



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

INPE-15238-TDI/1325

ESTUDO DA RELAÇÃO ENTRE RELÂMPAGOS, RELEVO, TEMPERATURA DE SUPERFÍCIE E TIPOS DE SOLO NO RIO GRANDE DO SUL

Vandoir Bourscheidt

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Geofísica Espacial, orientada pelos Drs. Osmar Pinto Junior e Kleber Pinheiro Naccarato, aprovada em 26 de fevereiro de 2008.

O original deste documento está disponível em:

<<http://urlib.net/sid.inpe.br/mtc-m17@80/2008/02.12.12.07>>

INPE
São José dos Campos
2008

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) 3945-6911/6923

Fax: (012) 3945-6919

E-mail: pubtc@sid.inpe.br

CONSELHO DE EDITORAÇÃO:

Presidente:

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

Membros:

Dr. Maria do Carmo de Andrade Nono - Conselho de Pós-Graduação

Dr. Haroldo Fraga de Campos Velho - Centro de Tecnologias Especiais (CTE)

Dra. Inez Staciarini Batista - Coordenação Ciências Espaciais e Atmosféricas (CEA)

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

Dr. Ralf Gielow - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPT)

Dr. Wilson Yamaguti - Coordenação Engenharia e Tecnologia Espacial (ETE)

BIBLIOTECA DIGITAL:

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

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

Jefferson Andrade Anselmo - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Simone A. Del-Ducca Barbedo - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Vinicius da Silva Vitor - Serviço de Informação e Documentação (SID) - bolsista

REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:

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

Marilúcia Santos Melo Cid - Serviço de Informação e Documentação (SID)

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

EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:

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



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

INPE-15238-TDI/1325

ESTUDO DA RELAÇÃO ENTRE RELÂMPAGOS, RELEVO, TEMPERATURA DE SUPERFÍCIE E TIPOS DE SOLO NO RIO GRANDE DO SUL

Vandoir Bourscheidt

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Geofísica Espacial, orientada pelos Drs. Osmar Pinto Junior e Kleber Pinheiro Naccarato, aprovada em 26 de fevereiro de 2008.

O original deste documento está disponível em:

<<http://urlib.net/sid.inpe.br/mtc-m17@80/2008/02.12.12.07>>

INPE
São José dos Campos
2008

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

B668e Bourscheidt, Vandoir.

Estudo da relação entre relâmpagos, relevo, temperatura de superfície e tipos de solo no Rio Grande do Sul/Vandoir Bourscheidt. – São José dos Campos: INPE, 2008. 126p. ; (INPE-15238-TDI/1325)

1. Relâmpagos. 2. Altitude. 3. Temperatura de superfície. 4. Sistemas de detecção. 5. Rio Grande do Sul. I. Título.

CDU 551.594.22(816.5A/Z)

Copyright © 2008 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, microfilmico, reprográfico ou outros, sem a permissão escrita da Editora, com exceção de qualquer material fornecido especificamente no propósito de ser entrado e executado num sistema computacional, para o uso exclusivo do leitor da obra.

Copyright © 2008 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, microfilming, recording or otherwise, without written permission from the Publisher, 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 Mestre em
Geofísica Espacial**

Dra. Fernanda São Sabbas Tavares



Presidente / INPE / SJCampos - SP

Dr. Osmar Pinto Junior



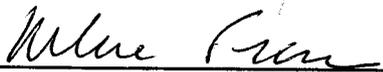
Orientador(a) / INPE / SJCampos - SP

Dr. Kleber Pinheiro Naccarato



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

Dra. Helena França



Convidado(a) / UNITAU / Taubaté - SP

Aluno (a): Vandoir Bourscheidt

São José dos Campos, 26 de Fevereiro de 2008

“Em tudo o que fizeres, apressa-te lentamente”.

(Augusto, sec 63 a.c.)

A minha família e a minha namorada Malu.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus por conceder as oportunidades ao longo de toda a minha vida e também a de desenvolver este estudo.

A meus pais que, educando e incentivando, me tornaram o que sou hoje e permitiram-me estar aqui, apresentando este trabalho. Juntamente, agradeço a todos os meus familiares que, presentes de uma forma ou outra no meu crescimento, permitiram este momento.

Aos Drs. Osmar Pinto Junior e Kleber Naccarato Pinheiro pelas valiosas sugestões, que deram ao objeto de estudo novas perspectivas e interessantes resultados. E, com a mesma significância, pela compreensão, apoio e amizade dados ao longo do mestrado e também durante a Iniciação Científica.

Aos doutorandos Antonio Carlos Varela Saraiva, Mauricio Grade Ballaroti, Gisele Zepka, Wendell Rondinelli Farias, por todo apoio, amizade e troca de idéias, oferecidos nesse (relativamente) curto espaço de tempo e que foram, com toda certeza, fundamentais ao desenvolvimento desta Dissertação.

A todos os demais amigos e colegas do curso de Geofísica Espacial e do ELAT, pela compreensão, companheirismo e apoio dados ao longo destes dois anos.

Aos professores do curso de Geofísica Espacial que, em cada disciplina, souberam transmitir seus conhecimentos a todos nós, alunos, e que, com toda certeza, participaram do desenvolvimento deste trabalho e do crescimento pessoal e intelectual.

Ao Conselho Nacional de Pesquisa e Tecnologia e a CAPES, pelo apoio financeiro dado no desenvolvimento do trabalho.

RESUMO

A presente dissertação tem por objetivo mostrar a atuação do relevo, temperatura de superfície e tipos de solo sobre a dinâmica espacial e temporal dos relâmpagos no Rio Grande do Sul. Para a análise foram usados dados de relâmpagos da Rede Brasileira de Detecção de Descargas Atmosféricas (BrasilDAT) entre Junho de 2005 e Maio de 2007 e, com caráter comprobatório, dados do *Lightning Imaging Sensor* (LIS) de Dezembro de 1998 a Setembro de 2007; o modelo digital de elevação (MDE) do programa SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*), dados de temperatura de superfície (Level 11) do satélite MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) entre Outubro de 2005 e Dezembro de 2006 e dados de solo do IBGE (mapas temáticos) e da EMBRAPA (amostras). As análises foram feitas com o uso de diferentes ferramentas estatísticas e aplicativos de SIG. Os resultados mostraram relações entre a atividade de relâmpagos e as variáveis analisadas em diferentes escalas. Parâmetros geomorfológicos como a declividade (coeficiente de correlação (r) de aproximadamente 0.9) mostraram que maiores declividades tendem a aumentar a incidência de relâmpagos em regiões específicas. Por outro lado, uma tendência linear de aumento da densidade de relâmpagos em função da temperatura de superfície se mostrou para todo o Estado, com valores de r da ordem de 0.98. Os efeitos da ilha de calor da região metropolitana de Porto Alegre sobre os relâmpagos não foram detectados. Variações da densidade de relâmpagos em função dos diferentes tipos de solo não ficaram evidentes. A análise da correlação dos picos de corrente das descargas com a concentração de constituintes metálicos do solo, utilizados como indicadores de condutividade, apresentou baixa significância estatística e os resultados apresentaram uma tendência contrária à encontrada por outros autores ($r \approx 0.63$ para relâmpagos nuvem-solo positivos e $r \approx -0.43$ para relâmpagos nuvem-solo negativos). A concentração de constituintes metálicos e a granulometria se mostraram altamente correlacionadas no sentido de que, à medida que as partículas do solo aumentam, ocorre uma diminuição da condutividade. Assim, o efeito da umidade na variação da condutividade em solos de maior granulometria é reduzido devido à sua menor capacidade de retenção de água. Os resultados, enfim, se mostraram satisfatórios, apesar da pequena série temporal usada, indicando a influência das variáveis analisadas sobre a distribuição espacial e temporal dos relâmpagos no Rio Grande do Sul.

THE RELATION BETWEEN LIGHTNING, TOPOGRAPHY, SURFACE TEMPERATURE AND SOIL TYPES OVER RIO GRANDE DO SUL

ABSTRACT

This study compares different environment variables (topography, land surface temperature and soil types) with lightning spatial and temporal dynamics. It was used Brazilian Lightning Detection Network (BrasilDAT) lightning data from June 2005 to May 2007 and, for validation, data from Lightning Imaging Sensor (LIS) from December 1998 to September 2007; the digital elevation model (DEM) from the SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) program; soil data from the Brazilian Company/Institute EMBRAPA (soil sample data) and IBGE(thematic maps); and land surface temperature Level 11 product from the MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) satellite from October 2005 to December 2006. The analysis was made throughout different GIS (Geographic Information Systems) applications and statistical tools. The results show relations between the lightning and the other variables at different scales. Geomorphologic variables such as slope (as an altitude product, with r value around 0.9) present a good correlation to lightning activity for particular regions. In other hand, the land surface temperature show r index of about 0.98 for all State. Porto Alegre metropolitan region does not show an urban heat island effect on lightning distribution. No statistically significant relationship between soil and lightning distribution was found. The comparison between lightning mean peak current and soil conductivity (represented by its metallic constituents) presented small statistical significance and also presented a contrary trend from what was found by other authors ($r \approx 0.63$ for CG+ lightning and $r \approx -0.43$ for CG- lightning). A significant relationship between metallic constituent concentration and soil granulometry was found, which impact the conductivity: the larger the particles size, the smaller the conductivity. So, the humidity effect on the conductivity variations for soils with largest particles is reduced due less water retention. Finally, although the time series used in the study is relatively small, the results were satisfactory, indicating some effects of the environment variables over the spatial and temporal lightning distribution.

SUMÁRIO

Pág.

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

LISTA DE EQUAÇÕES

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

LISTA DE SÍMBOLOS

1 INTRODUÇÃO	27
2 REVISÃO DE LITERATURA.....	31
2.1 Termodinâmica atmosférica e a formação de tempestades	31
2.2 Características dos relâmpagos	33
2.3 Sistemas de detecção de descargas atmosféricas	36
2.4 Características geográficas e meteorológicas nos estudos de Eletricidade Atmosférica	39
2.4.1 <i>A topografia nos estudos de Eletricidade Atmosférica</i>	<i>40</i>
2.4.2 <i>Os solos nos estudos de Eletricidade Atmosférica.....</i>	<i>45</i>
2.4.3 <i>A temperatura nos estudos de Eletricidade Atmosférica.....</i>	<i>48</i>
2.4.4 <i>Relações sistêmicas entre variáveis geográficas e meteorológicas</i>	<i>49</i>
3 METODOLOGIA.....	51
3.1 Localização da área em estudo.....	51
3.2 Dados utilizados	52
3.3 Processamento dos dados de relâmpagos	58
3.3.1 <i>Processamento para a análise espacial por geo-objetos</i>	<i>60</i>
3.3.2 <i>Processamento para a análise espacial por classes</i>	<i>61</i>
3.4 Processamento dos Modelos Digitais de Elevação (MDEs).....	62
3.4.1 <i>Geração da grade de declividade.....</i>	<i>63</i>
3.4.2 <i>Processamento de imagens MODIS.....</i>	<i>64</i>
3.4.3 <i>Processamento de imagens LANDSAT.....</i>	<i>66</i>
3.4.4 <i>Processamento dos dados de solo.....</i>	<i>67</i>
3.5 Sobre as análises estatísticas	68
3.6 Processamento para a análise temporal	70

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	73
4.1 Distribuição dos Relâmpagos sobre o Rio Grande do Sul.....	73
4.2 Influência do relevo sobre as descargas	76
4.2.1 <i>Análise temporal dos efeitos do relevo sobre os relâmpagos</i>	83
4.3 Influência da temperatura sobre as descargas.....	85
4.4 Influências dos solos sobre as descargas	92
4.5 Variáveis mais efetivas na distribuição de relâmpagos	98
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	101
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	105
GLOSSÁRIO	115
ÍNDICE POR ASSUNTO	117
APÊNDICE A – ROTINAS USADAS NO TRABALHO	119
A.1 – Rotinas em MAPBASIC:	119
A.2 – Rotina em IDL:	119
A.3 – Rotinas em Legal:	120
APÊNDICE B – GRÁFICOS DA DISTRIBUIÇÃO DE DENSIDADE DE RELÂMPAGOS (BRASILDAT E LIS)	121
B.1 – Densidade de relâmpagos para a BrasilDAT.	121
B.2 – Densidade de relâmpagos para os dados LIS.	121
APÊNDICE C – GRÁFICOS DAS RELAÇÕES ENTRE GRANULOMETRIA E CONCENTRAÇÃO DE CONSTITUINTES METÁLICOS NO SOLO	123
C.1 – Relação entre Areia Grossa e concentração de metais no solo.	123
C.2 – Relação entre Areia e concentração de metais no solo.....	123
C.3 – Relação entre Silte e concentração de metais no solo	124
C.4 – Relação entre Areia e concentração de metais no solo.....	124

LISTA DE FIGURAS

2.1– Linhas de corrente mostrando jatos de baixo e alto nível (maior intensidade dos ventos nas áreas vermelhas).	33
2.2– Representação dos principais tipos de relâmpagos	34
2.3 – Mecanismos de precipitação orográfica: (a) para uma atmosfera estável; (b) para um atmosfera condicionalmente instável; (c) precipitação induzida por realimentação	42
2.4 – Diagrama das relações sistêmicas em diferentes níveis.	50
3.1 – Localização da área de estudo.....	51
3.2 – Localização dos sensores da BrasilDAT.	52
3.3 – Eficiência de detecção obtido pela aplicação do MED3 sobre o Rio Grande do Sul.....	53
3.4 – Principais tipos de solo do Rio Grande do Sul	55
3.5 – Modelo da metodologia adotada na análise dos dados de vento.	57
3.6 – Etapas do processamento dos dados de relâmpagos.....	59
3.7 – Manipulação de dados na forma de grade numérica.	63
3.8 – Vetor resultante indicativo da declividade.	64
4.1 – Densidade anual de relâmpagos NS	73
4.2 – Densidade anual de relâmpagos NS positivos (flash.km ⁻² .ano ⁻¹)	74
4.3 – Densidade anual de relâmpagos NS negativos (flash.km ⁻² .ano ⁻¹)	75
4.4 – Densidade anual de relâmpagos sobreposta ao relevo. Em destaque a região com densidade elevada sob possível efeito do relevo.....	76
4.5 – Mapa de direção e frequência dos ventos.....	77
4.6 – Perfil S-N integrado: altitude (em preto), densidade total de relâmpagos NS (em vermelho), NS negativos (em azul) e NS positivos (em verde).....	79
4.7 – Densidade de relâmpagos NS total em função da altitude (análise por geo-objetos).....	80
4.8 – Densidade de relâmpagos NS total em função da declividade pela análise por células ou geo-objetos	81

4.9 – Densidade de relâmpagos NS em função da altitude (análise por classes).....	82
4.10 – Densidade de relâmpagos NS em função da declividade pela análise por classes.	83
4.11 – Variação diurna dos relâmpagos para as duas regiões: com altitudes inferiores a 500 metros (preto) e com altitudes superiores a 900 metros (em azul).	84
4.12 – Produto MODIS para a temperatura de superfície média (LST).....	85
4.13 – Temperatura média para normal climática de 1961 a 1990.	86
4.14 – Temperatura de superfície aparente para a região de São Paulo (imagem LANDSAT).....	87
4.15 – Temperatura de superfície aparente para a região de Porto Alegre (imagem LANDSAT).....	88
4.16 – Variação da temperatura por classes de densidade de relâmpagos.	89
4.17 – Variação temporal da temperatura de superfície e da frequência de relâmpagos.	91
4.18 – Variação temporal da temperatura de superfície, da umidade e da frequência de relâmpagos.	91
4.19 – Relação da concentração média dos constituintes metálicos para cada tipo de solo.	92
4.20 – Características granulométricas para cada tipo de solo.	93
4.21 – Relação da concentração média dos constituintes metálicos e a média do pico de corrente de relâmpagos NS positivos.....	97
4.22 – Relação da concentração média dos constituintes metálicos e a média do pico de corrente de relâmpagos NS negativos.	97

LISTA DE TABELAS

3.1 – Características das imagens LANDSAT utilizadas no trabalho	57
3.2 – Informações sobre a análise por classes	62
3.3 – Resolução das diferentes grades utilizadas no trabalho	63
3.4 – Imagens MODIS e suas características	65
3.5 – Valor atribuído às imagens de QC (Quality Control)	66
4.1 – Índices de correlação entre a média dos constituintes metálicos e as características granulométricas do solo.....	94
4.2 – Índices de correlação entre a média dos constituintes metálicos do solo e diferentes variáveis	96
4.3 – Estatística das variáveis mais efetivas na distribuição de relâmpagos sobre o Rio Grande do Sul	99

LISTA DE EQUAÇÕES

2.1 – Cálculo da Densidade de relâmpagos.....	58
2.2 – Função para cálculo da média ponderada	61
2.3 – Cálculo de pesos para média ponderada.....	61
2.4 – Função para calcular vetor resultante (declividade)	64
2.5 – Fator para a determinação da temperatura de superfície.....	64
2.6 – Conversão de níveis de cinza para radiância.....	66
2.7 – Cálculo da temperatura aparente de superfície.....	67
2.8 – Função do modelo de regressão simples.....	68
2.9 – Cálculo do coeficiente de determinação.....	68
2.10 – Função para minimizar o Qui-Quadrado	69
2.11 – Função para o coeficiente de determinação ajustado	69
2.12 – Coeficiente de correlação do momento do produto Pearson.....	70
2.13 – Cálculo da média de temperatura de superfície mensal	71

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

BrasilDAT	Rede Brasileira de Detecção de Descargas Atmosféricas
CCMs	Complexo Convectivo de Mesoescala
CEAG	Circuito Elétrico Atmosférico Global
DGI	Divisão de Geração de Imagens
ELAT	Grupo de Eletricidade Atmosférica
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
EN	(Relâmpago) Entre-nuvens
EOS	Earth Observatory System
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IMPACT	Improved Accuracy Using Combined Technology
IN	(Relâmpago) Intra-nuvem
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IVT	Infravermelho Termal
LEGAL	Linguagem Espacial para Processamento Algébrico
LF	Low Frequency (baixa frequência)
LIS	Lightning Imaging Sensor
LPATS	Lightning Position and Tracking System
LST	Land Surface Temperatura (Temperatura de Superfície Terrestre)
MDE	Modelo Digital de Elevação
MDF	Magnetic Direction Finding
MED3	Modelo de Eficiência de Detecção de relâmpagos, versão 3
MODIS	Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer
NASA	National Aeronautic and Space Administration
NC	Nível de Cinza
NCAR	National Center for Atmospheric Research
NLDN	National Lightning Detection Network
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
NS	(Relâmpago) Nuvem-solo
SBCS	Sistema Brasileiro de Classificação de Solos

SCMs	Sistemas Convectivos de Mesoescala
SIDDEM	Sistema de Informações Integradas Baseadas no Sistema de Detecção de Descargas Atmosféricas
SIG(s)	Sistema(s) de informações Geográficas
SN	(Relâmpago) Solo-nuvem
SPRING	Sistema de Processamento de Informações Georreferenciadas
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission
SST	Sea Surface Temperature (Temperatura de Superfície do Mar)
TOA	Time-of-Arrival
TRMM	Tropical Rainfall Measuring Mission
VHF	Very High Frequency
VLF	Very Low Frequency

LISTA DE SÍMBOLOS

\bar{R}^2	coeficiente de determinação (regressão) ajustado
°C	graus Celsius
μm	micrômetro
hPa	hectopascal, unidade de medida equivalente a 10^2 N.m^{-2}
K	graus Kelvin
km	quilômetro
kV	quilovolt
m	metros
P	probabilidade de um dado evento
R	coeficiente de correlação
R^2	coeficiente de determinação (regressão)
sr	estereoradiano
W	watts
μs	microsegundo

1 INTRODUÇÃO

Os estudos sobre Eletricidade Atmosférica a partir de dados de Sistemas de Detecção de Descargas Atmosféricas são relativamente recentes tanto no Brasil quanto no mundo, tendo início na década de 80 nos Estados Unidos (ORVILLE *et al*, 1983; ORVILLE, 1991b; ORVILLE e HUFFINES, 2001). A criação das redes de detecção possibilitou a espacialização dos relâmpagos tanto na análise individual de descargas, aliadas na maioria das vezes à medidas de outros instrumentos (SABA *et al*, 2006a; SABA *et al*, 2006b), quanto na geração de mapas de densidade, que possibilitam a identificação de padrões espaciais e, a longo prazo, a geração de climatologias de relâmpagos (PINTO JR *et al*, 1999; PINTO e PINTO JR, 2003; NACCARATO *et al*, 2005; NACCARATO, 2006). Estas redes avançaram ao longo dos anos, possibilitando, na atualidade, a detecção de relâmpagos com precisão da ordem de algumas centenas de metros. Aliado a isso está o fato de que estas mesmas redes são capazes de fornecer diferentes informações acerca das características elétricas das descargas, como polaridade, pico de corrente e multiplicidade. São estas características que definem, por exemplo, as diferentes classificações inerentes aos relâmpagos, isto é, os diferentes tipos (ou classes) de relâmpagos.

Sabe-se ainda que os relâmpagos estão sujeitos a certos agentes capazes de afetar sua ocorrência, ou seja, de afetar diretamente sua distribuição e características. Entre esses agentes estão características ou variáveis de ordem geográfica e meteorológica. Entre as variáveis de ordem geográfica vem sendo destacado, ao longo dos últimos anos, o relevo. Este é considerado, em muitos casos, como determinante em parte dos padrões espaciais encontrados em climatologias regionais de relâmpagos, realizadas sobre diferentes regiões do globo, com destaque especial para os Estados Unidos, através de dados da *National Lightning Detection Network* (NLDN)(ORVILLE e HUFFINES, 1999; ORVILLE e HUFFINES, 2001). Análises mais diretas dos efeitos do relevo sobre a distribuição e/ou ocorrência de relâmpagos também foram feitas em

outras regiões, onde foram encontradas correlações por regressão linear simples, correlações por regressão linear múltipla ou ainda um aumento e posterior declínio no total de descargas para crescentes valores de altitude (REAP, 1986; PINTO JR *et al*, 1999; SCHULZ e DIENDORFER, 1999; SORIANO e SOULA, 2001). Outra variável de ordem geográfica que merece destaque refere-se aos diferentes tipos de solo, que apresentam, para diferentes estudos, conclusões contraditórias sobre seus efeitos na distribuição dos relâmpagos, mostrando alguma correlação com a distribuição de descargas em alguns casos e nenhuma em outros, assim como apresentam idéias favoráveis ou contrárias a sua influência sobre os relâmpagos (KAMRA e RAVICHANDRAN, 1993; CHAUZY e SOULA, 1999; PINTO JR *et al*, 1999; GOMES, 2002). Ressalta-se que nenhum resultado conclusivo sobre seus efeitos foi obtido até o momento. Sabe-se ainda dos seus efeitos sobre as estimativas de pico de corrente das descargas, devido a atenuação do sinal recebido pelos sensores quando da propagação do pulso eletromagnético emitido pelo relâmpago sobre os diferentes tipos de solo (diferentes condutividades), o que leva certas limitações a estas medidas. Embora propostos, esses efeitos não foram observados pelas análises espaciais das soluções dos sistemas, ocorrendo, na verdade, diferentes resultados para relâmpagos NS (nuvem-solo) positivos e negativos quando das variações da condutividade na superfície (ORVILLE, 1991a; ORVILLE e HUFFINES, 2001).

Ainda sob perspectiva geográfica, a análise de variáveis como uso do solo e crescimento urbano e seus diferentes efeitos no espaço ganham importância. Estas últimas estão associadas especialmente com as variações de temperatura de superfície (que por sua vez dependem de umidade no solo), que afetam a distribuição dos fluxos de calor latente e sensível junto à superfície. Esses fluxos são fundamentais nos processos termodinâmicos iniciais na formação de tempestades (SELLERS *et al*, 1986). Podem-se destacar, a partir destas prerrogativas, os efeitos das variações (gradientes) de temperatura, por exemplo, sobre os grandes (ou pequenos) centros urbanos na ocorrência e distribuição das descargas atmosféricas (SORIANO e DE PABLO,

2002; NACCARATO *et al*, 2003). No que remete às variações das condições meteorológicas da atmosfera em um dado local (aliadas às diferentes variáveis espaciais que as modelam), observa-se que estas refletem diretamente sobre as características espaciais dos relâmpagos, bem como sobre as características físicas intrínsecas dos mesmos. É o caso, por exemplo, de variação da polaridade das descargas em diferentes processos convectivos devido a variações das correntes de ar ascendentes e descendentes, que implicam diferentes organizações dos centros de cargas dentro das nuvens (PARKER *et al*, 2001). Ressalta-se também a estreita relação entre as características geográficas e meteorológicas que, em muitos casos, agem de maneira conjunta. É o que ocorre nas tempestades sob efeito orográfico, nas variações de umidade disponível em função do tipo e uso de solo, bem como da distribuição da vegetação. Destaca-se ainda o papel do processo de urbanização sobre a formação de ilhas de calor e conseqüente formação de tempestades.

É pensando nessas condições que se torna importante a análise das relações entre as características dos relâmpagos e as características inerentes ao ambiente onde os mesmos ocorrem, integrando, para isso, informações de diferentes naturezas, tendo em vista o melhor entendimento dos processos elétricos e termodinâmicos da atmosfera. E estas prerrogativas delimitam o objetivo do trabalho, que visa melhorar o conhecimento das relações entre diferentes variáveis espaciais com os relâmpagos, buscando fornecer novos parâmetros, bem como reafirmar e/ou validar parâmetros já existentes nos estudos de Eletricidade Atmosférica, podendo assim contribuir no desenvolvimento de técnicas para reduzir impactos sociais e econômicos das descargas atmosféricas. Nesse sentido, são analisadas a influência do relevo, solos e temperatura de superfície sobre as descargas atmosféricas, usando-se de ambientes SIG e aplicando diferentes ferramentas de análise estatística; suas relações espaço-temporais; e ainda as variáveis (possivelmente) mais expressivas na ocorrência e distribuição das descargas.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Termodinâmica atmosférica e a formação de tempestades

A ocorrência de relâmpagos está associada diretamente à ocorrência de tempestades. Estas, que somam cerca de duas mil a cada instante, estão, por sua vez, associadas às condições meteorológicas atuantes em uma dada região. As tempestades ainda são a essência da idéia mais aceita para a explicação do problema fundamental da Eletricidade Atmosférica, agindo como uma fonte de cargas e completando o CEAG (Circuito Elétrico Atmosférico Global) (PINTO JR. e PINTO, 2000; RYCROFT *et al*, 2000; TINSLEY, 2000).

A formação de tempestades depende diretamente das condições da atmosfera. Tais condições incluem especialmente umidade e temperatura, cujas relações podem favorecer ou não o desenvolvimento das tempestades, indicando uma atmosfera saturada/não-saturada, instável/estável, etc., e que fazem parte dos estudos termodinâmicos. Outro aspecto importante em sua formação é a presença de aerossóis, na forma de núcleos de condensação, que, de acordo com suas relações com as demais características da atmosfera, poderão também levar à formação de tempestades (IRIBARNE e CHO, 1980; PINTO JR. e PINTO, 2000). Relacionadas a estes aspectos ainda estão questões como a orografia (KASAHARA, 1980; CHEN e LIN, 2005), a qual será desenvolvida posteriormente.

As tempestades se caracterizam especialmente pela presença de fortes correntes ascendentes e descendentes de ar, pela grande extensão vertical e por apresentarem eletrificação. São em grande parte formadas por nuvens do tipo *Cumulonimbus* e caracterizadas pela forma de bigorna no seu topo. Podem ocorrer de maneira isolada ou organizada. As tempestades isoladas têm duração média de algumas horas, possuem diâmetro de 10 a 20 km e atingem altitudes de 6 a 20 km, deslocando-se com velocidades que variam de poucos km/h até 50 km/h. Podem ainda, segundo as células que as formam, ser

unicelulares, multicelulares ou supercelulares. Essas tempestades, durante seu desenvolvimento, passam por diferentes estágios: estágio de desenvolvimento, maduro e dissipativo, durando cada um de 20 a 40 minutos. Cada estágio apresenta características peculiares, relacionadas especialmente às correntes de ar dentro da nuvem (PINTO, 1987).

Já as tempestades organizadas, também conhecidas como SCMs (Sistemas Convectivos de Mesoescala), tendem a ser maiores que as tempestades isoladas e a ter maior duração. Linhas de instabilidade, linhas de tempestade e CCMs (Complexos Convectivos de Mesoescala) são alguns tipos de tempestades organizadas. Destaca-se que durante seu desenvolvimento, uma tempestade pode evoluir de um tipo para outro (PINTO JR. e PINTO, 2000).

Os mencionados CCMs possuem uma forte atuação sobre a região do vale do Rio Paraná e Paraguai, afetando ainda consideravelmente o Noroeste do Rio Grande do Sul e Oeste de Santa Catarina (cerca de 70% dos casos) podendo, algumas vezes, se deslocar em direção ao Sudeste do Brasil (cerca de 30% dos casos)(FIGUEIREDO e SCOLAR, 1996). Sobre a América do Sul, estes sistemas são formados especialmente em função dos jatos de baixos níveis (850hPa) que convergem da região Amazônica em direção a depressão do Chaco, onde interagem com os jatos de altos níveis (205hPa) da região, que fluem de Oeste para Leste, sobre a Cordilheira dos Andes, conforme podem ser vistos nos campos da [Figura 2.1](#).

Os jatos de altos níveis seriam responsáveis por levar o ar frio e seco para a alta e média troposfera, por causar divergência em altos níveis, e ainda por transportar o calor sensível à jusante das regiões convectivas. Dessa forma, os jatos em baixos níveis, aliados aos jatos em altos níveis, levam rapidamente ar quente e úmido para a região convectiva (UCCELLINI e JOHNSON, 1979; SCOLAR e FIGUEIREDO, 1990).

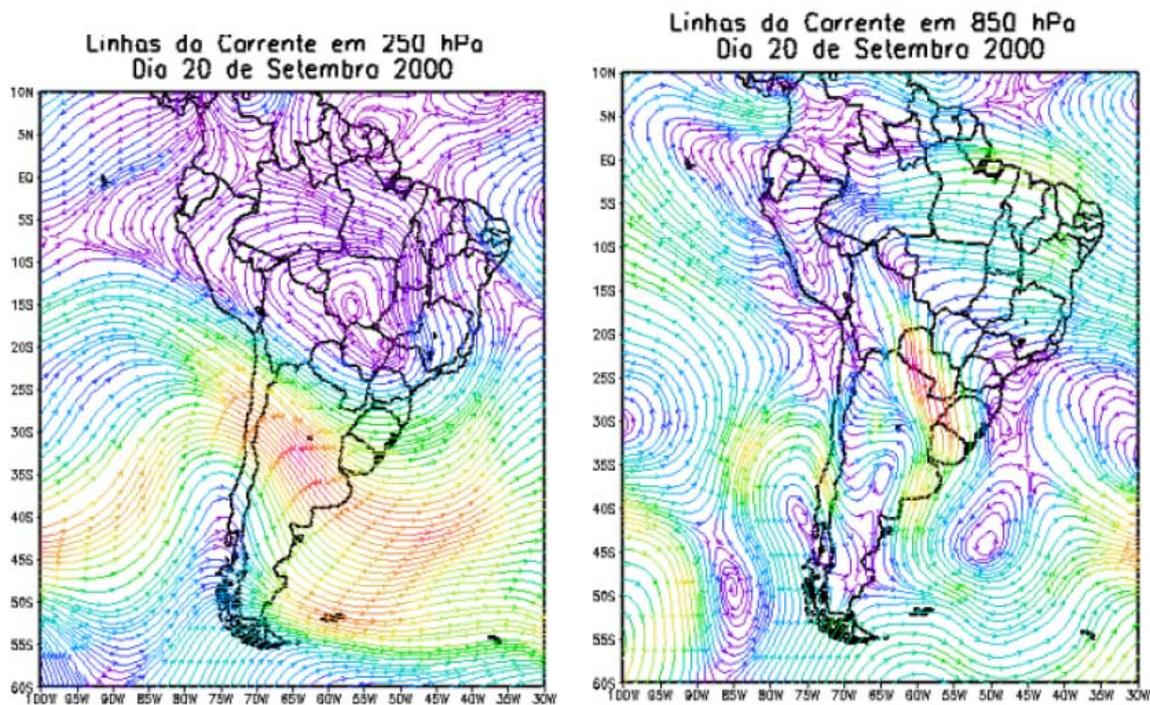


Figura 2.1– Linhas de corrente mostrando jatos de baixo e alto nível (maior intensidade dos ventos nas áreas vermelhas).

Fonte: Adaptada de Calbete *et al* (2001).

2.2 Características dos relâmpagos

Os relâmpagos podem ser classificados de diferentes maneiras, tanto com relação à carga transportada ao longo do canal, que indica a polaridade da descarga, quanto à direção de propagação do mesmo. Dessa forma, podem haver relâmpagos que envolvem a nuvem e o solo, conhecidos como relâmpagos NS (positivos ou negativos, segundo a sua polaridade) quando a descarga é transportada da nuvem para o solo; SN (solo-nuvem, 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 (PINTO JR. e PINTO, 2000; RAKOV e UMAN, 2003). Os principais tipos de relâmpagos podem ser vistos através da [Figura 2.2](#). Os relâmpagos NS são os mais conhecidos, tanto por seus efeitos sociais e econômicos quanto pelas várias maneiras de medi-los e estudá-los. Outro tipo de relâmpago consiste nos relâmpagos que se restringem à

atmosfera, ocorrendo dentro da nuvem, chamados IN (intra-nuvem), ou entre as mesmas, chamados então de EN (entre-nuvens). O estudo destes tipos de relâmpagos vem ganhando importância nos últimos anos com o desenvolvimento das redes de detecção em VHF, especialmente sobre previsão e análise de eventos severos (RAKOV e UMAN, 2003; DEMETRIADES *et al*, 2004). Sabe-se hoje que os relâmpagos IN ou EN, durante as tempestades, correspondem a cerca de 90% do total de relâmpagos (PINTO JR. e PINTO, 2000).

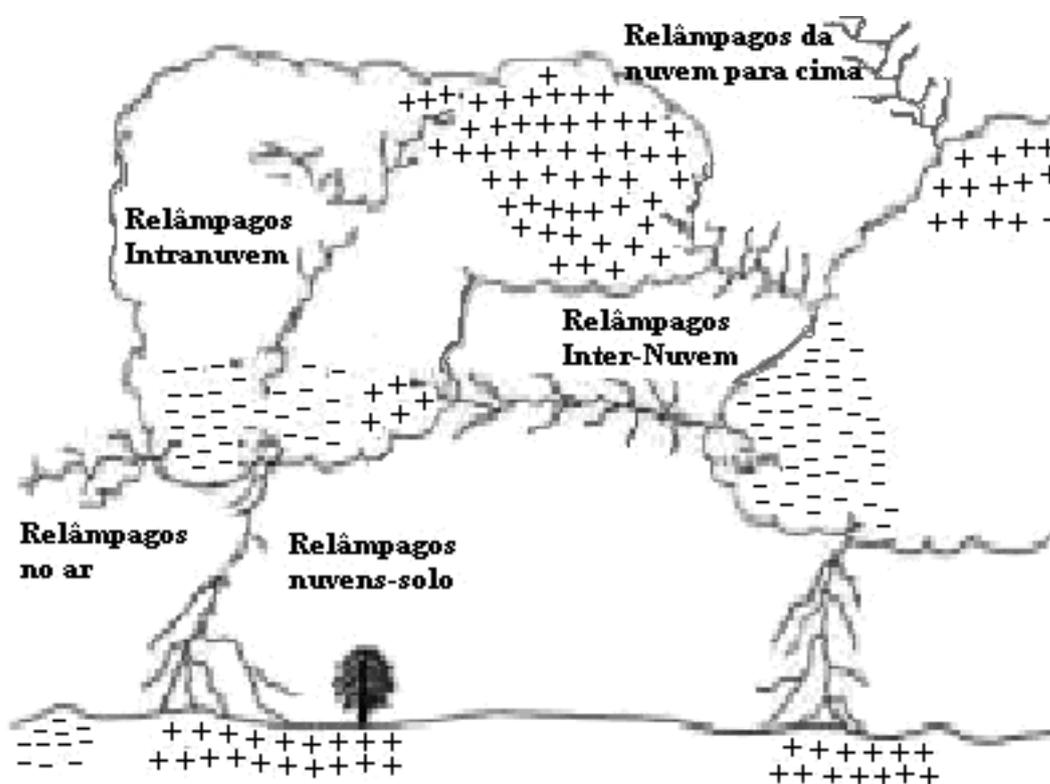


Figura 2.2– Representação dos principais tipos de relâmpagos.

Fonte: Adaptado de Tavares & Santiago (2002).

Existem ainda relâmpagos da nuvem para o ar e relâmpagos da nuvem para cima. Estudos recentes vêm sendo desenvolvidos acerca dos *sprites*, que são fenômenos luminosos que ocorrem na média atmosfera e associados, especialmente, a relâmpagos do tipo NS positivos (SÃO SABBAS, 1999; PINTO JR. *et al*, 2004).

A ocorrência de relâmpagos do tipo NS positivos está atrelada ao comportamento e evolução das nuvens de tempestade, sendo que, em geral, há maior ocorrência de relâmpagos positivos durante a fase madura da tempestade, onde há certo deslocamento horizontal do centro de cargas superior da nuvem (PINTO JR. e PINTO, 2000). O mesmo ocorre para SCMs lineares, os quais, segundo o seu comportamento, podem apresentar precipitação na região estratiforme para trás (*Trailing Stratiform Precipitation*); precipitação na região estratiforme para frente (*Leading Stratiform Precipitation*); ou com precipitação na região estratiforme paralela ao sistema (*Parallel Stratiform Precipitation*). Estes sistemas apresentam uma maior ocorrência de relâmpagos positivos na região com precipitação estratiforme para frente, enquanto os negativos ocorrem com maior frequência ao longo da linha de instabilidade (PARKER *et al*, 2001).

Os relâmpagos NS negativos são os mais comuns, representando cerca de 90% do total das descargas envolvendo o solo. Cabe destacar, no entanto, que as estatísticas feitas em torres metálicas tendem a favorecer relâmpagos NS negativos (aumentando a sua ocorrência), ao passo que estatísticas com base em sistemas de detecção tendem a favorecer os relâmpagos NS positivos, em função de contaminação destes por descargas IN nas soluções geradas pelo sistema (PINTO JR. e PINTO, 2000).

Os relâmpagos NS negativos apresentam singularidades, identificadas em estudos ao longo de muitos anos. Eles se formam após a quebra de rigidez preliminar, iniciando-se com fracas descargas dentro da nuvem. As suposições com relação às variáveis que atuam sobre essa quebra de rigidez com campos elétricos da ordem de 100 a 400 kV/m são principalmente a polarização de gotículas de água pelo campo local e atuação de elétrons secundários de origem cósmica. Após a quebra de rigidez, um canal se propaga em direção ao solo, em etapas de 30 a 100 metros cada, 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 em superfície, as descargas conectantes, que, quando conectadas ao líder escalonado, formam a descarga de retorno. É nesse momento que a carga é transferida ao solo. Uma nova descarga de retorno pode ocorrer no mesmo canal, já ionizado, ou por um novo caminho, indicando uma descarga subsequente. As descargas subsequentes indicam a multiplicidade da descarga. Todas essas etapas ocorrem em intervalos de tempo de centenas de milissegundos a poucos segundos (PINTO JR. e PINTO, 2000; VALINE e KRIDER, 2002; SABA *et al*, 2006a).

Os relâmpagos NS positivos apresentam as mesmas características, assumindo, porém, normalmente poucas ramificações do líder escalonado e ainda valores maiores para o pico de corrente. Também é nestas descargas que a ocorrência de corrente contínua, que é indicada por uma baixa e contínua corrente no intervalo de dezenas a centenas de milissegundos, é mais observada.

Os IN e EN 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.

2.3 Sistemas de detecção de descargas atmosféricas

Os sistemas de detecção surgiram em meados dos anos 80 nos Estados Unidos (ORVILLE *et al*, 1983; ORVILLE, 1991b; ORVILLE e HUFFINES, 2001), expandindo-se para outros países em pouco tempo. Esses sistemas utilizam medidas da radiação eletromagnética emitida pelos relâmpagos em baixas (VLF/LF, na faixa entre 10 e 300 kHz) e altas (VHF, na faixa de 30 a 300 MHz) frequências. Neste sentido, uma rede de sensores detecta essa radiação e, com as soluções associadas de cada sensor, é possível determinar o ponto de impacto da descarga (NACCARATO, 2006).

Estes sistemas podem trabalhar com dois métodos de detecção: através da medida da componente magnética da radiação emitida pelo relâmpago, conhecido como MDF (*Magnetic Direction Finder*) ou método da direção magnética; ou pela determinação do tempo que um pulso eletromagnético leva para chegar ao sensor, método este conhecido como TOA (*Time-of-Arrival*) ou método do tempo de chegada. Cada um desses métodos tem características peculiares, que devem ser levadas em conta no momento da determinação da localização das descargas. A localização das descargas através do método MDF é feita pela triangulação de sinais recebidos por diferentes sensores (pela intersecção das componentes de direção dada por cada sensor) e, para o caso do método TOA, é feita usando-se um processo de triangulação através de círculos, onde o raio de cada círculo é determinado pelo tempo de chegada do sinal ao sensor e as intersecções destes círculos determinam a localização da descarga. Este último é o método utilizado em sensores do tipo LPATS (SCHULZ, 1997; CUMMINS *et al*, 1998; CUMMINS e MURPHY, 2000). Os sensores atuais funcionam com ambos os métodos na geração das soluções, que passam ainda por diferentes processos de otimização (PINTO JR., 2005; NACCARATO, 2006). Estes sensores, combinando os dois métodos de detecção, são conhecidos como IMPACT (*Improved Accuracy Using Combined Technology*).

Outra possibilidade na detecção de descargas atmosféricas concerne ao uso de sensores ópticos a bordo de satélites. Esses sensores captam a radiação do relâmpago emitida na faixa do visível e, através de diferentes algoritmos para processamento dos dados, permitem identificar as descargas atmosféricas. O sensor mais recente é chamado de LIS (*Lightning Imaging Sensor*), destinado a adquirir e investigar a distribuição e variabilidade dos relâmpagos (CHRISTIAN *et al*, 2000). Este sistema possui, no entanto, algumas limitações. Estas se referem a questões temporais, em função de este sistema monitorar tempestades durante apenas 90 segundos a cada passagem do satélite sobre uma determinada região e apenas 2 vezes durante um dia; a questões espaciais, devido à baixa resolução, que varia de 3 km (nadir) a 6 km (limbo),

que permite gerar grades de densidades da ordem de 25x25 km; e ainda a questões relacionadas às próprias características das descargas, não sendo esse sensor capaz de diferenciar relâmpagos NS dos relâmpagos IN, o que impede certas análises. Para corrigir limitações como essas são aplicados modelos de eficiência de detecção. Esses modelos levam em conta, por exemplo, as variações do tempo de visada do satélite em diferentes latitudes e a variação de eficiência da detecção durante o dia (73%) e durante a noite (94%) (CHRISTIAN *et al*, 1989; BOCCIPPIO *et al*, 2002; CHRISTIAN *et al*, 2003).

Estas limitações não se restringem à detecção de relâmpagos por satélite. Os sistemas de detecção de relâmpagos em LF usados no Brasil e em outras regiões do planeta (rede americana NLDN, somada às redes européias e de outras regiões), possuem limitações que afetam a sua eficiência de detecção, que é entendida como a razão entre o total de descargas detectadas pelo sistema e o número real de descargas que ocorreram. Essa eficiência, por sua vez, depende de diferentes fatores: a eficiência individual de cada sensor, o número de sensores participando da solução, a linha de base dos sensores e a distribuição da corrente de pico das descargas. A eficiência tende a ser maior para as regiões centrais da rede e a diminuir à medida que se vai em direção às bordas da rede. Esta eficiência é determinada tanto sobre os flashes resultantes quanto sobre os *strokes* detectados pelo sistema, sendo essa eficiência relativamente menor para os *strokes* (SCHULZ, 1997; CUMMINS *et al*, 1998; NACCARATO, 2006).

Além da detecção e localização das descargas, esses sistemas de detecção em LF ainda permitem estimar o pico de corrente dos relâmpagos NS detectados. Esta estimativa é feita através de uma função que depende da velocidade da descarga de retorno (assumida como constante) e usa também a medida do campo elétrico, dado pelo sensor. Estas estimativas sofrem efeitos de atenuação na propagação do sinal ao longo da trajetória até o sensor e

ainda podem ser afetadas por variações da velocidade da descarga de retorno (ORVILLE, 1991a; MAIR *et al*, 1998; NACCARATO, 2006).

Outras informações são obtidas por esses sistemas de detecção e podem ser também usadas, tal qual a multiplicidade das descargas (obtida pelo agrupamento dos *strokes* detectados), informações temporais (hora, minuto, segundos, etc. com precisão de nanosegundos) e informações sobre as características do sinal (tempo de subida, largura de pulso, etc.). Havendo interesse em aprofundamento teórico nesses aspectos sugerem-se referências como as de Pinto Jr.(2005) e Naccarato (2006).

Com base no que já foi descrito, pode-se afirmar que os sistemas de detecção fornecem diferentes informações sobre as descargas atmosféricas, permitindo o seu uso com finalidades diversas. Desta forma, de acordo com os objetivos, determinadas características da rede podem ser de maior ou menor relevância.

2.4 Características geográficas e meteorológicas nos estudos de Eletricidade Atmosférica

Desde os primeiros estudos acerca da natureza elétrica dos relâmpagos, o homem vem tentando compreender e modular sua ocorrência. No entanto, 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 já é possível identificar as áreas com maior ocorrência desses eventos em todo o planeta. O que falta ainda, em muitos casos, é compreender as causas dessa espacialização, dessa variação na densidade sobre diferentes lugares. Entre algumas dessas causas, conforme apontam vários estudos, estão as características geográficas atuantes em um dado local. Estas características incluem aspectos como o relevo, o tipo e uso do solo e a vegetação.

2.4.1 A topografia nos estudos de Eletricidade Atmosférica

As informações topográficas tiveram seu primeiro uso em estudos meteorológicos, no intuito de fomentar modelos numéricos de previsão de tempo e modelos climáticos. A atuação do relevo se dá, a princípio, sobre a circulação atmosférica, onde há desde a formação de dutos de ar até efeitos sobre as massas de ar, bem como a influência em diferentes estratificações da atmosfera, especialmente pelos movimentos ondulatórios causados por essas variações de altitude (SMITH, 1979). Outro efeito destacado por Smith (1979) consiste na atuação da declividade, produto (derivada) da altitude, como forçante orográfica no disparo de convecção (ou ainda convecção profunda) para um estado atmosférico de instabilidade condicional. Neste ponto é de grande importância considerar os aspectos inerentes à topografia, como a forma da montanha, a direção do fluxo em relação à montanha e também a altitude da mesma. Os efeitos se dão ainda sobre as variações na insolação, que afeta fluxos locais (divergentes e convergentes) pelas variações de temperatura de um local para outro, que podem favorecer a formação de nuvens (aumento do fluxo vertical) ou mesmo levar à formação de tempestades (REAP, 1991).

Muitos estudos têm relacionado variações topográficas com diferentes tipos de condições meteorológicas atuantes, especialmente sobre sistemas convectivos, ou SCM, e sistemas frontais (efeitos sobre frontogênese e frontólise). Estes estudos envolvem especialmente simulações numéricas dos efeitos da topografia (EGGER e HOINKA, 1992; CHU e LIN, 2000). Sobre os sistemas frontais, os efeitos da topografia apresentam considerável influência, sendo a precipitação aparentemente intensificada e prolongada nas áreas montanhosas, o que seria explicado pela seqüência de chuvas pré-frontais seguidas pela passagem da frente.

No entanto, embora esses efeitos se dêem ao longo de toda a região montanhosa, a ocorrência de precipitação está associada quase totalmente às

regiões da montanha a barlavento (*windward slopes*), onde o ar é forçado a subir, levando à formação de chuva. Além dessas regiões, destacam-se ainda a região a sotavento da montanha, especialmente pela ocorrência de ciclogênese, conhecida como *lee cyclogenesis* (SMITH, 1979; CHEN e LIN, 2005).

Tem-se, portanto, dois fatores preponderantes na determinação do efeito da topografia sobre sistemas convectivos: o tipo de tempo/estação do ano, que pode determinar a importância da estabilidade/instabilidade sobre a precipitação; e ainda o tamanho da montanha, que é fundamental na determinação do local onde as correntes ascendentes forçadas poderão produzir precipitação (maior precipitação a sotavento para montanhas maiores de 100 km ou maior precipitação centrada na montanha para regiões menores que 20 km)(SMITH, 1979).

- Com base nisso, três mecanismos independentes de precipitação orográfica são identificados (Figura 2.3) (SMITH, 1979; CHU e LIN, 2000):
- Precipitação orográfica de larga escala em uma atmosfera estável (Figura 2.3 a), caracterizada pelo movimento vertical forçado pela orografia que leva à saturação do ar e a formação de precipitação;
- Controle orográfico na formação de nuvens Cumulonimbus em um ambiente condicionalmente estável (Figura 2.3 b). O aquecimento da montanha pela insolação, bem como a intensificação da componente vertical do fluxo de ar podem causar correntes ascendentes que, por sua vez, podem iniciar a formação de nuvens convectivas. Ocorre que, neste caso, a montanha age como a forçante necessária para se atingir a região de convecção livre, que poderá, então, levar à formação de nuvens de tempestade (IRIBARNE e CHO, 1980). Este último mecanismo é de grande importância no estudo de tempestades, pois a montanha, em uma atmosfera condicionalmente estável, pode disparar a

formação de nuvens de tempestade que, por sua vez, apresentam considerável eletrificação e, portanto, podem ter um efeito significativo na distribuição de relâmpagos numa dada região.

- Aumento da precipitação sobre pequenos elevados (Figura 2.3 c). A chuva de nuvens preexistentes é parcialmente evaporada antes de atingir o solo, e esta umidade acaba por alimentar a formação de novas nuvens (a exemplo do nevoeiro sobre montanhas depois da chuva);

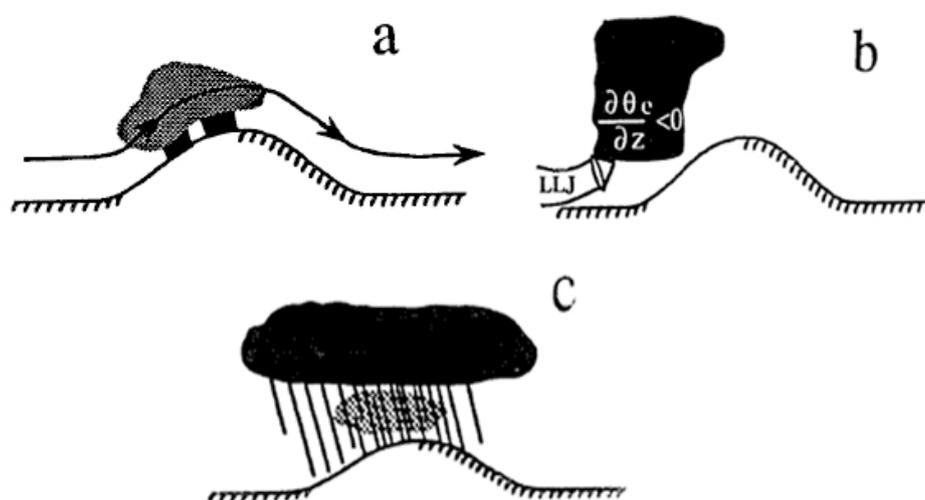


Figura 2.3 – Mecanismos de precipitação orográfica: (a) para uma atmosfera estável; (b) para um atmosfera condicionalmente instável; (c) precipitação induzida por realimentação.

Fonte: Adaptada de Chu and Lin (2000).

É interessante destacar a importância da forma e da localização das regiões elevadas, para que o efeito da topografia seja significativo. São essas características que irão determinar, por exemplo, a passagem de uma massa de ar sobre a montanha, ou que esta seja parcial ou totalmente desviada pelo entorno da montanha (SMITH, 1979).

Estudos recentes, especialmente após o avanço no uso de sistemas de detecção, vêm apontando efeitos da topografia sobre os relâmpagos, sendo relacionados, na sua maioria, ao desenvolvimento de climatologias regionais

(ORVILLE e SILVER, 1997; ORVILLE e HUFFINES, 2001; ZAJAC e RUTLEDGE, 2001). Estas climatologias, em grande parte, foram feitas sobre os Estados Unidos, visto que a maior e mais antiga rede se encontra neste país (NLDN, com cerca de 110 sensores IMPACT ESP atualmente). Nesses trabalhos, buscou-se compreender as distribuições espaciais e temporais das descargas, relacionando ainda os dados de relâmpagos com diferentes variáveis meteorológicas e geográficas. Poucos estudos até o momento evidenciaram correlações (relações diretas) entre o relevo e a distribuição de relâmpagos em escalas menores, como, por exemplo, cadeia de montanhas. Um desses estudos é apresentado por Schulz e Diendorfer (1999), usando informações de relâmpagos sobre a Áustria, e mostrando evidências de que há uma relação entre a ocorrência de relâmpagos e as variações de altitude para as cadeias montanhosas da região. No estudo, foram analisadas a densidade de relâmpagos NS total, a densidade de descargas positivas e negativas, e ainda variações na intensidade da corrente de pico, todas em função das variações de altitude. Os resultados indicaram um aumento na densidade de relâmpagos para altitudes de até 2000 metros, com posterior declínio. Os resultados para os picos de corrente também mostraram um comportamento similar, com declínio do pico de corrente para altitudes acima de 2000 metros. Também nesse trabalho Schulz e Diendorfer colocam alguns indicativos de que a proximidade da nuvem da montanha diminuiria a distância dos centros de carga (especialmente o centro de cargas negativo na base da nuvem) e a superfície, ou até mesmo colocaria a nuvem em contato com a superfície, facilitando a ocorrência de descargas.

Além disso, há fortes indicativos de que a altura do centro de cargas negativo tende a se manter estável ao longo da tempestade (isotermas entre -10° e -20°C) e ainda para diferentes tempestades, o que não ocorre para as cargas positivas, cuja altura tende a aumentar durante o desenvolvimento das tempestades (KREHBIEL, 1986). Dessa forma, tomando por base o fato de que a temperatura (isotermas) é pouco influenciada pelo relevo, têm-se centros de carga mais próximos à superfície para regiões mais elevadas. E isto

especialmente para regiões com variações significativas de altitude para pequenas distâncias. E, sendo a distância entre os centros de carga e a superfície menor, mais fácil seria a ocorrência de descargas. Outra hipótese com relação à interação entre os centros de carga da nuvem e a superfície diz respeito ao aumento do campo elétrico junto às montanhas (ROBLE e TZUR, 1986; PINTO, 1987), o que também poderia facilitar a ocorrência de descargas elétricas, embora nenhum estudo nesse sentido exista na literatura.

No Brasil também foram feitos estudos sobre as relações entre relâmpagos e a altitude. Estes estudos foram desenvolvidos especialmente sobre o Sudeste do Brasil (PINTO JR *et al*, 1999; NACCARATO, 2006). Pinto Jr *et al* (1999) encontraram uma relação linear entre os relâmpagos e a altitude, apesar de obter índices de correlação relativamente baixos. Naccarato (2006), assim como muitos outros trabalhos, também aponta para efeitos da altitude na distribuição dos relâmpagos, embora não mostre uma análise direta entre as variáveis.

Ershova *et.al.* (2002) também destaca efeitos da topografia na distribuição de relâmpagos sobre o Sul da Alemanha, onde as maiores densidades ocorrem em altitudes menores que 400 metros (para maiores altitudes a densidade diminui) e onde a diferença entre a mínima e máxima altitude (que remete a declividade) é de 100-400 metros. Reap (1991) também encontrou um aumento da densidade de relâmpagos para altitudes até 800 metros e um posterior decréscimo sobre o Alaska (Montanhas Rochosas), assim como obteve uma relação direta entre a variação diária (ou horária) no pico de atividade elétrica e a altitude. Ele observou que o pico da atividade tende a acontecer antes à medida que a altitude aumenta. Resultado semelhante já havia sido encontrado por Reap (1986) quando da análise das relações entre os relâmpagos e o relevo, encontrando, para este último caso, uma relação direta entre a altitude e as descargas. Com relação à variação horária do pico de atividade elétrica, para ambos os trabalhos foi obtida uma relação negativa entre a altitude e a

variação no pico das atividades, sendo que, à medida que aumenta a altitude, o horário de pico das atividades tende a se adiantar.

2.4.2 Os solos nos estudos de Eletricidade Atmosférica

Estudos levando em consideração os efeitos do tipo de solo (condutividade/resistividade) de uma dada região sobre os relâmpagos ainda não mostraram resultados conclusivos. Nos resultados obtidos por Gomes (2002), por exemplo, foram encontradas possíveis relações entre as descargas e os tipos de solo, com um considerável aumento no número de descargas em regiões de Latossolo Ferrífero, embora esse aumento possa, conforme ressalta a autora, estar associado mais ao efeito urbano do que ao próprio solo, pois as regiões com maior densidade de descargas são coincidentes. Em outros casos, nenhuma possível relação entre os relâmpagos e os tipos de solo é encontrada. É o caso do trabalho de Pinto Jr. *et. al.* (1999) já citado, que busca relações entre os relâmpagos e a condutividade de diferentes tipos de solo, cujos resultados não exibem correlação entre as variáveis. Isso talvez aconteça porque é difícil avaliar o tipo de solo nestes estudos, pois a ocorrência de relâmpagos está relacionada diretamente com a ocorrência de precipitação, e o solo, ao sofrer alterações na quantidade de água, altera também a sua condutividade, não sendo mais possível definir se os efeitos estão realmente relacionados ao tipo de solo da área.

Kamra e Ravichandran (1993) também buscaram efeitos da condutividade do solo sobre as características elétricas da atmosfera e seus possíveis efeitos sobre os relâmpagos. Eles encontraram variações significativas do campo elétrico (vertical e horizontal) sobre diferentes condições de condutividade da superfície e propuseram que efeitos dessas variações poderiam afetar a localização de descargas conectantes (e de retorno). No entanto, essas variações são significativas junto à superfície, mas diminuem com a altura sendo que, para as altitudes onde se encontram as nuvens (e os centros de

carga), seus efeitos são pequenos e, possivelmente, desprezíveis (GOMES, 2002).

Chauzy e Soula (1999) destacam que as variações espaciais das características elétricas, condutividade e resistividade da superfície (atreladas aos constituintes do solo) afetam a produção de corrente corona junto ao solo por campos elétricos elevados, que irão afetar principalmente a produção de cargas positivas na base da nuvem através do mecanismo convectivo de geração de cargas. Assim, criar-se-ia uma condição favorável à ocorrência de relâmpagos NS positivos oriundos desse centro de cargas (GOMES, 2002). Essa corrente corona, porém, não depende apenas da condutividade, mas também da geometria da superfície (objetos pontiagudos possuem um campo elétrico mais intenso, favorecendo a formação de corrente corona). Outro aspecto relacionado a estas idéias refere-se ao fato de que a produção de cargas através deste processo é pouco significativa em relação aos processos macro e microfísicos dentro das nuvens, o que pode torná-lo também desprezível.

Destaca-se ainda o fato de que variações espaciais do conteúdo de água no solo, bem como os próprios tipos de solo, podem estar ligadas diretamente à medida dos relâmpagos. É importante ter em mente que através de variações de condutividade do solo, a medida do pico de corrente das descargas é alterada por efeitos de atenuação do sinal recebido pelos sensores ante a sua propagação desde o local da ocorrência da descarga (ORVILLE, 1991a), onde solos com maior resistividade (menor condutividade) tendem a apresentar maior efeito na atenuação do sinal. Embora sugeridos esses efeitos, estudos mostraram um comportamento diferenciado dos picos de corrente sobre o oceano, com efeitos opostos entre relâmpagos positivos e negativos (ORVILLE e HUFFINES, 2001). Este efeito pode também resultar de outro que não da condutividade, visto que as variações se mostraram abruptas, o que não deveriam ocorrer no caso de atenuação do sinal.

Outra característica geográfica que pode ser determinante na distribuição de descargas é a quantidade de água no solo e a existência ou não de vegetação na superfície (CHANG e WETZEL, 1991; PIELKE, 2001). Para uma atmosfera condicionalmente instável, a variação espacial do conteúdo de água do solo poderia determinar, por exemplo, a localização do início da convecção (CHANG e WETZEL, 1991). A existência ou não de vegetação está, por sua vez, diretamente ligada às condições para o seu desenvolvimento: luz, calor, umidade e solos favoráveis, nos quais é indispensável à existência de água. Estas condições, além de serem necessárias à vegetação, indicam um ambiente favorável à formação de tempestades. Ocorrendo normalmente altos valores de umidade associados a temperaturas elevadas nas regiões com vegetação densa (por processos de transpiração/evapotranspiração das plantas), criam-se nestas áreas grandes chances de se formarem nuvens de tempestade. É o caso, por exemplo, das tempestades na região amazônica ou do efeito da umidade desta região sobre os CCMs que ocorrem no norte da Argentina e Sudoeste do Brasil (Depressão do Chaco).

Sellers *et al* (1986), através de um modelo, expressam o papel físico e fisiológico da vegetação: (i) ela determina grande parte da reflexão, transmissão, absorção e emissão da radiação direta e difusa nos comprimentos de onda no visível, infravermelho próximo e no infravermelho termal; (ii) na interceptação da chuva e sua evaporação através das folhas; (iii) na infiltração, drenagem e armazenamento da água no solo; (iv) controle da umidade entre o solo e a atmosfera, por meio dos estômatos e do sistema raiz-caule-folha; (v) e a transferência dinâmica de vapor d'água, calor sensível e momento de fluxo da vegetação e solo para a atmosfera. Todos esses aspectos, aliados à temperatura, podem ser fortes indicadores e/ou agentes na formação das tempestades e modulação da distribuição/densidade das descargas.

2.4.3 A temperatura nos estudos de Eletricidade Atmosférica

Sobre a temperatura de superfície, destaca-se a importância desta nos fluxos de superfície, especialmente pelas interações entre a atmosfera e a superfície através dos fluxos de calor latente e calor sensível, podendo ser usada nas estimativas do balanço energético da superfície (SELLERS *et al*, 1986). Além desses aspectos, a temperatura, associada com outras variáveis, é um dos principais determinantes das condições de estabilidade da atmosfera e podem levar à formação de tempestades. De Pablo e Soriano (2002) identificaram reflexos da variação da temperatura de superfície nas variações na densidade de relâmpagos sobre o oceano (SST, *Sea Surface Temperature*) na região da Península Ibérica. Porém, quando levada em conta a temperatura sobre o continente (LST, *Land Surface Temperature*), o mesmo estudo não mostrou nenhuma correlação desta temperatura com as descargas elétricas, possivelmente por ser uma região de pouca extensão continental, onde o efeito da umidade oceânica é predominante. Williams (1994) também mostrou uma estreita relação entre a temperatura do ar na superfície e o CEAG pela resposta (intensificação) deste ao aumento da temperatura, mostrando que o papel da LST é de grande importância na ocorrência de tempestades, eletrificação de nuvens e na conseqüente ocorrência de descargas. Destaca-se, no entanto, o fato de que a contribuição da temperatura se dá especialmente relacionada à umidade, pela temperatura de bulbo úmido.

Price (1994), em seu trabalho, relaciona as variações de temperatura a nível global à frequência global de relâmpagos. A frequência de relâmpagos, nesse caso, foi obtida através de parametrizações indiretas, com base em dados de temperatura de topo das nuvens (indicativos de convecção). Usando-se dessa metodologia, foi encontrada uma boa correlação (valores da ordem 0.75) entre as variações sazonais da temperatura de superfície e a frequência de relâmpagos a nível global.

Outros trabalhos recentes têm buscado relações entre a temperatura de superfície de grandes centros, sob um efeito conhecido como ilhas de calor, e os relâmpagos (SORIANO e DE PABLO, 2002; STEIGER *et al*, 2002). Soriano e de Pablo (2002), analisando pequenas e grandes cidades da Europa (desde 2 mil a 330 mil habitantes) e suas relações com a ocorrência de relâmpagos, sugerem que maiores densidade populacionais contribuem no aumento da densidade de relâmpagos, não ocorrendo o mesmo quando do aumento da área urbana. No Brasil, também foram realizados estudos, buscando relações entre a temperatura de superfície em grandes centros urbanos e as descargas atmosféricas, onde foram verificadas 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). Na maioria desses estudos, efeitos urbanos foram atrelados tanto às variações de temperatura quanto aos poluentes (aerossóis) lançados na atmosfera.

2.4.4 Relações sistêmicas entre variáveis geográficas e meteorológicas

Sabendo-se das estreitas relações entre as características meteorológicas e geográficas e as descargas atmosféricas, é importante ter em mente ainda as relações entre as próprias características meteorológicas e geográficas. Ambas as variáveis, considerando ainda diferentes níveis de interação, possuem íntimas relações, além de uma reciprocidade na maioria dos casos. O relevo, por exemplo, afeta diretamente as condições da atmosfera, as quais podem condicionar a formação de tempestades. O tipo de solo está relacionado diretamente à capacidade de retenção de água, assim como o seu uso implica variações localizadas de temperatura.

Seguindo nesse contexto, toma importância a vegetação, que depende do solo e da quantidade de água presente no mesmo. A vegetação ajuda na manutenção da umidade e mantém a temperatura mais estável. Essas características afetarão diretamente as condições de estabilidade da atmosfera, podendo favorecer ou não a formação de tempestades. A

ocorrência de tempestades, por sua vez, ajuda a manter a quantidade de água necessária à vegetação.

Observa-se, a partir desses exemplos, que as variáveis estão incluídas num sistema dinâmico de reciprocidade, onde variações nos inputs (de determinadas variáveis) alteram a estrutura de todo o sistema. Uma representação desse sistema pode ser vista no diagrama da [Figura 2.4](#).

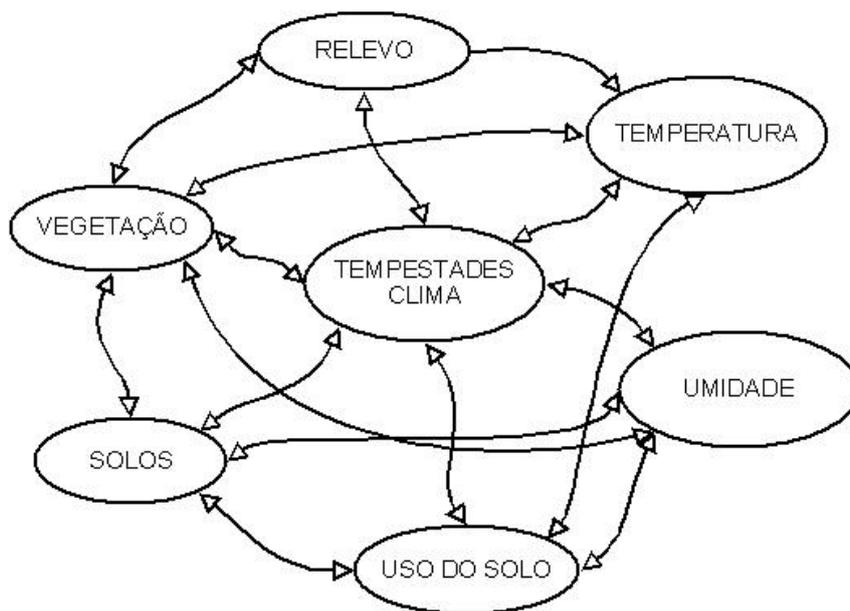


Figura 2.4 – Diagrama das relações sistêmicas em diferentes níveis.

3 METODOLOGIA

3.1 Localização da área em estudo

A região em estudo compreende o Estado Rio Grande do Sul, localizado em médias latitudes, na zona subtropical (entre 27 e 34° de latitude Sul e entre 50 e 57° de longitude Oeste). O mapa da [Figura 3.1](#) mostra a região de forma mais detalhada e destaca a variação de relevo na parte central do Estado, conhecida como Depressão Central. As áreas elevadas ao norte representam o Planalto Sul-Riograndense, as áreas elevadas na região centro-sul representam o Escudo Sul-Riograndense, e a leste, encontra-se a Planície Litorânea (UFRGS, 1999). As áreas em verde da figura indicam regiões com baixa altitude e as áreas em amarelo referem-se as regiões mais elevadas.

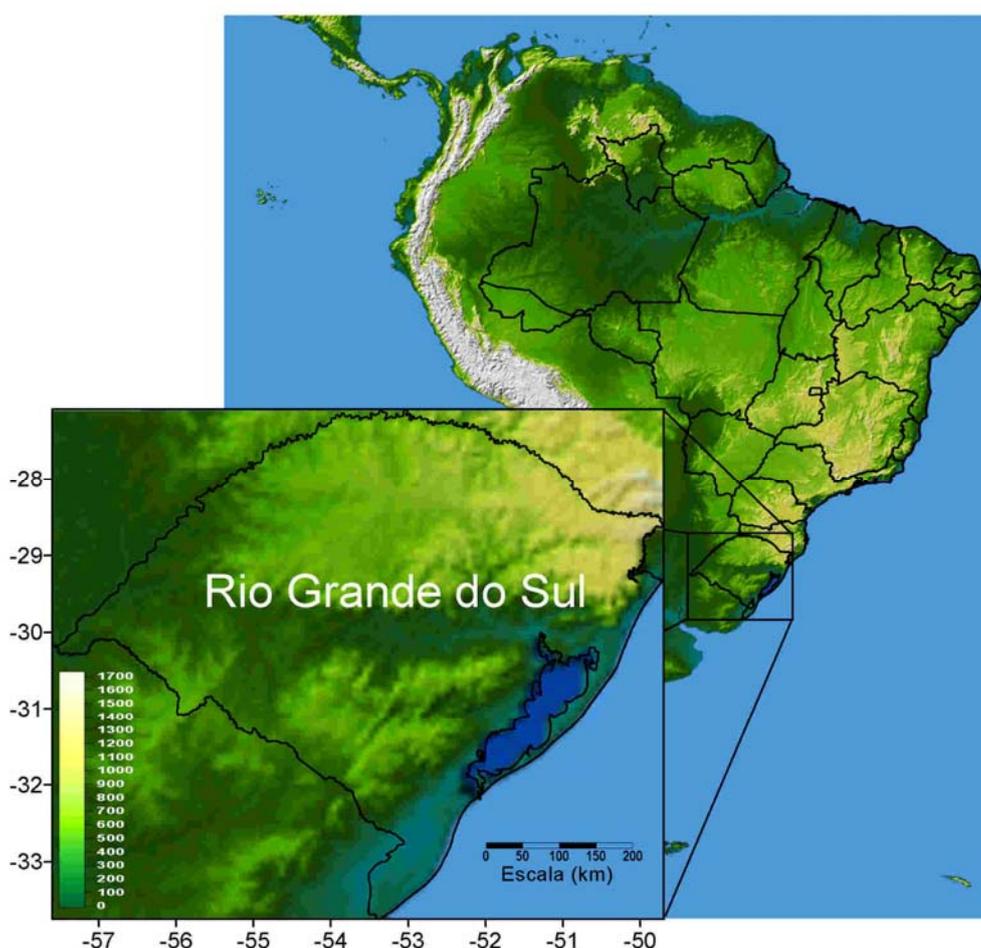


Figura 3.1 – Localização da área de estudo.

3.2 Dados utilizados

Os dados utilizados na análise resultam de diferentes fontes. Primeiramente, destacam-se os dados de descargas atmosféricas no período de Junho de 2005 a Maio de 2007, oriundos da Rede Brasileira de Detecção de Descargas Atmosféricas (BrasilDAT), da qual o INPE, através do Grupo de Eletricidade Atmosférica (ELAT), é membro. Esta rede é composta por sensores do tipo LPATS e IMPACT, distribuídos sobre as Regiões Sul, Sudeste, Centro-Oeste e Norte, cobrindo algumas regiões de forma parcial, e outras completamente. A mesma rede é também resultado do consórcio entre diferentes empresas e instituições brasileiras. Sobre o Rio Grande do Sul, conforme mostra a [Figura 3.2](#), a rede é composta apenas por sensores do tipo IMPACT, admitindo soluções com maior precisão e também uma maior eficiência na detecção das descargas.

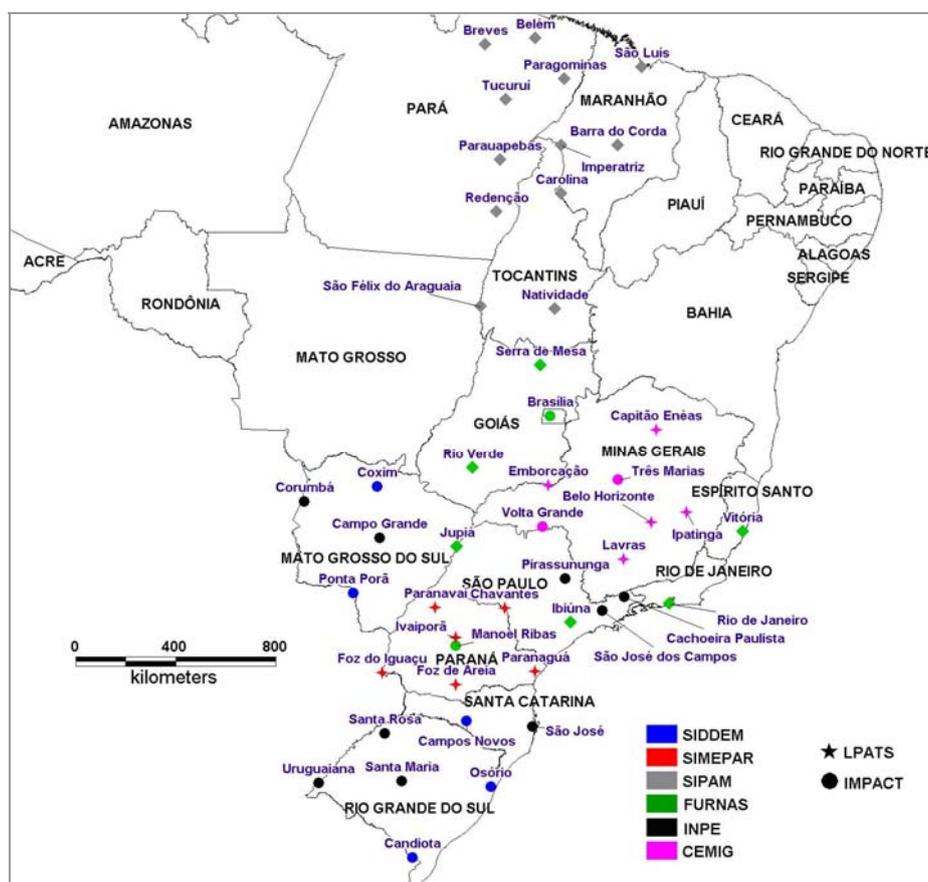


Figura 3.2 – Localização dos sensores da BrasilDAT.

Com relação à eficiência, modelos de eficiência de detecção foram criados para identificar e corrigir limitações na detecção, oriundas de problemas na comunicação e queima de equipamentos. Estes modelos levam em conta ainda a eficiência para diferentes intensidades de corrente de pico, sendo que a eficiência cai rapidamente à medida que a corrente de pico diminui (NACCARATO *et al*, 2005). O modelo mais recente (Modelo de Eficiência de Detecção MED3) a ser aplicado foi desenvolvido pelo ELAT e leva em conta ainda as singularidades de cada sensor (NACCARATO *et al*, 2007). Destaca-se que a correção, para este caso, levou em conta a média anual do status dos sensores e não considera, por exemplo, variações diurnas (ou horária) do status da rede. Mais informações a respeito da rede e suas características podem ser obtidas ainda nas obras de Pinto Jr. (2006) e Naccarato (2006). A [Figura 3.3](#) mostra o mapa de eficiência sobre o Rio Grande do Sul.

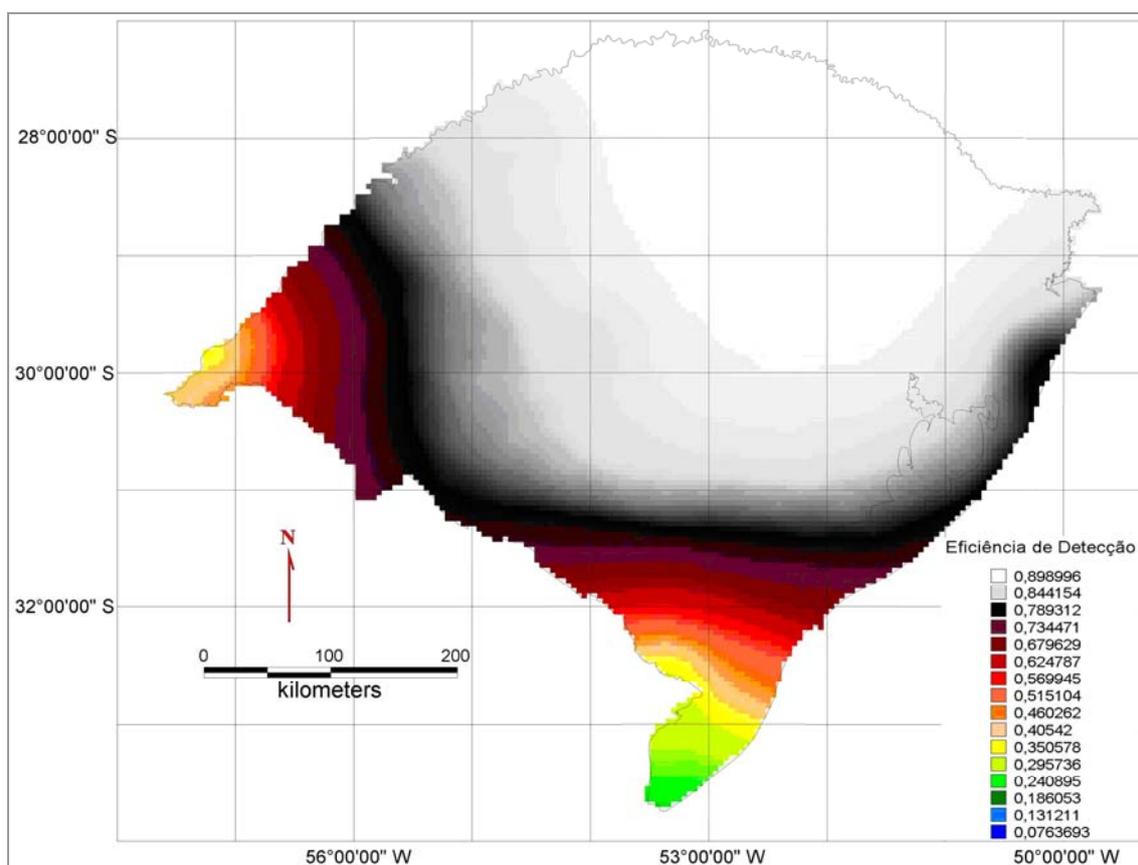


Figura 3.3 – Eficiência de detecção obtido pela aplicação do MED3 sobre o Rio Grande do Sul.

De forma a complementar e/ou validar os resultados com base na rede BrasilDAT, foram utilizados dados do sensor orbital. Este sensor está a bordo da plataforma TRMM (*Tropical Rainfall Measuring Mission*) e pertence ao EOS (*Earth Observing System*). Suas principais características e limitações já foram mencionadas anteriormente no texto. Os dados obtidos compõem um intervalo de quase 10 anos (Dez 1997 a Maio 2007), e representam uma série temporal considerável, apesar da sua baixa amostragem a cada passagem do satélite. Os dados, neste caso, não passaram por nenhuma correção na sua eficiência, sendo, portanto, apenas uma indicação da distribuição das descargas. Este aspecto, por outro lado, é compensado pela considerável série temporal que os mesmos compõem sobre a região em estudo.

As informações sobre a topografia foram obtidas através do Modelo Digital de Elevação (MDE) do programa *Shuttle Radar Topographic Mission* (SRTM) da NASA. Estes dados foram gerados, pelo uso de interferometria através de radar de abertura sintética (RODRIGUEZ e MARTIN, 1992). Este MDE, sobre a região em questão, apresenta, para 90% dos dados, um erro de altitude vertical linear absoluto inferior a 16 metros e um erro absoluto de precisão horizontal de até 20 metros sobre o tamanho do pixel (90 metros). Estes erros possuem entre suas principais fontes: oscilações do ângulo do sensor; erros de fase de diferentes ordem e origem; e erros de posição e tempo (RODRIGUEZ *et al*, 2005). As imagens (ou MDEs) SRTM foram obtidas através da EMBRAPA (MIRANDA, 2005), no formato GEOTIFF (16 bits), sistema de coordenadas geográficas (lat/long), datum WGS84. Estas, que se apresentam divididas segundo as cartas de 1:250.000 (IBGE), foram agrupadas em um mosaico para todo o Rio Grande do Sul. O próprio formato da imagem já implica que as mesmas sejam georreferenciadas. Este mesmo MDE foi usado para gerar a imagem/matriz de declividade. Esta última também foi criada no formato GEOTIFF (16 bits), sistema de coordenadas geográficas (lat/long), datum WGS84.

Os dados sobre os tipos de solo (mapas temáticos) foram obtidos através do banco de dados do IBGE, que é apresentado em uma escala de 1: 5.000.000, sendo resultado do Projeto RadamBrasil (1970-1980) e de levantamentos mais recentes realizados pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA, 2007; IBGE, 2007) (Figura 3.4). Seu detalhamento é pequeno, mas suficiente para os objetivos desse estudo. Este banco traz as informações georreferenciadas sobre os tipos de solos, no formato *shape*, que permite sua manipulação através de diferentes aplicativos de SIG (Sistema de informações Geográficas), aliadas a outras informações georreferenciadas.

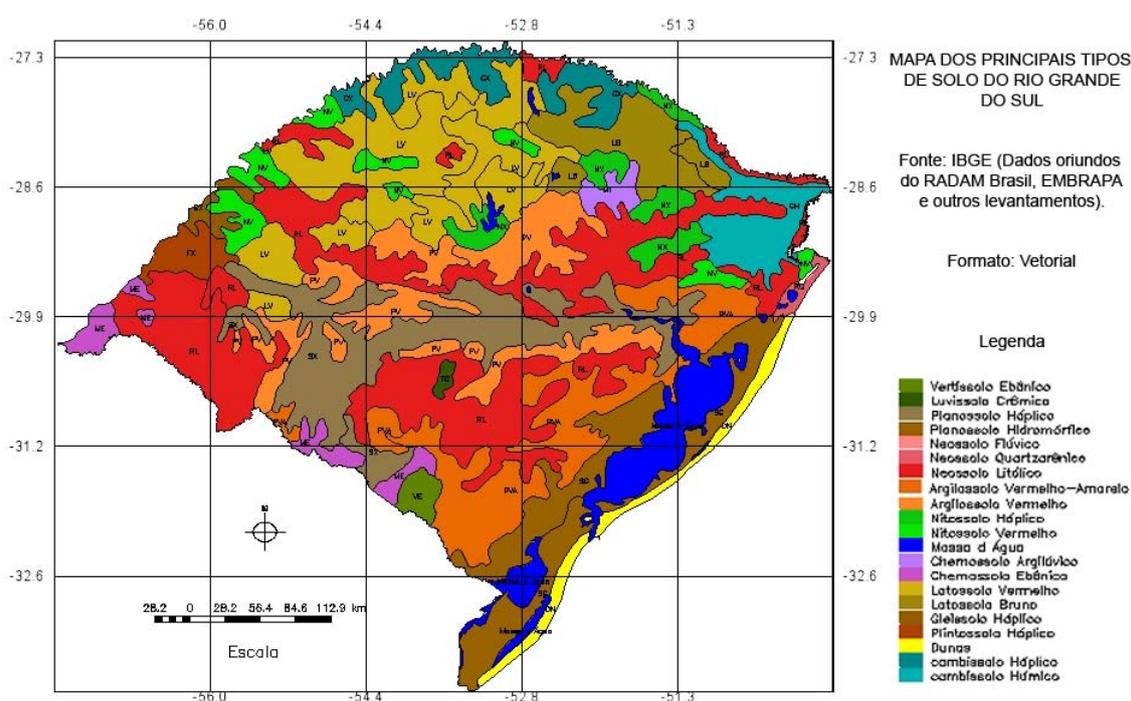


Figura 3.4 – Principais tipos de solo do Rio Grande do Sul. Este mesmo mapa é usado na análise (por classes) em relação às descargas.

Em conjunto com as informações espaciais, um banco de dados com informações específicas de cada tipo de solo foi montado. Estas foram obtidas através de um banco de dados experimental da EMBRAPA, que possui informações sobre cada tipo de solo, obtidas por amostragens em diferentes locais. Para cada tipo de solo, foi obtida uma média dos valores da cada parâmetro (características físicas e químicas). Aproximadamente 14 amostras

de cada tipo de solos foram usadas para estabelecer as médias (apesar do pequeno número de amostras, as tendências puderam ser evidenciadas). Os parâmetros incluídos na análise foram: granulometria (teores de silte, argila areia e cascalho) e características metalogenéticas (teores de Óxido Férrico ou Hematita, Fe_2O_3 ; Óxido de Alumínio ou Alumina, Al_2O_3 ; e Óxido de Titânio, TiO_2). Destaca-se que a nomenclatura dos tipos de solo variou consideravelmente ao longo dos últimos anos e que a nomenclatura adotada nesse trabalho leva em conta o novo Sistema Brasileiro de Classificação dos Solos (SBCS) (EMBRAPA, 1999). Ainda ressalta-se que as amostras referem-se, em muitos casos, a períodos anteriores à última versão do SBCS, que foram atualizados segundo as mudanças de nomenclatura em cada tipo de solo (EMBRAPA, 1981; EMBRAPA, 1999).

As imagens MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) foram usadas para analisar as variações de temperatura da superfície, através do produto mensal MOD11C3, resultado da composição mensal dos produtos LST diários MOD11C1, com resolução de 0.05° (aproximadamente 5 quilômetros), usando coordenadas geográficas lat/lon e datum WGS84 (WAN, 2006). A acurácia para as imagens LST é de 1 K para a resolução de 1 km, sendo possível encontrar uma acurácia de até 0.3 K sobre lagos e oceanos. (WAN e LI, 1997; WAN, 1999). O sensor MODIS está a bordo dos Satélites Aqua e Terra, resultantes de cooperações ente as agências espaciais americanas (através do EOS), canadenses e japonesas, fornecendo informações em nível mundial de diferentes variáveis, como temperatura, cobertura de nuvens, concentração de aerossóis, índices de vegetação, etc. (ARDANUY *et al*, 1991). Este sensor possui 16 bandas, coletando informação em comprimentos de onda do infravermelho termal (IVT, 3 a $15 \mu\text{m}$). Erros sistemáticos por banda do sensor, bem como o ruído associado a cada banda, devem ser considerados. A informação relativa a cada banda passa ainda por um processo de validação, que inclui correções para efeitos atmosféricos, tal como a absorção por vapor de água, ozônio e outros gases da atmosfera (WAN e LI, 1997). De forma complementar à análise da temperatura, imagens do satélite LANDSAT 7 ETM

na banda do infravermelho termal (banda 6, comprimento de onda entre 10,4 - 12,5 μm) foram usadas com fins comparativos e, ao mesmo tempo, de caráter comprobatório para as regiões metropolitanas de São Paulo e Porto Alegre (efeitos da temperatura sobre as áreas urbanas). Estas imagens foram obtidas através da DGI/INPE e informações detalhadas são dadas na [Tabela 3.1](#).

Tabela 3.1– Características das imagens LANDSAT utilizadas no trabalho.

Região Analisada	Orbita/Ponto	Data	Horário de passagem do satélite
Porto Alegre	221/081	31/01/2003	12:52:56
São Paulo	219/076	02/02/2003	13:07:15

Complementando o estudo no que se refere à análise dos efeitos da topografia foram usados mapas de vento (frequência e direção). Estes mapas resultam de um projeto coordenado pela Secretaria de Energia, Minas e Comunicações do Rio Grande do Sul ([Figura 3.5](#)).

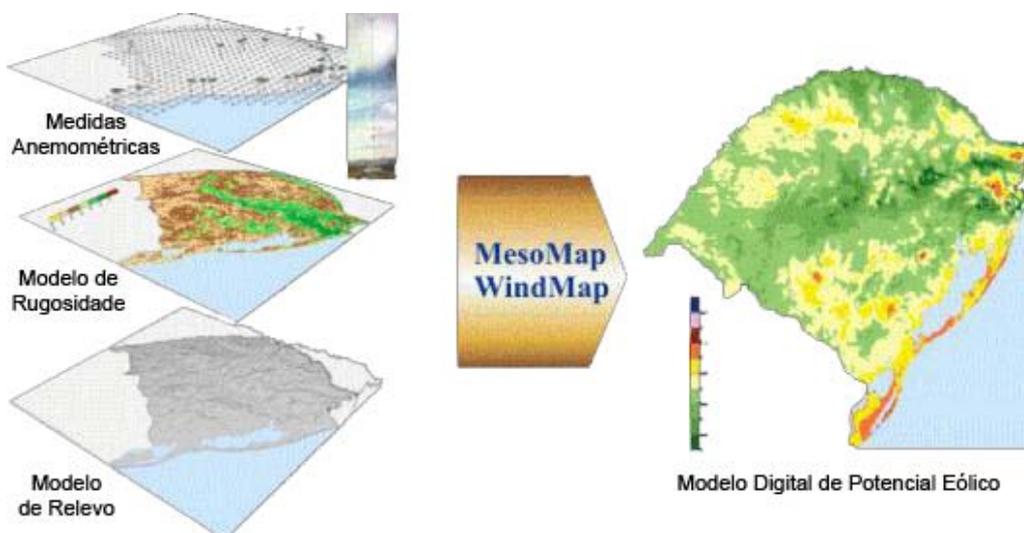


Figura 3.5 – Modelo da metodologia adotada na análise dos dados de vento.

Fonte: adaptado de Rio Grande do Sul (2002).

Os dados utilizados na geração dos mapas resultam de estações anemométricas (21 torres) e também de dados de reanálise (série de 15 anos de dados do NCAR/NOAA). Na sua modelagem foram integrados, além das informações de vento, dados de elevação (MDEs GTOPO30/GLOBE) e um

modelo de rugosidade (elaborado a partir de imagens LANDSAT). Estes dados foram interpolados, analisados, e, posteriormente, expostos na forma de mapas de ventos junto à superfície (Rio Grande do Sul, 2002).

3.3 Processamento dos dados de relâmpagos

Os dados de relâmpagos NS, depois de agrupados em uma única série temporal, e suprimidos os relâmpagos NS positivos com pico de corrente abaixo de 20 kA (com fins de reduzir ao máximo a contaminação destes por relâmpagos IN), foram processados para gerar uma matriz de densidade anual e por km². O processamento leva em conta o número de descargas que ocorrem em cada célula da matriz e é calculado da seguinte forma:

$$den = \left(\left(\frac{\sum n}{res^2} \right) * \frac{tmes}{12} \right) \quad (3.1)$$

onde *den* é a densidade anual e por km² de descargas; *n* refere-se a cada descarga dentro de cada célula da matriz; *res* é a resolução (unidimensional) das células da matriz; e *tmes* é o total de meses analisados. A resolução da matriz utilizada para este estudo foi de 5 km (25 km²). Esta resolução foi adotada por ser o número médio de pontos (ou flashes) associado a cada célula da grade um pouco acima de 100. Assumindo que a raiz quadrada deste número, dividida pelo mesmo e multiplicada por 100 seja indicativa do erro associado a cada célula, este erro seria da ordem de 10%, o que fica em uma margem aceitável. É com base nessa matriz de densidade que são feitos os mapas de densidade de relâmpagos, usando, para isso, um interpolador multivariado IDW (*Inverse Distance Weighting*) disponível no aplicativo MAPINFO, um algoritmo de média móvel que leva em conta o inverso da distância dos pontos na interpolação. Ele se baseia no mesmo princípio do

interpolador de *média ponderada*, descrito na [Equação 3.2](#). Feita a matriz de densidade, esta é transformada para um formato vetorial com geo-objetos¹ e também em dados pontuais na forma XYZ (latitude, longitude e cota Z). Em seguida, estes dados foram processados através do aplicativo SPRING. Um diagrama resumindo o processamento dos dados de descarga pode ser visto na [Figura 3.6](#). Além da matriz de densidade, gerada para o total de relâmpagos NS, NS positivos e NS negativos, média das polaridades dos relâmpagos SN positivos e negativos foram feitas e também transformadas para o formato XYZ. Estas densidades e médias serão usadas para a análise das classes de solo, descritas posteriormente.

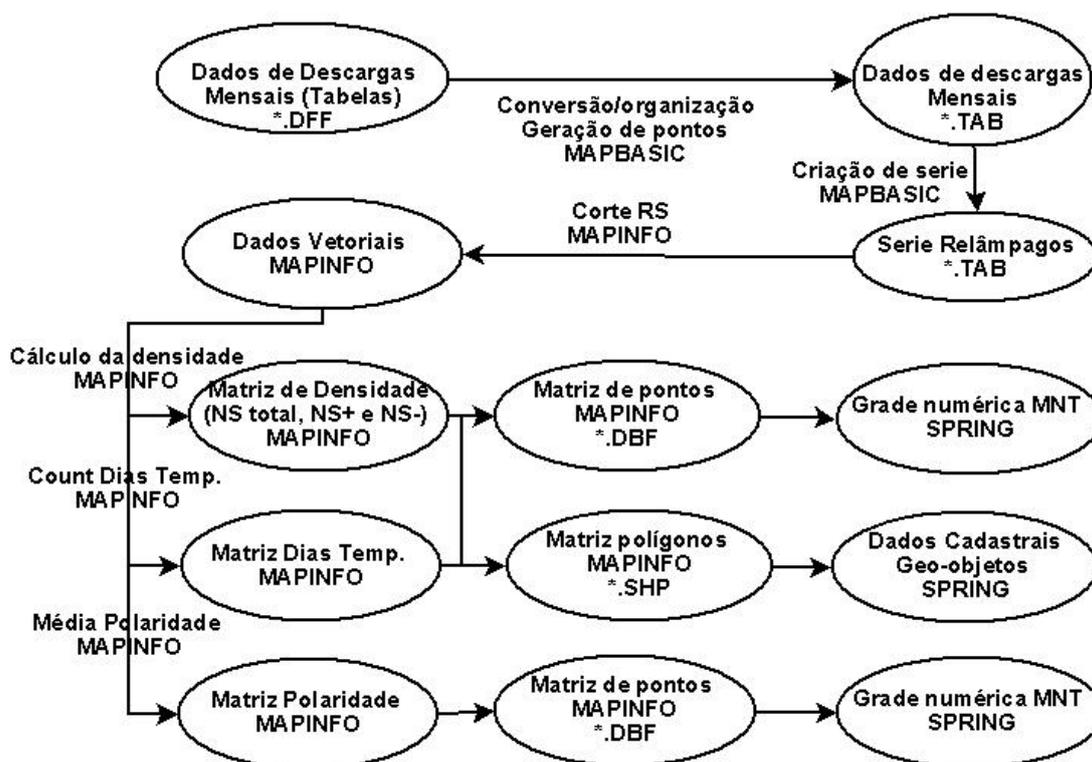


Figura 3.6 – Etapas do processamento dos dados de relâmpagos.

¹ Refere-se à associação de uma determinada topologia (áreas ou polígonos) a uma ou um grupo de características, expressas na forma de uma tabela, inerentes a esta topologia e independentes da forma gráfica da mesma.

3.3.1 Processamento para a análise espacial por geo-objetos

Os dados na forma de geo-objetos foram analisados em relação às grades numéricas MDE (ou MNT, Modelo numérico de Terreno, que se refere a uma representação matemática da distribuição espacial de uma determinada variável vinculada a uma superfície real), onde funções estatísticas básicas (média, desvio padrão, variância, etc.) foram usadas para extrair as informações dessas grades numéricas, coincidentes com cada geo-objeto. Estas funções permitem analisar grades numéricas a partir de geo-objetos, sendo as informações incluídas na mesma tabela dos geo-objetos.

Esta metodologia foi utilizada em função das diferentes resoluções entre a matriz de densidade de relâmpagos (geo-objetos com resolução de aproximadamente 5 km) e as demais grades numéricas (SRTM com 90 metros, MODIS com 5 km), processo esse realizado através de uma rotina desenvolvida dentro do próprio SPRING, através da linguagem LEGAL (Linguagem Espacial para Processamento Algébrico), exposta no [Apêndice A.3](#). Finalmente, com os geo-objetos associados às informações (estatísticas) das grades numéricas, os dados passaram à análise através de programas estatísticos e funções a serem descritas posteriormente.

Os dados de relâmpagos foram analisados, conforme já indicado na [Figura 3.6](#), em termos de dias de tempestade, que compreendem um período de 24 horas (definido entre 0 e 23 horas) no qual tenha ocorrido uma descarga. Este processamento foi feito através de uma rotina desenvolvida no aplicativo MAPBASIC ([Apêndice A.1](#)). Para tal, foi usada uma matriz com a mesma resolução matriz de densidade (5 km) e a cada célula dessa matriz foi atribuído um valor indicativo dos números de dias de tempestade. Esta análise permite a melhor compreensão da distribuição de tempestades sobre a região, além de ser uma alternativa à análise das características espaciais da ocorrência das descargas. Essas matrizes passam pelo mesmo processamento da matriz de densidade (e da análise com outras grades), descrito anteriormente, não

havendo, no entanto, o processamento através de dados pontuais XYZ (análise somente através de geo-objetos).

3.3.2 Processamento para a análise espacial por classes

Já os dados pontuais XYZ, na forma de uma matriz regular de pontos (pontos distribuídos regularmente no espaço), foram interpolados através de uma função de *média ponderada*. Nesta função o valor de cota da grade será dado a partir da média ponderada das cotas dos 8 vizinhos mais próximos (critério este atribuído à função no SPRING) a cada ponto (MONMONIER, 1982):

$$f(x, y) = \frac{\left(\sum_1^{\infty} w(x, y) * z \right)}{\left(\sum_1^{\infty} w(x, y) \right)} \quad (3.2)$$

sendo associado ainda a cada ponto amostrado, um peso dado por uma função que considera a distância do ponto cotado ao ponto da grade:

$$w(x, y) = \left(\frac{1}{d} \right)^{u-1} \quad (3.3)$$

onde u indica o expoente da função de ponderação e é tido como 1; e d é a distância euclidiana do ponto interpolante ao seu vizinho, dada por $d = \sqrt{((x - x_0)^2 + (y - y_0)^2)}$.

Com os dados interpolados, uma nova imagem (grade numérica) de densidade é gerada. A partir dessa grade, fez-se um fatiamento, que se define como o processo de criação de classes, em intervalos lineares ou não, da variável que se quer analisar. A partir das classes, é possível extrair, associadas a cada uma dessas, estatísticas de outras grades. Este fatiamento foi feito através de intervalos regulares e é mostrado na [Tabela 3.2](#) segundo as diferentes regiões e variáveis consideradas.

Tabela 3.2– Informações sobre a análise por classes.

Variável	Mínimo	Máximo	Intervalo	Região	Unidade
Altitude	9.3	21.1	1.07	Região Localizada	flash.km ⁻² .ano ⁻¹
Declividade	9.3	21.1	1.07	Região Localizada	flash.km ⁻² .ano ⁻¹
Temperatura	2.0	26.0	2.0	Todo Estado	flash.km ⁻² .ano ⁻¹

A aplicação desta técnica depende ainda da resolução das grades a serem analisadas em relação às classes, pois grades com poucos pixels diminuem a significância estatística dos resultados obtidos para cada classe. Dessa forma, tomou-se como critério um número mínimo de 10 *pixels* participando das estatísticas das grades analisadas a partir das classes, a fim de dar mais consistência às estatísticas de saída. As resoluções destas grades são apresentadas adiante na [Tabela 3.3](#).

Maiores informações sobre modelagem espacial, bem como sobre Sistemas de Informação Geográfica (SIGs), não serão apresentadas, por fugirem do escopo do trabalho. As mesmas podem ser obtidas em obras como a de Burrough (1986), Monmonier (1982), Maguire (1991) e Câmara *et al* (1996).

3.4 Processamento dos Modelos Digitais de Elevação (MDEs)

O diagrama da [Figura 3.7](#) mostra os passos adotados na manipulação das imagens e dados na geração dos MDEs. A partir dos passos prescritos neste diagrama, com a criação dos dados na forma numérica MNT (Modelo numérico de terreno: equivalente ao MDE) do SPRING, é que os dados puderam passar aos processamentos descritos (análise por geo-objetos e por classes).

Estes MDEs possuem ainda, conforme já destacado brevemente, diferentes resoluções espaciais, que devem ser consideradas nas análises e são expostas na [Tabela 3.3](#). As resoluções das grades relativas aos relâmpagos, mencionadas no início da seção 3.3 também são apresentadas. Destaca-se aqui que apenas o total de relâmpagos NS passou pelo processo de correção da eficiência, e que as densidades de relâmpagos NS positivos e negativos referem-se apenas ao número de eventos realmente detectados pelo sistema.

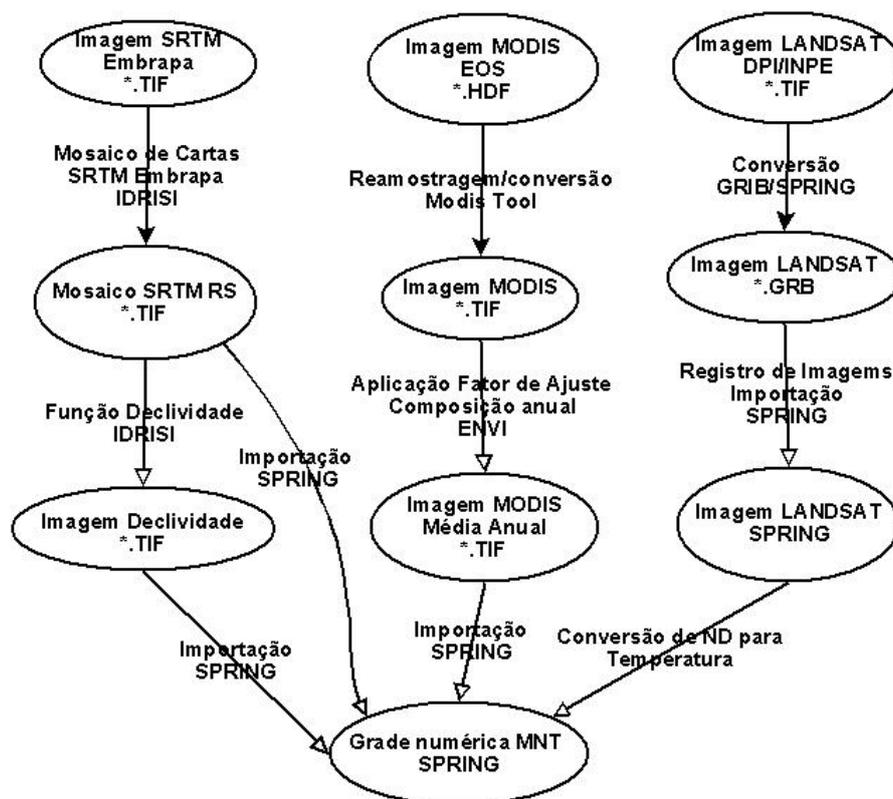


Figura 3.7 – Manipulação de dados na forma de grade numérica.

Tabela 3.3– Resolução das diferentes grades utilizadas no trabalho.

Variável	Resolução inicial	Resolução final	Unidade
Altitude	0.000833°	0.000833°	metros
Declividade	0.000833°	0.000833°	graus
Temperatura LST	0.05°	0.05°	° Celsius
Densidade NS total	5 km	0.05°	flash.km ⁻² .ano ⁻¹
Densidade NS +	5 km	0.05°	flash.km ⁻² .ano ⁻¹
Densidade NS -	5 km	0.05°	flash.km ⁻² .ano ⁻¹
Pico de Corrente NS +	5 km	0.05°	kA
Pico de Corrente NS +	5 km	0.05°	kA

3.4.1 Geração da grade de declividade

A declividade foi obtida pela aplicação de uma função sobre os dados de altitude (MDEs SRTM), a qual determina a declividade para uma determinada célula, baseada na resolução da célula e no valor das células vizinhas à primeira (MONMONIER, 1982). A declividade é dada como o vetor resultante entre as declividades em X e em Y (Figura 3.8):

$$slp = \sqrt{\left(\frac{right - left}{res * 2}\right)^2 + \left(\frac{top - bottom}{res * 2}\right)^2} \quad (3.4)$$

onde *slp* é a tangente do ângulo que tem a máxima declividade “downhill”; *left*, *right*, *top*, *bottom* representam as células vizinhas; e *res* é a resolução da célula (90 metros para este caso, o que equivale a resolução dos MDEs SRTM). O *slp* pode ser expresso em percentagem, pela $\tan(slp)*100$, ou em graus, pelo $\arctan(slp)$.

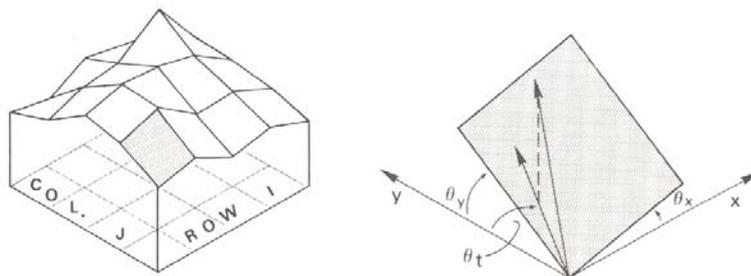


Figura 3.8 – Vetor resultante indicativo da declividade.

Fonte: Monmonier (1982)

3.4.2 Processamento de imagens MODIS

As imagens MODIS foram obtidas pela internet, no formato *.hdf*, e reprocessadas através do software Modis Reprojection Tool (DAAC, 2008), que extrai as bandas provenientes no arquivo para o formato georreferenciado *.tif*, apropriado para a análise posterior. As informações disponíveis no arquivo original e que foram usadas na análise podem ser vistas na [Tabela 3.4](#). As bandas com a temperatura de superfície foram corrigidas, com um fator de escala de 0.02, para graus Kelvin e, então, para graus Celsius:

$$\begin{aligned} LST &= SDS * 0.02 \\ LST(^{\circ}C) &= LST - 273 \end{aligned} \quad (3.5)$$

onde SDS é o valor unitário, em 16 bits, associado a cada célula de temperatura do grid; e LST é a temperatura de superfície. Este fator de escala na equação é determinado a partir de algoritmos do próprio MODIS. Estes algoritmos levam em consideração, entre outros fatores, as variações diurnas de emissões no infravermelho, a cobertura de nuvens e as variações da umidade do ar (WAN *et al*, 2002; WAN, 2003; WAN, 2005). As imagens mensais foram, então, agrupadas de forma a constituir uma média anual de temperatura de superfície durante o período de Janeiro a Dezembro de 2006 no IDL, e a temperatura transformada para graus Celcius. As mesmas, quando reprocessadas, possuem uma resolução de aproximadamente 5 quilômetros e apresentam a temperatura em graus Celsius.

Tabela 3.4– Imagens MODIS e suas características.

Variável	Long Name	Formato	Unidade	Range Válido	Fator de escala	Ganho
LST_Day_CMG	LST mensal diurna 1 km CMG	uint16	K	7500-65535	0.02	0.0
QC_Day	Arquivo QC para a LST diurna	uint8	NA	0-255	NA	NA
LST_Night_CMG	LST mensal noturna 1 km CMG	uint16	K	7500-65535	0.02	0.0
QC_Night	Arquivo QC para a LST noturna	uint8	NA	0-255	NA	NA

Fonte: Adaptada de Wan (2006).

Uma imagem com dados de controle de qualidade (QCs) também está associada aos dados. Esta imagem pode ser usada para avaliar o potencial dos dados sobre uma dada região e é criada segundo os critérios que seguem a [Tabela 3.5](#). Sendo as imagens MODIS utilizadas no trabalho resultado de composições mensais (MOD11C3) do produto diário MOD11C1, o valor dos pixels da imagem QCs passa a ser dado pela soma dos valores de QCs das imagens diárias. Como os erros (dados pelas imagens de controle) variam em função de diferentes aspectos (cobertura de nuvens, órbita do satélite, etc.) sobre a região, estes apresentam aleatoriedade espacial e temporal (erros não sistemáticos). Analisando os erros das imagens, concluiu-se que esses não são significativos no caso da média de todas as imagens, podendo ser

ignorados na análise espacial. Porém, o erro deve ser considerado no caso da análise temporal, descrita posteriormente, pois as variações mensais podem ser significativas.

Estas imagens foram importadas no SPRING, e foram analisadas pelo processo descrito anteriormente para a análise da densidade de relâmpagos na [Tabela 3.2](#) (por classes), onde são geradas estatísticas sobre a temperatura para cada classe de densidade de relâmpagos sobre todo o Estado.

Tabela 3.5– Valor atribuído às imagens de QC (Quality Control)

Código por “Pixel” da QC	Significado
00	“Pixel” produzido com boa qualidade, não sendo necessário um exame mais detalhado da QA.
01	“Pixel” produzido com uma qualidade não definida, sendo necessário um exame mais detalhado da QA.
10	“Pixel” não produzido devido aos efeitos das nuvens.
11	“Pixel” não produzido por outras razões, além dos efeitos das nuvens.

Fonte: Adaptado de Justice *et al* (1998).

3.4.3 Processamento de imagens LANDSAT

As imagens LANDSAT foram analisadas através do SPRING, passando por um processo de conversão (*.geotiff para *.grib), georreferenciamento e posterior importação. Para gerar resultados em termos de temperatura de superfície, as imagens precisavam, primeiramente, ser convertidas de NC (níveis de cinza) para radiância (L_{λ}). Esta conversão foi feita usando a [Equação 3.6](#) (CHANDER e MARKHAM, 2003):

$$L_{\lambda} = \left(\frac{L_{MAX} - L_{MIN}}{NC_{MAX} - NC_{MIN}} \right) \cdot (NC - NC_{MIN}) - L_{MIN} \quad (3.6)$$

onde L_λ é a radiância (recebida pelo sensor, em $\text{W.m}^{-2}.\text{sr}.\mu\text{m}$); NC_{MAX} é o nível digital máximo (255); NC_{MIN} é o nível digital mínimo (0); L_{MAX} é a radiância associada ao NC_{MAX} ; L_{MIN} é a radiância associada ao NC_{MIN} ; e NC é o valor do pixel da imagem. Os valores de cada variável são tabelados e podem ser encontrados no “*Landsat-7 Science Data User's Handbook*” (NASA, 2007). Para a banda 6 (LANDSAT ETM+), os valores de L_{MIN} e L_{MAX} são, respectivamente, 0.0 e 17.04. Tendo os valores de radiância espectral, podem-se obter os valores de temperatura aparente de superfície (em °C) através da [Equação 3.7](#) (CHANDER e MARKHAM, 2003):

$$T_s = \frac{k_2}{\ln\left(\left[\frac{k_1}{L_\lambda}\right] + 1\right)} - 273.15 \quad (3.7)$$

onde k_1 e k_2 são constantes de calibração dadas por, respectivamente, 666.09 ($\text{W.m}^{-2}.\text{sr}.\mu\text{m}$) e 1282.71 (K) (NASA, 2007). Destaca-se, ainda, que a temperatura obtida dessa maneira não leva em conta os efeitos de atenuação da atmosfera, não sendo feito nenhum tipo de correção neste sentido. Os cálculos para a temperatura aparente de superfície foram feitos através de rotinas criadas em LEGAL, que podem ser vistas no [Apêndice A.3](#).

3.4.4 Processamento dos dados de solo

Os dados espaciais (mapas temáticos na forma vetorial) sobre os tipos de solo foram primeiramente recortados, nos limites do Rio Grande do Sul, através do SPRING, passando ainda por um processo de revisão, para que nenhuma informação associada aos geo-objetos fosse alterada durante o recorte. Em seguida, estes dados foram transformados em classes temáticas (semelhantes às classes de densidade de relâmpago), sendo que cada classe foi analisada em relação às variáveis de interesse, através da estatística por classes, disponível no SPRING. Para esta análise foram usadas as grades de densidade de relâmpagos NS (positivos e negativos), bem como as grades com os picos de corrente médios (dos relâmpagos NS positivos e negativos).

Através desta análise foram obtidas estatísticas dos relâmpagos (densidades e polaridade) para cada classe de solo. As médias (e desvios) foram então comparadas às médias obtidas para as características dos solos (granulometria e concentração metálica).

3.5 Sobre as análises estatísticas

A partir de todas as informações obtidas com o processamento descrito, buscaram-se correlações entre as diferentes variáveis (solos, temperatura, altitude e declividade) e as descargas atmosféricas, usando diferentes técnicas estatísticas, com destaque para as análises de regressão e correlação. Todas as análises estatísticas, bem como os gráficos criados, foram feitas através dos aplicativos Microsoft Excel, SPSS e Origin.

A análise de regressão/correlação foi feita de duas formas: considerando apenas a função de regressão linear e ainda considerando os erros das variáveis (consideradas no modelo) como pesos. A análise de regressão simples procura determinar a relação entre duas ou mais variáveis, onde uma destas variáveis é considerada independente (x) e a outra, ou outras dependentes (y), sendo expressa por:

$$\hat{y} = a + \beta x \quad (3.8)$$

Esta função define o modelo de regressão simples, onde a indica a ordenada na origem e β o coeficiente de inclinação da reta que representa a relação entre as duas variáveis. Para este caso, o coeficiente de determinação R^2 , dado, segundo Montgomery e Runger (2003), por:

$$R^2 = \frac{S_{XY}}{S_{XX} \cdot T_{SS}} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \cdot \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (3.9)$$

onde $\bar{x} = 1/n \sum_{i=1}^n x_i$ e $\bar{y} = 1/n \sum_{i=1}^n y_i$.

Este coeficiente também pode ser obtido por uma função que considera erros associados às variáveis em análise. Estes erros podem ser obtidos minimizando-se o valor do Qui-quadrado:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^n w_i (y_i - \hat{y})^2 = \sum_{i=1}^n \frac{1}{\sigma_i^2} [y_i - (a + \beta x_i)]^2 \quad (3.10)$$

onde σ_i é o erro associado a cada ponto (em y). Usando-se esse valor na função do coeficiente de determinação, pode-se obter ainda o valor de R^2 ajustado:

$$\bar{R}^2 = 1 - \frac{R_{SS} / df_{Error}}{T_{SS} / df_{Total}} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n \frac{1}{\sigma_i^2} [y_i - (a + \beta x_i)]^2 / n - 1}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 / n} \quad (3.11)$$

Este valor do coeficiente de determinação ajustado se torna especialmente importante, quando do uso de um pequeno número de amostras na análise. É o que ocorre no desenvolvimento do trabalho, para o caso da análise por classes (solos, LST e relâmpagos), na qual o número de variáveis incluídas na regressão é relativamente pequeno.

Já a análise do coeficiente de correlação pode ser feita por um processamento mais simples, conhecido como coeficiente de correlação do momento do produto Pearson r , que leva em conta apenas as relações entre as variáveis (x, y) , indicando o quanto uma variável depende ou determina a outra (MEYER, 1983):

$$r = \frac{\sum_i^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_i^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_i^n (y_i - \bar{y})^2}}, \quad (3.12)$$

onde x_i e y_i são as variáveis em x e y , respectivamente; e \bar{x} e \bar{y} são as médias das amostras em x e y .

3.6 Processamento para a análise temporal

Outro tópico desenvolvido refere-se à análise temporal, realizada sobre as variáveis que possam afetar ou determinar, sob perspectiva temporal, a ocorrência de descargas atmosféricas. As análises foram feitas de maneira distintas para cada informação.

Para os relâmpagos NS, os dados foram agrupados em séries e analisados por estatísticas de frequência (histogramas) para a variável “hora” (inclusa na tabela com a série de relâmpagos). Esta estatística por frequência foi feita para diferentes séries temporais, que foram definidas segundo os objetivos do trabalho (espacial e temporalmente): para os dados de relâmpagos sobre todo o Rio Grande do Sul e para todo o período (toda a série de dados); para a região selecionada sobre a Serra Gaúcha (efeitos do relevo) e para todo o período; e para os dados sobre todo o Estado para o período coincidente com os dados de LST do MODIS.

Para a análise temporal concernente à temperatura de superfície LST, foram obtidas as médias de temperatura para cada composição mensal. Esta temperatura de superfície média foi feita pela soma dos valores de todos os *pixels* das imagens em cada mês e dividindo esse valor pelo número de *pixels* da imagem, processamento este feito através de rotinas no IDL ([Apêndice A.2](#)):

$$LST_{TOT} = \frac{\sum_{i=1}^n n_i}{n_{pix}}, \quad (3.13)$$

onde n_i é o valor de temperatura associado a cada *pixel* e n_{pix} é número de *pixels* da imagem. O resultado, para este caso, foi uma série temporal composta pelas médias das imagens de cada mês para todo o período. Usando essa mesma rotina, também foram obtidos os valores médios dos erros de cada imagem (mensal), cujas informações relevantes foram descritas anteriormente. Estes erros foram utilizados nas análises dos resultados.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Distribuição dos Relâmpagos sobre o Rio Grande do Sul

Uma análise preliminar sobre a distribuição espacial das descargas mostra um comportamento particular dos relâmpagos NS sobre o Rio Grande do Sul, com um aumento da densidade de relâmpagos especialmente sobre o Noroeste do Estado (Figura 4.1). Este comportamento parece estar relacionado à ocorrência de intensos Sistemas Convectivos de Mesoescala (SCMs), assim como Complexos Convectivos de Mesoescala (CCMs), sobre esta região, bem como sobre o Norte da Argentina e Paraguai (SCOLAR e FIGUEIREDO, 1990). Uma segunda região com densidades elevadas aparece sobre o Centro-Leste do Estado como aparente reflexo dos efeitos do relevo sobre a formação de tempestades e cujo enfoque será dado na próxima seção.

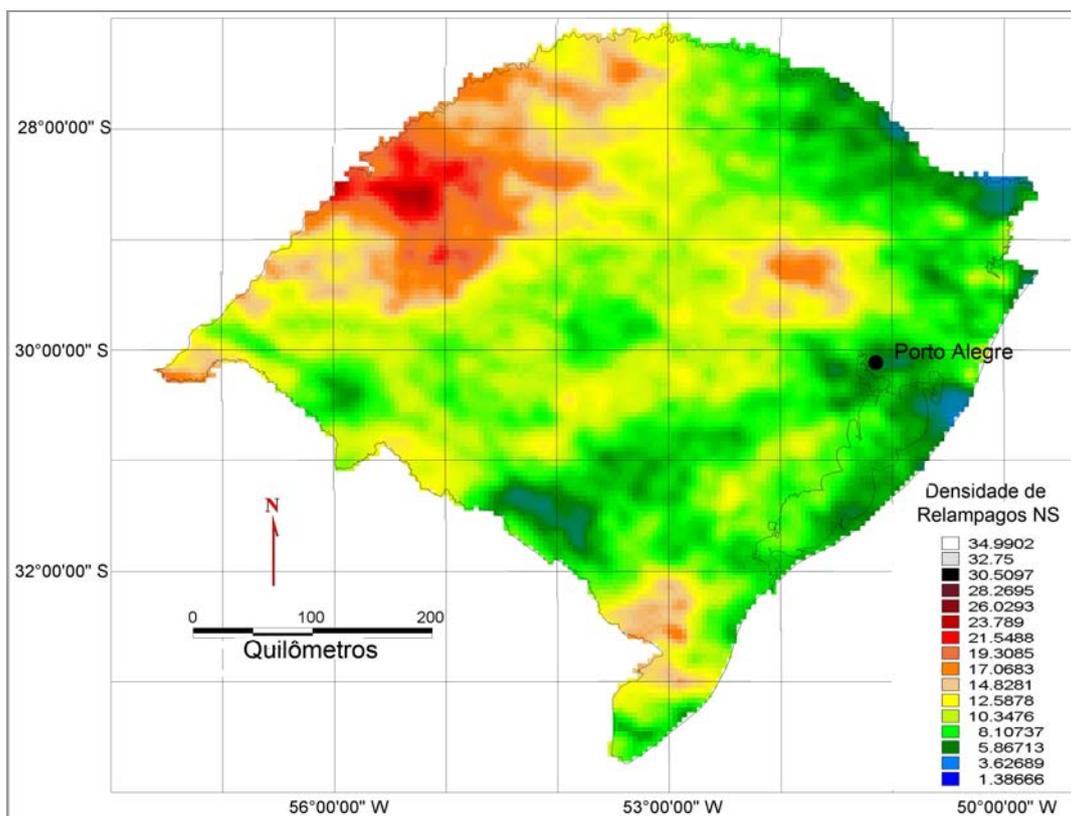


Figura 4.1 – Densidade anual de relâmpagos NS: destaque para a alta densidade sobre o Noroeste e ainda um segundo aumento na região Centro-Leste. Região de Porto Alegre apresenta baixa densidade.

Outro aspecto interessante refere-se à redução das descargas próximas a região de Porto Alegre. Este resultado mostra-se contrário aos obtidos na literatura que, em geral, apontam para um aumento da densidade de relâmpagos sobre as áreas urbanas. Maiores comentários sobre este aspecto se darão na análise sobre as relações entre os relâmpagos e a temperatura.

Analisando as densidades de relâmpagos NS de maneira individual (relâmpagos NS positivos e negativos) observa-se um comportamento especial. Os relâmpagos positivos se concentram sobre o Noroeste do Estado, o que possivelmente está, mais uma vez, relacionado aos SCMs e aos CCMs (já comentados anteriormente) que ali ocorrem (Figura 4.2).

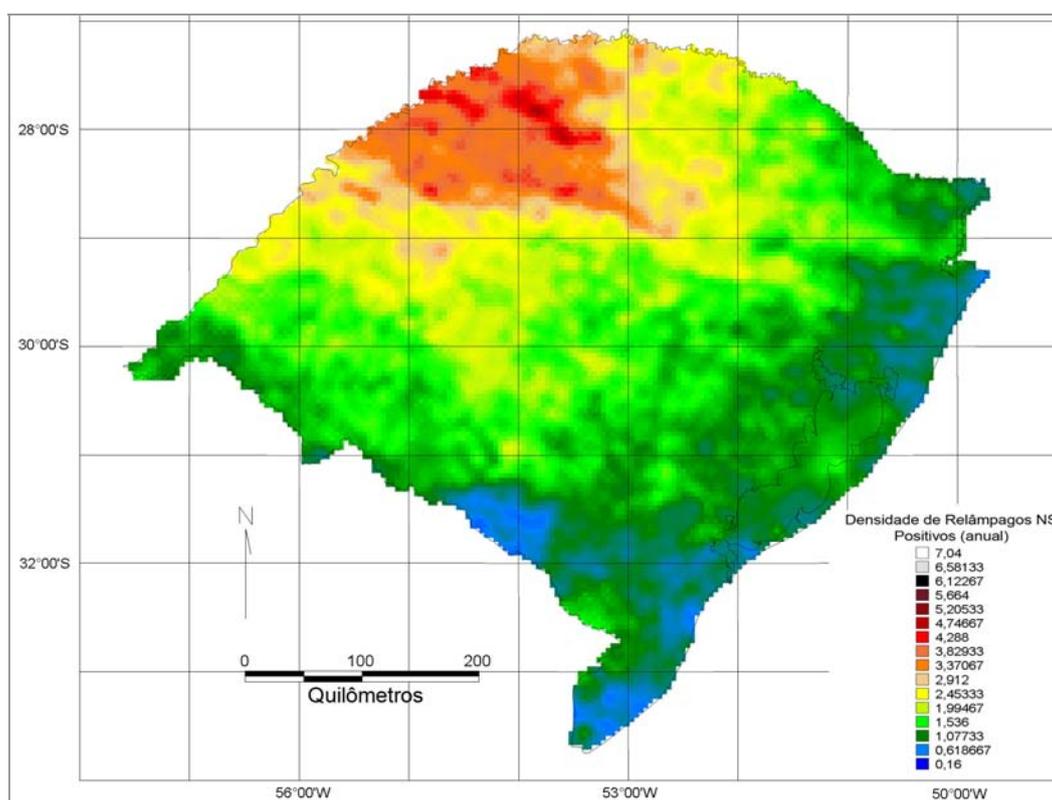


Figura 4.2 – Densidade anual de relâmpagos NS positivos (flash.km⁻².ano⁻¹).

Esta sugestão é dada com base em outros estudos, que já apontaram variações significativas nas taxas de relâmpagos NS positivos e negativos sobre estes tipos de sistemas (PARKER *et al*, 2001). Em virtude do foco do

trabalho, não se serão feitos avanços nessa linha, ficando em aberto perspectivas de estudos mais aprofundados dos efeitos desses sistemas convectivos na distribuição de relâmpagos.

Já os relâmpagos negativos acompanham, de maneira geral, a densidade total de relâmpagos NS (Figura 4.3). Este aspecto torna-se interessante onde, considerando-se especialmente a região com possíveis efeitos do relevo, este “acompanhamento” pode estar relacionado a efeitos da altitude sobre os centros de carga (especialmente negativo), e que será enfocado mais adiante. Conforme já destacado na metodologia, apenas o total de relâmpagos NS passou pelo processo de correção pela eficiência, não sendo esse processamento aplicado aos relâmpagos NS positivos e negativos discriminados.

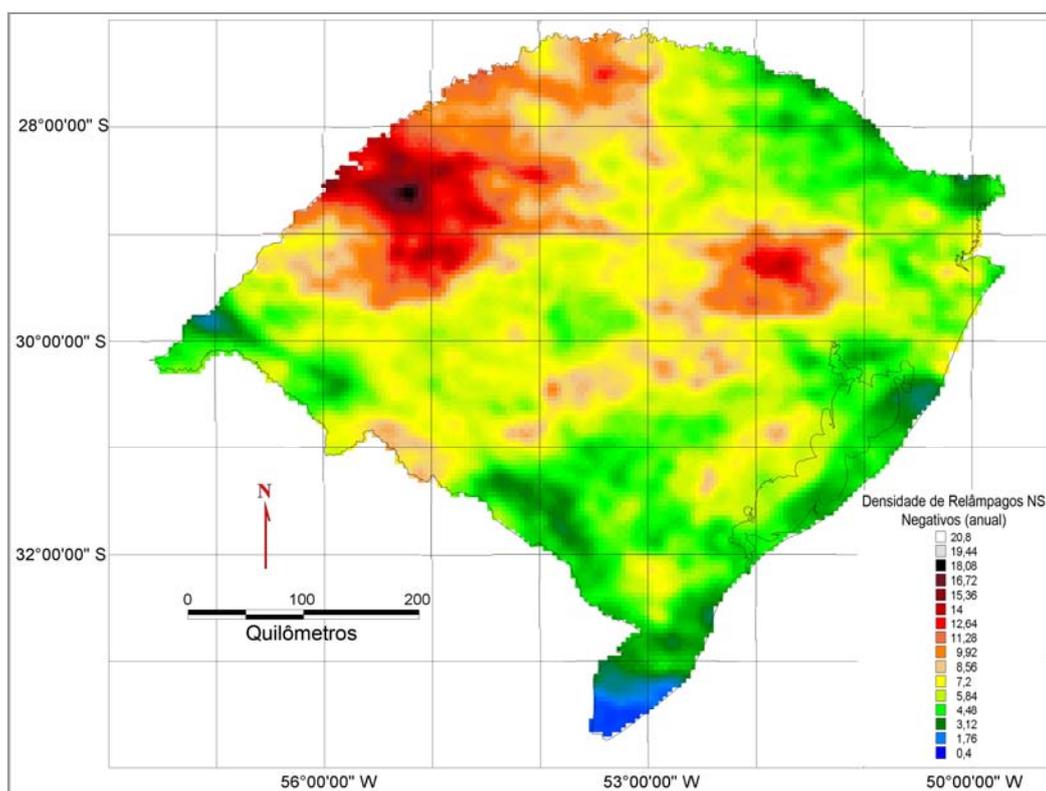


Figura 4.3 – Densidade anual de relâmpagos NS negativos (flash.km⁻².ano⁻¹).

4.2 Influência do relevo sobre as descargas

As primeiras análises da distribuição das descargas e suas relações com o relevo indicam certas concentrações espaciais na ocorrência de relâmpagos NS. A análise por geo-objetos para todo o Rio Grande do Sul não indica nenhuma correlação entre a densidade e a altitude, o que fica claro pela [Figura 4.4](#), onde as maiores densidades não estão associadas às maiores altitudes. O que se observa é que os valores de densidade mais elevados se encontram na porção noroeste do Rio Grande do Sul, provavelmente associados à CCMs, que apresentam, segundo estudos já destacados anteriormente, uma grande influência sobre o Noroeste gaúcho (FIGUEIREDO e SCOLAR, 1996). Porém, uma segunda área com concentração das descargas pode ainda ser vista em destaque na figura e esta área, devido à morfologia do relevo no entorno, pode estar associada aos efeitos da topografia.

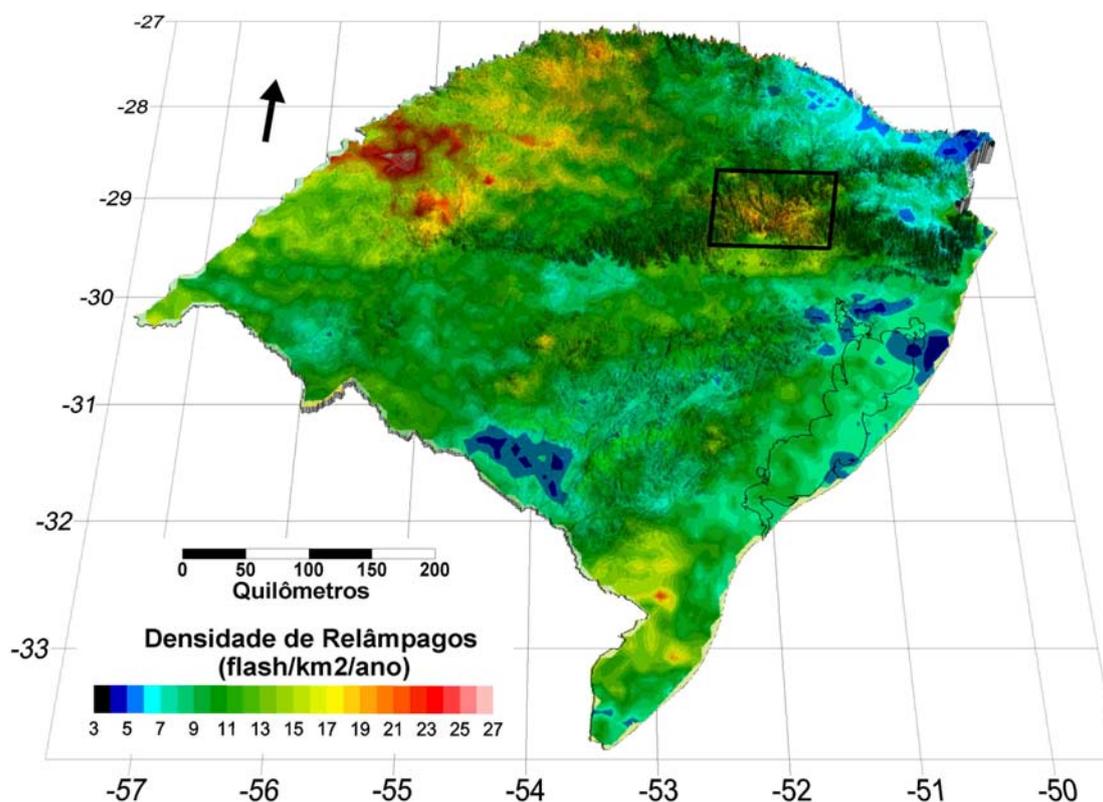


Figura 4.4 – Densidade anual de relâmpagos sobreposta ao relevo. Em destaque a região com densidade elevada sob possível efeito do relevo

Esse possível efeito do relevo se reafirma na observação do mapa de da freqüência e direção dos ventos sobre o Rio Grande do Sul, para um período de 15 anos de dados de reanálise (Rio Grande do Sul, 2002), que indica uma canalização do ar sobre a região da Depressão Central e um fluxo de Sul para Norte na região Centro Leste do Estado, sobre a região montanhosa (Figura 4.5). Com base nessa suposição, uma pequena área, definida na mesma figura, passa a ser considerada na análise das relações entre a topografia (tanto sob o ponto de vista da altitude como da declividade) e a densidade de descargas e as relações da topografia com os dias de tempestade.

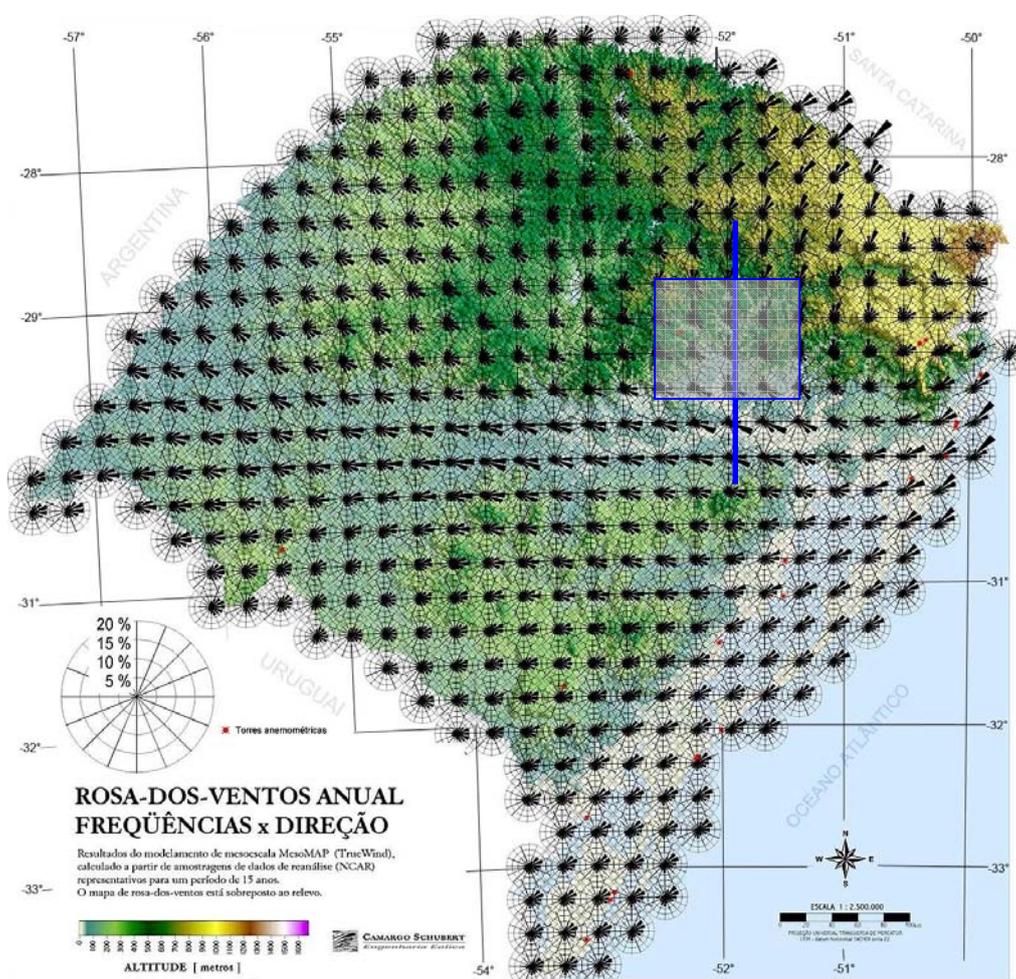


Figura 4.5 – Mapa de direção e freqüência dos ventos. Em vermelho são destacadas a região escolhida para a análise dos efeitos da altitude e a orientação do traçado do perfil.

Fonte: Rio Grande do Sul (2002).

Conforme destacado na seção anterior, a distribuição de relâmpagos NS negativos sobre o Rio Grande do Sul possui características particulares. A análise da densidade levando em conta a polaridade das descargas sobre o Rio Grande do Sul revela uma distribuição que concorda com as suposições sobre o efeito da distância dos centros de carga, isto é, sua proximidade com a superfície nas regiões mais elevadas. Isto se explica segundo o processo (de eletrificação das nuvens) colisional termoelétrico (UMAN, 1987), no sentido de que a isoterma indicativa da localização do centro de cargas negativas (entre -10° e -20°C) quase não varia sob a atuação de uma montanha: as isotermas, quando da existência de uma montanha, são “comprimidas” de tal modo que o perfil de temperatura varia de maneira pouco significativa, isto é, as mesmas não acompanham as variações de altitude, o que deixa isotermas de temperaturas mais baixas a menores distâncias da superfície. Isto indicaria que, mesmo com a atuação da montanha, os centros de carga (que seguem as isotermas) manter-se-iam em altitudes semelhantes e, quando nas proximidades das montanhas (ou sobre estas), a uma distância relativamente menor da superfície, o que poderia favorecer a ocorrência de descargas.

Esta análise se baseia tanto nas distribuições das descargas já apresentadas na [Figura 4.2](#) e [Figura 4.3](#), como também sobre o perfil traçado sobre a região ([Figura 4.6](#)). O perfil, além de indicar relações com a polaridade, indica como se dão as relações da densidade de relâmpagos com a altitude. É possível observar um aumento na densidade de relâmpagos para altitudes da ordem de 400-500 metros (destaque A). No entanto, há uma queda na densidade para maiores altitudes (destaque B). Este perfil também dá indícios de que o aumento da densidade de relâmpagos, conforme a região em destaque A, está ligado às áreas de maior declividade em depreciação às maiores altitudes, onde a densidade de relâmpagos diminui. Ressalta-se que esse perfil leva em conta as informações ao longo de uma linha (direção) apenas, e não considera as variabilidades espaciais das relações e é usado de forma a complementar análise com a distribuição da altitude por células de densidade. Porém, este perfil é traçado segundo a direção do vento sobre a região e indica que o fluxo

segue em direção perpendicular à montanha e que, conforme destacado em Smith (1979), é um determinante nos efeitos da altitude sobre a instabilidade local e também sobre a formação de nuvens e/ou tempestades.

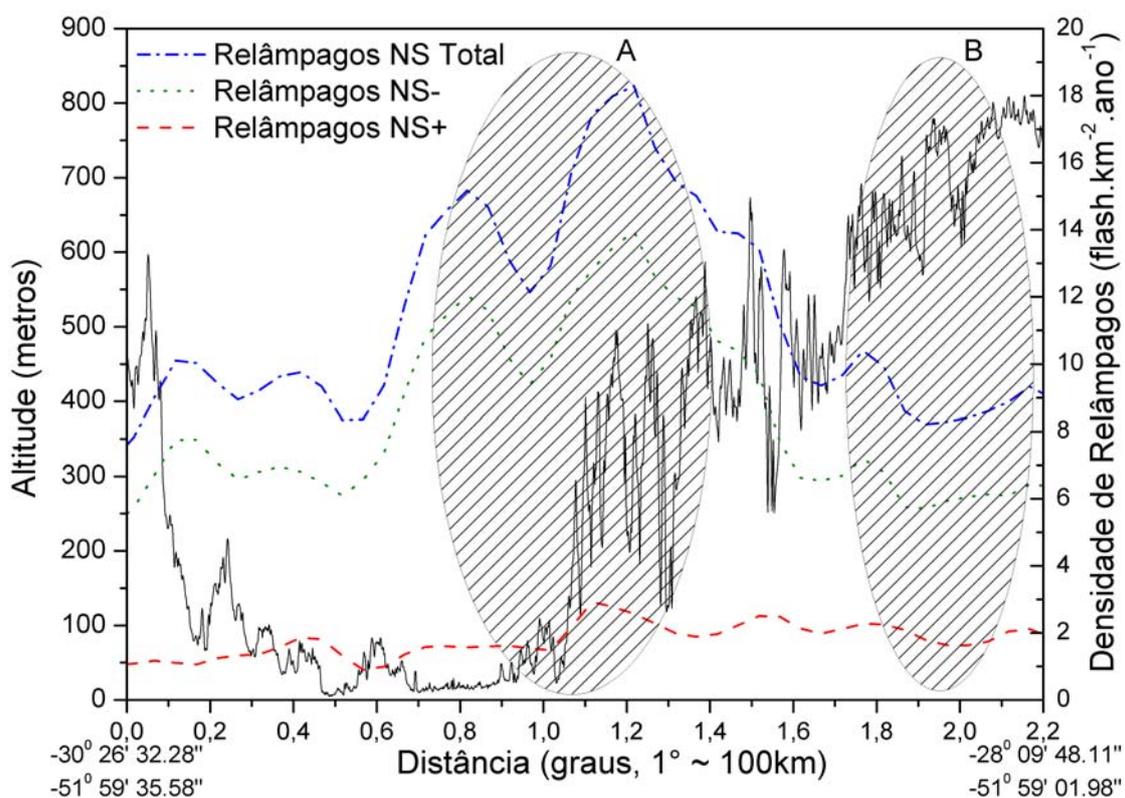


Figura 4.6 – Perfil S-N integrado: altitude (em preto), densidade total de relâmpagos NS (em vermelho), NS negativos (em azul) e NS positivos (em verde). Regiões destacadas (A e B) indicam variação da densidade de relâmpagos em relação às variações de altitude. Maiores altitudes não apresentam maior densidade de relâmpagos.

Seguindo nos efeitos do relevo, as análises sobre a [Figura 4.7](#), cujos resultados se baseiam nos dados obtidos para a região selecionada sobre a Serra Gaucha (indicada na [Figura 4.5](#)) não indicam nenhuma relação entre a altitude e a ocorrência de relâmpagos, com índice de correlação sem significância ($r = -0.12$). A grande dispersão dos dados se dá em função da metodologia adotada para esta análise, que leva em conta a média de altitude em cada geo-objeto. Como a região em análise possui altitudes com grande

variabilidade, os pontos aparecem, de forma semelhante, com uma grande dispersão.

A comparação deste resultado com o obtido através dos dados do sensor LIS (*total lightning*), que considera todos os tipos de descarga na sua solução, indica um aumento na densidade de descargas até altitudes da ordem de 400 metros, com posterior declínio, o que se mostra semelhante ao que ocorre para os resultados de Schulz e Diendorfer (1999) para altitudes maiores e vai ao encontro dos resultados de Ershova et al. (2002).

Os dados do sensor LIS foram usados a fim de validar os resultados e são apresentados no trabalho de Bourscheidt *et al* (2007), e expostos ainda no [Apêndice B](#). Os dados não foram usados ademais, em função de a área escolhida para a análise ser relativamente pequena (que é significativamente menor do que a área usada por Bourscheidt *et al* e a significância estatística ficar comprometida).

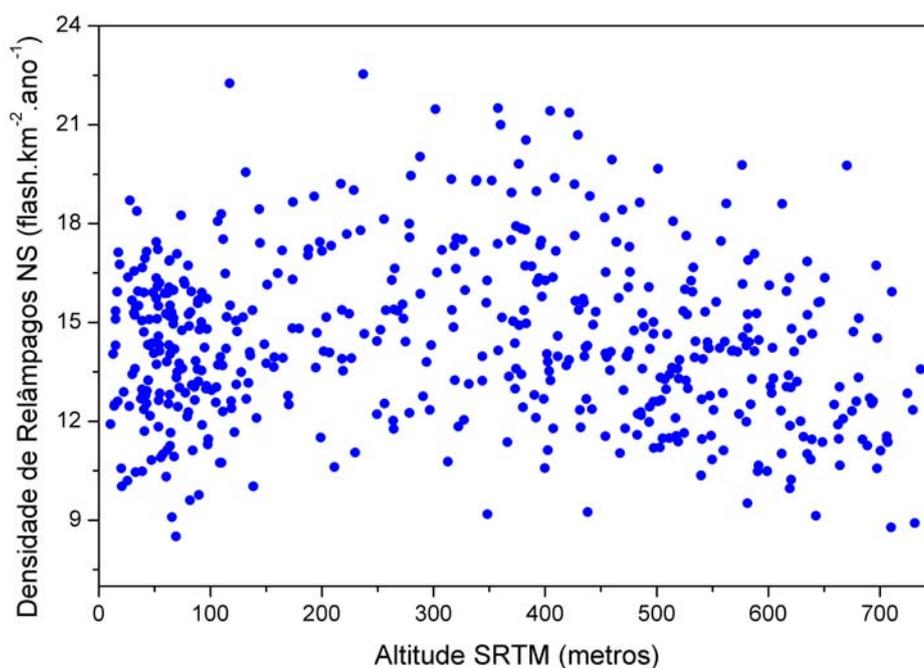


Figura 4.7 – Densidade de relâmpagos NS total em função da altitude (análise por geo-objetos). Aparente aumento para altitudes de até 400 metros e posterior declínio.

Ao considerar-se o efeito da declividade, que remete à influência da variação da altitude e que foi comentado anteriormente, não se tem, aparentemente, nenhuma correlação entre esta e a densidade de relâmpagos (Figura 4.8). Ressalta-se que, segundo a metodologia adotada (na análise através de geo-objetos), o resultado pode estar sendo afetado pelo espalhamento (desvio padrão) nos dados. Este espalhamento, por sua vez, está associado às variações espaciais da altitude e da densidade de relâmpagos.

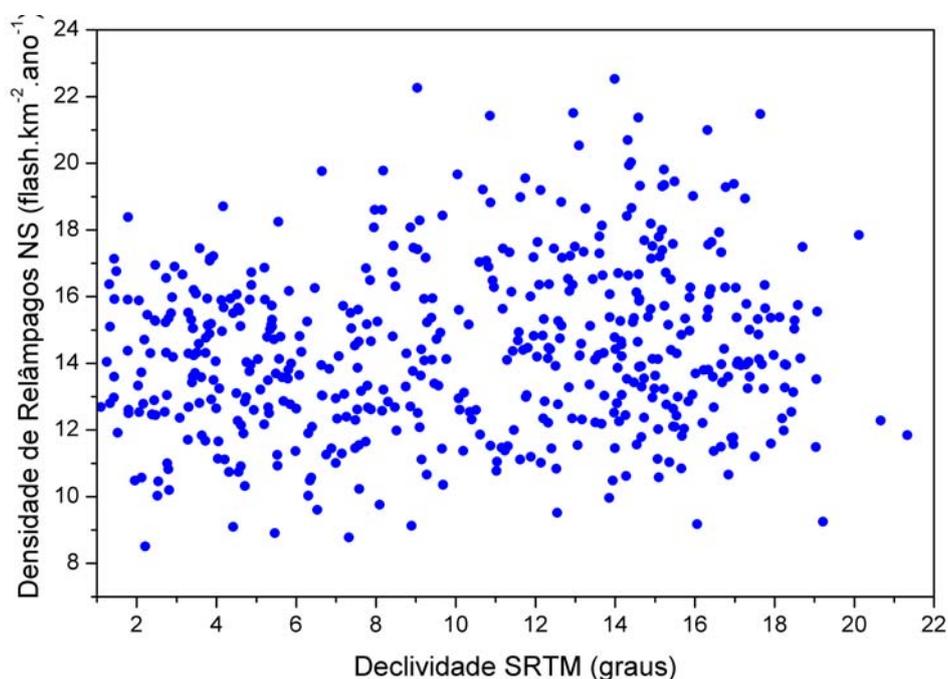


Figura 4.8 – Densidade de relâmpagos NS total em função da declividade pela análise por células ou geo-objetos. Nenhum efeito do relevo é evidenciado.

Outra análise se refere ao uso de informações sobre os dias de tempestade. Este tipo de análise (conforme definição dada no Capítulo 3) permite uma análise mais voltada à dinâmica das tempestades. Os resultados para esta análise se mostram muito semelhantes aos obtidos para a densidade. Destaca-se que o processamento foi feito da mesma forma que para a análise da densidade (através de células ou geo-objetos). Os resultados (e análises) descritos pela aplicação desta metodologia não indicam relações entre a topografia e a distribuição e frequência de relâmpagos. No entanto, quando da

análise das variáveis através de classes de densidade de descargas, estes mesmo se mostram de maneira diferente. O que acontece na análise através deste método é uma homogeneização das variações espaciais da altitude e da densidade de descargas, dando mais consistência à análise espacial das variáveis e diminuindo o desvio dos dados.

Os resultados obtidos desta forma mostram que realmente a densidade de relâmpagos não apresenta um comportamento linear em relação à altitude (Figura 4.9). Observa-se que, para altitudes semelhantes, valores de densidade significativamente diferentes são encontrados. Considerando, no entanto, as relações entre a declividade e a densidade de relâmpagos, os valores, que eram positivos e relativamente baixos, passam a ter uma correlação elevada, com esse índice de correlação da ordem de 0.90 e uma regressão (ajustada) com valor superior a 0.82 (Figura 4.10).

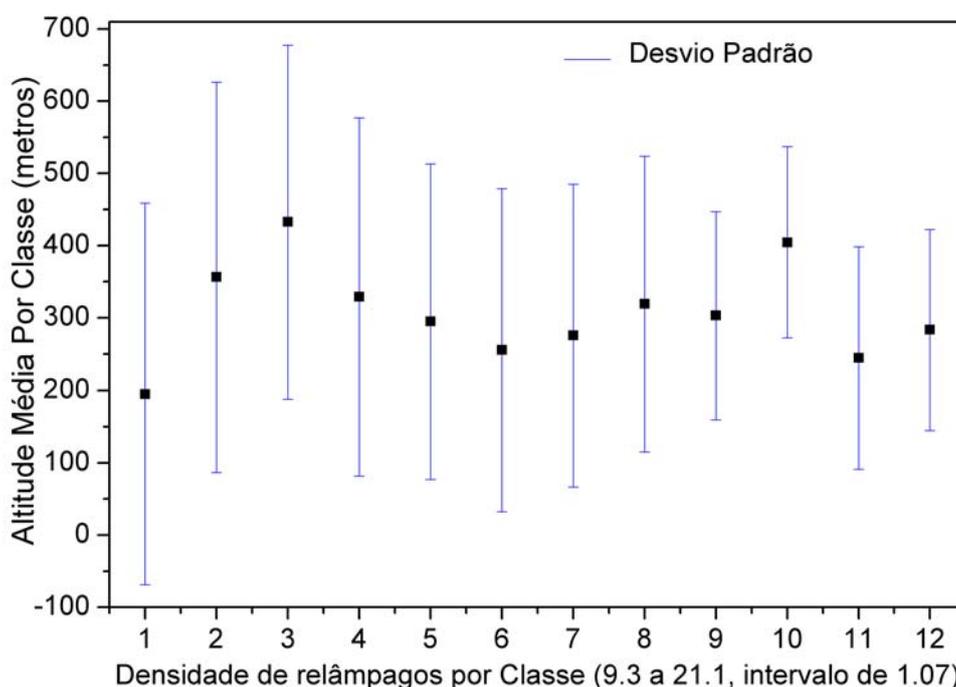


Figura 4.9 – Densidade de relâmpagos NS em função da altitude (análise por classes).

Estes resultados podem ser explicados pelas idéias de Smith (1979) e Chu e Lin (2000) onde, segundo os fluxos de ar, as regiões com maior declividade

são as regiões nas quais a componente vertical do vento é mais intensificada e onde a forçante necessária à superação do nível de convecção livre (para o caso de uma atmosfera condicionalmente estável) ou para passar do nível de condensação (atmosfera estável) é maior. E é, portanto, onde se encontram as condições mais favoráveis à formação de tempestades. Este resultado reforça a idéia de que a declividade afeta significativamente a formação de tempestades e a ocorrência de descargas.

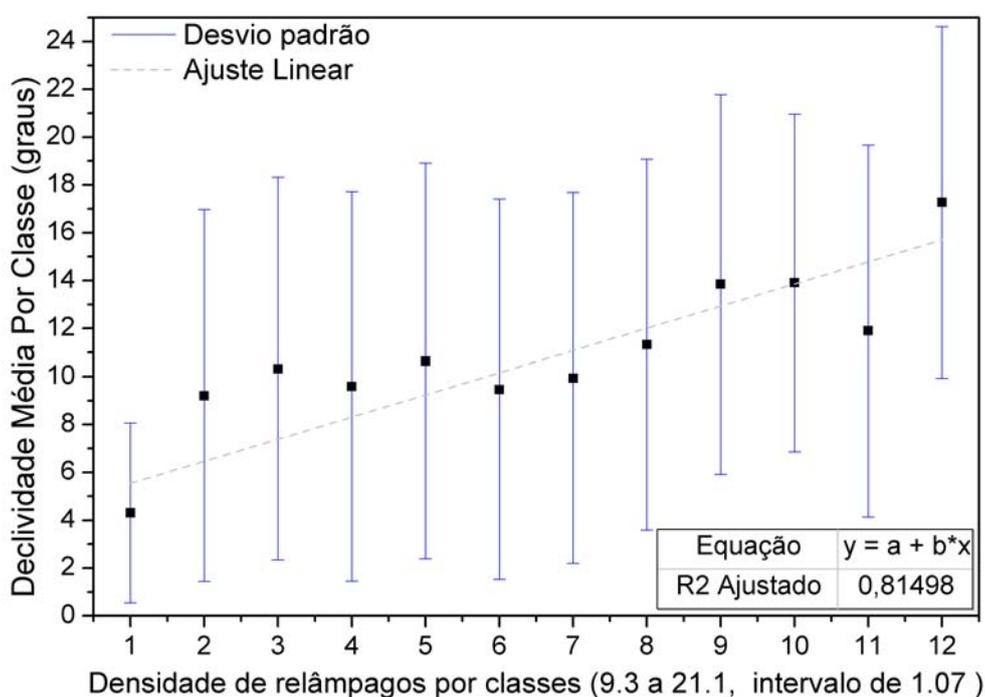


Figura 4.10 – Densidade de relâmpagos NS em função da declividade (análise por classes).

4.2.1 Análise temporal dos efeitos do relevo sobre os relâmpagos

Considerando ainda a variação temporal das descargas, observa-se uma variação no horário de pico da atividade elétrica, que acontece antes sobre as áreas elevadas (altitudes acima de 900 metros) do que sobre as regiões mais baixas (altitudes de até 500 metros) (Figura 4.11). Resultados similares já foram encontrados em outros trabalhos (REAP, 1986; REAP, 1991) e indicam o

efeito do relevo sobre a ocorrência de tempestades, que tende a antecipar o pico da atividade elétrica sobre as regiões mais elevadas.

Outro aspecto interessante observado esta relacionado com as diferenças entre as duas regiões em análise na amplitude do pico diurno de atividade elétrica: enquanto sobre as regiões mais altas o pico de atividade predomina sobre a tarde (18 horas GMT equivalem a 15 horas em tempo local LT), sobre as áreas mais baixas essa variação é bem menor, ou seja, o pico diurno da atividade elétrica não sobressai da mesma forma.

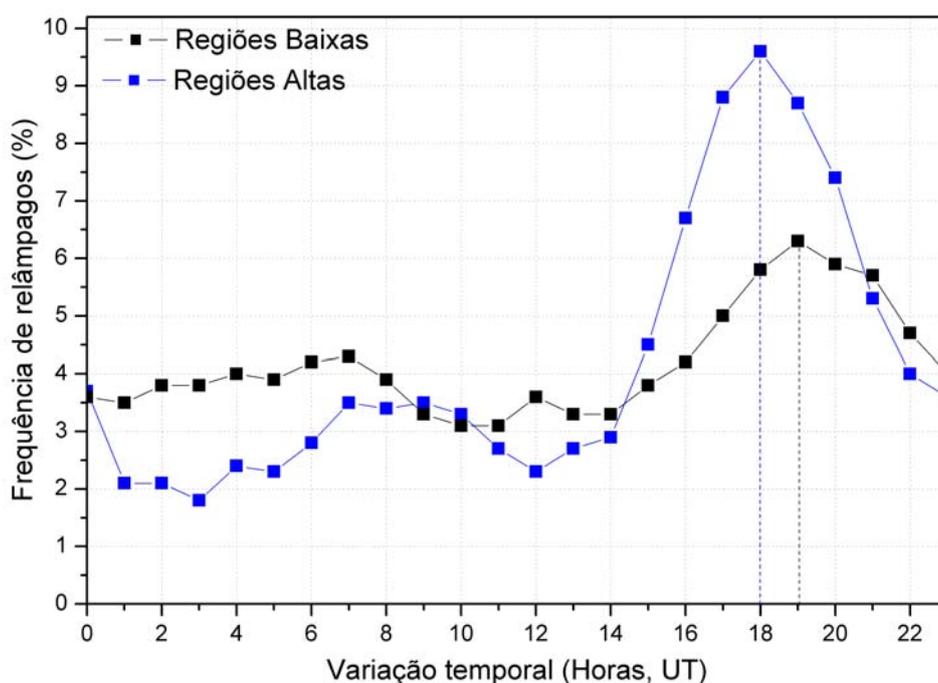


Figura 4.11 – Variação diurna dos relâmpagos para as duas regiões: com altitudes inferiores a 500 metros (preto) e com altitudes superiores a 900 metros (em azul).

Esta observação pode ser, mais uma vez, resultado dos sistemas convectivos. Boa parte da região com baixas altitudes compreende o Noroeste do Rio Grande do Sul, região onde a ocorrência desses sistemas é maior. Como esses sistemas perduram por muito tempo (durante dias em alguns casos) em comparação a tempestades de origem local, as variações diurnas da incidência de relâmpagos tendem a ser menor, com aumento na ocorrência de

relâmpagos durante a noite, o que vem a justificar o segundo pico (menor) nas primeiras horas do dia (4 Horas LT, 7 horas GMT).

4.3 Influência da temperatura sobre as descargas

Em primeira instância, observa-se um aumento das descargas, quando do aumento da temperatura, o que já foi comprovado em trabalhos anteriormente desenvolvidos (PRICE, 1994; WILLIAMS, 1994; NACCARATO *et al*, 2003; FARIAS *et al*, 2007). A [Figura 4.12](#) mostra o mapa de temperatura de superfície (LST MODIS) média composta entre os meses de Outubro de 2005 à Dezembro de 2006.

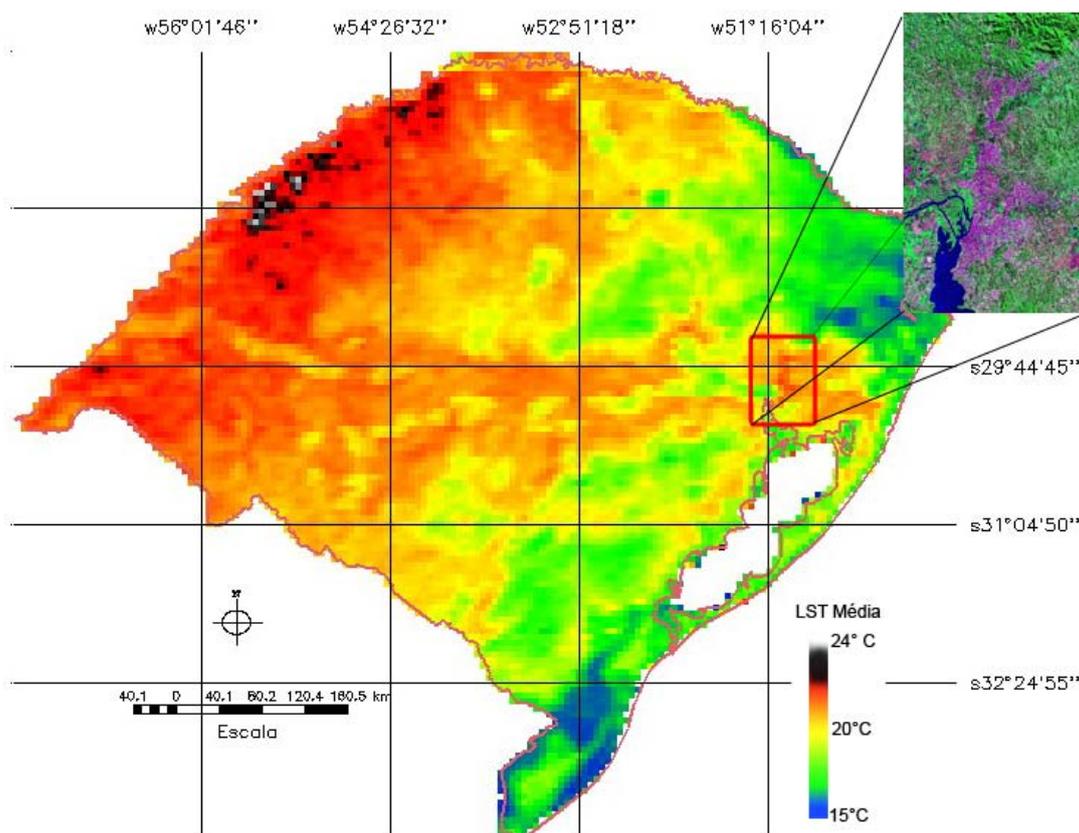


Figura 4.12 – Produto MODIS para a temperatura de superfície média (LST).

As maiores temperaturas sobre o Noroeste são condizentes com a temperatura média obtidas pelo INMET durante o período de 1961 a 1990 (normais climáticas), exposta na [Figura 4.13](#).

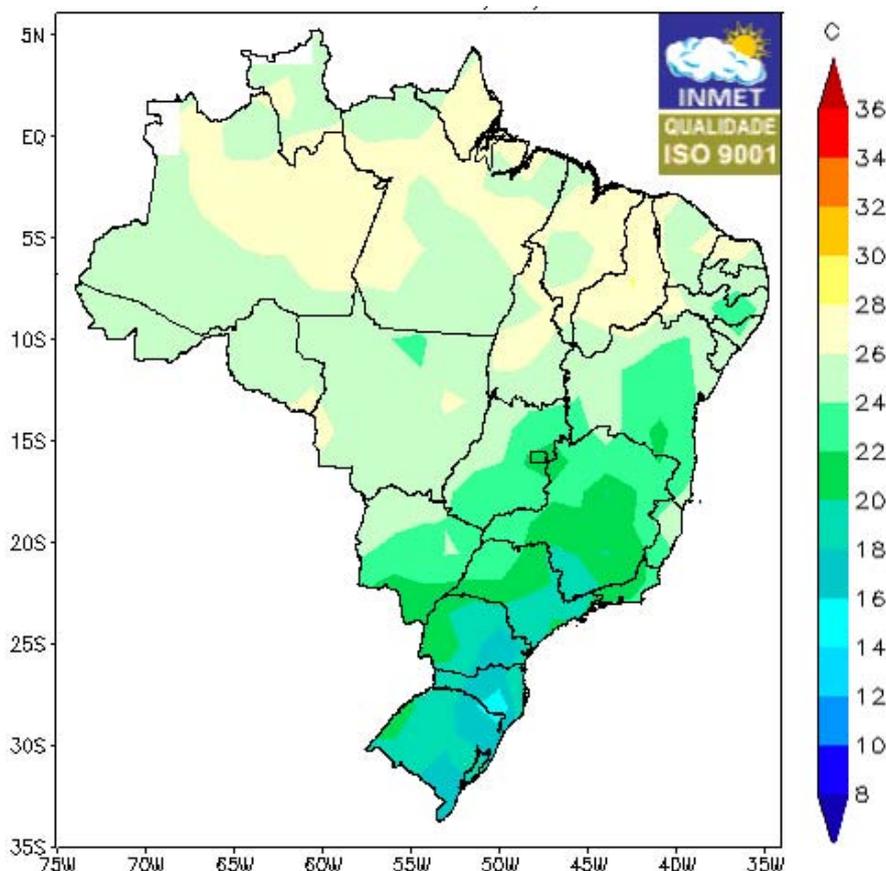


Figura 4.13 – Temperatura média para normal climática de 1961 a 1990.

Fonte: INMET (2007).

Observando-se a incerteza na temperatura obtida sobre a região metropolitana de Porto Alegre (pela indefinição na formação de ilha de calor urbano), imagens LANDSAT foram usadas com caráter comprobatório, e as mesmas mostraram que não há uma forma clara (bem definida) da área urbana na temperatura de superfície tal qual acontece para São Paulo. Estas imagens podem ser vistas através da [Figura 4.14](#) e da [Figura 4.15](#) para São Paulo (02/02/2003) e Porto Alegre (15/01/2003), respectivamente. Na composição MODIS, o resultado é um mascaramento ainda mais significativo da temperatura em função do tamanho reduzido do pixel e ainda por ser a imagem uma média de todos os meses do período. As relações entre a imagem LANDSAT e a imagem MODIS, sobre a região de Porto Alegre, indicam um índice de correlação entre os produtos da ordem de 0.72.

Através de uma análise qualitativa, tanto sobre a imagem LANDSAT quanto para o produto LST MODIS, em relação ao mapa de densidade de relâmpagos (exibido anteriormente na [Figura 4.4](#)), pode-se observar que nenhuma relação entre a temperatura de superfície e as descargas elétricas ocorre para a região metropolitana de Porto Alegre.

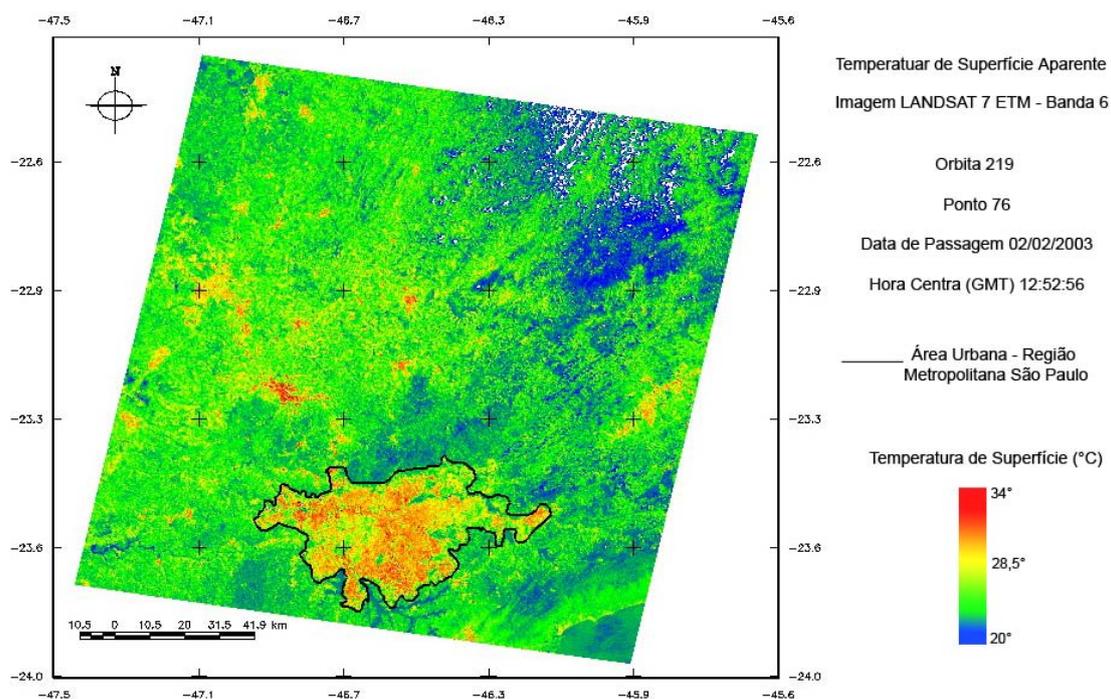


Figura 4.14 – Temperatura de superfície aparente para a região de São Paulo (imagem LANDSAT).

Com uma análise quantitativa, o resultado se reafirma, com um coeficiente de correlação de 0.026, para a imagem MODIS, e de -0.114 para a imagem LANDSAT (gráficos não expostos). Isto pode ser um indicativo de que é necessária, não apenas uma área urbana significativa, mas também uma forma destas áreas (área urbana bem definida), bem como um significativo gradiente de temperatura dentro e fora da área urbana, capaz de tornar os efeitos da ilha de calor (capacidade calorífica, fluxos de calor sensível e latente, etc.) favoráveis a fluxos convergentes sobre estas áreas. Estas afirmações se baseiam no fato de que a região urbana de Porto Alegre (áreas mais quentes) não tem uma forma bem definida, sendo muito intercalada com áreas com

cobertura vegetal, o que torna o gradiente de temperatura pequeno. As idéias propostas são baseadas em trabalhos como os de Naccarato *et al* (2003), Pinto *et al* (2004), Steiger *et al* (2002), Soriano e de Pablo (2002) e Freitas e Dias (2005), considerando diferentes cidades no Brasil e em diferentes regiões do Planeta. Deve-se levar em conta na análise também o fato de a série temporal de ambas as variáveis ser pequena, bem como o fato de as imagens MODIS serem de apenas um ano, enquanto os dados de relâmpagos compõem uma série temporal de dois anos.

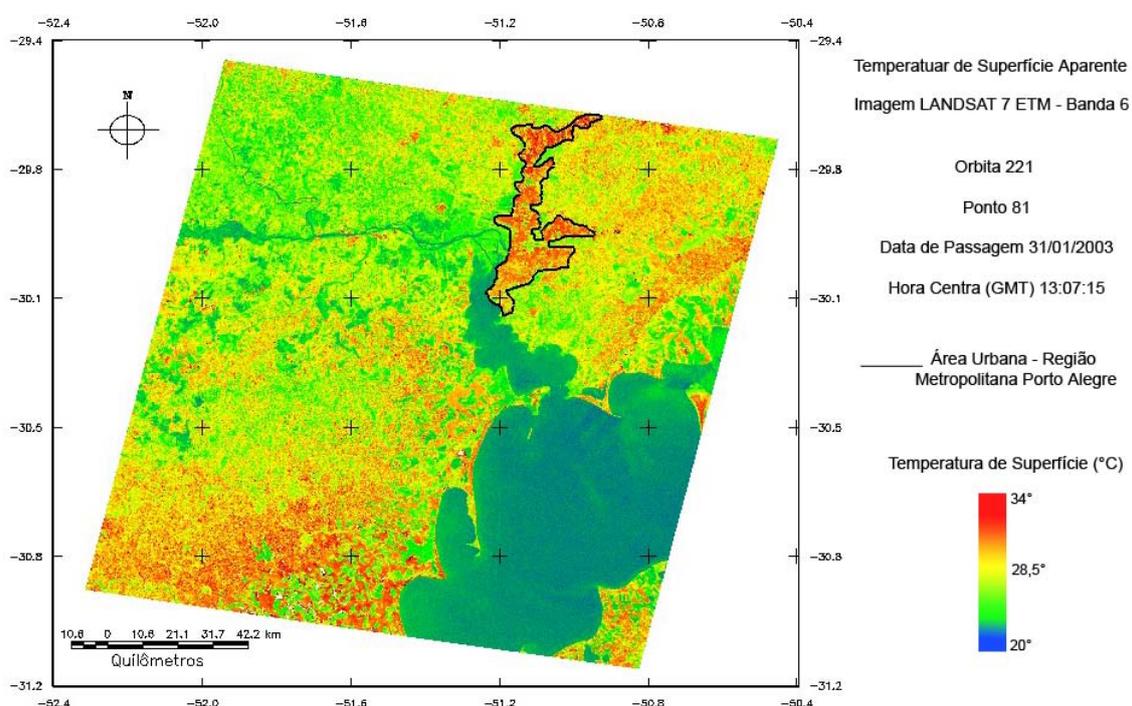


Figura 4.15 – Temperatura de superfície aparente para a região de Porto Alegre (imagem LANDSAT).

Outro aspecto que merece destaque em relação aos produtos de temperatura de superfície aparente das imagens LANDSAT sobre a região de Porto Alegre refere-se à semelhança de temperatura entre regiões urbanas e não-urbanas. Esta semelhança pode estar mascarando a ocorrência da ilha de calor sobre Porto Alegre e, possivelmente, é resultado tanto da variação sazonal das características da superfície (em função do manejo e uso do solo sobre a região, por exemplo), como do horário da passagem do satélite, o que afeta a

emissividade detectada pelo sensor. Sendo as regiões de Porto Alegre e de São Paulo distintas quanto às características espaciais e de sazonalidade, suas diferenças podem estar associadas a estas condições.

Voltando à análise da temperatura de superfície em relação aos relâmpagos para todo o Rio Grande do Sul com imagens MODIS (cujo produto foi exibido anteriormente, na [Figura 4.12](#)) através da análise por classes, observa-se um aumento linear da temperatura de superfície com o aumento na densidade de relâmpagos, quando da análise desta através de uma regressão linear simples cujo coeficiente, ajustado, é da ordem de 0.97 ([Figura 4.16](#)). Em termos de correlação, este coeficiente é dado por 0.99.

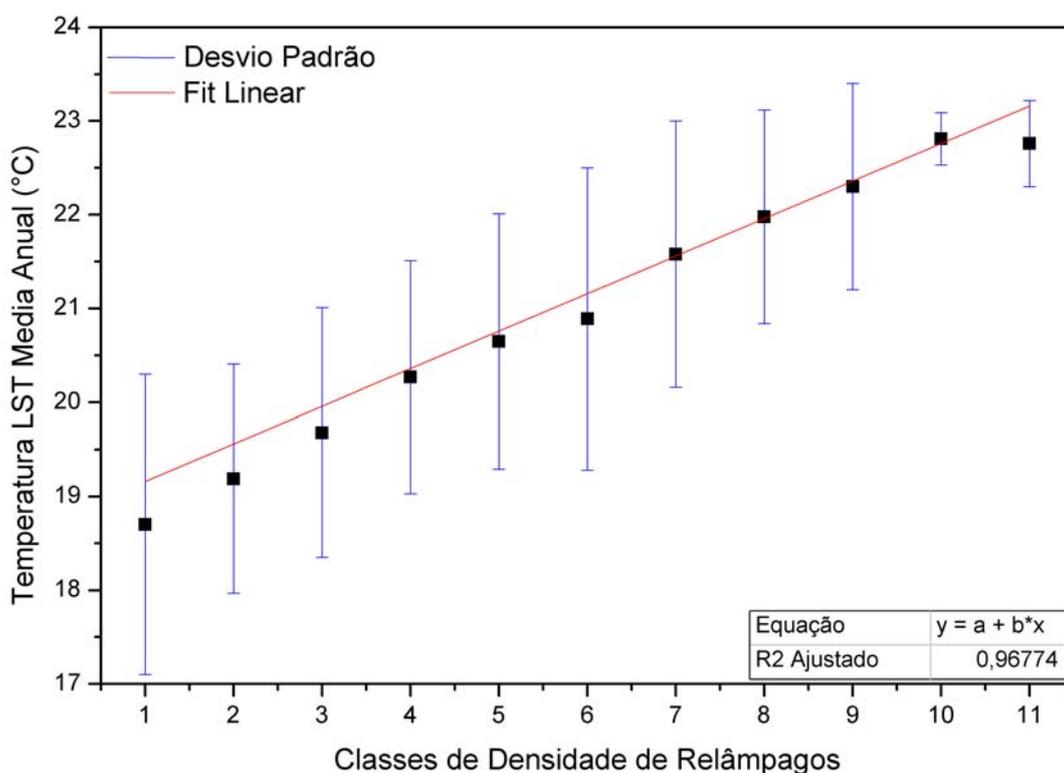


Figura 4.16 – Variação da temperatura por classes de densidade de relâmpagos.

Esta análise revela uma forte dependência da distribuição das descargas em relação à temperatura e indica ainda que, assim como a temperatura do ar junto à superfície, a temperatura da própria superfície (através dos fluxos de

calor latente e calor sensível) desempenha um papel fundamental na ocorrência de tempestades. E, para o caso do Rio Grande do Sul, esta temperatura de superfície pode estar afetando as características (intensidade e duração) dos sistemas convectivos (SCMs e CCMs) que ocorrem no Noroeste do Estado, já destacados no início das discussões e resultados. Sobre estes sistemas convectivos, destaca-se que esta temperatura de superfície pode ser um fator importante na manutenção destes, alimentando o seu desenvolvimento e levando a sua duração por longos períodos.

Estes efeitos da temperatura se revelam também sob perspectiva temporal, conforme mostra a [Figura 4.17](#). Observa-se um ciclo anual para a temperatura com máximos nos meses de verão e mínimos nos meses de inverno, o que já era esperado. Também é possível observar que, embora no primeiro Verão a temperatura siga o seu ciclo, o mesmo não é acompanhado pela frequência de relâmpagos.

Este resultado pode ser reflexo da estiagem que ocorreu sobre o Rio Grande do Sul nos meses de Verão de 2005/2006 (CLIMANÁLISE, 2005; CLIMANÁLISE, 2006), e demonstra a importância não só da temperatura, mas da análise conjunta das demais condições atmosféricas necessárias à formação de tempestades, tal como a variação de umidade. A variação da umidade (relativa) é exibida na [Figura 4.18](#), que leva em conta dados do NCEP/NOOA para o mesmo período das imagens MODIS, ficando clara a queda da mesma nos meses de estiagem.

Ressalta-se que este resultado é obtido para todo o período com imagens MODIS disponíveis e por isso não segue a relação linear (mesmos ciclos para ambas variáveis) apresentada na análise espacial, que é feita usando apenas uma composição anual que escapa ao período de estiagem.

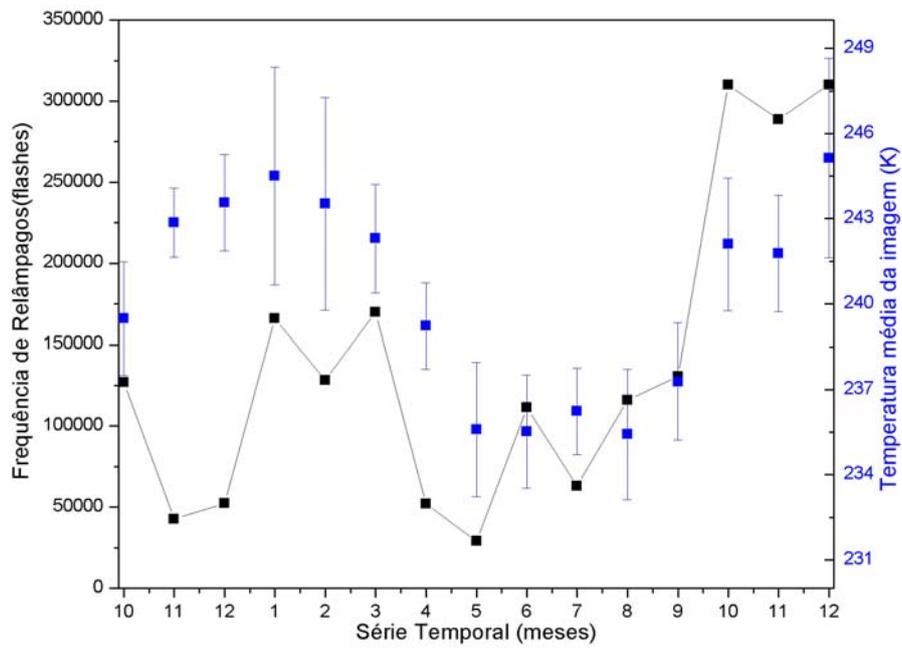


Figura 4.17 – Variação temporal da temperatura de superfície e da freqüência de relâmpagos.

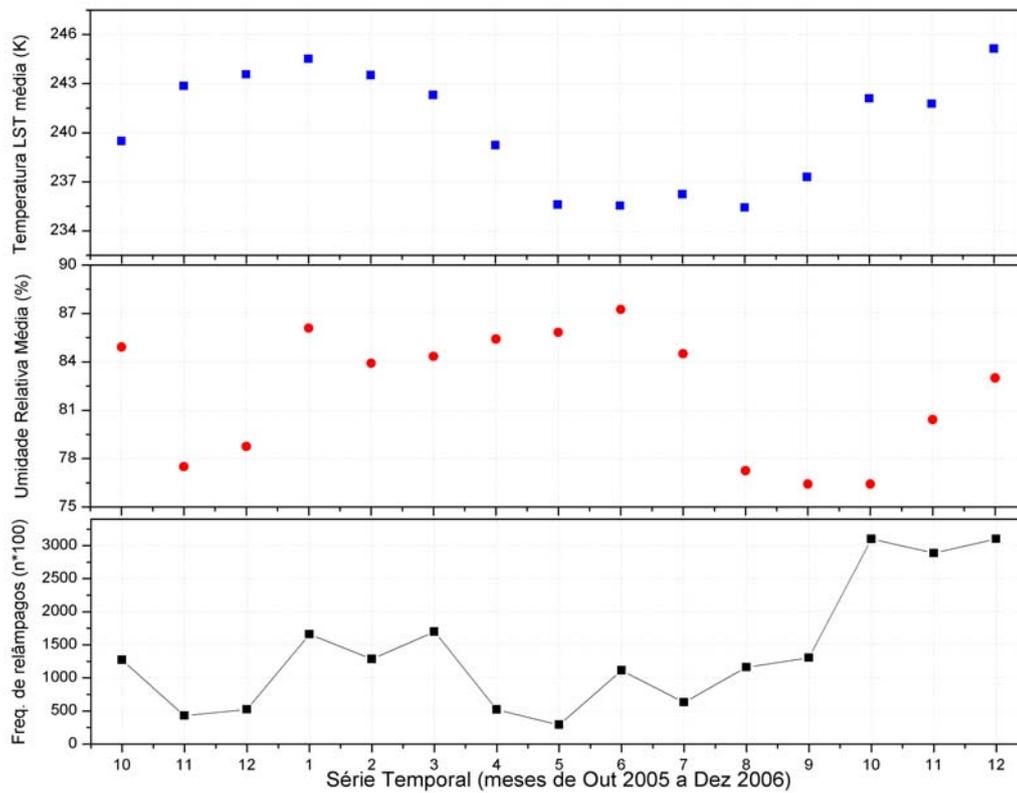


Figura 4.18 – Variação temporal da temperatura de superfície, da umidade e da freqüência de relâmpagos.

4.4 Influências dos solos sobre as descargas

Primeiramente, cabe descrever algumas atribuições de cada tipo de solo, considerando que estas possam ser importantes na análise dos seus efeitos sobre as descargas atmosféricas. Neste sentido, é exposto através da [Figura 4.19](#) um histograma com a média dos constituintes metálicos obtidos através das amostras de solo. Assim, pode se verificar a existência de dois grandes grupos de solo, associados à concentração de minerais metálicos (limiar definido pela análise visual do gráfico, em torno de 100 g/kg). Destaque para as dunas com a menor concentração de minerais metálicos.

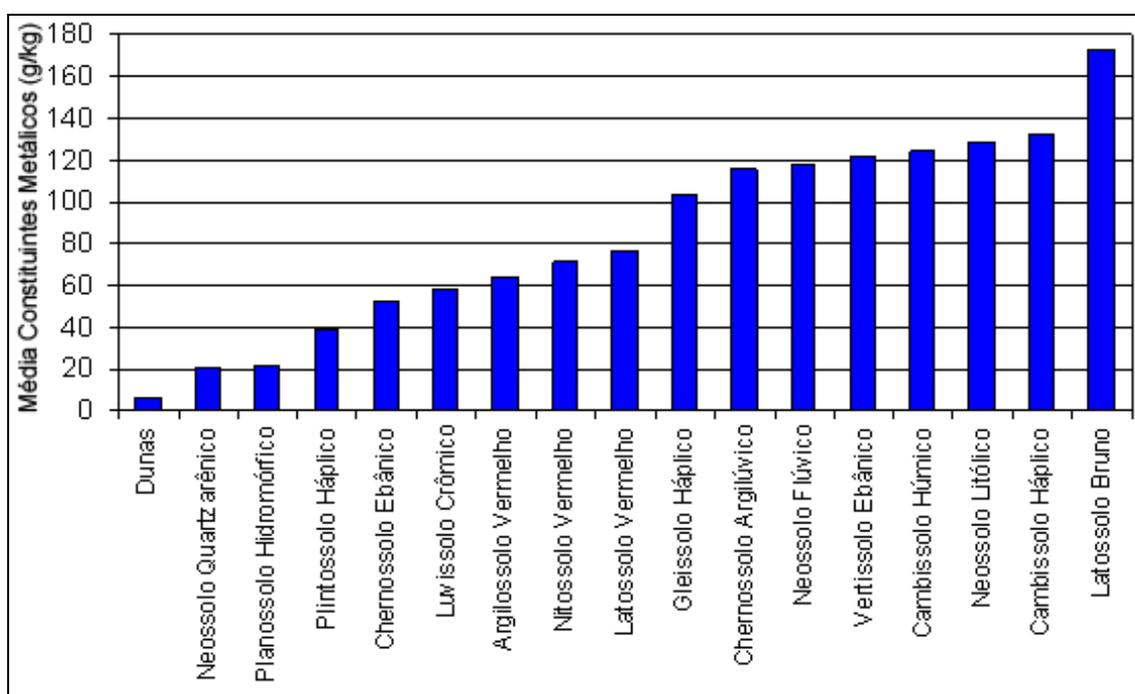


Figura 4.19 – Relação da concentração média dos constituintes metálicos para cada tipo de solo.

Destaca-se que os dados são obtidos de amostras extraídas pela EMBRAPA em todo país, representando, de maneira generalizada, as características associadas a cada tipo de solo, podendo não indicar com precisão os resultados das análises posteriores, sendo necessária, para tanto, uma análise cautelosa sobre a total validade dos resultados para este caso.

Pelo gráfico da [Figura 4.20](#), tem-se uma idéia das características do solo que indicam, por exemplo, altos teores de argila (e baixos teores de areia) para Latossolos Brunos e altos teores de areia (e baixos teores de argila) para as Dunas. Este indicativo mostra consistência nos dados de solo quando tomado em relação ao Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (EMBRAPA, 1999).

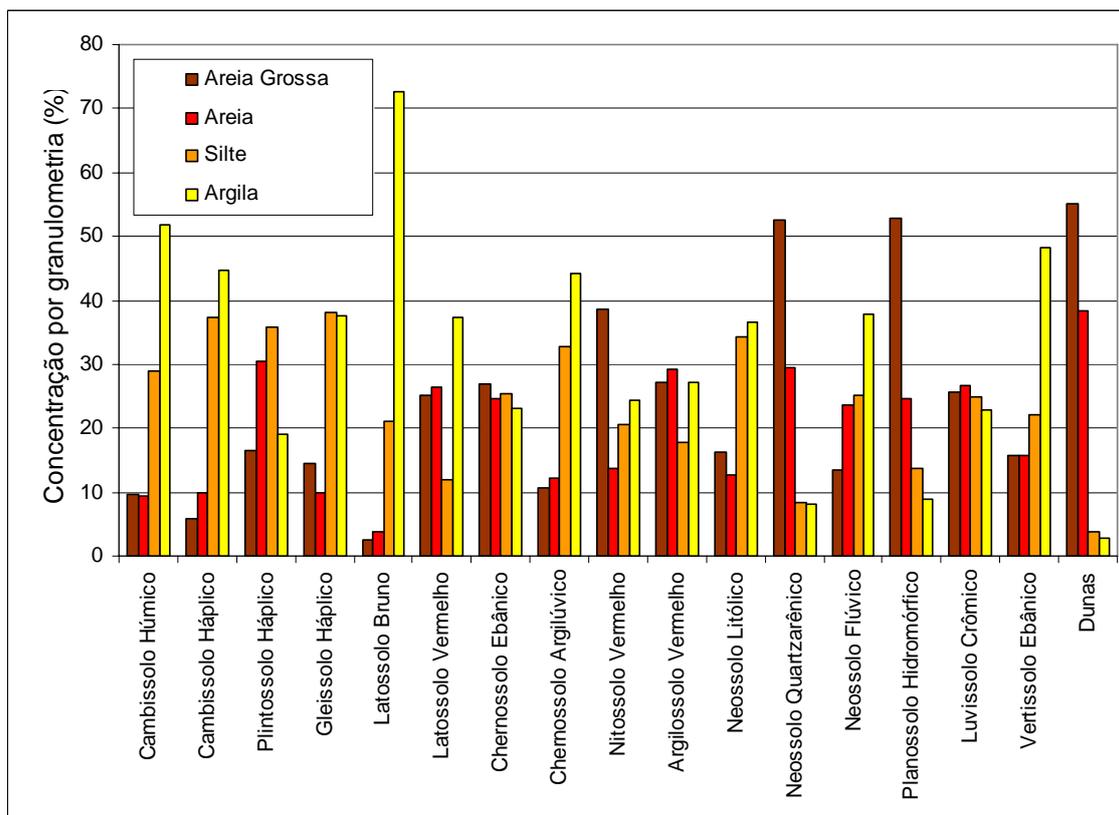


Figura 4.20 – Características granulométricas para cada tipo de solo.

Outra análise realizada mostra uma relação direta entre as características granulométricas do solo e a concentração de minerais metálicos no mesmo, que indicam altos valores de correlação positiva para a argila e silte e alta correlação negativa para a areia e areia grossa quando da sua comparação com os constituintes metálicos ([Tabela 4.1](#)). Os gráficos com as respectivas regressões (lineares) indicativas dos coeficientes de correlação estão expostos no [Apêndice C](#) e comprovam as relações entre as variáveis.

Tabela 4.1– Índices de correlação entre a média dos constituintes metálicos e as características granulométricas do solo.

<i>Variável</i>	<i>Índice de Correlação</i>
<i>Areia Grossa (2 a 0,2 mm)</i>	-0.86357
Areia (0,2 a 0,05 mm)	-0.84335
Silte (0,05 a 0,002 mm)	0.54336
Argila (menor que 0,002 mm)	0.94357

Estes resultados são coerentes com a literatura, que mostra situações semelhantes, e se explicam pela alta concentração de sílica em relação aos materiais metálicos para solos arenosos e uma relação inversa para solos argilosos. Isto ocorre porque solos arenosos são constituídos principalmente por minerais primários mais resistentes, tal como o quartzo (SiO_2), não suscetíveis às trocas iônicas. Já nos solos mais argilosos, onde predominam ferro, alumínio e silício, é que ocorre a maioria das trocas catiônicas² (BECEGATO e FERREIRA, 2005).

Outro aspecto a ser tratado se refere à concentração de água em diferentes tipos de solos e sua influência na condutividade: para um mesmo teor de umidade, solos com maiores concentrações de argila facilitam a passagem da corrente elétrica, ao contrário dos arenosos, onde a resistividade esperada é maior (BECEGATO e FERREIRA, 2005). É importante ressaltar aqui que este resultado discorda das idéias dos efeitos da umidade do solo nas variações de sua condutividade, visto que solos mais arenosos são mais permeáveis, além de sofrerem maior lixiviação e de terem menor concentração de materiais metálicos, sais dissolvidos e material orgânico, o que tende a diminuir sua

² As trocas iônicas e catiônicas referem-se ao processo reversível pelo qual íons retidos na superfície de uma fase sólida são substituídos por quantidades equivalentes de outros íons (em fase líquida ou sólida). Este processo pode ocorrer eletrostaticamente ou por covalência (WUTKE e DE CAMARGO, 1975).

condutividade. Além disso, o resultado mostra que solos com alta concentração de materiais metálicos são mais argilosos, tendem a concentrar mais água e, portanto, tendem a ser mais condutivos.

Uma das tentativas de análise, que passa a ser apresentada, refere-se à busca de efeitos da condutividade (através da concentração média de constituintes metálicos) dos diferentes tipos de solo na distribuição de relâmpagos. A média desses constituintes é usada de maneira a indicar a condutividade de cada tipo de solo. Como esses constituintes estão, conforme já discutido, relacionados à capacidade de retenção de água, e os efeitos da variação da condutividade devido às variações locais da umidade podem ser ignorados. Observa-se primeiramente que, conforme a [Tabela 4.2](#), nenhuma relação ocorre entre a densidade de relâmpagos NS e a média dos constituintes metálicos presentes em cada tipo de solo e, de forma semelhante, nenhuma relação para os relâmpagos NS separados em NS negativos e positivos, com coeficientes de correlação sem significância.

Um resultado positivo para os relâmpagos NS positivos concordaria com as idéias, baseadas nas observações de Chauzy e Soula (1999), sobre o efeito da corrente corona na formação do centro de cargas positivas na base da nuvem, quando da presença de uma nuvem de tempestade. No caso dos resultados obtidos, esse efeito não pode ser constatado devido ao baixo índice encontrado, o que não permite realizar qualquer análise nesse sentido. Outro aspecto a ser destacado é que a estatística para os relâmpagos NS positivos também é menos precisa do que para o total de relâmpagos e os relâmpagos NS negativos, visto que os dois últimos compõem a maior parte da série de dados. Além disso, os cálculos realizados por Kamra e Ravichandran (1993) mostraram que a variação do campo elétrico em função de variações de condutividade no solo é expressiva próxima ao solo, mas diminui para maiores altitudes, de modo que suas relações com a formação de cargas na nuvem são desprezíveis. Deve-se ter em mente ainda que, conforme dito anteriormente,

pode o resultado estar sendo influenciado por possíveis inconsistências entre os dados e reais características do solo para a região.

Tabela 4.2 – Índices de correlação entre a média dos constituintes metálicos do solo e diferentes variáveis.

<i>Variável</i>	<i>Índice de Correlação</i>
Densidade de relâmpagos NS Total	-0.157
Densidade de relâmpagos NS Positivos	0.291
Densidade de relâmpagos NS Negativos	0.015
Média de Corrente de Pico (NS negativos)	-0.427
Média de Corrente de Pico (NS positivos)	0.631

Em relação à análise do pico de corrente estimado pelo sistema, os resultados exibem índices de correlação positiva razoáveis para a média do pico de corrente dos relâmpagos NS positivos em cada classe de solo e a média dos constituintes metálicos dos solos (Figura 4.21) e uma correlação negativa para o caso dos relâmpagos NS negativos (Figura 4.22).

Ao comparar este resultado ao obtido por Orville e Huffines (2001), uma tendência de relação contrária entre a condutividade da superfície e o pico de corrente dos relâmpagos ocorre: Orville e Huffines encontraram diferenças bruscas no pico de corrente entre o oceano (superfície de alta condutividade) e o continente (com condutividade menor) para os relâmpagos NS negativos e não bruscas para os relâmpagos NS positivos, indicando uma resposta positiva à condutividade para os picos de corrente dos relâmpagos NS negativos e uma resposta “não-positiva” desta aos relâmpagos NS positivos. A proposta de que o efeito da atenuação do solo esteja relacionado diretamente ao pico de corrente (no sentido de que, quanto mais condutiva for a superfície na qual o pulso eletromagnético se propaga, maior tende a ser o pico de corrente estimado, devido a menor atenuação deste sinal) não explica, mais uma vez, o resultado obtido.

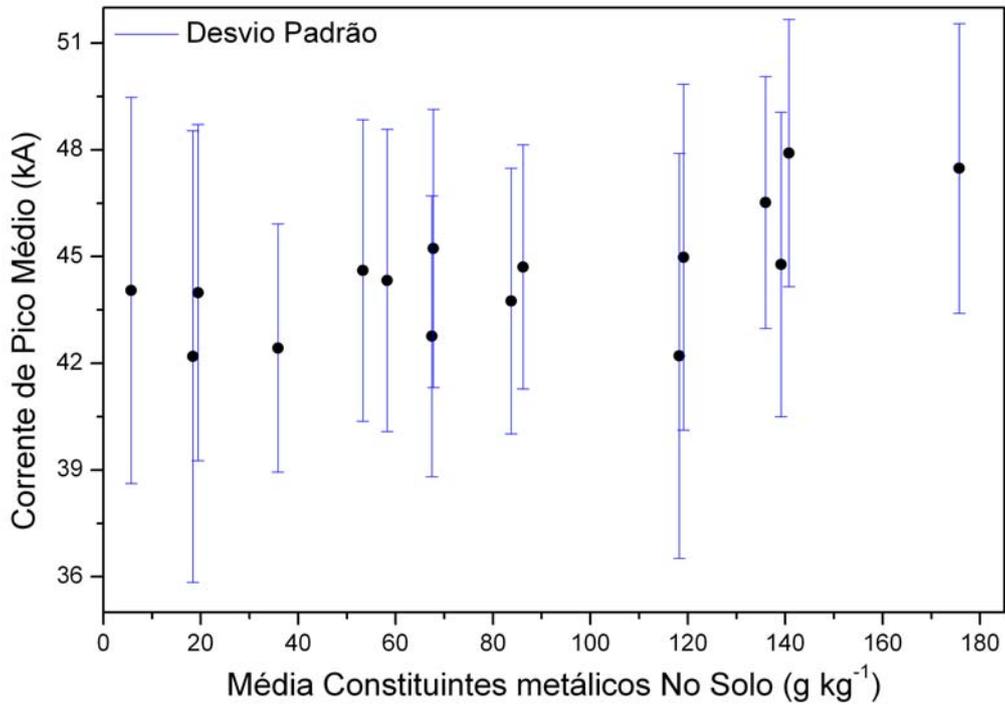


Figura 4.21 – Relação da concentração média dos constituintes metálicos e a média do pico de corrente de relâmpagos NS positivos.

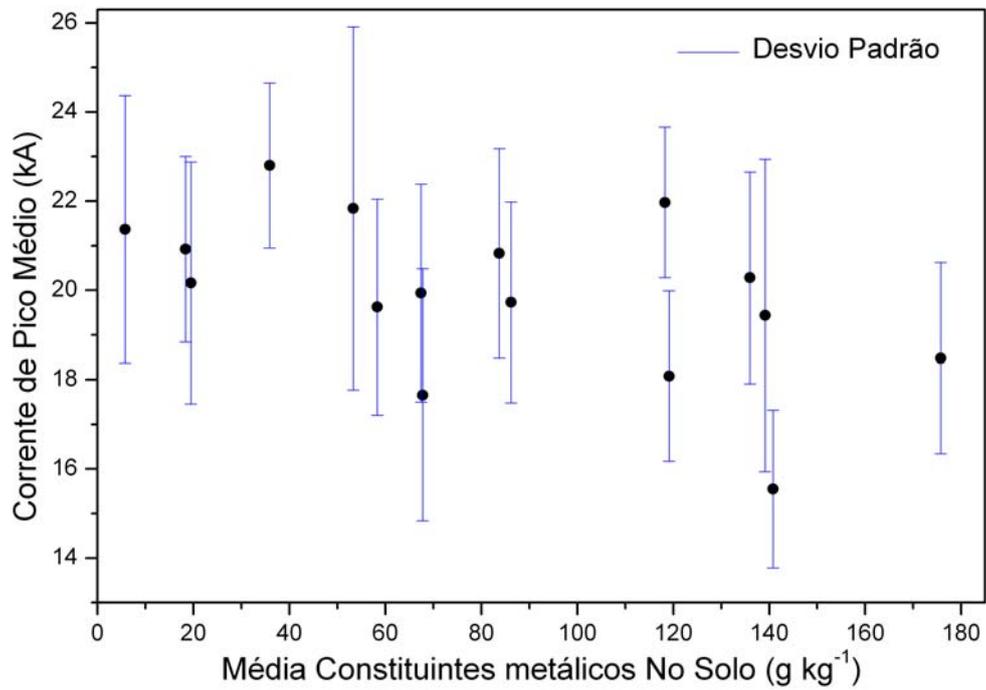


Figura 4.22 – Relação da concentração média dos constituintes metálicos e a média do pico de corrente de relâmpagos NS negativos.

Cabe destacar, porém, que o resultado obtido neste estudo dá-se apenas pela média de condutividade em termos de concentração de constituintes metálicos dentro de cada classe de solo e não considera toda a trajetória percorrida pelo pulso eletromagnético antes de atingir o sensor. Sugere-se, assim, o uso desse resultado como uma idéia no avanço dos estudos dos efeitos dos solos sobre as estimativas de corrente de pico.

4.5 Variáveis mais efetivas na distribuição de relâmpagos

Até o momento as variáveis foram analisadas de maneira isolada, e através dessa análise mostrou-se mais efetiva a atuação da temperatura sobre a distribuição dos relâmpagos sobre o Rio Grande do Sul. Os solos, por sua vez, não mostraram qualquer relação com a densidade de descargas. O relevo se mostrou ativo, especialmente no que se refere à variação da altitude ou à declividade, com efeitos na distribuição na região central do Estado.

Uma análise sobre os valores de correlação comprova o maior efeito de temperatura para o caso de estudo, cujos valores para a altitude, declividade e temperatura são mostrados na [Tabela 4.3](#) para duas regiões: cobrindo todo o Estado e apenas sobre a região elevada. Os solos não entraram na análise por não exibirem nenhuma relação com a densidade de descargas. Os resultados mostram valores de correlação elevados para a declividade quando analisada a região selecionada sobre a Serra e valores de correlação elevados para a temperatura quando da análise sobre todo o Estado.

Para o último caso, valores de correlação negativos elevados foram obtidos para a altitude e a declividade, o que resulta do fato de as maiores densidades de relâmpago ocorrerem na região oeste, onde se encontram as menores altitudes (e declividades) e de as densidades mais baixas ocorrerem sobre as regiões mais elevadas. Isto é dito desconsiderando a região na qual o relevo apresenta influência, que é mascarada quando todo Estado é analisado.

Tabela 4.3 – Estatística das variáveis mais efetivas na distribuição de relâmpagos sobre o Rio Grande do Sul.

Variáveis	<i>R para região selecionada</i>	<i>R para todo Estado</i>
Temperatura	0.4167	0.9859
Declividade	0.91203	-0.8588
Altitude	-0.05011	-0.9495

Com base nestas observações, podem-se fazer comentários relativos à influência de cada variável. As observações, no que concerne à temperatura e à declividade, indicam que as variáveis apresentam efeitos distintos e em diferentes escalas.

Esta estimativa abre perspectivas no sentido de estabelecer algum modelo que leve em conta diferentes variáveis e seus diferentes comportamentos em relação às descargas, como realizado no trabalho de Soriano e Soula (2001), que considerou a altitude e a latitude em um modelo de regressão. Com os resultados já obtidos para a declividade, que mostra considerável influência na distribuição de relâmpagos em dada escala, um modelo aperfeiçoado poderia ser criado.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise da relação entre a distribuição espacial e temporal de relâmpagos e as características geográficas e meteorológicas mostrou que o impacto destas características sobre os relâmpagos ocorre de forma diferenciada. As características geográficas afetaram a densidade de descargas atmosféricas em algumas regiões do Rio Grande do Sul. Por outro lado, as características meteorológicas, apesar de terem relação com algumas condicionantes geográficas, parecem afetar a distribuição de relâmpagos em todo Estado.

No que diz respeito ao relevo, encontraram-se efeitos significativos deste sobre as descargas em setores localizados (onde as condicionantes, orográficas e atmosféricas, possibilitam a maior intensificação da forçante) da Serra Gaúcha. E estes efeitos se dão especialmente em termos de declividade, que é a variável adotada nos modelos meteorológicos e que é sugerida, também para este caso de estudo, ser mais efetiva na formação de tempestades. Resultados semelhantes foram obtidos para a análise por dias de tempestade. A altitude também parece afetar a distribuição dos relâmpagos NS negativos (principais responsáveis pelo aumento de densidade na região selecionada, condicionada aos efeitos orográficos), sugerindo um efeito da diminuição da distância do centro de cargas negativo em relação à superfície. Sob uma perspectiva temporal, observaram-se os efeitos dos relâmpagos na antecipação do pico diurno da ocorrência de descargas.

Com relação à temperatura de superfície, esta aponta para efeitos significativos sobre a distribuição das descargas, especialmente sobre o Noroeste do Estado, onde se encontram as maiores temperaturas e também as maiores densidades de descarga. Os efeitos da temperatura na formação de ilhas de calor sobre a região metropolitana de Porto Alegre foram comprovados, embora de maneira menos clara que para a região de São Paulo por possíveis dependências das características da imagem LANDSAT utilizada e da própria região em análise. Embora evidenciada a maior temperatura para a área

urbana, reflexos no aumento da densidade de relâmpagos não foram encontrados. Este efeito pode ser resultante de diferentes aspectos, dos quais se ressaltam o baixo gradiente térmico encontrado entre a área urbana e os arredores, que eventualmente é incapaz de disparar a formação de tempestades.

Já quando levados em conta os resultados das relações entre a temperatura de superfície e os relâmpagos para todo Estado, foi encontrada uma correlação significativa ($r \approx 0.99$) que, ajustada através de uma regressão simples, mostrou um aumento quase linear das descargas em função da temperatura de superfície para do produto LST MODIS. Sob perspectiva temporal, os resultados mostraram um comportamento cíclico da temperatura, na qual um dos ciclos é seguido por um aumento na densidade de relâmpagos e no subsequente não, sugerindo que a densidade depende de outros fatores que não só a temperatura, como, por exemplo, a umidade relativa.

Com relação aos efeitos dos diferentes tipos de solos sobre a distribuição de descargas, resultados pouco satisfatórios foram obtidos. Nenhuma correlação entre a condutividade (baseada na média dos constituintes metálicos) e o total de descargas foi encontrada. Um índice de correlação um pouco maior foi encontrado entre a média dos constituintes metálicos e a densidade de relâmpagos NS positivos, porém com baixa significância estatística. Outro aspecto interessante sobre os solos refere-se à relação direta entre a granulometria e a média dos constituintes metálicos, indicando que os efeitos da variação de condutividade, devido às variações do conteúdo de água no solo, são pouco expressivos.

Os resultados sobre as estimativas dos picos de corrente dos relâmpagos NS, nas suas relações com a condutividade do solo (no que se refere ao esperado aumento das estimativas quando do aumento da condutividade), apresentaram valores com pouca significância e indicaram uma tendência contrária à encontrada na literatura. Destaca-se que as estimativas de pico de corrente

sofrem efeitos de atenuação ao longo de toda a trajetória percorrida pelo sinal e sobre diferentes tipos de solo quando da ocorrência de relâmpagos, o que não é considerado nesse estudo. Neste sentido, os resultados, embora não conclusivos, abrem novas perspectivas no entendimento das relações entre a condutividade do solo e as estimativas de pico de corrente, reforçando a necessidade de uma análise mais profunda, que considere as variações ao longo da trajetória percorrida pelo sinal, oferecendo soluções mais significativas e melhorando o desempenho dos sistemas de detecção.

Em relação aos efeitos das variáveis analisadas, encontrou-se a temperatura de superfície como sendo mais efetiva na distribuição de relâmpagos sobre todo o Estado, ao passo que os efeitos do relevo (especialmente declividade) dão-se mais na parte Centro-Leste do Estado e de forma mais sensível. Indicam-se assim, efeitos em diferentes proporções e escalas entre as variáveis e a dinâmica dos relâmpagos. Assim, novos estudos que explorem estas condições podem ser desenvolvidos, de forma a qualificar/aperfeiçoar as soluções geradas por diferentes modelos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARDANUY, P. E. *et al.* The moderate resolution imaging spectrometer (MODIS) science and data system requirements. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 29, p. 75-88, 1991.

BECEGATO, V. A. ; FERREIRA, F. J. F. Gamaespectrometria, resistividade elétrica e susceptibilidade magnética de solos agrícolas no noroeste do estado do Paraná. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 23, p. 371-405, 2005.

BOCCIPPIO, D. J. *et al.* Performance assessment of the optical transient detector and lightning imaging sensor. part I: predicted diurnal variability. **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**, v. 19, n. 9, p. 1318-1332, 2002.

BOURSCHEIDT, V. *et al.* Lightning behavior with respect to altitude variations at Rio Grande do Sul (South of Brazil) based on data of the Brazilian Lightning Detection Network. In: International Conference on Atmospheric Electricity, 13., 2007, Beijing, China. **Proceedings...** Beijing, China: ICAE/IAMAS/IUGG, 2007. p. 714-717.

BURROUGH, P. A. **Principles of geographical information systems for land resources assessment.** Oxford: Clarendon Press, 1986

CALBETE, N. O. *et al.* Interação entre o jato em baixos níveis e complexos convectivos de mesoescala sobre a região do conesul. In: Congresso Latinoamericano Iberico de Meteorologia e Congresso Argentino de Meteorologia, 9 e 8., 2001, Buenos Aires, AR. **Anais...** Buenos Aires, AR, 2001. p. 1-6.

CAMARA, G. *et al.* SPRING: Integrating remote sensing and GIS by object-oriented data modelling. **J Computers & Graphics**, v. 20, n. 3, p. 395-403, 1996.

CHANDER, G. ; MARKHAM, B. Revised Landsat-5 TM radiometric calibration procedures and postcalibration dynamic ranges. **Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on**, v. 41, n. 11, p. 2674-2677, 2003.

CHANG, J.-T. ; WETZEL, P. J. Effects of spatial variations of soil moisture and vegetation on the evolution of a prestorm environment: A case study. **Monthly Weather Review**, v. 119, n. 6, p. 1368–1390, 1991.

CHAUZY, S. ; SOULA, S. Contribution of the ground corona ions to the convective charging mechanism. **Atmospheric Research**, v. 51, n. 3-4, p. 279-300, 1999.

CHEN, S. H. ; LIN, Y. L. Orographic effects on a conditionally unstable flow over an idealized three-dimensional mesoscale mountain. **Meteorology and Atmospheric Physics**, v. 88, n. 1, p. 1-21, 2005.

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.

CHRISTIAN, H. J. *et al.* The detection of lightning from geostationary orbit. **Journal of Geophysical Research**, v. 94, n. 13, p. 329-337, 1989.

CHRISTIAN, H. J. *et al.* **Algorithm theoretical basis document (ATBD) for the lightning imaging sensor (LIS)**. NASA-TM: NASA/Marshall Space Flight Center, 2000. (AL 35812)

CHU, C.-M. ; LIN, Y.-L. Effects of orography on the generation and propagation of mesoscale convective systems in a two-dimensional conditionally unstable flow. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 57, n. 23, p. 3817-3837, 2000.

Climanálise - Boletim de Monitoramento e Análise Climática. São José dos Campos. v. 20, n. 12, dez, 2005.

Climanálise - Boletim de Monitoramento e Análise Climática. São José dos Campos. v. 21, n. 01, jan, 2006.

CUMMINS, K. L. *et al.* 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), 16., 2000, Tucson, Arizona. **Proceedings...** Tucson, Arizona, 2000. p. 1-10.

DAAC Land Processes ; USGS Center for Earth Resources Observation and Science. **MODIS reprojection tool** 2008. Disponível em < <http://lpdaac.usgs.gov/landdaac/tools/modis/index.asp> >, Acesso

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. *et al.* 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. p. 9.

EGGER, J. ; HOINKA, K. P. Fronts and orography. **Meteorology and Atmospheric Physics**, v. 48, n. 1, p. 3-36, 1992.

Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos (2ª aproximação)**. 100 p. 1981.

Centro Nacional de Pesquisas de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Rio de Janeiro: Rio de Janeiro: EMBRAPA. 412 p. 1999.

Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Iniciativa solos BR: site experimental** EMBRAPA: Rio de Janeiro, 2007. Disponível em < <http://www.cnps.embrapa.br/solosbr> >, Acesso

ERSHOVA, T. V. *et al.* Dependence of density of lightning discharges to the ground on physico-geographical factors of locality. In: Russian-Korean International Symposium on Science and Technology (KORUS), 6., 2002, Moscou. **Proceedings...** Moscou: KORUS, 2002. p. 414-417. 0-7803-7427-4. (10.1109/KORUS.2002.1028053).

FARIAS, W. R. G. *et al.* Anomalous lightning activity over metropolitan region of São Paulo due to urban effects. In: International Conference on Atmospheric Electricity ICAE, 13., 2007, Beijing China. **Proceedings...** Beijing China: ICAE/IAMAS/IUGG, 2007. p. 669-672.

FIGUEIREDO, J. C. ; SCOLAR, J. Estudo da trajetória dos sistemas convectivos de mesoescala na América do Sul. In: Congresso Argentino de Meteorologia e Congresso Latino-americano e Ibérico de Meteorologia, 7., 1996, Buenos Aires. **Anais...** Buenos Aires, 1996. p. 165-166.

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.

GOMES, M. A. S. S. **Estudo dos relâmpagos na região sudeste do Brasil em função das características geográficas**. 149 p. (INPE-10055-TDI/889). Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial)-Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2002.

Instituto Nacional de Geografia e Estatística. **Mapas Interativos**. IBGE: Rio de Janeiro, 2007. Disponível em < <http://mapas.ibge.gov.br/> >, Acesso em 18/09/2007.

Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). **Temperatura média**: normais climáticas de 1961 a 1990. INMET: Brasília, 2007. Disponível em < <http://www.inmet.gov.br/html/clima/mapas/> >, Acesso em 15/01/2008.

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

JUSTICE, C. O. *et al.* The moderate resolution imaging spectroradiometer (MODIS): land remote sensing for global change research. **Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on**, v. 36, n. 4, p. 1228-1249, 1998.

KAMRA, A. K. ; RAVICHANDRAN, M. On the assumption of the Earth's surface as a perfect conductor in atmospheric electricity. **Journal of Geophysical Research**, v. 98, n. D12, p. 22.875-22.885, 1993.

KASAHARA, A. **Influence of orography on the atmospheric general circulation** 23 ed., v. 23. New York: World Meteorological Organization, 1980. 48 p. (GARP Publication Series)

KREHBIEL, P. R. The electrical structure of thunderstorms. In: KRIDER, E. P. ; ROBLE, R. G. (Ed.). **The Earth's Electrical Environment**. Washington DC: National Academic Press, Inc., 1986. p. 90-113.

MAGUIRE, D. J. **Geographical information systems**: principles and applications. v. 1. Essex: Longman Scientific & Technical, 1991. 649 p.

MAIR, M. *et al.* Effect of signal attenuation on the peak current estimates from lightning location systems. In: International Conference on Lightning Protection, 24., 1998, Birmingham. **Proceedings...** Birmingham, 1998.

MEYER, P. L. **Probabilidade**: aplicações à estatística. v. 2. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora, 1983

MIRANDA, E. E. D. **Brasil em relevo**. Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite: 2005. Disponível em < <http://www.relevobr.cnpm.embrapa.br> >, Acesso em 26/01/2007.

MONMONIER, M. S. **Computer-assisted cartography: principles and prospects**. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice-hall, 1982. 214 p.

MONTGOMERY, D. C. ; RUNGER, G. C. **Applied statistics & probability for engineers**. New York: John Wiley & Sons, Inc., 2003

NACCARATO, K. P. **Análise das características dos relâmpagos na Região Sudeste do Brasil**. 362 p. (INPE-14083-TDI/1069). Tese (Doutorado em Geofísica Espacial)-Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2006.

NACCARATO, K. P. *et al.* Improvements to the detection efficiency model for the Brazilian lightning detection network. In: International Conference on Atmospheric Electricity ICAE, 13., 2007, Beijing China. **Proceedings...** Beijing China: ICAE/IAMAS/IUGG, 2007. p. 842-845.

NACCARATO, K. P. *et al.* 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. *et al.* Cloud-to-ground lightning flash climatology of State of São Paulo: 1999-2004. In: International Symposium on Lightning Protection (SIPDA), 8., 2005, São Paulo/SP. **Proceedings...** São Paulo/SP: Instituto de Eletrotécnica e Energia (IEE/USP), 2005. p. 120-125.

NASA. **Landsat-7 science data user's handbook**. Greenbelt, Maryland: NASA's Goddard Space Flight Center: 2007. Disponível em < <http://landsathandbook.gsfc.nasa.gov/handbook.html> >, Acesso em 26/07/2007.

ORVILLE, R. E. Calibration of a magnetic direction finding network using measured triggered lightning return stroke peak currents. **Journal of Geophysical Research**, v. 96, p. 17135-17142, 1991a.

_____. Lightning ground flash density in the contiguous united states -1989. **Monthly Weather Review**, v. 119, n. 2, p. 573-577, 1991b.

ORVILLE, R. E. *et al.* An east coast lightning detection network. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 64, n. 9, p. 1029-1037, 1983.

ORVILLE, R. E. ; HUFFINES, G. R. Lightning ground flash measurements over the contiguous United States: 1995 to 1997. **Monthly Weather Review**, v. 127, n. 11, p. 2693-2703, 1999.

_____. 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. *et al.* Cloud-to-ground lightning in linear mesoscale convective systems. **Monthly Weather Review**, v. 129, n. 5, p. 1232-1242, 2001.

PIELKE, R. A. Influence of the spatial distribution of vegetation and soils on the prediction of cumulus convective rainfall. **Review of Geophysics**, v. 39, n. 2, p. 151-178, 2001.

PINTO, I. R. C. A. **Estudo sobre campos elétricos e condutividade associados a nuvens eletrificadas na região da América do Sul**. 129 p. Tese (Doutorado em Ciência Espacial)-Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1987.

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

PINTO JR., O. *et al.* Recent upgrades to the Brazilian integrated lightning detection network. In: International Lightning Detection Conference (ILDC), 19., 2006, Tukson, Arizona. **Proceedings...** Tukson, Arizona: Vaisala Inc., 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 p.

PINTO JR., O. *et al.* Thunderstorm and lightning characteristics associated with sprites in Brazil. **Geophysical Research Letters**, v. 31, n. L13103, p. 4, 2004.

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, MA: USDOE/National Aeronautics and Space Administration, 1994. UCRL-JC--115035; CONF-940139--1; Other: ON: DE94002003.

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

REAP, R. M. Evaluation of cloud-to-ground lightning data from the Western United States for the 1983-84 summer seasons. **Journal of Applied Meteorology**, v. 25, n. 6, p. 785-799, 1986.

_____. Climatological characteristics and objective prediction of thunderstorms over Alaska. **Weather and Forecasting**, v. 6, n. 3, p. 309-319, 1991.

ROBLE, R. G. ; TZUR, I. The global atmospheric-electrical circuit. In: (Ed.). **The Earth's Electrical Environment**. Washington: National Academic Press, 1986. p. 206-231.

RODRIGUEZ, E. ; MARTIN, J. M. Theory and design of interferometric synthetic aperture radars. **Radar and Signal Processing, IEE Proceedings F**, v. 139, n. 2, p. 147-159, 1992.

RODRIGUEZ, E. *et al.* **An assessment of the SRTM topographic products**. Pasadena, California: Jet Propulsion Laboratory, 2005, p.143. (JPL D-31639)

RYCROFT, M. J. *et al.* The global atmospheric electric circuit, solar activity and climate change. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 62, n. 1, p. 1563-1576, 2000.

SABA, M. M. F. *et al.* Negative cloud-to-ground lightning properties from high-speed video observations. **Journal of Geophysical Research**, v. 111, n. D03101, p. 1-9, 2006a.

SABA, M. M. F. *et al.* Relation between lightning return stroke peak current and following continuing current. **Geophysical Research Letters**, v. 33, n. L23807, p. 1-4, 2006b.

SÃO SABBAS, F. Fenômenos luminosos estratosféricos e mesosféricos associados a nuvens de tempestades. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 17, p. 224-224, 1999.

SCHULZ, W. **Performance evaluation of lightning location systems** 136 p. Tese (Doutorado em Engenharia)-Faculty of Electrical Engineering, Technical University of Vienna, Vienna, 1997.

SCHULZ, W. ; DIENDORFER, G. 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, France: Society of Automotive Engineers, 1999.

SCOLAR, J. ; FIGUEIREDO, J. C. Análise das condições sinóticas associadas a formação de complexos convectivos de mesoescala. In: Congresso Brasileiro de Meteorologia (CBMET), 6., 1990, Salvador. **Anais...** Salvador: SBMET, 1990. p. 455-461.

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.

RIO GRANDE DO SUL (Estado). SECRETARIA DE ENERGIA, MINAS E COMUNICAÇÕES. **Rio Grande do Sul: atlas eólico** Secretaria de Energia, Minas e Comunicações: Porto Alegre, 2002. Disponível em < <http://www.semc.rs.gov.br> >, Acesso em 04/09/2007.

SMITH, R. B. The influence of mountains on the atmosphere. In: SALTZMAN, B. (Ed.). **Advances in geophysics**, v. 21. New York: Academic Press Inc., 1979. p. 87-230.

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.

SORIANO, L. R. ; SOULA, S. Meteorological and geo-orographical relationships with lightning activity in Castilla-Leon (Spain). **Meteorological Applications**, v. 8, n. 02, p. 169-175, 2001.

STEIGER, S. M. *et al.* 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.

TAVARES, M. ; SANTIAGO, M. A. M. Eletricidade atmosférica e fenômenos correlatos. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 24, p. 408-414, 2002.

TINSLEY, B. A. Influence of solar wind on the global electric circuit, and inferred effects on cloud microphysics, temperature and dynamics in the troposphere. **Space Science Reviews**, v. 42, n. 8, p. 1-28, 2000.

UCCELLINI, L. W. ; JOHNSON, D. R. The coupling of upper and lower tropospheric jet streaks and implications for the development of severe convective storms. **Monthly Weather Review**, v. 107, n. 6, p. 682-703, 1979.

UNIVERSIDADE FEREDAL DO RIO GRANDE DO SUL-PREFEITURA MUNICIPAL DE PORTO ALEGRE-INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (UFRGS-PMPOA-INPE). **Atlas ambiental de Porto Alegre**. Porto Alegre: Editora da universidade-UFRGS. 12-20 p. 1999.

UMAN, M. A. **The lightning discharge** v. 39. New York: Academic Press, Inc., 1987 (International Geophysics Series)

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.

WAN, Z. **MODIS land-surface temperature algorithm theoretical basis document (LST ATBD)**. Santa Barbara, CA: NASA, 1999. (NAS5-31370)

_____. **Land surface temperature measurements from EOS MODIS data**. Santa Barbara, CA: NASA, 2003. (NAS5-31370)

_____. **Refinements of the MODIS land-surface temperature products**. Santa Barbara, CA: NASA, 2005. (NNG04HZ15C)

_____. **MODIS land surface temperature products users' guide** NASA: 2006. Disponível em < <http://www.icesb.ucsb.edu/modis/LstUsrGuide/usrguide.html> >, Acesso em 02/11/2007.

WAN, Z. ; LI, Z.-L. A physics-based algorithm for retrieving land-surface emissivity and temperature from EOS/MODIS data. **Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on**, v. 35, n. 4, p. 980-996, 1997.

WAN, Z. *et al.* Validation of the land-surface temperature products retrieved from Terra Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer data. **Remote Sensing of Environment**, v. 83, n. 1-2, p. 163-180, 2002.

WILLIAMS, E. R. Global circuit response to seasonal variations in global surface air temperature. **Monthly Weather Review**, v. 122, n. 8, p. 1917-1929, 1994.

WUTKE, A. C. P. ; DE CAMARGO, O. A. Adsorção e troca iônica. In: MONIZ, A. C. (Ed.). **Elementos de pedologia**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1975. p.

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.

GLOSSÁRIO

Barlavento - lado de onde vem o vento ou lado exposto ao vento.

Declividade - inclinação, variação de altitude em função da distância.

Forçante - que exerce influência sobre determinada variável; afeta determinada variável.

Georreferenciamento - atribuição de coordenadas a um ponto ou imagem, vinculando-o a um sistema de coordenadas.

Granulometria - estudo ou determinação das dimensões das partículas sedimentares.

Isotermas - linhas de mesma temperatura.

Lixiviação - processo através do qual os minerais, existentes na camada superior do solo, são dissolvidos ou removidos das rochas e solos, e transportados pela água infiltrada.

Orográfico - referente à orografia, nuances do relevo; variações morfológicas do relevo.

Sotavento - lado contrário ao donde vem o vento; lado protegido do vento.

Topografia - semelhante à orografia.

ÍNDICE POR ASSUNTO

- Aerossóis.....38, 94
Atmosfera condicionalmente
instável.....87
Calor latente33, 89, 171
Calor sensível.....42, 89, 167, 171
Características geográficas27, 65
E meteorológicas35
Características metalogenéticas 106
Centros de cargas35
Condutividade ... 53, 81, 83, 85, 179,
180, 189
Dados pontuais 115, 117
Declividade ..66, 105, 122, 123, 124,
134, 147, 155, 156, 157, 158,
159, 188
Descarga de retorno.....51, 62
Descarga subsequente51
Descargas conectantes51
Dias de tempestade .. 117, 147, 156,
188
Eficiência de detecção59, 60
Eletricidade atmosférica .xxii, 37, 65,
81, 89, 97
Fatiamento119
Geo-objetos..... 115, 116, 117, 121,
134, 145, 155, 156
Grades numéricas116
Granulometria..... 106, 189
Ilhas de calor35, 92, 188
Informações georreferenciadas . 105
Líder escalonado 51, 53
Matriz de densidade . 113, 114, 116,
117
Média ponderada 114, 117
Métodos de detecção 55
Multiplicidade 27, 51
Pico de corrente.. 27, 32, 53, 75, 85,
183, 184
Polaridade 27, 35, 44, 149, 150
Precipitação orográfica 69
Relâmpagos ns... 44, 50, 53, 59, 75,
138, 143, 145, 182, 183, 184,
188, 189
Relâmpagos ns positivos 50
Relâmpagos positivos 49
Sensores ópticos 58
Sistemas de detecção 50, 53, 64, 73
Temperatura de superfície.... 33, 89,
92, 125, 129, 139, 163, 164, 165,
166, 174, 188, 197
Tempestades 33, 35, 37, 38, 40, 46,
66, 156, 158, 160, 171, 173, 189
Tipo de solo .. 81, 94, 106, 175, 177,
180
Topografia 65, 67, 69, 72, 73, 80,
102, 112, 146, 147
Variáveis meteorológicas..... 74

APÊNDICE A – ROTINAS USADAS NO TRABALHO

A.1 – Rotinas em MAPBASIC:

Cálculo dos dias de tempestade:

```
Include "mapbasic.def"
```

```
Dim x, z, a, i As Integer
```

```
Dim Ano, Mes, Dia, Ano1, Mes1, Dia1 As Integer
```

```
Dim strA, campo2 As String
```

```
Open Table "E:\Arquivos MapInfo\Tabelas\Series\Serie_relevo_20kA.TAB" Interactive
```

```
Open Table "E:\Arquivos MapInfo\Tabelas\Grids_tab\Grid_relevo_corrigido_20kA.TAB" Interactive
```

```
i = 0
```

```
Fetch First From Grid_relevo_corrigido_20kA
```

```
    DO While Not EOT (Grid_relevo_corrigido_20kA)
```

```
        campo2 = Grid_relevo_corrigido_20kA.ID_Celula
```

```
i = i + 1
```

```
        strA = "Select * from Serie_relevo_20kA, Grid_relevo_corrigido_20kA
```

```
Where Grid_relevo_corrigido_20kA.obj Contains Serie_relevo_20kA.obj And
```

```
Grid_relevo_corrigido_20kA.ID_Celula=""'+Grid_relevo_corrigido_20kA.ID_Celula+'"" Group By  
Ano, Mes, Dia Into SelectionFlash"
```

```
        Run Command strA
```

```
        Print strA
```

```
        x = TableInfo("SelectionFlash", TAB_INFO_NROWS)
```

```
        print i
```

```
strA = "Update Grid_relevo_corrigido_20kA SET Dias_temp = "+x+" Where RowID = "+i+""
```

```
        Run Command strA
```

```
Commit Table Grid_relevo_corrigido_20kA
```

```
Fetch Next From Grid_relevo_corrigido_20kA
```

```
loop
```

```
Commit Table Grid_relevo_corrigido_20kA
```

A.2 – Rotina em IDL:

Cálculo da média sobre imagem:

```
pro mosaico, idir
```

```
; Montando a estrutura
```

```
cd, idir
```

```
list = findfile("*.tif")
```

```
n = n_elements(list)
```

```
;m30 = where (list eq 'a*.'); And
```

```
;stop
```

```
print, n
```

```
total = do IDL
```

```
total = replicate(total, n)
```

```
;a = fltarr (179, 159)
```

```
for i=0, n-1 do begin
```

```
    a = read_tiff(list(i))
```

```
;print, a
```

```

        ;b = rotate(a,7)
        total[i].img = a;.field1
;        total[i].img2= where (total[i].img ne 0)
;print, total[i].img2
;stop
endfor
;ok
;teste de brilho integrado
sb = flarr(n)
print, sb
openw, 1, 'e:/meus_arquivos/resultados_modis_QCday.txt'
for i = 0,n-1 do begin
    sb(i) = ((total(total[i].img))/28461)*0.02
    printf,1, sb(i)
endfor
close, 1
plot, sb, xs = 1, ys = 1
end

```

A.3 – Rotinas em Legal:

Cálculo das médias das variáveis para os geo-objetos:

```

{Numerico decl ("srtm_declividade");
Numerico srtm ("modis_LST_media");
Numerico temp ("modis_LST_media");
Cadastral grid ("relampagos_cad");
Objeto relampago ("grid_rs_20ka");

decl = Recuperar (Nome = "decl_parte2");
srtm = Recuperar (Nome = "modis_poa");
temp = Recuperar (Nome = "LST_final");
grid = Recuperar (Nome = "grid_rs_corrigido_20ka");

relampago."ALTITUDE" = MediaZonal (srtm, relampago OnMap grid);
relampago."DECLIVE" = MediaZonal (decl, relampago OnMap grid);
relampago."TEMP_M" = MediaZonal (temp, relampago OnMap grid);}

```

Cálculo da temperatura de superfície aparente LANDSAT:

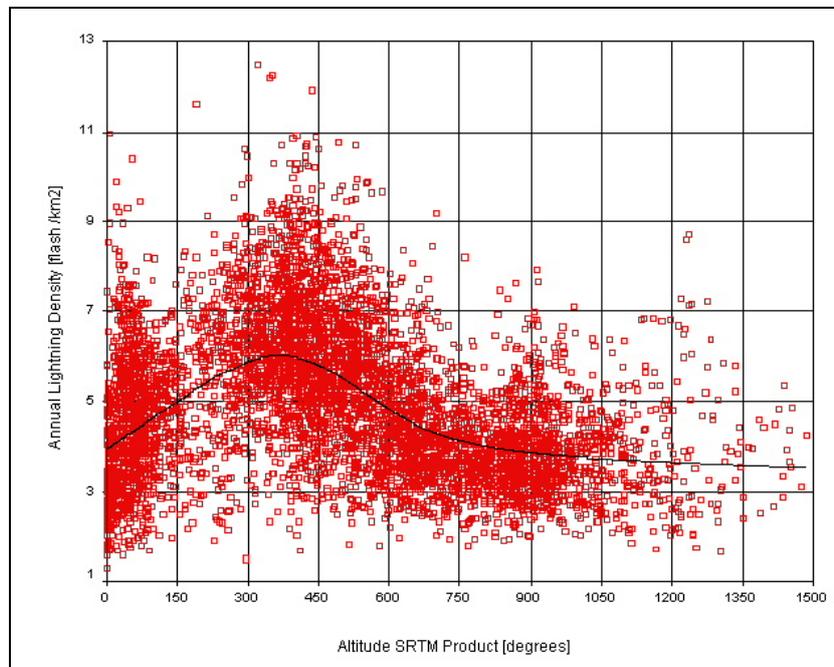
```

{Imagem Im1 ("LANDSAT");
Numerico temp, Lrad ("LANDSAT_TEMP");
Im1= Recuperar (Nome="landsat_temp");
Lrad = Novo (Nome="rad_Landsat", ResX = 0.00027, ResY = 0.00027, Min = 0, Max = 15);
temp = Novo (Nome="temp_Landsat", ResX = 0.00027, ResY = 0.00027, Min = 15, Max = 40);
//radiancia espectral
Lmin = 0.0;
Lmax=17.04;
QCALMax = 255;
QCALMin = 0;
Lrad = Digital (((Lmax - Lmin) / (QCALMax - QCALMin)) * (Im1 - QCALMin)) - Lmin);
// Cálculo da Temperatura
temp = ((1282.71) / (log((666.09 / Lrad) + 1))) - 273.15;}

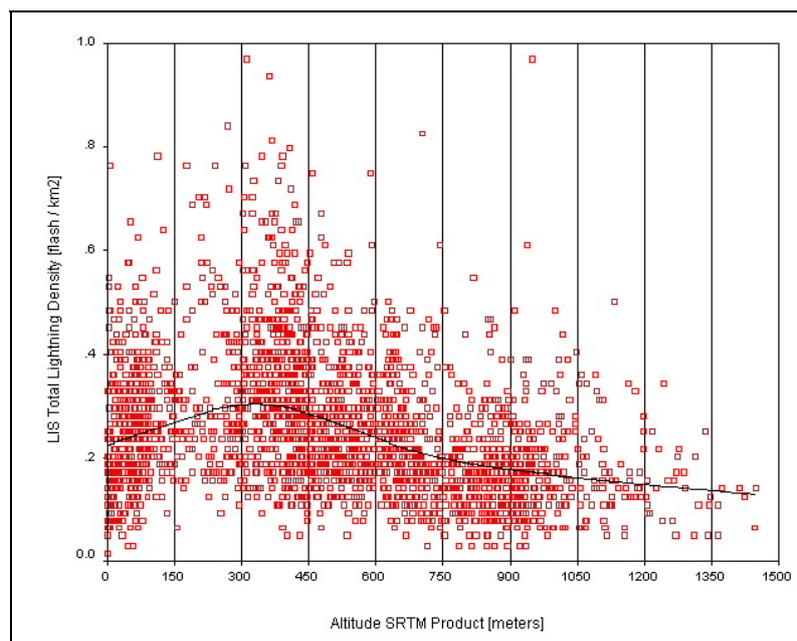
```

APÊNCIDE B – GRÁFICOS DA DISTRIBUIÇÃO DE DENSIDADE DE RELÂMPAGOS (BRASILDAT E LIS)

B.1 – Densidade de relâmpagos para a BrasilDAT.

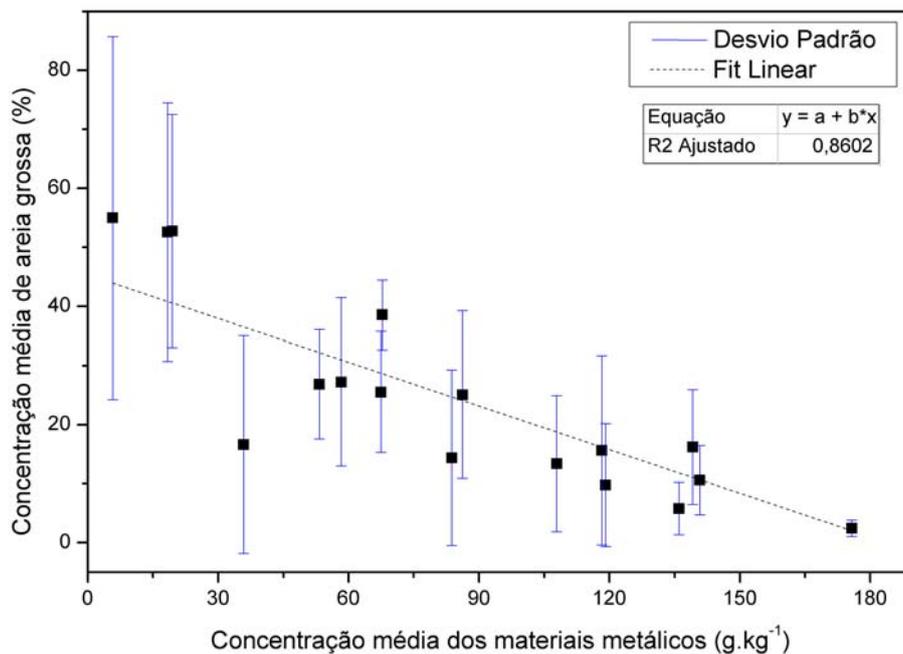


B.2 – Densidade de relâmpagos para os dados LIS.

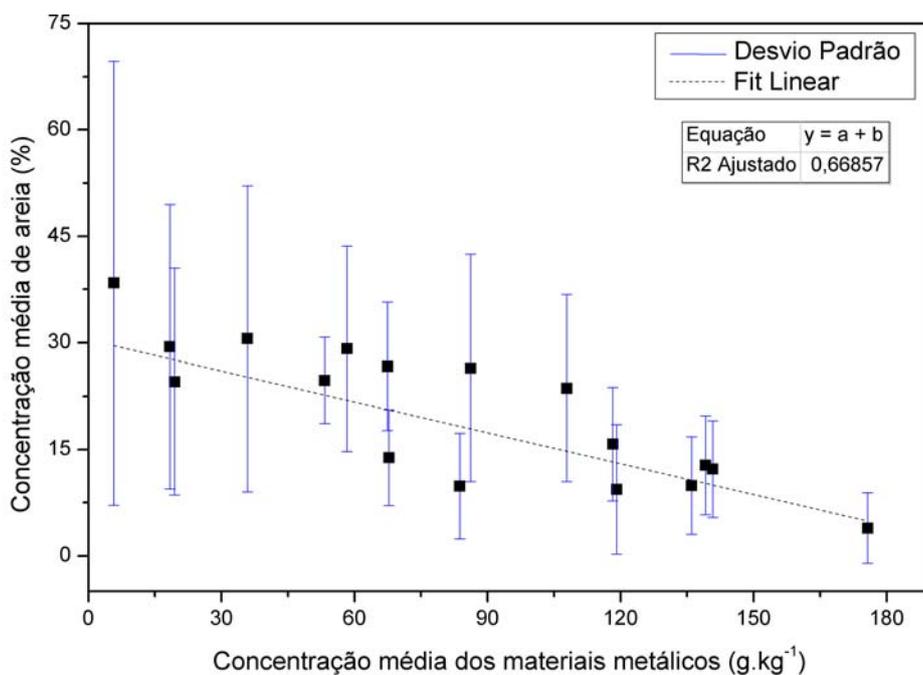


APÊNDICE C – GRÁFICOS DAS RELAÇÕES ENTRE GRANULOMETRIA E CONCENTRAÇÃO DE CONSTITUINTES METÁLICOS NO SOLO

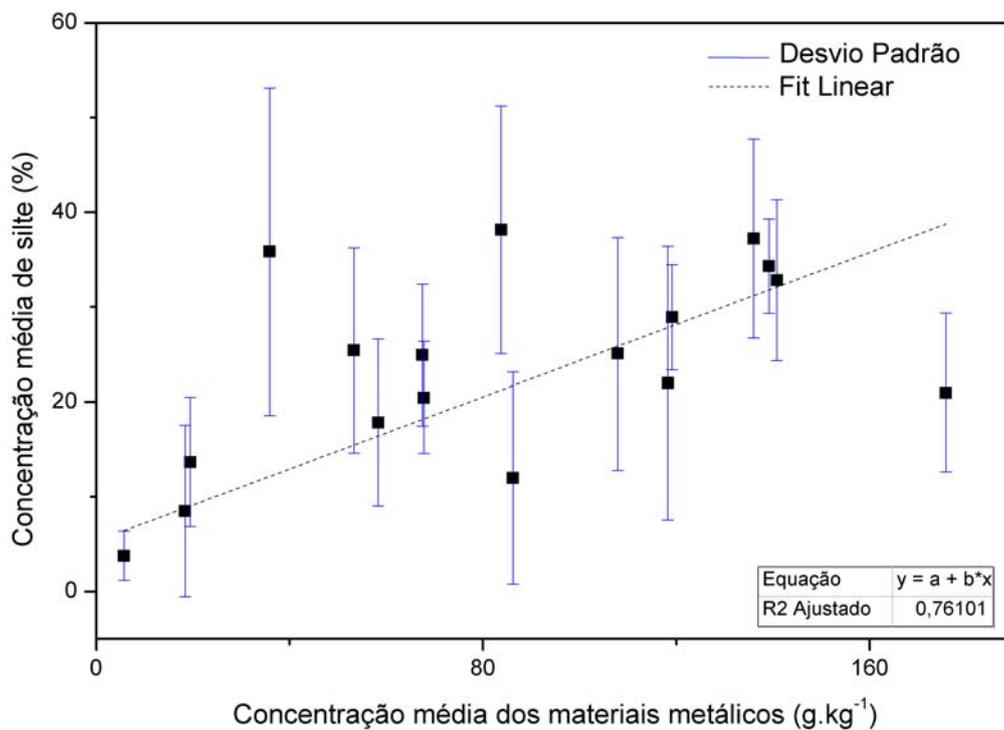
C.1 – Relação entre Areia Grossa e concentração de metais no solo.



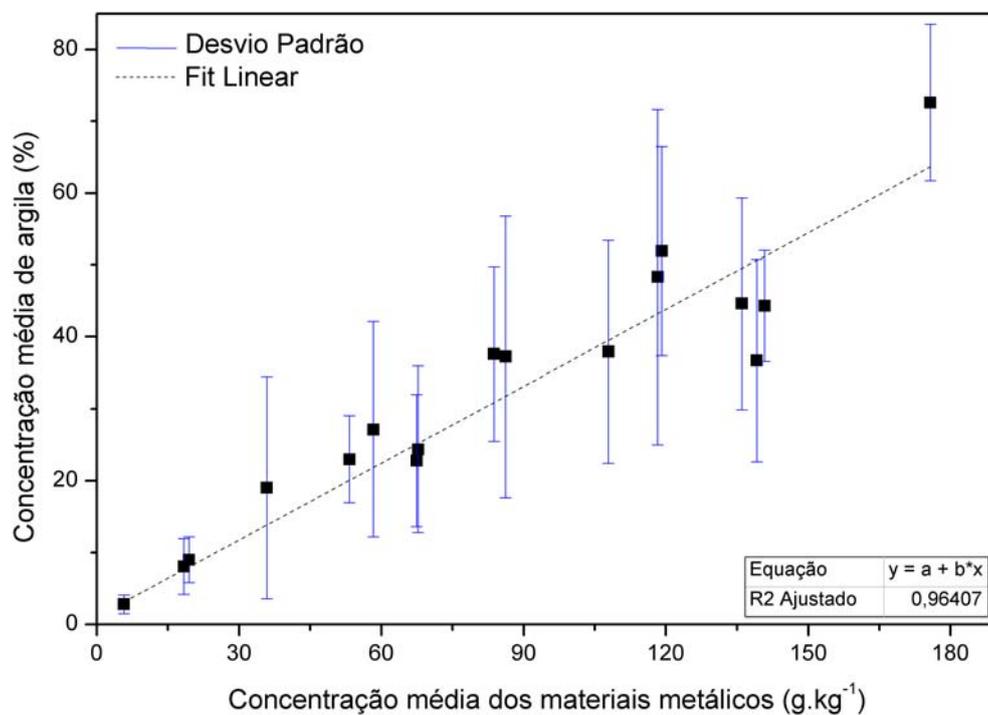
C.2 – Relação entre Areia e concentração de metais no solo



C.3 – Relação entre Silte e concentração de metais no solo



C.4 – Relação entre Areia e concentração de metais no solo



PUBLICAÇÕES TÉCNICO-CIENTÍFICAS EDITADAS PELO INPE

Teses e Dissertações (TDI)

Teses e Dissertações apresentadas nos Cursos de Pós-Graduação do INPE.

Manuais Técnicos (MAN)

São publicações de caráter técnico que incluem normas, procedimentos, instruções e orientações.

Notas Técnico-Científicas (NTC)

Incluem resultados preliminares de pesquisa, descrição de equipamentos, descrição e ou documentação de programa de computador, descrição de sistemas e experimentos, apresentação de testes, dados, atlas, e documentação de projetos de engenharia.

Relatórios de Pesquisa (RPQ)

Reportam resultados ou progressos de pesquisas tanto de natureza técnica quanto científica, cujo nível seja compatível com o de uma publicação em periódico nacional ou internacional.

Propostas e Relatórios de Projetos (PRP)

São propostas de projetos técnico-científicos e relatórios de acompanhamento de projetos, atividades e convênios.

Publicações Didáticas (PUD)

Incluem apostilas, notas de aula e manuais didáticos.

Publicações Seriadas

São os seriados técnico-científicos: boletins, periódicos, anuários e anais de eventos (simpósios e congressos). Constam destas publicações o Internacional Standard Serial Number (ISSN), que é um código único e definitivo para identificação de títulos de seriados.

Programas de Computador (PDC)

São a seqüência de instruções ou códigos, expressos em uma linguagem de programação compilada ou interpretada, a ser executada por um computador para alcançar um determinado objetivo. São aceitos tanto programas fonte quanto executáveis.

Pré-publicações (PRE)

Todos os artigos publicados em periódicos, anais e como capítulos de livros.