Maria do Carmo de Andrade Nono - Conselho de Pós-Graduação

Dr. Plínio Carlos Alvalá - Centro de Ciência do Sistema Terrestre (CST)

**BIBLIOTECA DIGITAL:**

Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação de Observação da Terra (OBT)

**REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:**

Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Yolanda Ribeiro da Silva Souza - Serviço de Informação e Documentação (SID)

**EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:**

Vivéca Sant´Ana Lemos - Serviço de Informação e Documentação (SID)



Ministério da  
**Ciência, Tecnologia  
e Inovação**



sid.inpe.br/mtc-m19/2012/03.13.23.12-TDI

## **SINGULARIDADE DA DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL E TEMPORAL DE RELÂMPAGOS NUVEM-SOLO A PARTIR DE DADOS DE SISTEMAS DE DETECÇÃO**

Vandoir Bourscheidt

Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Geofísica Espacial/Ciências Atmosféricas, orientada pelos Drs. Osmar Pinto Jr., e Kleber Pinheiro Naccarato, aprovada em 12 de abril de 2012.

URL do documento original:

<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/3BGQHEB>

INPE  
São José dos Campos  
2012

Bourscheidt, Vandoir.

B668s Singularidade da distribuição espacial e temporal de relâmpagos nuvem-solo a partir de dados de sistemas de detecção / Vandoir Bourscheidt. – São José dos Campos : INPE, 2012.  
xxvi + 133 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m19/2012/03.13.23.12-TDI)

Tese (Doutorado em Geofísica Espacial/Ciências Atmosféricas)  
– Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2012.

Orientadores : Drs. Osmar Pinto Jr., e Kleber Pinheiro Nacarato.

1. relâmpagos. 2. sistemas de detecção. 3. desempenho do sistema. 4. climatologias de relâmpagos. 5. métodos de Kernel.  
I.Título.

CDU 551.594

---

Copyright © 2012 do MCT/INPE. Nenhuma parte desta publicação pode ser reproduzida, armazenada em um sistema de recuperação, ou transmitida sob qualquer forma ou por qualquer meio, eletrônico, mecânico, fotográfico, reprográfico, de microfilmagem ou outros, sem a permissão escrita do INPE, com exceção de qualquer material fornecido especificamente com o propósito de ser entrado e executado num sistema computacional, para o uso exclusivo do leitor da obra.

Copyright © 2012 by MCT/INPE. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording, microfilming, or otherwise, without written permission from INPE, with the exception of any material supplied specifically for the purpose of being entered and executed on a computer system, for exclusive use of the reader of the work.

Aprovado (a) pela Banca Examinadora  
em cumprimento ao requisito exigido para  
obtenção do Título de Doutor(a) em  
Geofísica Espacial/Ciências Atmosféricas

Dr. Polinaya Muralikrishna



Presidente / INPE / São José dos Campos - SP

Dr. Marcelo Magalhães Fares Saba



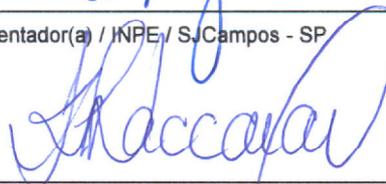
Vice-Presidente / INPE / SJCampos - SP

Dr. Osmar Pinto Junior



Orientador(a) / INPE / SJCampos - SP

Dr. Kleber Pinheiro Naccarato



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

Dr. Plínio Carlos Alvalá



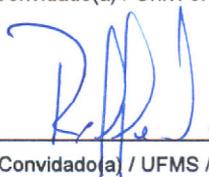
Membro da Banca / INPE / SJCampos - SP

Dr. Kenneth L. Cummins



Convidado(a) / Univ. of Arizona / Tucson - AZ

Dr. Widnei Alves Fernandes



Convidado(a) / UFMS / Campo Grande - MS

Este trabalho foi aprovado por:

( ) maioria simples

(x) unanimidade

Aluno (a): Vandoir Bourscheidt

São José dos Campos, 12 de abril de 2012



## AGRADECIMENTOS

Aos meus orientadores Dr. Osmar Pinto Jr. e Dr. Kleber Naccarato, pelas várias horas dispendidas para auxiliar no entendimento das questões relativas ao assunto abordado nesta tese. Sem esse auxílio e dedicação, este trabalho não seria possível.

Ao Dr. Kenneth Cummins, por todo o apoio oferecido no desenvolvimento das atividades no período de Doutorado Sanduíche, permitindo um grande crescimento intelectual e, ainda, oferecendo ótimos momentos de descontração durante minha estada em Tucson.

À Dra. Iara Pinto, presente praticamente ao longo de toda a minha vida acadêmica e sempre disposta a ajudar com as dúvidas.

Ao corpo docente da pós-graduação em Geofísica Espacial, pelas aulas dadas, que formaram as bases para o desenvolvimento do trabalho.

Às pessoas mais próximas, minha família e namorada, que, além de ser meu acalanto, sempre me ajudaram no que fosse preciso para a conclusão deste trabalho.

Aos amigos do ELAT, que sempre colaboraram com ideias e sugestões para tornar o trabalho melhor, além, é claro, das horas de conversa animada e distração.

Aos demais amigos e colegas que, de alguma forma, contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho.

À Eletrobras Furnas, pelos dados georreferenciados das linhas de transmissão. Ao CNPq e à CAPES, pela bolsa de estudos e auxílio financeiro para a realização da pesquisa.



## RESUMO

Uma das aplicações mais comuns dos dados de relâmpagos é a elaboração de mapas/climatologias de relâmpagos, visando identificar “singularidades físicas” na sua distribuição, ou seja, padrões ou tendências associados a aspectos físicos. Os dados são obtidos por meio de redes de sensores e a qualidade desta informação é usualmente avaliada por critérios de desempenho: eficiência de detecção e precisão de localização. As redes, no entanto, estão sujeitas a variações de desempenho no tempo e espaço, que podem criar singularidades resultantes do próprio sistema. Esta tese se concentra no aprimoramento e no desenvolvimento de técnicas e métodos para incluir e/ou superar efeitos do desempenho dos sistemas de detecção de relâmpagos na análise espacial e temporal de descargas. Por aprimoramento entende-se o novo modelo de eficiência de detecção relativa (MEDR), que passou por melhorias não só no cálculo da eficiência, passando a incluir variações angulares da mesma, mas também nos filtros, pela inclusão das variações diárias de estado (*uptime*) dos sensores. Por desenvolvimento, entende-se a inclusão das elipses de segurança como um método de suavização para os mapas ou climatologias de relâmpagos, chamado de KBBES. Outros métodos baseados em técnicas existentes são sugeridos como forma de minimizar os efeitos de desempenho espacial e temporalmente: filtros para baixa corrente, dias de tempestade e horas de tempestade. Finalmente, também é proposto um método baseado em dados de descarga que busca identificar o início das tempestades (chamado de TIT – *Thunderstorm Initiation Technique*). Com base nestes métodos, desenvolveu-se a análise de efeitos da ilha de calor de São Paulo e dos efeitos da altitude. As melhorias no MEDR são consideráveis, concentrando as maiores eficiências na parte interna da rede. O KBBES, por sua vez, permite que mapas de alta resolução sejam desenvolvidos sem prejudicar as estimativas de densidade – efeito comum no caso de métodos de contagem simples. Os demais métodos para superar efeitos de desempenho se mostraram uma boa contribuição científica, principalmente para análises espaciais e temporais para longos períodos. No que concerne às ilhas de calor, destaca-se a forma diferenciada que a TIT apresentou sobre a área urbana, indicando forte atuação do gradiente térmico sobre a formação das tempestades. Não foram encontradas tendências temporais de aumento na ocorrência de relâmpagos ou da temperatura de um modo geral. O mês de novembro, considerado como o início da estação de tempestades, apresentou alguma tendência, porém pouco significativa. Com relação à altitude, a análise através de mapas de alta resolução permitiu identificar relações estreitas entre a elevação e os relâmpagos. Ideias para compreender esta relação remetem a questões relativas ao próprio canal do relâmpago, bem como à inibição das tempestades no ambiente pós-montanha. A análise espacial da TIT para este caso também apontou a associação do início das tempestades com as áreas elevadas. Em resumo, os métodos e técnicas se mostraram satisfatórios e avanços significativos para a melhor compreensão das singularidades físicas e/ou resultantes dos sistemas de detecção foram alcançados.



# **SINGULARITIES ON THE SPATIAL AND TEMPORAL DISTRIBUTION OF CLOUD-TO-GROUND LIGHTNING BASED ON LOCATION SYSTEMS DATA**

## **ABSTRACT**

One of the most common applications of lightning data is providing lightning climatologies to identify physical "singularities" on its distribution, i.e., patterns or trends associated with physical aspects. Data are collected by Lightning Location Systems (LLSs) and the quality of information is usually evaluated by two performance criteria: detection efficiency and location accuracy. The networks are subject to spatial and temporal performance variations, which may imply in singularities resulting from the LLSs. This study focuses on the improvement and development of techniques and methods to include and/or overcome performance effects of lightning detection systems on the CG lightning spatial and temporal analysis. The improvements are related to the new relative detection efficiency model (RDEM), which has been modified to include the angular efficiency variations and filters for a status change of the sensors (daily uptime). The main development is related to the smoothing method for the lightning maps or climatologies, based on the confidence ellipses and is called KBBES. Other methods based on existing techniques are suggested in order to minimize the effects of spatial and temporal performance variations: filters for low peak current events, thunderstorm days and thunderstorm hours. Finally, a method to identify the onset of thunderstorms (called TIM – Thunderstorm Initiation Method) based on the lightning data is proposed. These methods are used, then, to analyze the effects of the urban heat island of São Paulo and the effects of the altitude. The improvements in the RDEM are significant, increasing the estimated efficiencies in the inner network. The proposed KBBES allowed the development of high-resolution maps without losing the density values, which usually happens for the simple count method. The methods to overcome the performance variations proved to be interesting, especially for long-term spatial and temporal analyzes. Regarding the urban heat island, the TIM showed a unique pattern, suggesting greater instability along the perimeter of the urban area. For the temporal analysis, no trends were observed in general. November, considered as the beginning of the storms season, showed some tendency, despite slight. With respect to the altitude, the analysis using high-resolution maps showed a good agreement between elevation and lightning. Ideas to understand this relationship refer to the lightning channel attachment process, and inhibition of storms in the post-mountain environment. Spatial analysis of TIM for this case also indicated that the storms are related to the elevation. In summary, methods and techniques gave satisfactory results and significant advances to understand the physical aspects and singularities resulting from the detection systems have been achieved.



## LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
Figura 2.1 – Representação das condições de estabilidade e instabilidade da atmosfera e seus efeitos sobre a formação de nuvens: até o nível de convecção livre (LFC) domina a CINE e a partir deste ponto a CAPE.....	<b>6</b>
Figura 2.2 – Modelo da estrutura elétrica de uma nuvem de tempestade. ....	<b>9</b>
Figura 2.3 – Diferentes tipos de relâmpagos: descarga da nuvem para o ar, relâmpago intranuvem, entre-nuvens e relâmpago nuvem-solo. ....	<b>10</b>
Figura 2.4 - Principais tipos de sistema de detecção segundo a frequência.....	<b>14</b>
Figura 2.5 - Algoritmo de localização otimizada usado no método MDF. ....	<b>17</b>
Figura 2.6 - a) Método de interseção hiperbólica para sistemas de localização utilizando três sensores; b) Ambiguidade resultante da interseção hiperbólica a partir de três sensores. ....	<b>19</b>
Figura 2.7 – Método de localização IMPACT, mostrando os dois azimutes ( $\theta_1$ e $\theta_2$ ) calculados pelo método MDF e os dois raios ( $r_1$ e $r_2$ ) obtidos a partir do método TOA. ....	<b>19</b>
Figura 2.8– Distribuição dos sensores da RINDAT (no período 2008-2009), com a localização dos diferentes tipos de sensores e instituições/empresas participantes do consórcio. ....	<b>22</b>
Figura 2.9 – Variação do erro na localização em função da distância e da geometria da rede. Elipse vermelha indica erros maiores fora da rede. ....	<b>30</b>
Figura 2.10 – Análise da ilha de calor (c) de São Paulo sobre a ocorrência de relâmpagos (a).....	<b>36</b>
Figura 2.11 – a) Evolução da área urbana de São Paulo (1942 a 1992); b) Análise decadal mostrando o aumento da temperatura e do número de dias de tempestade para a cidade de São Paulo (Congonhas).....	<b>37</b>

Figura 3.1 – Regiões de estudo segundo a Tabela 3.1. São mostradas as linhas de transmissão, os sensores da rede e a máscara urbana de São Paulo.....	<b>42</b>
Figura 3.2 – Ilustração do calculo da eficiência relativa de cada sensor levando em conta os intervalos de ângulo e de distancia. Os pontos pretos representam as descargas detectadas por toda a rede e os pontos vermelhos aquelas detectadas pelo sensor no centro da figura. ....	<b>45</b>
Figura 3.3 – Simulação dos tamanhos de célula de grade e efeitos na precisão do cálculo da gaussiana (volume) utilizando dados do sistema. ....	<b>47</b>
Figura 3.4 – Mapa dos semieixos maiores das elipses e regiões usadas para teste (retângulos vazados): Cuiabá (A); Belo Horizonte (B) e São Paulo (C). ..	<b>48</b>
Figura 3.5 – Efeitos do fator de suavização adotado na análise: fator de 2(a) e de 8(b). ....	<b>49</b>
Figura 3.6 – Técnicas para a análise dos dados de relâmpago: Horas de Tempestade e Dias de Tempestade.....	<b>51</b>
Figura 3.7 – Dispersão comparativa entre os DTs de estações observacionais (abcissas) e DTs obtido através do sistema de detecção (ordenadas).....	<b>52</b>
Figura 3.8 – Configuração final escolhida para a análise de desempenho. ....	<b>54</b>
Figura 3.9 – Avaliação da sensibilidade utilizando o percentil de 90% e o limiar de -15kA. Baseada nos dados contidos na região D da Figura 3.1. ....	<b>56</b>
Figura 3.10 – Ilustração da TIT.....	<b>57</b>
Figura 3.11 – Mascara que define a área urbana de São Paulo, além do buffer interno gerado a partir da mesma e a localização das estações meteorológicas da CETESB. ....	<b>59</b>
Figura 3.12 – Comparação entre dados MODIS e estações da CETESB. ....	<b>62</b>
Figura 4.1 – Diferenças para a eficiência calculada utilizando apenas a distância (a) e utilizando a distância e o azimute (b). O círculo indica a localização do sensor em destaque. ....	<b>65</b>

Figura 4.2 – Análise da utilização ( <i>w</i> na legenda) ou não ( <i>no</i> ) dos filtros de estatística ( <i>st</i> na legenda) e de sensores essenciais ( <i>ess</i> ). Curvas calculadas entre novembro 2009 e abril 2010 e para picos de corrente abaixo de 30 kA. .	<b>66</b>
Figura 4.3 – Eficiência média da rede baseada nos dois intervalos de pico de corrente.....	<b>67</b>
Figura 4.4 – Mapas de densidade sem correção (A) e com correção para a eficiência de detecção (B). .....	<b>68</b>
Figura 4.5 – Mapas de densidade utilizando o método de quadratura (coluna da esquerda) e o método KBBES (coluna da direita) para diferentes resoluções espaciais. O método KBBES se mostrou independente da resolução adotada (0.1, 0.5 e 2 km, de cima para baixo) e mais eficiente na representação da densidade. ....	<b>70</b>
Figura 4.6 – Visualização do método KBBES acompanhada de uma análise (tipo Monte Carlo) para efeitos dos erros sistemáticos. ....	<b>72</b>
Figura 4.7 – Mapa utilizando o método KBBES sobre a região de Belo Horizonte e variação do tamanho mediano do semieixo maior da elipse ao longo dos anos. ....	<b>74</b>
Figura 4.8 – Mapa utilizando o método KBBES sobre a região de São Paulo e variação do tamanho mediano do semieixo maior da elipse ao longo dos anos. ....	<b>74</b>
Figura 4.9 – Mapa utilizando o método KBBES sobre a região de Cuiabá e variação do tamanho mediano do semieixo maior da elipse ao longo dos anos. ....	<b>75</b>
Figura 4.10 – Mapa da incidência de descargas ao longo das linhas de transmissão de ITAIPU utilizando o método de <i>kernel</i> baseado nas elipses, corrigido pelo MEDR4.....	<b>76</b>
Figura 4.11 – Perfil ao longo da linha de transmissão de 750kV. Setas apontam a localização das subestações. ....	<b>77</b>
Figura 4.12 – Análise temporal mensal de relâmpagos utilizando diferentes tipos de abordagem: contagem de <i>flashes</i> , <i>flashes</i> filtrados para baixas	

correntes, HTs e DTs elaborados para os diferentes cenários: toda a rede (linha preta), cenário com 10 sensores (linha pontilhada vermelha) e cenário com 9 sensores (linha tracejada azul). Valores de eficiência relativa entre os diferentes cenários também podem ser observados.....	<b>78</b>
Figura 4.13 - Análise espacial utilizando as diferentes abordagens (colunas) – contagem de <i>flashes</i> , HTs e DTs – e os diferentes cenários (linhas): toda a rede (ref) e o cenário com 10 sensores (cfg1). A eficiência relativa entre os dois cenários (razão entre cfg1 e ref) também podem ser observada. Retângulo pontilhado indica a região usada na análise temporal. ....	<b>80</b>
Figura 4.14 – Mapas de densidade de relâmpagos (acima) e de TIT, início das tempestades (abaixo), sobre a região do Vale do Paraíba. As linhas pretas indicam os contornos da elevação. ....	<b>83</b>
Figura 4.15 – Comparação entre os resultados obtidos através do início de tempestades obtido a partir de dados do FORTRACC (sistemas ‘N’, acima) e através da TIT.....	<b>84</b>
Figura 4.16 – Gráfico da densidade de relâmpagos em função da altitude, obtido sobre a região do Vale do Paraíba. ....	<b>85</b>
Figura 4.17 – Gráfico do início de tempestades (TIT) em função da altitude, obtido sobre a região do Vale do Paraíba. ....	<b>86</b>
Figura 4.18 – Mapa de alta resolução (200m) sobre a região de Belo Horizonte. A Seta contínua está sobre a área urbana e indica a direção para uma análise detalhada do mapa. A seta pontilhada indica a região onde uma segunda análise em detalhes é feita sobre a cadeia de montanhas.....	<b>87</b>
Figura 4.19 – Recorte do mapa de alta resolução (200m) sobre a cadeia de motanhas ao sul de Belo Horizonte, MG (conforme indicado pelas linhas e seta pontilhada na Figura 4.18). ....	<b>88</b>
Figura 4.20 – Recorte do mapa de alta resolução (200m) sobre a região de Belo Horizonte, MG (conforme indicado pela seta preta contínua na Figura 4.18).....	<b>88</b>

Figura 4.21 – Mapa de alta resolução (500m) da densidade de relâmpagos sobre a região de São Paulo. Regiões destacadas são utilizadas em análise posterior (Pico do Jaraguá, ao Norte; Serra do Mar, ao Sudeste). .....	<b>89</b>
Figura 4.22 – Recorte do mapa de alta resolução (100m) sobre o Pico do Jaraguá, SP. ....	<b>90</b>
Figura 4.23 – Recorte do mapa de alta resolução (100m) sobre parte da Serra do Mar, conforme indicado na Figura 4.19. ....	<b>91</b>
Figura 4.24 – Evolução da área urbana e da população da cidade de São Paulo. ....	<b>92</b>
Figura 4.25 – Evolução da temperatura sobre a região de São Paulo (desde 1900) baseada em dados do GISS. ....	<b>93</b>
Figura 4.26 – Evolução temporal das médias de temperatura do satélite MODIS Terra obtidas para o anel em torno da área urbana de São Paulo nos meses de verão. ....	<b>94</b>
Figura 4.27 – Evolução temporal das médias de temperatura do satélite MODIS Aqua obtidas para o anel em torno da área urbana de São Paulo nos meses de verão. ....	<b>95</b>
Figura 4.28 – Painel da evolução temporal das HTs (baseada em dados de relâmpago), do início de tempestades e da temperatura média do ar para o inverno (linha superior), verão (linha intermediária) e para o mês de Novembro (linha inferior). ....	<b>96</b>
Figura 4.29 – Gráfico da variação diurna da atividade de relâmpagos ( <i>flashes</i> e TIT) sobre a área urbana de São Paulo. ....	<b>97</b>
Figura 4.30 – Painel da análise espacial da ilha de calor urbano de São Paulo com informações de HTs, TIT e temperatura de superfície MODIS. Dividido em diferentes horários (colunas) e diferentes períodos do ano (linhas). ....	<b>98</b>
Figura 4.31 – Horas de Tempestade e TIT para verão e para o intervalo entre as 14h e 18h (destacado da Figura 4.27). TIT exibe um comportamento singular, com a redução das descargas no centro da área urbana (polígono em magenta). ....	<b>100</b>

Figura 4.32 – Ilustração da convergencia da brisa marinha sobre uma ilha. ..	<b>101</b>
Figura 4.33 – Horas de Tempstade e TIT para o inverno e para o intervalo entre as 14h e 18h (destacado da Figura 4.27). Indica uma possivel interação das descargas com as áreas elevadas. ....	<b>101</b>
Figura A.1 - Diagrama de funcionamento do MEDR. ....	<b>119</b>
Figura A.2 – Interface do MEDR4.....	<b>120</b>
Figura A.3 – Interface para a suavização de curvas do MEDR4 com as curvas iniciais.....	<b>121</b>
Figura A.4 – Interface para a suavização de curvas do MEDR4 com as curvas suavizadas.....	<b>121</b>
Figura B.1 – Elipse rotacionada por um ângulo $\theta$ . ....	<b>124</b>
Figura D.1 – Estatísticas (desvios em verde) para as bandas do satélite LANDSAT 5 sobre a região de São Paulo.....	<b>131</b>
Figura D.2 – Área urbana de São Paulo obtida pela composição R(3) G(4) B(1).....	<b>132</b>
Figura D.3 – Comparação dos produtos MODIS.....	<b>132</b>

## LISTA DE TABELAS

	<b><u>Pág.</u></b>
Tabela 2.1 – Variações da RINDAT ao longo dos anos (por quantidade de sensores e de tecnologia utilizada). .....	<b>21</b>
Tabela 3.1 – Índice para cada região e tipo de análise realizada. ....	<b>41</b>
Tabela 4.1 – Variação da estimativa de densidade em função do tipo de metodologia e da resolução espacial adotada na análise (em <i>flashes.km<sup>-2</sup>.ano<sup>-1</sup></i> ). .....	<b>71</b>
Tabela D.1 – Indicações dos arquivos de controle de qualidade (valores binários) dos produtos LST do MODIS.....	<b>133</b>



## LISTA DE EQUAÇÕES

	<u>Pág.</u>
Equação 2.1 - Método de mínimos quadrados utilizado na otimização da localização das descargas .....	20
Equação 3.1 – Função de distribuição de probabilidade normal bivariada .....	46
Equação 3.2 – Eficiência média ponderada pelo intervalo de pico de corrente e pelo percentual de dados em cada intervalo.....	50
Equação 3.3 – Densidade de relâmpagos corrigida pela eficiência.....	50
Equação 3.4 – Probabilidade de dias de tempestade em função do número de descargas.....	51



## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

CAPE	Convective Available Potential Energy
CCMs	Complexos Convectivos de Mesoescala
CETESB	Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental
CINE	Convective Inhibition Energy
DEM	Digital Elevation Model
DT(s)	Dia(s) de Tempestade
ELAT	Grupo de Eletricidade Atmosférica
GISS	Goddard Institute for Space Studies
HT(s)	Hora(s) de Tempestade
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IN	Relâmpago Intranuvem
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
KBBES	<i>Kernel</i> Bivariado Baseado nas Elipses de Segurança
LFC	Level of Free Convection
LST	Land Surface Temperature
MED	Modelo de Eficiência de Detecção
MEDR	Modelo de Eficiência de Detecção Relativa
MODIS	Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer
NS	Relâmpago Nuvem-solo
RINDAT	Rede Nacional Integrada de Detecção de relâmpagos
SCMs	Sistemas Convectivos de Mesoescala
SN	Relâmpago Solo-Nuvem
SPPA	Spatial Point Pattern Analysis
TIT	Thunderstorm Initiation Technique



## SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>5</b>
2.1. Formação e eletrificação de nuvens de tempestade .....	5
2.2. Relâmpagos .....	10
2.3. Sistemas de detecção de relâmpagos .....	13
2.3.1. Radiação emitida por relâmpagos.....	13
2.3.2. Sistemas de detecção segundo a frequência.....	14
2.3.3. Métodos de localização de relâmpagos .....	16
2.4. Rede integrada nacional de detecção de descargas atmosféricas.....	20
2.4.1. Parâmetros fornecidos pela RINDAT .....	23
2.4.1.1. Parâmetros físicos .....	23
2.4.1.2. Parâmetros de desempenho .....	24
2.4.2. Central de processamento e reprocessamento de dados.....	24
2.4.3. Desempenho do sistema de detecção .....	25
2.4.3.1. Eficiência de detecção .....	26
2.4.3.2. Modelos de eficiência de detecção .....	27
2.4.3.3. Precisão de localização .....	29
2.4.3.4. Contaminação por descargas intranuvem.....	30
2.5. Dias de tempestade e o desempenho do sistema .....	31
2.6. Análise espacial de dados de relâmpagos.....	32
2.7. Fenômenos físicos associados à distribuição de relâmpagos .....	34
<b>3 METODOLOGIA.....</b>	<b>41</b>
3.1. Área de estudo .....	41
3.2. Análise de desempenho.....	42
3.2.1. Eficiência de detecção – MEDR4 .....	43
3.2.2. Precisão de localização: <i>kernel</i> usando elipses de confiança .....	45
3.2.3. Integração para mapas finais.....	49

3.2.4. Métodos alternativos para superar efeitos de desempenho .....	50
3.2.4.1. DTs: dados do sistema versus estações observacionais .....	51
3.2.4.2. Reprocessamento de cenários .....	53
3.2.4.3. Análise de sensibilidade.....	55
3.3. Métodos para a análise de efeitos físicos .....	56
3.3.1. TIT: início das tempestades .....	57
3.3.2. Imagens LANDSAT .....	58
3.3.3. Dados de temperatura .....	59
3.3.3.1. Temperatura de superfície MODIS.....	59
3.3.3.2. Dados da CETESB .....	61
3.3.3.3. Dados GISS .....	62
3.3.4. Análise da altitude .....	63
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>65</b>
4.1. Melhorias no modelo de eficiência.....	65
4.2. Avaliação do método de <i>kernel</i> baseado nas elipses (KBBES).....	69
4.3. Mapas de densidade com aplicações ao setor elétrico .....	76
4.4. Métodos alternativos para superar efeitos de desempenho .....	78
4.5. Singularidades Físicas .....	81
4.5.1. Densidade, TIT e sua relação com a altitude.....	82
4.5.2. Altitude e relâmpagos: análise para alta resolução.....	86
4.5.3. Ilha de calor urbano de São Paulo.....	92
4.5.3.1. Análise temporal.....	94
4.5.3.2. Análise espacial .....	97
<b>5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>103</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>107</b>
<b>APÊNDICE A – DETALHES DO MODELO DE EFICIENCIA RELATIVA.....</b>	<b>119</b>
A.1 Diagrama MEDR .....	119
A.2 Interface do modelo mais recente .....	120
A.3 Suavização por SPLINE .....	120
<b>APÊNDICE B - A ELIPSE DE ERRO DO SISTEMA DE DETECÇÃO .....</b>	<b>123</b>

B.1 Como são obtidas as elipses? .....	123
B.2 Como podemos reconstruir as elipses bidimensionais? .....	125
<b>APÊNDICE C – DADOS FORTRACC .....</b>	<b>129</b>
C.1 Amostra de dados .....	129
C.2 Algoritmo utilizado na extração dos dados .....	129
<b>APÊNDICE D – PROCEDIMENTOS SOBRE AS IMAGENS LANDSAT E</b>	
<b>MODIS .....</b>	<b>131</b>
D.1 Bandas LANDSAT utilizadas na análise .....	131
D.2 Informações sobre as imagens MODIS .....	132



## 1 INTRODUÇÃO

O uso de informações de descargas atmosféricas obtidas através de sistemas de detecção e localização teve início em meados da década de 80. Desde então, estes sistemas foram sendo aprimorados para fornecer, nos dias atuais, a localização das descargas com grande precisão. As informações são obtidas através de redes de sensores distribuídos sobre uma determinada região (PINTO JR., 2005). A qualidade destas informações é normalmente avaliada por critérios de desempenho. No caso do sistema utilizado no Brasil até o momento deste trabalho, este desempenho é avaliado em termos da eficiência de detecção e da precisão de localização (CUMMINS *et al.*, 1998; CUMMINS; MURPHY, 2009).

A eficiência de detecção depende diretamente das condições da rede no momento em que as descargas acontecem: se um número mínimo de sensores não estiver funcionando, a descarga não será detectada. Para superar os problemas inerentes à eficiência do sistema, modelos foram e vêm sendo desenvolvidos para diferentes regiões (RUBINSTEIN, 1995; NACCARATO *et al.*, 2006; NACCARATO *et al.*, 2007; SCHULZ; CUMMINS, 2008; NACCARATO; PINTO JR., 2009). Estes modelos permitem avaliar as variações espaciais e temporais da eficiência. A precisão de localização dos sistemas de detecção é determinada por meio de elipses de segurança, que seguem um modelo teórico-probabilístico (distribuição normal) baseado principalmente na geometria da rede (STANSFIELD, 1947; CUMMINS *et al.*, 1998). Estas informações são usadas nas mais variadas aplicações, inclusive pelo próprio sistema de detecção para o agrupamento de descargas (*strokes*<sup>1</sup>) pertencentes a um mesmo *flash* (CUMMINS *et al.*, 1998). Nesta tese, as informações de precisão serão usadas como um método para a suavização de mapas, adicionando os erros de localização às climatologias. Atualizações e

---

<sup>1</sup> Cada descarga de retorno (1ª e subsequentes) de um relâmpago é tida como um *stroke* para o sistema de detecção. Um *flash* indica o agrupamento das descargas de retorno (*strokes*) em um mesmo relâmpago.

melhorias no cálculo da eficiência também são abordadas neste trabalho, através da versão mais atual do modelo de eficiência relativo (MEDR4), desenvolvido pelo Grupo de Eletricidade Atmosférica (ELAT). Para certas análises, no entanto, a utilização dos critérios de desempenho pode ser insuficiente ou mesmo inviável. Nessas situações, metodologias mais simples podem ser adotadas para tornar as análises baseadas em dados de sistema de detecção mais estáveis e menos dependentes do desempenho do sistema. Essas metodologias também serão abordadas neste trabalho.

Uma das principais aplicações das informações obtidas pelos sistemas de detecção de relâmpagos é a elaboração de mapas de densidade (chamados de forma recorrente de climatologias), que mostram a distribuição espacial dos relâmpagos. Estes mapas são elaborados utilizando-se diferentes métodos. Para o caso dos relâmpagos, que são eventos pontuais, os métodos mais comuns envolvem a análise de padrões espaciais de pontos, principalmente através da técnica de quadratura ou *quadrat* (GATRELL *et al.*, 1996). Mais recentemente vem ganhando espaço também a análise através de *kernel*<sup>2</sup> (AMATULLI *et al.*, 2007; LIU *et al.*, 2010). Independentemente do método utilizado, é importante levar em consideração tanto as limitações dos métodos (DIENDORFER, 2008), como as do próprio sistema de detecção (SCHULTZ *et al.*, 2005). As limitações na precisão de localização são geralmente dominadas por erros aleatórios nas partes internas da rede e por erros sistemáticos nas bordas. No entanto, para o caso do Brasil, onde a rede é composta por sensores híbridos e onde a ocorrência de falhas (*downtimes*) pode ser expressiva, a existência de erros sistemáticos pode ser relativamente grande também na parte interna da rede. Isso implica que, além de se ter uma eficiência de detecção variável e relativamente mais baixa em algumas regiões (o que implica na necessidade de correções por modelos de eficiência), as

---

<sup>2</sup> O *kernel* está associado com a ponderação, pela distância, dos valores em relação a um ponto central (ou núcleo, origem da palavra em inglês). Esta ponderação pode utilizar diferentes tipos de funções matemáticas.

variações na precisão de localização também passam a ser importantes, principalmente na análise espacial.

Os mapas de densidade são amplamente utilizados tanto no meio acadêmico quanto no setor privado. No meio acadêmico, sua principal aplicação se dá no sentido de compreender os fenômenos físicos associados, determinantes (ou não) para a sua ocorrência. Esta compreensão está, no entanto, condicionada à qualidade das informações obtidas pelo sistema de detecção, isto é, se a distribuição espacial é fruto de fenômenos físicos ou se é resultado, de alguma forma, das variações (espaciais e temporais) de desempenho do sistema de detecção. São estes aspectos (de ordem física ou resultado do desempenho do sistema) que serão chamados de singularidades.

No caso do Brasil, algumas das principais “singularidades físicas” já discutidas em trabalhos anteriores remetem, por um lado, à forte atuação das áreas urbanas sobre a formação de tempestades e ocorrência de relâmpagos (NACCARATO *et al.*, 2003; PINTO *et al.*, 2004; PINTO; PINTO, 2008; FARIAS *et al.*, 2009) e, por outro lado, ao controle das montanhas e áreas elevadas sobre a distribuição espacial das descargas (PINTO; PINTO JR, 2003; BOURSCHEIDT *et al.*, 2009). Com relação à ilha de calor urbano de São Paulo, Naccarato *et al.* (2003) desenvolveram a análise mantendo seu enfoque sobre a perspectiva espacial. Já sobre a perspectiva temporal, uma análise da temperatura desta região e seu impacto na ocorrência de relâmpagos é mostrada por Pinto Jr. e Pinto (2008). Trabalhos em diferentes regiões do globo também apontam para os impactos dos elementos anteriormente mencionados na ocorrência de descargas (SCHULZ; DIENDORFER, 1999; WESCOTT, 1995; ORVILLE; HUFFINES, 2001; SORIANO; DE PABLO, 2002; STEIGER *et al.*, 2002).

O objetivo principal deste trabalho é, pois, discutir estas singularidades e promover métodos que incluam ou minimizem os impactos do desempenho do sistema sobre a distribuição espacial das descargas. A análise das singularidades de ordem física se dará pelo aprofundamento dos estudos já realizados, principalmente no que se refere aos efeitos da ilha de calor urbano

de São Paulo (tanto sobre a perspectiva espacial quanto temporal), assim como pela análise complementar dos efeitos do relevo sobre a ocorrência de relâmpagos com base em mapas de alta resolução.

Para tal propósito, o Capítulo 2 traz a base conceitual usada no desenvolvimento do trabalho, tanto no que se refere às questões de desempenho quanto aos elementos físicos já mencionados. No Capítulo 3 são descritos os procedimentos adotados na análise. Estes procedimentos se referem aos avanços realizados no modelo de eficiência utilizado (e desenvolvido) no Brasil, bem como à inclusão da precisão de localização nos mapas de densidade através de um método de suavização adaptado. Além disso, esta seção inclui a descrição de métodos independentes capazes de minimizar os impactos da eficiência de detecção e a metodologia utilizada para a análise das singularidades de ordem física.

No Capítulo 4 são expostos os resultados alcançados, seguidos de suas respectivas discussões e análises. Finalmente, no Capítulo 5, encontram-se as conclusões e as sugestões para trabalhos futuros.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta uma breve discussão sobre os principais aspectos ligados a formação e eletrificação de tempestades, relâmpagos e sistemas de detecção. Estas discussões são baseadas principalmente nos trabalhos de Iribarne e Cho (1980), House Jr. (1994), Naccarato (2002; 2006), Emanuel (1994), Pinto Jr. e Pinto (2000), Cummins *et al.* (1998) e Cummins e Murphy (2009). O capítulo segue ainda com a discussão de aspectos relativos ao desempenho dos sistemas, as técnicas para a geração de climatologias de relâmpagos e a discussão de aspectos físicos envolvidos com a sua distribuição espacial e temporal.

### 2.1. Formação e eletrificação de nuvens de tempestade

Os relâmpagos ocorrem, normalmente, associados a nuvens de tempestade, conhecidas como *Cumulunimbus*, cuja origem está atrelada às condições da atmosfera. Essas condições se referem basicamente à instabilidade (associadas com a termodinâmica atmosférica e explicadas normalmente pela *teoria da parcela*<sup>3</sup>), que leva à convecção de uma determinada parcela de ar, condensação do vapor de água, à formação de gotículas, cristais de gelo, em suma, à formação da nuvem. Tanto a instabilidade quanto a estabilidade dependem basicamente das variações de densidade do ar, que estão atreladas às variações de temperatura. Isto permite afirmar que, quanto maior o gradiente de temperatura junto à superfície (e acima desta), mais intensos tendem a ser os processos convectivos em um dado local e maior a probabilidade de uma tempestade se formar.

Esse gradiente de temperatura pode ser considerado como um forçante ou então como a energia necessária para que a parcela, partindo da superfície, supere a região estável – inibidora de convecção – e atinja o nível de convecção livre. A energia que inibe a convecção é conhecida como Energia

---

<sup>3</sup> A teoria da parcela descreve o movimento vertical e as mudanças de estado de uma parcela de ar, bem definida, inserida na atmosfera.

de Inibição da Convecção ou CINE (do inglês *Convective INhibition Energy*). A energia necessária para superar a CINE pode ter origem na atuação de frentes, em uma cadeia de montanhas (que intensificam as componentes verticais do vento), nas brisas marítimas etc. A necessidade de forçantes está ligada diretamente às condições naturais de estabilidade/instabilidade da atmosfera. Ela normalmente é estável até um determinado nível, de onde passa a ser instável (nível de convecção livre ou LFC - *Level of Free convection*), o que caracteriza a instabilidade condicional. A Figura 2.1 mostra as condições de instabilidade e estabilidade, indicando seus efeitos sobre a convecção.

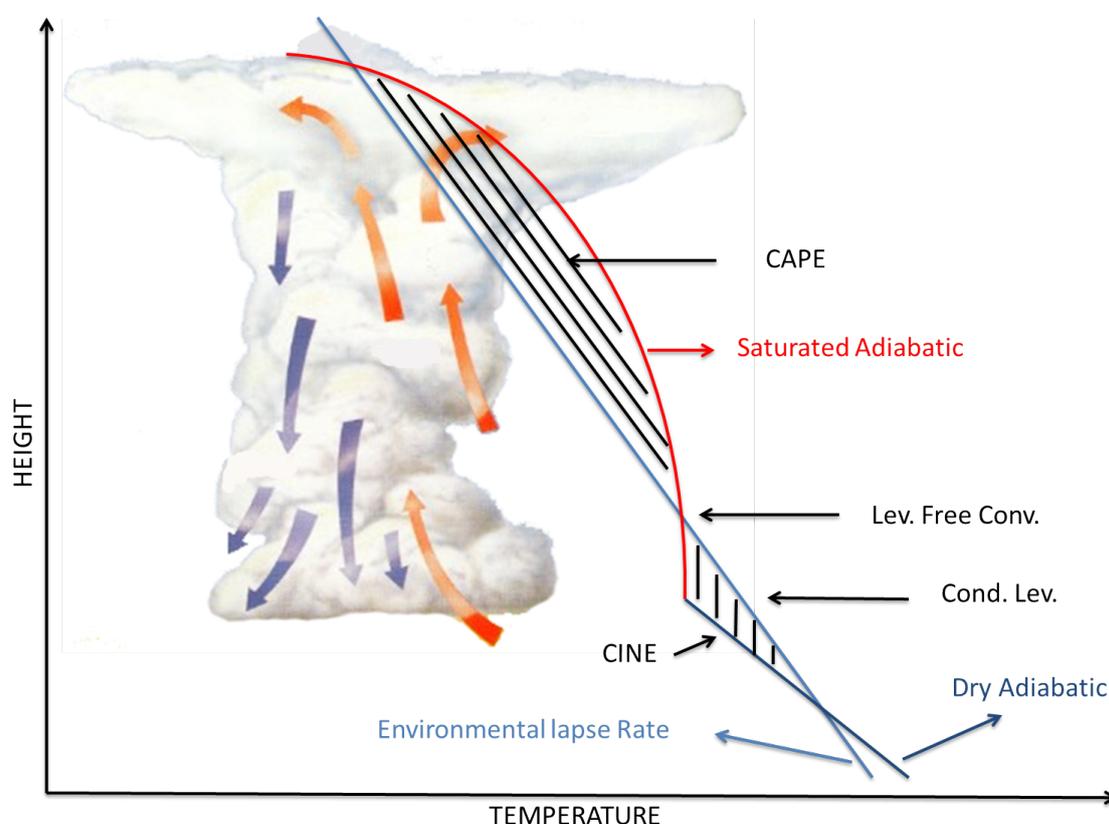


Figura 2.1 – Representação das condições de estabilidade e instabilidade da atmosfera e seus efeitos sobre a formação de nuvens: até o nível de convecção livre (LFC) domina a CINE e a partir deste ponto a CAPE.  
 Fonte: Baseada em Pinto Jr. e Pinto (2000).

A figura mostra também a energia potencial disponível para convecção ou CAPE (do inglês *Convective Available Potential Energy*), que está relacionada com as variações de temperatura – do ar ambiente (*environmental lapse rate* na Figura 2.1) e da parcela – com a altura. As diferentes curvas da parcela de

ar (adiabática seca ou *dry adiabatic* e adiabática saturada ou *saturated adiabatic* na figura) remetem a mudança de estado no nível de condensação (*condensation level*). Quanto maior (e mais positiva) for a diferença entre as temperaturas da atmosfera e da parcela de ar integradas com a altura, maior será a energia disponível para a convecção.

Já foram mencionados os processos termodinâmicos e mecânicos (forçantes) responsáveis pela ascensão de uma dada parcela de ar na atmosfera. Durante a ascensão, esta parcela passa a depender não só das condições de saturação da atmosfera, mas também da existência de gotículas de água e partículas de gelo no processo de formação da nuvem.

Normalmente, a partir do nível de condensação, passa a haver a formação de gotículas de água. Variações do nível de condensação ocorrem dependendo das condições de saturação da atmosfera, da temperatura e da existência de núcleos de condensação. Quando a parcela de ar atinge temperaturas menores (maiores altitudes), passam a existir também cristais de gelo e gotas de água super-resfriadas. A coexistência de ambos delimita a chamada fase mista, que ocorre para temperaturas entre 0°C e -40°C. Como na atmosfera todos os processos ocorrem de forma simultânea, gotículas e cristais de gelo de diferentes tamanhos (e, portanto, com diferentes condições de equilíbrio de supersaturação), núcleos ativos e inativos, aerossóis de tamanhos variados, e outros componentes estão imersos na atmosfera.

Toda esta dinâmica tem um efeito direto sobre a formação (ou não) de nuvens e, conseqüentemente, de tempestades. Efeito este que se dá especialmente sobre o processo de (de)crescimento das partículas imersas neste meio. Quando partículas grandes e pequenas coexistem, a tendência é que ocorra o crescimento das gotas maiores em detrimento das menores, o mesmo ocorrendo para as partículas de gelo (por um processo conhecido como Bergeron-Findeisen). Estes são apenas alguns dos processos envolvidos no crescimento das gotas, os quais estão geralmente associados aos estágios iniciais das nuvens.

À medida que as partículas crescem, outros processos se tornam importantes: a aglutinação e a coalescência, para o caso da fase líquida; o crescimento para a fase mista; a agregação, para o caso da fase sólida. Todos esses processos dependem diretamente dos efeitos da gravidade e de correntes de ar, que, por sua vez, também podem levar à “quebra” das partículas. Dependendo das condições, as gotas de água podem crescer até atingirem tamanho suficiente para precipitarem e as partículas de gelo podem se tornar maiores e serem caracterizadas como granizo. Tudo isso mostra a complexidade e a interatividade dos processos associados à formação das nuvens, que ocorrem de forma simultânea na atmosfera e podem levar, ou não, à ocorrência de tempestades.

Estes mesmos processos também influenciam diretamente na eletrificação das nuvens de tempestade. A já discutida região de fase mista (entre 0°C e -40°C) pode ser considerada como a região onde a maior parte da eletrificação ocorre. A coexistência de gotículas de água super-resfriada e partículas de gelo, bem como o conteúdo de água líquida existente, são essenciais para que ocorra a separação de cargas dentro da nuvem, fazendo parte do assim chamado método não indutivo de separação de cargas. Simulações em laboratório já mostraram que a colisão entre cristais de gelo (formados por deposição do vapor) e grãos de gelo (formados pelo congelamento e incrustação de gotículas de água super-resfriada) faz com que estes últimos adquiram carga negativa, refletindo na maior parte das cargas negativas existentes na nuvem (TAKAHASHI , 1978). Esta colisão, aliada aos processos gravitacionais e convectivos, separa cargas nas nuvens, dando origem à chamada estrutura elétrica das nuvens.

No entanto, uma grande complexidade está envolvida nessa separação de cargas, que, para o já mencionado método não indutivo, depende da temperatura em que a colisão ocorre: pela chamada temperatura de inversão de cargas, que carrega negativamente os grãos de gelo em relação aos cristais de gelo para temperaturas entre -15° e -20°C e positivamente entre -5°C e -10°C. Outra explicação é dada pelo método (colisional) indutivo, que assume

que o campo elétrico atmosférico externo polariza os grãos de gelo presentes na nuvem e, pela colisão destes com os cristais de gelo (e vice-versa, dependendo da atuação das correntes de ar), faz com que os grãos de gelo fiquem carregados negativamente e os cristais de gelo carregados positivamente. A partir daí, a atuação dos processos microfísicos (gravitacional e convectivo), determina a estrutura elétrica da nuvem. Esses processos explicam, por exemplo, a estrutura elétrica básica de uma nuvem de tempestade, com dois centros de cargas principais: cargas positivas no topo e negativas mais próximas à base.

Muitas outras estruturas, no entanto podem ser encontradas nos diferentes trabalhos desenvolvidos, envolvendo também outros aspectos, como por exemplo, a incorporação de cargas através de convecção, descargas corona na superfície, interação com íons de origem cósmica, formação de camadas de blindagem, entre outros. É importante ressaltar que nenhum dos modelos explica a eletrização por si só. O que se sugere é que todos os modelos tenham sua importância, ao seu devido tempo, na eletrificação das nuvens de tempestade. A Figura 2.2 mostra um dos modelos mais recentes, com grande complexidade na estrutura elétrica da nuvem.

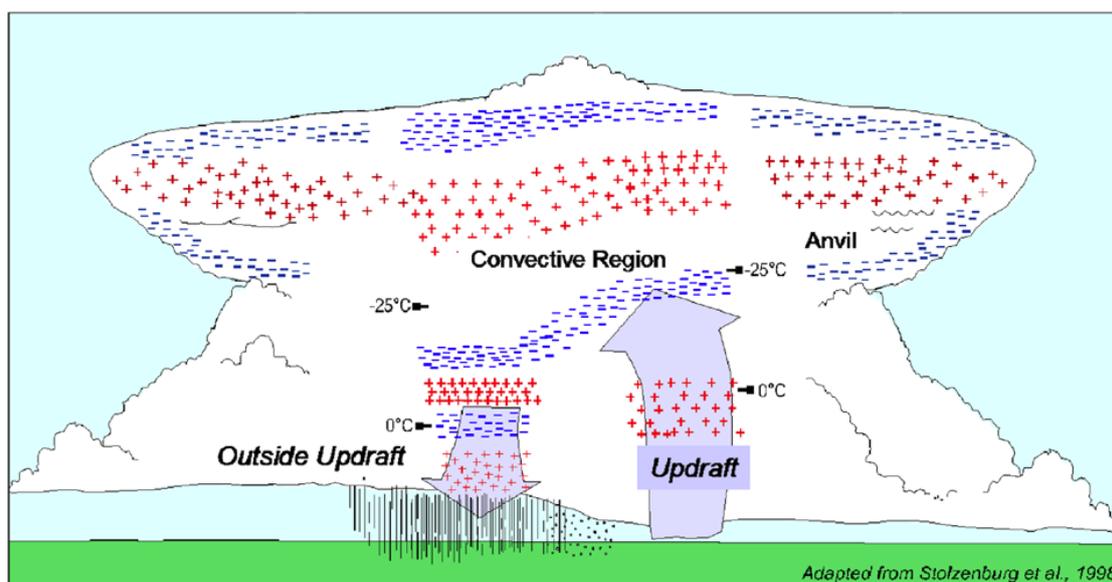


Figura 2.2 – Modelo da estrutura elétrica de uma nuvem de tempestade.  
Fonte: Stolzenburg e Marshall (2008).

## 2.2. Relâmpagos

Sabe-se que a separação e acúmulo de cargas dentro das nuvens de tempestades têm como resultado a ocorrência dos relâmpagos. Existem diferentes classificações para os relâmpagos, que se dão tanto com relação à carga transportada ao longo do canal, que indica a polaridade da descarga, quanto em relação à sua direção de propagação. A Figura 2.3 mostra um resumo dos principais tipos de relâmpagos.

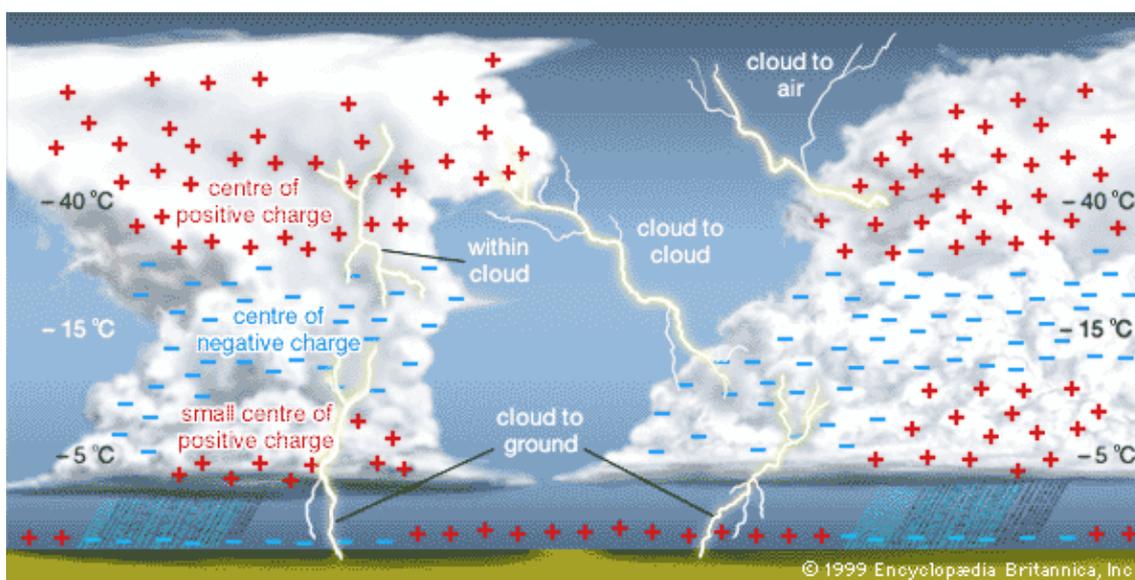


Figura 2.3 – Diferentes tipos de relâmpagos: descarga da nuvem para o ar, relâmpago intranuvem, entre-nuvens e relâmpago nuvem-solo.  
Fonte: Enciclopédia Britânica, Inc (1999).

Desta forma, têm-se relâmpagos que envolvem a nuvem e o solo, conhecidos como relâmpagos nuvem-solo ou NS (positivos ou negativos, segundo a sua polaridade) quando a descarga é transportada da nuvem para o solo; solo-nuvem ou SN (, também positivos ou negativos) quando a carga é transportada do solo para a nuvem; ou ainda bipolares (em alguns casos), quando as duas polaridades ocorrem associadas ao mesmo relâmpago. Outros relâmpagos se restringem à atmosfera, ocorrendo dentro da nuvem (chamados intranuvem ou IN), entre as mesmas (chamados de entre-nuvens ou EN), ou ainda da nuvem para o ar. Os relâmpagos IN são os mais comuns, representando cerca de 70% do total das descargas ocorridas. Estes são seguidos pelos relâmpagos NS que, por sua vez, são normalmente dominados pela polaridade negativa (NS

negativos, com cerca de 90% dos casos), salvo sob condições especiais, envolvendo tempestades severas e/ou Sistemas Convectivos de Mesoescala (SCM), em que o percentual de relâmpagos NS positivos costuma ser maior (VELASCO; FRITSCH, 1987; NACCARATO; PINTO JR, 2009b).

Embora ocorram com menos frequência que os IN, os relâmpagos NS (e, entre estes, especialmente os NS negativos) são os mais estudados possivelmente em função da maior facilidade com que podem ser observados/medidos além, é claro, por seu caráter destrutivo. Este trabalho se concentra sobre a ocorrência dos relâmpagos NS e IN, que são ainda os principais produtos dos sistemas de detecção (descargas IN estão associadas à contaminação nas soluções dadas pelos sistemas de detecção). Primeiramente dar-se-á enfoque aos relâmpagos NS negativos.

Para esses relâmpagos é dito ocorrer, inicialmente, a chamada quebra de rigidez preliminar dentro da nuvem, que normalmente é dita ocorrer entre os centros de carga negativo (principal) e positivo (na base da nuvem). Esta quebra está atrelada à intensidade do campo elétrico, cujas medidas indicam ser da ordem de 400 kV/m para estas regiões. Esse campo, porém, é inferior que costuma ser necessário para a quebra de rigidez do ar. Neste sentido, algumas teorias propõem, por exemplo, o efeito da polarização de gotículas de água e de elétrons de origem cósmica sobre a quebra de rigidez preliminar do ar. A razão de se considerar a região negativa (principal) e o centro de cargas positivas na base da nuvem no processo de quebra de rigidez está associada a dois aspectos: (1) a maior proximidade dos centros de carga nessa região e (2) a maior concentração de gotículas na região baixa da nuvem, facilitando a quebra de rigidez. No entanto, isto não explica o processo para o caso de relâmpagos NS positivos (com sua origem atrelada ao centro de cargas superior da nuvem), que teriam como melhor suporte o efeito de elétrons de origem cósmica. (OGAWA, 1995; PINTO JR.; PINTO, 2000; VALINE; KRIDER, 2002; NACCARATO, 2006).

A partir da quebra de rigidez preliminar e após a neutralização das cargas positivas do pequeno centro na base da nuvem, a descarga continua a se

propagar, tortuosamente, por um canal em direção ao solo, em etapas de 30 a 100 metros, com intervalos de aproximadamente 50 microssegundos. Este é o chamado líder escalonado. Quando esse canal se aproxima do solo, a intensificação do campo elétrico junto deste quebra a rigidez dielétrica, iniciando pequenas descargas ascendentes a partir de objetos ou pontos elevados na superfície (chamadas descargas conectantes) que, quando unidas ao líder escalonado, formam a descarga de retorno. É nesse momento que a carga, acumulada ao longo do canal, é transferida ao solo. Um novo líder pode se propagar pelo mesmo canal já ionizado, chamado líder contínuo, levando a ocorrência de uma nova descarga de retorno, chamada nesse caso de descarga subsequente. As descargas subsequentes indicam a multiplicidade da descarga. Todas as etapas mencionadas ocorrem em intervalos de tempo de centenas de milissegundos até poucos segundos (PINTO JR.; PINTO, 2000; VALINE; KRIDER, 2002; SABA *et al.*, 2006).

Os relâmpagos NS positivos apresentam características relativamente diferenciadas em relação aos relâmpagos NS negativos. As principais diferenças que têm sido apontadas remetem a multiplicidade, que é praticamente única para os relâmpagos positivos e ultrapassa 15 descargas de retorno no caso de relâmpagos negativos. Com relação à ramificação do líder escalonado, tem se observado que ambos os tipos são relativamente ramificados, com os positivos, porém, apresentando luminosidades (intensidades) mais tênues. Também é nestas descargas que é mais observada a ocorrência de altos picos de corrente acompanhados de longa corrente contínua, que é indicada por uma corrente baixa e contínua no intervalo de dezenas a centenas de milissegundos, causando variações de luminosidade no canal, sendo resultado da neutralização de cargas de regiões distintas (mas normalmente próximas) da qual o relâmpago se originou (PINTO JR.; PINTO, 2000; NACCARATO, 2006; SABA *et al.*, 2008; SABA *et al.*, 2010).

Os relâmpagos IN, embora representem a maioria das descargas que ocorrem, eram pouco estudados há alguns anos. Estes relâmpagos são mais frequentes devido à menor distância entre os centros de carga na região onde ocorrem e

também por encontrarem agentes que facilitam a sua ocorrência, como a diminuição da densidade do ar e o aumento da condutividade com a altura, permitindo a quebra de rigidez dielétrica. Seu estudo vem ganhando importância nos últimos anos, especialmente com o desenvolvimento das redes de detecção em VHF (que permitem, por exemplo, mapear o canal dos relâmpagos), e se aplica principalmente sobre a previsão e análise de eventos severos (RAKOV; UMAN, 2003; DEMETRIADES *et al.*, 2004). Sabe-se hoje que os relâmpagos IN, durante as tempestades, correspondem a cerca de 90% do total de relâmpagos (PINTO JR.; PINTO, 2000).

### **2.3. Sistemas de detecção de relâmpagos**

O uso e o desenvolvimento de sistemas de detecção de relâmpagos com base na radiação eletromagnética (RE) é, atualmente, uma das principais ferramentas de análise da distribuição e características das descargas. Esses sistemas se distribuem por todo o planeta, detectando e localizando relâmpagos em diferentes faixas de frequência e com diferentes enfoques.

#### **2.3.1. Radiação emitida por relâmpagos**

A emissão de RE associada aos relâmpagos ocorre sobre todo espectro de radiofrequência, visto que ao longo da formação do relâmpago (desde a quebra de rigidez preliminar até a descarga de retorno), diferentes acelerações são impostas aos elétrons em deslocamento devido às variações no campo elétrico (e na diferença de potencial) e na condutividade nas regiões onde esses processos ocorrem.

Isto porque o relâmpago não é composto de um processo contínuo e estável, mas ocorre em etapas com características distintas. E a amplitude da RE emitida varia em função do processo (etapa) e do comprimento do canal do relâmpago em cada uma dessas etapas. Emissões em VLF e LF, por exemplo, têm seu pico durante a ocorrência da descarga de retorno (maior comprimento do canal), associado às grandes variações de corrente, e onde os intervalos entre as descargas são da ordem de dezenas de milissegundos. Já as

emissões em VHF resultam dos processos iniciais da descarga (pulsos curtos associados à quebra de rigidez preliminar e aos “passos” da descarga, com um canal de pequeno comprimento em cada pulso) e aos processos J e K<sup>4</sup>, que ocorrem em intervalos muito curtos (microsegundos).

### 2.3.2. Sistemas de detecção segundo a frequência

Existe uma relação direta entre a radiação emitida pelos relâmpagos, o modo de propagação dessa radiação, e sua implicação na detecção das descargas. Na faixa de radiofrequência, a propagação se dá de diferentes formas para as diferentes frequências. Um resumo do espectro de frequências relacionadas aos relâmpagos e os sistemas utilizados em cada uma delas é apresentado na Figura 2.4.

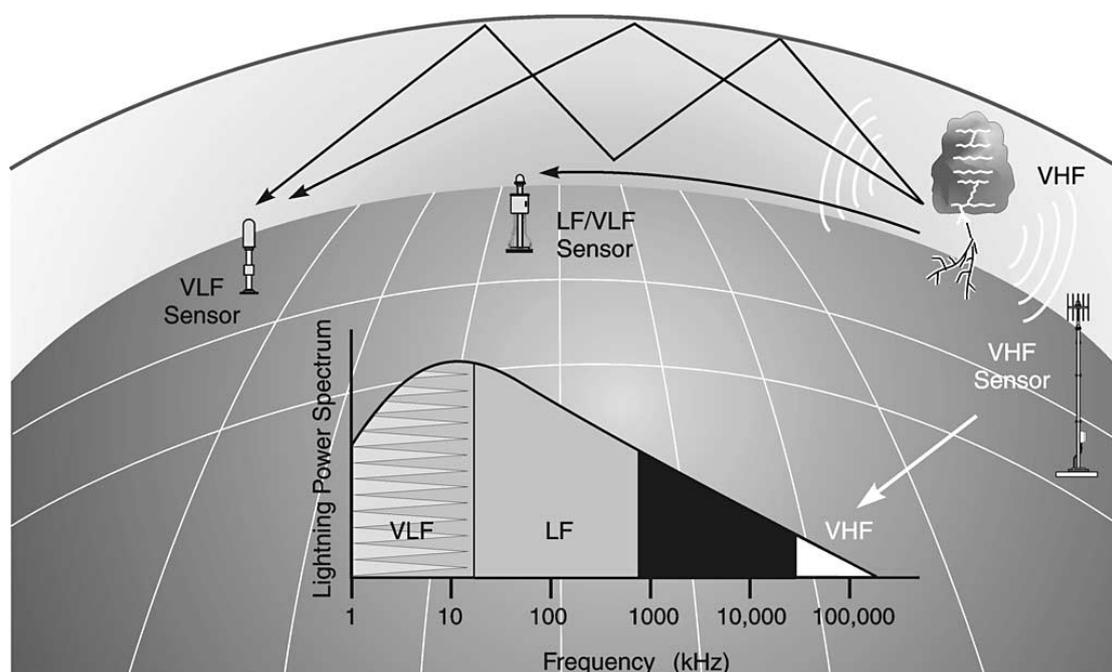


Figura 2.4 - Principais tipos de sistema de detecção segundo a frequência.

Fonte: Cummin e Murphy (2009).

---

<sup>4</sup> Os processos J e K referem-se, respectivamente, a processos que ocorrem no intervalo entre descargas de retorno e também aos chamados *recoil leaders*. Tratam-se de descargas de pequenas proporções que ocorrem dentro ou entre as nuvens. Mais informações em Rakov e Uman (2003).

Sistemas em VLF, com frequências entre poucos hertz e dezenas de quilohertz, como a WWLLN (*World Wide Lightning Location Network*) (JACOBSON *et al.*, 2006) e ZEUS (CHRONIS; ANAGNOSTOU, 2003), são conhecidos por terem uma ampla abrangência, visto que utilizam a propagação da radiação através do guia de onda terra-ionosfera, o que permite a detecção de descargas em nível global. Embora inicialmente estes sistemas fossem usados na detecção aproximada do ponto de contato do relâmpago com o solo (não permitiam a discriminação entre as descargas de retorno de um mesmo relâmpago, por exemplo), as melhorias recentes nesses sistemas têm permitido a detecção de descargas de retorno, com menor eficiência, no entanto, quando comparados aos sistemas LF/VLF (RAKOV; UMAN, 2003; DEMETRIADES *et al.*, 2010).

Sistemas em VLF/LF, com frequências entre poucos quilohertz e algumas centenas de quilohertz, como a rede americana NLDN (CUMMINS *et al.*, 1993; CUMMINS *et al.*, 1998; ORVILLE; HUFFINES, 2001), a rede austríaca ALDIS (SCHULZ, 1997; SCHULZ *et al.*, 2005), e a rede brasileira RINDAT (PINTO JR., 2005; PINTO Jr. *et al.*, 2006; PINTO JR *et al.*, 2007; NACCARATO *et al.*, 2008) oferecem a localização do ponto de contato das descargas com o solo e podem discriminar as descargas de retorno em um mesmo relâmpago. Nessa frequência, a radiação se propaga principalmente através das chamadas ondas de superfície. A propagação da radiação por esse mecanismo se dá a distâncias da ordem de algumas centenas de quilômetros, a partir de onde a atenuação passa a ter grande efeito, não permitindo, portanto, grandes distâncias entre os sensores e limitando a área de cobertura das redes. Isso não permite, por exemplo, uma estatística global eficaz da ocorrência de relâmpagos através desses sistemas.

Sistemas em VHF, que funcionam em frequências entre dezenas de megahertz e centenas de mega-hertz (comprimentos de onda de poucos metros), permitem detectar todo o canal do relâmpago, inclusive de forma tridimensional. Nessa faixa de frequência, a radiação se propaga de forma direta e sofre atenuação facilmente, necessitando de linhas de base muito

pequenas entre os sensores. Os estudos que usam esse tipo de sistema são relativamente recentes e um exemplo dessa tecnologia pode ser encontrado nos EUA, através da rede LDAR (*Lightning Detection and Ranging*) (WILLIAMS *et al.*, 1999; LOJOU; CUMMINS, 2006).

A atenuação da radiação ao se propagar é de grande importância na interpretação das características dos relâmpagos. Os picos associados à descarga de retorno, dependendo da frequência (e do modo de propagação), podem sofrer alterações de forma a tornar sua interpretação equivocada. Para sistemas em LF, por exemplo, nos quais a atenuação se dá sobre a forma de onda (aumento do tempo de subida e da largura de pulso), a atenuação pode fazer com que uma descarga seja confundida com um pulso refletido na ionosfera e não seja detectada pelos sistemas. Consequentemente, a interpretação das características físicas torna-se impossível a grandes distâncias, restando apenas a possibilidade de se obter uma localização aproximada da descarga.

### **2.3.3. Métodos de localização de relâmpagos**

A localização das descargas para sistemas na faixa de LF/VLF<sup>5</sup> pode ser feita através do método da direção magnética (MDF ou *magnetic direction finder*), do tempo de chegada (TOA, sobre o campo elétrico) e ainda do método combinado TOA+MDF, chamado de IMPACT (*IMProved Accuracy from Combined Technology*). Esses métodos, com funções específicas e algoritmos interativos, determinam a posição (latitude e longitude) e a hora de ocorrência das descargas. Todos esses métodos serão descritos de forma mais detalhada ao longo desta seção.

O método da direção magnética (MDF) se baseia na detecção da componente magnética da RE. Trata-se de um sistema com duas bobinas cruzadas, onde cada bobina detecta as variações da componente magnética (horizontal), de

---

<sup>5</sup> Os métodos de localização podem variar segundo o sistema utilizado. Será focado neste trabalho apenas o caso dos sistemas LF/VLF.

forma que a razão das amplitudes indique o azimute, isto é, a direção da descarga. A detecção assume que a descarga de retorno ocorre de forma vertical. Dependendo da polaridade da descarga, duas direções podem ser obtidas (ambiguidade de  $180^\circ$ ). Essa ambiguidade é resolvida normalmente pela análise do campo elétrico (SCHULZ 1997; CUMMINS *et al.*, 1998).

Com dois sensores, pode-se determinar a posição da descarga, através da interseção das diferentes direções obtidas para cada sensor. Entretanto, existem situações nas quais a descarga pode ocorrer na mesma linha de base dos dois sensores, sendo impossível gerar uma solução para a sua localização usando apenas dois sensores. Devido a essa situação, um mínimo de três sensores é usado na geração das soluções. O uso de três ou mais sensores ainda permite um processo de otimização, minimizando os erros dos ângulos (azimutes obtidos para cada sensor) (CUMMINS; BURNETT 1993; CUMMINS *et al.*, 1998; NACCARATO, 2006). Esse processo usa um algoritmo de mínimos quadrados e indica a localização otimizada da descarga, conforme é exibido na Figura 2.5.

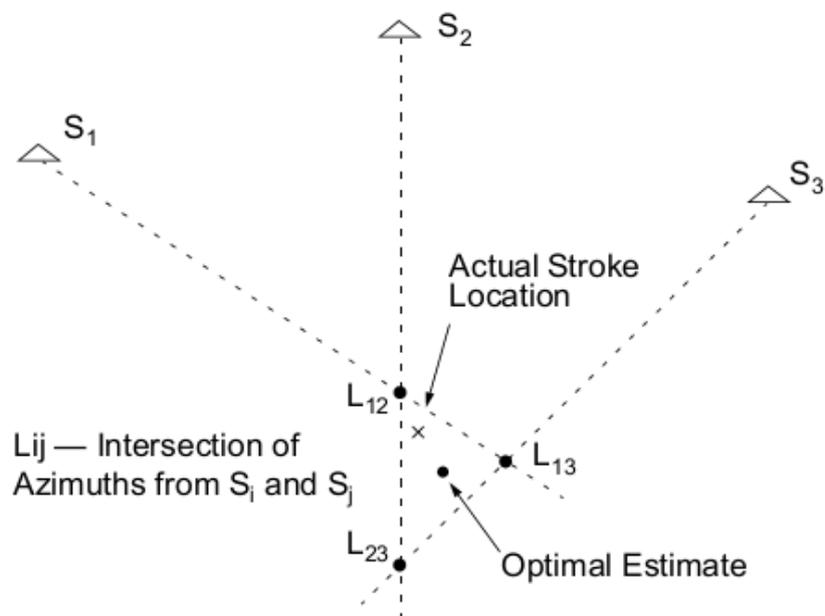


Figura 2.5 - Algoritmo de localização otimizada usado no método MDF.

Fonte: Cummins e Burnett (1993).

O método TOA (do inglês *Time-Of-Arrival*) usa a diferença dos tempos de chegada do sinal (pico de RE) a cada sensor. Trata-se do método utilizado pela maioria dos sistemas de detecção de relâmpagos que existem atualmente (JACOBSON *et al.*, 2006; CHRONIS; ANAGNOSTOU, 2003; CUMMINS; BURNETT, 1993; LOJOU; CUMMINS, 2006). A localização da descarga pode se dar tanto por meio de intersecções hiperbólicas quanto de intersecções circulares.

A localização através de intersecções hiperbólicas é descrita em trabalhos como os de Lewis *et. al.* (1960), Proctor (1971) e Cummins e Burnett (1993). Ela é obtida pela diferença temporal relativa entre os horários de chegada registrados pelos vários sensores. Cada par de sensores define uma hipérbole para as possíveis localizações da fonte de radiação (ponto de contato da descarga com o solo, no caso de relâmpagos nuvem-solo), obtida pela diferença de tempo entre os picos de radiação medidos em cada sensor (CUMMINS; MURPHY, 2000). O uso de três sensores define três hipérboles, cujas intersecções dão a localização da descarga. Apesar de três sensores/três hipérboles serem suficientes para permitir essa localização, resultados ambíguos ainda podem ocorrer para esta situação, o que é resolvido com o uso de, pelo menos, quatro sensores na obtenção da localização (KOSHAK; SOLAKIEWICZ, 1996).

Já a localização através das intersecções circulares leva em consideração a diferença absoluta de tempo de chegada do sinal em cada sensor. Esse tempo absoluto pode ser obtido medindo-se precisamente o tempo de chegada do sinal em cada sensor e, através de um método iterativo, encontrar círculos que, quando interseccionados, dão a localização da descarga. As soluções através desse método iterativo podem se tornar demoradas se a posição inicial para o início do processo iterativo for inapropriada. Para este caso, pode se usar o tempo estimado através das intersecções hiperbólicas. A determinação da posição através das intersecções hiperbólicas e as ambiguidades podem ser vistas na Figura 2.6.

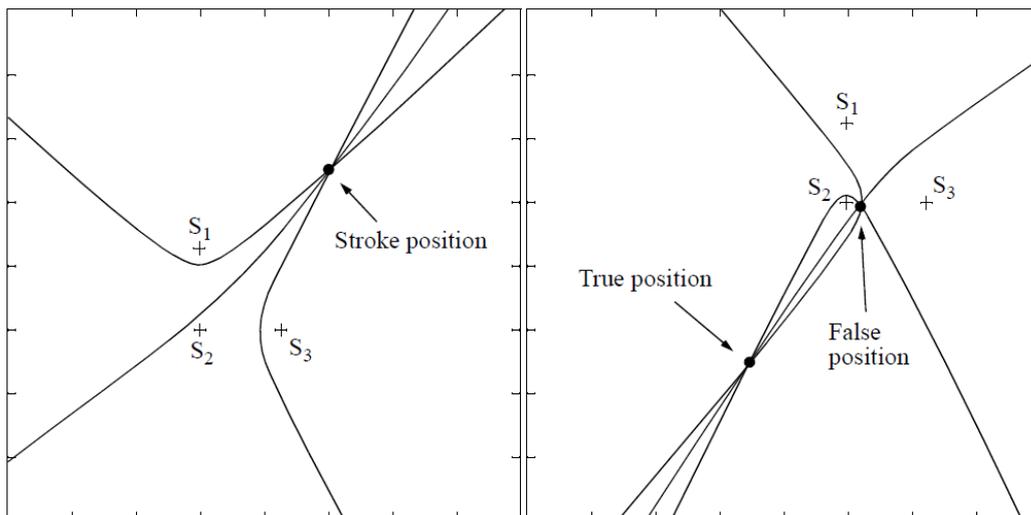


Figura 2.6 - a) Método de interseção hiperbólica para sistemas de localização utilizando três sensores; b) Ambiguidade resultante da interseção hiperbólica a partir de três sensores.  
 Fonte: Cummins e Burnett (1993).

O método integrado é conhecido como Método da Melhoria de Precisão através da Tecnologia Combinada ou IMPACT. A tecnologia IMPACT nada mais é do que a integração dos métodos MDF e TOA em um único sistema. Neste, o método MDF fornece a informação do ângulo de azimuth enquanto o método TOA fornece a informação da distância em relação ao sensor. Uma ilustração desse método é mostrada na Figura 2.7.

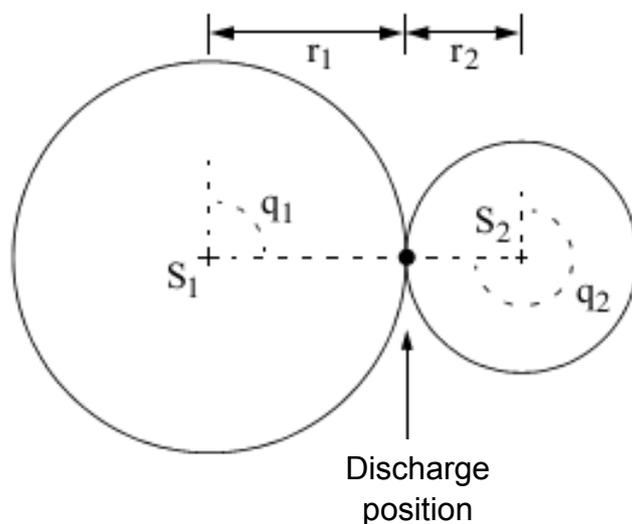


Figura 2.7 – Método de localização IMPACT, mostrando os dois azimutes ( $\theta_1$  e  $\theta_2$ ) calculados pelo método MDF e os dois raios ( $r_1$  e  $r_2$ ) obtidos a partir do método TOA.  
 Fonte: Adaptado de Naccarato (2006).

Com a combinação dos métodos, mesmo em uma condição de detecção mínima (i.e., quando a descarga é detectada por apenas dois sensores, conforme a Figura 2.7), o número de medidas – dois ângulos e dois tempos de chegada – será maior do que o número de parâmetros a serem estimados – latitude, longitude e tempo de ocorrência da descarga. Isto permite uma redundância de informações e, portanto, uma otimização da localização da descarga (CUMMINS *et al.*, 1993).

Com as informações obtidas, seja pelo método MDF, TOA ou pelo método integrado IMPACT, é possível obter esta localização otimizada da descarga com o uso de algoritmos iterativos. Utilizaremos o exemplo do método IMPACT<sup>6</sup>. A otimização é feita levando em consideração um método de mínimos quadrados, normalizado pelos graus de liberdade ( $x$ ) associados à estimativa e dependente das estimativas de erros angulares ( $\theta$ ) e de tempo ( $t$ ) associados a cada sensor ( $j$ ), dados em termos de desvio padrão ( $\sigma$ ) (RAKOV; UMAN, 2003; NACCARATO, 2006):

$$\chi^2 = \left( \sum_{j=1}^N \frac{(\theta_j - \theta_j^*)^2}{\sigma_{\theta}^2} + \sum_{j=1}^n \frac{(t_j - t_j^*)^2}{\sigma_t^2} \right) \cdot x^{-1} \quad (2.1)$$

#### 2.4. Rede integrada nacional de detecção de descargas atmosféricas

A Rede Integrada Nacional de Detecção de Descargas Atmosféricas ou RINDAT é composta, até o momento deste trabalho, por sensores comerciais do tipo LPATS (TOA), IMPACT (TOA+MDF) e LS7000 (TOA+MDF)<sup>7</sup>. Ela é resultado de um consórcio entre instituições e empresas, visando à máxima abrangência para monitoramento da atividade de relâmpagos, com diferentes finalidades. As soluções necessitam de ao menos quatro sensores (quatro

---

<sup>6</sup> A otimização poderia, opcionalmente, levar em conta apenas o método MDF e a otimização através dos ângulos, ou então o método TOA, considerando os tempos de chegada. Otimizações utilizando a amplitude do sinal detectado também podem ser feitas.

<sup>7</sup> Maiores informações podem ainda ser obtidas no site da fabricante: <http://www.vaisala.com>

tempos) quando geradas por redes LPATS e de ao menos dois sensores (dois tempos e dois ângulos) quando geradas em redes IMPACT e LS7000, e a coexistência de diferentes tecnologias de localização caracteriza a RINDAT como uma rede híbrida. O fato de a rede contar com tecnologias que envolvem diferentes métodos de localização afeta diretamente a sua eficiência de detecção (NACCARATO, 2006; PINTO JR. *et al.*, 2006).

A Tabela 2.1 apresenta um resumo das variações da rede ao longo dos anos por quantidade e tipos de tecnologias existentes. É possível observar a evolução da rede em termos da quantidade de sensores até 2007 e da sensibilidade (com as novas tecnologias) a partir do referido ano. As variações no número de sensores têm implicação direta sobre a área de abrangência da rede, que foi significativamente reduzida em 2009 e 2010 devido à desativação de sensores nas partes ao Norte e ao Sul do país.

Tabela 2.1 – Variações da RINDAT ao longo dos anos (por quantidade de sensores e de tecnologia utilizada).

ANO	IMPACT	LPATS	LS7000	LS8000	TOTAL
1999	5	17			22
2003	8	17			25
2005	18	27			45
2007	16	27	2		45
2008	16	27	2	2	47
2009	11	17	2	2	32
2010	11	16	2	3	32
2011	10	16	7	4	37
2012	10	15	9	5	39

Fonte: Naccarato e Pinto Jr. (2012)

Essas variações, no entanto, não apresentam grande impacto sobre a análise realizada, que mantém seu enfoque sobre as regiões nas quais a cobertura permaneceu relativamente estável ao longo de todos os anos (Paraná e Sudeste em geral. Maiores informações podem ser encontradas no Capítulo 3, Seção 3.1). A Figura 2.8 mostra o estado RINDAT para o período entre

2008/2009. Ela chegou a apresentar 47 sensores espalhados pelas regiões Sul, Sudeste, Centro-Oeste e parte das regiões Norte e Nordeste.

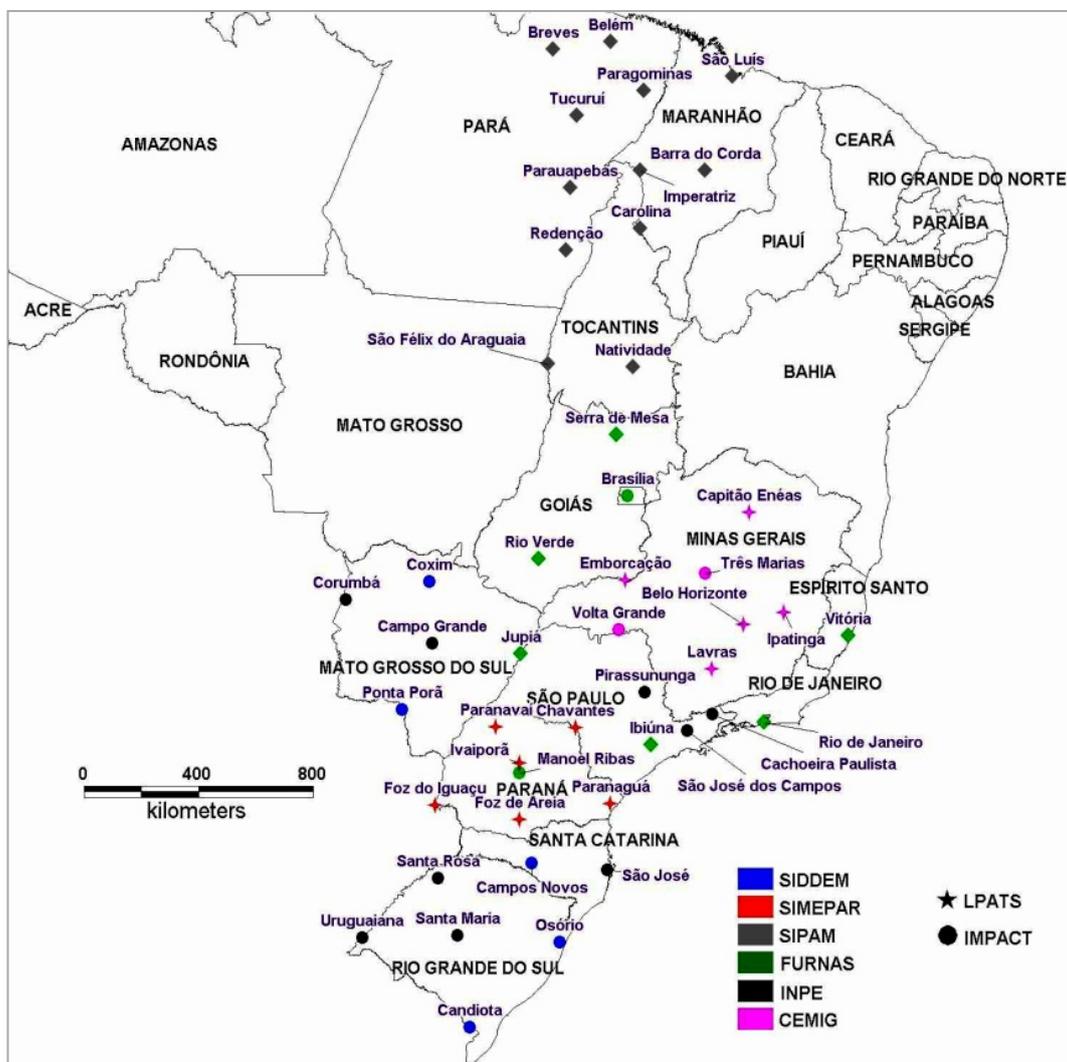


Figura 2.8– Distribuição dos sensores da RINDAT (no período 2008-2009), com a localização dos diferentes tipos de sensores e instituições/empresas participantes do consórcio.

Para o trabalho, a configuração média inclui a maior parte dos sensores, desconsiderando-se apenas os sensores do SIPAM, ao Norte, que funcionaram integrados à rede apenas por um curto período (2007-2008). Destaca-se que os sensores do tipo IMPACT de Cachoeira Paulista e São José dos Campos foram substituídos definitivamente em 2008 por sensores LS7000. Estes, com maior sensibilidade e tecnologia avançada, estão substituindo os mais antigos gradativamente.

As seções a seguir refere-se aos principais parâmetros fornecidos pelo sistema de detecção utilizado no Brasil (Seção 2.4.1), à forma como os dados são gerados e/ou reprocessados (Seção 2.4.2) e ainda aos critérios de desempenhos utilizados por este tipo de sistema (Seção 2.4.3).

## **2.4.1. Parâmetros fornecidos pela RINDAT**

### **2.4.1.1. Parâmetros físicos**

Os sistemas de detecção na faixa de LF em operação hoje, a exemplo da rede brasileira RINDAT, permitem que sejam obtidos diferentes parâmetros físicos referentes às descargas, a constar (NACCARATO, 2006):

- Pico de corrente (e polaridade) das descargas: estimado com base no campo elétrico e/ou magnético irradiado pela descarga. Assume, através do chamado Modelo de Linha de Transmissão, uma proporcionalidade entre o pico do campo elétrico e o pico de corrente, dependendo ainda da distância e de efeitos de propagação.
- Multiplicidade: como os sistemas em LF permitem discriminar as descargas de retorno (e subsequentes) dos relâmpagos, é possível determinar a multiplicidade dos relâmpagos – através de um algoritmo de agrupamento e levando-se em consideração tempo, distância e precisão de localização (a ser discutida mais adiante). Ressalta-se que os valores de multiplicidade obtidos pelos sistemas de detecção tendem a subestimar os valores reais, devido ao fato de as descargas subsequentes serem, em geral, menos intensas que a primeira descarga de retorno e, portanto, mais facilmente perdidas pelo sistema (RAKOV; UMAN, 2003, NAG *et al.* 2008).
- Tempo de subida e largura de pulso: são parâmetros associados à forma de onda que chega aos sensores e que, no caso de redes LF, servem para diferenciar relâmpagos NS de relâmpagos IN (os critérios de diferenciação levam em conta, por exemplo, a largura de pulso: valores pequenos desse parâmetro costumam estar associados a

descargas IN). Tais parâmetros podem também ser usados no sentido de avaliar a atenuação do sinal que chega aos sensores e, conseqüentemente, a estimativa do pico de corrente. Ressalta-se que estes critérios vêm sendo aprimorados com o passar dos anos para melhor discriminar as descargas.

#### **2.4.1.2. Parâmetros de desempenho**

As soluções dadas pelo sistema de detecção também oferecem parâmetros obtidos durante o processamento das informações referentes a cada sensor, na chamada central de processamento<sup>8</sup>. Estas informações se referem basicamente ao desempenho do sistema no que concerne à detecção e localização das descargas, e são discriminadas a seguir:

- Semieixos e ângulo da elipse: a elipse de confiança, a ser discutida adiante, está relacionada aos erros (de tempo e de ângulo) associados à precisão de localização da descarga. O tamanho da elipse dependerá da geometria da rede e da distância da descarga em relação aos sensores participantes;
- Qui-Quadrado: os valores de qui-quadrado resultam das equações de otimização, sendo que, quanto menor seu valor, maior a coerência entre as medidas de cada sensor participante da solução;
- Graus de liberdade: associados ao número de sensores participantes nas soluções. É usado diretamente no processo de otimização (já mencionado);

#### **2.4.2. Central de processamento e reprocessamento de dados**

Esta seção resume alguns aspectos relativos à central de processamento discutidos no trabalho de Naccarato (2006) e aborda as características dos aplicativos para a geração das soluções da RINDAT. As soluções geradas pela

---

<sup>8</sup> É através da central de processamento que todas as informações são geradas, usando-se, para tal finalidade, diferentes algoritmos, cujas especificações podem ser encontradas no trabalho de Naccarato (2006).

rede são processadas por um pacote de softwares. Um dos módulos integrados a esses pacotes é o LP2000, que concentra a maior parte das informações finais fornecidas aos usuários: data, horário, longitude, latitude, pico de corrente, semieixos da elipse, graus de liberdade, tempo de subida e largura de pulso. Este módulo pode ser considerado como o centro do processamento, o qual pode ser feito tanto em tempo real quanto através de reproprocessamento. As soluções em tempo real podem ser afetadas por atrasos da informação dos sensores, o que faz com que algumas soluções não sejam calculadas. Com o reproprocessamento não existe perda de informação, de forma que as soluções assim calculadas tendem a apresentar maior precisão (mais sensores podem participar das soluções), além de aumentar entre 15-20% o número de descargas detectadas (NACCARATO, 2001).

O módulo LP2000 permite a configuração de diversos parâmetros, separados em três módulos: (1) os critérios de discriminação de relâmpagos IN, o modelo de propagação da RE, precisão de localização inicial da descarga e métodos de otimização etc. no módulo `locate.cfg`; (2) os critérios de qualidade e seleção dos dados, configuração dos sensores etc. no módulo `APAconfig`; e (3) os critérios para o cálculo da multiplicidade (tempo total, raio de abrangência, máximo de *strokes*, raio de agrupamento, etc.) no módulo `fcalc.cfg`. Um dos aspectos mais interessantes do aplicativo `APAconfig` é a interação com o usuário por meio de uma interface gráfica. Por estar ligado diretamente ao núcleo de processamento e aos sensores, tal aplicativo permite criar diferentes cenários de configuração da rede em um arquivo específico, permitindo aplicar diferentes configurações, segundo a necessidade do usuário. Como exemplo, diferentes combinações de sensores (inclusive com a remoção de sensores na geração das soluções) podem ser separadas em cenários distintos, possibilitando a análise da importância de cada sensor sobre as soluções da rede, e a avaliação das variações dessas soluções para os diferentes cenários.

### **2.4.3. Desempenho do sistema de detecção**

Os sistemas de detecção de relâmpagos em LF dependem de vários aspectos para que soluções (i.e., a determinação da localização, pico de corrente e

multiplicidade) sejam dadas de forma satisfatória. Entre esses aspectos encontram-se, por exemplo, a distância da descarga até os sensores. Essa distância deve ser próxima o suficiente para que o limiar de ativação dos sensores seja ultrapassado e, ao mesmo tempo, grande o suficiente para evitar a saturação do sinal que chega até os sensores. Dessa forma, o pico de radiação poderá ser detectado, o que, possivelmente, permitirá a determinação da localização e de outras informações relativas à descarga. Este aspecto, bem como outros, precisam ser quantificados de forma a oferecer uma análise de desempenho do sistema e, futuramente, serem usados para corrigir eventuais falhas. Cummins *et al.* (1998) assumem dois parâmetros na análise de desempenho dos sistemas de detecção: a eficiência de detecção (ED) e a precisão de localização (PL). Ambos os parâmetros são analisados através de modelos que serão destacados mais a frente.

#### **2.4.3.1. Eficiência de detecção**

Conforme destacado por Nacarrato (2006) para os sensores da RINDAT, cada sensor necessita superar o valor de pico de radiação mínimo (*threshold*) e sua forma de onda deve satisfazer os critérios básicos (tempo de subida, largura de pulso, múltiplos picos, padrão bipolar). Além disso, ainda deve ser possível correlacionar as informações entre os diferentes sensores. Caso não seja possível superar esses critérios, a descarga não poderá ser localizada.

Com base nisso, podem se destacar os principais fatores que afetam a eficiência de detecção: a eficiência de detecção individual de cada sensor, relacionada aos critérios já mencionados e que dependem do pico de corrente e da distância da descarga em relação ao sensor; o número de sensores participantes da solução, que podem variar por falhas e atrasos na comunicação; as linhas de base da rede, indicativa da distância entre os sensores, que deve ser tal que o menor número de descargas (de baixa amplitude) seja perdido; e, ainda, a distribuição das correntes de pico das descargas (a eficiência individual de cada sensor está relacionada às características morfológicas da tempestade e sua posição geográfica em relação à rede).

Dessa forma, a eficiência de detecção é a capacidade da rede de detectar descargas. Esta eficiência é dada como o percentual do número total de descargas ocorridas e pode ser dada em termos de eficiência de detecção de *flashes*<sup>9</sup> ou de *strokes*<sup>10</sup>. A eficiência de detecção de *strokes* será sempre menor ou igual à eficiência de detecção de *flashes*. Isso porque um flash é dito existir se ao menos um *stroke* for detectado e, normalmente, nem todos os *strokes* de um mesmo *flash* são detectados. Como exemplo podem ser mencionadas as eficiências de detecção obtidas para a RINDAT na região do Vale do Paraíba (BALLAROTTI *et al.*, 2006): 87,4% para *flashes* e 54,7% para *strokes*. Salienta-se que os valores obtidos dependem de vários aspectos, podendo variar segundo o tipo de sensor, da linha de base, da geometria da rede, entre outros.

#### **2.4.3.2. Modelos de eficiência de detecção**

Existem diferentes formas de se determinar a ED para os sistemas de detecção em VLF/LF:

- Observacional, através de medidas diretas das descargas que aconteceram em relação às detectadas pelo sistema. A dificuldade, nesse caso, está em assumir valores para a rede como um todo, já que, muitas vezes, existe uma interdependência de vários fatores (tipo de sensor, caminho de propagação etc.), que são variáveis no tempo e espaço;
- Modelo de eficiência absoluto, através de um conjunto de equações teóricas que assumem condições físicas simplificadas e condições de contorno específicas (com base, por exemplo, no Modelo de Linha de transmissão), buscando aproximar o modelo às condições reais de ED. As simplificações muitas vezes acabam por não considerar variações

---

<sup>9</sup> Reflete a eficiência de que ao menos uma descarga de retorno seja detectada pelo sistema, identificando um *flash*.

<sup>10</sup> A eficiência de detecção de *strokes* reflete a capacidade da rede em detectar todos os *strokes* de um mesmo flash.

espaciais e temporais das condições físicas básicas do modelo, como, por exemplo, a condutividade, que afeta diretamente a propagação e é altamente variável no espaço (tipo de solo) e no tempo (ocorrência de precipitação).

- Modelo de eficiência relativa, baseado na própria rede, considerando a razão das descargas obtidas por um determinado sensor sobre as obtidas pela rede como um todo. Normalmente, são obtidas curvas de eficiência (em função do pico de corrente e da distância) para cada sensor e estas curvas são usadas nos cálculos das “probabilidades totais”.

Um modelo teórico a ser destacado é o apresentado por Cummins *et al.* (1998), onde uma grade é usada para calcular a eficiência de detecção. Picos de corrente específicos são gerados para cada célula da grade e, usando um modelo de propagação, são calculadas as intensidades de sinal que devem chegar a um determinado local (um sensor, a priori). É este sinal que irá refletir a eficiência de detecção para cada sensor<sup>11</sup>. Essas eficiências são calculadas para todas as combinações possíveis dos sensores (assumindo as EDs de cada sensor como independentes), o que fornece uma probabilidade integrada de detecção, por faixas de pico de corrente, para toda uma área. Existem ainda outros modelos teóricos que consideram outros aspectos, com destaque para os de Schulz e Cummins (2008) e Rubinstein (1995).

Além do modelo supracitado, pode-se mencionar o modelo de detecção relativo aplicado recentemente à RINDAT, descrito por Naccarato e Pinto Jr. (2009a), e que leva em conta a eficiência relativa de cada sensor. O cálculo da eficiência, nesse caso, foi feito em função do pico de corrente e da distância. O modelo também inclui a distinção dos métodos de localização dos diferentes tipos de sensores (soluções com quatro (TOA) e dois (IMPACT) sensores), já que a

---

<sup>11</sup> No caso do trabalho de Cummins *et al.* (1998), o sinal recebido era comparado à uma tabela com as informações de associação entre o sinal recebido e a respectivo percentual de eficiência, que ia de 0 para o limiar de ativação até um máximo, inferior a 1, para sinais 2-3 vezes superiores ao do limiar de ativação.

rede brasileira é híbrida. Além disso, tal modelo permite avaliar a eficiência de acordo com diferentes intervalos de tempo (ano, mês, dia), o que demanda cautela para que a quantidade de dados em cada intervalo não seja muito pequena, o que poderia afetar as estatísticas no cálculo da eficiência relativa de cada sensor. O modelo foi desenvolvido sobre uma função recursiva – assumindo que a eficiência de cada sensor é independente –, tal como descrita por Schulz e Cummins (2008) e Rubinstein (1995), e usa um fator (de valor 1.6) para chegar à eficiência de detecção de *flashes*, partindo da eficiência de *strokes*. Um fluxograma que resume o funcionamento do modelo pode ser visto no Apêndice A.1. Mais comentários sobre o modelo serão feitos no capítulo seguinte.

#### **2.4.3.3. Precisão de localização**

Seguindo na análise de desempenho, o segundo parâmetro mencionado no início da seção refere-se à precisão de localização. Para a RINDAT, ela é determinada pela medida dos semieixos, pela excentricidade e pela orientação das elipses de segurança. Essas elipses assumem uma distribuição gaussiana (normal) bivariada dos erros, obtidos pelos desvios padrões médios dos tempos e dos ângulos (azimutes) das descargas, com dependência ainda da geometria da rede e da distância da descarga em relação aos sensores (STANSFIELD, 1947). Além disso, o ponto mais provável (centro da elipse) é obtido por um processo de otimização, como o descrito anteriormente (Equação 2.1). Por padrão, uma elipse de segurança com 50% de probabilidade de englobar a descarga é utilizada (CUMMINS *et al.* 1998). Maiores detalhes de como as elipses são obtidas podem ser vistos no Apêndice B.

Os principais aspectos que afetam a precisão de localização, segundo Schulz (1997) e Schulz e Diendorfer (1996), são: (1) o desvio padrão médio das medidas angulares e temporais das descargas registradas, sendo esse desvio oriundo de erros sistemáticos e aleatórios na detecção e na localização; (2) o número de sensores que participam nas soluções (o que está associado diretamente à eficiência de detecção); e (3) a localização dos sensores em

relação à posição da descarga. Destaca-se, ainda, que estes dois últimos aspectos estão ligados diretamente à geometria da rede.

Se a configuração de uma determinada rede permanece constante, os erros tendem a crescer em direção às suas bordas e as menores elipses tendem a se concentrar na parte central, como pontua o trabalho de Schulz (1997). Esse efeito pode ser visto na Figura 2.9, que mostra como os erros aumentam, em função da distância, para as bordas da rede. Tal efeito também é ressaltado por Diendorfer *et al.* (2007), que ainda sugerem que esses erros são basicamente de ordem sistemática.

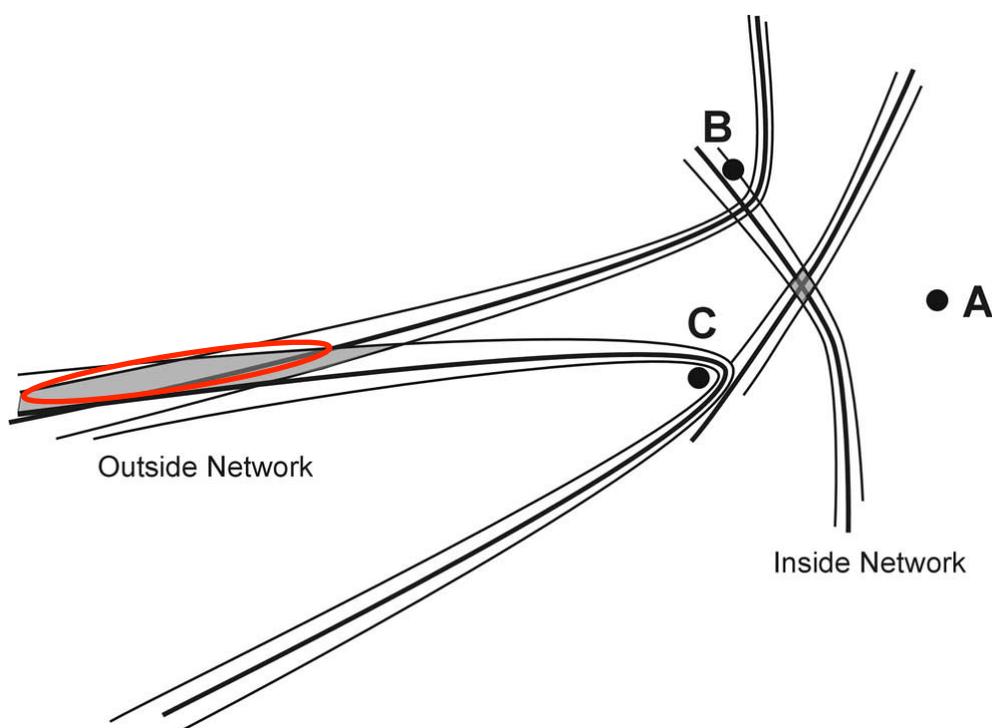


Figura 2.9 – Variação do erro na localização em função da distância e da geometria da rede. Elipse vermelha indica erros maiores fora da rede.  
Fonte: Adaptado de Cummins e Murphy (2009).

#### 2.4.3.4. Contaminação por descargas intranuvem

Outro aspecto que pode ser atrelado ao desempenho do sistema refere-se à contaminação das soluções dadas pelo sistema de detecção por descargas intranuvem (já que o principal produto da RINDAT são as descargas NS). A filtragem dos relâmpagos para picos de corrente fracos normalmente é associada à remoção dessas descargas. Biagi *et al.* (2007) apontam em seu

trabalho que aproximadamente 90% das descargas NS positivas abaixo de 10 kA são produzidas, na verdade, por descargas intranuvem. Como os sistemas de detecção estão sempre passando por atualizações – principalmente pelo aumento da sua sensibilidade (menos ruído e menor limiar de ativação) e/ou pela mudança de tecnologia de localização (LPATS para IMPACT no caso da RINDAT, por exemplo) – essas melhorias implicam na detecção de descargas mais fracas e, conseqüentemente, numa maior contaminação por descargas intranuvem. Logo, pressupõe-se que, com a melhoria da rede, um número maior de descargas de baixa intensidade seja detectado e que ocorra também uma crescente contaminação por descargas intranuvem (BIAGI *et al.*, 2007; NACCARATO *et al.*, 2008; CUMMINS; MURPHY, 2009). Essas variações, por sua vez, precisam ser consideradas nas diferentes análises, especialmente para o caso de análises temporais.

## **2.5. Dias de tempestade e o desempenho do sistema**

Embora o modelo de eficiência utilizado no Brasil possibilite a correção dos efeitos de desempenho, limitações ainda existem principalmente para a análise temporal, já que a eficiência calculada é relativa (determinada com base em certas condições de contorno – espaciais e temporais – sobre os dados do próprio sistema). As variações de eficiência ao longo do tempo, por exemplo, estão limitadas pelos intervalos utilizados no modelo. Nesse sentido, mudanças na rede para diferentes períodos podem não ser consideradas. Além disso, todo o processo demanda um tempo considerável. Diendofer *et al.* (2007) sugerem métodos baseados nas distribuições dos picos de corrente para realizar as correções para redes (que tenham se tornado) diferentes, determinando um fator de escala constante que pode ser usado para recuperar valores reais de eficiência. No entanto, esse cálculo (pela obtenção das distribuições de probabilidade) também ser complicado de se realizar.

Tendo em vista as dificuldades inerentes a este processo, outros procedimentos para superar as variações de desempenho do sistema nas análises espaciais e temporais podem ser considerados, sendo estes independentes do cálculo da eficiência de detecção. Esses procedimentos

incluem a análise através de Dias de Tempestade (DTs) e Horas de Tempestade (HTs) com base em dados do sistema de detecção, fazendo os mesmos semelhantes aos observados em estações observacionais de superfície. Um aspecto importante acerca dos DTs e HTs obtidos pelos dados do sistema é que estes têm mais chance de serem medidos do que eventos isolados como *flashes* ou *strokes*. Isso acontece porque a probabilidade de detectar ao menos uma descarga com um pico de corrente suficientemente grande é maior.

Diferentes autores já realizaram validações e/ou comparações entre os dados de estações de superfície (observacionais) e os valores calculados a partir de dados do sistema de detecção (REAP; ORVILLE, 1990; REAP, 1993; PINTO JR. *et al.*, 2011). A boa correlação obtida, em geral, indica que os dados resultantes dos sistemas de detecção podem ser uma maneira interessante de analisar DTs e HTs. Além disso, o uso dos dados do sistema dessa forma permite a correlação com as séries históricas de DTs de estações em análises climatológicas.

Os DTs resultantes dos sistemas de detecção apresentam ainda outras vantagens. As informações obtidas pelo sistema de detecção são baseadas em descargas reais e não precisam de nenhum tipo de interpolação, como acontece com os dados de estações observacionais. Além disso, as informações obtidas nas estações dependem de uma série de fatores como a audibilidade e a possível realocação de sítios de medida (CHANGNON, 2001).

## **2.6. Análise espacial de dados de relâmpagos**

Como as soluções geradas pelos sistemas de detecção de relâmpagos permitem definir a localização das descargas sobre a superfície terrestre, uma das suas principais aplicações consiste na análise espacial destas informações, seja de forma individual (por tempestade, sobre um lugar e momento específico, etc.), seja na forma de uma climatologia (mapa de densidade, por exemplo).

Para analisar eventos estocásticos como os relâmpagos, podem ser utilizados métodos conhecidos como SPPA (Spatial Point Pattern Analysis), os quais se baseiam em diferentes ferramentas orientadas à análise de pontos. A análise por meio de mapas de densidade (ou intensidade) normalmente é referida como uma análise de primeira ordem (GATRELL *et al.*, 1996), isto é, que visa a identificar como a informação está variando no espaço. Alguns dos métodos mais comuns utilizados nas análises desta ordem são os métodos de quadratura (ou *quadrat*) e os métodos de estimativa de densidade por *kernel*.

Algumas pesquisas já discutiram a aplicação e as limitações do método de quadratura, quando aplicado à análise de relâmpagos, principalmente por que a posição da descarga possui erros aleatórios e sistemáticos intrínsecos e de diferentes origens (conforme destacado na Seção 2.3.2), que determinam a precisão de localização. O trabalho desenvolvido por Schultz (2005) mostra, por exemplo, uma iniciativa nesta direção para identificar a resolução ideal dos mapas de densidade de relâmpagos gerados para a NLDN. Nesse trabalho, admitindo um erro constante (circular) de 1 km, Schultz avalia o percentual de descargas que ficam totalmente dentro de uma grade (com resolução variante), identificando a resolução ideal para a qualidade dos dados em questão. Diendorfer (2008), nesta mesma direção, discute uma maneira de incluir as incertezas relativas ao método de quadratura por meio do uso de uma fórmula que indica a quantidade de eventos necessários, dentro de uma célula de grade, para obter-se resultados confiáveis na estimativa de densidade. Dessa forma, erros intrínsecos ao número de soluções poderiam ser estimados e incluídos como um critério na elaboração dos mapas.

Ainda sobre os erros associados à estimativa de densidade, no que diz respeito à análise univariada, Wilkinson (1999) destaca os resultados obtidos por Freedman e Diaconis (1981), e mais recentemente por Scott (1992), mostrando a análise do que estes chamam de erro quadrático médio integrado (*Mean Integrated Square Error* ou MISE): para histogramas convencionais esse erro é da ordem de  $n^{-2/3}$ , onde  $n$  representa o número de eventos dentro de uma célula do histograma. Este valor passa para  $n^{-4/5}$  quando a análise através de

um *kernel* univariado é utilizada, indicando que os erros tendem a diminuir pelo uso desta técnica. A análise utilizando *kernel* já vem sendo aplicada também aos estudos de relâmpagos (AMATULLI *et al.*, 2007; LIU *et al.*, 2010). Considerado mais sofisticado matematicamente, o *kernel* ainda tem vantagens por estar associado a funções de distribuição de probabilidade.

Interpoladores podem ainda ser utilizados em conjunto com as técnicas mencionadas. Dentre os interpoladores que existem atualmente, pode-se destacar o Inverso da Distância (IDW), baseado principalmente na distância euclidiana; a krigeagem, baseada na variância das amostras com a distância (geoestatístico); ou ainda os do tipo SPLINE, que consideram o valor de cada ponto. Muitos trabalhos procuram avaliar qual seria o método mais apropriado, mas o que se vê, em geral, é que a escolha depende das condições e do tipo de variável em questão (ASSAD *et al.*, 2003; ANDERSON, 2004).

## **2.7. Fenômenos físicos associados à distribuição de relâmpagos**

O avanço da detecção de relâmpagos tem sido uma grande motivação ao desenvolvimento de climatologias de relâmpagos através da análise de sua distribuição espacial. Apenas em estudos recentes se tornou possível compreender certos aspectos inerentes a sua espacialização, especialmente através do desenvolvimento de sistemas e de redes de detecção de descargas e de sensores remotos, com os quais se podem identificar as áreas com maior ocorrência desses eventos em todo o planeta. Hoje, já existem diversos estudos desta ordem sobre regiões específicas bem como para todo o globo, seja por redes locais, globais ou mesmo por sensores a bordo de satélites (ORVILLE; HENDERSON, 1986; PINTO JR. *et al.*, 1999; CHRISTIAN *et al.*, 2003; PINTO; PINTO JR, 2003; NACCARATO *et al.*, 2008).

Apesar de os relâmpagos estarem associados às tempestades, que são fenômenos muito particulares, sua ocorrência pode ser, a longo prazo, um bom indicativo de uma possível regularidade na distribuição espacial das descargas, caracterizando, assim, uma climatologia de relâmpagos e/ou de tempestades. Isso devido à facilidade de sua análise em relação aos recorrentes objetos de

estudo das tempestades (radar, imagens de satélite), de difícil conciliação para longos períodos. A climatologia de relâmpagos é relativamente recente e não está disponível para períodos muito antigos, devido principalmente ao fato de os sistemas de detecção e as técnicas computacionais para a sua visualização em mapas serem muito recentes. Além disso, é extremamente importante entender como as limitações desses sistemas afetam o desenvolvimento dessas climatologias. Apesar de vários trabalhos abordarem essa questão, poucos até o momento mostraram maior preocupação com relação às limitações sujeitas, por exemplo, à detecção de relâmpagos. Para o caso brasileiro, pode-se dizer que uma das primeiras tentativas diretas de conciliar a interpretação física da distribuição das descargas com base em correções sobre a eficiência dos sistemas (i. e., uma primeira tentativa da minimização dos erros associados ao sistema de detecção para posterior análise sobre os aspectos físicos) foi o trabalho de Naccarato (2006). Neste buscou-se, a partir das correções para efeitos do sistema, explicações para as altas densidades sobre a região metropolitana de São Paulo, baseando essa alta densidade nas teorias então existentes sobre os efeitos dos aerossóis e das ilhas de calor urbano (WESCOTT, 1995).

Essas ilhas de calor urbano são caracterizadas basicamente pelo gradiente de temperatura e pelas características físicas diferenciadas da superfície. Com relação à temperatura, seus efeitos se dão diretamente nos fluxos de superfície, especialmente pelas interações entre a atmosfera e a superfície através dos fluxos de calor latente e calor sensível, o que permite que ela seja usada nas estimativas do balanço energético (SELLERS *et al.*, 1986). Dessa forma, o gradiente de temperatura, associado ainda a outras variáveis, afeta a circulação local e pode ser considerado um determinante das condições de instabilidade da atmosfera que podem levar à formação de tempestades (NACCARATO *et al.*, 2003; FREITAS; DIAS, 2005). Uma série de trabalhos aponta para a relação entre as ilhas de calor e a atividade de relâmpagos (SORIANO; DE PABLO, 2002; STEIGER *et al.*, 2002). Na maioria desses estudos, efeitos urbanos foram atrelados tanto às variações de temperatura

quanto aos poluentes (aerossóis) lançados na atmosfera. Stallins e Bentley (2006) trazem uma revisão de uma série de trabalhos nessa linha.

No Brasil, conforme já destacado, também foram realizados estudos em torno das relações entre a temperatura de superfície em grandes centros urbanos e as descargas atmosféricas, verificando-se aumentos da densidade de relâmpagos sobre as áreas urbanas em resposta aos gradientes de temperatura (GOMES, 2002; NACCARATO *et al.*, 2003; PINTO *et al.*, 2004). O trabalho de Naccarato *et al.* (2003) foi um dos que mais se aproximou de uma relação qualitativa direta entre a temperatura de superfície e a atividade de relâmpagos. Uma amostra dos resultados obtidos pelo autor pode ser observada na Figura 2.10. Outros trabalhos realizados ao redor do mundo ainda abordam efeitos positivos da temperatura da superfície do mar e da temperatura do ar no aumento da atividade de relâmpagos (PRICE, 1994; De PABLO; SORIANO, 2002).

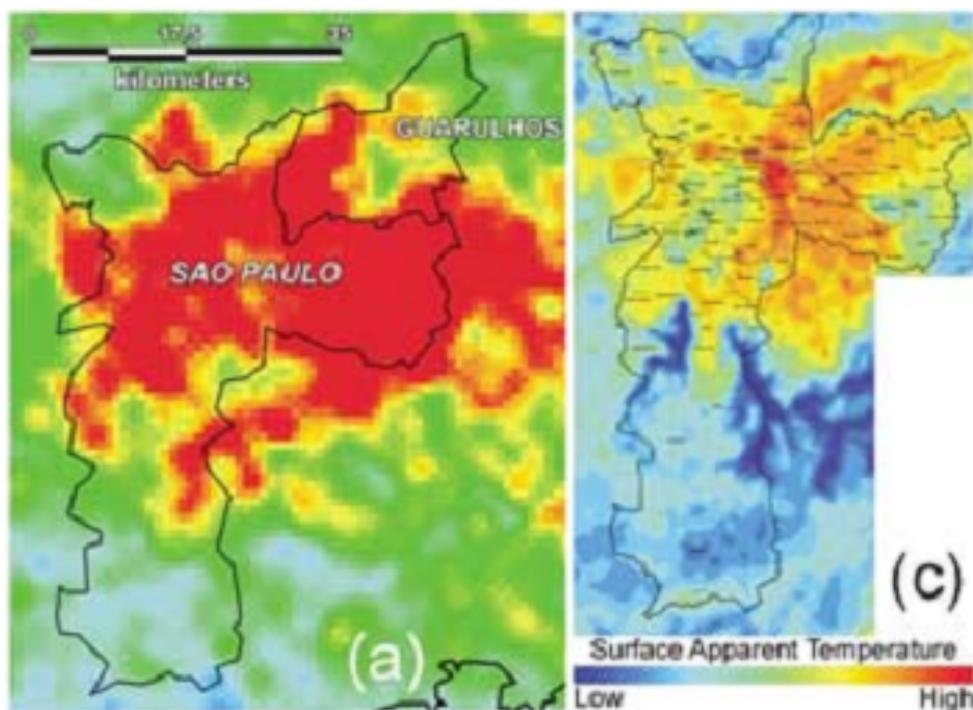


Figura 2.10 – Análise da ilha de calor (c) de São Paulo sobre a ocorrência de relâmpagos (a).

Fonte: Naccarato *et al.* (2003).

Porém, os impactos das ilhas de calor não se restringem à análise espacial. Sobre a perspectiva temporal, uma análise da temperatura e seu impacto na

ocorrência de relâmpagos foi destacada por Pinto Jr. e Pinto (2008). Os autores mostraram neste trabalho um aumento da temperatura do ar junto à superfície sobre a área urbana de São Paulo. A Figura 2.11 mostra os resultados obtidos por Pinto Jr. e Pinto (2008) para a análise decadal, em conjunto com o mapa da expansão da área urbana de São Paulo. Observa-se uma tendência de aumento da temperatura, que é acompanhada pela atividade de relâmpagos. Uma comparação rápida da temperatura com o crescimento das áreas urbanas indica que estes fenômenos podem estar interligados.

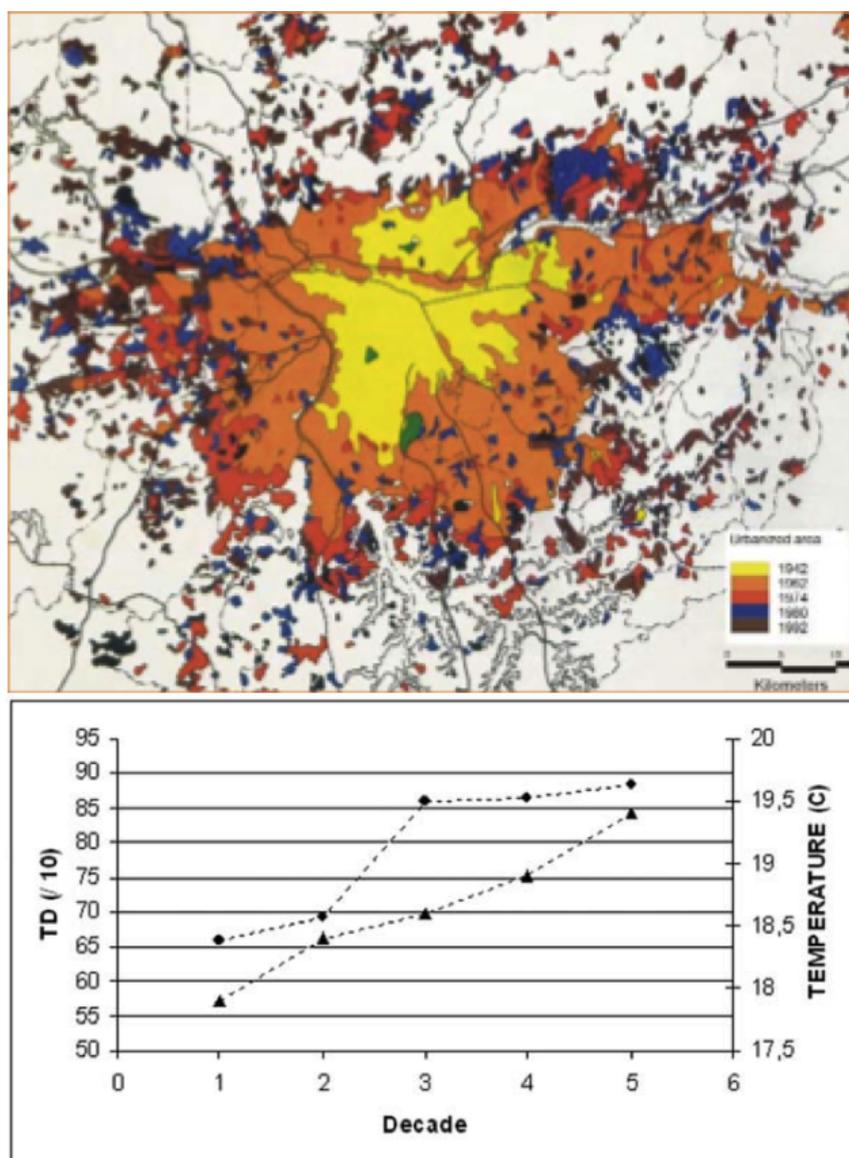


Figura 2.11 – a) Evolução da área urbana de São Paulo (1942 a 1992); b) Análise decadal mostrando o aumento da temperatura e do número de dias de tempestade para a cidade de São Paulo (Congonhas).  
 Fonte: Pinto Jr. e Pinto (2008); FIX *et al.* (2003).

Outro trabalho que também mostra o crescimento da área urbana mais recentemente é o de Ohata e Quintanilha (2005). Neste trabalho os autores encontram um crescimento da área urbana da ordem de 8% no intervalo entre 1991 e 2002, com os valores concordando com o crescimento populacional.

As ilhas de calor podem ser consideradas como um fator estático (ou de ordem geográfica) na formação de tempestades, pois sempre ocorre, sendo (relativamente) independente de sazonalidade ou oscilações (el niño, la niña etc.). Outro fator estático recorrente nos estudos é o relevo. Estudos recentes (especialmente após o avanço no uso de sistemas de detecção de relâmpagos) vêm apontando efeitos da topografia sobre os relâmpagos. Estes estudos estão associados, na sua maioria, ao desenvolvimento de climatologias regionais (ORVILLE; SILVER, 1997; ORVILLE; HUFFINES, 2001; ZAJAC; RUTLEDGE, 2001). Poucos estudos até o momento, no entanto, evidenciaram correlações (relações quantitativas) entre o relevo e a distribuição de relâmpagos (PINTO JR. *et al.*, 1999; SCHULZ; DIENDORFER, 1999; BOURSCHEIDT *et al.*, 2009). Trabalhos ainda mostram que o pico da atividade de relâmpagos tende a acontecer antes (no tempo) à medida que a altitude aumenta, indicando que as características das tempestades para esta situação se dão de forma diferenciada (REAP, 1991; BOURSCHEIDT *et al.*, 2009).

Com o crescimento dos bancos de dados de descargas, análises utilizando alta resolução têm se tornado possíveis, permitindo uma compreensão mais aprofundada da relação entre relâmpagos e altitude. Cummins *et al.* (2009) realizaram uma análise detalhada da formação de tempestades e da ocorrência de relâmpagos sobre o Grand Canyon. Uma variação rápida no total de descargas entre a parte superior e a inferior do canyon foi observada e algumas hipóteses sobre suas causas foram levantadas: intensificação do campo elétrico e geração de uma área de atração, fazendo com que os relâmpagos se conectem à montanha e/ou com que as ramificações se conectem primeiro às paredes do canyon; possível efeito da montanha na atenuação/distorção da radiação eletromagnética; ou, ainda, a dificuldade de tempestades se formarem e/ou se propagarem sobre o canyon. Grant (2011)

também fez menção à relação entre os relâmpagos e as áreas elevadas para a África do Sul. Seus resultados apontam, de forma intrigante, para um comportamento singular das descargas intranuvem sobre o contorno das áreas elevadas.

Outros estudos ainda apontam para possíveis relações entre a distribuição espacial dos relâmpagos e outras variáveis (estáticas/geográficas e dinâmicas/meteorológicas), como a continentalidade e a maritimidade (WILLIAMS; STANFILL, 2002) e os sistemas convectivos de mesoscala (CCMs e SCMs) (RUTLEDGE *et al.*, 1990; PARKER *et al.*, 2001).



### 3 METODOLOGIA

Até o presente momento, a RINDAT conta com onze anos completos de dados de descargas nuvem-solo reprocessados (de Janeiro de 1999 a Dezembro de 2009). Este período apresentou variações na quantidade de sensores e no tipo de tecnologia utilizada por estes, conforme já destacado na Seção 2.4. Todos os aspectos envolvidos com essas variações e com os diferentes métodos propostos no trabalho, assim como os métodos adotados nas análises das singularidades físicas são discutidos nesta seção.

#### 3.1. Área de estudo

Diferentes regiões do Brasil foram utilizadas para a realização desta pesquisa em função das demandas de cada tipo de análise desenvolvida. A Tabela 3.1 mostra as regiões de acordo com a análise realizada (índice para cada região). Essas regiões também podem ser vistas em detalhes na Figura 3.1, a seguir.

Tabela 3.1 – Índice para cada região e tipo de análise realizada.

<b>Tipo de análise</b>	<b>Índice</b>	<b>Região</b>
Modelo de Eficiência	A	Toda cobertura da rede (BR)
Mapas corrigidos pelo MEDR	B	Linhas de transmissão de Itaipu
Métodos alternativos	C & D	Sudeste & RMSP
Mapas de alta resolução	E & D	São Paulo & Belo Horizonte
Ilha de calor	D	RMSP
Efeitos da altitude	F	Vale do Paraíba

O polígono (máscara) em D se refere à região urbana de São Paulo. Trata-se de um limite físico (não político), definido por meio de imagens LANDSAT 5, utilizando uma metodologia que será apresentada posteriormente. Os pontos em preto definem os sensores da rede. A próxima seção segue com os métodos utilizados para a análise de desempenho.

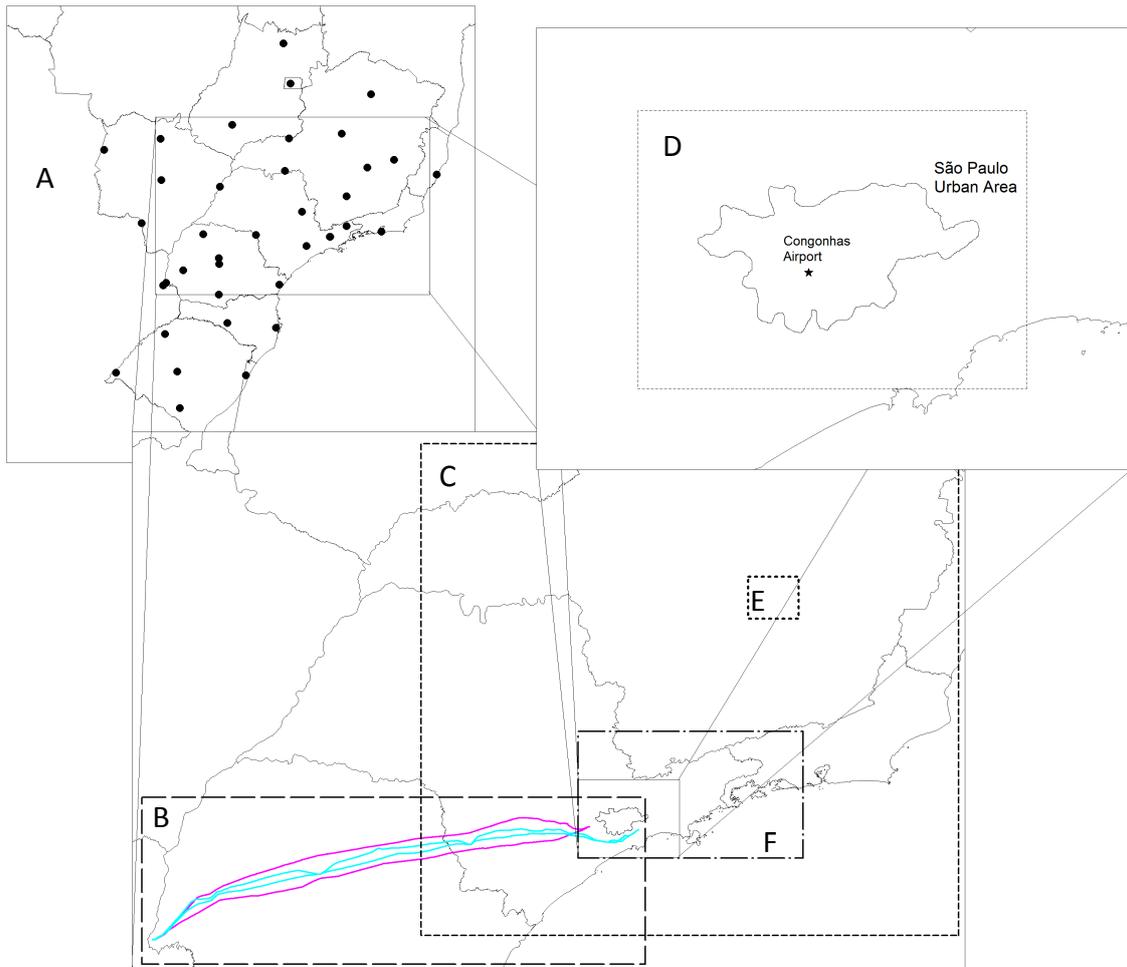


Figura 3.1 – Regiões de estudo segundo a Tabela 3.1. São mostradas as linhas de transmissão, os sensores da rede e a máscara urbana de São Paulo.

### 3.2. Análise de desempenho

Entre os sistemas de detecção mais utilizados atualmente para localização de descargas estão os sistemas na faixa de VLF/LF (com grande precisão). Estes sistemas permitiram não só avanços significativos na análise da distribuição espacial de relâmpagos, mas também a criação de ferramentas essenciais para os diferentes setores da sociedade. No entanto, como exposto anteriormente, uma análise criteriosa da distribuição espacial de relâmpagos também depende de como o desempenho do sistema é considerado. A seguir são descritos métodos utilizados para incluir os efeitos de desempenho do sistema na análise espacial das descargas atmosféricas, principalmente no que se refere à eficiência de detecção e à precisão de localização.

### 3.2.1. Eficiência de detecção – MEDR4

O Apêndice A (Figura A.1) mostra um diagrama do funcionamento do modelo de eficiência desenvolvido pelo grupo de eletricidade atmosférica do INPE para maiores esclarecimentos sobre o cálculo da eficiência, com base no trabalho mais recente de Naccarato e Pinto (2009).

Para esta tese, a quarta geração do modelo de eficiência de detecção relativa (MEDR4) foi desenvolvida. Ela integra uma série de melhorias que permitem uma melhor representação da eficiência de detecção:

- Estatística: permite que sejam utilizadas, no levantamento das curvas de eficiência relativa de cada sensor (EDRS), apenas informações dos dias em que o sensor esteve efetivamente funcionando. Por exemplo: considerando um limite de uptime de 50%, se o sensor esteve funcionando apenas 40% de um determinado dia, esse mesmo dia não será considerado no levantamento da EDRS do sensor em questão, evitando-se, assim, falsas reduções de eficiência (em alguns casos).
- Intervalos de tempo reduzidos podem ser utilizados na geração da eficiência. Quanto menor este intervalo, mais realístico tende a ser o modelo resultante. Este intervalo também pode incluir o filtro de status: se o sensor esteve muito tempo sem funcionar, ele será desconsiderado no cálculo da eficiência (i.e., sua eficiência será zero). Isto é válido tanto para o cálculo da eficiência quanto para a geração das curvas de eficiência individuais de cada sensor.
- Intervalos angulares: cada sensor pode apresentar limitações para detectar em uma determinada direção. Estas limitações estão associadas a objetos/estruturas que obstruem/alteram a radiação eletromagnética, impedindo que os sensores possam interpretar esta radiação de forma consistente.
- A estatística ainda leva em conta um critério de ponderação baseado no período mais ativo de formação de tempestades: maior peso pode ser

dado para certo intervalo do dia, já que efetivamente as tempestades (e os raios) tendem a ocorrer durante apenas à tarde e no fim do dia.

A nova versão do modelo visa ao acesso às informações através de uma interface simples, possibilitando ao usuário a análise para diferentes intervalos de ângulos, distâncias, picos de corrente e também de tempo. A Figura A.2 do Apêndice A mostra a interface (web) desenvolvida para o novo modelo. Para a geração dos mapas de eficiência, três módulos são utilizados:

1. Módulo estatística, que recupera as informações de status (*uptime*) dos sensores.
2. Módulo EDRS, que calcula a eficiência, considerando os filtros específicos (inclusive a estatística).
3. Módulo MED, que calcula efetivamente a eficiência, com base nas curvas de eficiência geradas no módulo EDRS. Estas passam por um processo de suavização através de um interpolador *spline* para dar maior continuidade ao mapa final (ver Figura A.3).

Com base na descrição anterior, os seguintes critérios foram usados no desenvolvimento do trabalho:

- Geração da EDRS (ilustração na Figura 3.2):
  - Período: dados anuais (Jan de 1999 a Dez 2009)
  - Intervalo de ângulo (0-360): 60 graus
  - Intervalo de distância: 50 km;
  - Intervalo de pico de corrente (kA<sup>12</sup>): 0 a 20 e 20 a 1000;
  - Estatística: filtro de 50% *down*, com ponderação entre 14h e 20h (GMT)
- Geração da eficiência:
  - Filtro de status: 50%
  - Intervalo de tempo: diário;

---

<sup>12</sup> Levando em conta valores absolutos (descargas de ambas as polaridades).

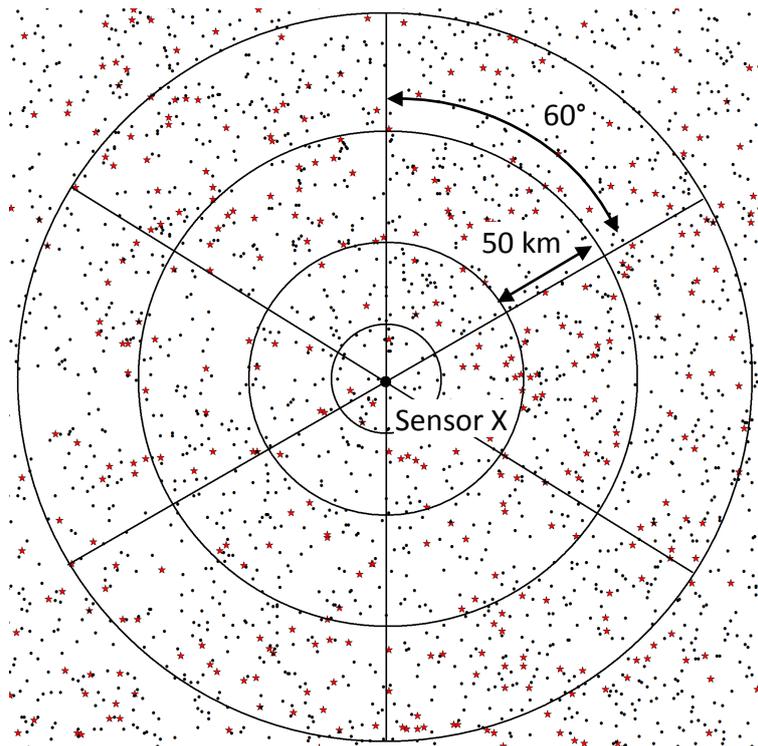


Figura 3.2 – Ilustração do cálculo da eficiência relativa de cada sensor levando em conta os intervalos de ângulo e de distancia. Os pontos pretos representam as descargas detectadas por toda a rede e os pontos vermelhos aquelas detectadas pelo sensor em questão (no centro da figura).

A utilização desses critérios permite obter a eficiência de detecção em grande detalhe no que se refere ao status dos sensores. Esta análise, entretanto, ainda não permite a obtenção da EDRS em uma escala minuciosa, o que depende diretamente da quantidade de eventos (descargas). Da análise desenvolvida com base nos critérios acima resultam 22 mapas de eficiência (para os 11 anos e para os dois intervalos de pico de corrente). Esses mapas são utilizados na correção dos dados de descarga, seguindo a metodologia que será descrita posteriormente.

### 3.2.2. Precisão de localização: *kernel* usando elipses de confiança

Conforme já descrito na Seção 2.4.3.3, a precisão de localização do sistema de detecção é determinada por meio de elipses de segurança. O Apêndice B traz uma descrição detalhada destas elipses. Como estas são baseadas em uma distribuição normal (STANSFIELD, 1947; CUMMINS *et al.*, 1998), é possível

calcular a posição da descarga na verdade como uma distribuição de probabilidades usando:

$$P(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma_x\sigma_y} + e^{[a(x-x_0)^2+2b(x-x_0)(y-y_0)+c(y-y_0)^2]} \quad (3.1)$$

$$\text{onde } a = \frac{\cos^2\theta}{2\sigma_x^2} + \frac{\sin^2\theta}{2\sigma_y^2}; b = \frac{\sin 2\theta}{4\sigma_x^2} - \frac{\sin 2\theta}{4\sigma_y^2}; \text{ e } c = \frac{\sin^2\theta}{2\sigma_x^2} + \frac{\cos^2\theta}{2\sigma_y^2}.$$

Todas as incógnitas da Equação 3.1 ( $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\theta$ ,  $x_0$ ,  $y_0$ ) são dadas pelo sistema de detecção. Como os valores dos semieixos representam por padrão o valor de sigma ( $\sigma$ ) para uma elipse com 50% de confiança (i.e, 50% de probabilidade de que a descarga esteja dentro da elipse), estes valores devem ser divididos por 1.177, para representar o valor de ‘um sigma’ (ver apêndice B), seguindo a equação descrita por Vaisala Inc. (2006). É o valor de sigma que deve ser usado para o cálculo de  $P_{(x,y)}$ .

Com base na Equação 3.1, um método foi desenvolvido a partir de uma técnica semelhante à integração numérica por quadratura (UEBERHUBER, 1997), onde os valores de probabilidade de cada descarga são calculados sobre uma grade. O somatório de todas as descargas sobre esta grade fornece a densidade (ou contagem) de descargas. Tal método ainda permite avaliar a precisão em termos do volume da distribuição de probabilidade (ou o valor final da integração numérica), conforme será visto adiante. Esse método será chamado a partir deste ponto de *Kernel* Bivariado Baseado na Elipse de Segurança (KBBES). Espera-se que este *kernel* tenha resultados semelhantes ao *kernel* convencional baseado numa distribuição normal (WAND; JONES, 1995). A diferença, no entanto, é que este método considera a precisão de localização do sistema de detecção, principalmente pelos ângulos e semieixos da elipse, que são diferentes para cada solução. Como resultado desta metodologia, tem-se um mapa (suavizado) que inclui os erros de localização estimados pelo sistema de detecção.

Com este novo método, cada descarga é distribuída ao longo dos semieixos da elipse e acredita-se que a estimativa de localização passa a ser menos dependente da resolução (tamanho da grade) utilizada no mapa. Quanto menor o tamanho da célula de grade em relação ao tamanho da elipse, maior é a precisão associada com a estimativa da probabilidade (a integral ou o volume da distribuição se aproxima de um). Esta análise pode ser vista na Figura 3.3, através de uma avaliação (tipo Monte Carlo) que usa soluções dadas pelo sistema de detecção sobre diferentes tamanhos de grade. Por outro lado, se o tamanho da célula passa a ser da mesma ordem ou ainda maior que o tamanho da elipse, a chance de ocorrer uma descarga dentro da célula de grade também aumenta, o que reduz os erros associados ao número de eventos dentro de cada célula, conforme descrito por Diendorfer (2008). É importante, no entanto, lembrar que, para que sejam obtidos resultados mais confiáveis acerca da distribuição espacial dos relâmpagos, é sempre aconselhável ter um número razoável de eventos sobre uma determinada região.

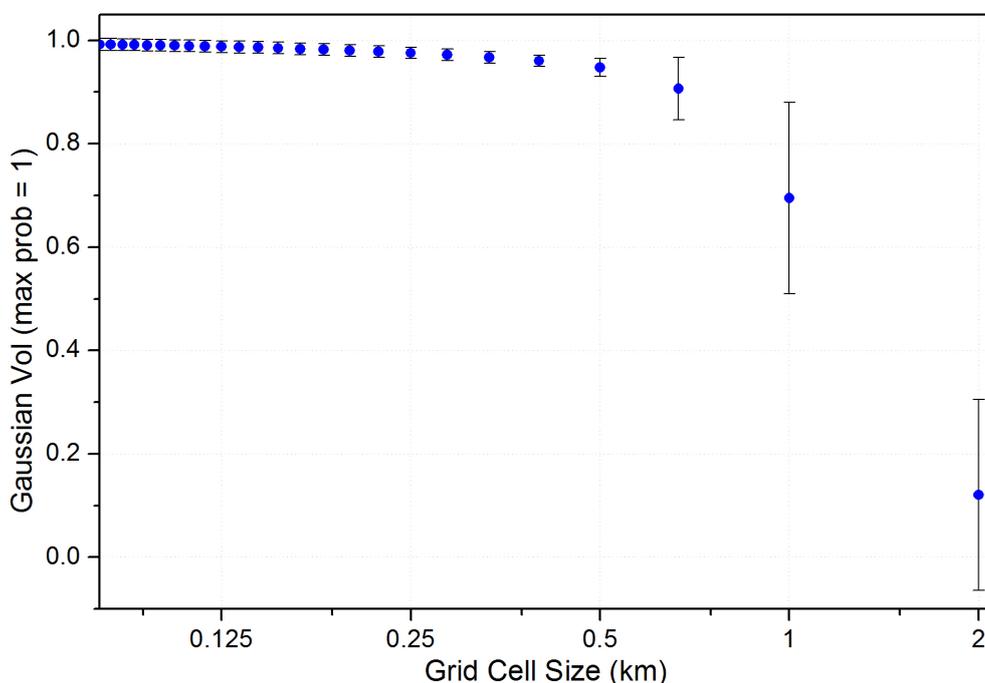


Figura 3.3 – Simulação dos tamanhos de célula de grade e efeitos na precisão do cálculo da gaussiana (volume) utilizando dados do sistema.

Uma análise do tamanho médio (mediana) do semieixo maior das elipses de segurança utilizando um banco de dados reduzido (Janeiro de 2006 a Maio de 2008) é mostrada na Figura 3.4. Esta análise inicial demonstra a clara dependência das elipses em relação à geometria da rede: o tamanho da elipse aumenta à medida que nos aproximamos das bordas da rede. Com base nesta observação, três regiões (retângulos vazados na Figura 3.4) foram escolhidas para testar o impacto das variações no tamanho da elipse sobre os mapas finais gerados pelo método proposto neste trabalho: uma na região de Cuiabá (A), onde o tamanho médio das elipses é relativamente grande; outra no entorno de Belo Horizonte (B), onde sensores TOA (LPATS no caso da RINDAT) diminuem o tamanho médio das elipses; e outra nos entornos de São Paulo, que também será analisada sob outros vieses (região D da Figura 3.1).

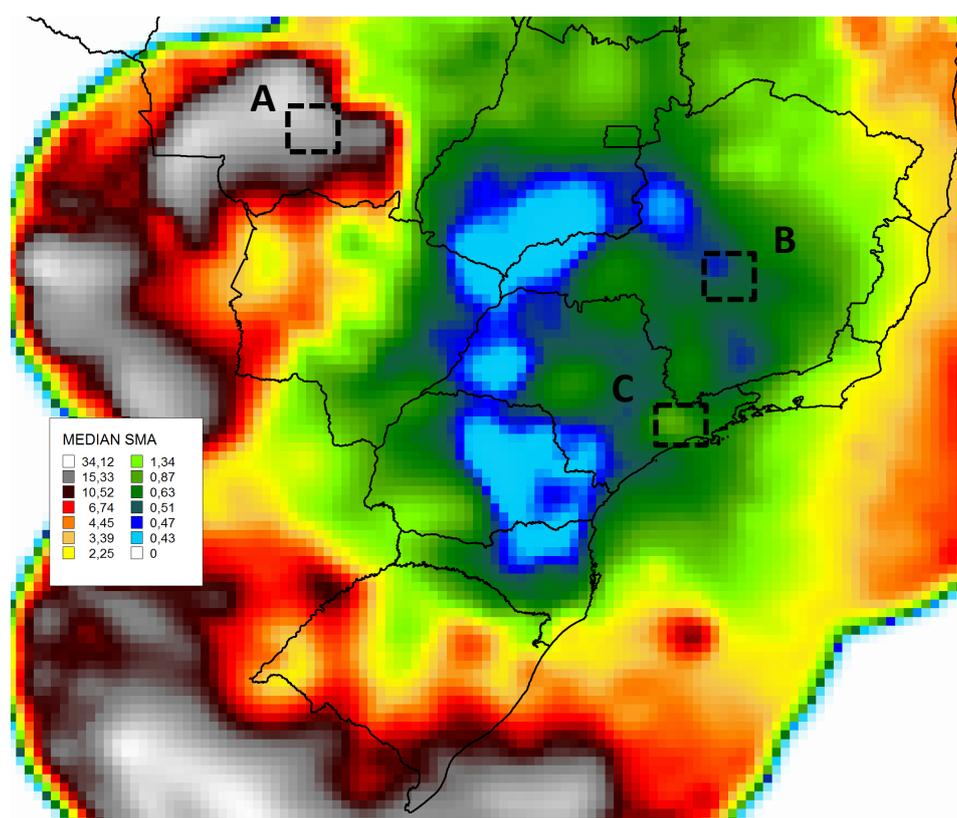


Figura 3.4 – Mapa dos semieixos maiores das elipses (km) e regiões usadas para teste (retângulos pontilhados): Cuiabá (A); Belo Horizonte (B) e São Paulo (C).

Outra análise desenvolvida refere-se à comparação do método proposto com outro método comumente utilizado na geração dos mapas (método de grades

ou *quadrat*). Esta análise levou em conta diferentes resoluções espaciais, buscando identificar os efeitos das diferentes resoluções sobre os mapas produzidos. Três resoluções foram utilizadas: 0.1, 0.5 e 2 km.

Destaca-se previamente que o tamanho médio da elipse sobre as regiões utilizadas nas análises finais (destacadas na Figura 3.1) é da ordem de 1-2 km. Neste sentido, resoluções entre 100 e 500 metros foram usadas na geração dos mapas finais, dando uma acurácia da ordem de 0.99 ao volume da distribuição de probabilidade.

Os mapas ainda utilizam um fator de suavização que multiplica os tamanhos dos semieixos e que tende a criar um mapa de melhor visualização, seguindo a ideia proposta por Wand e Jones (1993) para o método de *kernel* convencional. Este fator é constante e não possui, no entanto, um significado físico. Os efeitos desse fator de suavização são mostrados na Figura 3.5. Os mapas desenvolvidos no trabalho utilizaram um fator de suavização igual a 2 (dois).

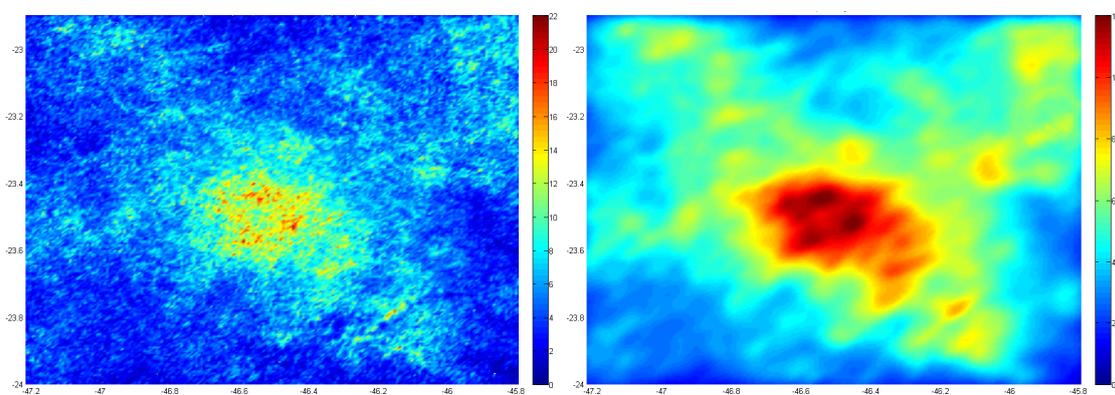


Figura 3.5 – Efeitos do fator de suavização adotado na análise: fator de 2(a) e de 8(b).

### 3.2.3. Integração para mapas finais

A soma de todas as descargas sobre a grade fornece a contagem final de relâmpagos. Para gerar mapas corrigidos pela eficiência, no entanto, é considerada a proporção das descargas que estão inseridas dentro de cada intervalo de pico de corrente e para cada média anual de eficiência gerada com o MEDR:

$$DE_i = \sum_{i=1999}^{2009} \frac{(Perc_{i(<20)} * Ef_{i(<20)} + Perc_{i(>20)} * Ef_{i(>20)})}{Perc_{i(<20)} + Perc_{i(>20)}} \quad (3.2)$$

$$FC_{final} = \sum_{i=1999}^{2009} D_i / DE_i \quad (3.3)$$

onde  $D_i$  é a contagem de descargas sem correção,  $DE_i$  é a eficiência de detecção média para cada ano e  $FC_{final}$  é a contagem de descargas corrigida.  $Ef$  e  $Perc$  são, respectivamente, a eficiência calculada e a percentagem de descargas dentro de cada intervalo de pico de corrente. O uso desta ponderação ao invés da média simples entre os dois conjuntos de picos de corrente evita que a eficiência seja superestimada (a eficiência para os picos de corrente maiores é sempre maior do que para os picos de corrente mais fracos). Após este processo, a densidade em  $flash.km^{-2}.ano^{-1}$  foi obtida dividindo-se o total de descargas pela área da célula (0.01, 0.04, 0.25 e 4  $km^2$ , dependendo da análise realizada) e pelo número de anos (11 anos). Ressalta-se que a Equação 3.2 é genérica e pode ser aplicada para qualquer intervalo de pico de corrente. Esta equação permite obter ainda um valor médio da eficiência de forma individual para todo o período, o que será abordado na Seção 4.1.

#### 3.2.4. Métodos alternativos para superar efeitos de desempenho

Conforme destacado anteriormente, nem todas as questões relativas ao desempenho podem ser facilmente superadas pelos modelos de eficiência de detecção e/ou pela precisão de localização. Nesse sentido, outros três procedimentos para superar as variações de desempenho do sistema nas análises espaciais e temporais serão considerados, sendo estes procedimentos independentes do cálculo da eficiência.

Tais procedimentos incluem a análise tanto através de Dias de Tempestade (DTs) e Horas de Tempestade (HTs), com base em dados do sistema de detecção, fazendo os mesmos semelhantes aos observados em estações observacionais, quanto através das descargas filtradas para picos de corrente

fracos. A Figura 3.6 mostra uma representação gráfica das técnicas HTs e DTs. As HTs foram obtidas agrupando os dados de *flashes* em intervalos de horas e os DTs agrupando os dados em intervalos diários. Estes métodos têm por objetivos mitigar a baixa eficiência dos sistemas de detecção pois, ao passar de flashes para DTs, por exemplo, a probabilidade de se ter ao menos uma descarga com pico de corrente suficientemente grande para fornecer uma contagem ou evento na análise final é aumentada.

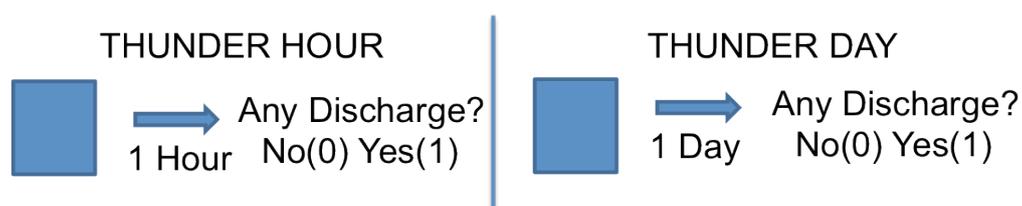


Figura 3.6 – Técnicas para a análise dos dados de relâmpago: Horas de Tempestade e Dias de Tempestade.

De forma mais quantitativa, pode-se associar a probabilidade de se ter um DT ( $P_{(DT)}$ ) à probabilidade de detectar um *flash* da seguinte forma:

$$P_{(DT)} = 1 - (1 - P_f)^n \quad (3.4)$$

onde  $n$  é o número de flashes e  $P_f$  é a probabilidade de se detectar um flash. Dessa forma, a probabilidade de se ter um DT (ou HT) é definida como a probabilidade de detectar ao menos um flash ou, de forma mais específica, não deixar de detectar todos os flashes. Enquanto  $n$  for maior do que um, os DTs serão detectados com maior probabilidade que os flashes.

Para desenvolver e avaliar esta metodologia, foram necessários uma série de critérios e diferentes análises, que são descritos a seguir.

#### 3.2.4.1. DTs: dados do sistema versus estações observacionais

Com relação aos métodos mencionados acima, uma das primeiras avaliações feitas refere-se à validação dos dados de dias de tempestade obtidos pelo sistema de detecção (chamados a partir deste ponto de DTSS) utilizando dados de estações observacionais (DTEs). Os DTEs foram obtidos para uma estação

localizada próxima ao Aeroporto de Congonhas, no centro da área urbana de São Paulo, no período entre 1999 e 2006. Estes dados, aliados a outras estações, têm sido usados por mais de 50 anos para desenvolver mapas isocerânicos. Medidas diárias foram integradas em médias mensais e comparadas então com os dados obtidos pelo sistema de detecção. Três raios de abrangência distintos em torno da estação foram usados (5, 8 e 10 km), no sentido de emular variações na distância (e audibilidade).

A Figura 3.7 mostra um diagrama de dispersão dos dias de tempestade obtidos pela RINDAT (DTSs) e os DTEs. É mostrado também o ajuste linear para cada um dos raios avaliados. A correlação entre os dois conjuntos de dados é relativamente alta para os três diferentes raios, e o melhor ajuste ocorre para o raio de 8 km em torno da estação ( $R^2 = 0.86$ ), com a inclinação de 1.03.

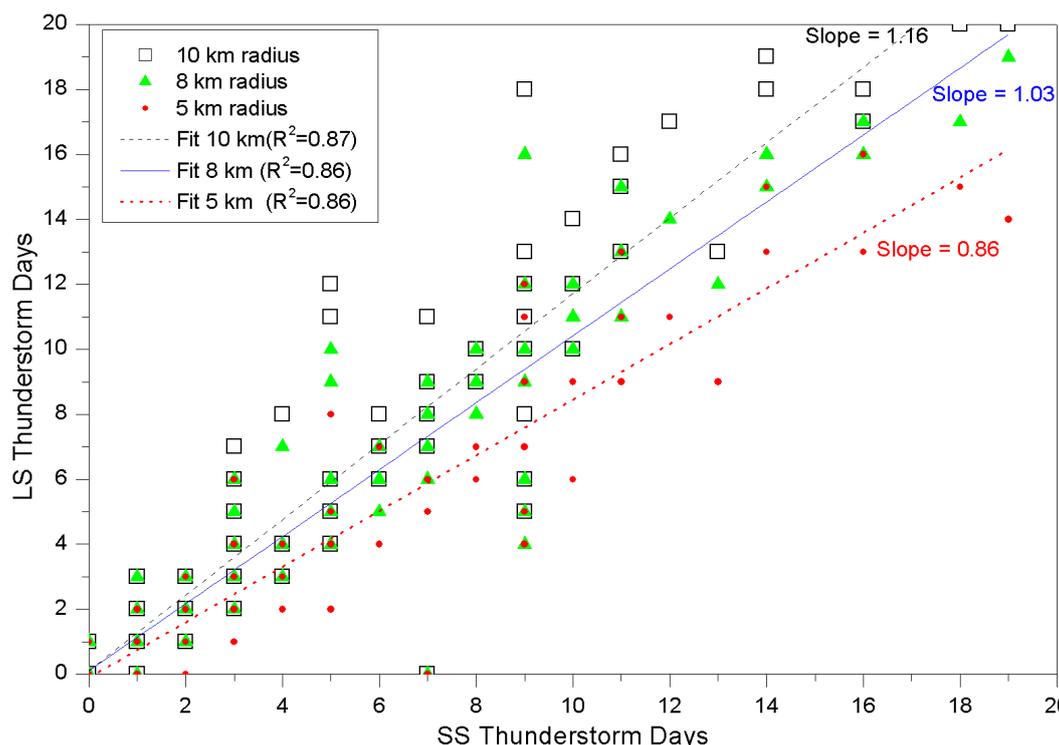


Figura 3.7 – Dispersão comparativa entre os DTs de estações observacionais (abscissas) e DTs obtido através do sistema de detecção (ordenadas).

Ainda é possível observar que, à medida que o raio aumenta, o número de DTSs aumenta em relação ao número de DTEs (a inclinação aumenta). Este resultado é esperado, visto que a habilidade de ouvir e ver o relâmpago

(habilidades básicas para os DTEs) depende diretamente da distância, e os DTSs não apresentam essa limitação. Para o raio de 5 km, a quantidade de dados da RINDAT é reduzida – possivelmente devido à eficiência de detecção –, o que afeta o número de DTSs, diminuindo a inclinação da reta. Uma análise similar já foi realizada por Pinto Jr. *et al.* (2011), e os autores sugerem que o reduzido raio médio das observações de DTEs (menor que 10 km) está associado ao ambiente ruidoso (aeroporto + área urbana).

#### **3.2.4.2. Reprocessamento de cenários**

Para avaliar o impacto do desempenho do sistema sobre a ocorrência de relâmpagos, diferentes cenários (configurações específicas da rede com um número determinado de sensores) foram criados, usando-se as ferramentas de reprocessamento da RINDAT (VAISALA, 2003). Alguns critérios básicos foram utilizados para tornar a análise mais confiável:

- O número de dias (e, conseqüentemente, de soluções geradas) deve ser o suficiente para evitar grandes flutuações estatísticas;
- Cada sensor deve funcionar durante os mesmos dias, mantendo as condições de contorno equivalentes para todos os sensores;
- Somente dias com *uptime* relativamente alto (90%) são levados em consideração;

O limite escolhido para o *uptime* implica em desconsiderar dias nos quais os sensores funcionem por menos de 90% do tempo. Esse percentual incorpora uma ponderação, dando maior peso ao intervalo entre as 14h e 20h horas (GMT). Essa seleção foi ainda estendida para incluir apenas os meses de verão, quando a maioria das descargas ocorre.

Após esta primeira seleção, todas as possíveis combinações entre os sensores foram analisadas para encontrar as configurações ideais, que implicam na combinação de aspectos como: 1) o maior número de dias possíveis, 2) o maior número de sensores e 3) a geometria mais apropriada para os sensores resultantes. A configuração final escolhida apresentou 476 dias e possui uma

boa geometria sobre a região de estudo, além de sensores com diferentes tecnologias (Figura 3.8).

Outras configurações foram obtidas com base na configuração em questão. Além disso, uma configuração de referência foi assumida. Todas estas configurações são descritas a seguir:

- Cenário de referência (CR): cenário utilizando todos os sensores da rede.
- Cenário 1 (C1): cenário composto por 10 sensores: 3 sensores IMPACT e 7 LPATS, obtidos pela análise das combinações.
- Cenário 2 (C2): a rede passa a ter 9 sensores (2 IMPACT e 7 LPATS), removendo-se o sensor do tipo IMPACT de São José dos Campos. Ângulo e tempo são considerados nesse caso.

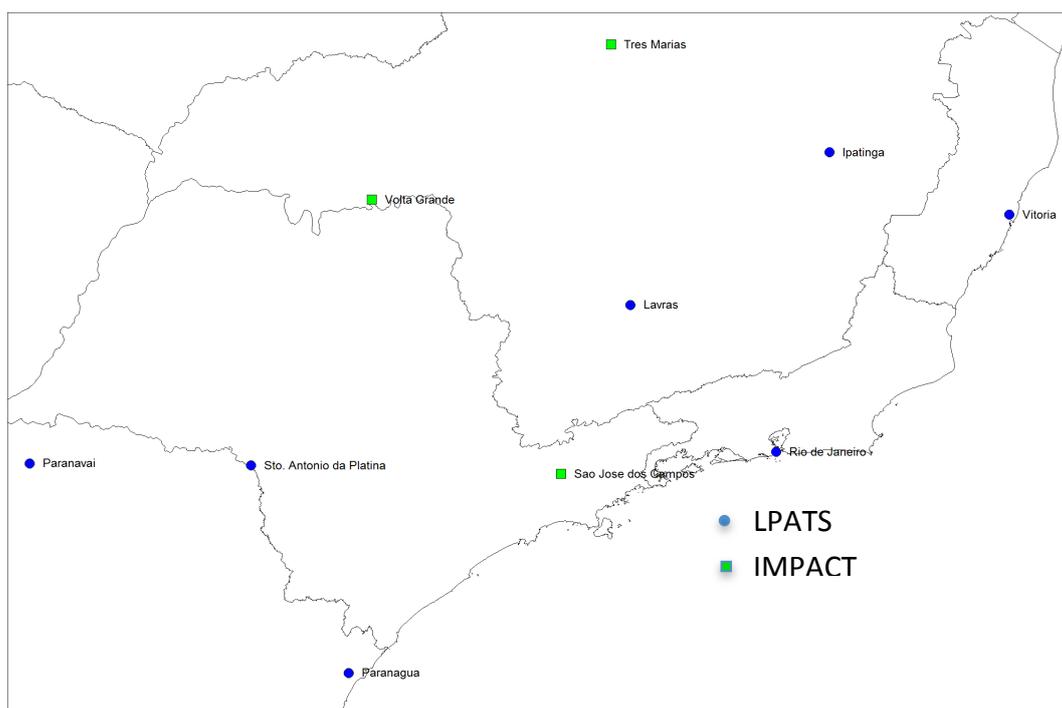


Figura 3.8 – Configuração final escolhida para a análise de desempenho.

Para a análise de desempenho foram utilizados, efetivamente, os cenários CR, C1 e C2. O cenário de referência CR foi utilizado como “verdade”, fornecendo uma referência objetiva para o desempenho relativo de C1 e C2. Esses cenários visam simular condições pelas quais muitas redes VLF/LF ao redor do

mundo já passaram durante a sua existência, seja devido a falhas na detecção ou resultado da expansão da rede e/ou upgrade de sensores. Para muitas redes, isto implica também na melhoria da sensibilidade dos sensores, permitindo a detecção de descargas com picos de corrente menores (e.g. CUMMINS *et al.*, 1998; PINTO JR. *et al.*, 2006). As análises utilizando os cenários foram realizadas sobre duas regiões (com base na Figura 3.1): sobre a região D para a análise temporal e sobre a região C na análise espacial. O período de dados utilizado nesta análise vai de Janeiro de 2003 à Dezembro de 2007. Maiores detalhes podem ser vistos na Seção 4.4.

### **3.2.4.3. Análise de sensibilidade**

Para definir a variação temporal da sensibilidade da RINDAT e encontrar limite de pico de corrente para a análise das descargas filtradas, a distribuição dos picos de corrente foi analisada por meio de uma distribuição de probabilidade cumulativa empírica. Esta análise levou em conta dados de todo o período e foi realizada sobre a região D da Figura 3.1. O limite percentual (percentil) de 90% das descargas negativas foi utilizado como referência para definir um valor mínimo de corrente, visto que eventos muito fracos são usualmente detectados por poucos sensores, levando a estimativas menos confiáveis do pico de corrente. Apenas descargas negativas foram consideradas nessa análise para evitar efeitos significativos de contaminação por descargas intranuvem, usualmente associadas com as descargas positivas de baixa intensidade (BIAGI *et al.*, 2007). O pico de corrente associado ao percentil de 90% e sua variação ao longo dos anos é mostrado na Figura 3.9, que também mostra a variação percentual de eventos com pico de corrente abaixo de 15 kA. A quantidade desses eventos de baixo pico de corrente varia de apenas 5% em 1999 para quase 60% em 2009. O pico de corrente mínimo passou de aproximadamente 18 kA para 6 kA, indicando que a sensibilidade evoluiu de forma aproximadamente constante ao longo dos anos, o que está relacionado à adição e ao upgrade dos sensores (NACCARATO e PINTO JR., 2008).

O uso desta análise servirá de referência para a normalização do crescente desempenho do sistema de detecção, assim como uma forma para eliminar

qualquer descarga intranuvem classificada como nuvem-solo (BIAGI *et al.*, 2007; NACCARATO *et al.*, 2008; CUMMINS; MURPHY, 2009). Neste sentido, um limiar de 19 kA foi usado para equalizar a sensibilidade para a análise temporal.

Para a análise espacial e para a análise temporal usando DTs e HTs, foi usado um filtro para descargas NS de baixa intensidade (abaixo de 15 kA) com o objetivo de diminuir a classificação errônea de descargas nuvem-solo como intranuvem.

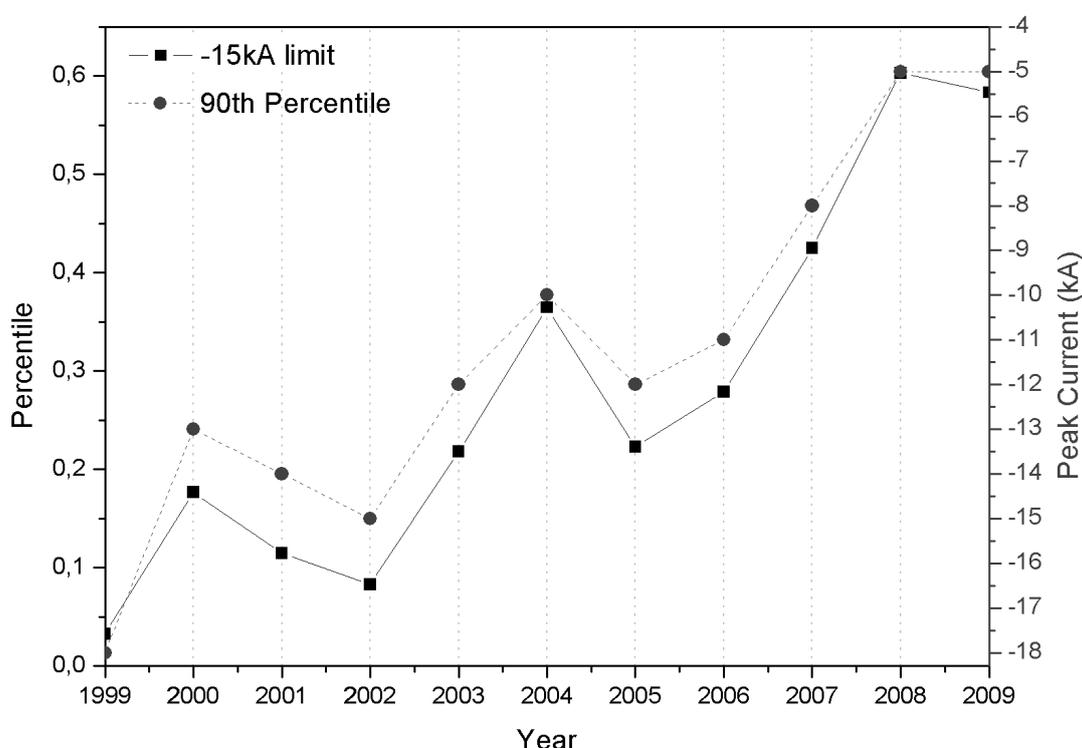


Figura 3.9 – Avaliação da sensibilidade utilizando o percentil de 90% e o limiar de - 15kA. Baseada nos dados contidos na região D da Figura 3.1.

### 3.3. Métodos para a análise de efeitos físicos

Nesta seção são descritos os procedimentos adotados para a análise dos aspectos físicos associados à distribuição espacial e temporal de relâmpagos. Primeiramente são destacados os procedimentos envolvendo os dados de relâmpagos. Em seguida, outros dados e técnicas são descritos, os quais envolvem basicamente imagens de satélite e dados de estações

meteorológicas. Ressalta-se que as técnicas de DTs e HTs já descritas também são utilizadas para as análises envolvendo aspectos físicos.

### 3.3.1. TIT: início das tempestades

Um procedimento diferenciado utilizado neste trabalho consiste na tentativa de identificar, através de dados de relâmpago, o momento em que as tempestades iniciam. Chamamos este procedimento de técnica para identificação do início de tempestades ou de forma mais simples, TIT (do inglês Thunderstorm Initiation Technique). A TIT é obtida pela análise espacial e temporal das descargas: se uma descarga não for precedida por outra em um determinado intervalo de tempo e se nenhuma outra descarga ocorrer em um determinado raio de busca, este evento passa a identificar uma TIT. O resultado é uma climatologia que pretende identificar os locais onde as tempestades costumam ter início.

A Figura 3.10 traz uma representação da técnica. Os intervalos (de tempo e espaço) com os melhores resultados e que, ao mesmo tempo, mantinham um embasamento físico (e.g. COORAY, 2003; PECKHAM, 1984), foram utilizados (conforme mostrado na figura): critério temporal de 30 minutos e espacial de aproximadamente sete quilômetros (0.07 graus). Os eventos resultantes são acumulados sobre uma grade ou mapa. Neste trabalho, os mapas foram feitos com resoluções espaciais entre três e cinco quilômetros.

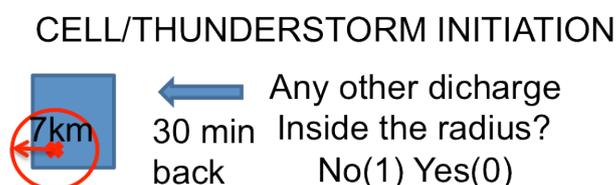


Figura 3.10 – Ilustração da TIT.

Esta análise ainda leva em conta apenas dados de relâmpagos NS negativos, com um objetivo simples: evitar a identificação de novas tempestades associadas, na verdade, com as regiões estratiformes das tempestades, que são normalmente dominadas por descargas positivas (MARSHALL *et al.*, 2001;

LANG *et al.*, 2004). Além disso, tempestades no estágio inicial não apresentam regiões estratiformes.

Os dados resultantes dessa análise foram comparados com os dados do FORTRACC. Trata-se de um sistema de *tracking* utilizado no próprio INPE (Divisão de satélites e sistemas ambientais), baseado em imagens de satélite. Partindo de limiares de temperaturas, os sistemas convectivos são monitorados. Maiores detalhes sobre o sistema podem ser obtidas nos trabalhos de VILA *et al.* (2008) e Machado e Laurent (2004). Para este trabalho, interessa saber quando novos sistemas convectivos são criados. Para tanto, foram extraídas as coordenadas de cada novo sistema convectivo identificado pelo FORTRACC. Os pontos foram, então, acumulados sobre uma grade e um mapa foi gerado, sendo este usado posteriormente para a comparação com os resultados obtidos pela TIT. O Apêndice C traz uma amostra dos dados do FORTRACC e o algoritmo utilizado para extrair as informações de novos sistemas convectivos (N).

### **3.3.2. Imagens LANDSAT**

Imagens do satélite LANDSAT 5 foram usadas para calcular o crescimento e os limites da área urbana de São Paulo. Foram obtidas imagens para sete datas, desde 1986 até 2010. A análise seguiu parte da metodologia proposta por JAT *et al.* (2008): somente as bandas com maiores diferenças nos pixels (i.e., maior separação entre os alvos) foram utilizadas: bandas 1, 3 e 4 (ver Figura D.1 e D.2 do Apêndice D).

As imagens foram classificadas utilizando o software SPRING, através de um classificador supervisionado. Em seguida, estas imagens foram separadas em diferentes classes, sendo uma delas considerada como área urbana. O tamanho da área urbana foi então calculado para cada uma das datas, e a variação desta área ao longo dos anos foi analisada em conjunto com a evolução da população (obtida junto ao IBGE).

Os resultados destas análises são apresentados na seção 4.5.1. Esta mesma classificação serviu de base para a criação de uma máscara (polígono) – mostrada na Figura 3.11 e também vista na Figura 3.1 (região D) –, delimitando a região urbana contínua de São Paulo. A Figura 3.11 também mostra um buffer interno criado para tentar identificar a expansão da ilha de calor nas imagens MODIS, assim como mostra a localização das estações meteorológicas da CETESB. Estas informações são discutidas a seguir.

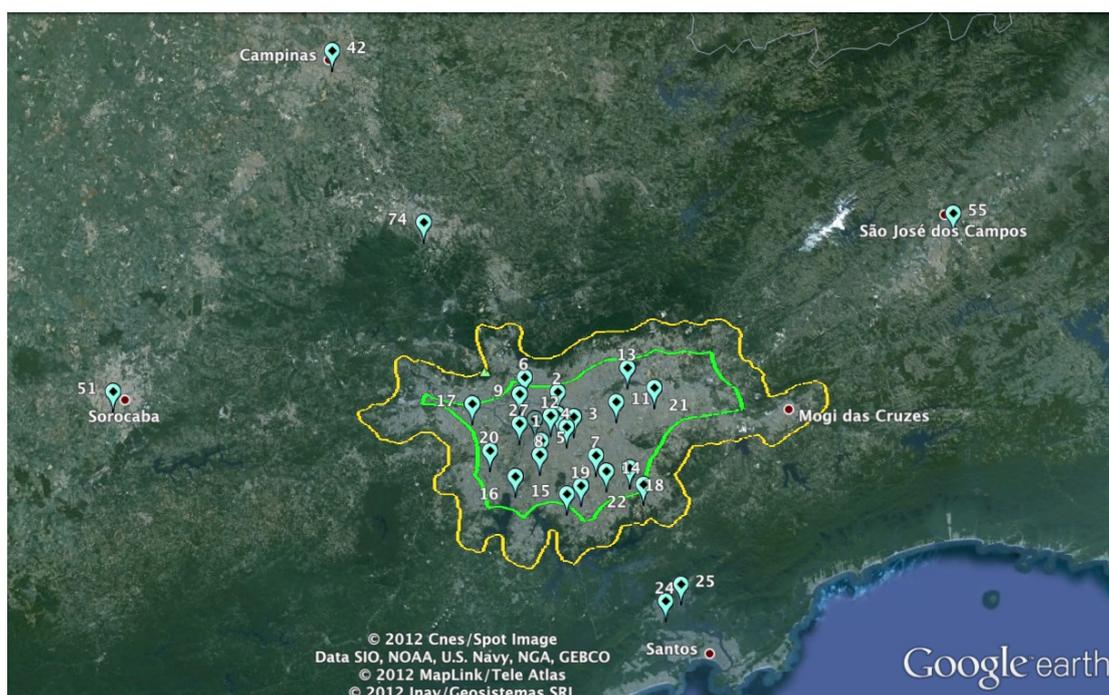


Figura 3.11 – Mascara que define a área urbana de São Paulo, além do buffer interno gerado a partir da mesma e a localização das estações meteorológicas da CETESB.

### 3.3.3. Dados de temperatura

#### 3.3.3.1. Temperatura de superfície MODIS

Dados do sensor MODIS (*Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer*) foram usados para avaliar o padrão espacial da temperatura de superfície sobre a região de São Paulo. Este sensor, que fica a bordo das plataformas Aqua e Terra, pode fornecer a temperatura de superfície ou LST (do inglês *Land Surface Temperature*, produto MOD11) para quatro horários ao longo do dia. Em razão do seu tipo de órbita (sol-síncrona), este satélite pode fornecer

medidas para quase todos os dias (variações de 1-2 dias) sobre um mesmo local. As imagens estão disponíveis desde Março de 2000 e Agosto de 2002 para as plataformas Terra e Aqua, respectivamente. Dois níveis foram considerados neste trabalho:

- MOD11B2, que fornece uma média de 8 dias (normalmente 4 imagens) da LST com uma resolução espacial de 1 km. Este produto é gerado pelo algoritmo de janelas divididas (generalized split-window LST algorithm) e utiliza uma máscara para condições de céu limpo (WAN; DOZIER, 1996).
- MOD11C1, que fornece uma composição média mensal da LST com resolução espacial de 0.05° (~5 km). Esta média leva em conta produtos de níveis inferiores e, portanto, conta com os mesmos filtros e algoritmos descritos acima.

Estes produtos tem um arquivo de controle (tipo binário) que classifica cada pixel com determinados critérios de qualidade. Uma descrição desse arquivo encontra-se no Apêndice D.2. Maiores detalhes podem ser encontrados ainda em Wan e Dozier (1996). Para a análise do produto MOD11B2, apenas pixels com boa qualidade para a temperatura e emissividade e com pequenos erros de ângulo foram considerados (i.e., pixels com valores de QA = 0 e de ângulo zenital <70° no arquivo binário). O algoritmo de janelas divididas descrito anteriormente já leva em conta variações de ângulo. No entanto, espera-se que valores de ângulo zenitais menores resultem em pixels de maior qualidade. Este produto foi usado para tentar identificar variações na temperatura de superfície em função do crescimento da área urbana, principalmente devido à sua resolução espacial (1km), que permite melhor discriminação dos valores de temperatura. Esta análise foi feita avaliando a temperatura média obtida dentro do anel formado pela máscara e o buffer interno (exibidos na Figura 3.11) para todo o período de dados disponível.

O produto MOD11C1 foi utilizado para a análise espacial. Como o algoritmo de janelas divididas já considera as variações do ângulo de aquisição das imagens e a composição mensal já possui uma série de correções adicionais, apenas desvios de tempo na passagem do satélite foram analisados para avaliar a

qualidade das informações e que podem ser vistos através da Figura 3.12, discutida na próxima seção. A Figura D.3 do Apêndice D mostra as médias mensais geradas pelos dois produtos MODIS.

### **3.3.3.2. Dados da CETESB**

Para avaliar os produtos MODIS, foram utilizadas medidas de temperatura do ar de estações automáticas de superfície, obtidas junto à CETESB<sup>13</sup> (Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental, ligada a Secretaria do Meio Ambiente do Estado de São Paulo).

As estações estão distribuídas principalmente sobre a região metropolitana de São Paulo e os dados estão disponíveis desde Janeiro de 1999 até Dez de 2010 (com exceção do ano de 2004, que não tinha medidas disponíveis). A Figura 3.12 mostra uma série de informações relativas à comparação entre os dados MODIS e as estações: os desvios no tempo de passagem dos satélites, a relação entre as temperaturas ( $R^2$ ), e a curva (média) de temperatura ao longo do dia. Todas as comparações e avaliações utilizando a temperatura foram feitas dentro da máscara urbana destacada na seção anterior. No caso das imagens MODIS, esta informação foi obtida pela média dos pixels e para as estações esta informação coincide com a média de todas as estações dentro da área urbana. Observa-se que, para os produtos diurnos dos satélites a temperatura é superestimada e, para os noturnos, ela é subestimada, o que está possivelmente relacionado com as diferenças das técnicas de medidas (temperatura do ar e temperatura de brilho), bem como com a forma diferenciada que os fluxos de calor ocorrem junto à superfície urbana.

Os dados de superfície também foram utilizados para a análise temporal dos efeitos das ilhas de calor de São Paulo. Esta análise temporal foi feita no sentido de comparar os dados de relâmpago com as variações de temperatura,

---

<sup>13</sup> Maiores informações em: <http://www.cetesb.sp.gov.br/>

segundo as análises conduzidas por Pinto Jr. *et al.* (2008) destacadas no início deste trabalho.

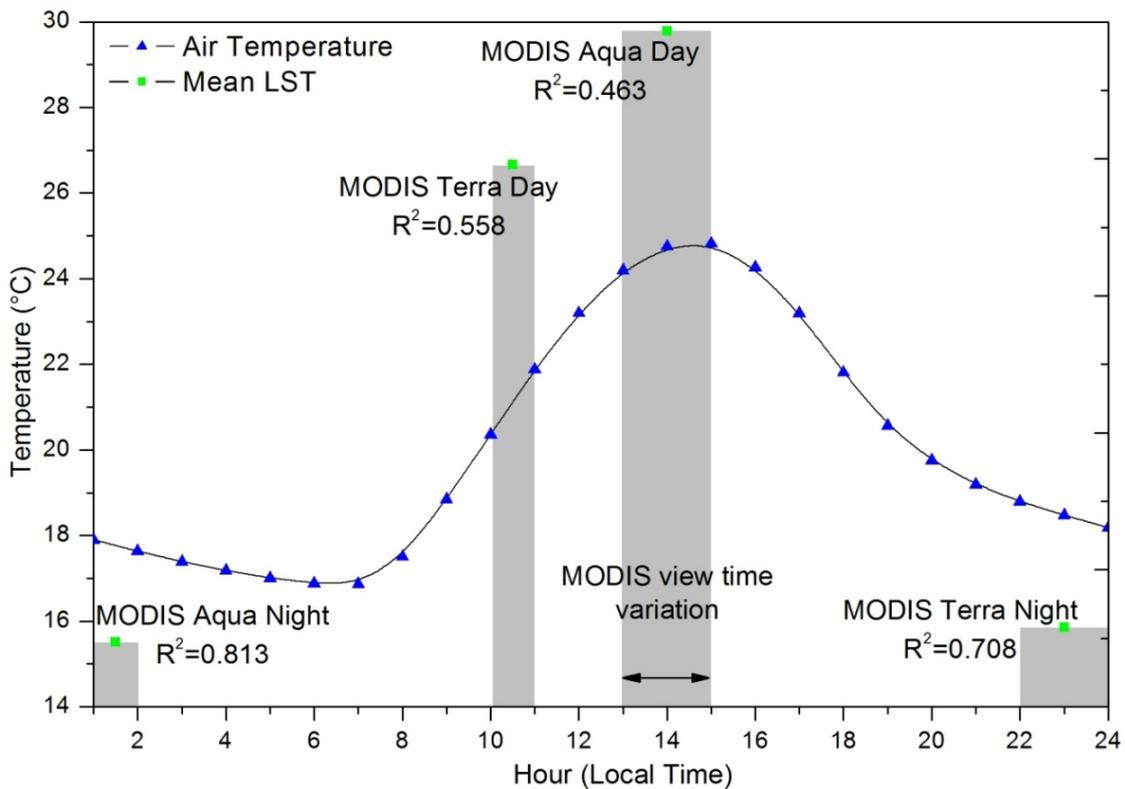


Figura 3.12 – Comparação entre dados MODIS e estações da CETESB.

### 3.3.3.3. Dados GISS

A análise da temperatura ainda levou em conta dados disponibilizados pela NASA/GISS (Goddard Institute for Space Studies), através do programa GISTemp<sup>14</sup> (*GISS Surface Temperature Analysis*), que concentra dados de temperatura de estações de superfície distribuídas por todo o mundo. O principal objetivo deste programa é concentrar dados de temperatura para o monitoramento climático para longos períodos. Estes dados tem origem no banco de dados GHCN-M (*Global Historical Climatology Network-Monthly*), coordenado pela NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*) e são distribuídos na forma mensal, sazonal e na forma de média (meteorológica)

<sup>14</sup> Maiores informações em [http://data.giss.nasa.gov/gistemp/station\\_data/](http://data.giss.nasa.gov/gistemp/station_data/).

anual. Os dados utilizados neste trabalho foram obtidos para a estação de São Paulo (-23.5, -46.6) e estão disponíveis desde 1887.

#### **3.3.4. Análise da altitude**

Os impactos da altitude sobre a distribuição de relâmpagos foram avaliados tanto de forma qualitativa quanto quantitativa. A análise qualitativa foi feita através da sobreposição dos mapas de densidade à visualização tridimensional do software Google Earth. Para a análise quantitativa, o modelo de elevação GTOPO30 com resolução 30 arc-sec ( $0.00833^\circ \approx 1 \text{ km}$ ) foi utilizado. Este modelo digital de elevação ou DEM (do inglês *Digital Elevation Model*) está disponível para todo o globo e é resultado de uma colaboração entre diversas instituições<sup>15</sup>. Ele foi finalizado e disponibilizado para uso em 1996. Para este trabalho, esse modelo foi transformado para a forma vetorial poligonal (isolinhas) através do software com ferramentas para geoprocessamento SPRING<sup>16</sup> (desenvolvido pelo INPE) e, para cada classe de elevação, foi obtido um valor médio com base na grade de valores gerada através do software MATLAB. As informações comparadas com a altitude foram a densidade de relâmpagos e a TIT.

---

<sup>15</sup> Mais informações, assim como os dados de elevação, podem ser encontrados no endereço: [http://eros.usgs.gov/#/Find\\_Data/Products\\_and\\_Data\\_Available/gtopo30\\_info](http://eros.usgs.gov/#/Find_Data/Products_and_Data_Available/gtopo30_info) (acesso em 07/03/2012).

<sup>16</sup> Disponível em: <http://www.dpi.inpe.br/spring/portugues/download.php>.



## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos, que envolvem principalmente questões relativas ao desempenho do sistema de detecção e, complementarmente, os efeitos físicos observados mediante a metodologia desenvolvida. Partimos inicialmente da análise das melhorias no modelo de eficiência de detecção e, posteriormente, do método de suavização baseado nas elipses de segurança. Ainda neste capítulo, é discutida a capacidade de certas técnicas (horas/dias de tempestade e filtros para descargas com baixos picos de corrente) de minimizar efeitos das variações de desempenho do sistema. Com base nessas metodologias, são ainda apresentados avanços na análise dos efeitos das ilhas de calor e da altitude sobre a atividade de relâmpagos.

### 4.1. Melhorias no modelo de eficiência

Com a introdução dos novos filtros e dos novos critérios para o cálculo da eficiência, uma série de melhorias pode ser observada. Uma das primeiras observações refere-se à inclusão das medidas de ângulo, conforme mostra a figura 4.1.

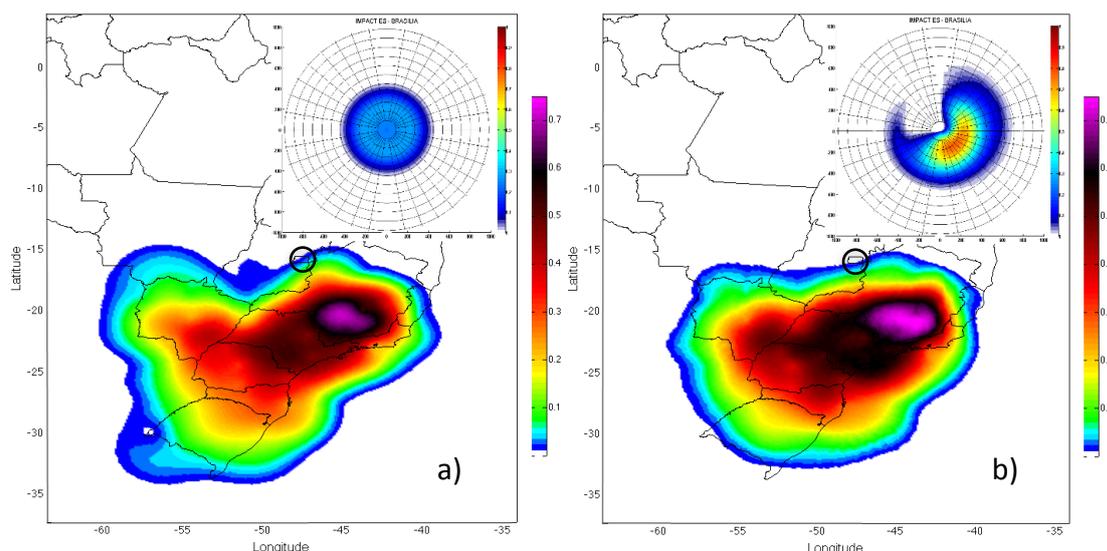


Figura 4.1 – Diferenças para a eficiência calculada utilizando apenas a distância (a) e utilizando a distância e o azimute (b). O círculo indica a localização do sensor em destaque.

As variações são claras e há uma tendência ao aumento da eficiência nas partes internas da rede, quando os ângulos são considerados no levantamento da eficiência de detecção (Figura 4.1a). As figuras internas (canto superior direito) mostram um exemplo da variação da eficiência para um único sensor (IMPACT ES, instalado em Brasília). Este mostra que as maiores eficiências se concentram na direção Sudeste, que é a direção para o centro da rede (o sensor fica na borda Norte, conforme indicado pelo círculo preto).

Outro resultado se refere às variações encontradas pelo uso (ou não) dos filtros de status (gerados no módulo Estatística) e de sensores essenciais (SE), mostradas na Figura 4.2. Esta análise levou em conta levantamentos realizados no período de novembro de 2009 a abril de 2010 e leva em conta a média para todos os sensores. Observa-se que a eficiência é consideravelmente reduzida pela inclusão do filtro de SE, o que é esperado. Por outro lado, a adoção do filtro de status (estatística) aumenta essa eficiência ao considerar apenas os dias em que o sensor esteve efetivamente funcionando.

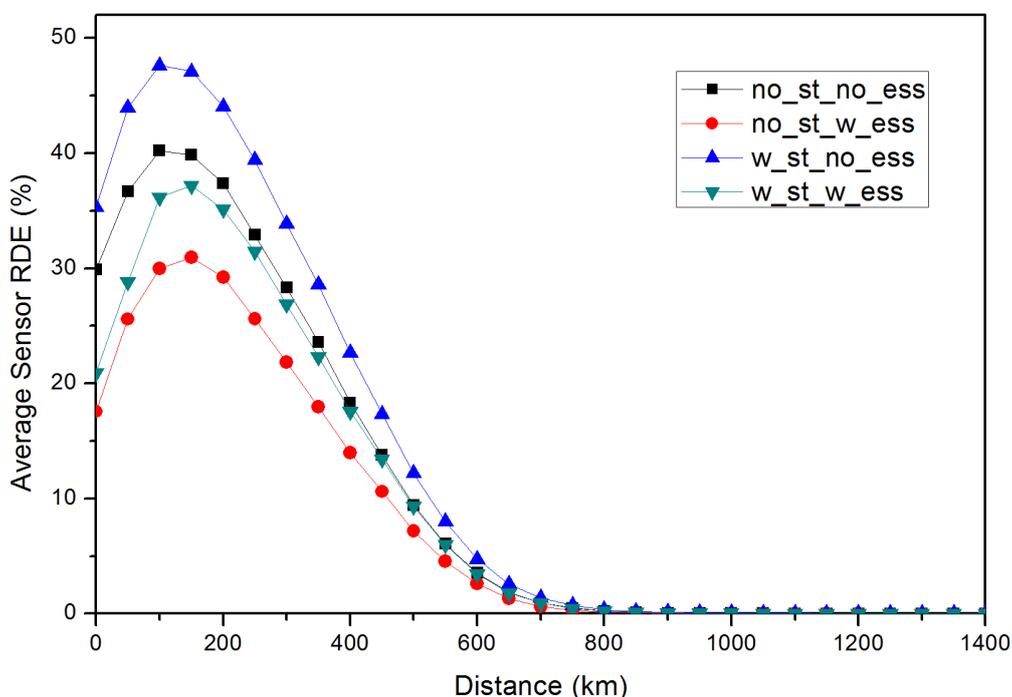


Figura 4.2 – Análise da utilização (*w* na legenda) ou não (*no*) dos filtros de estatística (*st* na legenda) e de sensores essenciais (*ess*). Curvas calculadas entre novembro 2009 e abril 2010 e para picos de corrente abaixo de 30 kA.

As variações máximas para o uso (ou não) dos filtros, para todos os sensores, são da ordem de 8%. Esse valor pode variar significativamente, dependendo do sensor em questão. Com base nesses resultados observa-se que as variações são expressivas e que, portanto, esta análise é de grande importância para a obtenção de valores de eficiência mais realistas.

A Figura 4.3 mostra a eficiência de detecção média para toda a rede (exceto sensores do SIPAM ao Norte, que participaram apenas por um curto período de tempo e não foram considerados neste trabalho). Trata-se da eficiência média obtida para os dois intervalos de pico de corrente com a utilização da Equação 3.2. Nota-se que a máxima eficiência estimada é da ordem de 85% (o que é razoável) e que as regiões de maior eficiência se concentram nos estados de São Paulo, Minas Gerais, Rio de Janeiro e Paraná. Ressalta-se ainda que, idelamente, intervalos de pico de corrente menores deveriam ser utilizados (5 kA, por exemplo). Estes não foram utilizados, no entanto, devido ao tempo de processamento necessário para tal condição ser muito alto.

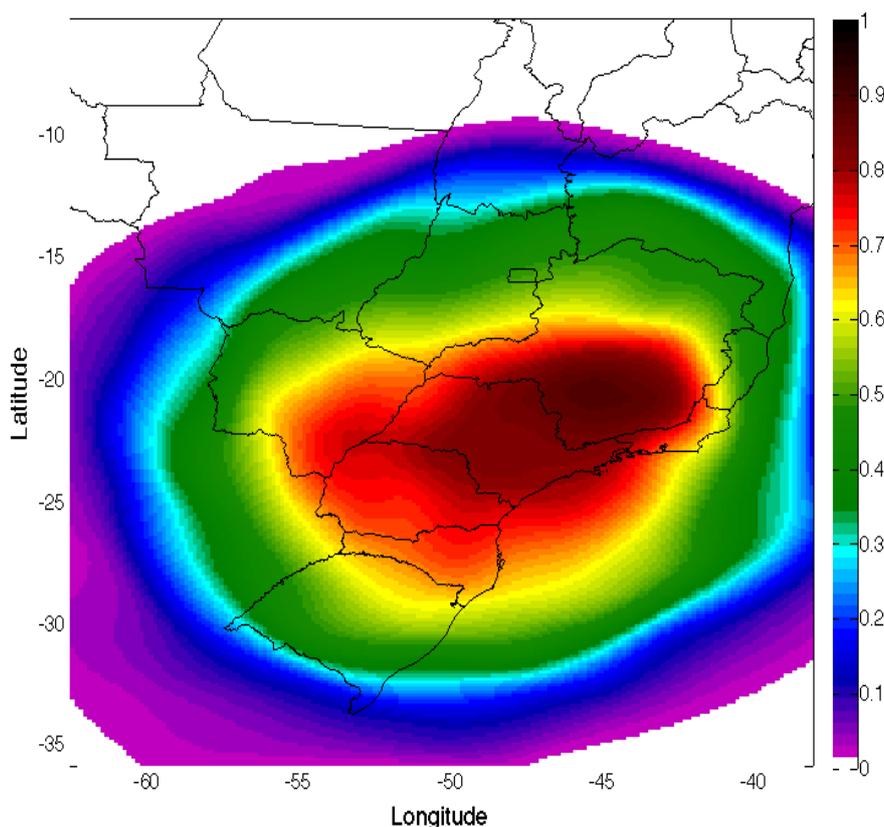


Figura 4.3 – Eficiência média da rede baseada nos dois intervalos de pico de corrente.

Esta mesma eficiência, aplicada aos dados de relâmpago, é mostrada no mapa da Figura 4.4 (utilizando uma resolução espacial de 10 km). As variações espaciais relacionadas à correção no número de descargas sobre as principais regiões estudadas (destacadas na Figura 3.1) são da ordem de 30% (ou 70% de eficiência). As regiões mais afetadas pela eficiência ficam na porção oeste do país. Embora ocorram alterações significativas na densidade, as singularidades analisadas em outros estudos permanecem e, portanto, não resultam da variação de eficiência do sistema de detecção. A densidade máxima observada para esta resolução é da ordem de 12 *flashes.km<sup>-2</sup>.ano<sup>-1</sup>*.

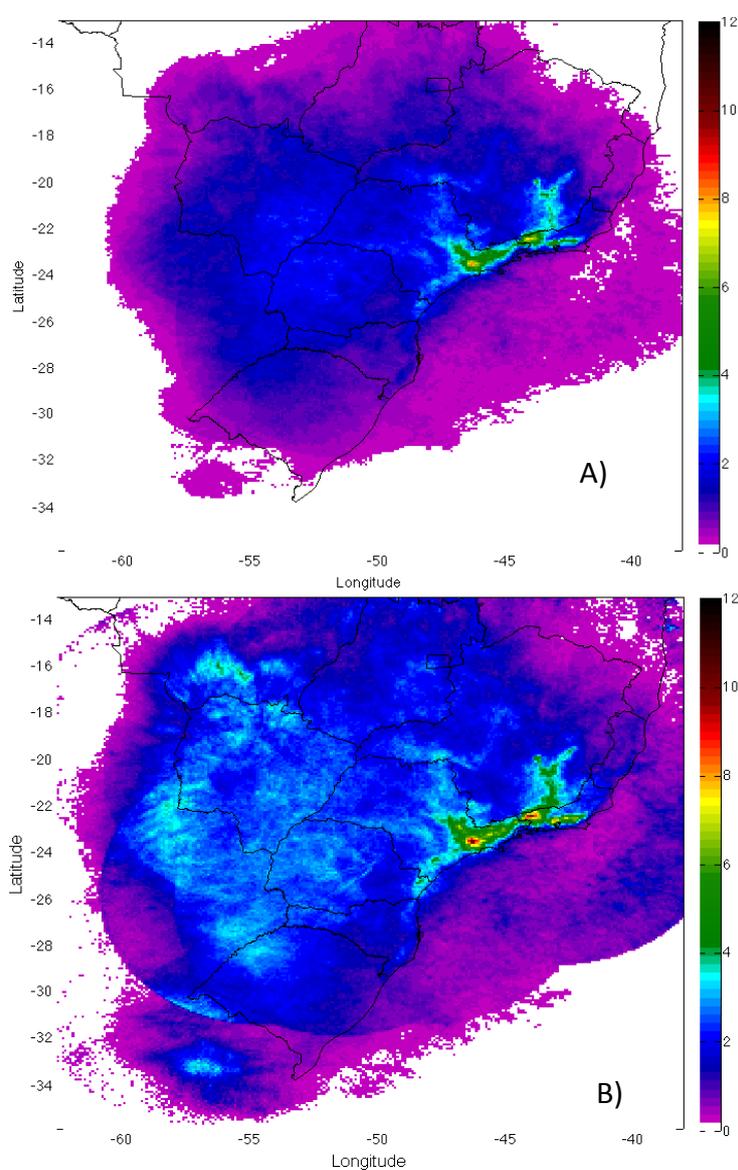


Figura 4.4 – Mapas de densidade sem correção (A) e com correção para a eficiência de detecção (B).

## 4.2. Avaliação do método de *kernel* baseado nas elipses (KBBES)

Conforme já discutido na revisão bibliográfica, existem diversos métodos para a análise espacial de pontos (SPPA) e cabe ao usuário escolher entre estes de acordo com seus objetivos. Um dos principais objetivos desse trabalho é o de integrar os efeitos dos erros de localização aos mapas por meio do método KBBES, baseado nas elipses de segurança fornecidas pelo sistema. Para tanto, foi necessário avaliar o método proposto em relação a outros métodos conhecidos. Nesse sentido, foram criados mapas de duas formas: utilizando tanto o método de contagem por célula (*quadrat*), quanto o *kernel* bivariado, para diferentes resoluções espaciais (0.1, 0.5 e 2 km) e utilizando dados para todo o período (1999 a 2009). Os resultados para esta análise são mostrados na Figura 4.5.

Observa-se que as diferenças crescem à medida que a resolução dos mapas é aumentada, o que está provavelmente associado à variação no número de eventos dentro de cada célula de grade, conforme discutido por Diendorfer (2008). Se o número de eventos diminui, aumentam as flutuações estatísticas e maior é a probabilidade de o aspecto ruidoso ocorrer para o método de contagem simples. O mesmo efeito é observado na estimativa da densidade ( $\text{flash.km}^{-2}$ ): como tal estimativa depende do tamanho da célula de grade adotada, as variações aumentam conforme aumenta a resolução utilizada no mapa.

Para o mapa no canto superior esquerdo da Figura 4.5, utilizando o método de contagem simples, por exemplo, a densidade chega a  $80 \text{ flashes.km}^{-2}.\text{ano}^{-1}$ . O mesmo não acontece para o método KBBES, onde os valores de densidade estimados permanecem aproximadamente constantes para todas as resoluções demonstradas. Os resultados quantitativos desta análise podem ser vistos na Tabela 4.1 (valores corrigidos pela eficiência de detecção).

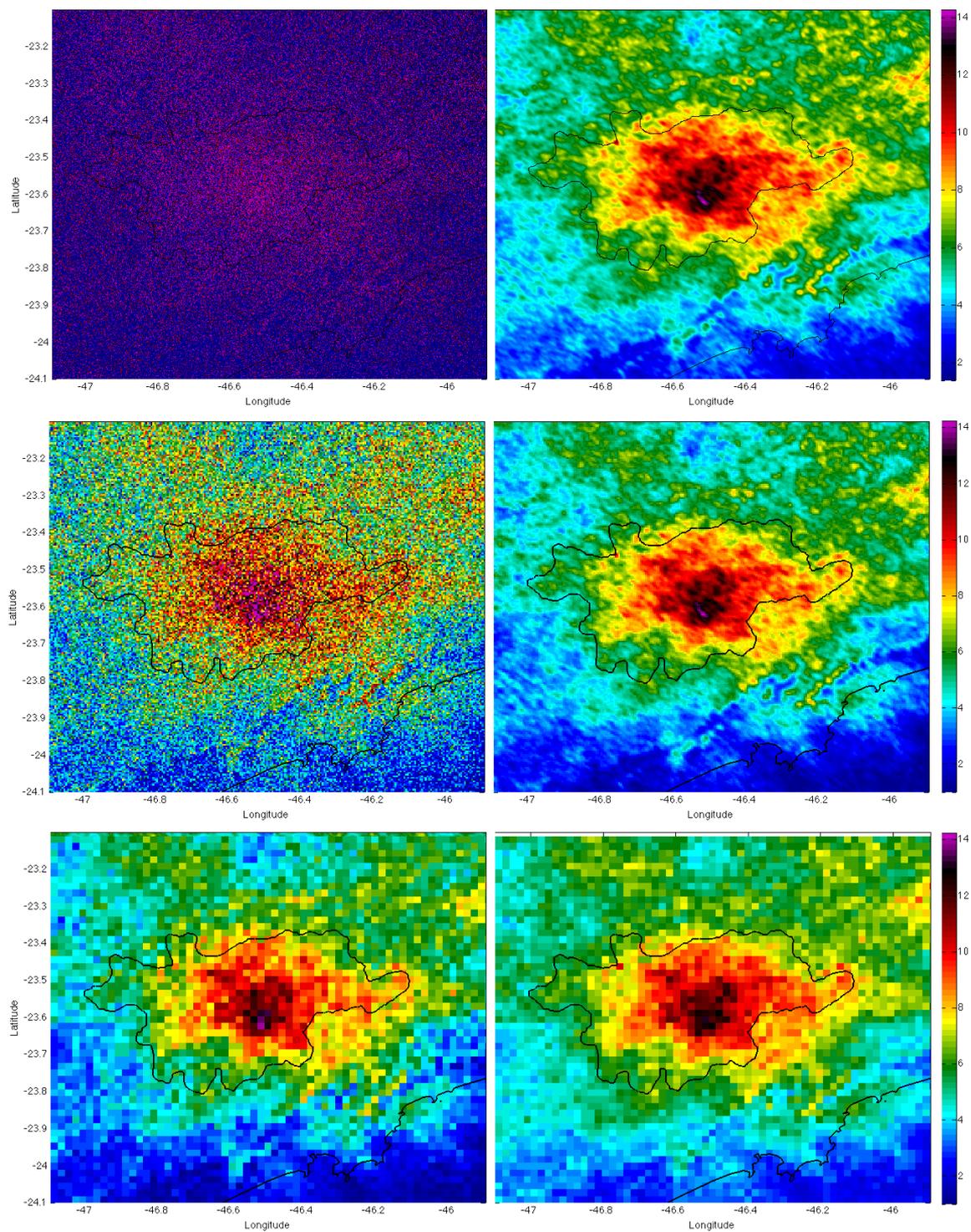


Figura 4.5 – Mapas de densidade utilizando o método de quadratura (coluna da esquerda) e o método KBBES (coluna da direita) para diferentes resoluções espaciais. O método KBBES se mostrou independente da resolução adotada (0.1, 0.5 e 2 km, de cima para baixo) e mais eficiente na representação da densidade.

Tabela 4.1 – Variação da estimativa de densidade em função do tipo de metodologia e da resolução espacial adotada na análise (em *flashes.km<sup>-2</sup>.ano<sup>-1</sup>*).

Resolução (km)	Quadrat				KBBES			
	Min	Max	Mediana	Desvio	Min	Max	Mediana	Desvio
0.1	0	88.99	5.79	8.85	1.38	14.32	5.97	2.0
0.5	0	21.25	5.49	2.68	1.39	14.28	5.61	2.0
2	1.35	13.97	5.63	2.03	1.38	13.16	5.53	1.97

Como o método KBBES distribui as descargas sobre uma superfície de probabilidades, ele se torna independente da resolução, permitindo a construção de mapas de alta resolução que mantêm, ainda, as informações de desempenho do sistema de detecção (precisão de localização).

Outra ressalva é a de que, caso um usuário trabalhe com mapas de baixa resolução (maior tamanho da célula de grade), a quantidade de dados pode ser suficiente para que o aspecto ruidoso não ocorra. Além disso, quando o tamanho da célula de grade ultrapassa o tamanho da elipse (linha inferior do painel da Figura 4.5), os mapas se tornam similares e qualquer um dos métodos pode ser utilizado para a sua criação. É importante ressaltar que o método KBBES é bastante similar ao método de *kernel* normal (convencional) descrito por Wand e Jones (1995). Porém, o método proposto tem o diferencial de incluir os erros de localização fornecidos pelo sistema de detecção.

Retomando a avaliação do método proposto, este parece funcionar de forma satisfatória para os erros aleatórios associados ao sistema de detecção. Erros sistemáticos, por outro lado, podem levar a resultados tendenciosos e com consideráveis distorções, principalmente quando as elipses apresentam uma orientação preferencial e os tamanhos dos semieixos são relativamente grandes. Situações como essas tendem a ocorrer em direção às bordas da rede e/ou fora dela (ver Figura 3.4). Nesse sentido, uma avaliação foi realizada para verificar se há alguma direção preferencial para as elipses, o que poderia afetar a produção do mapa final. A Figura 4.6 mostra uma análise que leva em consideração os ângulos das elipses de uma série razoável de descargas

sobre a região de São Paulo. Esta análise desconsidera a posição (Lat=0.0, Lon=0.0) e utiliza apenas os ângulos e semieixos das elipses. É possível ver que, embora uma pequena orientação preferencial seja observada, a maior porção da distribuição é praticamente circular (o que seria o caso de erros totalmente aleatórios). Outra observação é a de que a maior parte da distribuição de probabilidade se encontra a distâncias inferiores a 1 km, indicando que a precisão de localização é razoavelmente boa para a amostra utilizada.

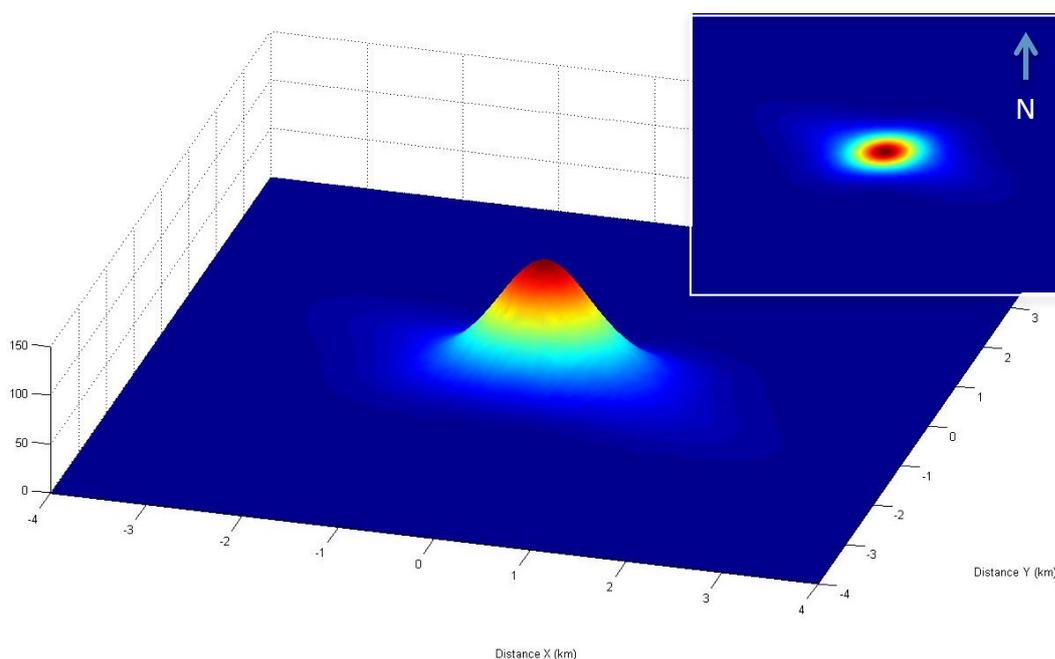


Figura 4.6 – Visualização do método KBBES acompanhada de uma análise (tipo Monte Carlo) para efeitos dos erros sistemáticos.

Para mostrar os efeitos dessas variações no tamanho das elipses – desta vez sobre os mapas produzidos –, três regiões foram consideradas: a região de São Paulo, na parte interna da rede e cercada por vários sensores do tipo IMPACT; a região de Belo Horizonte, com sensores principalmente do tipo LPATS; e a região de Cuiabá, localizada na borda da rede, onde se espera a ocorrência de elipses com semieixos maiores (conforme a Figura 3.4). A comparação entre tais regiões pode ser vista nas Figuras 4.7, 4.8 e 4.9, que trazem também a variação anual do tamanho médio (mediana) do semieixo maior das elipses de segurança (lado direito das figuras). Regiões com

extensões equivalentes foram utilizadas na geração dos mapas (aproximadamente um grau em ambas as direções). Observa-se que, de um modo geral, os efeitos dos tamanhos e orientação das elipses não apresentaram grande interferência na geração dos mapas.

A Figura 4.7 mostra a densidade de relâmpagos para a região de Belo Horizonte e as variações anuais do tamanho médio do semieixo maior das elipses. Esta região é caracterizada por uma boa eficiência de detecção e com grande precisão de localização. Os tamanhos médios (mediana) do semieixo maior das elipses para esta região são da ordem de 0.62 km. Este tamanho foi obtido com base em todas as descargas (flashes filtrados para descargas intranuvem) que ocorreram sobre a região, e este mesmo procedimento é utilizado nas próximas figuras. Observa-se na Figura 4.7 um sensível aumento no tamanho médio das elipses para os últimos anos, o que deve estar associado com a instalação de novos sensores LS7000 na região ao sul, em São Jose dos Campos e Cachoeira Paulista, em 2007-2008: como no período apenas dois sensores LS7000 estavam instalados, um número razoável de soluções (com baixo pico de corrente) é dado apenas por este par de sensores, implicando numa situação de redundância mínima, o que faz com que os tamanhos das elipses tendam a aumentar. Os mapas produzidos sobre esta área apresentam pouca ou nenhuma tendência espacial.

Para a região de São Paulo (Figura 4.8), observam-se resultados semelhantes a Belo Horizonte, porém com uma pequena influência da orientação e tamanho das elipses, possivelmente mais evidente devido à resolução espacial e à escala utilizada. O tamanho médio (mediana) do semieixo maior das elipses para esta região é da ordem de 0.79 km. Este tamanho relativamente maior das elipses está associado possivelmente à existência de mais sensores do tipo IMPACT (TOA+MDF), o que possibilita a detecção com menos sensores e, logo, com uma geometria menos favorável para as elipses de confiança. Como as elipses dependem basicamente da geometria e do número de sensores participantes, os tamanhos das elipses para esta região são um pouco maiores.

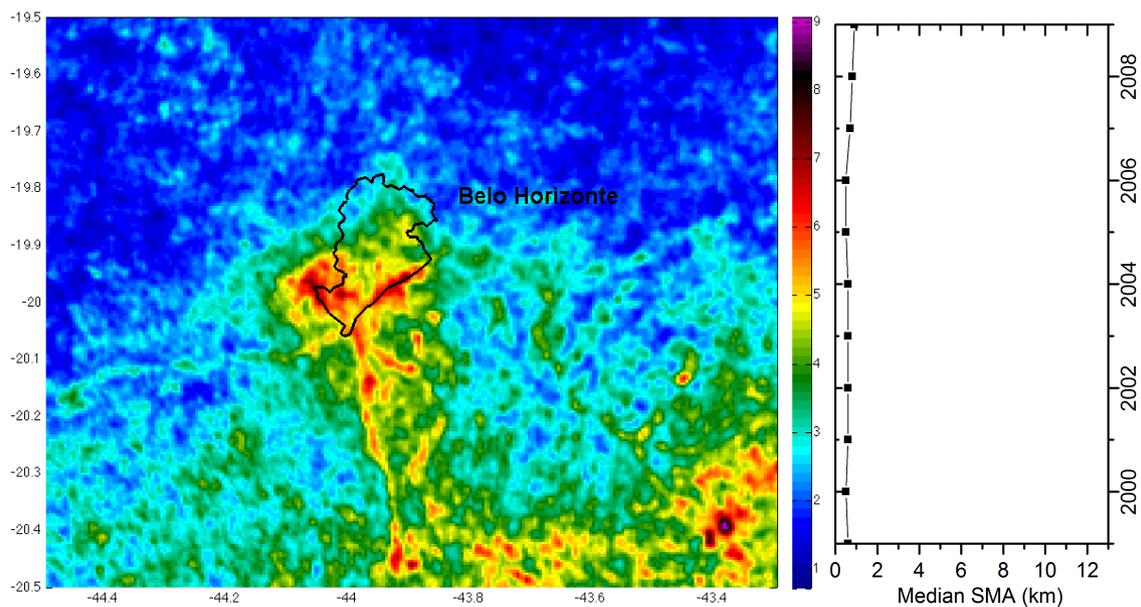


Figura 4.7 – Mapa utilizando o método KBBES sobre a região de Belo Horizonte e variação do tamanho mediano do semieixo maior da elipse ao longo dos anos.

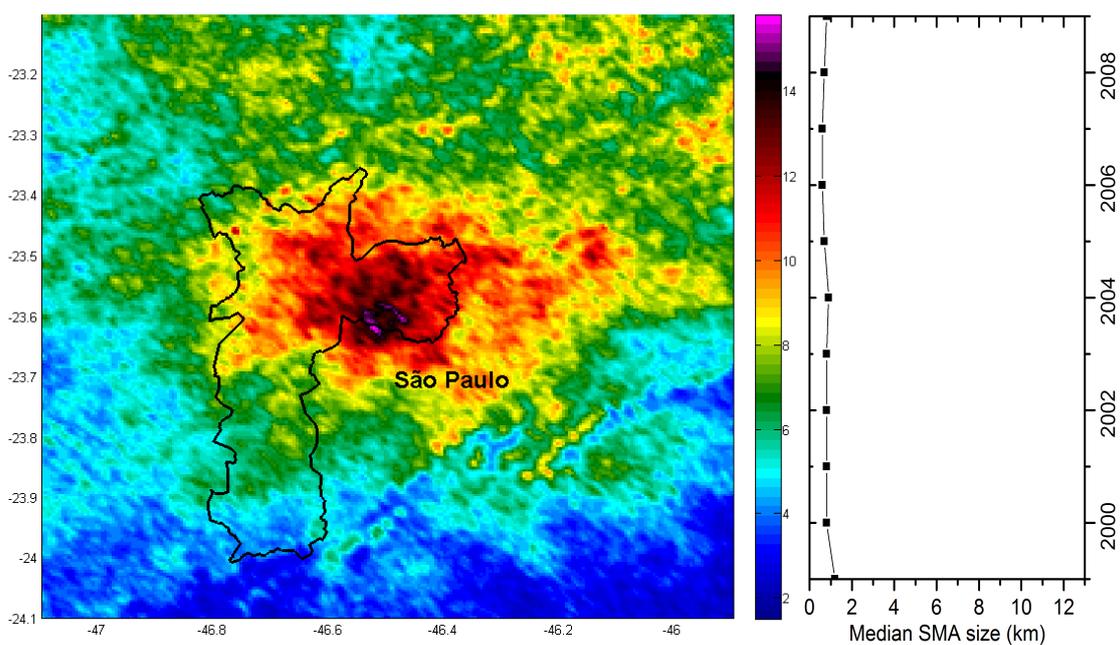


Figura 4.8 – Mapa utilizando o método KBBES sobre a região de São Paulo e variação do tamanho mediano do semieixo maior da elipse ao longo dos anos.

Finalmente, para a região de Cuiabá (Figura 4.9), os resultados mostraram uma tendência mais forte, com possível orientação preferencial das elipses no sentido Noroeste-Sudeste. O tamanho mediano do semieixo maior das elipses para esta região foi de 5.65 km, com as menores elipses ocorrendo no ano de

2004. Ressalta-se que esta região está ainda nas bordas da rede e sua eficiência de detecção é consideravelmente reduzida.

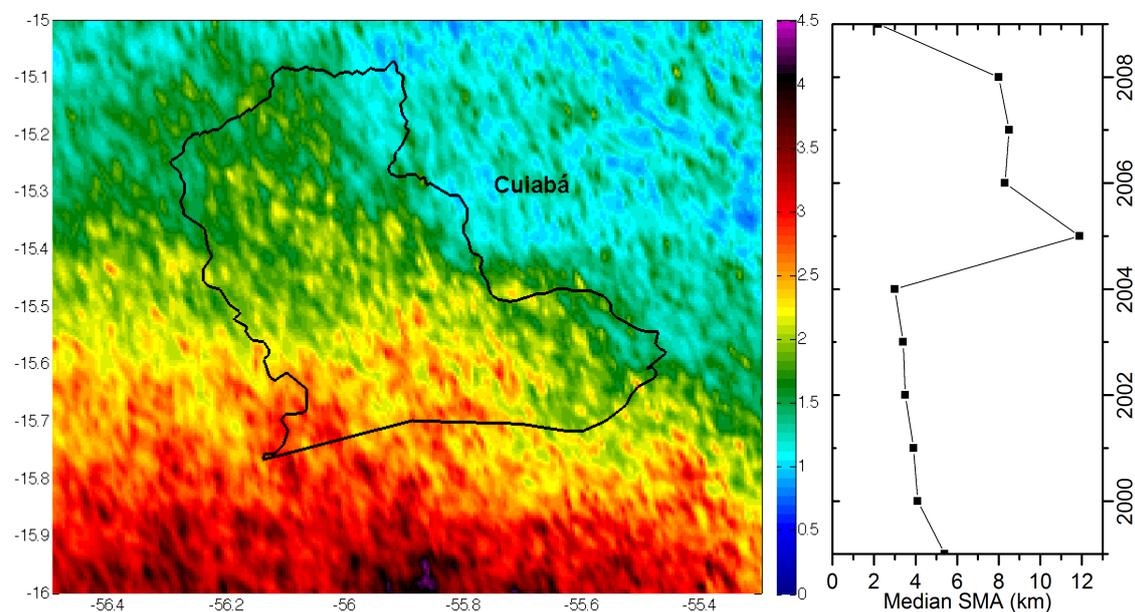


Figura 4.9 – Mapa utilizando o método KBBES sobre a região de Cuiabá e variação do tamanho mediano do semieixo maior da elipse ao longo dos anos.

Estes aspectos indicam que, ao predominarem elipses com tamanhos (medianos) de semieixos inferiores a um quilômetro, pouca ou quase nenhuma tendência deverá ser observada nos mapas. Por outro lado, regiões onde os semieixos das elipses superam 10 km terão possivelmente erros sistemáticos que interferem na aplicação do método KBBES.

Outro aspecto importante a ser considerado é o fator de suavização adotado: variações deste fator afetam consideravelmente a visualização do mapa final. Portanto, cada usuário precisa buscar os valores mais apropriados para o estudo que se deseja realizar. Todas as análises deste trabalho levaram em consideração um fator de dois para a suavização, ou seja, os semieixos da elipse com o dobro do tamanho original.

Em resumo, o método de KBBES, proposto nesta pesquisa, parece fornecer resultados satisfatórios e sua aplicação pode ser muito útil em análises que utilizem alta resolução espacial. Ressalvas devem ser feitas, no entanto, para

situações em que os erros sistemáticos associados ao sistema de detecção predominam.

#### 4.3. Mapas de densidade com aplicações ao setor elétrico

O objetivo final da aplicação do modelo de eficiência e do método utilizando as elipses é a criação de mapas de densidade ou climatologias de relâmpagos. A análise que segue foi desenvolvida pensando em aplicações no setor elétrico. A Figura 4.10 mostra a densidade final obtida sobre o entorno da principal linha de transmissão do país (linhas de 750kV e 600kV), ligando a usina hidroelétrica de ITAIPU à região de São Paulo.

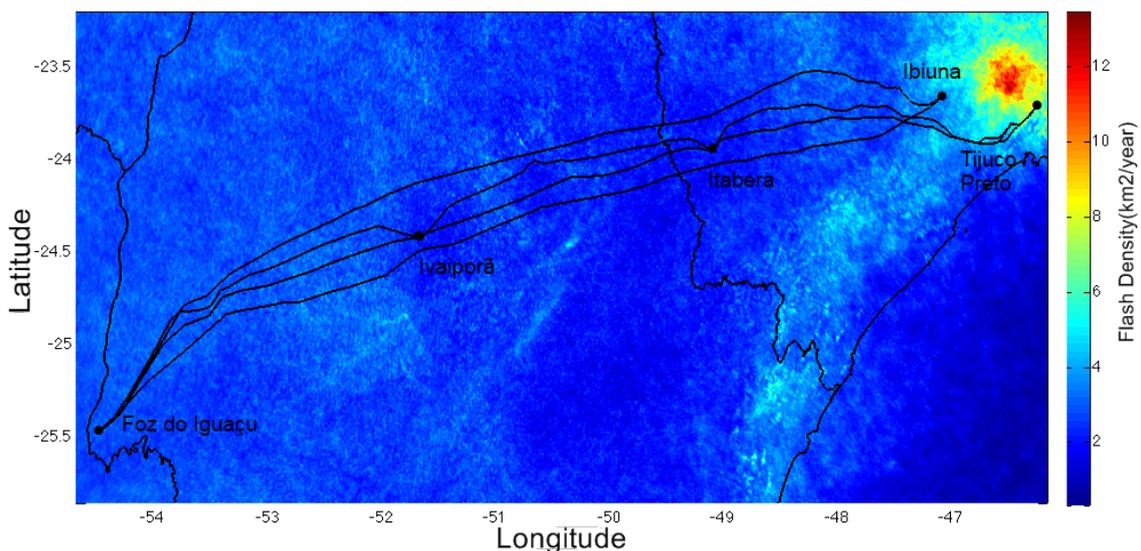


Figura 4.10 – Mapa da incidência de descargas ao longo das linhas de transmissão de ITAIPU utilizando o método de *kernel* baseado nas elipses, corrigido pelo MEDR4.

Os resultados, de modo geral, são semelhantes aos encontrados nos estudos já realizados para a região de São Paulo (e.g. NACCARATO *et al.*, 2003). Outra observação relevante refere-se à maior incidência de descargas ao longo da costa leste, que possivelmente segue a cadeia de montanhas nesta região. O limite nordeste das linhas de transmissão coincide com a região de São Paulo, indicando que as subestações mais suscetíveis às descargas estão nesta região.

O método KBBES se mostrou satisfatório para a análise pretendida, gerando resultados consistentes e com pouco efeito de erros sistemáticos, mesmo para regiões de eficiência relativamente menor, o que também é condizente com os resultados da seção anterior. Com relação ao novo modelo de eficiência e seu desempenho, as variações na densidade de relâmpagos são da ordem de 20% quando o modelo é considerado, com o máximo da densidade passando de aproximadamente 11 para 14  $flashes.km^{-2}.ano^{-1}$ . Este valor pode mudar dependendo dos intervalos de pico de corrente adotados na pesquisa, visto que o fator de ponderação descrito na metodologia (seção 3.2.3) depende desta informação. A Figura 4.11 mostra um perfil ou corte ao longo de uma das linhas de transmissão (linha de 750 kV ao Norte na Figura 3.1). O perfil indica que as subestações intermediárias (Ivaiporã e Itaberá) estão localizadas em regiões com as mais baixas densidades de relâmpagos. Ele também indica que as maiores densidades ocorrem nas proximidades de São Paulo, concordando com a Figura 4.10.

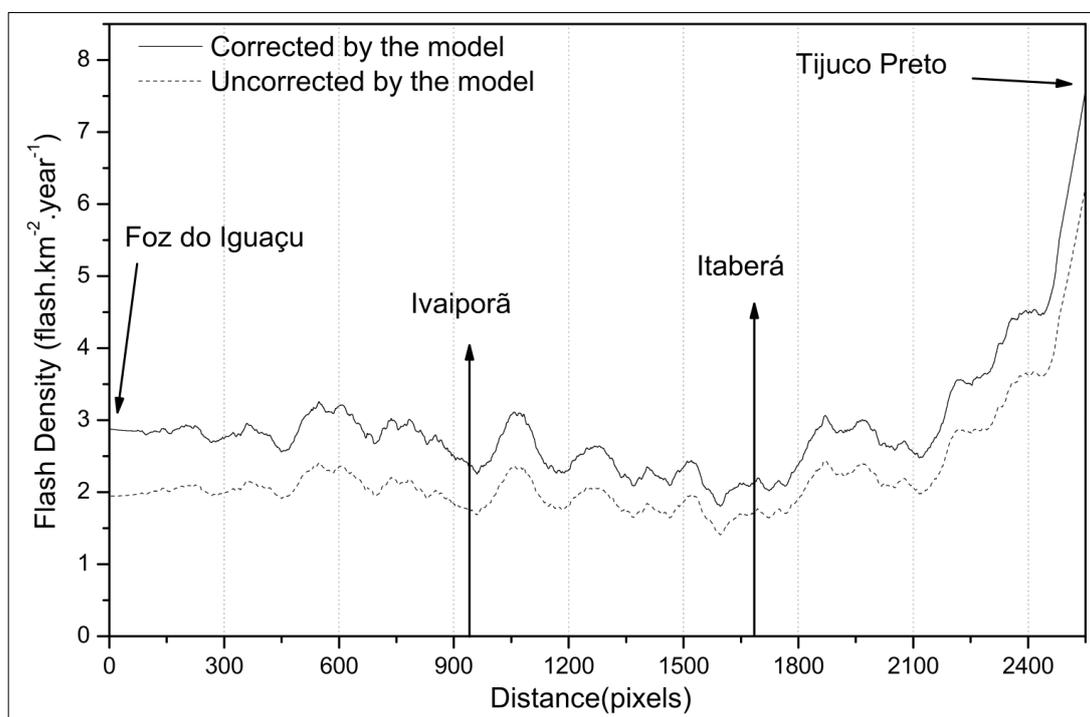


Figura 4.11 – Perfil ao longo da linha de transmissão de 750kV. Setas apontam a localização das subestações.

#### 4.4. Métodos alternativos para superar efeitos de desempenho

Conforme já destacado, as variações de desempenho ao longo dos anos podem não ser completamente abordadas pelo uso do MED. Para estas situações, outras metodologias, que são apresentadas a seguir, podem ser utilizadas. A Figura 4.12 mostra uma análise temporal mensal das descargas obtidas pela RINDAT não só para os *flashes* detectados, mas também para os três filtros propostos na seção 3.2.4.

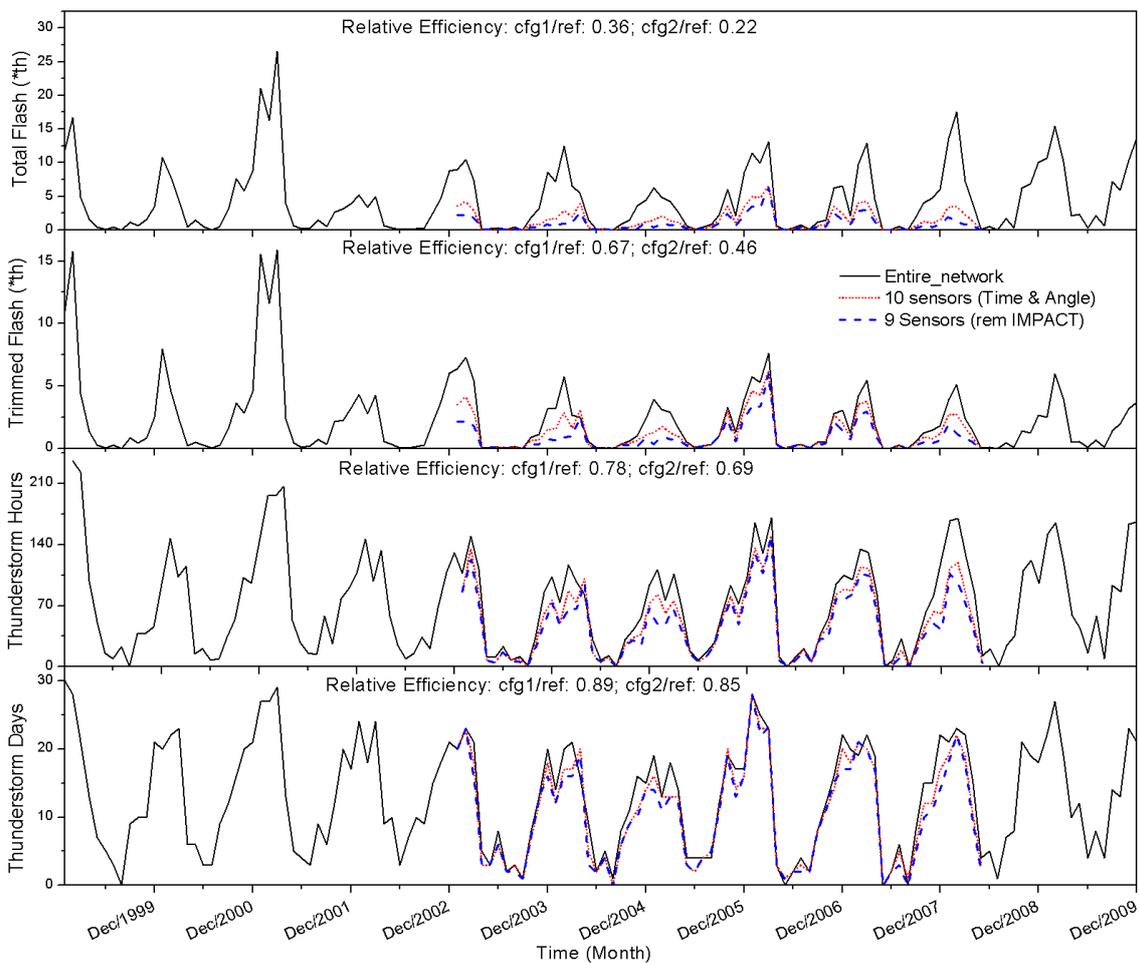


Figura 4.12 – Análise temporal mensal de relâmpagos utilizando diferentes tipos de abordagem: contagem de *flashes*, *flashes* filtrados para baixas correntes, HTs e DTs elaborados para os diferentes cenários: toda a rede (linha preta), cenário com 10 sensores (linha pontilhada vermelha) e cenário com 9 sensores (linha tracejada azul). Valores de eficiência relativa entre os diferentes cenários também podem ser observados.

Quando a contagem de *flashes* (topo do painel) obtida pela rede de referência (todos os sensores da RINDAT) é comparada com o primeiro cenário (cfg1 com

10 sensores, linha vermelha da figura), uma diferença da ordem de 64% (com 36% de eficiência relativa) pode ser observada. Essa diferença é significativamente reduzida quando os relâmpagos filtrados para as baixas correntes são considerados (segundo painel, com 67% de eficiência relativa média), devido à equalização da sensibilidade. De forma similar, quando HTs e DTs obtidos a partir dos dados de relâmpago (filtrados para descargas positivas abaixo de 15kA) são considerados, as diferenças são reduzidas para aproximadamente 20% e 10%, respectivamente (78% (HTs) e 89%(DTs) de eficiência relativa), conforme pode ser observado no terceiro e no quarto painel. Esta análise mostra que mesmo com uma rede significativamente reduzida (36% de eficiência relativa), os resultados para os HTs e os DTs são relativamente similares àqueles obtidos pelo cenário de referência.

Os resultados para o segundo cenário (cfg2) podem ser vistos na Figura 4.12 pela linha tracejada em azul. Trata-se de uma condição extrema, com eficiência relativa de apenas 22%. Este desempenho relativo aumenta para 46% quando se consideram os dados filtrados para baixas correntes, e para 69% e 85% quando se consideram THs e TDs, respectivamente. Isso indica claramente que as variações extremas de desempenho da rede podem ser mitigadas com o uso da análise através de DTs.

Sob a perspectiva espacial, os efeitos sobre o desempenho do sistema de detecção apresentam resultados similares, conforme pode ser visto na Figura 4.13. Duas condições de rede foram comparadas nesta análise: o cenário de referência (rede inteira) e o primeiro cenário (cfg1, com 10 sensores). A análise foi feita sobre a região descrita na metodologia (Figura 3.1). Três parâmetros foram analisados para este caso: a contagem de *flashes* (CF), HTs e DTs. HTs e DTs foram acumulados, utilizando-se um raio de 8km, a partir do centroide de cada célula do mapa, com base na análise da Seção 3.2.4.1. Mapas de eficiência relativa também são mostrados na figura. A escala de cores utilizada para cada parâmetro foi escolhida para fornecer um efeito visual similar ao dos mapas da primeira linha (cenário de referência). Para obter uma escala mais consistente entre a CF e os DTs/HTs, foram utilizadas equações adaptadas de

estudos anteriores (ANDERSON *et al.*, 1984; RAKOV; UMAN, 2003):  
 $0.11 * FC^{1/4}$  para HTs e  $0.06 * FC^{1/4}$  para DTs.

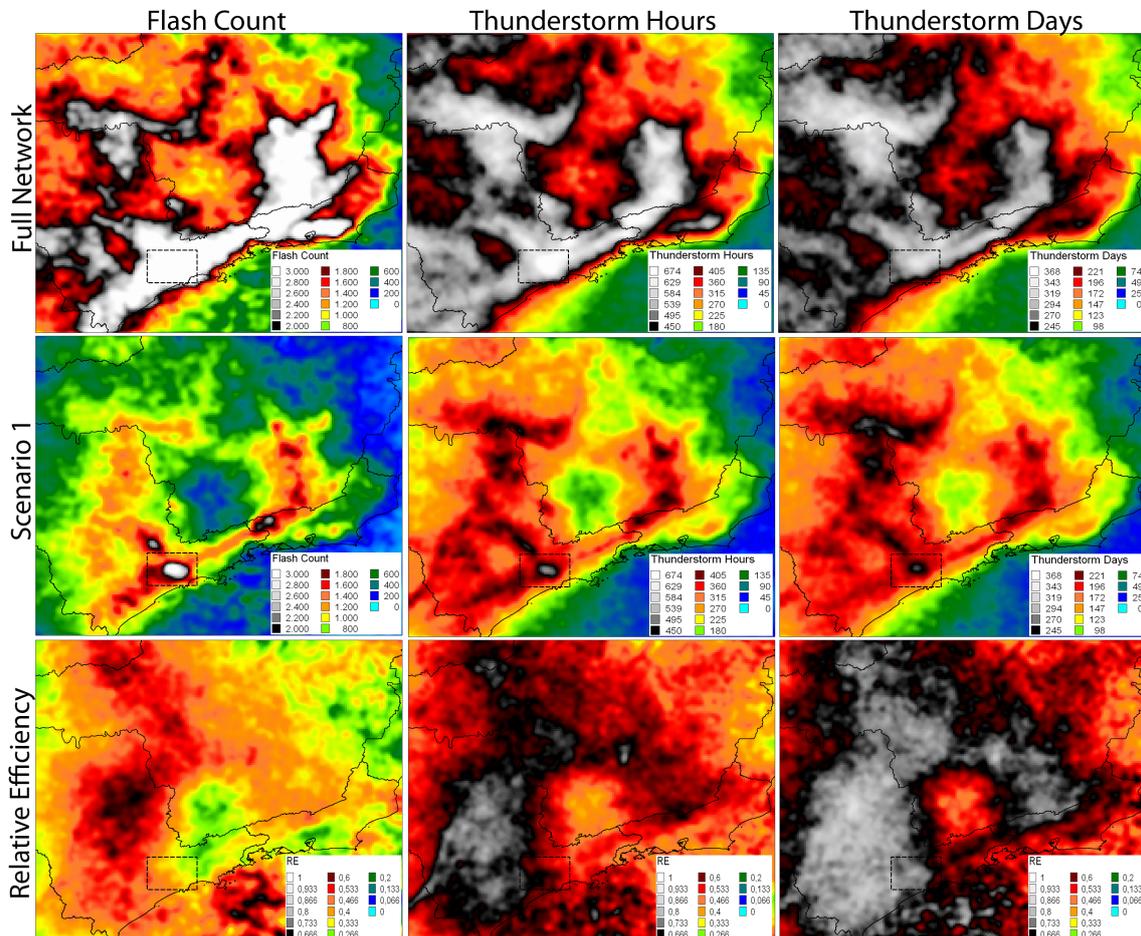


Figura 4.13 - Análise espacial utilizando as diferentes abordagens (colunas) – contagem de *flashes*, HTs e DTs – e os diferentes cenários (linhas): toda a rede (ref) e o cenário com 10 sensores (cfg1). A eficiência relativa entre os dois cenários (razão entre cfg1 e ref) também podem ser observada. Retângulo pontilhado indica a região usada na análise temporal.

Analisando a Figura 4.13, observa-se que a distribuição espacial de *flashes* não é bem reproduzida pelo primeiro cenário (cfg1), quando comparado ao cenário de referência. Por outro lado, quando HTs e DTs são considerados, a comparação dessa distribuição espacial se torna muito mais consistente. Esse resultado é quantificado pelos mapas de eficiência relativa (linha de baixo na Figura 4.13). Tal resultado está de acordo com os obtidos na análise temporal, que foi feita utilizando dados de dentro da região destacada pelo retângulo pontilhado na figura. É importante destacar que a eficiência relativa de DTs e

HTs, para a análise espacial, é relativamente menor do que a obtida na análise temporal, o que está possivelmente relacionado ao tamanho reduzido da região utilizada para acumular os dados de descarga (raio de 8 km ao invés da região retangular). Este efeito está associado à Equação 3.4 descrita na metodologia. É importante notar que, quando a eficiência de detecção se torna muito baixa (principalmente nas bordas do domínio abrangido pelo primeiro cenário), os métodos não são capazes de reproduzir as características dos relâmpagos. Isso pode ser observado nas bordas oeste e nordeste do domínio em questão.

Os resultados indicam, portanto, que os métodos propostos são consideravelmente eficientes na equalização do desempenho, tanto na perspectiva temporal quanto espacial. Estes procedimentos podem auxiliar no uso dos dados de sistemas de detecção para a obtenção de análises (espaciais e temporais) mais confiáveis e realistas, especialmente quando longos períodos são considerados.

#### **4.5. Singularidades Físicas**

Embora as análises anteriores sobre as diferentes metodologias apontem variações espaciais e temporais da distribuição das descargas, é possível observar que seus impactos não modificam os principais padrões espaciais observados para as descargas no Brasil, já analisados em diferentes estudos, principalmente sobre a região Sudeste (GOMES, 2002; NACCARATO *et al.*, 2003; PINTO *et al.*, 2007).

Com base nisso, procedeu-se a análise das variáveis físicas mencionadas nesses estudos como sendo responsáveis pelas características dessa distribuição. O enfoque da presente pesquisa se deu sobre a ilha de calor urbano de São Paulo e sobre a atuação da altitude (em larga escala, sobre a região do Vale do Paraíba, e em alta resolução, sobre as regiões de São Paulo e Belo Horizonte) na ocorrência de relâmpagos, buscando novas perspectivas para a atuação destes elementos sobre as descargas.

#### **4.5.1. Densidade, TIT e sua relação com a altitude**

A análise em larga escala, sobre a região do Vale do Paraíba, buscou mostrar como as tempestades interagem com a elevação desta região, assumida como fator (estático) preponderante sobre a formação/desenvolvimento das mesmas neste local. A Figura 4.14 compara os valores obtidos pela análise de densidade de relâmpagos e pela contagem de TIT ou de “iniciação de tempestades”. Essas informações estão sobrepostas aos contornos de elevação e mostram, ainda, a alta densidade de relâmpagos sobre a região de São Paulo, associada também a outros efeitos (efeito urbano).

É possível observar que as duas informações apresentam resultados diferenciados: embora os relâmpagos se concentrem sobre regiões específicas, as tempestades parecem ter início sobre uma região mais ampla. Além disso, as tempestades parecem não iniciar na parte interna do vale (região separada pelas montanhas, aproximadamente no centro dos mapas), o que pode ser visto pela variação abrupta dos valores de TIT e pelo aspecto constante da densidade, considerando a mesma região.

Ressalta-se que esses aspectos estão, ainda, possivelmente, ligados à direção preferencial do deslocamento das tempestades, que é normalmente de Oeste para Leste para a região de São Paulo. Essa informação se baseia na observação de diversas imagens de radar e satélite (não mostradas) e é confirmada no trabalho de Held e Escobedo (2010), que determinaram a orientação predominante do deslocamento das tempestades para a região de Bauru como sendo na direção Noroeste-Sudeste. Por tratar-se de uma região relativamente próxima da região analisada neste estudo, seus resultados podem ser estendidos também para este caso. Se a direção fosse contrária, por outro lado, seriam esperadas mais tempestades se formando ao longo da costa, que não é evidenciado. Outros efeitos dinâmicos podem também estar atuando e não podem ser descartados (ciclogênese pós-montanha, por exemplo, possivelmente na porção nordeste dos mapas).

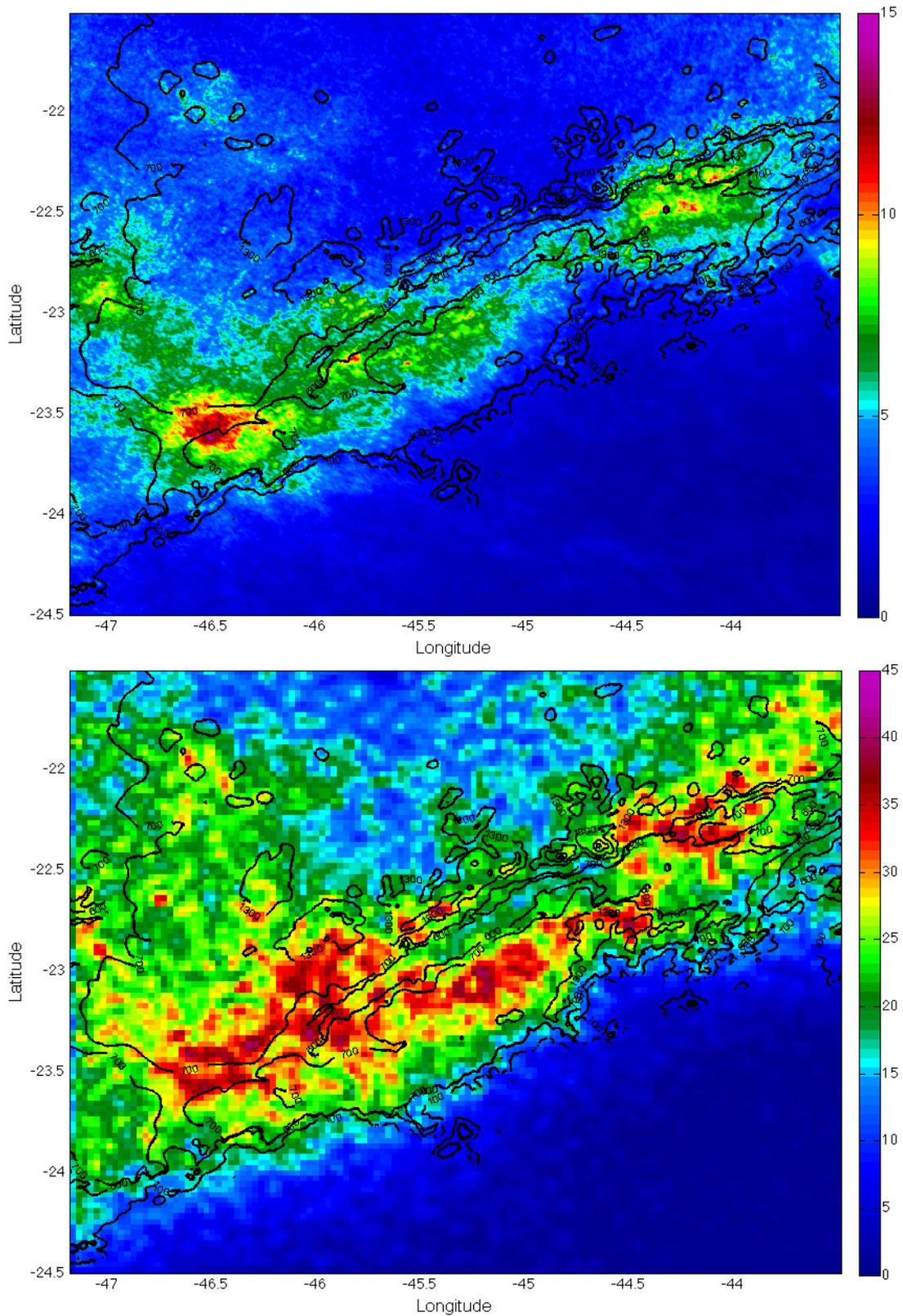


Figura 4.14 – Mapas de densidade de relâmpagos (acima) e de TIT, início das tempestades (abaixo), sobre a região do Vale do Paraíba. As linhas pretas indicam os contornos da elevação.

A comparação dos resultados para a TIT com os dados obtidos através do FORTRACC (análise de novos sistemas convectivos, definidos como 'N') é mostrada na Figura 4.15. Embora pareça haver uma razoável correlação para a porção oeste, a comparação de um modo geral não indica concordância entre as duas técnicas.

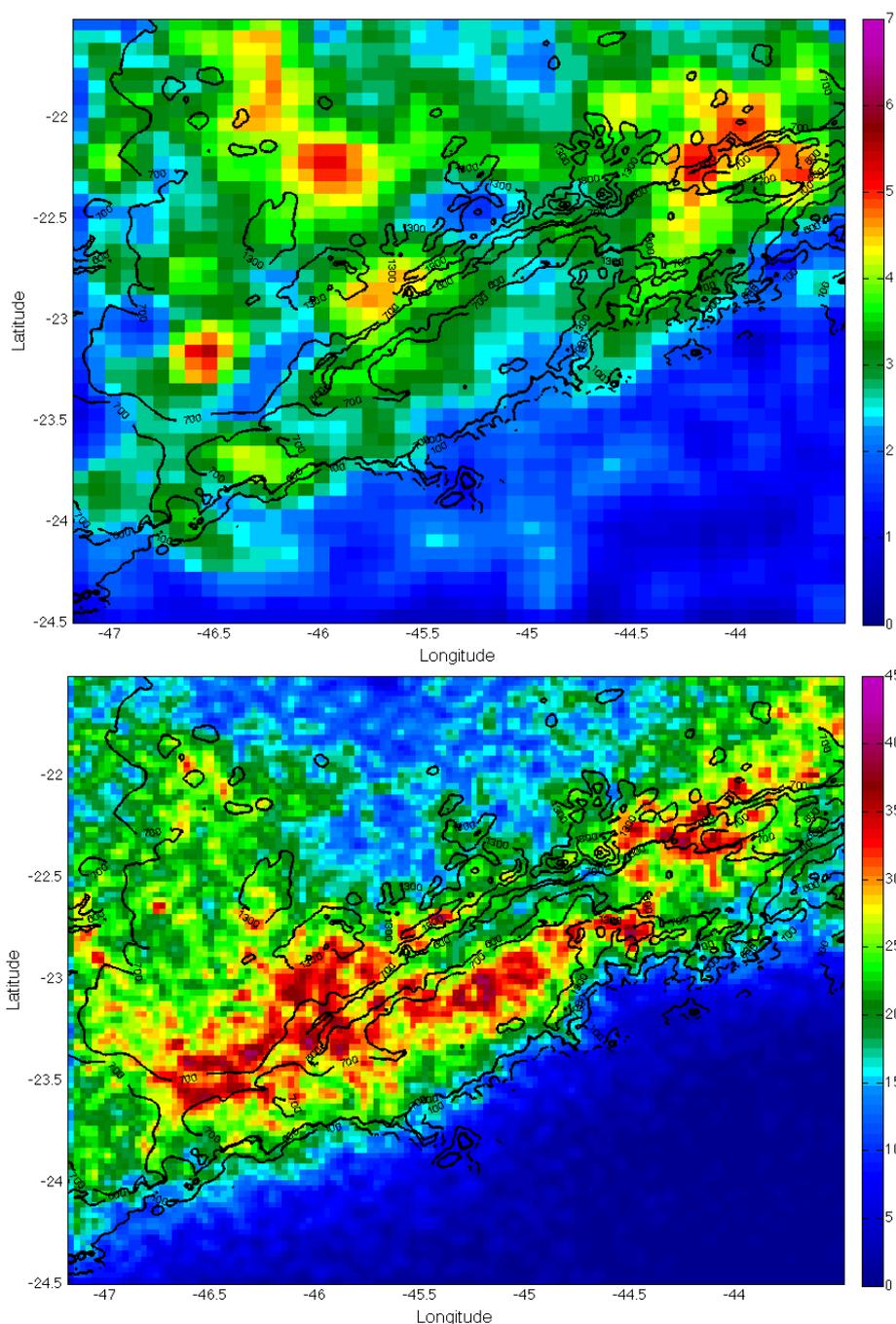


Figura 4.15 – Comparação entre os resultados obtidos através do início de tempestades obtido a partir de dados do FORTRACC (sistemas 'N', acima) e através da TIT.

Essa disparidade pode estar associada a aspectos relacionados às diferenças entre as duas técnicas: enquanto a TIT obtém os dados de relâmpagos já nos estágios iniciais da tempestade, o FORTRACC possui um limiar (de temperatura) baseado em um número mínimo de pixels. Isto implica ao FORTRACC a detecção de novos sistemas com certo deslocamento em relação aos sistemas obtidos a partir dos relâmpagos o que, dependendo da direção de deslocamento das tempestades, poderia explicar as diferenças espaciais entre as duas técnicas.

Nas Figuras 4.16 e 4.17 são expostos os resultados estatísticos obtidos pela análise das informações destacadas nos mapas da Figura 4.14 e 4.15. A análise levou em conta a densidade e a TIT dentro de cada intervalo de altitude, sobre a mesma região considerada nos mapas. Na Figura 4.16 é possível observar valores quase constantes de densidade até elevações da ordem de 1500 metros. A partir daí, um aumento da densidade de descargas com a altitude até 2200 metros e, depois, uma queda nos valores de densidade. De maneira diferenciada, parece haver um decréscimo quase linear da TIT à medida que a altitude aumenta (vide Figura 4.17), mesmo que os desvios, para este caso, sejam consideráveis.

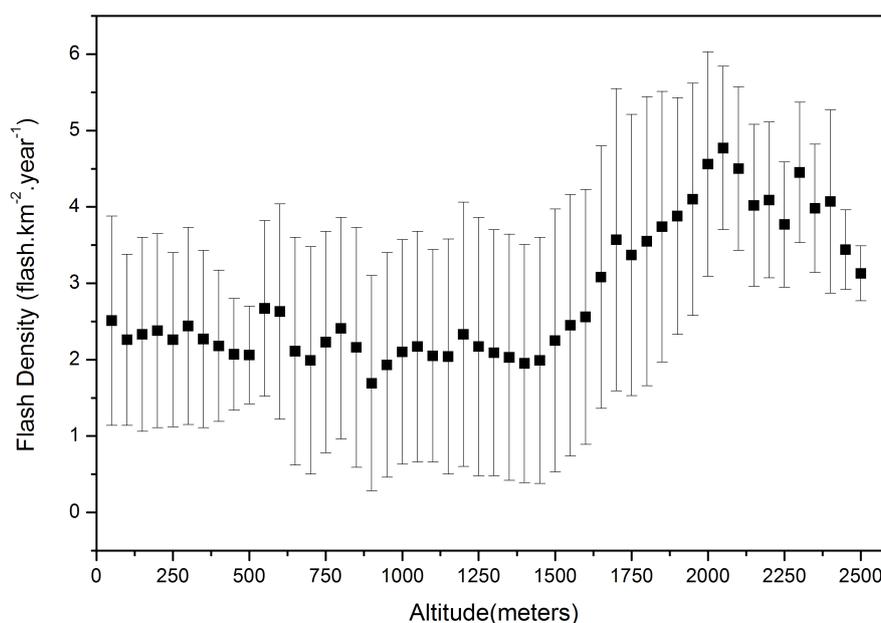


Figura 4.16 – Gráfico da densidade de relâmpagos em função da altitude, obtido sobre a região do Vale do Paraíba.

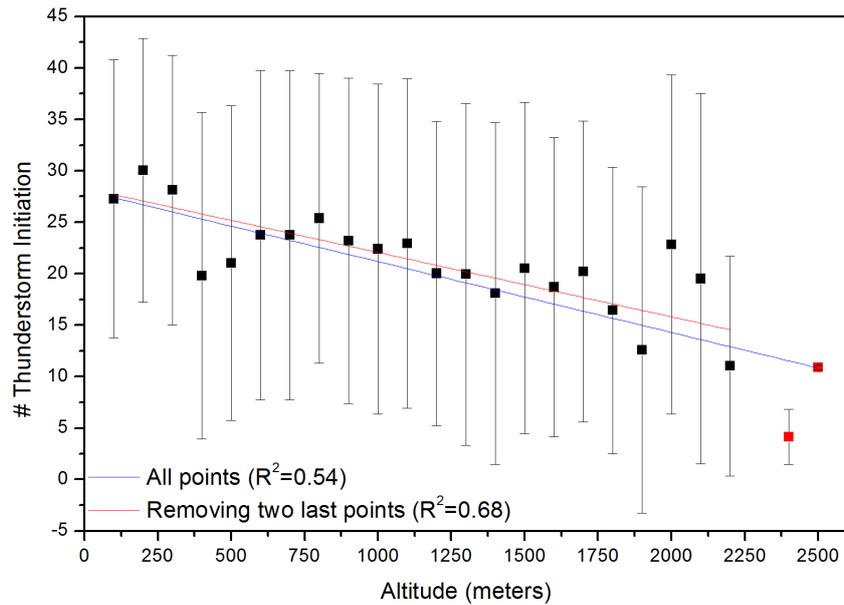


Figura 4.17 – Gráfico do início de tempestades (TIT) em função da altitude, obtido sobre a região do Vale do Paraíba.

Mesmo desconsiderando os dois últimos pontos (em vermelho) e considerando os desvios padrões no cálculo do coeficiente de determinação ( $R^2$ ), a inclinação da reta (-0.62) é significativa ao nível de confiança de 99%. Os referidos resultados podem ser indicativos de que as tempestades, para o caso do Vale do Paraíba, iniciariam em regiões mais baixas e se propagariam sobre as regiões mais elevadas. Sua origem, dessa forma, estaria associada aos maiores gradientes de altitude, que poderiam disparar a convecção e dar início às tempestades.

A relação das montanhas com as descargas ainda pode estar associada a outros aspectos, que se tornam mais evidentes ao se realizar análises em alta resolução, o que é abordado na seção seguinte.

#### 4.5.2. Altitude e relâmpagos: análise para alta resolução

Uma das principais aplicações do método KBBES é a elaboração de mapas de alta resolução espacial, a qual demanda uma grande quantidade de dados de relâmpagos e permite a análise em microescala da relação entre as descargas e a elevação. Esse tipo de observação não é possível para resoluções baixas e este é o primeiro estudo com esse nível de detalhe no Brasil.

A Figura 4.18 mostra um mapa de alta resolução sobreposto ao relevo<sup>17</sup>, sobre a região de Belo Horizonte. Essa sobreposição indica que uma cadeia de montanhas na direção Norte-Sul concentra grande quantidade de descargas acompanhando principalmente o seu topo. Esta região é destacada pela seta e linhas pontilhadas na Figura 4.18 e na visão detalhada mostrada na Figura 4.19. O mesmo acontece na direção Leste-Oeste, porém de forma menos evidente. Observa-se ainda uma concentração de descargas ao Sul e sobre a região metropolitana (sob a seta preta contínua), possivelmente atrelada à ocorrência da ilha de calor discutida por Pinto *et al.* (2004).

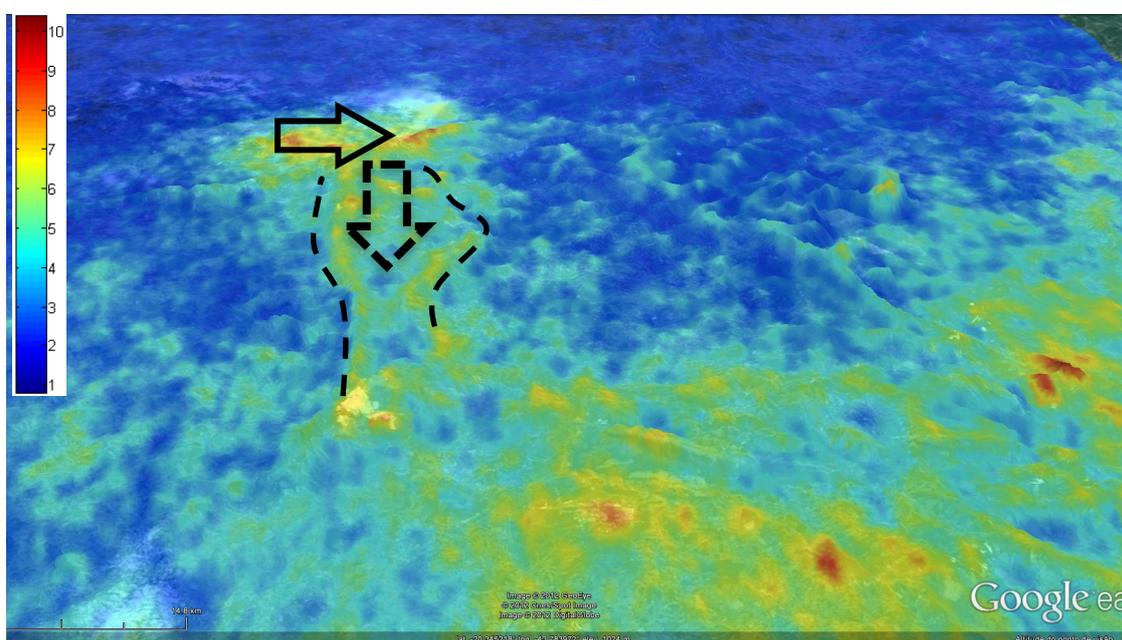


Figura 4.18 – Mapa de alta resolução (200m) sobre a região de Belo Horizonte. A Seta contínua está sobre a área urbana e indica a direção para uma análise detalhada do mapa. A seta pontilhada indica a região onde uma segunda análise em detalhes é feita sobre a cadeia de montanhas.

A seta contínua ainda aponta para o pico de densidade sobre as montanhas ao sul da área urbana, junto ao Parque das Mangabeiras (Figura 4.20). Esta observação também aponta para a atuação das montanhas na ocorrência de relâmpagos, seja pela atuação como forçante orográfica ou então pela facilitação do processo de attachment das descargas. Um aspecto importante

---

<sup>17</sup> Utilizando o software Google Earth®.

que pode estar atuando associado a este último aspecto é a ocorrência de descargas ascendentes seguidas de descargas subsequentes (pulsos  $\beta$ ) semelhantes às descargas NS, que poderiam estar sendo detectadas pelos sistemas de detecção (RAKOV; UMAN, 2003; DIENDORFER, 2007).

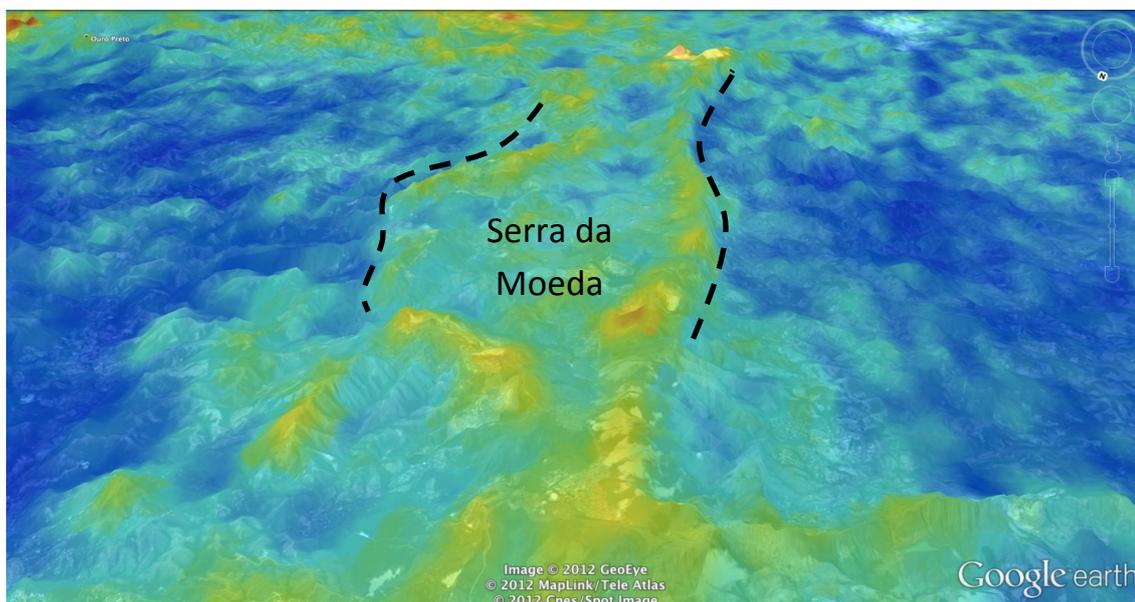


Figura 4.19 – Recorte do mapa de alta resolução (200m) sobre a cadeia de montanhas ao sul de Belo Horizonte, MG (conforme indicado pelas linhas e seta pontilhada na Figura 4.18).

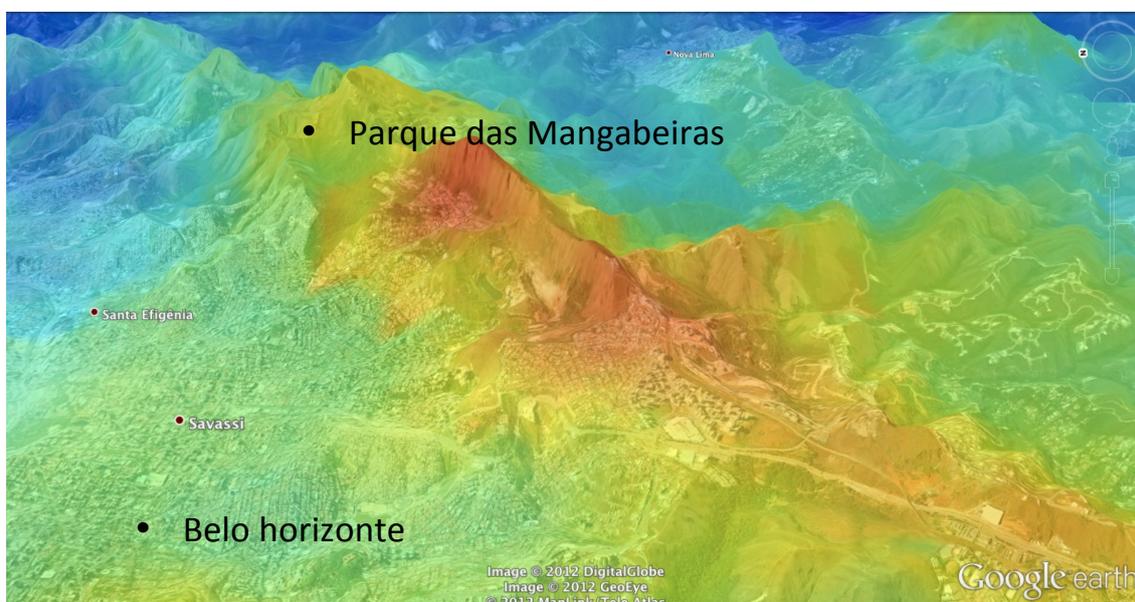


Figura 4.20 – Recorte do mapa de alta resolução (200m) sobre a região de Belo Horizonte, MG (conforme indicado pela seta preta contínua na Figura 4.18).

Seguindo na análise para altas resoluções, a Figura 4.21 mostra a densidade de relâmpagos sobre a região de São Paulo e arredores. Observa-se, primeiramente, uma alta densidade sobre a região urbana, possivelmente associada aos efeitos urbanos de uma forma geral mencionados no início deste trabalho (WESCOTT, 1995; NACCARATO *et al.*, 2003) e que serão discutidos na próxima seção. Com relação à interação com o relevo, observa-se que as descargas, nesta resolução, acompanham nitidamente seus contornos. Possíveis explicações para essa relação já foram levantadas, por exemplo, por Cummins *et al.* (2009) e destacadas na Seção 2.6: facilidade para as regiões elevadas no processo *attachment* do canal do relâmpago com a superfície, efeitos do relevo complexo sobre a radiação eletromagnética e efeitos termodinâmicos na inibição da convecção.

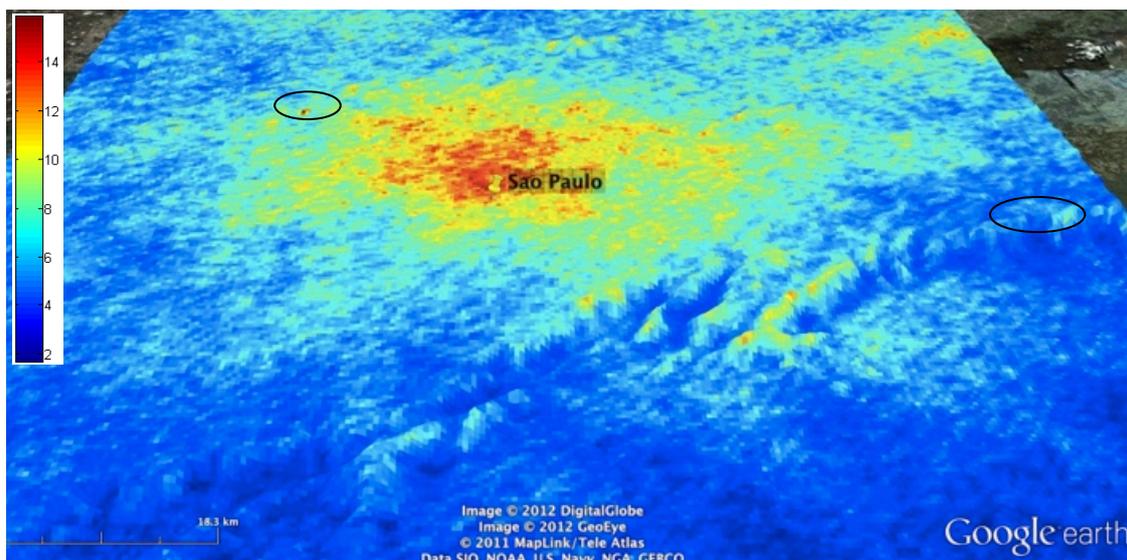


Figura 4.21 – Mapa de alta resolução (500m) da densidade de relâmpagos sobre a região de São Paulo. Regiões destacadas são utilizadas em análise posterior (Pico do Jaraguá, ao Norte; Serra do Mar, ao Sudeste).

A análise da direção de deslocamento preferencial das tempestades para esta região dá indicações de que efeitos de ordem termodinâmica poderiam ser os principais atuantes na ocorrência diferencial de descargas ao longo da costa: tempestades se movendo de Oeste para Leste seriam inibidas ao passar pela variação brusca de altitude nessa região (1000 metros para o nível do mar em poucos quilômetros). A figura ainda traz em destaque duas regiões que serão avaliadas com maior detalhe a seguir (círculos pretos).

Esta análise detalhada foi feita com base em uma resolução espacial de 100m, sobre duas regiões: o pico do Jaraguá, ao norte da cidade de São Paulo e sobre uma pequena porção da Serra do Mar, a sudeste. Com relação ao pico do Jaraguá (Figura 4.22), é possível observar uma grande concentração de descargas (maior densidade) exatamente sobre a montanha. Trata-se de um pico isolado (altutude efetida entre 350 e 450 metros) e com a presença de antenas, capaz de concentrar a atividade de relâmapagos, tanto por descargas NS como por descargas solo-nuvem (cf. RAKOV; UMAN, 2003; DIENDORFER, 2007), que podem apresentar descargas subseqüentes semelhantes às dos relâmpagos NS, conforme já discutido. Filmagens realizadas recentemente pelo ELAT/INPE mostram relâmpagos SN partindo desse local (SABA et al, 2012).

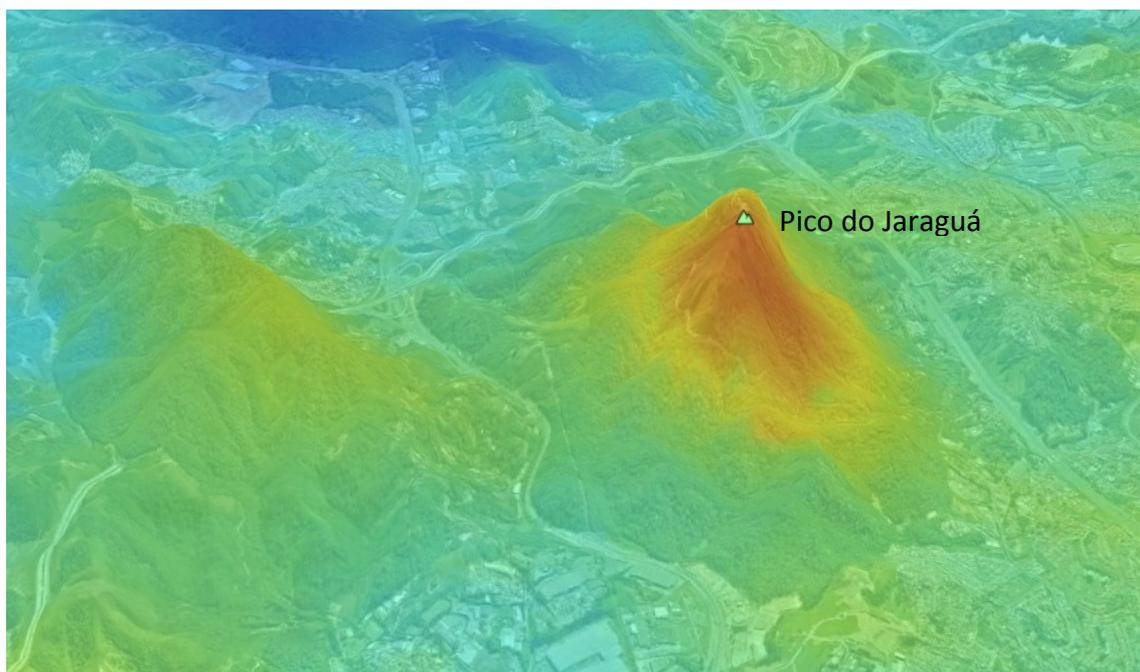


Figura 4.22 – Recorte do mapa de alta resolução (100m) sobre o Pico do Jaraguá, SP. Esta observação ainda indica que a precisão de localização do sistema de detecção para a região é relativamente alta. A mesma relação foi observada para outras regiões, que não serão destacadas no trabalho, mas que indicam uma boa precisão de localização do sistema de detecção, de modo geral, possivelmente inferior a 1 km.

O segundo recorte utilizado refere-se a uma pequena porção da Serra do Mar (Figura 4.23) e tem por finalidade mostrar, novamente, a relação dos relâmpagos com o relevo. Embora pareça haver uma pequena orientação preferencial nos mapas, causada pelas elipses, pode-se observar que as maiores densidades ocorrem sobre o rebordo da montanha, acompanhando de forma singular seu contorno. Densidades menores são observadas em ambas as direções à medida que o observador se afasta deste rebordo. Estes resultados fornecem indícios de que ambos os processos de *attachment* e termodinâmico poderiam estar atuando na ocorrência de relâmpagos para esta região.

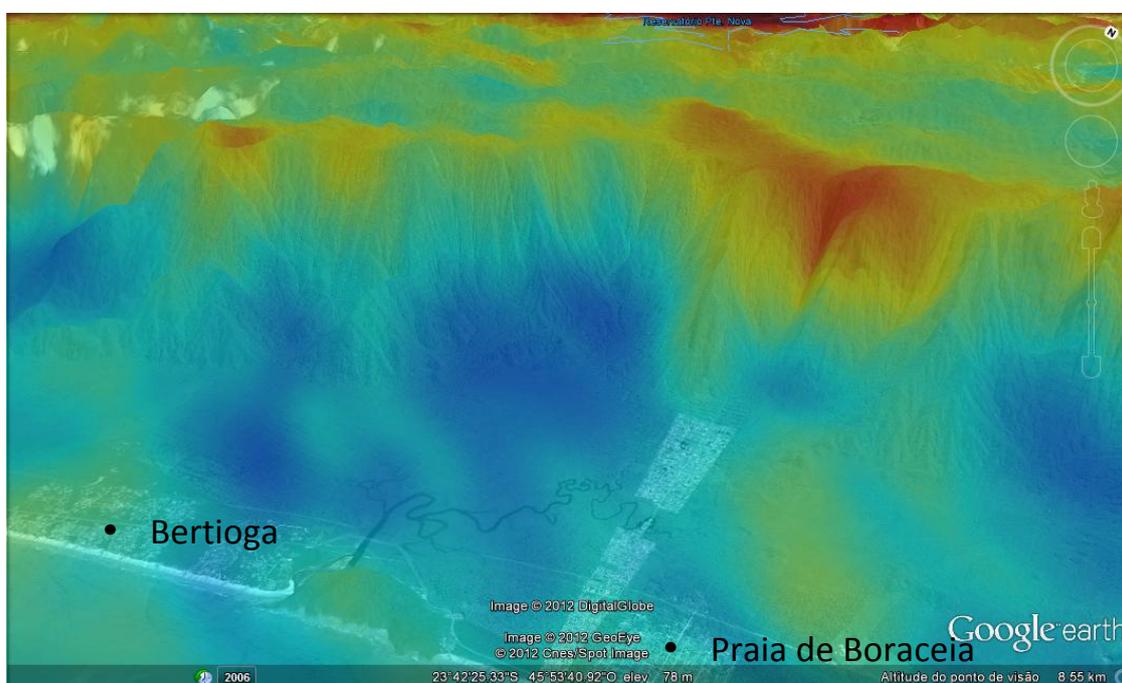


Figura 4.23 – Recorte do mapa de alta resolução (100m) sobre parte da Serra do Mar, conforme indicado na Figura 4.19.

Da mesma forma que para o caso de Cummins *et al.* (2009) sobre o Grand Canyon, estes resultados não são conclusivos e poderiam ser confrontados com dados de câmera rápida sobre estas regiões, o que fica como sugestão de trabalho a ser realizado no futuro, além, é claro, do uso de medidas de campo elétrico para a verificação de efeitos da propagação (distorção e/ou atenuação) da radiação.

### 4.5.3. Ilha de calor urbano de São Paulo

Outra análise realizada concerne ao aprofundamento do estudo da ilha de calor urbano de São Paulo, na tentativa de entender melhor como ocorre a formação de tempestades sobre essa região e qual seria o papel da ilha de calor sobre as características espaciais e temporais das descargas. Uma das primeiras indagações se refere à variação do tamanho da região urbana ao longo dos anos e seu impacto, tanto no crescimento da ilha de calor, quanto no aumento da atividade de relâmpagos. Nesse sentido, a Figura 4.24 mostra o crescimento da população de São Paulo, assim como o crescimento da área urbana obtido pela análise de imagens LANDSAT. O que se observa é uma tendência de estabilização da área urbana nos últimos anos, com taxa de crescimento reduzida. Isto pode ser resultado, por um lado, do processo de verticalização da referida cidade e, por outro, do maior controle (legislação) sobre o crescimento urbano, que se dá de forma mais ordenada. Os resultados concordam ainda com os obtidos por Ohata e Quintanilha (2005), que apontam para um crescimento de aproximadamente 8% no intervalo entre 1991 e 2002.

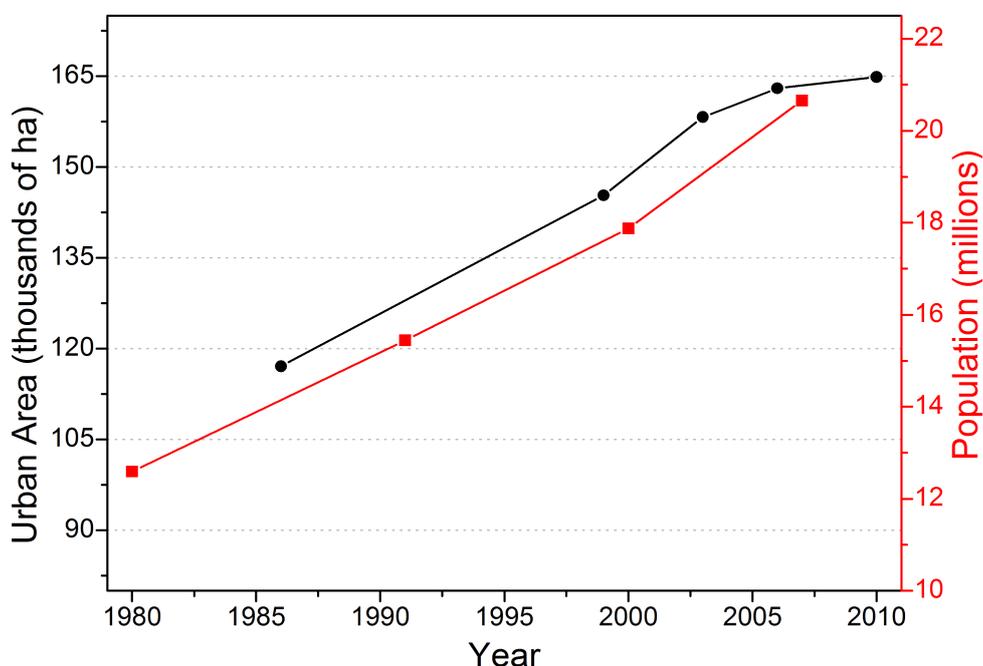


Figura 4.24 – Evolução da área urbana e da população da cidade de São Paulo.

A temperatura tende a acompanhar esse crescimento urbano, o que pode ser visto pela Figura 4.25, que leva em conta dados do GISS (conforme mencionado na metodologia). Observa-se um claro aumento da temperatura, possivelmente associado ao crescimento da área urbana: o maior aumento da temperatura (a partir de 1950) coincide com período de maior crescimento da área urbana, conforme observado na Figura 2.11. Além disso, o trabalho de Pinto Jr. *et al.* (2008) aponta para relações diretas entre o número de dias de tempestade (usado como parâmetro indicativo da atividade de relâmpagos) e o aumento da temperatura para esta região desde 1950.

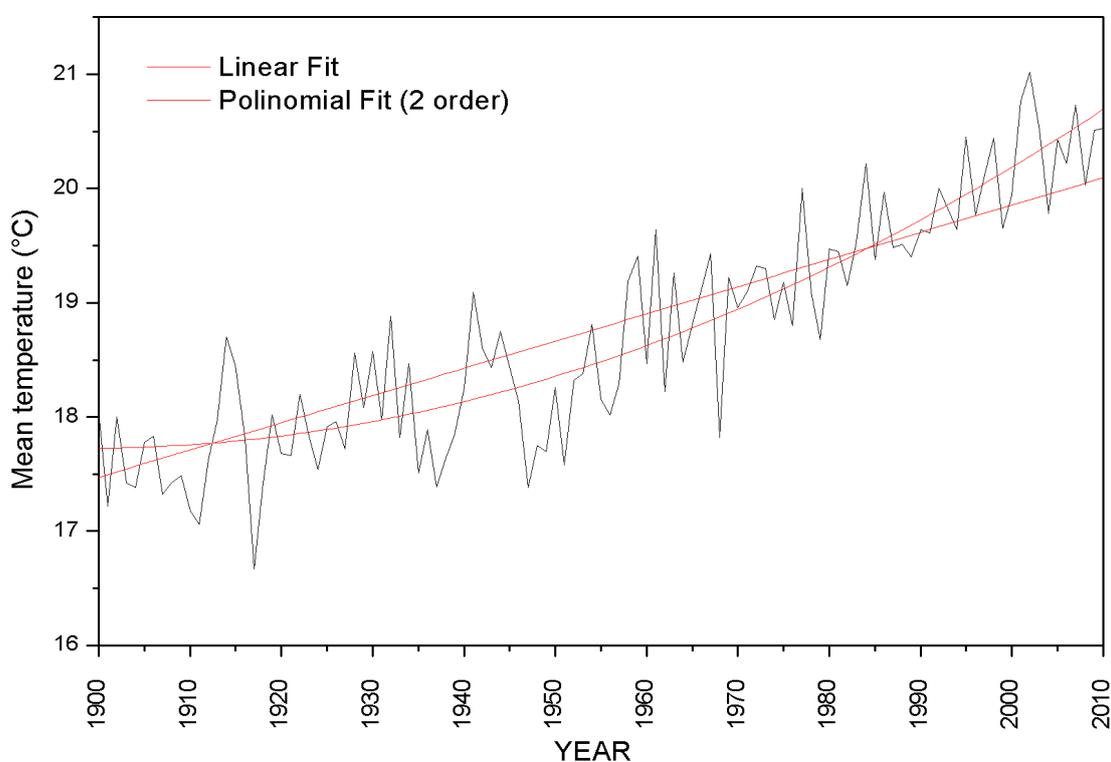


Figura 4.25 – Evolução da temperatura sobre a região de São Paulo (desde 1900) baseada em dados do GISS.

Com base nessas observações iniciais, foram feitas análises espaciais e temporais para melhor entender, a partir dos dados do sistema de detecção, a relação entre as descargas atmosféricas e a ilha de calor urbano de São Paulo. Será destacada, inicialmente, a análise temporal. Em seguida, com base em aspectos definidos na análise temporal, é exposta a análise espacial da ilha de calor.

#### 4.5.3.1. Análise temporal

Os resultados obtidos através das imagens LANDSAT acerca do crescimento da área urbana podem servir de base para a compreensão da variação da temperatura de superfície sobre a área urbana de São Paulo ao longo dos anos. As Figuras 4.26 e 4.27 mostram a análise da média de temperatura de superfície (LST) obtida através das imagens MODIS sobre um anel definido pelas duas regiões mostradas na Figura 3.11 (discutidas na Seção 3.3.3.1.), considerando-se apenas os meses de verão (dezembro a março). Nestas figuras não é possível observar nenhuma tendência de aumento da temperatura sobre a região urbana de São Paulo.

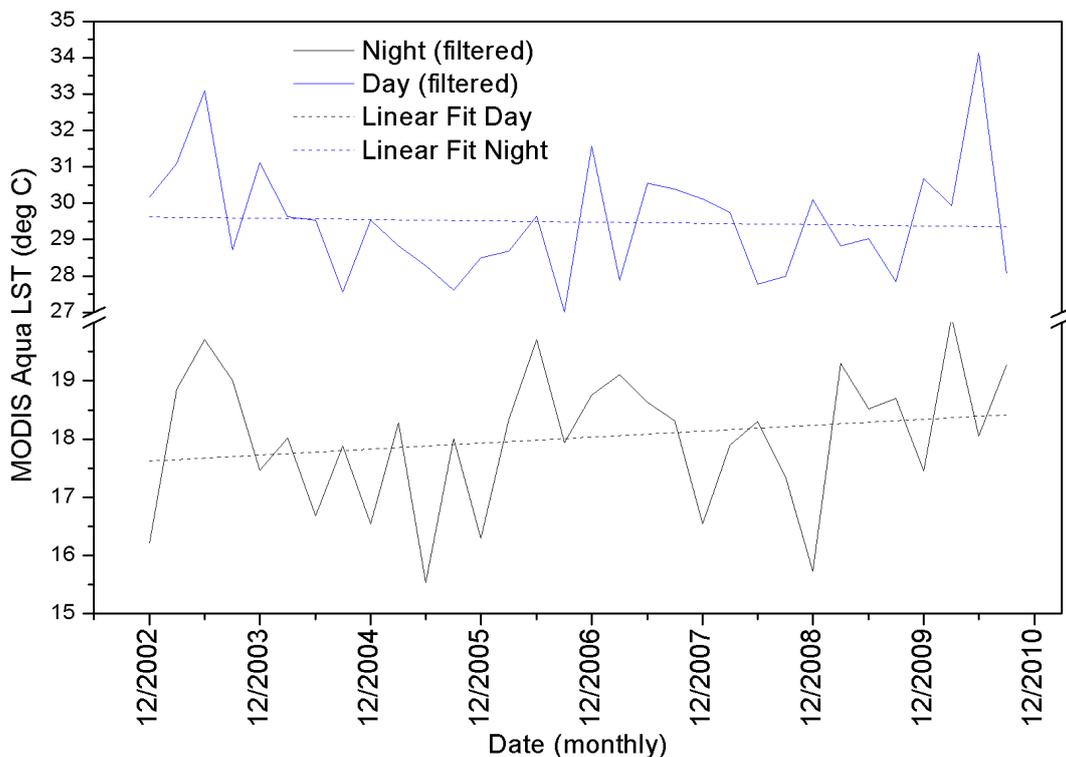


Figura 4.26 – Evolução temporal das médias de temperatura do satélite MODIS Terra obtidas para o anel em torno da área urbana de São Paulo nos meses de verão.

Para as imagens MODIS Aqua Day e Night, por exemplo, testes estatísticos apontam a probabilidade de 79% e 26%, respectivamente, para a hipótese de a inclinação da reta ser nula. O mesmo acontece para os dados MODIS Terra (91% e 79% de chance de a inclinação da reta ser nula), o que pode estar associado ao período de estudo relativamente curto (2000 a 2009): as

variações de tamanho da cidade ainda não seriam suficientes para discriminar novos pixels urbanos para a resolução espacial do satélite (1 km).

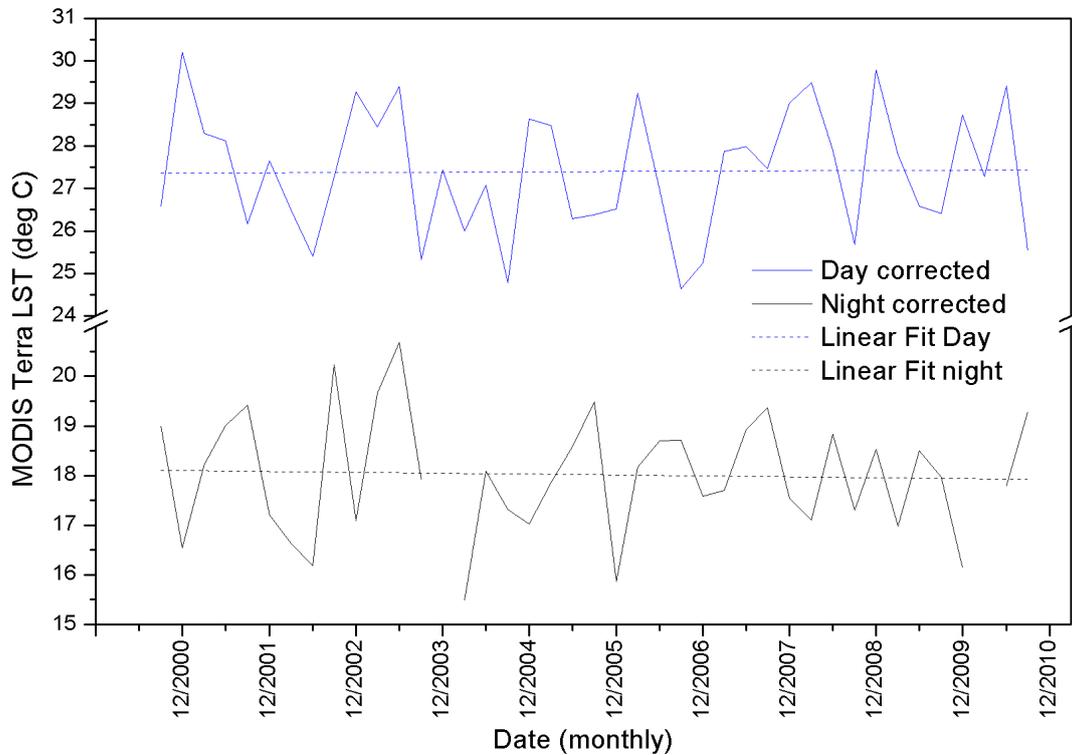


Figura 4.27 – Evolução temporal das médias de temperatura do satélite MODIS Aqua obtidas para o anel em torno da área urbana de São Paulo nos meses de verão.

Da mesma forma, os dados médios obtidos por meio das estações meteorológicas inseridas na máscara urbana (ver Figura 3.11) também não mostram tendências de aumento da temperatura, o que reforça a hipótese da pequena expansão urbana. Essas informações podem ser vistas na Figura 4.28, que também traz as variações no número de horas de tempestade (HTs) e de início de tempestades (TIT) sobre esta mesma máscara. HTs foram utilizadas devido à sua menor dependência em relação à variação de desempenho da rede, conforme destacado na Seção 4.4.

Para praticamente todos os casos, nenhuma tendência clara de aumento é observada, apenas oscilações, possivelmente associadas a outros fenômenos (el niño, la niña etc.). O único caso que apresenta uma possível tendência se refere ao mês de novembro, quando considerado de forma isolada (principalmente no que diz respeito à TIT). Este mês foi escolhido como sendo

indicativo do início da estação de tempestades, período em que pequenas mudanças na termodinâmica atmosférica poderiam causar variações mais perceptíveis na formação de tempestades.

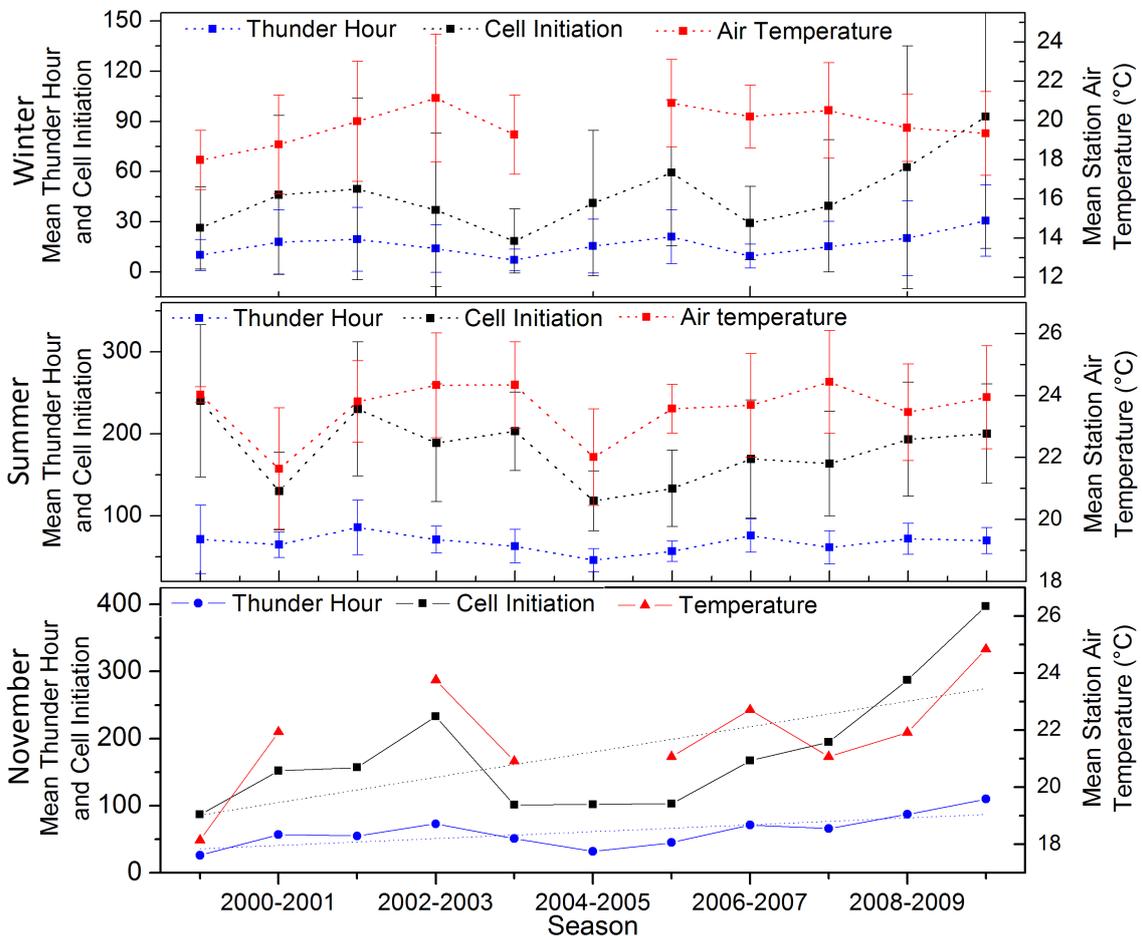


Figura 4.28 – Painel da evolução temporal das HTs (baseada em dados de relâmpago), do início de tempestades e da temperatura média do ar para o inverno (linha superior), verão (linha intermediária) e para o mês de Novembro (linha inferior).

Outra avaliação realizada refere-se à variação diurna da atividade de relâmpagos sobre a área urbana (Figura 4.29). Analisando-se os dados inseridos dentro da máscara urbana e considerando-se as informações em termos percentuais, é possível observar que o pico diurno da atividade de relâmpagos ocorre às 16h (hora local). Para a TIT, o pico também ocorre no mesmo horário; entretanto, sua distribuição não é tão concentrada quanto a dos *flashes*. É possível observar, ainda, que o aumento dos eventos para a TIT

antecede a evolução das descargas (*flashes*), o que mostra coerência na metodologia, com o início das tempestades antecedendo o máximo de *flashes*.

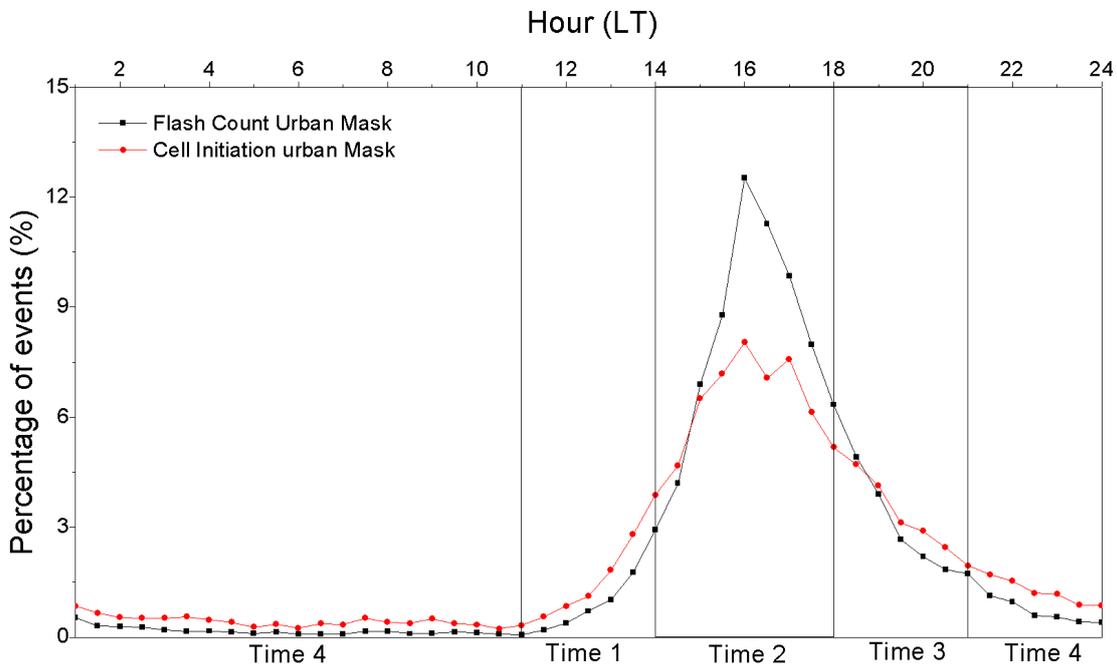


Figura 4.29 – Gráfico da variação diurna da atividade de relâmpagos (*flashes* e TIT) sobre a área urbana de São Paulo.

As análises temporais também serviram de base para o desenvolvimento da análise espacial, que será mostrada na seção seguinte.

#### 4.5.3.2. Análise espacial

A análise espacial foi concentrada em um único painel (Figura 4.30), que integra informações de horas de tempestade (HTs), TIT e da temperatura de superfície obtida através do MODIS. Os valores médios de cada variável, para todo o período de dados disponível, foram agrupados em quatro intervalos de horário e em duas estações anuais (abril a novembro e de dezembro a março). Os intervalos de horário foram obtidos buscando com base na Figura 4.30: 11h às 14h (T1), das 14h às 18h (T2), das 18h às 21h (T3) e das 21h às 11h (T4). Isso foi feito na tentativa de separar efeitos de diferentes condições meteorológicas que atuam sobre a região para os diferentes períodos do ano ou do dia. Destaca-se, ainda, que a imagem MODIS para o terceiro intervalo foi obtida através de uma ponderação ( $MODIS_{T3} = (MODIS_{T2} * 1.2 + MODIS_{T4}) / 2$ ), já

que não existem imagens do satélite para este intervalo. Os outros intervalos forma definidos como: T1 utilizando a imagen MODIS Terra Day; T2 utilizando a imagen MODIS Aqua Day; e T4 utilizando a imagen MODIS Aqua Night.

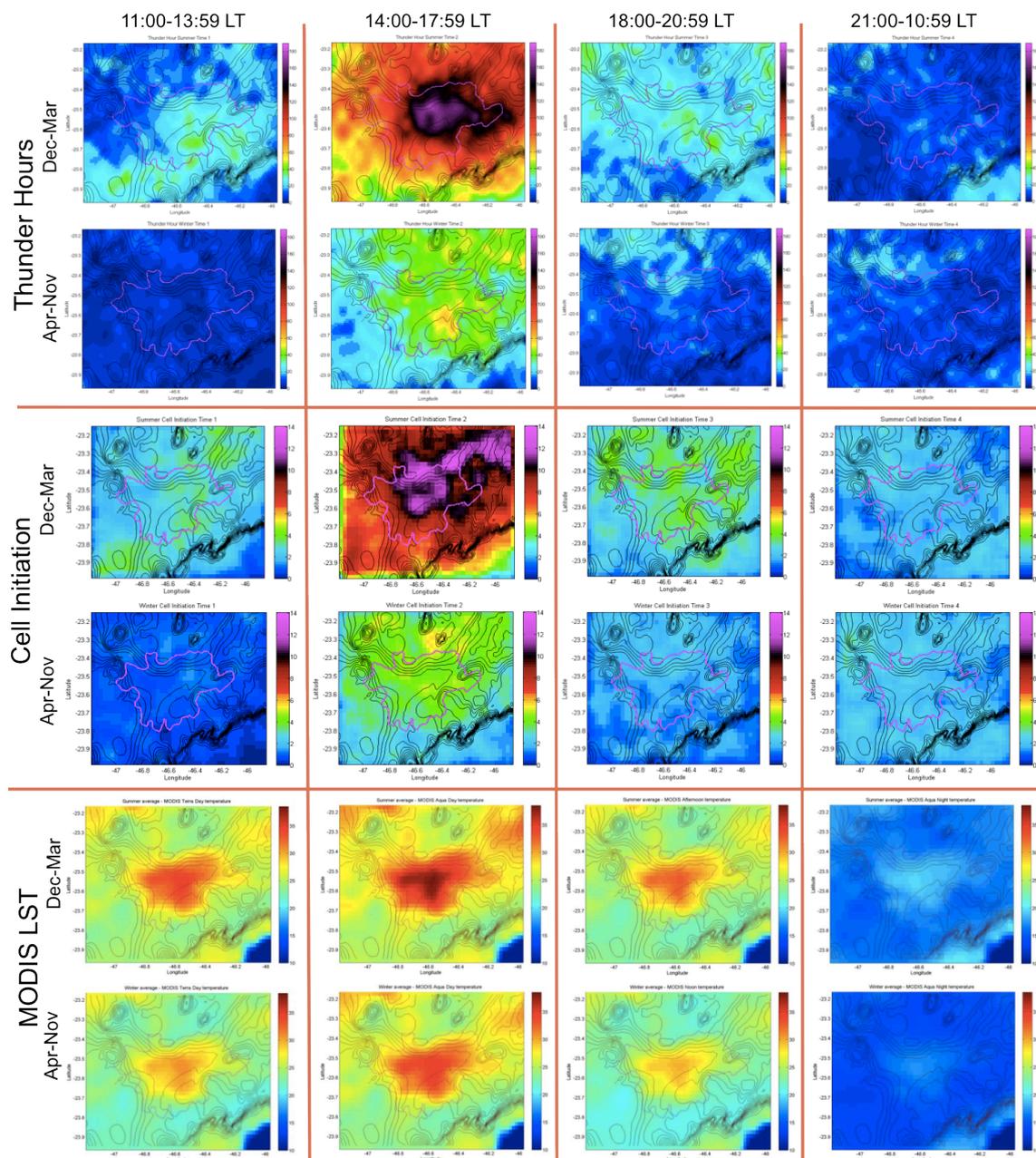


Figura 4.30 – Painele da análise espacial da ilha de calor urbano de São Paulo com informações de HTs, TIT e temperatura de superfície MODIS. Dividido em diferentes horários (colunas) e diferentes períodos do ano (linhas).

Uma das primeiras observações realizada é a concentração das descargas e da TIT sobre a área urbana, principalmente nos meses de verão e durante o intervalo das 14h às 18h. Considerando sua relação com a ilha de calor, é

possível observar que as maiores temperaturas de superfície ocorrem no mesmo horário e período do ano. Este resultado pode ser um indicador da importância da ilha de calor, aliada a outros fatores como a umidade, na formação de tempestades e na ocorrência de relâmpagos. As imagens MODIS parecem representar a ilha de calor de forma consistente, com o máximo ocorrendo no verão e durante o horário de maior energia térmica disponível. A temperatura parece ainda acompanhar as variações diárias da temperatura.

Outro aspecto singular se refere ao comportamento da TIT para este mesmo período e horário (terceira linha e segunda coluna do painel – L3C2, destacada parcialmente na Figura 4.31), que parece mostrar uma redução no número de tempestades tendo início exatamente sobre o centro da região urbana, o que não ocorre para o número de HTs ou mesmo para a densidade (não mostrada).

Esta observação pode indicar que as regiões de maior instabilidade se encontram ao longo do perímetro da área urbana e que o fator mais importante para a formação da tempestade é o gradiente de temperatura, que será maior nos entornos de tal área. Logo, as tempestades tenderiam a iniciar nas bordas e a se propagar sobre a região urbana, onde a maior parte das descargas é observada. Esta suposição segue as hipóteses discutidas por Williams *et al.* (2004), onde pequenas ilhas causariam a convergência de ar (brisa), que levaria a formação de nuvens (e tempestades) ao longo do perímetro desta ilha. Esta hipótese é ilustrada através da Figura 4.32.

Além dos aspectos destacados, outros mapas da Figura 4.30 parecem mostrar ainda resultados associados à temperatura: a L1C4 e a L3C4 indicam efeitos do calor específico da água sobre a ocorrência de relâmpagos durante a noite e/ou pela manhã, que ganha destaque sobre o oceano (porção Sudeste das imagens) e indica, seguindo as ideias de Williams e Stanfill (2002), um “contraste invertido” na atividade de relâmpagos associadas com o contraste oceano-continente. Destaca-se que as imagens MODIS não mostram o aumento noturno da temperatura devido ao fato de o produto LST fornecer informações apenas para áreas continentais.

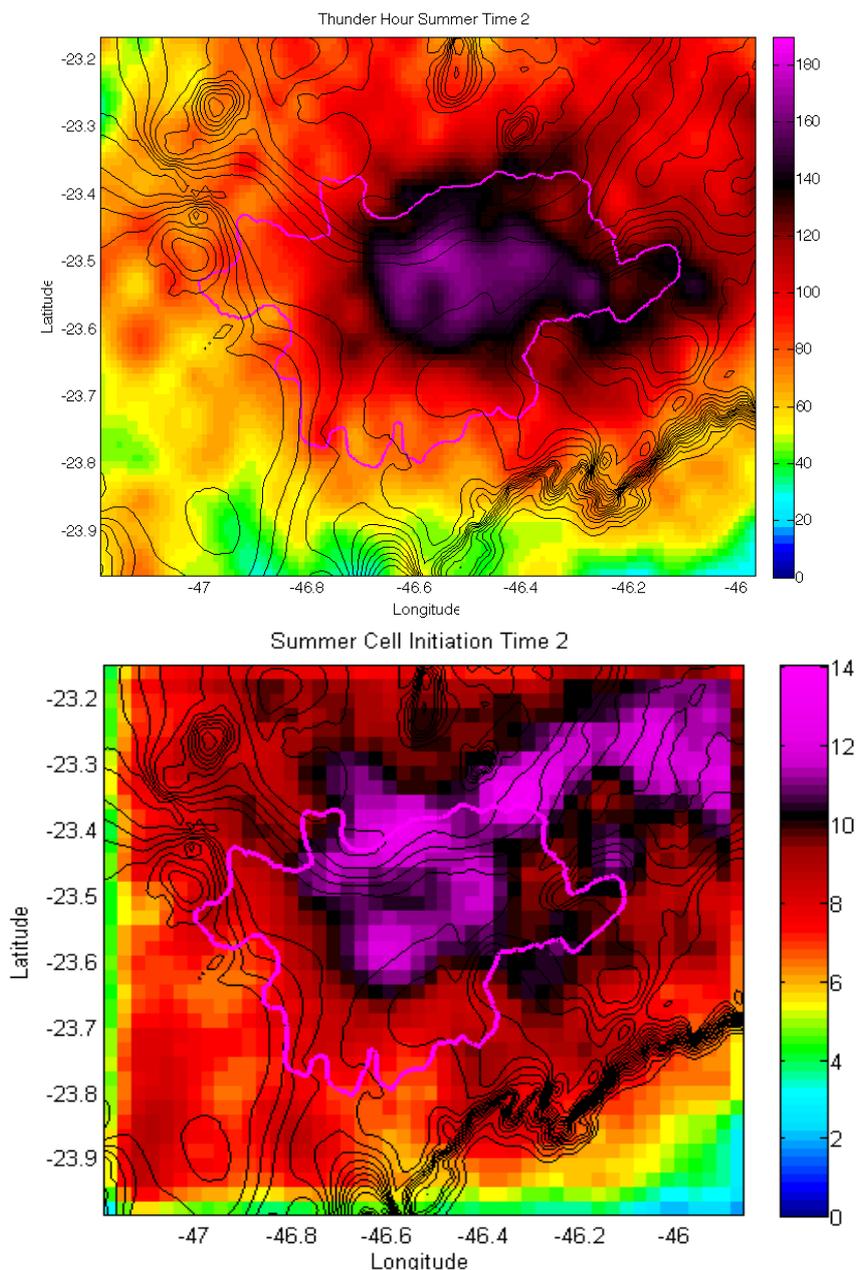


Figura 4.31 – Horas de Tempestade e TIT para verão e para o intervalo entre as 14h e 18h (destacado da Figura 4.27). TIT exhibe um comportamento singular, com a redução das descargas no centro da área urbana (polígono em magenta).

Efeitos da elevação não ficam evidentes nessa análise. Apenas pequenas concentrações das descargas logo ao norte da área urbana poderiam estar relacionadas a estes aspectos, conforme indica a Figura 4.33, principalmente pelo aparente início das tempestades (maior TIT) nas regiões próximas às montanhas, ao norte – pelo maior gradiente de altitude. Estes aspectos já foram abordados em maior detalhe na análise utilizando alta resolução.

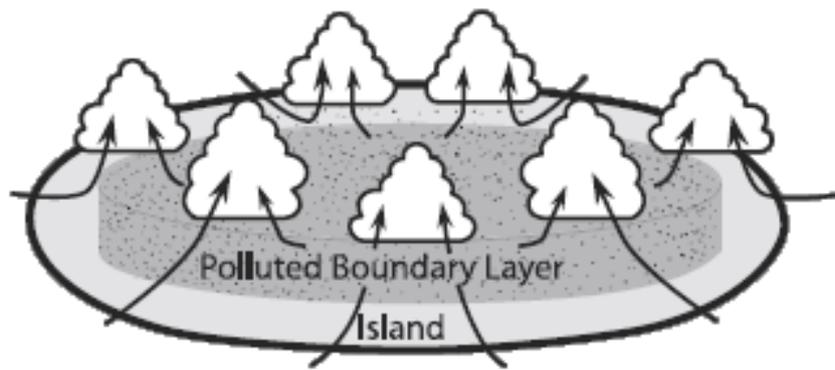


Figura 4.32 – Ilustração da convergência da brisa marinha sobre uma ilha.  
 Fonte: Williams et al. (2004).

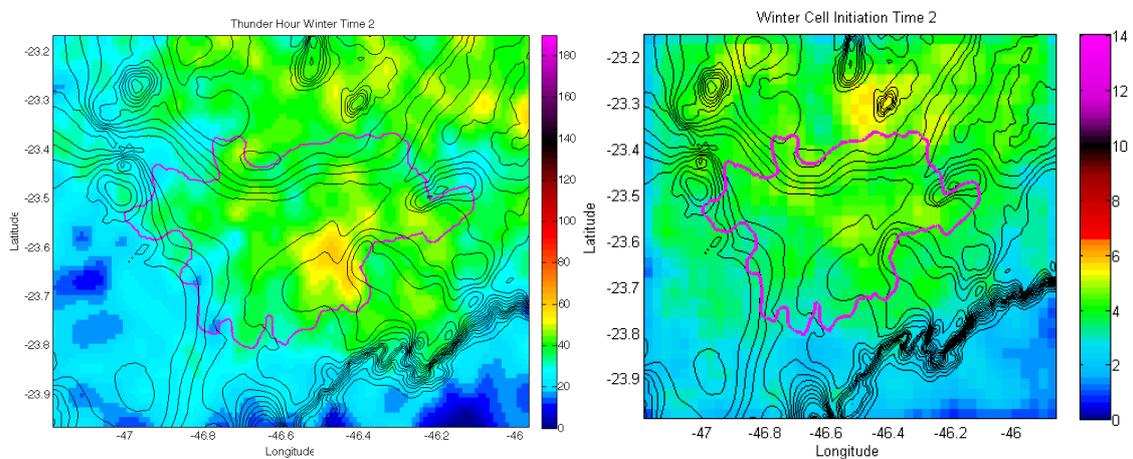


Figura 4.33 – Horas de Tempstade e TIT para o inverno e para o intervalo entre as 14h e 18h (destacado da Figura 4.27). Indica uma possível interação das descargas com as áreas elevadas.



## 5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

O presente trabalho envolveu uma série de aspectos relacionados ao desempenho dos sistemas de detecção de relâmpagos, às técnicas de espacialização dos dados e ainda às análises físicas associadas à distribuição de relâmpagos.

No que se refere ao desempenho do sistema de detecção, as contribuições se deram pelo aprimoramento e pelo desenvolvimento de técnicas utilizando a eficiência de detecção e a precisão de localização do sistema. O aprimoramento do modelo de eficiência relativa através da adição das variações angulares e de filtros de status mais eficientes teve efeitos positivos sobre a estimativa da eficiência da rede, que passou a ficar mais concentrada na sua parte interna, situação que é mais condizente com a realidade. O impacto dos filtros sobre as eficiências individuais de cada sensor também foram evidentes, já que se reduziu a (falsa) alta eficiência nas bordas da rede e se evitou, ao mesmo tempo, que períodos de não funcionamento dos sensores contabilizassem para suas curvas de eficiência. As correções dos dados de relâmpago a partir do modelo de eficiência MEDR4, para as regiões estudadas mostraram variações da ordem de 30% (ou seja, 70% de eficiência, em média), com maior impacto em toda a porção oeste da RINDAT.

Sobre a precisão de localização, o desenvolvimento do método de suavização, utilizando um *kernel* baseado nas elipses de segurança (KBBES), mostrou resultados relevantes, principalmente por permitir o desenvolvimento de mapas de alta resolução espacial sem prejudicar a estimativa de densidade e gerando uma superfície suavizada de melhor visualização. Os diferenciais deste *kernel* em relação aos existentes referem-se ao uso de eixos bivariados que incorporam os erros (precisão) de localização das descargas à análise. Este método se mostra muito eficiente quando os erros são basicamente aleatórios. Porém, quando erros sistemáticos predominam (situação que ocorre, geralmente, em regiões externas da rede), o método pode apresentar estimativas de densidade tendenciosas. O tamanho médio do semieixo maior das elipses para as regiões estudadas foi da ordem de 3 km. Observou-se

também uma variação significativa no tamanho das elipses ao longo do tempo, o que está possivelmente associado às mudanças de tecnologia de detecção ao longo dos anos.

Os métodos alternativos sugeridos no trabalho como forma de superar efeitos de desempenho, especialmente quando os modelos de eficiência não são viáveis de se obter (em uma situação de mudança de tecnologia, por exemplo), mostram uma boa capacidade de equalização do desempenho, mesmo em condições extremas de variabilidade de eficiência e sensibilidade do sistema de detecção. HTs e DTs se mostraram as metodologias mais eficientes, com um desempenho de 69% e 85%, respectivamente, para o caso da análise temporal. Os dados filtrados para baixos picos de corrente também se mostraram eficientes, com desempenho relativo da ordem de 46%. Para a análise espacial os efeitos são semelhantes. Uma conclusão importante sobre os resultados é a de que estes podem guiar usuários de dados de relâmpagos em climatologias utilizando longos períodos (quando há ainda maior suscetibilidade a variações das redes).

As metodologias apresentadas serviram de base para as análises posteriores, que envolveram os aspectos físicos da distribuição espacial e temporal das descargas. Nestas análises foi evidenciada, por exemplo, uma forte relação entre as descargas e as regiões de maior altitude. Essa relação é melhor percebida pela análise quantitativa, indicando um aumento da densidade de relâmpagos para altitudes entre 1500 e 2200 metros. Esta mesma análise foi realizada ainda para a técnica chamada de TIT, que tem por objetivo identificar o local e o horário do início da tempestade, utilizando os próprios dados de relâmpago. Para esta análise, uma relação linear negativa foi observada, a qual, aliada às análises qualitativas, sugere que as tempestades tendem a começar junto às montanhas e, então, propagar-se sobre elas.

Com relação à alta resolução, as regiões elevadas também apresentaram estreita relação com as descargas para as análises realizadas sobre as regiões no entorno de Belo Horizonte e de São Paulo. Estas relações podem ter origem em diferentes aspectos: processo de contato das descargas com o solo, efeitos

sobre a propagação da RE, ou ainda efeitos termodinâmicos na formação/inibição de tempestades. Este último parece ser o principal efeito associado à ocorrência de descargas ao longo do litoral do estado de São Paulo, cujo comportamento acompanha os contornos das montanhas. Sobre a região da cidade de São Paulo, pode-se observar uma concentração de descargas sobre o Pico do Jaraguá, o que está de acordo com recentes medidas que indicam este ponto local como ponto de ocorrência de descargas SN. Esse resultado também sugere, pelos resultados obtidos, que a precisão de localização do sistema para esta região é alta.

A análise da TIT foi ainda utilizada para avaliar os efeitos da ilha de calor de São Paulo, acompanhada ainda da análise para HTs, da contagem de relâmpagos e das medidas de temperatura de superfície através do MODIS. Os resultados para essa análise, separados em dois intervalos anuais e dois intervalos diários, apontaram para uma concentração da atividade de relâmpagos sobre a área urbana principalmente durante o intervalo entre as 14h e as 18h (hora local) e durante os meses de verão. Para o mesmo horário nos demais meses do ano, esta concentração não ocorre, o que ressalta os efeitos da ilha de calor. A TIT mostrou um padrão espacial singular, sugerindo uma maior instabilidade ao longo do perímetro da área urbana, região que também apresenta o maior gradiente térmico. Os resultados também são consistentes no que diz respeito ao oceano, pois durante o período entre as 21h e às 11h há uma concentração de relâmpagos no mar, o que indica para efeitos de um “contraste térmico invertido”, esperado nessas condições.

A análise temporal da ilha de calor não mostrou tendência de aumento para o período analisado, nem para a temperatura de superfície, tampouco para as informações de relâmpagos. O mês de novembro, considerado como o início do período de tempestades, apresentou uma pequena tendência nos dados de descarga (principalmente para a TIT). Tais resultados podem estar associados ao crescimento da área urbana, que vem se estabilizando ao longo dos últimos anos – conforme mostrou a análise para o crescimento da área urbana –, o que tenderia a estabilizar também a ilha de calor desta região.

Finalmente, outros trabalhos podem ser realizados no sentido de validar ou de aperfeiçoar os métodos sugeridos. Como sugestão para trabalhos futuros, pode-se destacar:

- A realização de campanhas que avaliem, de forma mais contundente, a relação entre as descargas e a Serra do Mar, seguindo, por exemplo, a metodologia utilizada por Cummins *et al.* (2009) na campanha do Grand Canyon. A existência de novas câmeras de alta velocidade pode ser muito útil para esse tipo de análise.
- A utilização do Pico do Jaraguá ou mesmo outro ponto elevado com alta densidade de ocorrência de relâmpagos como ponto de referência para uma (criteriosa) validação dos dados do sistema em termos de precisão de localização;
- A realização de um novo levantamento da eficiência absoluta da rede, comparando-o com os resultados obtidos pelo novo modelo;
- Correções para as variações temporais, com base na metodologia proposta por Dienfdorfer *et al.* (2007) – utilizando a distribuição dos picos de corrente –, comparando-se os resultados obtidos com as metodologias desenvolvidas neste trabalho.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMATULLI, G.; PERÉZ-CABELLO, F.; DE LA RIVA, J. Mapping lightning/human-caused wildfires occurrence under ignition point location uncertainty. **Ecological Modelling**, v. 200, n. 3-4, p. 321-333, 2007.
- ANCKER, C. J. Airborne direction finding - the theory of navigation errors. **IRE Trans. Aeronautical & Navigational Electronics**, v. 5, 11 p., 1958.
- ANDERSON, R. B. *et al.* Lightning and thunderstorm parameters. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON LIGHTNING AND POWER SYSTEMS, 1984. London. **Proceedings...**London: IEE Conf. Publ., 1984, 5 p.
- ANDERSON, S. **An evaluation of spatial interpolation methods on air temperature in Phoenix, AZ**. 2004. Disponível em: < <http://www.cobblestoneconcepts.com/ucgis2summer/anderson/anderson.htm> > (Acesso em 27/02/2011)
- ASSAD, E. D. *et al.* Avaliação de métodos geoestatísticos na espacialização de índices agrometeorológicos para definir riscos climáticos. **Revista Agropecuária Brasileira**, v. 38, n. 2, p.161-171, 2003.
- BALLAROTTI, M. G.; SABA, M. M. F.; PINTO JR, O. A new performance of evaluation of the Brazilian Lightning Location System (RINDAT) based on high-speed camera observations of natural negative ground flashes. In: INTERNATIONAL LIGHTNING DETECTION CONFERENCE (ILDC), 2006. Tucson, Arizona. **Proceedings...**Tucson: Vaisala, 2006
- BIAGI, C. J. *et al.* National lightning detection network (NLDN) performance in Southern Arizona, Texas, and Oklahoma in 2003-2004. **Journal of Geophysical Research**, v. 112, n. D05208, 2007.
- BOURSCHEIDT, V. *et al.* The influence of topography on the cloud-to-ground lightning density in South Brazil. **Atmospheric Research**, v. 91, n. 2-4, p. 508-513, 2009.
- CHANGNON, S. A. Assessment of the quality of thunderstorm data at first-order stations. **Journal of Applied Meteorology**, v. 40, n. 4, p. 783-794, 2001.
- CHRISTIAN, H. J. *et al.* Global frequency and distribution of lightning as observed from space by the Optical Transient Detector. **Journal of Geophysical Research**, v. 108, n. D1, 2003.
- CHRONIS, T. G.; ANAGNOSTOU, E. N. Error Analysis for a Long-Range Lightning Monitoring Network of Ground-Based Receivers in Europe. **Journal of Geophysical Research**, v. 108, n. D24, 2003.
- COORAY, G.V.(ed.). **The lightning flash** (IEE power series). UK: IEE, 2003.

CUMMINS, K. L.; BURNETT, R. O. Line Reliability and fault analysis using the National Lightning Detection Network. In: PRECISE MEASUREMENTS IN POWER CONFERENCE, 1993. **Proceedings...**Arlington, VA, 1993.

CUMMINS, K. L.; KRIDER, E. P.; MALONE, M. D. The US national lightning detection network and applications of cloud-to-ground lightning data by electric power utilities. **IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility**, v. 40, n. 4, p. 465-480, 1998.

CUMMINS, K. L.; MURPHY, M. J. Overview of lightning detection in the VLF, VF, and VHF frequency ranges. In: INTERNATIONAL LIGHTNING DETECTION CONFERENCE (ILDC), 2000. Tucson, Arizona. **Proceedings...**Tucson: Vaisala, 2000, p.1-10.

\_\_\_\_\_. An Overview of Lightning Locating Systems: History, Techniques, and Data Uses, With an In-Depth Look at the US NLDN. **IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility**, v. 51, n. 3, p. 499-518, 2009.

CUMMINS, K. L. *et al.* A Combined TOA/MDF Technology Upgrade of the U.S. National Lightning Detection Network. **Journal of Geophysical Research**, v. 103, n. D8, p. 9035-9044, 1998.

CUMMINS, K. L. *et al.* A Combined TOAIMDF Technology Upgrade of the U.S. National Lightning Detection Network. **Journal of Geophysical Research**, v. 103, n. D8, p. 9035-9044, 27 April 1998.

CUMMINS, K. L. *et al.* On the (mis-) Behavior of Thunderstorms at the Grand Canyon, Arizona. In: AGU FALL MEETING, 2009. San Francisco, CA. **Proceedings...** San Francisco: AGU, 2009.

DE PABLO, F.; SORIANO, L. R. Relationship between cloud-to-ground lightning flashes over the Iberian Peninsula and sea surface temperature. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 128, n. 579, p. 173-183, 2002.

DEMETRIADES, N. W. S.; MURPHY, M. J.; HOLLE, R. L. The importance of total lightning in the future of weather nowcasting. In: SYMPOSIUM ON PLANNING, NOWCASTING, AND FORECASTING IN THE URBAN ZONE, 2004. Seattle. **Proceedings...** Seattle: American Meteorological Society, 2004, 9 p.

DEMETRIADES, N. W. S.; MURPHY, M. J.; CRAMER, J. A. Validation of Vaisala's global lightning dataset (GLD360) over the continental United States. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON LIGHTNING DETECTION (ILDC), 2010.Orlando, FL. **Proceedings...**Tucson: Vaisala, 2010.

DIENDORFER, G. Lightning Location Systems (LLS). In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON LIGHTNING PROTECTION, 2007. Foz do Iguaçu, PR. **Proceedings...** São Paulo: IEE(USP), 2008.

DIENDORFER, G. *et al.* **Cloud-to-ground lightning parameters derived from lightning detection systems: the effects of system performance.** Paris: CIGRE (WG C4.404), 2009.

\_\_\_\_\_. Some comments on the achievable accuracy of local ground flash density values. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON LIGHTNING PROTECTION, 2008. Uppsala, Sweden. **Proceedings...** Uppsala: University of Uppsala, 2008, p.281-286.

EMANUEL, K. A. **Atmospheric Convection.** New York: Oxford University Press, 1994.

ENCYCLOAEDIA BRITANNICA, INC. **Electrical charge distribution in a thunderstorm.** Encycloaedia Britannica Online. 1999. Disponível em: <http://www.britannica.com/EBchecked/topic/594363/thunderstorm/49567/Cloud-to-cloud-and-intracloud-lightning> (Acesso em 5 Mar. 2012).

FARIAS, W. R. G. *et al.* Anomalous lightning activity over the Metropolitan Region of São Paulo due to urban effects. **Atmospheric Research**, v. 91, n. 2-4, p. 485-490, 2009.

FIX, M.; ARANTES, P.; TANAKA, G. **Urban slums reports: the case of Sao Paulo, Brazil, 2003**

FREEDMAN, D.; DIACONIS, P. On the histogram as a density estimator - L2 theory. **Zeitschrift Fur Wahrscheinlichkeitstheorie Und Verwandte Gebiete**, v. 57, n. 4, p. 453-476, 1981.

FREITAS, E. D. D.; DIAS, P. L. D. S. Alguns efeitos de áreas urbanas na geração de uma ilha de calor. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 20, n. 3, p. 355-366, 2005.

GATRELL, A. C. *et al.* Spatial point pattern analysis and its application in geographical epidemiology. **Transactions of the Institute of British Geographers**, v. 21, n. 1, p. 256-274, 1996.

GOMES, M. A. S. S. **Estudo dos relâmpagos na região sudeste do Brasil em função das características geográficas.** 2002. 149 p. (INPE-10055-TDI/889). Tese (Doutorado em Geofísica Espacial) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2002. Disponível em: <<http://urlib.net/sid.inpe.br/jeferson/2003/11.18.11.34>>.

GRANT, M. **A self-consistent method for the analysis of lightning stroke data sets containing misclassified stroke**: the variation of lightning over southern Africa. 2011. Thesis (PhD). Faculty of Engineering, University of the Witwatersrand, Johannesburg, 2011.

HELD, A. M. G.; ESCOBEDO, J. F. Climatologia de Tempestades na Área Central do Estado de São Paulo Usando Radar Meteorológico. **Revista Energia na Agricultura**, v. 25, n. 1, p. 20, 2010.

HOUSE JR., R. A. **Cloud dynamics**. Academic Press, 1994. 612 p.

IRIBARNE, J. V.; CHO, H. R. **Atmospheric physics**. 3. Dordrecht: Deidel Publishing Company, 1980. 212 p.

JACOBSON, A. R. *et al.* Performance Assessment of the World Wide Lightning Location Network (WWLLN), Using the Los Alamos Sferic Array (LASA) as Ground Truth. **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**. 23: 1082-1092 p. 2006.

JAT, M. K.; GARG, P. K.; KHARE, D. Monitoring and modelling of urban sprawl using remote sensing and GIS techniques. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 10, n. 1, p. 26-43, Feb 2008.

KOSHAK, W.; SOLAKIEWICZ, R. J. On the retrieval of lightning radio sources from time-of-arrival data. **Journal of Geophysical Research**, v. 101, n. D21, p. 26631-26640, 1996.

LANG, T. J.; RUTLEDGE, S. A.; WIENS, K. C. Origins of positive cloud-to-ground lightning flashes in the stratiform region of a mesoscale convective system. **Geophysical Research Letters**, v. 31, n. 10, 2004.

LEWIS, E. A.; HARVEY, R. B.; RASMUSSEN, J. E. Hyperbolic direction finding with sferics of transatlantic origin. **Journal of Geophysical Research**, v. 65, n. 7, p. 1879-1905, 1960.

LIU, W. *et al.* Spatial distribution patterns analysis of historical forest fires in DaXingAn Mountains of China. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTER APPLICATION AND SYSTEM MODELING (ICCASM), 2010. Taiyuan, China. **Proceedings...** Taiyuan, China, 2010. p.V3-634-V3-638.

LOJOU, J. Y.; CUMMINS, K. L. Total Lightning Mapping using both VHF Interferometry and Time-of-Arrival Techniques. In: INTERNATIONAL LIGHTNING DETECTION CONFERENCE (ILDC), 2006. Tucson, AZ. **Proceedings...**Tucson: Vaisala, 2006

MACHADO, L. A. T.; LAURENT, H. The convective system area expansion over Amazonia and its relationships with convective system life duration and high-level wind divergence. **Monthly Weather Review**, v. 132, n. 3, p. 714-725, Mar 2004.

MARSHALL, T. C. *et al.* Positive charge in the stratiform cloud of a mesoscale convective system. **Journal of Geophysical Research-Atmospheres**, v. 106, n. D1, p. 1157-1163, Jan 16 2001.

MIKHAIL, E. M. **Observations and Least Squares**. New York: University Press of America, 1976.

NACCARATO, K. P. **Estudo de relâmpagos no Brasil com base na análise de desempenho do sistema de localização de tempestades**. 2001. 165 Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial). Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos.

\_\_\_\_\_. **Topicos em eletricidade atmosferica**. INPE. São José dos Campos, SP. 2002

\_\_\_\_\_. **Análise das características dos relâmpagos na Região Sudeste do Brasil**. 2006. 362 Tese (Doutorado em Geofísica Espacial). Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos.

NACCARATO, K. P.; PINTO JR, O.; DAMATA, G. Improvements to the detection efficiency model for the Brazilian lightning detection network. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ATMOSPHERIC ELECTRICITY, 2007. Beijing, China. **Proceedings...** Beijing: ICAE/IAMAS/IUGG, 2007, p.842-845.

NACCARATO, K. P.; PINTO JR, O. Improvements in the detection efficiency model for the Brazilian lightning detection network (BrasilDAT) **Atmospheric Research**, v. 91, n. 2-4, p. 546-563, 2009a.

\_\_\_\_\_. Monthly variations of CG lightning activity in Brazil based on Lightning Image Sensor (LIS) data. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON LIGHTNING PROTECTION (SIPDA), 2009b. Curitiba, PR. **Proceedings...** São Paulo: IEE(USP), 2009b.

\_\_\_\_\_. **Evolução da RINDAT de 1999 a 2012**. (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2012) Comunicação Pessoal.

NACCARATO, K. P.; PINTO JR, 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, p. 71-74, 2003.

- NACCARATO, K. P.; PINTO JR., O. Comparison of LS7000 and IMPACT sensor performance in Paraíba valley (São Paulo) during the summer of 2007/2008. In: GROUND'2008 & 3RD LPE, 2008. Florianópolis, SC. **Proceedings...** Florianópolis: SB-RAY, 2008.
- NACCARATO, K. P. *et al.* Cloud-to-ground lightning activity over Brazil using VLF, LF and lightning image sensor (LIS) combined data. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON LIGHTNING PROTECTION, 2008. Uppsala, Sweden. **Proceedings...** Uppsala: University of Uppsala, 2008.
- NACCARATO, K. P.; PINTO JR., O.; MURPHY, M. Performance analysis of the BrasilDAT network. In: GROUND'2008 & 3RD LPE, 2008. Florianópolis, SC. **Proceedings...** Florianópolis: SB-RAY, 2008, p.329-338.
- NACCARATO, K. P.; PINTO JR., O.; PINTO, I. R. C. A. A detection efficiency model for the Brazilian lightning detection network (RINDAT). In: INTERNATIONAL LIGHTNING DETECTION CONFERENCE (ILDC), 2006. Tucson, Arizona. **Proceedings...** Tucson: Vaisala, 2006
- NAG, A. *et al.* First versus subsequent return-stroke current and field peaks in negative cloud-to-ground lightning discharges. **Journal of Geophysical Research-Atmospheres**, v. 113, n. D19, 2008.
- OGAWA, T. Lightning Currents. In: VOLLAND, H. (Ed.). **Handbook of atmospheric electrodynamics**. Boca Raton: CRC Press, v.1, 1995. cap. 4, p.93-136.
- OHATA, A. T.; QUINTANILHA, J. A. O uso de algoritmos de clustering na mensuração da expansão urbana e detecção de alterações na Região Metropolitana de São Paulo. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 12. (SBSR), 2005, Goiânia. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2005. p. 647-656. CD-ROM, On-line. ISBN 85-17-00018-8. Disponível em: <<http://urlib.net/ltid.inpe.br/sbsr/2004/11.21.15.43>>.
- ORVILLE, R. E.; HENDERSON, R. W. Global distribution of midnight lightning: September 1977 to August 1978. **Monthly Weather Review**, v. 114, n. 12, p. 2640-2653, 1986.
- ORVILLE, R. E.; HUFFINES, G. R. Cloud-to-ground lightning in the United States: NLDN results in the first decade, 1989-1998. **Monthly Weather Review**, v. 129, n. 5, p. 1179-1193, 2001.
- ORVILLE, R. E.; SILVER, A. C. Lightning ground flash density in the contiguous United States: 1992 to 1995. **Monthly Weather Review**, v. 125, n. 4, p. 631-638, 1997.

PARKER, M. D.; RUTLEDGE, S. A.; JOHNSON, R. H. Cloud-to-ground lightning in linear mesoscale convective systems. **Monthly Weather Review**, v. 129, n. 5, p. 1232–1242, 2001.

PECKHAM, D. W.; UMAN, M. A.; WILCOX, C. E. Lightning phenomenology in the tampa-bay area. **Journal of Geophysical Research**, v. 89, n. ND7, p. 1789-1805, 1984.

PINTO, I. R. C. A.; PINTO JR, O. Cloud-to-ground lightning distribution in Brazil. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 65, n. 6, p. 733-737, 2003.

PINTO, I. R. C. A. *et al.* Urban effect on the characteristics of cloud-to-ground lightning over Belo Horizonte-Brazil. **Annales Geophysicae**, v. 22, p. 697–700, 2004.

PINTO JR, O.; PINTO, I. R. C. A.; NACCARATO, K. P. Maximum cloud-to-ground lightning flash densities observed by lightning location systems in the tropical region: A review. **Atmospheric Research**, v. 84, n. 3, p. 189-200, 2007.

PINTO JR, O.; NACCARATO, K. P.; CAMPINHO, C. B. Lightning incidence in the Southeast Brazil: Comparison of thunderstorm days from different data bases. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ATMOSPHERIC ELECTRICITY, 2011. Rio de Janeiro, RJ. **Proceedings...**Rio de Janeiro: ICAE, 2011.

PINTO JR, O. *et al.* Cloud-to-ground lightning in southeastern Brazil in 1993 1. Geographical distribution. **Journal of Geophysical Research**, v. 104, n. D24, p. 31369-31379, 1999.

PINTO JR, O.; PINTO, I. R. C. A.; NACCARATO, K. P. Maximum cloud-to-ground lightning flash densities observed by lightning location systems in the tropical region: A review. **Atmospheric Research**, v. 84, p. 189-200, 2007.

PINTO JR., O. **A arte da guerra contra os raios**. São Paulo: Oficina de Textos, 2005. 80

PINTO JR., O. *et al.* Recent upgrades to the Brazilian integrated lightning detection network. In: INTERNATIONAL LIGHTNING DETECTION CONFERENCE (ILDC), 2006. Tucson, Arizona. **Proceedings...**Tucson: Vaisala, 2006.

PINTO JR., O.; PINTO, I. R. C. A. **Tempestades e relâmpagos no Brasil**. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2000. 193 ISBN 85-901719-1-4.

PINTO JR., O.; PINTO, I. R. C. A. On the sensitivity of cloud-to-ground lightning activity to surface air temperature changes at different timescales in Sao Paulo, Brazil. **Journal of Geophysical Research-Atmospheres**, v. 113, n. D20, 2008.

PRICE, C. Lightning, atmospheric electricity and climate change. In: ANNUAL MEETING SYMPOSIUM ON GLOBAL ELECTRICAL CIRCUIT, GLOBAL CHANGE AND THE METEOROLOGICAL APPLICATIONS OF LIGHTNING INFORMATION, 1994. Boston, MA. **Proceedings...** Boston: USDOE/National Aeronautics and Space Administration, 1994.

PROCTOR, D. E. A hyperbolic system for obtaining VHF radio pictures from lightning. **Journal of Geophysical Research**, v. 76, p. 1478-1489, 1971.

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

REAP, R. M. Climatological characteristics and objective prediction of thunderstorms over Alaska. **Weather and Forecasting**, v. 6, n. 3, p. 309-319, September 01, 1991 1991.

\_\_\_\_\_. The use of network lightning data to detect thunderstorms near-surface reporting stations. **Monthly Weather Review**, v. 121, n. 2, p. 464-469, Feb 1993.

REAP, R. M.; ORVILLE, R. E. The relationships between network lightning locations and surface hourly observations of thunderstorms. **Monthly Weather Review**, v. 118, n. 1, p. 94-108, Jan 1990.

RUBINSTEIN, M. On the determination of the flash detection efficiency of lightning location systems given their stroke detection efficiency. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY, Zürich, 1995. **Proceedings...** Zürich: ETH, 1995.

RUTLEDGE, S. A.; LU, C.; MACGORMAN, D. R. Positive cloud-to-ground lightning in mesoscale convective systems. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 47, n. 17, p. 2085-2100, September 01, 1990 1990.

SABA, M. M. F.; BALLAROTTI, M. G.; PINTO JR., O. Negative cloud-to-ground lightning properties from high-speed video observations. **Journal of Geophysical Research**, v. 111, n. D03101, p. 1-9, 2006.

SABA, M. M. F. *et al.* Positive leader characteristics from high-speed video observations. **Geophysical Research Letters**, v. 35, n. 7, 2008.

SABA, M. M. F. *et al.* High-speed video observations of positive lightning flashes to ground. **Journal of Geophysical Research**, v. 115, 9 p., 2010.

SABA, M. M. F. *et al.* Upward lightning in Brazil. In: INTERNATIONAL LIGHTNING DETECTION CONFERENCE (ILDC), 2012. Denver, Colorado. **Proceedings...**Denver: Vaisala, 2012.

SCHULTZ, M. D.; UNDERWOOD, S. J.; RADHAKRISHNAN, P. A Method to Identify the Optimal Areal Unit for NLDN Cloud-to-Ground Lightning Flash Data Analysis. **Journal of Applied Meteorology**, v. 44, n. 5, p. 739-744, 2005.

SCHULZ, W. **Performance evaluation of lightning location systems**. 1997. Thesis (PhD). Faculty of Electrical Engineering, Technical University of Vienna, Vienna, 1997, 136 p.

SCHULZ, W. *et al.* Cloud-to-ground lightning in Austria: A 10-year study using data from a lightning location system. **Journal of Geophysical Research**, v. 110, 2005.

SCHULZ, W.; CUMMINS, K. L. A method to determine relative stroke detection efficiencies from multiplicity distributions. In: INTERNATIONAL LIGHTNING DETECTION CONFERENCE (ILDC), 2008. Tucson, Arizona. **Proceedings...**Tucson: Vaisala, 2008.

SCHULZ, W.; DIENDORFER, G. Detection Efficiency and Site Errors of Lightning Location Systems. In: INTERNATIONAL LIGHTNING DETECTION CONFERENCE (ILDC), 1996. Tucson, Arizona. **Proceedings...**Tucson: Vaisala, 1996.

\_\_\_\_\_. Lightning characteristics as a function of altitude evaluated from lightning location network data. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON LIGHTNING AND STATIC ELECTRICITY (ICOLSE), 1999. Toulouse, France. **Proceedings...**Toulouse: Society of Automotive Engineers, 1999.

SCOTT, D. W. **Multivariate density estimation: theory practice and visualization**. John Wiley & Sons, Inc., 1992.

SELLERS, P. J. *et al.* A simple biosphere model (SIB) for use within general circulation models. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 43, n. 6, p. 505-531, 1986.

SORIANO, L. R.; DE PABLO, F. Effect of small urban areas in central Spain on the enhancement of cloud-to-ground lightning activity. **Atmospheric Environment**, v. 36, n. 17, p. 2809-2816, 2002.

STALLINS, J. A.; BENTLEY, M. L. Urban lightning climatology and GIS: An analytical framework from the case study of Atlanta, Georgia. **Applied Geography**, v. 26, n. 3-4, p. 242-259, 2006.

STANSFIELD, R. G. Statistical Theory of D.F. Fixing. **Journal of the Institution of Electrical Engineers**, v. 94, n. 15, p. 762-770, 1947.

STEIGER, S. M.; ORVILLE, H. D.; HUFFINES, G. R. Cloud-to-ground lightning characteristics over Houston, Texas:1989–2000. **Journal of Geophysical Research**, v. 107, n. D11, p. ACL 2-1 - ACL 2-12, 2002.

STOLZENBURG, M.; MARSHALL, T. C. Charge structure and dynamics in thunderstorms. **Space Science Reviews**, v. 137, n. 1-4, p. 355-372, Jun 2008.

TAKAHASHI, T. Riming electrification as a charge generation mechanism in thunderstorms. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 35, n. 8, p. 1536-1548, 1978.

UEBERHUBER, C. W. **Numerical computation 2: methods, software, and analysis**. Berlin: Springer-Verlag, 1997.

VAISALA. **LF Sensor LS7000 User's Guide**. Helsinki. 2006

VAISALA, I. **LP Series™, LP2000™, LP5000™ user's guide**. Helsinki. 2003

VAISALA INC. **Vaisala thunderstorm total lightning sensor LS-8000 user's guide**. Vaisala Oyj. Helsinki. 2008

VALINE, W. C.; KRIDER, E. P. Statistics and characteristics of cloud-to-ground lightning with multiple ground contacts. **Journal of Geophysical Research-Atmospheres**, v. 107, n. D20, p. 11, 2002.

VELASCO, I.; FRITSCH, J. M. Mesoscale convective complexes in the Americas. **Journal of Geophysical Research**, v. 92, n. D8, p. 9591-9613, 1987.

VILA, D. A. *et al.* Forecast and Tracking the Evolution of Cloud Clusters (ForTraCC) using satellite infrared imagery: Methodology and validation. **Weather and Forecasting**, v. 23, n. 2, p. 233-245, 2008.

WAN, Z. M.; DOZIER, J. A generalized split-window algorithm for retrieving land-surface temperature from space. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 34, n. 4, p. 892-905, 1996.

WAND, M. P.; JONES, M. C. Comparison of smoothing parametrizations in bivariate kernel density estimation. **Journal of the American Statistical Association**, v. 422, n. 88, p. 520-528, 1993.

\_\_\_\_\_. **Kernel smoothing**. New York: Chapman and Hall, 1995.

WESCOTT, N. Summertime Cloud-to-Ground Lightning Activity around Major Midwestern Urban Areas. **Journal of Applied Meteorology**, n. 34, p. 9, 1995.

WILKINSON, L. Dot plots. **American Statistician**, v. 53, n. 3, p. 276-281, 1999.

WILLIAMS, E. *et al.* The behavior of total lightning activity in severe Florida thunderstorms. **Atmospheric Research**, v. 51, n. 3-4, p. 245-265, 1999.

WILLIAMS, E.; STANFILL, S. The physical origin of the land – ocean contrast in lightning activity. **Comptes Rendus Physique**, v. 3, p. 1277-1292, 2002.

ZAJAC, B. A.; RUTLEDGE, S. A. Cloud-to-ground lightning activity in the contiguous united states from 1995 to 1999. **Monthly Weather Review**, v. 129, n. 5, p. 999-1019, 2001.



## APÊNDICE A – DETALHES DO MODELO DE EFICIÊNCIA RELATIVA

Este apêndice concentra informações adicionais sobre o modelo de eficiência de detecção relativa desenvolvido pelo Grupo de Eletricidade Atmosférica (ELAT).

### A.1 Diagrama MEDR

O diagrama a seguir (Figura A.1) representa o funcionamento do MEDR, com base em dados de entrada, na análise de status, nas curvas de eficiência de cada sensor e na função de probabilidade para integrar as eficiências sobre o mapa. Baseado no trabalho de Naccarato e Pinto Jr. (2009).

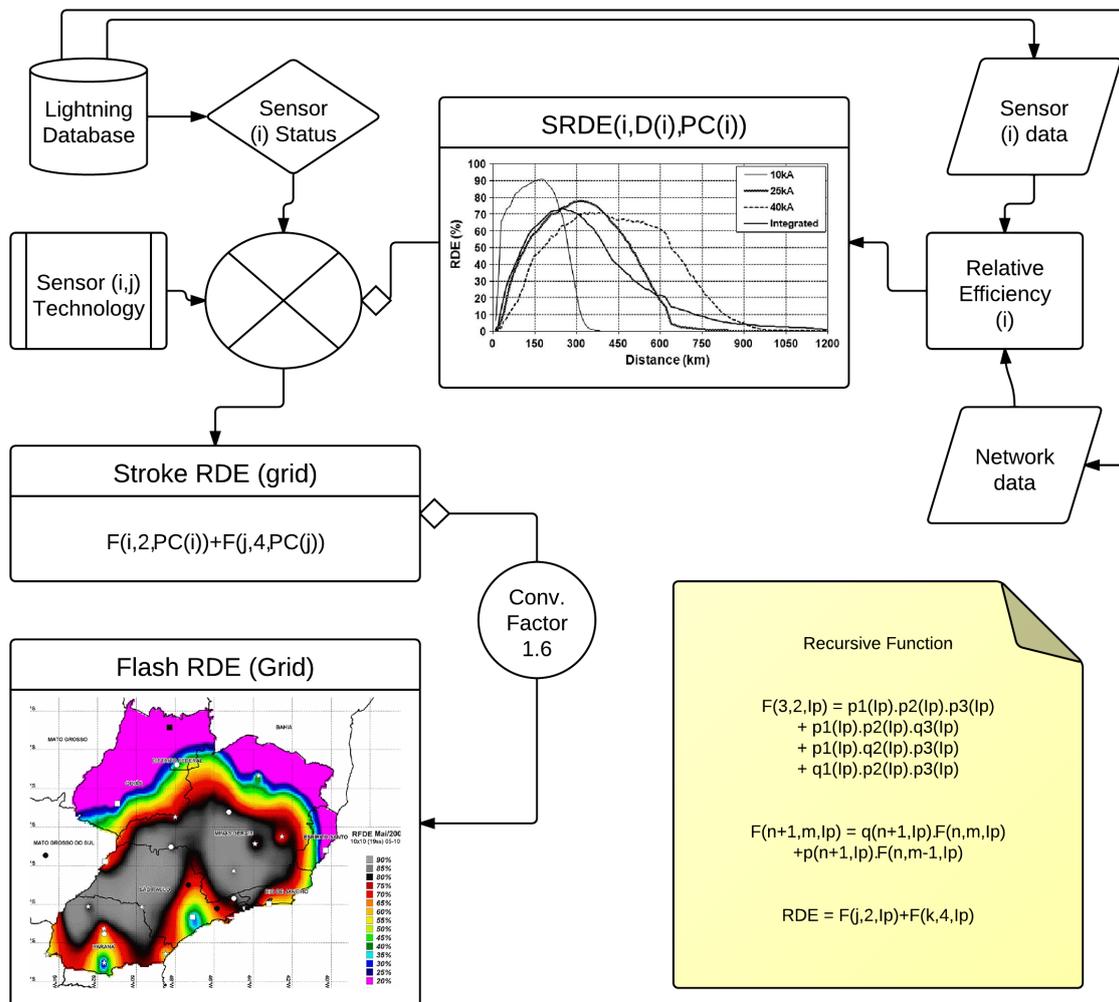


Figura A.1 - Diagrama de funcionamento do MEDR.

## A.2 Interface do modelo mais recente

A Figura A.2 mostra a interface desenvolvida para o modelo mais recente. Esta interface foi desenvolvida para funcionar no ambiente WEB e apresenta os três módulos (Estatística – em sensor –, Curvas e Modelos) descritos na seção 3.2.1. O quarto módulo (Correção) está funcional, mas não foi utilizado no desenvolvimento do trabalho.

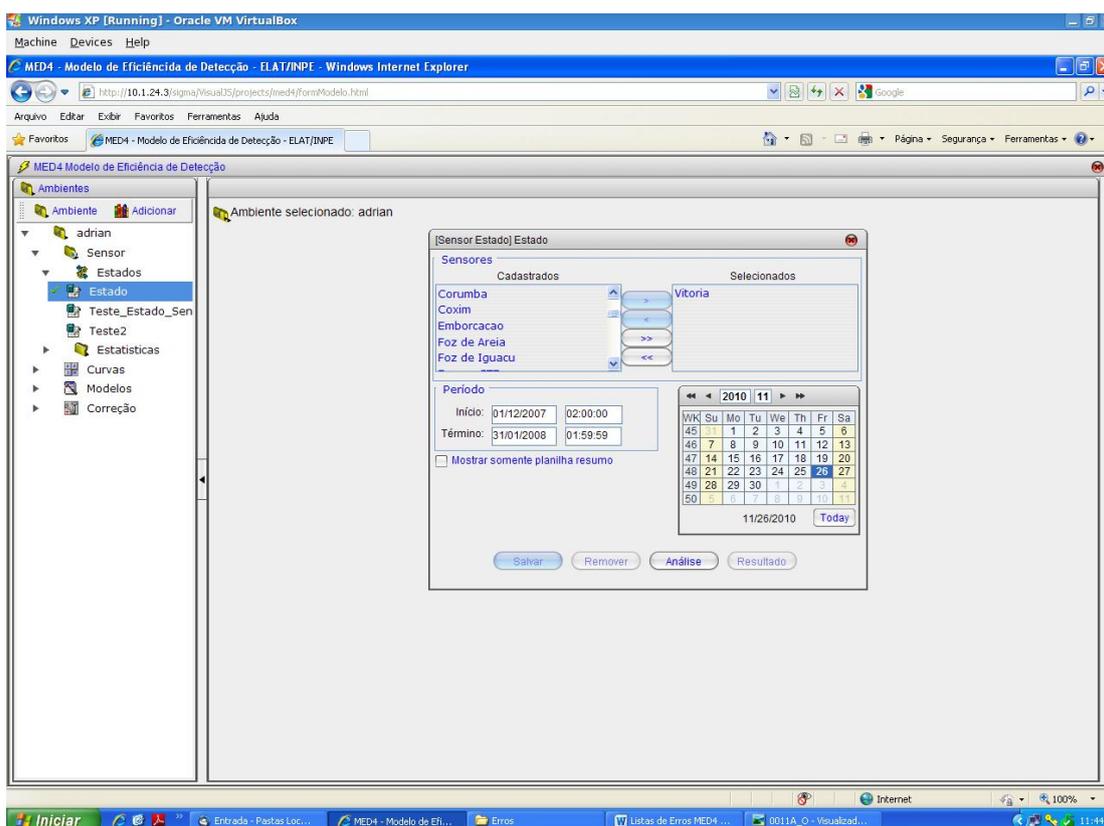


Figura A.2 – Interface do MEDR4.

## A.3 Suavização por SPLINE

As Figuras A.3 e A.4 mostram a interface do programa utilizado na suavização das curvas de eficiência geradas para cada sensor. Esta suavização permite a criação de mapas com contornos menos ruidosos. A segunda figura mostra o resultado obtido após a aplicação da suavização.

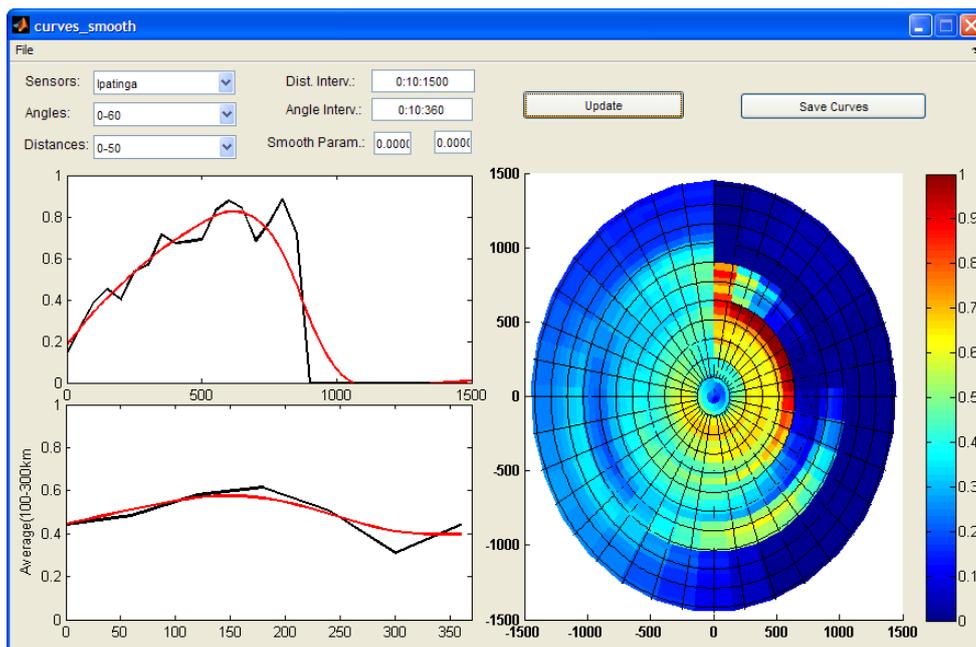


Figura A.3 – Interface para a suavização de curvas do MEDR4 com as curvas iniciais.

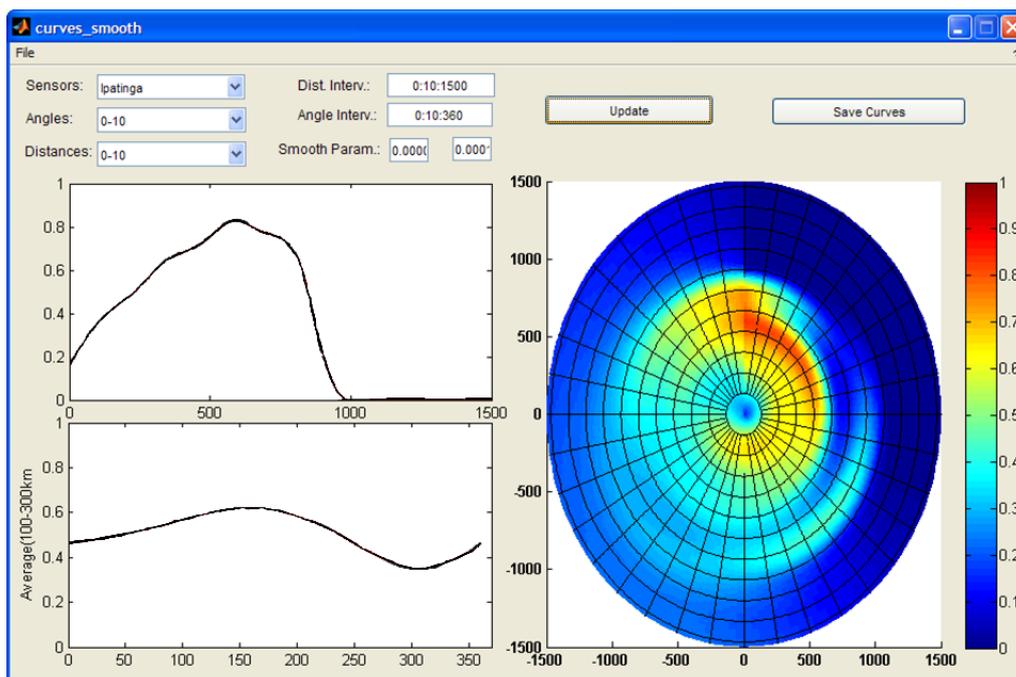


Figura A.4 – Interface para a suavização de curvas do MEDR4 com as curvas suavizadas.



## APÊNDICE B - A ELIPSE DE ERRO DO SISTEMA DE DETECÇÃO

As elipses de erro estão associadas à precisão de localização do sistema de detecção. As informações disponíveis ao usuário são os semieixos (maior e menor), o ângulo e a excentricidade, que estão disponíveis para cada solução (*flash* ou *stroke*).

### B.1 Como são obtidas as elipses?

As soluções dadas pelo sistema de detecção passam por um processo de otimização. Este processo de otimização envolve a solução de incógnitas por mínimos quadrados e depende de uma matriz de cofatores composta pelas variâncias e covariâncias das informações fornecidas. Esta matriz de cofatores é que é utilizada para determinar as elipses de segurança do sistema de detecção (SCHULZ, 1997). Para duas incógnitas (no espaço), podemos considerar:

$$cof(\sigma) = \begin{bmatrix} \sigma_x^2 & \sigma_{xy} \\ \sigma_{xy} & \sigma_y^2 \end{bmatrix}$$

A covariância define a elipse (quando  $\rho \neq 0$ ) para  $x$  e  $y$  correlacionados. Partindo do pressuposto de que o ponto  $(x, y)$  permanece inalterado, podemos reescrever esta equação utilizando um ângulo  $\theta$  (girando a elipse), de modo que a correlação entre  $x$  e  $y$  seja eliminada (ANCKER, 1958):

$$cov(\sigma) = \begin{bmatrix} \sigma_x^2 & 0 \\ 0 & \sigma_y^2 \end{bmatrix}$$

A Figura B.1 mostra como seria esta elipse. Podemos escrever, portanto, que:

$$\begin{matrix} x \\ y \end{matrix} \rightarrow \begin{bmatrix} \sigma_x^2 & \sigma_{xy} \\ \sigma_{xy} & \sigma_y^2 \end{bmatrix} \quad \text{e} \quad \begin{matrix} x' \\ y' \end{matrix} \rightarrow \begin{bmatrix} \sigma_{x'}^2 & 0 \\ 0 & \sigma_{y'}^2 \end{bmatrix}, \text{ com: } \quad \begin{matrix} x' \\ y' \end{matrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}$$

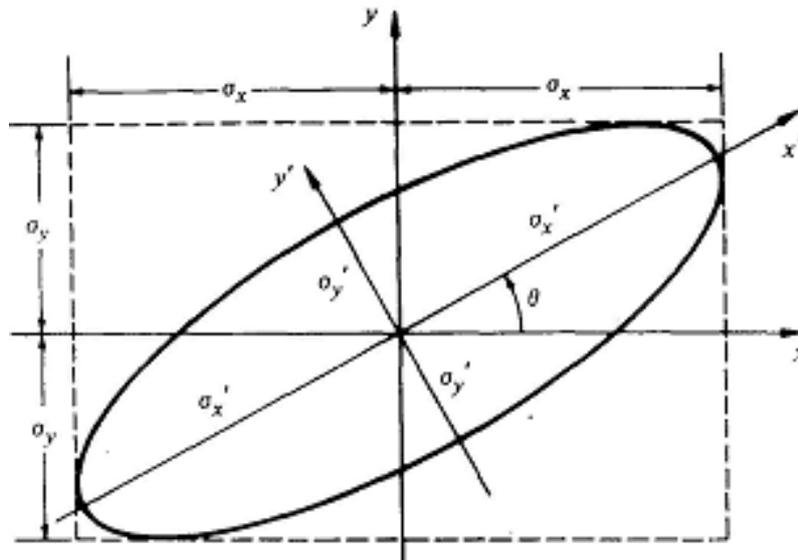


Figura B.1 – Elipse rotacionada por um ângulo  $\theta$ .

Nosso interesse está em obter os valores de  $\sigma_{x'}$  e  $\sigma_{y'}$ , que são os semi-eixos maior e menor da elipse. Podemos resolver esse conjunto de matrizes utilizando a máxima  $\Sigma_{yy} = A \Sigma_{xx} A^T$ :

$$\begin{bmatrix} \sigma_{x'}^2 & 0 \\ 0 & \sigma_{y'}^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_x^2 & \sigma_{xy} \\ \sigma_{xy} & \sigma_y^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix}$$

Resolvendo a matriz acima, obtemos:

$$\sigma_{x'}^2 = \sigma_x^2 \cos^2\theta + 2\sigma_{xy}^2 \sin\theta \cos\theta + \sigma_y^2 \sin^2\theta$$

$$\sigma_{y'}^2 = \sigma_x^2 \sin^2\theta + 2\sigma_{xy}^2 \sin\theta \cos\theta + \sigma_y^2 \cos^2\theta$$

$$0 = (\sigma_y^2 - \sigma_x^2) \sin\theta \cos\theta + \sigma_{xy}^2 (\cos^2\theta - \sin^2\theta)$$

Com estas informações, é possível definir as elipses em termos dos semieixos e ângulo. Sabendo que  $\sin\theta \cos\theta = \frac{\sin 2\theta}{2}$  e que  $\cos^2\theta - \sin^2\theta = \cos 2\theta$ , podemos escrever a terceira equação como:

$$(\sigma_y^2 - \sigma_x^2) \sin 2\theta + \sigma_{xy} \cos 2\theta = 0$$

que pode ser simplificado para obter o ângulo:

$$\theta = \frac{1}{2} \operatorname{tg}^{-1} \frac{2\sigma_{xy}}{\sigma_x^2 - \sigma_y^2}$$

As outras duas partes da equação permitem obter os semieixos:

$$\sigma_{x'}^2 = \frac{\sigma_x^2 + \sigma_y^2}{2} + \left[ \frac{(\sigma_x^2 + \sigma_y^2)^2}{4} + \sigma_{xy}^2 \right]^{1/2}$$

$$\sigma_{y'}^2 = \frac{\sigma_x^2 + \sigma_y^2}{2} - \left[ \frac{(\sigma_x^2 + \sigma_y^2)^2}{4} + \sigma_{xy}^2 \right]^{1/2}$$

## B.2 Como podemos reconstruir as elipses bidimensionais?

As elipses resultam de uma distribuição normal bivariada, que pode ser descrita pela função básica:

$$f(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma_x\sigma_y\sqrt{1-\rho^2}} \exp \left\{ -\frac{1}{2(1-\rho^2)} \left[ \left( \frac{x-\bar{x}}{\sigma_x} \right)^2 - 2\rho \left( \frac{x-\bar{x}}{\sigma_x} \right) \left( \frac{y-\bar{y}}{\sigma_y} \right) + \left( \frac{y-\bar{y}}{\sigma_y} \right)^2 \right] \right\}$$

onde  $\bar{x}$  e  $\bar{y}$  representam a localização otimizada e também a média para a distribuição  $N(\mu, \sigma)$ ; e  $\rho = \sigma_{xy}/\sigma_x\sigma_y$  é a correlação.

Para  $n$  variáveis estocásticas independentes distribuídas, a soma dos quadrados dessas variáveis normalmente seguirá uma distribuição qui-quadrado (MIKHAIL, 1976). No caso da distribuição normal bivariada, dois graus de liberdade estão associados às componentes  $x$  e  $y$ , onde cada uma delas segue uma distribuição normal. Para dois graus de liberdade, tem-se a função de densidade  $\chi^2$ :

$$P(\chi^2) = 1 - e^{-\frac{k^2}{2}}$$

A constante k está associada à região ou contorno que delimita uma mesma probabilidade (elipse). Esta região é obtida ao utilizar um valor constante para a função exponencial, de modo que:

$$-\frac{1}{2(1-\rho^2)} \left[ \left( \frac{x-\bar{x}}{\sigma_x} \right)^2 - 2\rho \left( \frac{x-\bar{x}}{\sigma_x} \right) \left( \frac{y-\bar{y}}{\sigma_y} \right) + \left( \frac{y-\bar{y}}{\sigma_y} \right)^2 \right] = \left( \frac{x}{\sigma_x} \right)^2 + \left( \frac{y}{\sigma_y} \right)^2 = k^2$$

Se a constante utilizada é  $k = 1$  e  $\rho \neq 0$ , teremos os valores para a chamada elipse padrão (MIKHAIL, 1976), com os desvios padrões sendo  $\sigma_x$  e  $\sigma_y$ . Esta mesma constante é utilizada pode ser utilizada para calcular o tamanho da elipse para diferentes valores de probabilidade  $P(\chi^2)$ . Reescrevendo a equação podemos mostrar que:

$$k = \sqrt{-2 \ln(P(\chi^2) - 1)}$$

onde  $P(\chi^2)$  é a probabilidade ou nível de confiança desejado. O valor k é usado como fator de escala sobre os semieixos da elipse.

As soluções dadas pelo sistema de detecção fornecem as elipses obtidas para  $P(\chi^2) = 50\%$ . Portanto, para reconstruirmos as elipses bivariadas (tridimensionais), precisamos primeiro achar o tamanho do semieixos correspondentes a 1-sigma. Usando a equação podemos achar o fator de escala:

$$k = \sqrt{-2 \ln(P(0.5) - 1)} = 1.177$$

Agora, dividindo-se o tamanho dos semieixos pela constante, poderemos obter a elipse padrão, com  $P(\chi^2) \sim 39\%$ .

Com estas informações já estamos aptos a reconstruir a distribuição bivariada utilizando a equação de uma simples elipse rotacionada por um ângulo  $\theta$ :

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1 \quad \longrightarrow \quad \begin{aligned} x &\rightarrow x \cos(\theta) + y \sin(\theta) \\ y &\rightarrow y \cos(\theta) - x \sin(\theta) \end{aligned}$$

de modo que:

$$f(x, y) = \frac{1}{2\pi ab} \exp\left(-\frac{A}{2}\right)$$

onde A:

$$x^2\left(\frac{\cos^2(\theta)}{a^2} + \frac{\sin^2(\theta)}{b^2}\right) + 2xy \cos(\theta) \sin(\theta)\left(\frac{1}{a^2} - \frac{1}{b^2}\right) + y^2\left(\frac{\sin^2(\theta)}{a^2} + \frac{\cos^2(\theta)}{b^2}\right)$$

com a e b sendo os semieixos maior e menor da elipse. Esta última representação da elipse não depende da matriz de covariância, mas apenas do ângulo da elipse e dos tamanhos dos semieixos.

A representação final pode incluir ainda:

$$x = x - \bar{x}$$

$$y = y - \bar{y}$$

de modo que podemos calcular os valores da distribuição sobre um plano em relação a média, representada pela localização da descarga. Desta forma, com as informações de ângulo e tamanhos dos semieixos da elipse (sabendo que a probabilidade é de 50%), podemos reconstruir a distribuição normal bivariada associada às elipses.



## APÊNDICE C – DADOS FORTRACC

### C.1 Amostra de dados

Abaixo encontra-se uma amostra de dados do FORTRACC. Trata-se de um arquivo texto contendo várias informações referentes às tempestades monitoradas. A letra “N” indica quando uma tempestade nova tempestade tem início. No nosso caso, as informações de interesse são as novas tempestades, bem como sua posição (lat,lon).

```
FAMILY= 3428 - YEAR= 2003 MONTH= 10 DAY= 9 HOUR= 3.45 FIRST MEMBER= 156 CLASSIF= N
  SYS# XLAT XLON TIME  SIZE DSIZE  TMED DTMED  TMIN DTMIN  TMIN9 DTMIN9  CBNUM CBMED  VEL DIR
INCLI ECCE T_INI T_FIN CLA SYS_ANT
* 156 11.07 -49.24 0.00 179 -999.9 22853.7 -999.9 21736.0 -999.9 22185.5 -999.9 -99 -99 11.4 314 3.38 0.21 0.0 99.9
N 0
* 141 10.99 -49.55 0.50 536 554.8 22673.2 -361.0 20832.0 -1808.0 21556.1 -1258.8 1 1 18.3 296 2.08 0.20 0.5 7.0
M 156 149
* 137 11.01 -49.62 1.00 649 106.0 22641.1 -64.1 20721.0 -222.0 21410.6 -290.9 1 1 18.1 296 2.14 0.19 1.0 6.0 C
141
* 131 11.03 -49.69 1.50 708 48.3 22607.8 -66.7 20666.0 -110.0 21036.9 -747.5 1 8 8.2 270 2.02 0.19 1.5 5.0 C
137
159 11.10 -49.73 2.00 224 -572.5 22458.9 -295.4 21200.0 1059.7 21345.5 612.3 -99 -99 18.1 333 2.36 0.34 2.0 1.0
C 131
* 148 11.18 -49.80 2.50 214 -25.4 22460.0 2.2 21257.0 114.0 21417.0 143.1 -99 -99 23.1 314 3.26 0.33 2.5 1.0 C
159
139 11.16 -49.69 3.00 160 -159.2 22775.0 625.0 21700.0 879.1 21990.0 1137.1 -99 -99 24.3 90 -17.49 0.52 3.0 0.5
C 148
TOTAL TIME= 3.00 DELTAX -0.45 DELTAY 0.09 LAST IMAGE= R END=NOR
```

### C.2 Algoritmo utilizado na extração dos dados

```
%select the directory
dir_name = uigetdir('G:\DADOS\ForTraCC\2010\','Get the lightning file
directory');
%list the files
files = dir(fullfile(dir_name,'*.txt'));
fid2 = fopen(fullfile(dir_name,'\serie_1.txt'),'a');

for i = 1:length(files);

file_name = files(i,1).name;
```

```

fid = fopen(fullfile(dir_name,file_name),'r');

%loop through the file
while (~feof(fid))

    line = fgetl(fid);
    if isempty(line)
        continue
    end
    [A] = str2double(strsplit(line));
    line2 = ' ';
    while ~isempty(line2) && (~feof(fid))
        line2 = fgetl(fid);
        [B] = strsplit(line2);

        try
            switch strcmp(B(1),'*')
            case 0
                if strcmp(B(21),'N')
                    %CCM_ini(x,:) = [ A(2) A(5) A(7) A(9) A(11) A(14) B(2) B(3) B(21)];
                    %x = x + 1;
                    fprintf(fid2,'%d \t %d \t %d \t %d \t %d \t %2.2f \t %d\t %f \t %f \t %s \n',...
                        A(2), A(5), A(7), A(9), A(11), A(14),...
                        str2double(cell2mat(B(2))), str2double(cell2mat(B(3))),...
                        cell2mat(B(21)));
                    end
                end

            case 1
                if strcmp(B(22),'N')
                    %CCM_ini(x,:) = [ A(2) A(5) A(7) A(9) A(11) A(14) B(3) B(4) B(22)];
                    %x = x + 1;
                    fprintf(fid2,'%d \t %d \t %d \t %d \t %d \t %2.2f \t %d\t %f \t %f \t %s \n',...
                        A(2), A(5), A(7), A(9), A(11), A(14),...
                        str2double(cell2mat(B(3))), str2double(cell2mat(B(4))),...
                        cell2mat(B(22)));
                    end
                end
            catch
                continue
            end
        end
    end
    fclose(fid);
end
fclose(fid2);

```

## APÊNDICE D – PROCEDIMENTOS SOBRE AS IMAGENS LANDSAT E MODIS

### D.1 Bandas LANDSAT utilizadas na análise

As bandas utilizadas levaram em conta as variações associadas aos pixels obtidos sobre a região urbana e suas vizinhanças. Quanto maiores os desvios, maior é a distinção entre os pixels e, portanto, mais fácil se torna a separação de classes. Estes desvios são mostrados na Figura D.1 para as 7 bandas do satélite LANDSAT na imagem obtida para 2010.

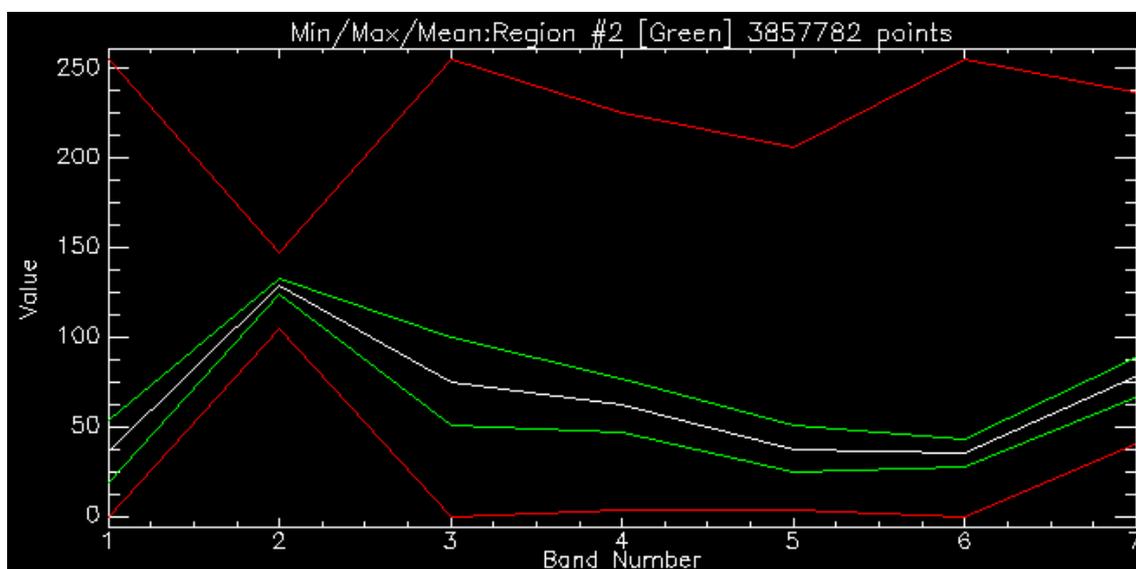


Figura D.1 – Estatísticas (desvios em verde) para as bandas do satélite LANDSAT 5 sobre a região de São Paulo.

A Figura D.2 mostra a composição RGB (associando as bandas 3, 4 e 1, respectivamente) resultante para as três bandas com maior distinção entre os pixels para a mesma imagem de 2010.



Figura D.2 – Área urbana de São Paulo obtida pela composição R(3)G(4)B(1).

## D.2 Informações sobre as imagens MODIS

A Figura D.3 mostra uma comparação dos dois produtos MODIS utilizados no trabalho convertidos para a escala temporal mensal. A ideia é comparar os dois produtos. O produto MOD11B2, com as correções de ângulo e tempo se mostrou similar ao produto mensal.

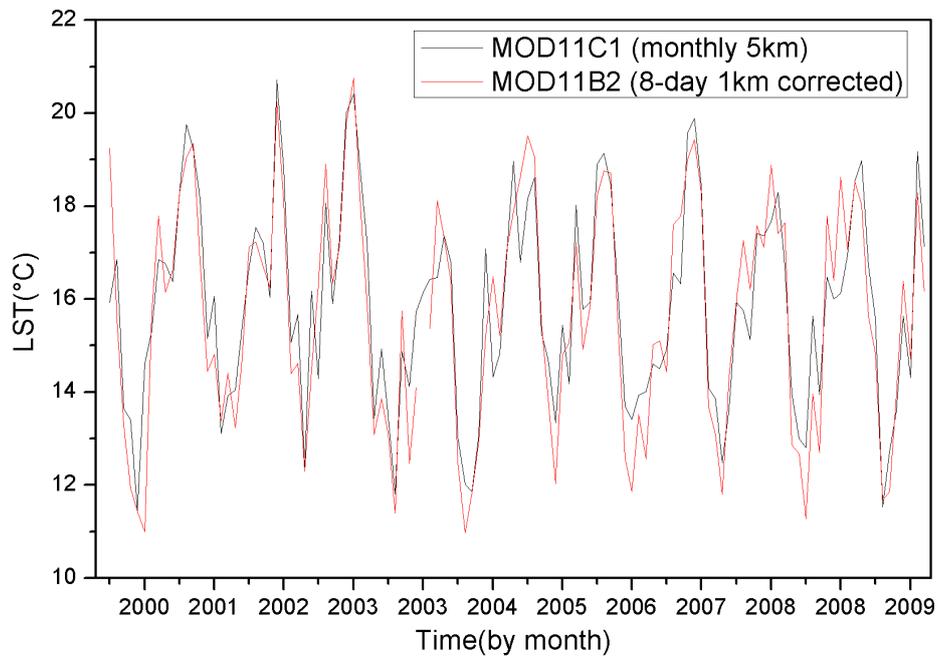


Figura D.3 – Comparação dos produtos MODIS.

Os arquivos de controle das imagens MODIS seguem um padrão binário que, somado, fornece a qualidade do pixel em questão. A Tabela D.1 mostra os valores binários e suas respectivas chaves de interpretação.

Tabela D.1 – Indicações dos arquivos de controle de qualidade (valores binários) dos produtos LST do MODIS.

<b>bits</b>	<b>Long Name</b>	<b>Key</b>
1 & 0	Mandatory QA flags	00=LST produced, good quality, not necessary to examine more detailed QA 01=LST produced, other quality, recommend examination of more detailed QA 10=LST not produced due to cloud effects 11=LST not produced primarily due to reasons other than cloud
3 & 2	Data quality flag	00=good data quality 01=other data quality pixel 10=LST affected by nearby clouds and/or sub-grid clouds and/or ocean 11=LST screened off
5 & 4	Emis Error flag	00=average emissivity error <= 0.01 01=average emissivity error <= 0.02 10=average emissivity error <= 0.04 11=average emissivity error > 0.04
7 & 6	LST Error flag	00=average LST error <= 1K 01=average LST error <= 2K 10=average LST error <= 3K 11=average LST error > 3K