

Caracterização das propriedades espaciais, temporais e físicas de Relâmpagos e Sistemas Convectivos de Mesoescala

Enrique Vieira Mattos
Luiz Augusto Toledo de Machado

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Caixa Postal 01 - 12630-000 – Cachoeira Paulista - SP, Brasil
{enrique.mattos, luiz.machado}@cptec.inpe.br

Abstract. The objective of this work is to present the cloud-ground lightning spatial and temporal distribution and the relationship between electrical discharges and the physical properties of the Meso-scale Convective System (MSC) for the determination of potential forecaster parameters of atmosphere electrical activity. This work combined data from GOES geostationary satellite infrared channels with cloud-ground lightning from the ground network supplied by the Brazilian Integrated Lightning Detection Network (RINDAT) during the period from July of the 2005 to February of the 2008. The results showed important relationship between orograph and urban effects to geographic distribution of the lightning on the study region. The combined utilization of the a algorithm that determine MSC's physical properties and the cloud-ground electrical discharge was possible to adjust curves that relates the lightning occurrence with size, brightness temperature and growth rate of the MSC, with very high coefficient of determination. The results indicate that these MCS proprieties possibly can be used as diagnosis and prognosis parameters of the occurrence of cloud-ground electrical discharges.

Palavras-chave: Cloud-Ground Lightning, Convective Clouds, physical properties, nowcasting, Relâmpago Nuvem-Solo, nuvens convectivas, propriedades físicas, previsão imediata do tempo.

1. Introdução

Anualmente diversas regiões do mundo são intensamente afetadas pela ocorrência de relâmpagos, indubitavelmente devida a sua natureza agressiva e destruidora. O Brasil, por sua proximidade ao equador e extensa área territorial é atingido por cerca de 100 milhões de descargas elétricas por ano (Pinto Jr e Pinto, 1996), causando prejuízos aos setores de energia elétrica, telefonia e telecomunicações além de incêndios florestais e mortes. Por outro lado, os Sistemas Convectivos de Mesoescala (SCM) são os principais responsáveis pela precipitação e eventos extremos na região tropical. Desta forma, a utilização conjunta de propriedades físicas de SCM obtidas através do canal infravermelho (IR, $10.2\mu\text{m}$ - $11.2\mu\text{m}$) de satélites geoestacionários e dados de descargas elétricas de detectores em solo, pode ser empregada como ferramenta de monitoramento e para previsão imediata de tempo para suporte a mitigação de eventos extremos.

Esses intensos fenômenos elétricos atmosféricos são originados pelo acúmulo de cargas elétricas dentro de nuvens de tempestade do tipo Cumulonimbus (Cb). Quebrada a rigidez dielétrica ocorre um rápido movimento de elétrons entre a região de cargas positivas e negativas. Portanto, as nuvens convectivas Cb inseridas dentro dos SCM são extremamente eficazes na produção de atividade elétrica.

A análise da atividade elétrica e convectiva feita em muitos países é realizada utilizando ferramentas como sensores de relâmpagos em solo, radares e satélites. Apesar de radares e detectores de relâmpagos em solo determinarem de forma precisa parâmetros como: localização, instante de ocorrência de relâmpagos e propriedades físicas de nuvens convectivas, essas informações são limitadas para regiões relativamente próximas a esses instrumentos. Assim o uso de dados de relâmpagos acoplados com dados de temperaturas de brilho (T_B) no canal IR do satélite GOES (*Geostationary Operational Environmental Satellite*), tem-se tornado uma importante ferramenta para determinação de parâmetros de severidade e prognóstico em regiões onde não se dispõe de uma vasta rede de detectores e radares, como em regiões de florestas tropicais e regiões oceânicas. Essa importância deve-se

principalmente pela boa resolução temporal (15 minutos) e espacial (4 km x 4 km) proporcionada pelos satélites geoestacionários.

No Brasil, um método para essas análises de identificação e previsão de propagação de SCM em curto prazo de tempo utilizado operacionalmente é a técnica FORTRACC (*Forecast and Tracking of Active Convective Cells*), implementado na Divisão de Satélites e Sistemas Ambientais (DSA) pertencente ao Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (CPTEC/INPE). Este algoritmo determina as trajetórias e ciclo de vida desses sistemas através de imagens sucessivas do IR, com base nas características morfológicas (reconhecimento de padrões) e a superposição de áreas de SCM entre essas imagens (Vila et al, 2008).

Diante do exposto acima, este trabalho tem o objetivo de apresentar uma análise da distribuição espacial de relâmpagos no estado de São Paulo ocorridos entre os anos de 2005 a 2008, seguidos pela apresentação da caracterização do ciclo diurno de propriedades físicas de SCM e as relações de algumas dessas propriedades físicas com as descargas elétricas, a partir da utilização de imagens sucessivas no IR do satélite GOES e dados de relâmpagos, cujos resultados permitirão em um futuro breve determinar parâmetros de severidade e prognóstico da atividade elétrica em SCM para serem utilizados em previsão imediata do tempo.

2. Área de estudo e Dados

A área escolhida para a realização desse estudo é o estado de São Paulo, que se localiza entre as coordenadas geográficas 44 Oeste e 53 Oeste; e 19 Sul e 26 Sul. Esta região foi escolhida por possuir a melhor e mais homogeneia cobertura da Rede Integrada Nacional de Detecção de Descargas Elétricas (RINDAT), contando com uma eficiência de detecção de descargas elétricas maior que 90 %. Portanto, para a realização desse trabalho nesta região de estudo, foram utilizados dados de descargas elétricas da Rindat e imagens do satélite GOES.

Os dados utilizados da Rindat constituem-se basicamente do horário e localização de ocorrência de descargas elétricas para o período de Julho de 2005 a fevereiro de 2008. Nestes arquivos, a quantidade de relâmpagos ocorridos em uma determinada área é contabilizada a cada intervalo de 5 minutos.

Com relação aos dados do satélite GOES, foram utilizados T_B do canal IR de imagens em projeção satélite entre Julho de 2005 e Fevereiro de 2008 obtidas do banco de dados do DSA/CPTEC/INPE. Entre Julho de 2005 e Abril de 2007 foram utilizados os dados do GOES-12, com resolução temporal de 30 minutos, após essa data o satélite geoestacionário operacional na América do Sul foi o GOES-10 com resolução espacial de 15 minutos. Ambos os satélites apresentam uma resolução espacial no ponto sub-satélite de 4 km x 4 km.

3. Metodologia

No intuito de avaliar e caracterizar a ocorrência de relâmpagos na região de estudo durante o período de 2005 a 2008 realizou-se uma análise preliminar da distribuição espacial de ocorrência de relâmpagos a partir dos dados fornecidos pela Rindat. Para tanto, calculou-se uma média de ocorrência de relâmpagos entre os quatro anos para a área de estudo, utilizando uma grade com resolução espacial de 4 km x 4 km (a mesma resolução espacial do satélite GOES). Desta forma, este resultado permitiu avaliar o comportamento espacial médio dos relâmpagos no estado de São Paulo, podendo avaliar os efeitos das mega cidades (poluição, aerossóis e ilhas de calor), orografia e fatores meteorológicos sobre a ocorrência desses fenômenos elétricos atmosféricos.

Depois de caracterizado a distribuição espacial de relâmpagos na região de estudo, realizou-se uma análise para avaliar a evolução temporal diurna do número de nascimentos

espontâneos de SCM, ocorrência de relâmpagos e de algumas propriedades físicas de SCM ocorridos durante o período de Julho de 2005 à Fevereiro de 2008. Foi realizada também uma caracterização da relação existente entre o número de raios dos SCM e algumas dessas propriedades físicas determinadas pelo FORTRACC. Esta análise inédita permitiu conhecer melhor a dinâmica dos SCM, bem como os possíveis parâmetros preditores da atividade elétrica da convecção.

Para a realização dessa segunda etapa foi utilizado um banco de dados que se constitui basicamente das propriedades físicas dos SCM durante seu ciclo de vida e a respectiva quantidade de relâmpagos para cada imagem no IR do satélite GOES. Este banco de dados foi processado operacionalmente na DSA/CPTEC/INPE utilizando a técnica FORTRACC e dados da Rindat. Durante este processamento este algoritmo utiliza o limiar de 235 K e 210 K do satélite GOES para definir um SCM e célula convectiva em seu interior, respectivamente. Assim, um SCM é definido como uma área de nuvem com no mínimo 90 *pixels* (aproximadamente 1440 Km²) e, posteriormente, o algoritmo produz uma série temporal das principais características morfológicas e radiativas como: localização, tamanho, taxa de expansão normalizada, eixo maior e menor de uma elipse, ângulo de inclinação, temperatura média e mínima e outros parâmetros dos SCM (Vila et al, 2008).

O acoplamento entre os dados de relâmpagos fornecidos pela rede Rindat com as propriedades físicas determinadas pelo algoritmo de rastreamento de SCM é realizado de forma que é contabilizado o número de ocorrência de relâmpagos entre 15 minutos antes da passagem do satélite e 15 minutos depois (no caso do GOES-10 são 7,5 minutos antes e 7,5 minutos depois), assim para cada *pixel* de imagem do IR tem-se o número de relâmpagos ocorridos e as respectivas propriedades físicas do SCM que originou as descargas elétricas.

Realizado o processamento desse banco de dados, foi levantado o ciclo diurno de nascimentos espontâneos de SCM ocorridos durante o período de estudo, variação diurna do número total de raios para este período e das propriedades físicas: fração convectiva (expressa pela razão do tamanho médio dos núcleos com $T_B < 210$ K do SCM pela sua área total) e a taxa de expansão normalizada (A_e), de forma que esta última é determinada pela seguinte relação:

$$A_e = \frac{1}{A^*} \left(\frac{\partial A}{\partial t} \right), \quad (1)$$

sendo A^* a área média do SCM, δA a variação da área do SCM num intervalo δt (tipicamente 30 minutos).

Posteriormente, essa segunda etapa foi finalizada através do levantamento estatístico de histogramas de frequência relativa referente ao tamanho (raio efetivo) dos SCM durante seu ciclo de vida. Assim, para cada instante do ciclo de vida dos SCM verificou-se o seu tamanho e a respectiva quantidade de raios, dessa forma construiu-se histogramas de tamanhos dos SCM que apresentaram raios e um para os que não apresentaram. Em seguida, levantaram-se curvas de dispersão que relacionam cada intervalo de classe do histograma de tamanho com o respectivo número médio de raios e a densidade de raios, sendo a última expressa pela razão entre o número de raios pela área total do SCM. Foram também montadas curvas de dispersão que relacionam o número médio de raios com a A_e e com a temperatura mínima média do *kernel* de 9 *pixels* (T_{min9}) dos SCM. Sendo que a variável T_{min9} corresponde à temperatura média dos nove *pixels* mais frios do SCM para uma determinada imagem no IR.

4. Resultados e Discussões

Para a região de estudo no período analisado (2005-2008) foi registrada pela rede Rindat uma média de 1.888.579 relâmpagos. A distribuição geográfica média dessa densidade de relâmpagos (eventos/km². ano) revelou (Figura 1), que para quase todo o estado de São Paulo

ocorreu mais do que quatro raios por quilometro quadrado por ano. Observa-se também uma faixa de densidade de raios bem definida a partir da região metropolitana da cidade de São Paulo, passando por Campinas, São Jose dos Campos e atingindo a cidade de Rezende no estado do Rio de Janeiro. Esses resultados evidenciam a associação da orografia com a incursão freqüente de sistemas frontais nesta região, visto que a leste desta região esta a Serra da Mantiqueira, a qual estaria induzindo a formação de tempestades convectivas ao longo dessa encosta. A brisa marítima em associação com esta região montanhosa também seria possivelmente um dos fatores locais que estaria influenciando a formação e a intensificação da convecção nesta região.

A ocorrência significativa bem definida de raios também sobre as Megacidades como São Paulo (a cidade com maior densidade de raios 14 raios/km². ano), São José dos Campos, e Campinas, sugere possivelmente a relação entre o efeito de urbanização (poluição, densidade populacional e ilhas de calor) com o aumento de ocorrência de raios nas grandes cidades. Naccarato (2006) realizou um estudo climatológico de seis anos de dados de raios no estado de São Paulo e encontrou evidencias que a maior ocorrência de raios nesses centros urbanos estaria associada a uma alteração na estrutura elétricas das nuvens convectivas devido ao aumento da poluição urbana (associado ao aumento de núcleos de condensação) e as ilhas de calor (alteração da circulação local). Porém esses resultados preliminares expostos aqui, apenas permitem apresentar os fatos e sugerir as hipóteses, visto que este estudo é complexo (devido às muitas variáveis envolvidas) e necessitaria de um estudo mais detalhado para indicar os fatores predominantes que caracterizam essa distribuição geográfica de raios nesta região de estudo.

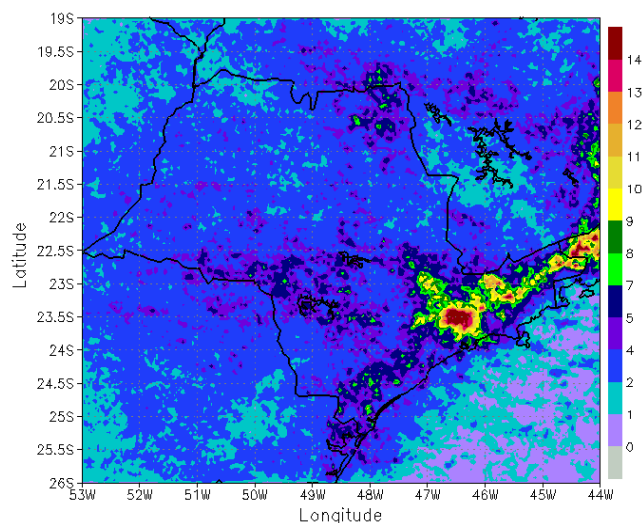


Figura 1. Mapa de densidade de relâmpagos médio anual (relâmpagos/km². ano) com resolução de 4 km para a região de estudo, para quatro anos de dados consecutivos (2005-2008).

Durante a análise do ciclo diurno das propriedades físicas dos SCM obtido pelo algoritmo FORTRACC, foram identificadas para a região de estudo a ocorrência de 8.158 SCM entre os anos de 2005 e 2008. Observa-se que os nascimentos espontâneos dos SCM (Figura 2(a)) podem ocorrer a qualquer hora do dia, porém com uma preferência entre as 13 horas local e 23 horas local. O favorecimento do maior número de nascimentos durante a tarde e as primeiras horas da noite essa associado ao caráter termodinâmico da convecção (horário de máxima insolação).

A evolução temporal diurna das propriedades físicas (Figura 2(b)), como número total de raios dos SCM, taxa de expansão normalizada e fração convectiva mostraram importantes características físicas e dinâmicas dos SCM. Nota-se nitidamente um máximo de ocorrência

de raios bem definido às 16 horas, basicamente 3 horas após o máximo da A_e e da fração convectiva. Apesar da fração convectiva não ter apresentado um comportamento perfeitamente bem definido, mostra-se que a máxima fração de células convectivas (células com topos com $T_B < 210$ K) é alcançada no instante de máximo crescimento médio dos SCM (próximo às 13 horas local), este fato revela a estreita relação entre a máxima insolação diária e a dinâmica interna dos SCM (correntes ascendentes e descendentes).

Nota-se também um crescente aumento da atividade elétrica a partir das 10 horas em consonância com um aumento da taxa de crescimento dos SCM, sendo alcançada a maior taxa de crescimento às 13 horas e o máximo de raios às 16 horas. Outro fator importante é que esse máximo de raios ocorre quando a A_e esta próxima de zero, esses resultados indicam que a dinâmica interna do SCM influencia de modo direto na formação de gelo e posterior eletrização das nuvens, de tal forma que o máximo de raios é observado próximo a fase de maturação do SCM.

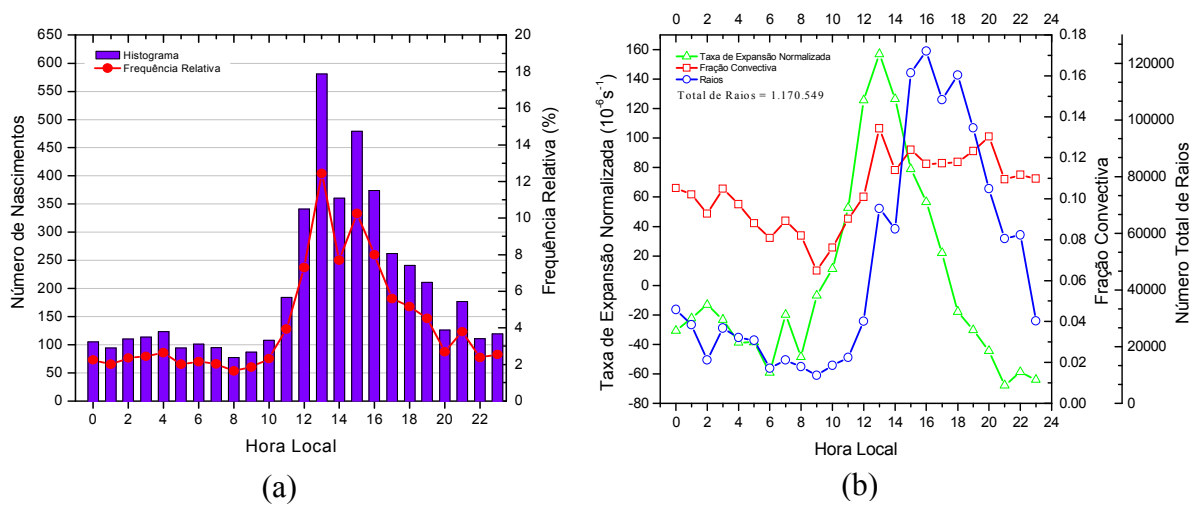


Figura 2. (a) Distribuição horária de frequência total de nascimentos espontâneos de SCM e (b) distribuição horária média da Taxa de Expansão Normalizada ($10^{-6} s^{-1}$), Fração Convectiva e o Número Total de Raios dos SCM detectados pelo Fortrarcc.

Analisado o ciclo diurno dessas propriedades físicas, dispõe-se agora avaliar e caracterizar a relação de alguns desses parâmetros com as respectivas descargas elétricas, para a determinação de algum parâmetro predictor da atividade elétrica. A figura 3 apresenta a curva ajustada para a distribuição de raio efetivo que não tiveram raios (curva azul) e para os que apresentaram raios (curva vermelha) em algum momento do ciclo de vida dos SCM.

Observa-se que há em geral uma predominância de SCM pequenos (com raio efetivo aproximadamente de 44 km) para os dois grupos, porém há 30 % mais eventos de tamanho de SCM sem raios na primeira classe em relação aos com raios da mesma classe. Verifica-se também que para classes de raio efetivo maior que 336.5 km a frequência de classe para os dois grupos são substancialmente pequena, sendo que diferenças significativas entre essas duas distribuições são observadas abaixo desse valor. Portanto, esses resultados indicam que há uma predominância de SCM pequenos (80 % dos casos no grupo sem raios e 60 % dos casos no com raios, apresentam valor de raio efetivo menor que 66,5 km).

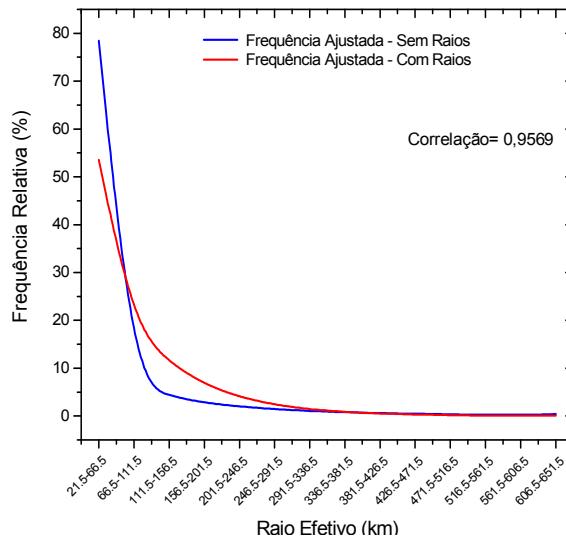


Figura 3. Análise comparativa entre a curva ajustada para o histograma de Raio Efetivo (km) de membros de SCM que não apresentaram raios (curva azul) e para os que tiveram raios (curva vermelha).

A figura 4(a) apresenta a relação encontrada entre o tamanho (raio efetivo) dos SCM e o respectivo número médio de raios para cada intervalo de classe utilizado na Figura 3. Observa-se claramente que existe uma relação aproximadamente linear entre o tamanho do SCM e o associado número médio de raios. Isto sugere que os maiores SCM como um todo, devido a sua maior área e dinâmica possivelmente produzem muito mais raios do que os pequenos. Altos valores de desvio padrão nas classes de maiores raio efetivo, são encontrados devido o menor número de eventos nas mesmas como discutido na figura 3.

Em contrapartida a esses resultados, a figura 4(b) mostra que a maior densidade de raios (raios/pixel) é encontrada para SCM pequenos. Como sugerido por Frediane et al (2004) isto é um indicativo que os SCM grandes têm uma significativa parte de sua área sendo estratiforme (mais de 80%), enquanto que os menores SCM possivelmente possuem uma parte significativa de sua área sendo convectiva (área mais propícia a ocorrência de raios). Logo estes resultados sugerem que existe uma dinâmica diferenciada entre os SCM pequenos e grandes, porém os maiores SCM apresentam maior número de raios como um todo.

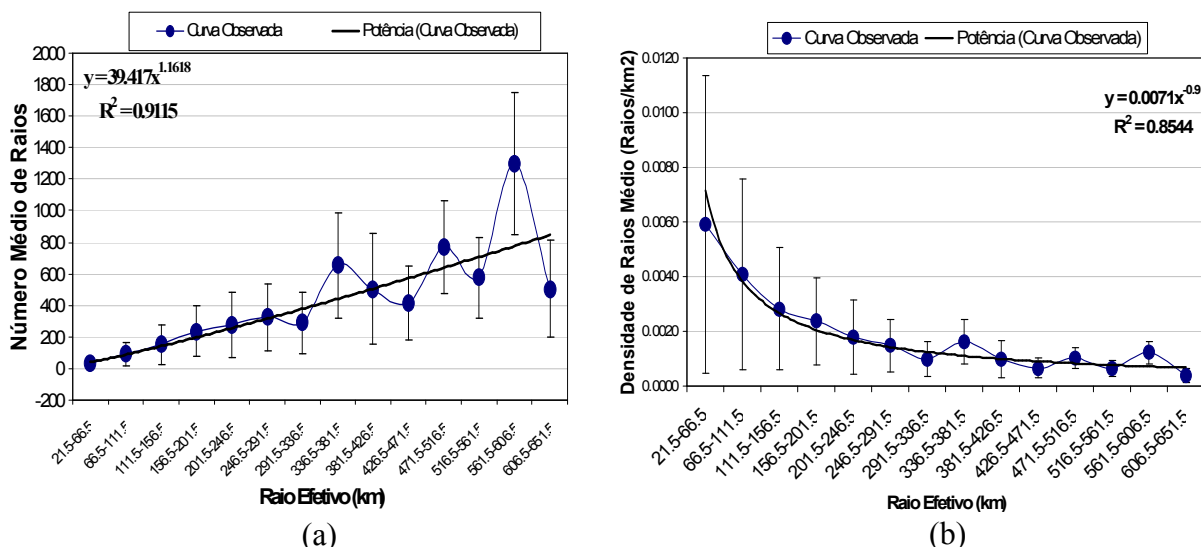


Figura 4. (a) Variação do número médio de raios e (b) Densidade de Raios Média (raios/km²) em função do Raio Efetivo do SCM. seu desvio padrão e curva ajustada.

A taxa de expansão normalizada (Figura 5) mostrou também uma relação aproximadamente linear (coeficiente de ajuste maior que 0.85) com a ocorrência média de raios. Este fato sugere que quanto maior a taxa de crescimento do SCM, mais intenso são os movimentos verticais em seu interior, propiciando a formação de gelo e posterior intensificação dos processos de eletrização das nuvens convectivas. Portanto a A_e mostra-se um parâmetro importante para análise e previsão da atividade elétrica.

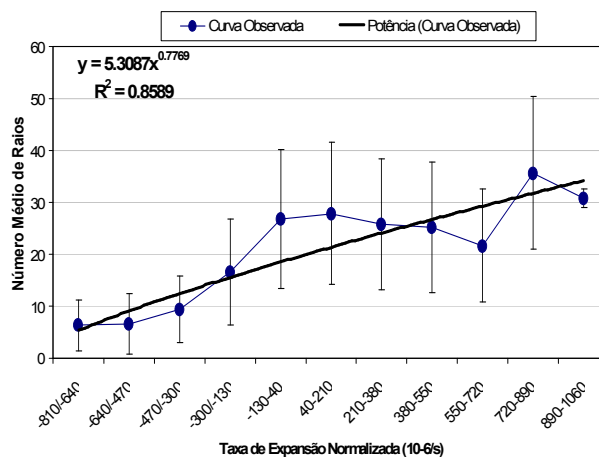


Figura 5. Variação do número médio de raios em função da taxa de expansão Normalizada ($10^{-6} s^{-1}$), seu desvio padrão e curva de potência ajustada para a ocorrência média de raios.

Por fim, a análise da propriedade física T_{min9} , que corresponde à temperatura média dos nove *pixels* mais frios pertencentes ao SCM, encontrou-se uma forte relação exponencial decrescente entre essa propriedade e o número médio de raios (com alto valor do coeficiente de ajuste, maior que 0.98). Observa-se que para temperaturas abaixo de 213 K há um rápido crescimento na ocorrência de raios. O relativamente alto desvio padrão para baixas temperaturas é devido a pouca ocorrência de eventos com essas temperaturas. Desta forma, esses resultados indicam o fato que quanto menor a temperatura do topo da nuvem maior a possibilidade de formação de gelo e possivelmente de eletrização dessas nuvens convectivas. Assim, a T_{min9} sugere ser um importante parâmetro para ser utilizado para diagnosticar e prever a atividade de raios.

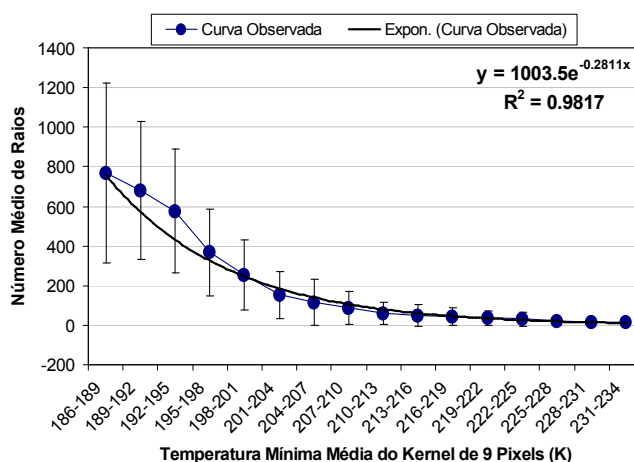


Figura 6. Variação do número médio de raios em função da Temperatura Mínima Média do *Kernel* de 9 *Pixels* (K), seu desvio padrão e curva exponencial ajustada para a ocorrência média de raios.

5. Conclusões

Os resultados obtidos neste trabalho indicam que a utilização conjunta de dados de T_B no canal infravermelho provenientes de satélites geoestacionários com dados de relâmpagos de sensores de solo, mostra-se uma importante ferramenta para caracterizar a atividade convectiva e elétrica, com vista na determinação de parâmetros diagnósticos e prognóstico da ocorrência de raios.

A distribuição geográfica de raios na região de estudo para o período de 2005 a 2008 evidenciou que fatores como orografia, urbanização (poluição e ilhas de calor) e meteorológicos são os possíveis determinantes da configuração da distribuição de raios nesta região.

A caracterização do ciclo diurno de raios, mostrou um máximo de ocorrência bem definido em torno das 16 horas locais. Já durante a análise das propriedades físicas encontrou-se uma forte correlação do tamanho, taxa de expansão normalizada e temperatura do SCM com o número de ocorrência de raios. Estes resultados proporcionaram a esclarecer os possíveis limiares de cada propriedade física para o início da atividade elétrica.

Apesar dos importantes resultados encontrados neste trabalho, ainda necessita-se de algumas análises mais detalhadas, para caracterizar fielmente a atividade elétrica de SCM. Para tanto, esta em andamento a análise para determinar a fase do ciclo de vida dos SCM de maior ocorrência de raios e também a relação de propriedades microfísicas de partículas de gelo com os relâmpagos através de dados em microondas de satélites de órbita polar. Desta forma, esta caracterização inédita irá permitir em um passo futuro a utilização desses parâmetros para a previsão de ocorrência de raios, para a mitigação de desastres associados a esses eventos extremos.

Agradecimentos

Este trabalho faz parte da dissertação de Mestrado sendo desenvolvida pelo autor, no curso de Pós-Graduação em Meteorologia do INPE. Sendo assim os autores agradecem o suporte financeiro dado pela CAPES durante a elaboração da dissertação e ao DSA/CPTEC pelo fornecimento dos dados.

Referências Bibliográficas

Frediani, M. E.; Morales, C. A.; Machado, L. A. T. Caracterização dos Sistemas Convectivos durante Dry-to-Wet 2002. In: **Third LBA Scientific Conference**, 27-29 Julho, 2004, Brasília. Disponível em: <<http://mtcm15.sid.inpe.br/col/cptec.inpe.br/walmeida/2004/08.09.08.31/doc>> Acesso em: 10 out. 2008.

Naccarato, K. P. **Análise das características dos relâmpagos na região sudeste do Brasil**. 2005. 364 p. (INPE-14083-TDI/1069). Tese (Doutorado em Geofísica Espacial) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. São José dos Campos. 2006.

Pinto Jr., O.; Pinto, I. R. C. A. **Relâmpagos**. São Paulo: Editora Brasiliense, 1996. 105 p.

Vila, D. A.; Machado, L. A. T.; Laurent, H.; Velasco, I. Forecast and Tracking the Evolution of Cloud Clusters (ForTraCC) Using Satellite Infrared Imagery: Methodology and Validation. **Weather and Forecasting**, v. 23, n. 2, p. 233–245, 2008.