

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	Observações do TRMM sobre a América do Sul.	16
2	Acumulados dos raios e áreas das 154,189 tempestades elétricas identificadas.	21

LISTA DE TABELAS

SUMÁRIO

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

LISTA DE SÍMBOLOS

1	METODOLOGIA	11
1.1	O SATÉLITE TRMM	11
1.1.1	Radar de Precipitação	11
1.1.2	Imageador de relâmpagos	12
1.1.3	Radiômetro no visível e infravermelho	12
1.1.4	Radiômetro de microondas	12
1.2	FONTE DE DADOS	13
1.3	RAIOS COM DIFERENTES TAXAS DE DESCARGAS DE RETORNO .	13
1.4	IDENTIFICAÇÃO DAS TEMPESTADES ELÉTRICAS	14
1.5	A TAXA DE RAIOS POR TEMPESTADE ELÉTRICA	15
1.6	DENSIDADES ESPACIAIS DE RAIOS E TEMPESTADES ELÉTRICAS	15
1.7	MORFOLOGIA DA PRECIPITAÇÃO DAS TEMPESTADES ELÉTRICAS	17
1.7.1	Estrutura tridimensional da precipitação na óptica dos processos microfísicos	18
	REFERÊNCIAS	22

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

CCFAD	Diagramas de Contorno de Frequência Cumulativa por Altitude
CFAD	Diagrama de Contorno de Frequência por Altitude
CFTD	Diagrama de Contorno de Frequência por Temperatura
JAXA	<i>Japan Aerospace Exploration Agency</i>
LIS	<i>Lightning Imaging Sensor</i>
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
NCEP	<i>National Centers for Environmental Prediction</i>
PR	<i>Precipitation Radar</i>
TMI	<i>TRMM Microwave Imager</i>
TRMM	<i>Tropical Rainfall Measuring Mission</i>
VIRS	<i>Visible and InfraRed Scanner</i>

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_c	Fator de refletividade corrigida por atenuação, produto TRMM 2A25
\mathbf{VT}_{lis}	Matriz do tempo total da visada do sensor LIS sobre a superfície
$f_{cdf}(x, y)$	Função densidade de probabilidade cumula- tiva com duas variáveis
$f_{pdf}(x, y)$	Função densidade de probabilidade com duas variáveis

1 METODOLOGIA

Consiste fundamentalmente na construção de um subconjunto de dados provindos das observações dos sensores a bordo do satélite TRMM, que estiveram em órbita planetária entre 1998 e 2011.

Foram investigadas 68,230 órbitas do TRMM, juntamente com os dados de temperatura e altura geopotencial em 17 níveis de pressão das reanálises II do NCEP.

As informações dos diferentes sensores foram combinadas de maneira a identificar sistemas denominados como Tempestades Elétricas.

Para melhor entender as implicações que envolvem a construção de uma base de dados de sistemas individualmente a partir das observações do TRMM, inicialmente descreve-se algumas das principais características operacionais do satélite TRMM.

1.1 O SATÉLITE TRMM

O satélite TRMM (*Tropical Rainfall Measuring Mission*) faz parte de uma missão conjunta entre a NASA (*National Aeronautics and Space Administration* - EUA) e a JAXA (*Japan Aerospace Exploration Agency*) (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).

1.1.1 Radar de Precipitação

O PR (*Precipitation Radar*) é um radar que opera na frequência de 13,8 GHz e possui uma resolução horizontal entre 4,3-5 km, 250 m de resolução vertical e uma varredura

215 km. Uma de suas características mais importantes é a capacidade para fornecer a estrutura tridimensional dos hidrometeoros de nuvens, desde a superfície até uma altura de 20 km (KUMMEROW et al., 1998). Para esta pesquisa serão utilizados os dados 2A25 que apresentam o fator de refletividade do radar corrigido por atenuação da chuva (NASA, 2009).

1.1.2 Imageador de relâmpagos

O LIS (*Lightning Imaging Sensor*) é um sensor óptico capaz de detectar e localizar relâmpagos em tempestades individuais, analisando a emissão óptica resultante da dissociação, excitação e recombinação dos constituintes atmosféricos, em resposta a ocorrência de descargas atmosféricas. Este sensor CCD¹, que trabalha no comprimento de onda de 772 nm, identifica descargas nuvem-solo e intranuvens, tanto no período diurno quanto noturno, a partir da amostragem de 500 imagens por segundo. Combinado com a velocidade do satélite (11 km/s) e abertura da CCD, o sensor LIS possui um campo de visão que permite a observação de um ponto na Terra por 80 a 90 s, tempo suficiente para a estimativa da taxa de raios de uma tempestade no momento da observação (CHRISTIAN et al., 1992; NASDA, 2001).

1.1.3 Radiômetro no visível e infravermelho

O VIRS (*Visible and InfraRed Scanner*) é um radiômetro passivo que realiza medidas de radiância em 5 bandas espectrais, com comprimentos de onda de 0,63 μm , 1,61 μm , 3,75 μm , 10,8 μm e 12 μm . Sua resolução horizontal atinge 2,11 km no nadir e 720 km de varredura (NASDA, 2001).

Nesta pesquisa, utilizamos apenas o canal 10,8 μm , para estimativa da temperatura de topo de nuvens.

1.1.4 Radiômetro de microondas

O TMI (*TRMM Microwave Imager*) é um radiômetro passivo multicanal, 10,65 GHz, 19,35 GHz, 21,3 GHz, 37 GHz, e 85,5 GHz, com dupla polarização. Possui uma varredura cônica combinada com movimento de rotação de sua antena, a qual observa regiões elipsoidais quando projetadas na superfície (KUMMEROW et al., 1998). Sua resolução

¹Um dos dispositivos eletrônicos utilizados para registro de imagens em câmeras digitais.

horizontal varia entre 6-50 km, dependendo do ângulo entre o feixe e o nadir, e varredura de 760 km (NASDA, 2001).

1.2 FONTE DE DADOS

A fonte de dados foi obtida utilizando a infra-estrutura de rede do IAG-USP, aonde os dados foram transferidos a partir do servidor de FTP da NASA (<ftp://disc2.nascom.nasa.gov/ftp/data>).

Os arquivos orbitais do TRMM na versão 7, produtos 1B01, 2A25 e 1B11 foram baixados para o período entre 1998 e 2011. Nesta etapa um conjunto de *scripts* foi desenvolvido para download e verificação de integridade dos dados baixados. No total o volume de dados atingiu 28 TB.

Os dados do LIS de *flash*, *group*, *events* e *view time* foram concedidos pela pesquisadora Albrecht (2010), quem já possuía essa base de dados no Brasil.

Como as observações globais do PR, LIS, VIRS e TMI entre 1998-2011 representam um volume de aproximadamente 30 TB, a região de estudo foi limitada entre 10N-40S e 91W-30W. Portanto foi feito um recorte nos dados orbitais apenas para esta região que cobre toda a América do Sul, o que reduziu bastante o volume de dados a serem utilizados e tornou o processamento possível perante a infraestrutura computacional do IAG-USP.

1.3 RAIOS COM DIFERENTES TAXAS DE DESCARGAS DE RETORNO

O estudo da Morfologia das tempestades foi iniciado pela construção de um algoritmo que fez a extração de perfis verticais do fator de refletividade corrigida por atenuação (Z_c), produto 2A25, nos pontos de grade onde ocorreram descargas atmosféricas observadas pelo LIS.

Após a extração dos perfis verticais de Z_c orientada pela ocorrência de raios, foi constituída uma base de dados com as seguintes características:

- Para cada raio observado pelo LIS existia um perfil vertical de refletividade do radar.
- Além dos 80 níveis verticais de cada perfil de refletividade do radar, temos também a classificação do tipo de chuva identificada pelo produto TRMM 2A25 (convectiva, estratiforme, etc).
- Cada raio (*flash*) possui o seu respectivo número de eventos (pixels da CCD iluminados), número de grupo (grupos de *pixels* iluminados na CCD que compõem o

raio), e tempo de duração em milisegundos.

A morfologia da estrutura 3D da precipitação observada pelo PR foi estudada para diferentes classes de perfis separados conforme o número de descargas de retorno (*groups*) de cada raio (*flash*).

Nesta etapa foi investigada se a taxa de descargas de retorno representa maior definição de precipitação em altitude principalmente na região de fase mista, entre 5 e 7 km de altitude.

1.4 IDENTIFICAÇÃO DAS 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.

Técnicas numéricas de mudança de eixo ordenados foram utilizadas para projetar as observações orbitais do VIRS, PR e LIS em uma grade regular com $0,05^\circ$ de resolução, a qual foi utilizada para verificar regiões com medidas coincidentes entre os sensores.

A equação de Planck foi aplicada nos dados de radiância espectral do produto 1B01, canal 4 do VIRS ($10,8 \mu\text{m}$), e áreas com temperaturas de corpo negro em infravermelho mais frias do que 258 K delimitaram os *clusters* de nuvens. Após, o algoritmo verifica se houve raios detectados pelo LIS na mesma área da nuvem. Havendo pelo menos um raio, o sistema era classificado como uma tempestade elétrica.

Desta forma, cada tempestade elétrica foi armazenada na forma de um arquivo HDF contendo medidas coincidentes do VIRS, LIS e PR. Os arquivos de tempestades elétricas são compostos pelas seguintes informações contidas nos produtos do TRMM:

- VIRS: 1B01 – *latitude, longitude, Radiance channel 4* ($10,8 \mu\text{m}$)
- PR: 2A25 – *latitude, longitude, Corrected Z-factor, Rain Type*
- LIS: *latitude and longitude of, flashes, groups, events and View Time*

Foram identificadas 154,189 tempestades elétrica e devido a varredura do PR ser menor do que a do VIRS, apenas 96,281 tiveram pelo menos um perfil de chuva válido observado pelo radar a bordo do satélite.

1.5 A TAXA DE RAIOS POR TEMPESTADE ELÉTRICA

A taxa de raios no tempo (FT), foi definida como a razão entre o número de flashes (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).

A taxa de raios no tempo também foi normalizada pela área da tempestade elétrica (A_t), obtendo também o índice da taxa de raios no tempo por área (FTA).

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

$$FTA = \frac{N_{fl}}{VT_m A_t} 86400 \text{ [raios dia}^{-1} \text{ km}^{-2}\text{]} \quad (2)$$

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

1.6 DENSIDADES ESPACIAIS DE RAIOS E TEMPESTADES ELÉTRICAS

Neste trabalho, buscamos identificar espacialmente as regiões mais eficientes nos processos de eletrificação, as quais possuem pouca densidade de sistemas porém 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. 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 1998 e 2011, o satélite passou 10,000 vezes mais sobre a região extra-tropical do que na região tropical, como mostra a figura 1b, com todas as órbitas e as varreduras do VIRS projetadas e acumuladas sobre a América do Sul.

Fazendo o acumulado do tempo de visada do LIS na superfície, como mostra a figura 1a, observa-se que em 14 anos o LIS passou 10 dias a mais na latitude -34°S do que em 0°.

Na figura 1, estão representadas duas matrizes que correspondem aos pontos de uma grade igualmente espaçada (grade regular), com $0,25^\circ$ de resolução, projetada sobre a América do Sul. A matriz (\mathbf{VT}_{lis}) do tempo total da visada do sensor LIS sobre a superfície e a matriz (\mathbf{VT}_{virs}), do número de vezes que o satélite passou conforme o tamanho da varredura do radiômetro VIRS na superfície.

Com as mesmas dimensões e resolução de grade que o tempo de observação e o número de passagens do satélite foram acumulados em duas matrizes, os raios foram acumulados na matriz (\mathbf{FL}_{lis}) e todos os píxeis do VIRS com radiância espectral associada com temperaturas de brilho inferiores a 258 K e que definiram as áreas das tempestades elétricas, foram acumulados na matriz (\mathbf{P}_{te}) que representa os locais com maior cobertura de nuvens de tempestades elétricas.

A matriz \mathbf{FL}_{lis} projetada sobre a América do Sul está representada na figura 2a e a matriz \mathbf{P}_{te} , na figura 2b. Principalmente na figura 2b 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.

Mesmo que as matrizes representem pontos em uma grade com espaçamento angular regular, as áreas de cada ponto de grade não são iguais, pois a o comprimento de arco de $0,25^\circ$ na direção zonal depende da latitude da região. Assim a matriz que corresponde a

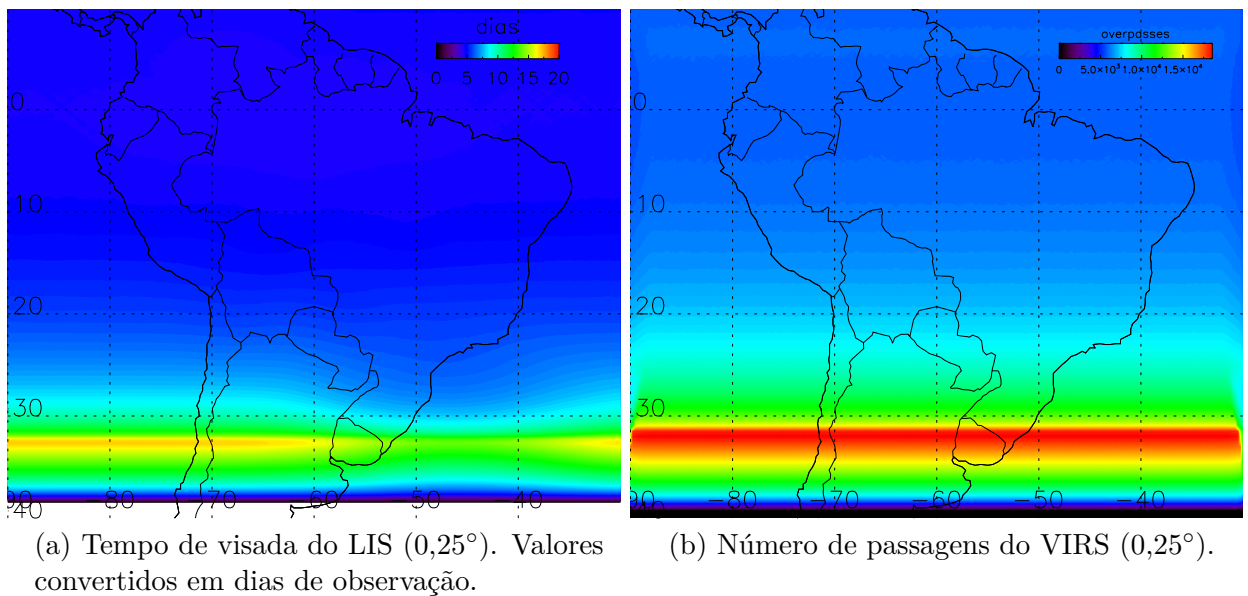


Figura 1: Observações do TRMM sobre a América do Sul.

área da grade regular (\mathbf{A}_g) foi calculada e considera nos cálculos de densidades espaciais.

Portanto, a densidade espacial de raios (\mathbf{DE}_{fl}) é calculada conforme a equação 3. Note que a razão de \mathbf{FL}_{lis} por \mathbf{VT}_{lis} e \mathbf{A}_g é multiplicada por $24 \times 60 \times 60 \times 365, 25$, o que converte o tempo de observação do LIS de segundos para anos. Então as densidades espaciais de raios, possuem dimensões de número de [raios] por [tempo] por [quilômetro quadrado].

No mesmo caminho as densidades espaciais de tempestades elétricas (\mathbf{DE}_{te}) foram obtidas conforme a equação 4. Porém a constante de conversão de tempo na equação 4 é diferente da equação 3, pois o tempo que o VIRS observou a AS, foi estimado a partir do número de vezes que o satélite passou sobre a AS e considerando que cada ponto de grade na orbita foi observado por 90 segundos.

Portanto ao converter a matriz \mathbf{VT}_{virs} para segundos de observação, temos um fator de 90 no denominador, que está implícito na equação 4.

$$\mathbf{DE}_{fl} = \frac{\mathbf{FL}_{lis}}{\mathbf{VT}_{lis}\mathbf{A}_g} 31557600 [\text{raios ano}^{-1} \text{ km}^{-2}] \quad (3)$$

$$\mathbf{DE}_{te} = \frac{\mathbf{P}_{te}}{\mathbf{VT}_{virs}\mathbf{A}_g} 350640 [\text{sistemas ano}^{-1} \text{ km}^{-2}] \quad (4)$$

1.7 MORFOLOGIA DA PRECIPITAÇÃO DAS TEMPESTADES ELÉTRICAS

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.

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. Foram obtidos Diagramas de Contorno de Frequência por Altitude, os CFADs.

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.

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 função de densidade de probabilidade ($f_{pdf}(x, y)$) que define 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.

1.7.1 Estrutura tridimensional da precipitação na óptica dos processos microfísicos

Em Fabry e Zawadzki (1995), é mostrado que processos de crescimento de hidrometeoros como a acreção e agregação, podem ser estudados em função da espessura da banda brilhante e flutuações nos valores do fator de refletividade no perfil atmosférico.

Como o fator de refletividade do radar é proporcional ao diâmetro das gotas no volume iluminado elevado a 6 potência, os processos de crescimento de hidrometeoros como flocos de neves, granizo e gotas, são marcados por um aumento do fator de refletividade do radar.

Pois em um regime de precipitação estratiforme, por exemplo, espera-se um aumento abrupto no fator de refletividade do radar próximo a isoterma de 0° C associado a mudança do índice de refração dos hidrometeoros.

O aumento de potência recebida no radar associada ao derretimento em 0° C pode ser ainda intensificado quando há flocos de neve, os quais podem desenvolver uma película de água líquida aumentando o espalhamento radiativo das micro-ondas enviadas pelo radar, causando a banda brilhante.

Porém, em um perfil de precipitação convectivo a transição de fase é perturbada por correntes ascendentes. Os processos de agregação, acreção e colisão coalescência, os quais são responsáveis pelo crescimento do diâmetro dos hidrometeoros de nuvem, torna-se mais eficientes.

No ambiente convectivo, também a mudança do índice de refração da água não ocorre em 0°C, pois pode haver gelo sólido caindo até a superfície e água super-resfriada em temperaturas de -15°C. Portanto o derretimento ocorre em um caminho de temperatura muito maior do que na precipitação estratiforme.

Considerado os resultados de pesquisas em laboratório como por exemplo em Takahashi (1978), Saunders et al. (1999), Takahashi e Miyawaki (2002), Ávila et al. (2009), os quais mostram que os processos de crescimento de hidrometeoros associado aos mecanismos de eletrificação dependem fortemente da razão de mistura e da temperatura, nesta pesquisa construímos um diagrama denominado como Diagrama de Contorno de Frequência por Temperatura (CFTD), o qual objetiva uma análise das flutuações do fator de refletividade do radar, mas, em função das variação de temperatura no perfil atmosférico.

Para a construção dos CFTD, os dados de Reanálises II do NCEP (KANAMITSU et al., 2002) entre 1998 e 2011 foram utilizados, mais especificamente os dados em 17 níveis de pressão, de altura geopotencial e temperatura.

Para cada tempestade elétrica foi localizado os dados de altura geopotencial e temperatura para a hora mais próxima, antes da ocorrência do sistema.

Os perfis de altura geopotencial e temperatura mais próximos ou coincidentes com as regiões de tempestade elétrica observadas pelo TRMM foram extraídos e utilizando interpolação de dados, os 80 níveis de altitude referentes as observações do PR foram convertidos em 80 níveis de temperatura.

Desta maneira, obteve-se histogramas bidimensionais da densidade de probabilidade de ocorrência de Z_c por nível de temperatura. Estes histogramas possuíam uma granularidade de 1 dBZ para cada 2° C e cada nível de temperatura foi normalizado pelo número total de ocorrência de Z_c do respectivo nível. No CFTD, os níveis superiores e inferiores foram truncados para as temperaturas entre 20° C e -50° C.

Os níveis de altitude com número de ocorrência de Z_c menor do que 10% do nível de máxima ocorrência foram desconsiderados dos contornos de probabilidade em todos os CFADs.

To understand how the vertical Z_{ef} profiles are associated with the hydrometeor growth and electrification processes, the altitude level of each PR profile was converted in to temperature. For this conversion, we have used the NCEP RII reanalysis. So for each thunderstorm, we have extracted the temperature and geopotencial height profile to

make the conversion and have created the contoured frequency by temperature diagram (CFTD) in addition to the cumulative CFTD (CCFTD).

descrever CFAD CCFD CFTD

For each thunderstorm, we have extracted the temperature and geopotential height profile to make the conversion the altitude levels of PR to temperature levels and have created the Contoured Frequency by Temperature Diagram (CFTD) in addition to the cumulative CFTD (CCFTD).

To analyze the radar reflectivity (Z_{ef}) profiles associated with these 2 groups, we have computed the contoured frequency by altitude diagram (CFAD) by assuming bins of 1 dBZ every 250 m altitude resolution. In each CFAD we present the fraction of convective, stratiform and other Z_{ef} profiles, the respective number of profiles in each CFAD (P), then number of profiles at the level of maximum (Z_{ef}) (L) and the respective altitude of maximum Z_{ef} (H). Finally, only altitude levels with more than 10% of L were considered in the CFADs, guaranteeing a statistical representativeness.

To understand how the vertical Z_{ef} profiles are associated with the hydrometeor growth and electrification processes, the altitude level of each PR profile was converted in to temperature. For this conversion, we have used the NCEP RII reanalysis. So for each thunderstorm, we have extracted the temperature and geopotential height profile to make the conversion and have created the contoured frequency by temperature diagram (CFTD) in addition to the cumulative CFTD (CCFTD).

Conforme descreve (YUTER; Houze Jr., 1995), primeiramente obtivemos histogramas bidimensionais (hist2D) da densidade de probabilidade de ocorrência de Z_{ef} por nível de altitude com tamanho de bin de 1 dBZ para cada 250 m de altitude. Cada nível de altitude do hist2D foi normalizado pelo total de ocorrência de refletividade ($N_{Z_{ef}}$) do respectivo nível.

Com base nos dados de Reanálises rII do NCEP, o eixo de altitude dos perfis do radar foram projetados em um eixo de temperatura conforme os campos de altura geopotencial e temperatura, por nível de pressão.

Desta forma desenvolvemos o estudo das frequências de ocorrência de refletividade por nível de temperatura, construindo diagramas que foram denominados como Diagramas de Contorno de Frequência por Temperatura (CFTD) e Diagramas de Contorno de Frequência Cumulativa por Temperatura (CCFTD).

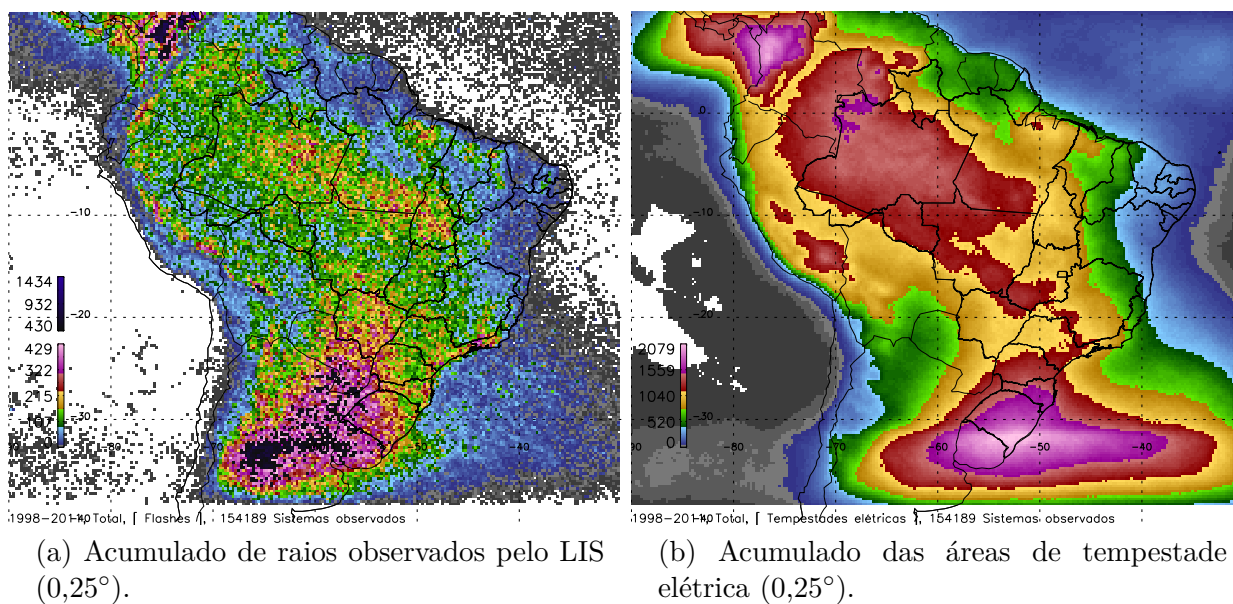


Figura 2: Acumulados dos raios e áreas das 154,189 tempestades elétricas identificadas.

REFERÊNCIAS

- ALBRECHT, R. I. **Comunicação Pessoal**. São Paulo: [s.n.], 2010.
- 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. 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.
- FABRY, F.; ZAWADZKI, I. Long-Term Radar Observations of the Melting Layer of Precipitation and Their Interpretation. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 52, n. 7, p. 838–851, 1995. ISSN 0022-4928.
- 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.
- 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>>.