

Severe Thunderstorms as observed from TRMM PR and LIS in South America

Evandro M. Anselmo^{a,*}, Carlos A. Morales^a

^a Institute of Astronomy, Geophysics and Atmospheric Science of USP, São Paulo-SP, 12227-010, Brazil

Abstract

Sistemas precipitantes com descargas atmosféricas podem estar associadas com condições de tempo severo e a taxa de raios um indicativo de severidade. Porém as tempestades elétricas com as maiores extensões em área e maior número de raios observadas pelo LIS podem não ser as com maior intensidade convectiva.

Este trabalho identifica quais as tempestades elétricas que possuem maior severidade nas regiões dos núcleos de ocorrência de raios com base nas observações do satélite Tropical Rainfall Measure Mission (TRMM).

Neste trabalho identifica-se as tempestades elétricas severas

Com dados entre 1999-2011, foi criado um banco de dados de tempestades elétricas individuais sobre a América do Sul (10N-40S and 91W-30W). Os sistemas foram identificados a partir das observações do Lightning Imaging Sensor (LIS) combinadas com técnicas de limiar de temperatura de brilho associadas com a radiação do VIRS 10,8 μm . As áreas com temperaturas de corpo negro em infravermelho mais frias do que 258K e com ocorrência de flash definiram as dimensões e posições das tempestades elétricas. No total, 89666 tempestades elétricas foram identificadas com pelo menos um perfil de precipitação válido observado pelo PR. Considerando o tempo de visão médio (VTm) e a área da tempestade elétrica (At) observada pelo TRMM, foram identificados 2 grupos de sistemas com indicativo de tempo severo; o percentil de 90% das maiores taxas de raios/VTm e das maiores taxas de raios/VTm/At. A área dos núcleos de raios foram definidas utilizando as posições dos *events* observados pelo LIS. A região de estudo foi dividida em caixas de $10^\circ \times 10^\circ$ e a frequência de ocorrência de tamanho, da fração convectiva, da fração estratiforme e da refletividade do PR com a altitude associada aos núcleos de raios foram estudadas. As tempestades elétricas que possuíram as maiores taxas de raios/VTm tiveram maior probabilidade de extensão em área na ordem de 105 km² enquanto as maiores taxas de raios/VTm/At, estiveram mais frequentemente relacionadas com sistemas na ordem de 5x102 km². Os sistemas ordenados pela taxa de raios/VTm/At possuíram maior fração convectiva, apresentaram os maiores valores de refletividade no volume e também maior número de ocorrência de refletividade acima de 10 km de altitude. Os sistemas ordenados pela taxa de raios/VTm possuíram maior fração estratiforme e maior número de raios na região eletricamente ativa, porém a taxa de raios/VTm/At se mostrou mais eficiente para identificar as regiões com maior severidade de tempo.

1. INTRODUCTION

Motivações: (Morales and Anagnostou, 2003), Cecil et al. (2005).

Morales and Anagnostou (2003), ao desenvolver o algoritmo de estimativa de precipitação denominado como SIRT, mostrou que os sistemas de pre-

cipitação com raios possuem menor área de chuva do que sistemas sem raios, porém, quando há descargas a convecção é mais profunda e a produção de chuva é maior.

Com base nos estudos de Cecil et al. (2005), sabemos que os sistemas de precipitação com raios representam apenas 2,4% do total de sistemas obser-

* Corresponding author address: Instituto de Astronomia Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo-SP, 05508-090, Brazil, e-mail: evandro@model.iag.usp.br, phone: (55)-(11)-3091-4675.

Email addresses: evandro@model.iag.usp.br (Evandro M. Anselmo), morales@model.iag.usp.br (Carlos A. Morales)

vados pelo TRMM.

2. DATA AND METHODOLOGY

Foram baixados via internet (<ftp://disc2.nascom.nasa.gov/ftp/data/s4pa/>) os dados orbitais do TRMM na versão 7, produtos 1B01, 2A25 e dados do LIS de flash, group, events e view time para 13 anos, entre 1998 e 2011.

A região de estudo foi limitada entre (10N-40S and 91W-30W). Portanto foi feito um recorte nos dados orbitais apenas para esta região que cobre toda a América do Sul, o que reduziu a massa de dados a serem utilizados. As observações orbitais do VIRS, PR e LIS foram projetadas em uma grade regular com 0,05° de resolução, a qual foi utilizada para verificar 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 μm), e áreas com temperaturas de corpo negro em infravermelho mais frias do que 258K delimitaram os clusters de nuvens. Após, o algoritmo verifica se houve flashes detectados pelo LIS na mesma área do cluster. Havendo pelo menos um flash, o sistema era classificado como uma tempestade elétrica.

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

- VIRS – 1B01 – latitude, longitude, Radiance – channel 4 (10,8 μm)
- PR – 2A25 – latitude, longitude, Corrected Z-factor, Rain Type
- LIS – latitude and longitude of, flashes, groups, events and View Time

Desta forma foram identificados 100,000 tempestades elétrica, e devido ao swath do PR ser menor do que o do VIRS, apenas 89,000 tiveram pelo menos um perfil de chuva válido observado pelo PR.

A taxa de raios no tempo (FT), foi definida como a razão entre o número de flashes (N_{fl}) e a média dos pontos de grade do view time (VT_m) do LIS, da mesma forma como foi calcula para as precipitation features (Cecil et al., 2005; Nesbitt et al., 2000).

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

Para cada sistema foi calculado dois índices que podem estar associados com a severidade de tempo, o FT e FTA.

$$FT = \frac{N_{fl}}{VT_m} 86400 [fl\ day^{-1}] \quad (1)$$

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

Como este estudo propõe-se em associar a estrutura 3D da precipitação com a severidade de tempo, os 89,000 sistemas com chuva do PR, foram separados em dois grupos de sistemas potencialmente severos:

- O 90th percentil das máximas FT.
- O 90th percentil das máximas FTA.

Para avaliar qual dos índices representam maior severidade de tempo, foram calculados diagramas de contorno de frequência por altitude, os CFADs, utilizando os perfis de refletividade efetiva (Z_{ef}) do produto 2A25. Conforme descreve Yuter and 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_Zef) do respectivo nível. O código 1 ilustra o processo numérico de construção dos CFADs realizados neste trabalho.

code 1: Algoritmo representativo para o cálculo dos CFADs.

```
for h=0L,79 do begin
    CFAD[* ,h]=100.* hist2D [* ,h] / N_Zef [h]
endfor
```

A partir das posições dos events do LIS, projetadas na grade regular de 0,05°, foi definida a área dos núcleos eletricamente ativos. A chuva dentro e fora dos núcleos de raios foi separada e investigada utilizando CFADs para o 90th percentil de tempestades elétricas ordenadas pelo FTA e FT a cada 10° × 10° sobre a América do Sul.

Para cada diagrama foi calculado o percentual (%) de perfis classificados como convectivo, estratiforme e outros, (P) o número de perfis que compõe o CFAD, (L) o número de ocorrência de refletividade do nível de máxima ocorrência e (H) a altitude do nível de máxima ocorrência. Ao plotar os contornos

dos CFADs, os níveis de altitude que representaram menos do que 10% de L foram desconsiderados.

A densidade de probabilidade de ocorrência de tamanho e temperatura de brilho em infravermelho também foram calculadas para os dois grupos.

A temperatura de brilho associa as observações do VIRS e os perfis médios de Z_{ef} foram plotadas para as cinco tempestades elétricas mais severas indicadas por FTA e FT.

3. RESULTS

Ao estudar a densidade de probabilidade de ocorrência de extensão em área dos dois grupos de tempestades elétricas, definidos pelo 90th percentil dos índices de FT e FTA, observa-se que cada grupo corresponde a sistemas com tamanhos bem distintos, como mostra a figura 1.

Os maiores valores de FTA correspondem a tempestades elétricas com 3 ordens de grandeza menor do que as com os maiores valores de FT.

As tempestades elétricas escolhidas pelo FT são maiores em extensão por que conforme aumenta a área do sistema, maior a probabilidade de haver raios na região.

Uma tempestade elétrica com 10^5 km^2 , provavelmente terá maior número de descargas observadas no view time do LIS do que uma com 10^2 km^2 .

Quando a densidade espacial de descargas aumenta muito em uma região com centenas de quilômetros quadrados, em torno de 100 descargas intranuvens para uma nuven-solo, como por exemplo os maiores valores de $Z = IC/CG$ mostrados por Anselmo (2009) na região de Campo Grande - MS no Brasil, a capacidade do LIS de identificar brilhos transientes provavelmente fica comprometida devido a resolução horizontal da CCD.

(Talvez caiba um breve comentários das intercomparações do LMA x LIS, obtidas durante o GLM-SP.)

Portanto, ao normalizar a taxa de raios no tempo por A_t , a taxa de raios fica diluída na extensão do sistema, evidenciando que os maiores valores de FTA correspondem aos sistemas com as maiores densidades espaciais de raios, cuja a extensão em área e a taxa de raios têm maior probabilidade de serem menores do que as observadas nos sistemas com os maiores valores de FT.

A frequência de ocorrência de temperatura de brilho em infravermelho observada pelo VIRS é

mostrada na figura 1, em que observa-se temperaturas de topo de nuvens com aproximadamente 10 K mais frias para o grupo dos maiores índices de FTA, indicando que a convecção nos sistemas menores é mais profunda.

No algoritmo SIRT, as regiões com área de temperatura de brilho inferior a 215 K e com raios foram as regiões com maior precipitação associada (Morales and Anagnostou, 2003).

No presente estudo, ao ordenar as tempestades elétricas pelo índice FTA, temperaturas de brilho menores do que 215 K são as com a maior probabilidade de ocorrência conforme a figura 1.

Os sistemas maiores, selecionados pelo FT, geralmente possuem vasta extensão estratiforme, enquanto as regiões com precipitação convectiva ocupam área bem menor do que as áreas estratiformes (Houze Jr. et al., 2007; Rasmussen and Houze Jr., 2011).

Avaliando a densidade de probabilidade de fração de chuva total, convectiva e estratiforme, os máximos valores de FTA correspondem a tempestades elétricas com maior chance de 70% de área convectiva e 40% de área estratiforme enquanto que para os máximos valores de FT possuíram 20% de fração convectiva e 75% de fração estratiforme.

Talvez os sistemas selecionados pelo FTA estejam em estágio de maturação e conforme vão se dissipando vão ganhando extensão e área com chuva estratiforme, se enquadrando no grupo dos maiores índice de FT.

A maior probabilidade de fração de área observada pelo PR das tempestades elétricas escolhidas pelo FT foi de 30%, pois geralmente o swath do PR não contempla toda a sua extensão. Para as escolhidas pelo FTA o PR teve maior probabilidade de observar entre 90-100% da área dos sistemas.

Por meio dos níveis de contorno dos CFADs na figura 2, observa-se claramente que tanto para FTA quanto para FT, a parte sem raios possuiu maior percentual de perfis estratiformes e menores valores de Z_{ef} com as probabilidades mais representativas, entre 2-10%, em todos os níveis de altitude.

A parte eletricamente ativa possui maior percentual de perfis convectivos e com maiores valores de Z_{ef} em todos os níveis, confirmando a correlação positiva entre descargas elétricas e produção de chuva (Petersen and Rutledge, 1998).

Se avaliarmos apenas os níveis de contorno da figura 2 com probabilidade entre 3-5% (cor verde), observa-se que os máximos de Z_{ef} para as chuvas sem raios, figuras 2a e 2c, não ultrapassaram 38

dBZ enquanto que para as chuvas com raios, figuras 2b e 2d, os valores de Z_{ef} atingiram 50 dBZ.

A figura 2c mostra que a chuva na região tropical, entre 10N-20S e 91W-30W, possui maior probabilidade de valores de Z_{ef} em torno de 25 dBZ nas altitudes de 0 km à 5 km. Observe os níveis de contorno com probabilidade entre 5-7% (cor amarela).

Ao comparar com a figura 2a quase não se observa o nível de probabilidade de cor amarela entre 0-5km. A precipitação mais próxima da superfície fica associada com valores entre 15-40 dBZ e probabilidades de 2% à 5%. Porém, a probabilidade entre 2-3% representada principalmente pela cor azul, mostra-se mais alargada do que em 2c e atinge 40 dBZ, com exceção entre 10N-10S e 80W-70W, região tropical da Cordilheira dos Andes.

As chuvas na superfície associada com as porções de tempestades elétricas tropicais sem raios selecionadas por FT têm maior probabilidade de serem mais moderadas do que as selecionadas por FTA, as quais são mais aleatórias em intensidade mas podem atingir valores de Z_{ef} maiores.

Os CFADs referentes as tempestades elétricas selecionadas por FTA possuem contornos em níveis de altitude mais elevados do que os CFADs dos sistema selecionados por FT, tanto para a parte com raios quanto para a parte sem raios. A diferença mais notável pode ser observada entre a figura 2a e 2c para 0S-10S e 50W-60W, região do estado do Tocantins no Brasil. O CFAD em 2a define valores de probabilidade em altitude 1,75 km mais elevada do que em 2c.

Nas regiões entre 10N-0S e 70W-80W e entre 20S-40S e 50W-60W, em que Cecil et al. (2005) apontam como região das tempestades mais severas na América do Sul, os CFADs em 2b e 2a possuem contornos de probabilidade aproximadamente 1 km mais elevado do que em 2d e 2c.

Como o último nível de altitude dos CFADs deste trabalho é limitado por altitudes com até 10% de L, a maior definição de probabilidades de ocorrência em altitude para as tempestades selecionadas por FTA mostra que, as altas taxas de raios por km^2 estão associadas com a convecção mais profunda do que os sistemas com as maiores taxas de raios (FT).

Em geral a precipitação é bem mais frequente próxima da superfície, entre 0-5km de altitude. Acima da região de mistura, a precipitação é mais rara de ocorrer. Em Liu et al. (2008) é mostrado que a densidade espacial de sistemas com no mínimo 20 dBZ em 2 km de altitude é glob-

almente maior do que os sistemas que atingem 20 dBZ em níveis superiores de altitude.

Principalmente nas regiões da figura 2 as quais o valor de H, marcado no topo direito de cada CFAD, é menor em 2b do que em 2d e mesmo assim os CFADs em 2b possuem maior altitude nos níveis de contorno de probabilidade, o índice definido como FTA associa-se com maior severidade de tempo do que o FT.

Pois mesmo que a refletividade mais ocorrente esteja abaixo da região de mistura, a precipitação acima de 7 km também é frequente, mostrando que nestas regiões os sistemas ordenados pelo FTA têm mais chuva na superfície, maior quantidade de hidrometeoros na região de mistura e precipitação acima de 10 km de altitude com bastante representatividade estatística.

Por exemplo na região da Colômbia entre 10N-0S e 70W-80W, o nível H para a figura 2b é de 4,0 km e em 2d é de 4,2 km e os níveis de contorno da figura 2b possuem valores até 16 km de altitude, enquanto que em 2d os contornos param em 15 km.

Os contornos da figura 2b, principalmente para as altitude acima de 5 km, mostram valores de refletividade entre 1-3 dBZ maiores do que em 2d. Para a chuva entre 1-2 km de altitude os valores são mais semelhantes entre as tempestades elétricas selecionadas por FTA e FT. Porém, para FTA (figura 2b) há um estreitamento da região de contorno com os maiores valores de probabilidade associada a chuva na superfície, entre 3-5%. Entre 20S-40S e 40-70W, o estreitamente é maior do que as demais regiões mostrando que as chuvas possuem maior probabilidade de estarem associadas com valores de 45 dBZ em 2b.

As probabilidades mais baixas de ocorrência de refletividade observadas nos CFADs da figura 2 estão associadas com a precipitação mais severa. Observe as faixas de contorno mais escuras entre 0,1-0,7% nas figuras 2b e 2d. Esta é a ocorrência de precipitação mais rara, porém pode estar associada com enchentes rápidas, alta taxa de raios, chuva de granizo, fortes rajadas de vento e até mesmo ocorrência de tornados em algumas regiões.

Os valores mais elevados de refletividade estiveram na figura 2b entre 20S-40S e 40W-70W, sobre a Bacia do Rio da Prata, que abrange o Sul do Brasil, Paraguai, Uruguai e Argentina.

A dinâmica de formação de Sistemas Convecivos de Meso-escala, como é discutido em Velasco and Fritsch (1987) e Durkee and Mote (2009), somados com efeitos de topografia, como por exemplo

a região da Serra de Córdoba na Argentina, a qual Rasmussen and Houze Jr. (2011) mostram grande ocorrência de convecção profunda, promovem valores de refletividade de aproximadamente 45 dBZ entre 10-15 km de altitude e chuvas na superfície com 55 dBZ, como mostra os contornos com as probabilidade mais raras.

3.1. Intensidade convectiva e as Teorias de Eletrificação

Na figura 3a e 3c, temos o Diagrama de Contorno de Frequência da refletividade por Temperatura (CFTD) para o grupo FTA e FT respetivamente. Ao lado, figuras 3b e 3d, temos os Diagramas de Contorno de Frequência Cumulativa (CCFTD).

Agora o estudo da estrutura 3D da precipitação possui um eixo relacionado a condição termodinâmica da atmosfera não sendo apenas uma informação espacial conforme apresentada na figura 2, mas sim como a refletividade do radar se comporta de acordo com as variações de temperatura do perfil atmosférico, que sofre influência das estações do ano, sistemas sinóticos e oscilações climáticas.

Trabalhos como Takahashi (1978); Saunders et al. (1999) evidenciam que o processo de acreção governa a eletrificação das tempestades elétricas. Em laboratório, o estudo da eletrificação de hidrometeores por acreção é geralmente realizado em ambiente controlado com temperaturas entre -30°C e 0°C.

Investigando os processos microfísicos diretamente no meio ambiente, Fabry and Zawadzki (1995) mostram que flutuações nos valores do fator de refletividade por altitude podem evidenciar a banda brilhante, intensificação de processos como, acreção e agregação.

Em um regime de precipitação estratiforme, espera-se um aumento abrupto de Z_{ef} próximo a isoterma de 0°C associado a mudança do índice de refração dos hidrometeores.

Sabendo que o índice de refração de micro-ondas no gelo é de $\sim 0,1$ e na água líquida é de $\sim 0,9$, a transição de fase sólida para líquida pode representar um aumento de 7 dBZ na potência do sinal do radar.

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 um película de água líquida aumentando o espalhamento radiativo das micro-ondas enviadas pelo radar.

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 hidrometeores de nuvem, torna-se mais eficientes.

Como o fator de refletividade do radar é proporcional ao diâmetro das gotas no volume iluminado elevado a 6 potência, o crescimento, desde os flocos de neves até a formação do granizo, é marcado por um aumento contínuo de Z_{ef} durante o caminho que a precipitação percorre até a superfície ou temperaturas acima de 0°C.

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

A partir das figuras 3b e 3d, iremos avaliar a intensidade convectiva dos grupos FTA e FT com base na velocidade de crescimento de Z_{ef} em função do aumento da temperatura, para os quartis de 30%, 50%, 70% e 95% da amostra de probabilidade de Z_{ef} por temperatura, presentes nas figuras 3a e 3c.

Para a caixa entre 30S-40S e 60W-70W, foram extraídas as linhas de contorno do diagrama CCFTD correspondentes aos percentis de 30%, 50%, 70% e 95%. Após foi calculada a derivada das respectivas linhas de contorno.

Desta forma podemos avaliar a taxa de aumento e decrescimento em dBZ/°C, a cada nível de temperatura para diferentes percentis da amostra de probabilidade dos diagramas da figura 3.

Na figura 4a, vamos observar a derivada da mediana da amostra de probabilidade, que corresponde a derivada da linha cor preta presente nas figuras 3b e 3d. Em 0°C o aumento de Z_{ef} é 0,2 dBZ/°C maior para as tempestades elétricas ordenadas pelo índice FT, indicando que o derretimento estratiforme é maior do que é observado para o grupo das FTA.

O percentual de perfis estratiformes na caixa entre 30S-40S e 60W-70W relacionada ao grupo das FT é 3,7% maior do que em FTA (ver figuras 2 ou 3).

Mas entre -5°C e -18°C a taxa de aumento de dBZ é maior para o grupo das FTA, mostrando que o processo de acreção é mais vigoroso.

Observa-se também que um aumento mais

rápido na taxa de dBZ/°C em -25°C para FTA e em -20°C para FT. Esse aumento está mais relacionado com o processo de agregação, que se mostra mais eficiente em -25°C para FTA, provavelmente pelo fato da corrente ascendente ingerir maior quantidade de vapor d'água em regiões com altitudes mais elevadas, o que favorece também a acreção e interação entre o *graupel* e flocos de neve.

Para os dois grupos, FTA e FT como mostra a figura 4a, observa-se que conforme o percentil da amostra de probabilidade aumenta, a taxa de aumento de Z_{ef} com a temperatura vai ficando menor em torno de 0°C e maior para temperaturas mais frias. O percentil de 95% mostra maior taxa de aumento em -12°C para FTA e -8°C para FT, o que é uma forte evidência de uma região de mistura bem mais espessa do que para os percentis inferiores.

Agora quando comparamos a análise da velocidade de aumento de Z_{ef} com outras regiões, a microfísica de eletrificação se mostra bem diferente em cada local. Na figura 4a temos uma região ao Sul da América do Sul enquanto que em 4b a região fica ao Norte, entre 0N-10N e 60W-70W. Ambas são regiões de ocorrência de sistemas severos conforme aponta Cecil et al. (2005).

Na figura 4b, para todos os percentis expostos, a taxa de dBZ/°C entre -15°C e -40°C é maior do que em 4a. Portanto podemos afirmar que a eletrificação dos sistemas ao Norte é muito mais governada pelo processo de agregação do que acreção.

Os sistemas com as maiores de valores de FT tiveram maior eficiência de acreção do que do que os maiores FTA, principalmente entre -12°C e -5°C, porém as concentrações de hidrometeoros são maiores para FTA, pois os maiores valores de probabilidade de Z_{ef} por temperatura na caixa entre 0N-10N e 60W-70W, correspondem a valores maiores de Z_{ef} , como mostra as figuras 3a e 3c. Portanto o conteúdo de água líquida dos perfis que produzem as maiores taxas de raio por área de tempestade elétrica (FTA) é maior e esse fator pode intensificar a eletrificação das partículas de nuvem.

Uma interação mais efetiva entre flocos de neve (acreção) do que o processo de crescimento do *graupel* e granizo (acreção) sugere centros de carga na tempestade elétrica em altitudes mais elevadas. Considerando também que a acreção é mais eficiente no carregamento dos hidrometeoros, os sistemas ao Sul da AS, além de possuir centros de cargas em altitudes mais baixas, são mais intensos. Por isso observa-se maior número de descargas ao Sul do que ao Norte, pois os centros de cargas estão

mais próximas do condutor.

4. CONCLUSIONS

$FL/day/km^2$ é mais severo. Estrutura 3d da precipitação com maior desenvolvimento vertical, tanto com e sem raios, maior fração convectiva em todos os pontos de grade sobre a AS. Tb mais frios tbm.

O fato dos sistemas com maiores FT possuírem maior probabilidade de menor fração convectiva, maior fração estratiforme e maior extensão em área, sugere que os maiores valores de FT podem estar associados a sistemas em estágios dissipativos enquanto que os maiores valores de FTA podem estar mais associados a sistemas em estágio de iniciação.

Os sistemas com os maiores valores de FTA 50% de fração convectiva e aumento de 30% da fração estratiforme

5. REFERENCES

References

- Anselmo, E.M., 2009. Estudo da razão entre o número de relâmpagos intranuvens e nuvem-solo para sistemas convectivos na cidade de campo grande - MS. Master's thesis. Universidade Federal de Mato Grosso do Sul.
- Cecil, D., Goodman, S., Boccippio, D., Zipser, E., Nesbitt, S., 2005. Three years of trmm precipitation features. part i: Radar, radiometric, and lightning characteristics. *Mon. Wea. Rev.* 133, 543–566.
- Durkee, J.D., Mote, T.L., 2009. A climatology of warm-season mesoscale convective complexes in subtropical South America. *International Journal of Climatology* 30, 418–431. URL: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/joc.1893/abstract>, doi:10.1002/joc.
- Fabry, F., Zawadzki, I., 1995. Long-Term Radar Observations of the Melting Layer of Precipitation and Their Interpretation. *Journal of the Atmospheric Sciences* 52, 838–851. doi:10.1175/1520-0469(1995)052<0838:LTROOT>2.0.CO;2.
- Houze Jr., R.A., Wilton, D.C., Smull, B.F., 2007. Monsoon convection in the Himalayan region as seen by the TRMM Precipitation Radar. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 133, 1389–1411. URL: <http://dx.doi.org/10.1002/qj.106>, doi:10.1002/qj.
- Liu, C., Zipser, E.J., Cecil, D.J., Nesbitt, S.W., Sherwood, S., 2008. A cloud and precipitation feature database from nine years of trmm observations. *J. Appl. Meteor. Climatol.* 47, 2712–2728.
- Morales, C.A., Anagnostou, E.N., 2003. Extending the capabilities of high-frequency rainfall estimation from geostationary-based satellite infrared via a network of long-range lightning observations. *J. Hydrometeor* 4, 141–159.

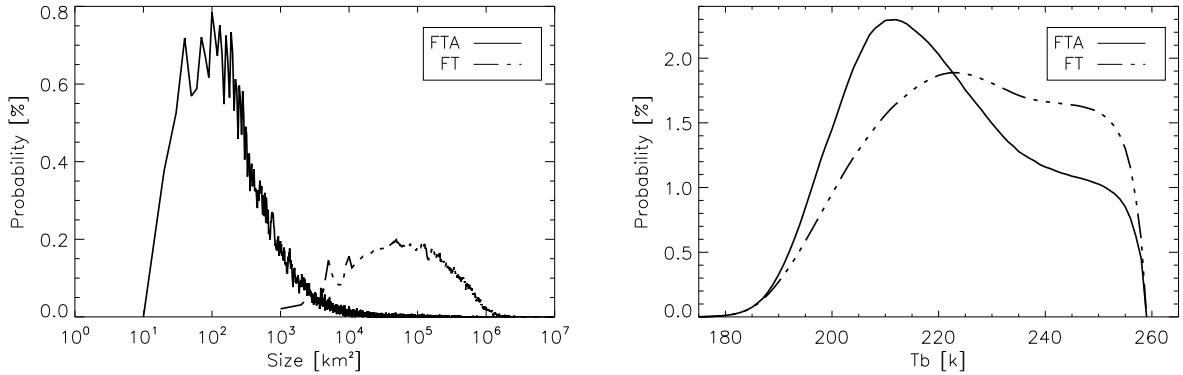


Figure 1: Densidade de probabilidade de ocorrência de tamanhos e temperaturas de brilhos observadas pelo VIRS para os grupos de tempestades elétricas selecionados por FTA e FT.

Nesbitt, S.W., Zipser, E.J., Cecil, D.J., 2000. A Census of Precipitation Features in the Tropics Using TRMM: Radar, Ice Scattering, and Lightning Observations. *Journal of Climate* 13, 4087–4106. doi:10.1175/1520-0442(2000)013<4087:ACOPFI>2.0.CO;2.

Petersen, W.A., Rutledge, S.A., 1998. On the relationship between cloud-to-ground lightning and convective rainfall. *Journal of Geophysical Research* 103, 14025–14040. doi:10.1029/97JD02064.

Rasmussen, K.L., Houze Jr., R.A., 2011. Orogenic Convection in Subtropical South America as Seen by the TRMM Satellite. *Monthly Weather Review* 139, 2399–2420. URL: <http://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/MWR-D-10-05006.1>. doi:10.1175/MWR-D-10-05006.1.

Saunders, C., Avila, E., Peck, S., Castellano, N., Varela,

G.A., 1999. A laboratory study of the effects of rime ice accretion and heating on charge transfer during ice crystal/graupelet collisions. *Atmospheric Research* 51, 99–117.

Takahashi, T., 1978. Rimming electrification as a charging generation mechanism in thunderstorms. *J. Atmos. Sci.* 35, 1536–1548.

Velasco, I., Fritsch, J.M., 1987. Mesoscale convective complexes in the Americas. *Journal of Geophysical Research* 92, 9591. doi:10.1029/JD092iD08p09591.

Yuter, S.E., Houze Jr., R.A., 1995. Three-dimensional kinematic and microphysical evolution of florida cumulonimbus. part ii: Frequency distribution of vertical velocity, reflectivity, and differential reflectivity. *J. Appl. Meteor.* 123, 1941–1963.

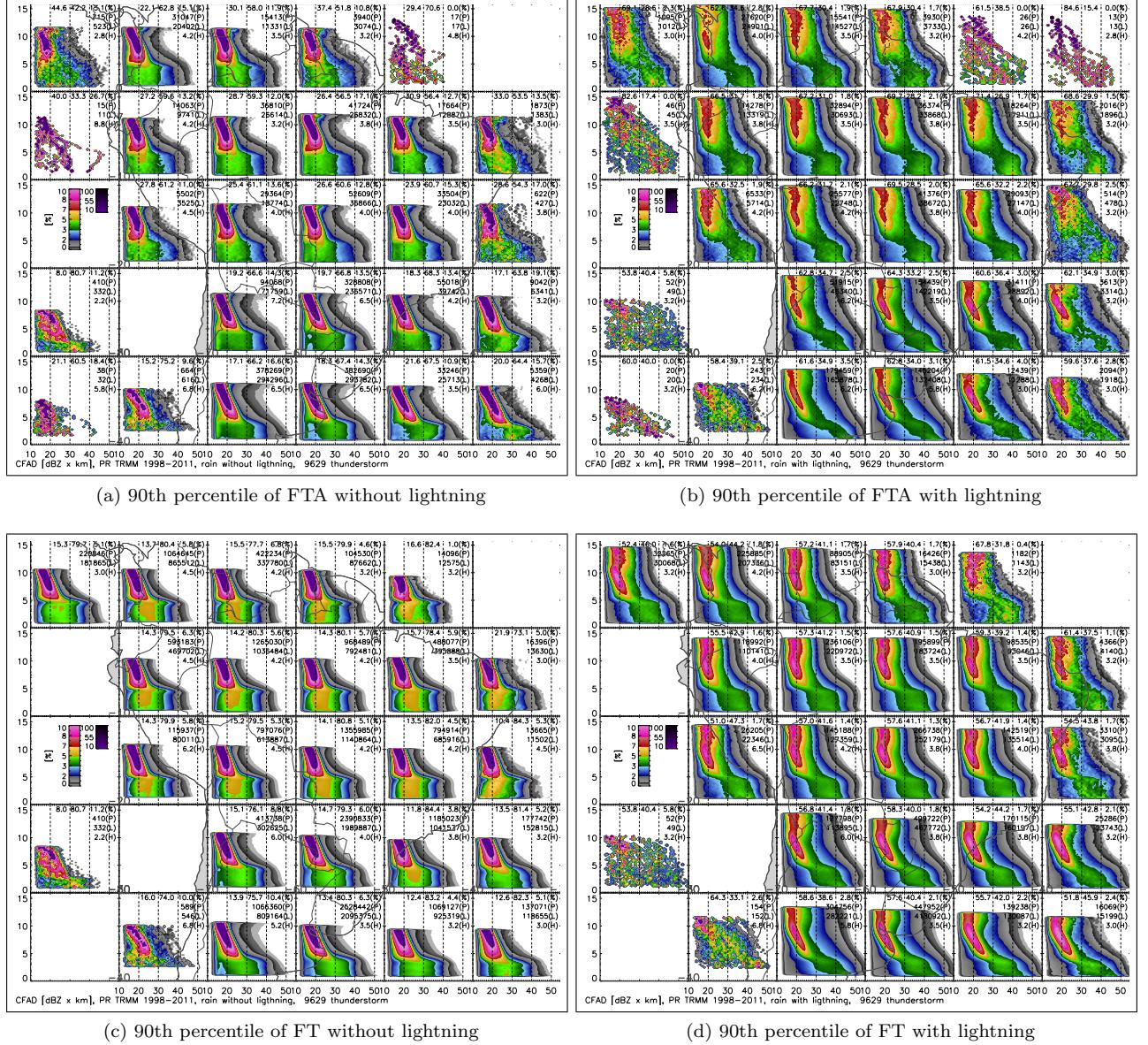


Figure 2: Contour frequency by altitude diagram for thunderstorms order by 90th of percentile of FTA and FT for the South America in each $10^\circ \times 10^\circ$. The precipitation profiles from PR-TRMM (1998–2011) were separated by with and without lightning. In each box we can check the percentage of convective, stratiform and others profiles respectively marked by (%), (P) the numbers of profiles computed, (L) the number of occurrency of reflectivity on level of maximum occurrency and (H) the level of maximum occurrency.

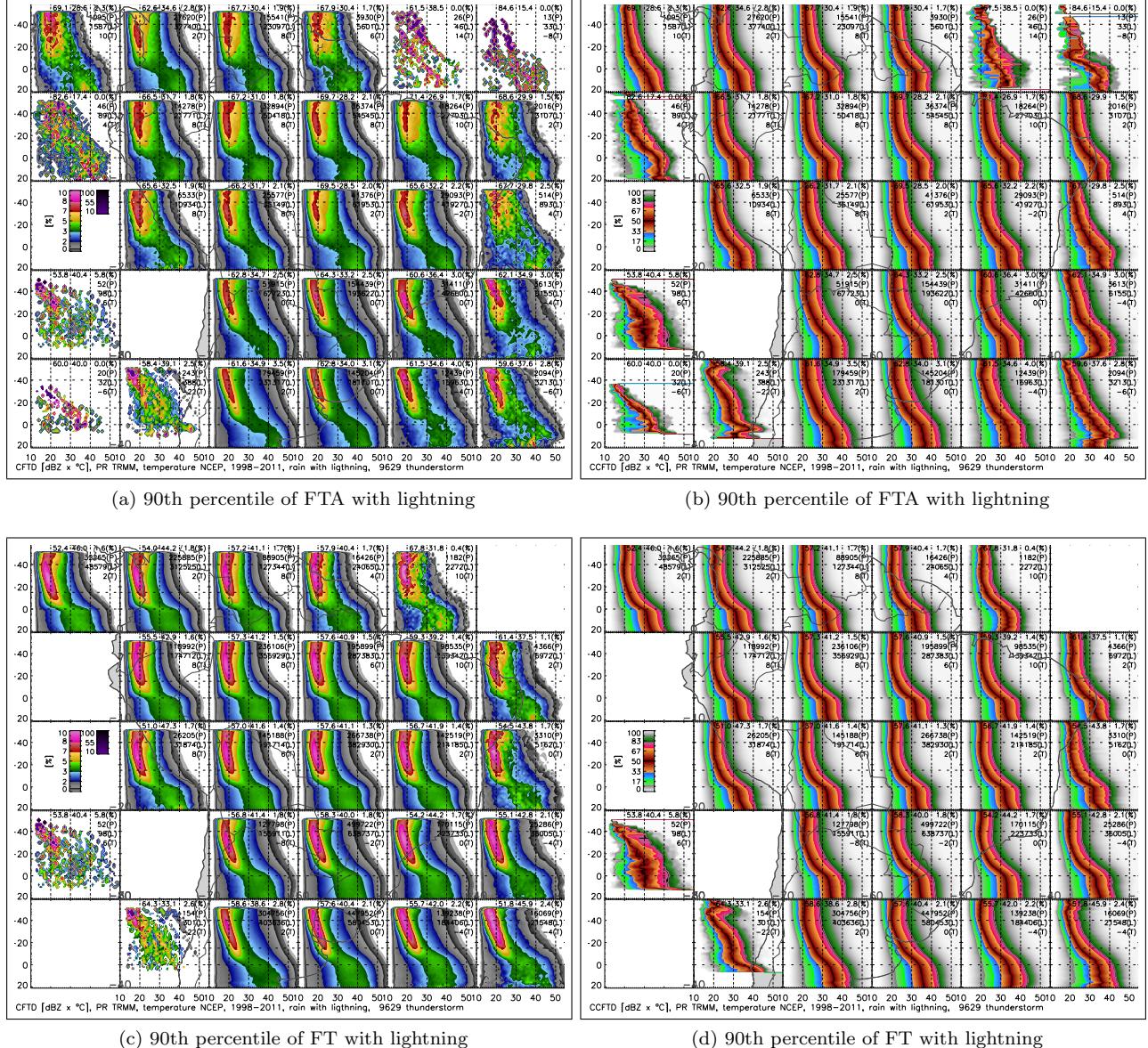


Figure 3: Contour Frequency by Temperature Diagram (CFTD) and contour cumulative frequency by temperature diagram (CCFTD) for thunderstorms order by 90th of percentile of FTA and FT for the South America in each $10^\circ \times 10^\circ$. The precipitation profiles from PR-TRMM (1998–2011) were separated by with and without lightning. In each box we can check the percentage of convective, stratiform and others profiles respectively marked by (%), (P) the numbers of profiles computed, (L) the number of occurrency of reflectivity on level of maximum occurrency and (H) the level of maximum occurrency.

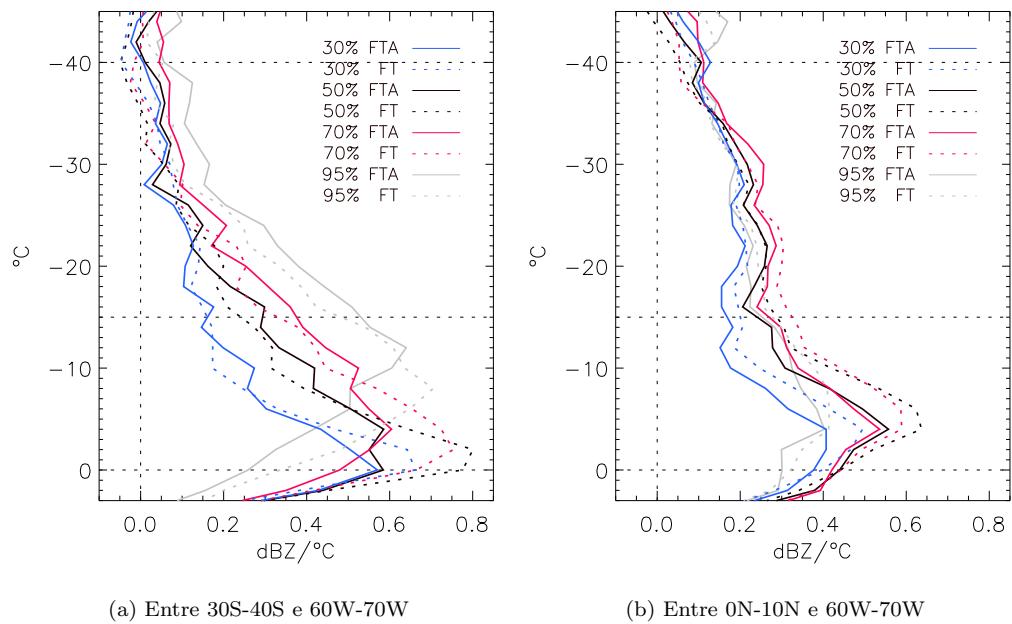


Figure 4: Derivadas das linhas de contornos da amostra de probabilidade cumulativa.



(a) Brightness temperature in Kelvin

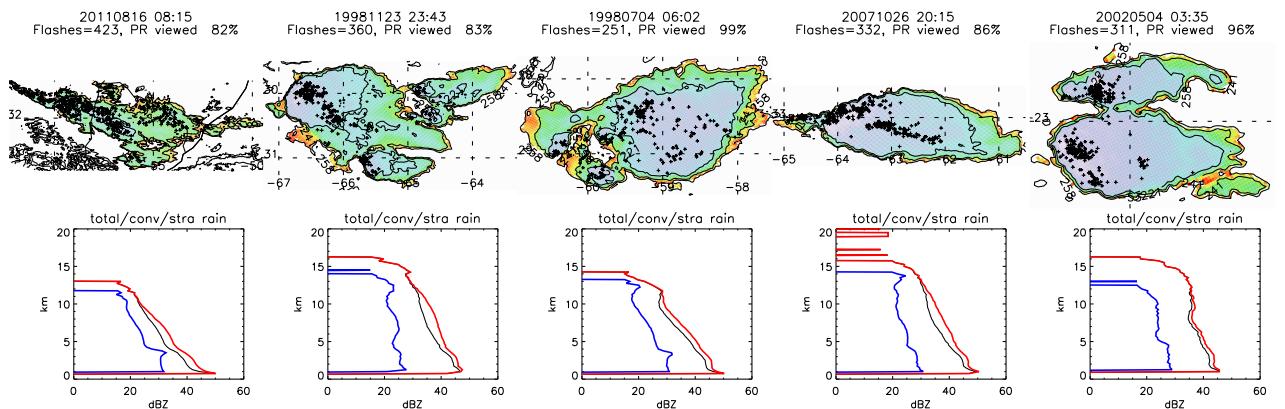
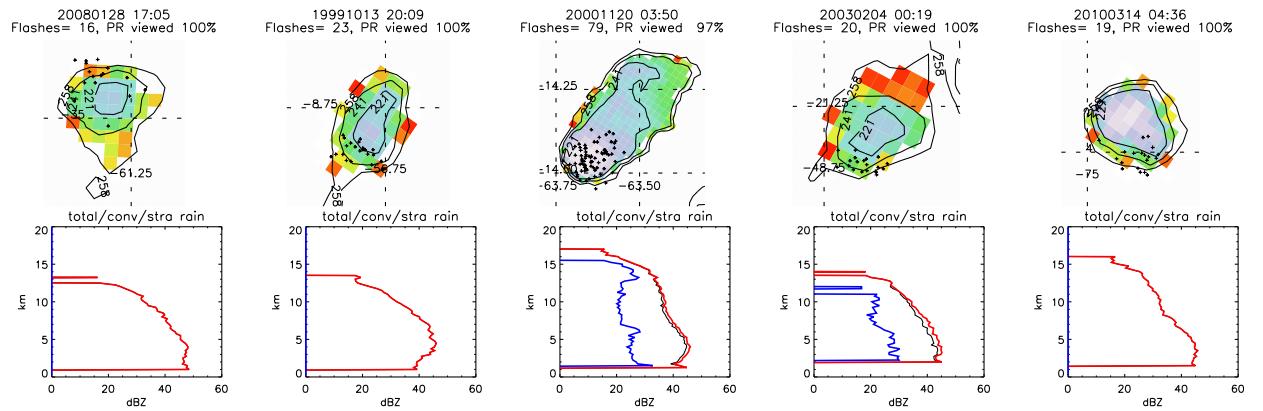


Figure 5: Top 5 das tempestades elétricas estudadas. Na parte superior a área do sistema observada pelo VIRS, com as isotermas de 221 K, 241 K, 258 K e os flashes. Na parte inferior o perfil médio de Z_{ef} para a chuva total (cor preta), convectiva (cor vermelha) e estratiforme (cor azul). Nesta figura foram selecionadas as cinco mais severas que possuíram no mínimo 50% de chuva válida identificada pelo PR.