

Evandro Moimaz Anselmo

Morfologia das tempestades elétricas na América do Sul

São Paulo - SP

2014

Evandro Moimaz Anselmo

Morfologia das tempestades elétricas na América do Sul

Tese ao departamento de Ciências Atmosféricas, realizada como pré-requisito para obtenção do título de Doutor em Ciências.

Orientador:
Prof. Dr. Carlos Augusto Morales Rodriguez

INSTITUTO DE ASTRONOMIA, GEOFÍSICA E CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS DA
UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

São Paulo - SP

2014

AGRADECIMENTOS

RESUMO

Resumo

Palavras-chave: relâmpagos, tempestades, monitoramento.

ABSTRACT

Abstract

Key-words: lightning, storms, tracking.

LISTA DE FIGURAS

1	Principais características das observações do PR (NASDA, 2001)	14
2	Ilustração do algoritmo de identificação de <i>events</i> , <i>groups</i> e os <i>flashes</i> do LIS (CHRISTIAN et al., 2000).	15
3	Número de passagens do VIRS ($0.25^\circ \times 0.25^\circ$).	19
4	Tempo de amostragem (<i>View time</i>) do LIS ($0.25^\circ \times 0.25^\circ$).	20
5	Acumulado de raios (<i>flashes</i>) observados pelo LIS ($0.25^\circ \times 0.25^\circ$).	21
6	Acumulado das 157,592 tempestade elétrica ($0.25^\circ \times 0.25^\circ$).	22

LISTA DE TABELAS

3	Variáveis dos produtos do TRMM que foram utilizadas na identificação e descrição das tempestades elétricas.	17
---	---	----

SUMÁRIO

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS	9
LISTA DE SÍMBOLOS	11
1 METODOLOGIA	13
1.1 O SATÉLITE TRMM	13
1.1.1 Radar de Precipitação	14
1.1.2 Imageador de relâmpagos	14
1.1.3 Radiômetro no visível e infravermelho	16
1.2 REANÁLISES (R2) DO NCEP-DOE	16
1.3 DADOS	16
1.4 AS TEMPESTADES ELÉTRICAS	17
1.5 A TAXA DE RAIOS	18
1.6 DENSIDADE GEOGRÁFICA DE RAIOS E SISTEMAS	18
1.7 MORFOLOGIA DA ESTRUTURA TRIDIMENSIONAL DA PRECIPITAÇÃO	23
1.7.1 Distribuições de probabilidades com a altitude	23
1.7.2 Distribuições de probabilidades com a temperatura	24
REFERÊNCIAS	25

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

CCFAD	Diagramas de Contorno de Frequência Cumulativa por Altitude
CCFTD	Diagramas de Contorno de Frequência Cumulativa por Temperatura
CFAD	Diagrama de Contorno de Frequência por Altitude
CFTD	Diagrama de Contorno de Frequência por Temperatura
DJF	Dezembro, janeiro e fevereiro
JAXA	<i>Japan Aerospace Exploration Agency</i>
JBN	Jato de Baixos Níveis
JJA	Junho, julho e agosto
LIS	<i>Lightning Imaging Sensor</i>
MAM	Março, abril e maio
MCS	Sistemas Convectivos de Meso-escala
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
NCEP	<i>National Centers for Environmental Prediction</i>
NCEP–DOE	<i>National Centers for Environmental Prediction – Department of Energy</i>
NCEP–NCAR	<i>National Centers for Environmental Prediction – National Center for Atmospheric Research</i>
PR	<i>Precipitation Radar</i>

R1	Reanálises do NCEP-NCAR
R2	Reanálises 2 do NCEP-DOE
SACZ	Zona de Convergência do Atlântico Sul
SAMS	Sistema de Monção da América do Sul
SIRT	<i>Sferics Infrared Rainfall Technique</i>
SON	Setembro, outubro e novembro
TRMM	<i>Tropical Rainfall Measuring Mission</i>
VIRS	<i>Visible and InfraRed Scanner</i>
ZCIT	Zona de Convergência Intertropical

LISTA DE SÍMBOLOS

A_t	Área da tempestade elétrica
FT	Taxa de raios por tempo [<i>raios minuto</i> ⁻¹]
FTA	Taxa de raios por tempo por área [<i>raios dia</i> ⁻¹ <i>km</i> ⁻²]
N_{fl}	Número de flashes
VT_m	Tempo médio de visada do LIS
Z_m	Refletividade do radar medida
\mathbf{VT}_{lis}	Matriz do tempo total da visada do sensor LIS sobre a superfície
°C	Grau Celcius
$f(x) = y$	Função de uma variável
$f_{cdf}(x, y)$	Função densidade de probabilidade cumula- tiva com duas variáveis
$f_{pdf}(x, y)$	Função densidade de probabilidade com duas variáveis
%	Nos diagramas, CFAD, CCFAD, CFTD e CCFTD, representam: a porcentagem de per- fis convectivos, estratiformes e outros, respec- tivamente
H	Nos diagramas, CFAD, CCFAD, CFTD e CCFTD, representam: o nível de altitude, em quilômetros, aonde ocorreu o máximo de ocorrências de Z_c
L	Nos diagramas, CFAD, CCFAD, CFTD e CCFTD, representam: o número de ocorrência de Z_c no nível de altitude de máxima ocorrência

P Nos diagramas, CFAD, CCFAD, CFTD e
CCFTD, representam: número de perfis do
PR computados

1 METODOLOGIA

A Metodologia consiste fundamentalmente na construção de um subconjunto de dados das observações dos sensores VIRS, LIS e PR a bordo do satélite TRMM, durante o período entre 1998 e 2011.

Além dos dados satelitais, as reanálises II do NCEP em níveis de pressão foram utilizadas para identificar os valores de temperatura nos níveis de altitude do PR.

As informações dos diferentes sensores foram combinadas de maneira a identificar sistemas denominados como tempestades elétricas, definidas como nuvens as quais possuem pelo menos um *flash* detectado pelo LIS.

1.1 O SATÉLITE TRMM

O satélite *Tropical Rainfall Measuring Mission* – TRMM faz parte de uma missão conjunta entre a *National Aeronautics and Space Administration* – NASA e a *Japan Aerospace Exploration Agency* – JAXA, com o objetivo de determinar a distribuição geográfica e a variabilidade da chuva e do fluxo de calor latente de condensação para a região tropical e subtropical terrestre, informações fundamentais, por exemplo, nas inicializações de modelos globais e climáticos, principalmente quando se trata de previsão do tempo e clima nos trópicos (KUMMEROW et al., 1998; SIMPSON et al., 1988).

Os instrumentos a bordo do TRMM são: radar de precipitação (PR), radiômetro de microondas (TMI), radiômetro no visível e no infravermelho (VIRS), sistema de energia radiante da terra e das nuvens (CERES) e sensor para imageamento de relâmpagos (LIS) (KUMMEROW et al., 1998).

Esse satélite possui uma órbita de aproximadamente 320 km de altura e inclinação de 30°-35° para que possa visitar uma mesma região duas vezes ao dia, em horários distintos, sobre a região tropical do planeta Terra (SIMPSON et al., 1988).

O satélite foi lançado em 28 novembro de 1997 e continua em operação.

1.1.1 Radar de Precipitação

O *Precipitation Radar* – PR é o principal instrumento do TRMM. Se trata do primeiro radar meteorológico lançado no espaço sendo a maior inovação apresentada pela missão TRMM.

Os maiores objetivos do PR são: prover a estrutura tridimensional da precipitação; e quantificar as taxas de precipitação sobre os continentes e oceanos, ambos objetivos focados na região tropical.

A antena do PR possui uma largura de feixe de $0.71^\circ \times 0.71^\circ$, abertura de $2.0 \text{ m} \times 2.0 \text{ m}$ e faz uma varredura de $\pm 17^\circ$ com 49 feixes, proporcionando a observação de uma faixa na superfície de $\approx 215 \text{ km}$. A resolução horizontal no nadir é de $4.3 \pm 0.12 \text{ km}$, e de até 5 km nos ângulos próximos dos $\pm 17^\circ$. Verticalmente, o PR observa uma faixa de 20 km a partir da superfície, com resolução de 250 m . Portanto, a precipitação observada corresponde a uma matriz bidimensional de 49×80 posições: 49 feixes na varredura horizontal, com 80 níveis verticais de 250 m de altitude. Estas principais características operacionais do PR são representadas na figura 1 (KUMMEROW et al., 1998).

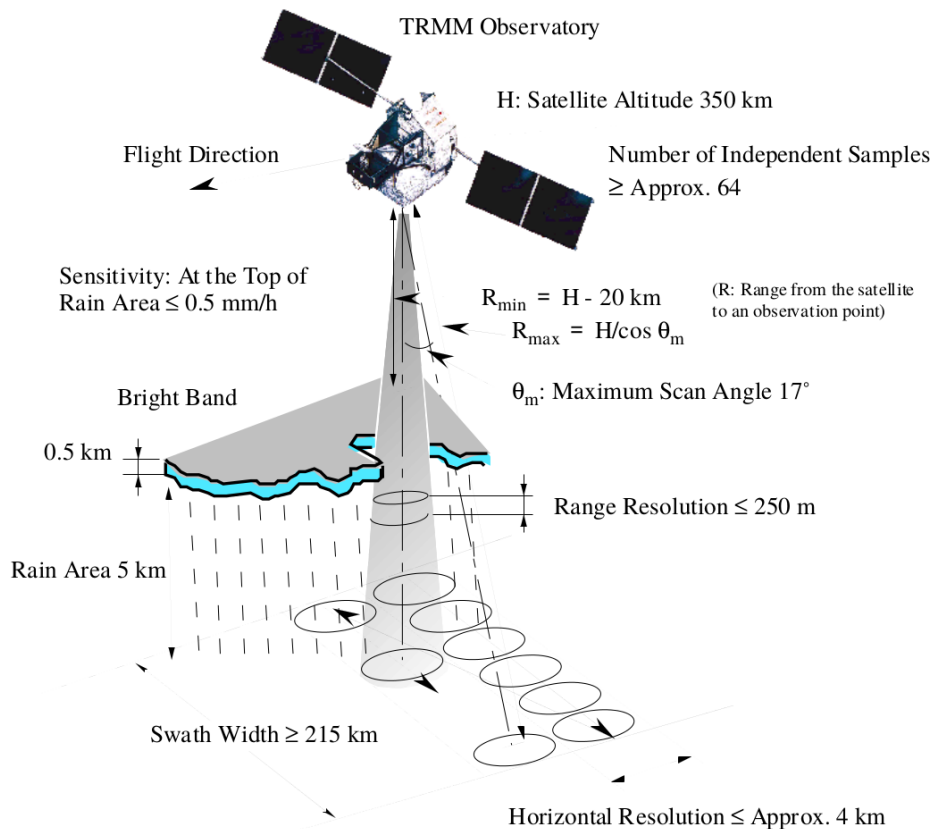


Figura 1: Principais características das observações do PR (NASDA, 2001)

Para esta pesquisa serão utilizados os dados do produto 2A25, o qual corrige a ate-

nução da refletividade do radar medida (Z_m) e a partir do fator de refletividade corrigido por atenuação Z_c , estima a estrutura tridimensional da precipitação no instante da observação, bem como a taxa de precipitação em cada célula da resolução (46×80) do PR (JAXA/NASA, 2011).

Além da estrutura tridimensional da precipitação do produto 2A25, nesta tese, utiliza-se das classificações do tipo de chuva do produto 2A23: convectivo, estratiforme, outros, etc (NASA, 2009; JAXA/NASA, 2011).

1.1.2 Imageador de relâmpagos

O *Lightning Imaging Sensor* – LIS é um sensor óptico capaz de detectar e localizar raios individualmente, a partir da emissão óptica resultante da dissociação, excitação e recombinação dos constituintes atmosféricos durante uma descarga atmosférica.

O sistema de imagens do LIS é constituído por um telescópio f/1.6 que expande o feixe luminoso observado, que passa por um filtro de interferência no comprimento de onda de 777.4 nm e largura de banda de 1 nm e atinge uma matriz de 128×128 CCDs¹. O LIS também possui uma lente angular que proporciona um campo de visão panorâmico sobre as tempestades elétricas sobrevoadas de $80^\circ \times 80^\circ$, que corresponde a uma área de $580 \text{ km} \times 580 \text{ km}$ no nadir. Um pixel do campo de visão do LIS, possui resolução entre 5-10km. O sistema de amostragem de dados do LIS garante o registro de 500 imagens por segundo. (CHRISTIAN et al., 2000; BOCCIPPIO et al., 1996; NASDA, 2001).

Conforme é descrito por Christian et al. (2000), a identificação dos raios/*flashes* depende do brilho difuso e transiente observado no topo das tempestades elétricas. Dependendo da posição em que as CCDs são sensibilizadas e do intervalo de tempo entre os brilhos subsequentes, o algoritmo de processamento de imagens do LIS identifica os *events*, *groups* e os *flashes*. Os *flashes* são associados aos raios, sejam nuvem-solo ou intra-nuvem. Os *events* e *groups* estão associados os processos quem envolvem a formação das descargas de retorno, por exemplo, os processos de recuo e conexão dos líderes percursores das correntes elétricas dos raios.

A figura 2, ilustra como é feita a identificação dos *events*, *groups* até a caracterização de um *flash*. Observe, que após 700 milissegundos, como mostra a sequência de figuras 2a-2e, temos 4 *flashes* (A, B, C e D), 8 *groups* (a, b, c, d, e, f, g e h) e 14 *events* (CHRISTIAN et al., 2000).

¹Um dos dispositivos eletrônicos utilizados para registro de imagens com base no efeito fotoelétrico.

O LIS possui a capacidade de identificar descargas nuvem-solo e intranuvens, tanto no período diurno quanto noturno. Com sua velocidade orbital de 11 km/s, o sensor LIS possui um campo de visão que permite a observação de um ponto na Terra por 80-90 segundos, tempo suficiente para a estimativa da taxa de raios de uma tempestade no momento da observação (CHRISTIAN et al., 1992; NASDA, 2001).

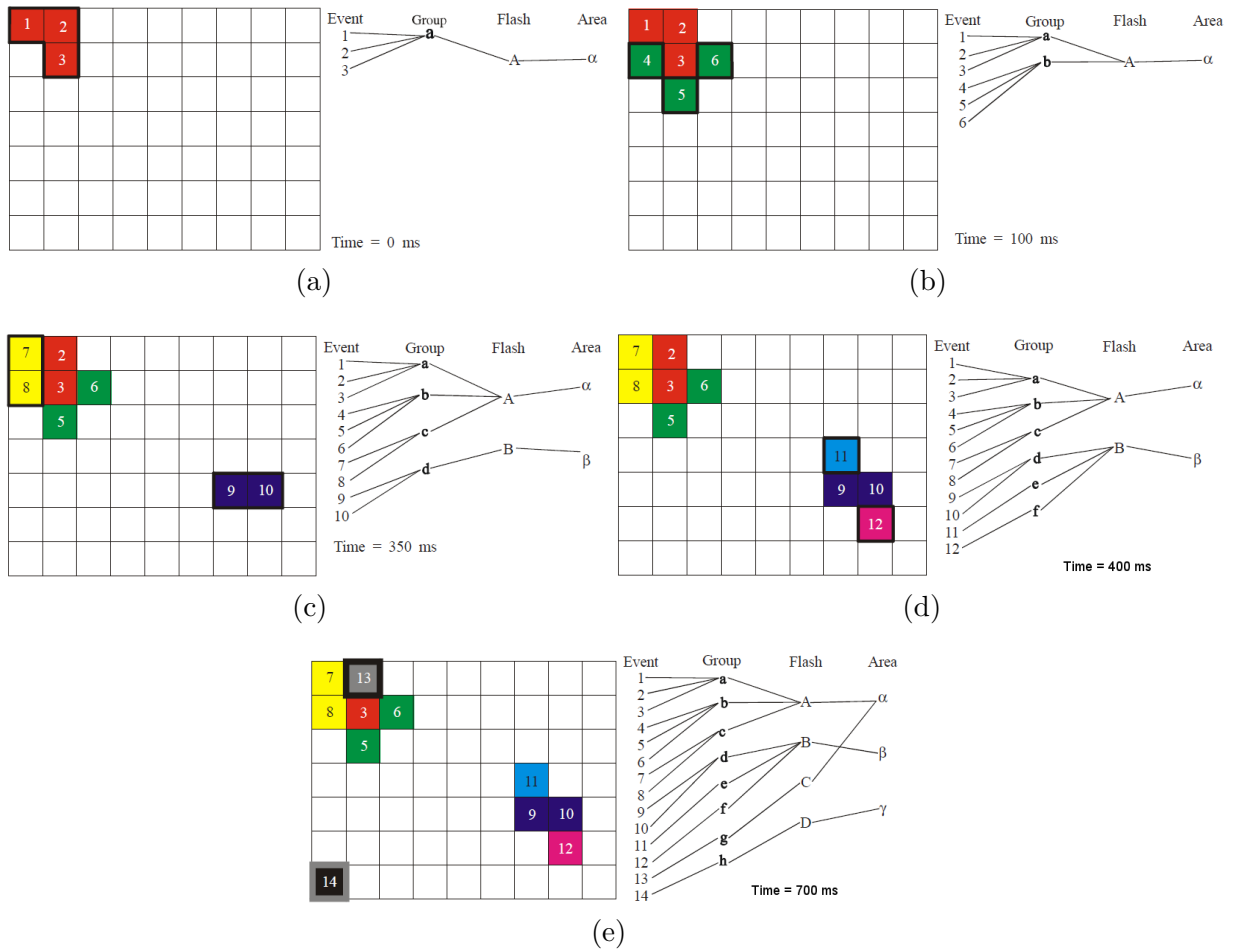


Figura 2: Ilustração do algoritmo de identificação de *events*, *groups* e os *flashes* do LIS (CHRISTIAN et al., 2000).

1.1.3 Radiômetro no visível e infravermelho

O *Visible and InfraRed Scanner* – VIRS é um radiômetro de varredura biaxial, um eixo com $\pm 45^\circ$ e outro 360° , que mede a radiância em 5 bandas espectrais: com comprimentos de onda de $0.63 \mu\text{m}$ e $1.61 \mu\text{m}$, que correspondem a faixa do visível; $3.75 \mu\text{m}$, $10.8 \mu\text{m}$ e $12 \mu\text{m}$, na faixa do infravermelho para o monitoramento do vapor d'água e temperaturas de topo de nuvens.

Com uma inclinação $\pm 45^\circ$ na horizontal, observa uma faixa de 720 km, com resolução

de 2,11 km no nadir (KUMMEROW et al., 1998; NASDA, 2001).

1.2 REANÁLISES (R2) DO NCEP-DOE

Em continuidade ao projeto das reanálises do NCEP-NCAR (R1), o projeto reanálises 2 (R2) – *NCEP-DOE Atmospheric Model Intercomparison Project (AMIP-II) reanalysis* – faz o uso de dados de satélite e de modelos mais atuais do que no projeto R1, buscando corrigir erros humanos e erros conhecidos de versões anteriores de modelos atmosféricos utilizados no processo de integração e assimilação de dados de envolvem o projeto R1 (KANAMITSU et al., 2002).

1.3 DADOS

Os dados referentes as observações do TRMM foram obtidos foram transferidos a partir do servidor de FTP da NASA (<ftp://disc2.nascom.nasa.gov>) e do NCEP (<ftp://ftp.cdc.noaa.gov>).

Foram utilizadas nesta pesquisa os dados de temperatura em altura geopotencial em 17 níveis de pressão das reanálises 2 do NCEP-DOE e os arquivos orbitais do TRMM, produtos 1B01, 2A25 e 1B11, ambos na versão 7, durante o período entre 1998 e 2011.

Os dados do LIS de *flash*, *group*, *events* e *view time* foram concedidos pela pesquisadora Albrecht (2010), que processou estes dados na NASA anteriormente a esta pesquisa.

No total, os dados brutos desta pesquisa, representaram um volume de aproximadamente 30 terabytes.

Para este trabalho de pesquisa os dados do TRMM e das R2 foram amostrados sobre a região limitada entre 10N-40S e 91W-30W, que abrange toda a extensão da América do Sul.

Diante as variáveis que integram os 3 produtos do TRMM utilizados nesta pesquisa, foram selecionadas apenas algumas variáveis conforme descreve a tabela 3.

1.4 AS TEMPESTADES ELÉTRICAS

Após uma análise ponto a ponto, buscando associar cada raio com um perfil de refletividade do PR, partimos para uma análise de grupo, buscando identificar quais as tempestades elétricas que representam maior intensidade convectiva.

Tabela 3: Variáveis dos produtos do TRMM que foram utilizadas na identificação e descrição das tempestades elétricas.

Variável	Sensor TRMM	Produto
<i>Latitude</i>	VIRS	1B01
<i>Longitude</i>	VIRS	1B01
<i>Channels (4) 10.8 μm</i>	VIRS	1B01
<i>Latitude</i>	PR	2A25
<i>Longitude</i>	PR	2A25
<i>Corrected Z-factor</i>	PR	2A25
<i>Rain Type</i>	PR	2A23
<i>Lat. Lon. Flashes</i>	LIS	(ALBRECHT, 2010)
<i>Lat. Lon. Events</i>	LIS	(ALBRECHT, 2010)
<i>Lat. Lon. Groups</i>	LIS	(ALBRECHT, 2010)
<i>View Time 0.5° \times 0.5°</i>	LIS	(ALBRECHT, 2010)

Para criar um banco de dados de nuvens de tempestades elétricas, A equação de Planck foi aplicada nos dados de radiância espectral do produto 1B01, canal 4 do VIRS (10,8 μm). As regiões com temperaturas de brilho mais frias do que 258 K e com pelo menos um raio do LIS observado, definiram as nuvens de tempestades elétricas.

A partir da definição do cluster de nuvem, o algoritmo extrai as variáveis listadas na tabela 3 referentes as observações do PR e LIS na mesma área do *cluster* de nuvem de tempestade elétrica.

Como os sensores do TRMM possuem diferentes resoluções, técnicas numéricas de mudança de base foram utilizadas para projetar as observações orbitais do VIRS, PR e LIS em uma grade regular com $0.05^\circ \times 0.05^\circ$ de resolução, de maneira à verificar as regiões com medidas coincidentes entre o PR, LIS e VIRS.

Desta forma, cada tempestade elétrica foi armazenada na forma de um arquivo HDF contendo medidas coincidentes do VIRS, LIS e PR.

Inicialmente foram identificadas 154,189 tempestades elétricas, pelo instrumento numérico rastreador de sistemas, porém 331 tempestades elétricas, não corresponderam a um único sistema convectivo ou multicelular.

Portanto, foi feita uma redivisão nos sistemas enormes considerando a temperatura de brilho de 221 K. Regiões com temperatura de brilho em infravermelho inferiores a 221 K são consideradas como a parte mais ativa dos sistemas convectivos de meso-escala identificados em Maddox (1980).

Com a recategorização dos sistemas enormes, portanto o número total de tempestades elétricas identificadas nesta pesquisa é de 157,592.

1.5 A TAXA DE RAIOS

A taxa de raios por minutos ou por hora por sistema, ou apenas a taxa de raios no tempo quando não se pode aferir a extensão do sistema, pode ser utilizada para descrever a severidade de uma tempestade.

Para descrever a morfologia das tempestades bem como identificar quais tempestades são mais eficientes ou severas, defini-se dois índices:

- FT – A taxa de raios no tempo, sendo a razão entre o número de raios (N_{fl}) e o tempo médio (VT_m) em que o sensor LIS observou a tempestade elétrica, da mesma forma como foi calcula para as *precipitation features* (CECIL et al., 2005; NESBITT et al., 2000).
- FTA – A taxa de raios por tempo pela área da tempestade elétrica (A_t).

Para cada tempestade elétrica foram calculados os dois índices que podem estar associados com a severidade, o FT e FTA, conforme as equações 1 e 2.

$$FT = \frac{N_{fl}}{VT_m} 60 \text{ [raios minuto}^{-1}\text{]} \quad (1)$$

$$FTA = \frac{N_{fl}}{VT_m A_t} 60 \text{ [raios minuto}^{-1} \text{ km}^{-2}\text{]} \quad (2)$$

1.6 DENSIDADE GEOGRÁFICA DE RAIOS E SISTEMAS

Neste trabalho, buscamos identificar regiões mais eficientes nos processos de eletrificação, as quais tem pouca densidade de sistemas porém com alta densidade de raios em comparação com as demais regiões da América do Sul.

O que se torna fundamental na construção destes mapas é considerar quantas vezes, ou qual o tempo em que o satélite ficou observando cada parte da região de estudo, pois uma determinada região pode ter muito mais amostragens do outras. Portanto, qualquer análise de densidade espacial com dados do TRMM que não considere o número de passagens ou tempo em que o sensor observou a região projetada na superfície, será tendenciosa.

Mesmo que o satélite TRMM visite o mesmo lugar do globo duas vezes por dia em função de sua órbita inclinada 35° e velocidade, entre o período de 1998–2011 o satélite passou 10,000 vezes mais sobre a região extra-topical do que na região tropical, como mostra a figura 3, que ilustra o número de órbitas cobertas pelo sensor VIRS em uma grade regular de $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ na América do Sul.

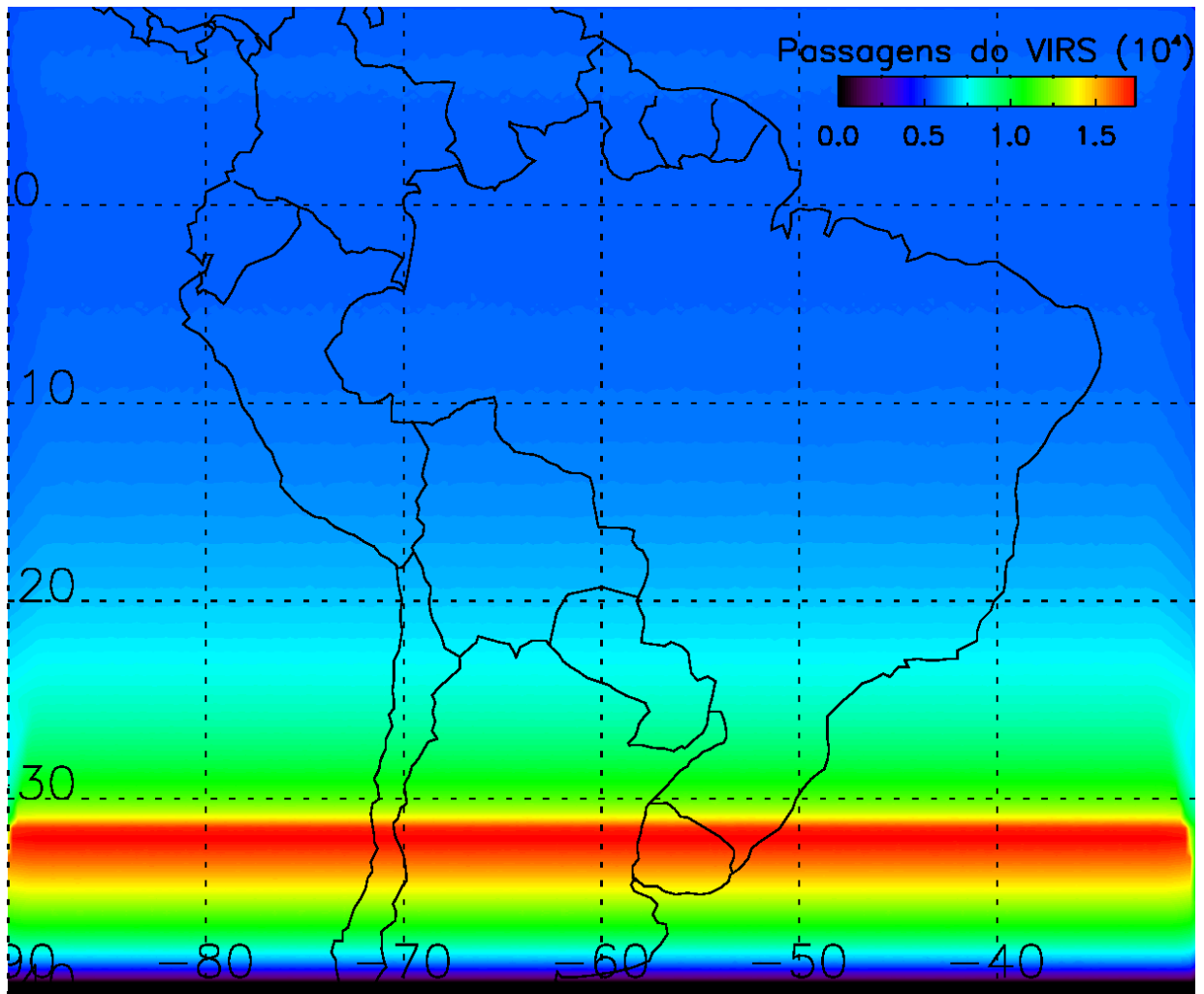


Figura 3: Número de passagens do VIRS ($0.25^\circ \times 0.25^\circ$).

Levando em consideração tempo de amostragem do LIS na superfície terrestre (*view time*), o número de dias de amostragem na região de estudo pode ser observado na figura 4. Observa-se que em 14 anos o LIS observou 10 dias a mais na latitude 34° S do que em 0° .

As figuras 4 e 3 representam duas matrizes que correspondem aos pontos de uma grade igualmente espaçada (grade regular), com 0.25° de resolução, projetada sobre a América do Sul. A matriz (\mathbf{VT}_{lis}), figura 4, do tempo total de amostragem do sensor LIS sobre a superfície e a matriz (\mathbf{VT}_{virs}), figura 3 do número de vezes que o satélite passou conforme

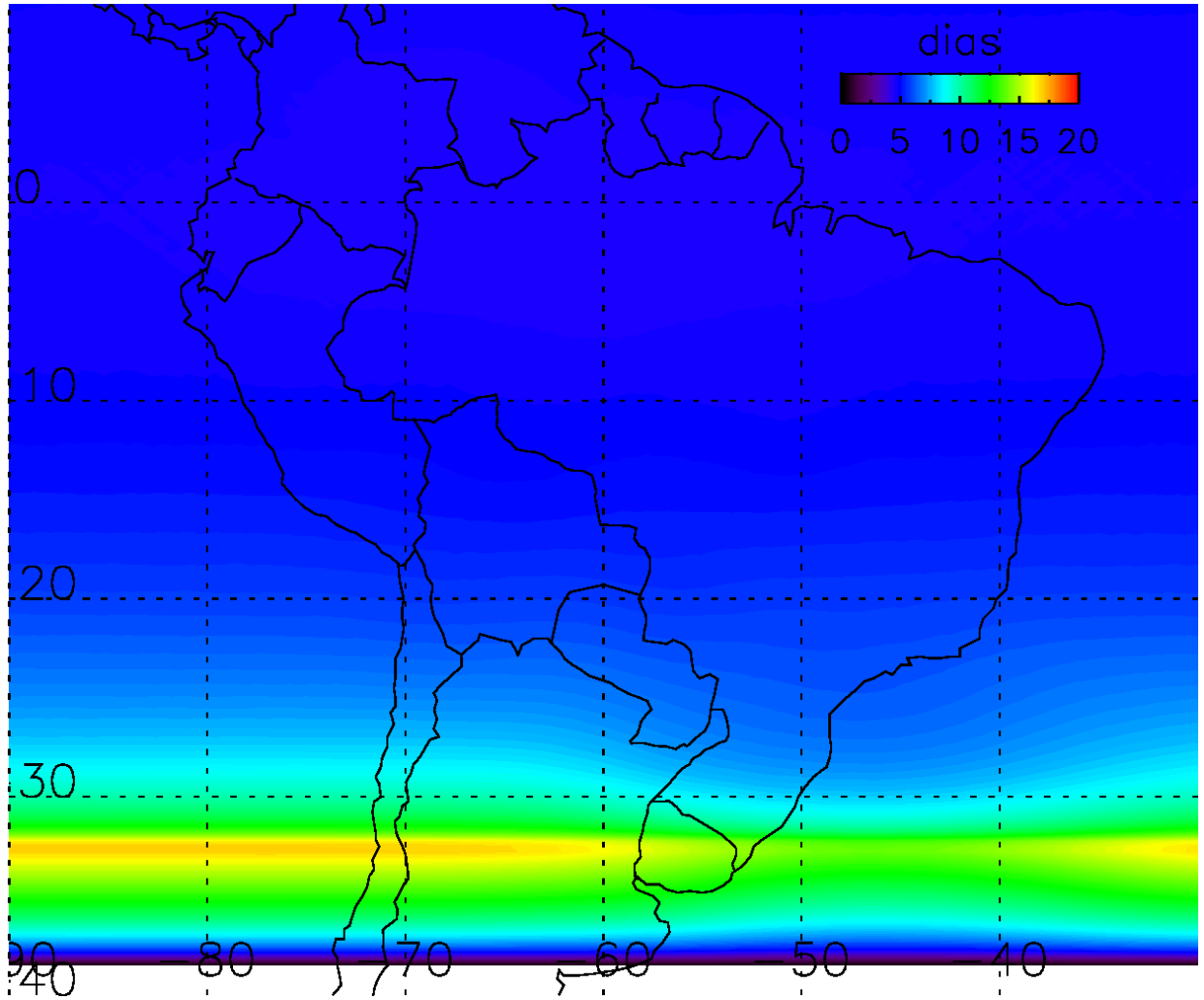


Figura 4: Tempo de amostragem (*View time*) do LIS ($0.25^\circ \times 0.25^\circ$).

o tamanho da varredura do radiômetro VIRS na superfície, as quais são utilizadas para normalizar as medidas de raios e de tempestades elétricas definidas pelo VIRS.

Neste sentido podemos calcular a densidade de raios (\mathbf{DE}_{fl}) e a densidade de tempestades elétricas (\mathbf{DE}_{te}) em função do tempo de amostragem.

Para tanto, é necessário calcular o número total de raios observados (\mathbf{FL}_{lis}) e o número total de tempestades elétricas (\mathbf{P}_{te}) em cada ponto da grade de $0.25^\circ \times 0.25^\circ$. Logo é possível identificar as regiões com a maior número de amostragem de raios, na figura 5, e de amostragem de tempestades elétricas, na figura 6.

Na figura 6 é notável o alto número de sistemas na região Sul da AS, com mesma ordem de magnitude do que em locais ao Norte aonde atua a Zona de Convergência Intertropical. Mas esse máximo no Sul da AS não indica maior ocorrência de tempestades elétricas e sim maior frequência de passagem do satélite TRMM.

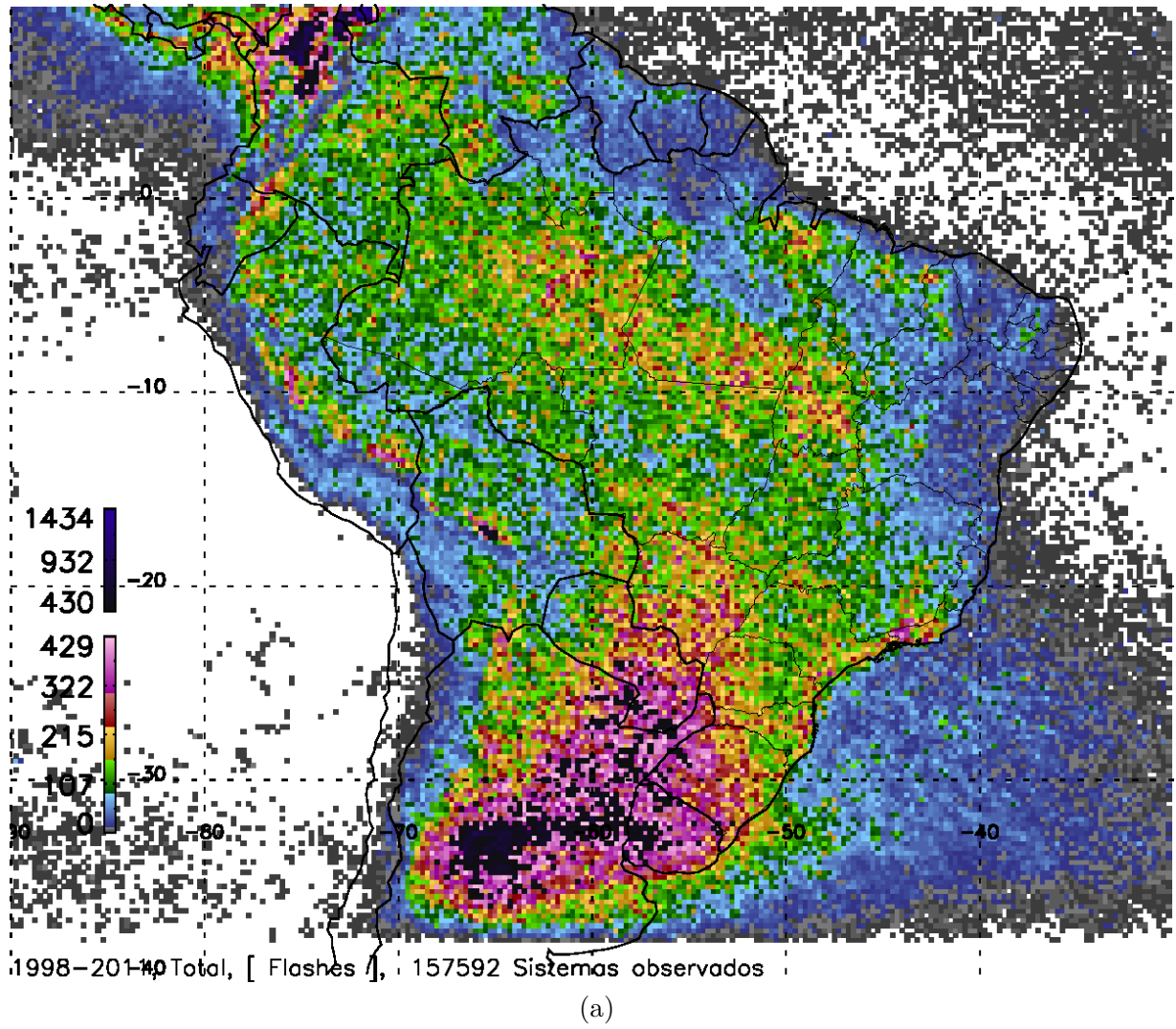


Figura 5: Acumulado de raios (*flashes*) observados pelo LIS ($0.25^\circ \times 0.25^\circ$).

Mesmo que as matrizes representem pontos em uma grade com espaçamento angular regular, as áreas de cada ponto de grade não são iguais, pois o comprimento de arco de 0.25° na direção zonal depende da latitude da região. Assim a matriz que corresponde a área da grade regular (\mathbf{A}_g) foi calculada e considerada nos cálculos de densidades.

A densidade de raios (\mathbf{DE}_{fl}) foi calculada conforme a equação 3, que apresenta a razão entre \mathbf{FL}_{lis} e o \mathbf{VT}_{lis} e \mathbf{A}_g , multiplicada por 24 horas \times 60 minutos \times 60 segundos \times 365.25 dias, o que converte o tempo de observação do LIS de segundos para anos. Então as densidades de raios, possuem dimensões de número de [raios] por [tempo] por [quilômetro quadrado] (raios ano $^{-1}$ km $^{-2}$).

$$\mathbf{DE}_{fl} = \frac{\mathbf{FL}_{lis}}{\mathbf{VT}_{lis} \mathbf{A}_g} 31557600 \quad (3)$$

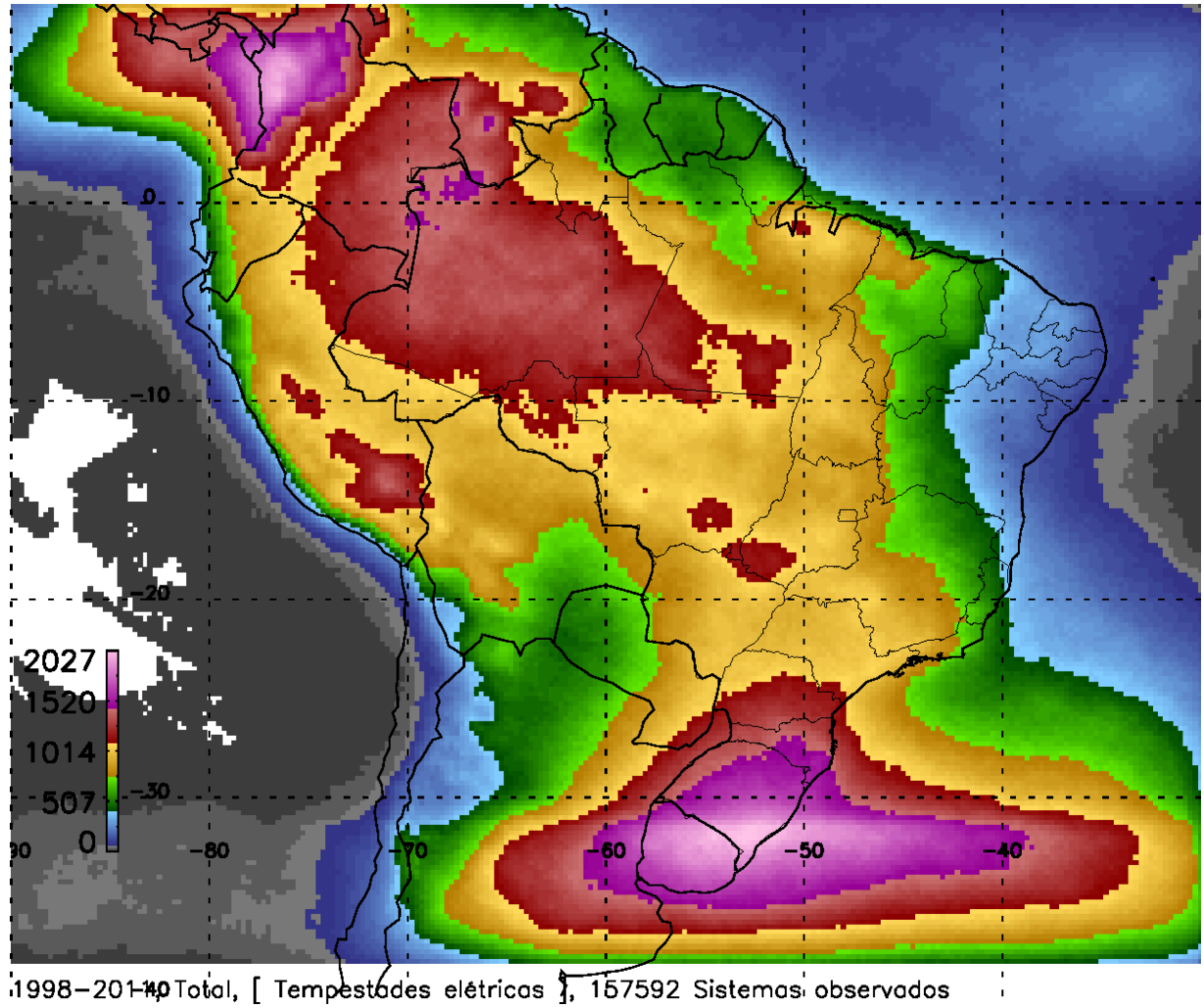


Figura 6: Acumulado das 157,592 tempestade elétrica ($0.25^\circ \times 0.25^\circ$).

No mesmo caminho as densidades de tempestades elétricas (\mathbf{DE}_{te}) foram obtidas conforme a equação 4. Mas, note que, conforme descrito em 1.1 o tempo de amostragem do LIS e do VIRS são bem distintos. Enquanto o LIS é um sistema de imageamento, o VIRS é um radiômetro que realiza varreduras durante a trajetória do satélite.

Portanto, a densidade de tempestades elétricas \mathbf{DE}_{te} , como descreve a equação 4 é normalizada pelo número de vezes que o VIRS sobrevoou cada ponto da grade de $0.25^\circ \times 0.25^\circ$, o que corresponde a dimensão física do número de [sistemas] por [observação] por [quilômetro quadrado] (sistemas observações $^{-1}$ km $^{-2}$). Essa grandeza revela, por exemplo, que a cada 10,000 observações do VIRS, temos entre 1-4 tempestades elétricas observadas na América do Sul.

$$\mathbf{DE}_{te} = \frac{\mathbf{P}_{te}}{\mathbf{VT}_{virs} \mathbf{A}_g} \quad (4)$$

1.7 MORFOLOGIA DA ESTRUTURA TRIDIMENSIONAL DA PRECIPITAÇÃO

O estudo para descrever a morfologia da precipitação foi realizado com base nas observações do PR, buscando avaliar como a precipitação está distribuída nos níveis de altitude e como os perfis de Z_c estão associados com os processos de crescimento de hidrometeoros e de eletrificação.

1.7.1 Distribuições de probabilidades com a altitude

A partir dos perfis de Z_c selecionados pelo algoritmo de identificação de tempestades elétricas, foi estudada a probabilidade de ocorrência de Z_c por altitude. Desta forma, foram obtidos Diagramas de Contorno de Frequência por Altitude, os CFADs (YUTER; Houze Jr., 1995).

Conforme descrevem Yuter e Houze Jr. (1995), primeiramente obteve-se uma função de densidade de probabilidade com duas variáveis ($f_{pdf}(x, y)$), cuja a dimensão x correspondeu à valores de Z_c e y os nível de altitude do PR. A função $f_{pdf}(x, y)$, foi representada numericamente por uma matriz bidimensional com a granularidade de 1 dBZ para cada 250 m de altitude (YUTER; Houze Jr., 1995).

Para a obtenção dos diagramas de probabilidade normalizados por nível de altitude, cada nível y da função $f_{pdf}(x, y)$ foi normalizado pelo número total de ocorrências de valores de Z_c distribuídos em x . Os níveis y de altitude com número total de ocorrência de Z_c em x , menor do que 10% do nível de máxima ocorrência, foram desconsiderados dos contornos de probabilidade em todos os CFADs.

Com base na ($f_{pdf}(x, y)$) que definiu cada CFAD, foi calculada a função densidade de probabilidade cumulativa ($f_{cdf}(x, y)$) de Z_c por altitude, que originaram os Diagramas de Contorno de Frequência Cumulativa por Altitude (CCFAD).

Os CCFADs auxiliam a investigar quais as diferenças entre os perfis de Z_c associados à diferentes quantis da amostra de probabilidade, elucidando ainda mais as informações contidas nos CFADs.

1.7.2 Distribuições de probabilidades com a temperatura

A distribuição de probabilidade da precipitação com a altitude associa-se com o desenvolvimento vertical, porém o tipo de hidrometeoro de determinada altitude é função da temperatura e da razão de saturação naquela altura (TAKAHASHI, 1978; SAUNDERS

et al., 1999).

Objetivando uma análise dos processos de crescimento de hidrometeoros no perfil atmosférico, na mesma óptica de trabalhos como Takahashi (1978), Saunders et al. (1999), Takahashi e Miyawaki (2002), Ávila et al. (2009), ou seja, em função de diferentes condições de temperatura e valores de Z_c , nesta pesquisa, foi construído o Diagrama de Contorno de Frequência por Temperatura (CFTD), .

Nos CFTDs, os níveis de temperatura não correspondem as condições controladas em laboratório, e sim às variações de temperatura do perfil atmosférico.

Foram utilizados os dados de reanálises (R2) do NCEP-DOE entre 1998 e 2011, mais especificamente os dados em 17 níveis de pressão, de altura geopotencial e temperatura (KANAMITSU et al., 2002).

Os perfis de altura geopotencial e temperatura mais próximos ou coincidentes com cada região de tempestade elétrica observada pelo VIRS, foram extraídos. A partir dos 17 níveis verticais das R2, os 80 níveis de temperaturas associados aos 80 níveis de altitude das observações do PR foram obtidos por interpolação por método de mínimos quadrados.

Desta maneira, obteve-se a função $f_{pdf}(x, y)$, cuja a dimensão x correspondeu à valores de Z_c e y os nível de temperaturas estimados a partir das reanálises II do NCEP. A função $f_{pdf}(x, y)$ de Z_c por temperatura, foi representada por uma matriz bidimensional com a granularidade de 1 dBZ para cada 2 °C. Nos CFTDs, os níveis superiores e inferiores foram definidos para temperaturas entre 20° C e -50° C.

Também foi calculada a função $f_{cdf}(x, y)$ de Z_c por temperatura, que originaram os Diagramas de Contorno de Frequência Cumulativa por Temperatura (CCFTD).

REFERÊNCIAS

- ALBRECHT, R. I. **Comunicação Pessoal**. São Paulo: [s.n.], 2010.
- BOCCIPPIO, D. J.; KOSHAK, W. J.; GOODMAN, S. J.; MACH, D. M. Science data validation plan for the lightning imaging sensor (lis). 1996.
- CECIL, D.; GOODMAN, S.; BOCCIPPIO, D.; ZIPSER, E.; NESBITT, S. Three years of trmm precipitation features. part i: Radar, radiometric, and lightning characteristics. **Mon. Wea. Rev.**, v. 133, p. 543–566, 2005.
- CHRISTIAN, H.; BLAKESLEE, R.; GOODMAN, S.; MACH, D. Algorithm theoretical basis document (atbd) for the lightning imaging sensor (lis). **NASA TM**, 2000.
- CHRISTIAN, H. J.; RICHARD, J. B.; J., G. S. **Lightning Imaging Sensor (LIS) for the Earth Observing System**. Alabama, 1992. 193 p. NASA Technical Memorandum TM-4350.
- JAXA/NASA. **Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) – Precipitation Radar Algorithm – Instruction Manual For Version 7**. 2011. Disponível em: <http://www.eorc.jaxa.jp/TRMM/documents/PR_algorithm_product_information-/pr_manual/PR_Instruction_Manual_V7_L1.pdf>. Acesso em: 01 jan. 2012.
- KANAMITSU, M.; EBISUZAKI, W.; WOOLLEN, J.; YANG, S.; HNILO, J.; FIORINO, M.; POTTER, G. L. Ncep–doe amip-ii reanalysis (r-2). **Bull. Amer. Meteor. Soc.**, v. 83, p. 1631–1643, 2002. Doi:10.1175/BAMS-83-11-1631.
- KUMMEROW, C.; BARNES, W.; KOZU, T.; SHIUE, J.; SIMPSON, J. The tropical rainfall measuring mission (trmm) sensor package. **J. Atmos. Oceanic Technol.**, v. 15, p. 809–817, 1998.
- MADDOX, R. A. Mesoscale convective complexes. **Bulletin American Meteorological Society**, 1980.
- NASA. **TRMM Product Level 2A Precipitation Radar (PR) Rainfall Rate and Profile**. 2009. Disponível em: <http://disc.sci.gsfc.nasa.gov/precipitation-/documentation/TRMM_README/TRMM_2A25_readme.shtml>. Acesso em: 28 jan. 2010.
- NASDA. **TRMM Data Users Handbook**. National Space Development Agency of Japan: [s.n.], 2001.
- NESBITT, S. W.; ZIPSER, E. J.; CECIL, D. J. A Census of Precipitation Features in the Tropics Using TRMM: Radar, Ice Scattering, and Lightning Observations. **Journal of Climate**, v. 13, n. 23, p. 4087–4106, 2000. ISSN 08948755.

- SAUNDERS, C.; AVILA, E.; PECK, S.; CASTELLANO, N.; VARELA, G. A. A laboratory study of the effects of rime ice accretion and heating on charge transfer during ice crystal/graupel collisions. **Atmospheric Research**, v. 51, p. 99–117, mar. 1999.
- SIMPSON, J.; ADLER, R.; NORTH, G. A proposed tropical rainfall measuring mission (trmm) satellite. **J. Atmos. Oceanic Technol.**, v. 69, p. 278–295, 1988.
- TAKAHASHI, T. Rimming electrification as a charging generation mechanism in thunderstorms. **J. Atmos. Sci.**, v. 35, p. 1536–1548, 1978.
- TAKAHASHI, T.; MIYAWAKI, K. NOTES AND CORRESPONDENCE Reexamination of Riming Electrification in a Wind Tunnel. n. 1980, p. 1018–1025, 2002.
- YUTER, S. E.; Houze Jr., R. A. Three-dimensional kinematic and microphysical evolution of florida cumulonimbus. part ii: Frequency distribution of vertical velocity, reflectivity, and differential reflectivity. **J. Appl. Meteor.**, v. 123, p. 1941–1963, 1995.
- ÁVILA, E. E.; CASTELLANO, N. E.; SAUNDERS, C. P. R.; BÜRGESESSER, R. E.; VARELA, G. G. A. Initial stages of the riming process on ice crystals. **Geophysical Research Letters**, v. 36, n. 9, p. n/a–n/a, 2009. ISSN 1944-8007. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1029/2009GL037723>>.