

Condições sinóticas para geração de *sprites* e outros eventos luminosos transientes (TLEs) sobre o Paraguai em 04/03/2006

Rodrigo da Rosa Azambuja¹, Fernanda de São Sabbas Tavares², Nelson Jorge Schuch¹.

(1) Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais – CRS/INPE-MCT em colaboração com o Laboratório de Ciências Espaciais de Santa Maria – LACESM/CT-UFSM, Santa Maria, RS, Brasil.

(2) Divisão de Aeronomia – DAE/CEA/INPE –MCT, São José dos Campos, SP, Brasil.

Copyright 2009, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation during the 11th International Congress of the Brazilian Geophysical Society held in Salvador, Brazil, August 24-28, 2009.

Contents of this paper were reviewed by the Technical Committee of the 11th International Congress of the Brazilian Geophysical Society and do not necessarily represent any position of the SBGf, its officers or members. Electronic reproduction or storage of any part of this paper for commercial purposes without the written consent of the Brazilian Geophysical Society is prohibited.

Abstract

The Transient Luminous Events (TLEs) are light emissions that occur in middle and upper atmosphere and are associated with thunderstorms with high electrical activity. Usually these events are associated with electric fields produced in the occurrence of lightning. On March 04th, 2006 sprites and halos were observed above a storm over Paraguay from the Southern Space Observatory - SSO/CRS/INPE-MCT, (29.4°S, 53.8°W, 480 m a.s.l.), São Martinho da Serra, RS, Brazil, during a field campaign. The formation of the mesoscale convective system that gave rise to the TLEs was favored by a combination of factors. The confluence of the north and south low level jets, the north carrying hot air and humidity from the Amazon, and the south carrying cold air from the frontal system to the region of formation of the storm, associated with high upward vertical velocity were fundamental to the development of MCS over Paraguay. 94 sprites were observed in this campaign, the majority occurred during the apex of the MCS, when the system had its larger area of clouds Cumulonimbus. This work shows the weather conditions that favored the formation of the MCS generating TLEs, and relate the TLEs observation with the development stages of the MCS.

Introdução

Os eventos luminosos transientes (TLEs / Transient Luminous Events) são fenômenos que ocorrem na média e alta atmosfera, associados a tempestades com alta atividade elétrica. Esses eventos são emissões luminosas geradas por campos elétricos produzidos por relâmpagos. Dentre esses eventos, destacam-se os *sprites*, *halos*, *jatos azuis* e *elves*. A Figura 1 mostra uma representação dos principais TLEs citados.

Os sprites muitas vezes aparecem com forma similar a uma “cenoura” ou colunas brilhantes que se estendem da mesosfera até a estratosfera (~40- 90 km) (Taylor, 2008). Geralmente os sprites estão associados a relâmpagos nuvem-solo positivos, que são os relâmpagos que partem da nuvem em direção ao solo transportando carga

positiva (Pinto Jr. e Pinto, 2000). Observações mostram que cerca de 85% dos *sprites* ocorrem após um relâmpago nuvem-solo (CG: cloud-to-ground) positivo (Boccippio et al., 1995).

Os *halos* são conhecidos como *sprite-halos*. Geralmente estão associados à *sprites*, porém os *halos* podem ocorrer de forma independente. Frequentemente, observações mostram que os *sprites* são precedidos ou acompanhados por um *halo* de luz difuso a uma altitude entre 70 e 80km (Tavares e Santiago, 2002).

Os jatos azuis são estreitos feixes de luz de coloração azulada que partem do topo das nuvens de tempestades se dirigindo para cima com tempo de vida da ordem de um décimo de segundo. O cone de luz formado por estes jatos tem amplitude média de 15 graus e se propaga com velocidade média da ordem de 100 km/h (Wescott et al., 1998). As emissões normalmente não ultrapassam 40km de altitude, porém foram observado fenômenos que alcançaram 70km de altitude, que foram chamados de *gigantic jets* ou jatos gigantes (Pasko et al., 2002).

Os *elves* são anéis de luminosidade avermelhada, que aparece na imagem da Figura 1 como uma estrutura circular um pouco acima do topo do *sprite*, isto é, na altura da região E ionosférica (cerca de 90km de altitude). *Elves* são gerados na base da ionosfera pelos pulsos eletromagnéticos (EMP) gerados por relâmpagos (Inan, 2002).

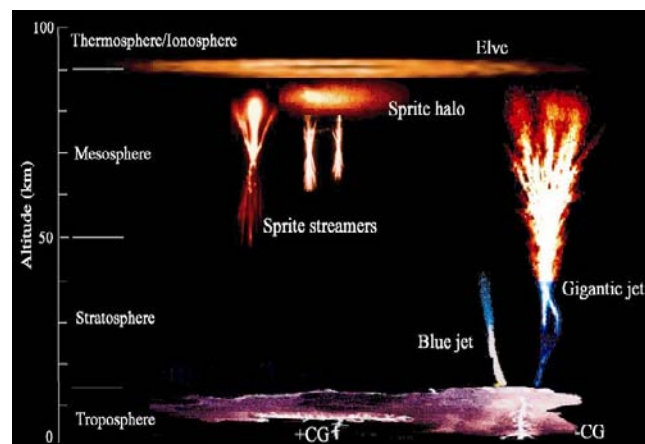


Figura 1 – Alguns dos principais TLEs (sprites, halos, elves, blue jets)

FONTE: http://smc.cnes.fr/TARANIS/GP_science.htm

Os TLEs ocorrem em tempestades com alta atividade elétrica, essas tempestades podem ser massas de ar isoladas, frentes frias, sistemas tropicais ou Sistemas Convectivos de Mesoescala (SCM). Os Sistemas Convectivos de Mesoescala (MCS) são constituídos por um aglomerado de nuvens convectivas e que apresentam área com contínua precipitação, que pode ser parcialmente estratiforme e parcialmente convectiva, possuem formas variadas (Houze, 1993).

Nos meses de fevereiro e março de 2006 foi realizada uma campanha para observação de *sprites* a partir do Observatório Espacial do Sul – OES/CRS/CIE/INPE – MCT. Nessa campanha *sprites* foram observados sobre uma tempestade na Argentina na noite de 22-23/02/06 e sobre uma tempestade no Paraguai na noite de 03-04/03/2006. Este trabalho é focado na segunda noite, durante a qual foram observados 94 eventos.

O trabalho apresenta a caracterização do cenário meteorológico sinótico que levou a formação do Sistema Convectivo de Mesoescala que originou os TLEs observados. Mostra a relação entre o número de eventos registrados e as células convectivas do sistema. Os dados analisados incluem imagens de satélite e mapas com dados de reanálise do NCEP/NOAA.

Metodologia

A localização do Observatório Espacial do Sul, situado no município de São Martinho da Serra, RS, Brasil, (29.4°S, 53.8°O, 480 m a.d.m.), a partir do qual a campanha foi realizada e mostrada na Figura 2(a). Durante a campanha, foram utilizadas duas câmeras Xybion (ICCD) para a filmagem dos eventos (Imagem 2(b)). Os vídeos gerados foram gravados em fitas DVC e estão sendo digitalizados e editados através de programas Adobe Premiere Pro Tryout e Jasc Paint Shop Pro. Os eventos foram filmados no período entre 01:38 UTC e 05:33 UTC.

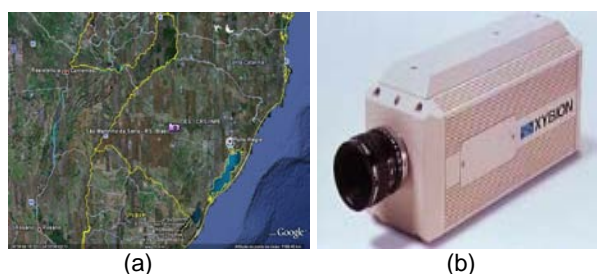


Figura 2 – (a) Localização geográfica do Observatório Espacial do Sul – OES/CRS/INPE-MCT, São Martinho da Serra, RS, Brasil. (b) Exemplo de uma Câmera ICCD Xybion utilizada na campanha.

Para identificação do Sistema Convectivo de Mesoescala atuante sobre a região de estudo e as nuvens Cumulonimbus (Cb), foram utilizadas imagens do satélite do Goes-12 no infravermelho (11 μ m). Nessas imagens, foram diminuídos os tons de cinza para uma melhor identificação da cobertura de nuvens. Estes padrões de nuvens são observados de acordo com o pixel das

imagens no canal infravermelho. Na imagem do canal infravermelho quanto mais branco brilhante for o pixel da imagem menor é a temperatura de brilho da superfície emissora. Quanto mais alto o topo da nuvem, mais brilhante ela aparecerá na imagem. Assim, nuvens espessas (Cb) são mais brilhantes que nuvens finas.

Foram utilizados dados de reanálise do NCEP (National Center for Environmental Prediction) disponibilizados pela National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). O NCEP/NOAA dispõe de dados para análise e previsão a partir de 1948 aos dias de hoje, estes dados estão disponíveis através da rede mundial de computadores. Um grande subconjunto desses dados é disponibilizado 4 vezes ao dia (00 UTC, 06 UTC, 12 UTC, 18 UTC) como seus valores médios diários. No trabalho foram utilizados mapas para as 00 UTC e 06 UTC dos campos de vetor vento e isolinhas de temperatura em 850hPa, vetor vento em 200hPa e velocidade vertical em 700hPa. Para a confecção dos mapas foi utilizado o programa *Grid Analysis and Display System* (GrADS).

Para detecção de umidade na área do SCM foram utilizadas imagens de satélite no canal de vapor d'água (6 μ m), e para auxiliar na identificação das células convectivas, utilizou-se imagens de satélites realçadas no canal do infravermelho (11 μ m). Ambas as imagens são do Goes-10 de projeção retangular.

Resultados

O Sistema Convectivo de Mesoescala (SCM) que se desenvolveu sobre o Paraguai teve origem devido um sistema frontal que iniciou sua trajetória a partir de uma ciclogênese que se configurou sobre o Rio Grande do Sul, Uruguai e Argentina no dia 03/03/2006.

No desenvolvimento do estudo foram definidos dois períodos para serem analisados: iniciação e dissipação. A primeira fase, que vai de 22:00 UTC a 01:00 UTC foi denominada período de iniciação, e é onde podemos identificar as células convectivas antes do seu desenvolvimento. A Figura 3a exemplifica o desenvolvimento convectivo da tempestade nesta fase, às 01:00 UTC do dia 04/03/2006. O período caracterizou-se por apresentar uma região onde havia o desenvolvimento de tempestades individuais (aglomerados convectivos), demarcados pelos círculos vermelhos. Estes aglomerados convectivos se desenvolveram e se uniram, formando o estágio em que o SCM atinge maior extensão.

A segunda fase, de 06:00 UTC a 09:00 UTC, foi denominada período de dissipação, quando o SCM se dissolveu, exemplificada na Figura 3b. Nessa fase houve uma diminuição significativa das nuvens Cumulonimbus (Cb). As imagens realçadas da Figura 3, no canal infravermelho, mostram os dois períodos citados anteriormente, demarcadas por um retângulo preto, que representa a área de interesse do SCM (área onde foram feitas as filmagens). Na imagem no canal infravermelho quanto mais branco brilhante for o pixel da imagem menor é a temperatura de brilho da superfície emissora.

Quanto mais alto o topo da nuvem, mais brilhante ela aparecerá na imagem. As imagens abaixo são realçadas, atribuindo a cor azul aos topos mais frios.

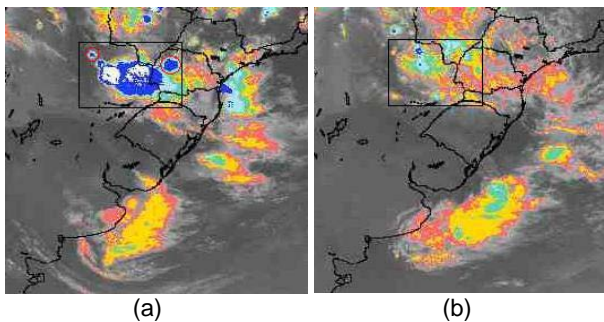


Figura 3 - Imagens realçadas no canal infravermelho de 04/03/2006, (a) 01:00 UTC, (b) 07:30 UTC. Fonte: <http://satelite.cptec.inpe.br> para o dia 04/03/2006.

A descrição das condições sinóticas associadas à atuação do SCM foi feita para as 00 UTC e 06 UTC, horários próximos às fases de iniciação e dissipação. Para a análise do evento utilizaram-se os seguintes campos: vetor vento e isolinhas de temperatura em 850hPa, vetor vento em 200hPa, velocidade vertical em 700hPa e imagens de satélite no canal de vapor d'água.

Os vetores de direção do vento em 850hPa às 00 UTC e 06 UTC de 04/03/2006, que indicam a ciclogênese no Hemisfério Sul devido seu sentido de rotação (horário) sobre o Rio Grande do Sul, Uruguai e Argentina, criados no CRS/INPE-MCT, são apresentados na Figura 4(a) e (b) respectivamente. Tal movimento de rotação, no sentido horário, caracteriza uma área de baixa pressão. As 00 UTC foi observado na Figura 4(a), relativa ao período de iniciação, um JBN (jato de baixos níveis) que trazia ar quente proveniente do norte que confluiu sobre a região de formação do SCM com ar mais frio vindo do sul, associado à frente fria (vetores demarcados pelo círculo vermelho). As 06 UTC (Figura 4(b)) horário marcado pela dissipação do SCM e dissipação das nuvens Cb, observou-se que ainda existia advecção de ar quente proveniente do norte, trazido pelo JBN (vetores demarcados pelo círculo vermelho). No mapa das 06 UTC não temos mais advecção fria, tendo em vista que o sistema frontal se deslocou para leste alterando a direção dos vetores vindos do sul que antes atingiam a região do SCM.

O sentido da direção do vento em conjunto com as isoterms é fundamental para a análise da advecção de temperatura. Considerando a região de interesse, sobre o Paraguai, temos ventos que sopram do quadrante norte no mapa acima e um cavamento nas isoterms no mapa da Figura 5(a). A combinação desses fatores indica uma advecção quente na área estudada durante o período de

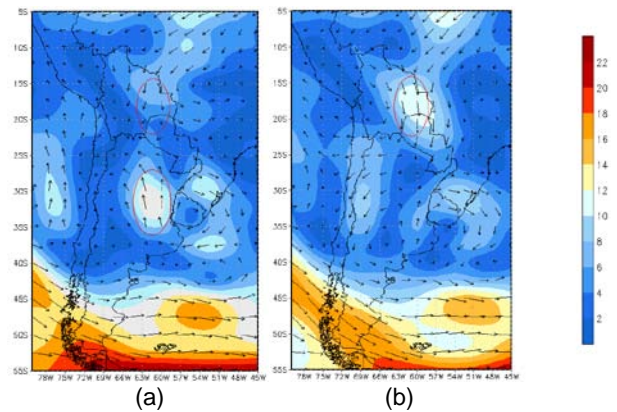


Figura 4 – Direção e Velocidade do Vento (m/s) em 850hPa, (a) 00 UTC, (b) 06 UTC.

iniciação. Regiões com advecção quente em 850hPa sofrem desestabilização e apresentam maiores chances para nebulosidade e precipitação na presença de umidade. Esta condição de instabilidade atmosférica favorece o desenvolvimento vertical das nuvens. No mapa das 06 UTC há um decréscimo de temperatura na área do SCM.

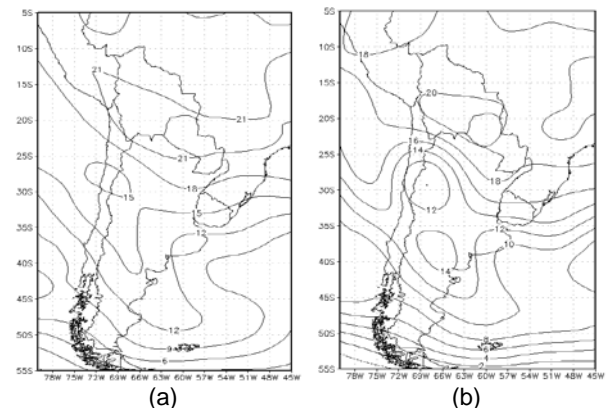


Figura 5 – Temperatura em 850hPa, (a) 00 UTC, (b) 06 UTC.

A imagem de satélite no canal de vapor d'água detecta a água em estado de vapor na atmosfera (Figura 6). Quanto mais brilhante for o pixel da imagem maior é a quantidade de vapor d'água. Esta imagem nos permite identificar o escoamento atmosférico, assim como a presença do jato em altos níveis (JAN). A partir das imagens de satélite no canal do vapor d'água abaixo, a primeira referente ao período de iniciação (Figura 6(a)) e a segunda ao de dissipação (Figura 6(b)), temos a presença de bastante umidade na fase de iniciação sobre a área do SCM e pouca umidade na fase de dissipação. Em ambas as imagens temos a presença do JAN (parte escura) sobre o Rio Grande do Sul e Uruguai, que será evidenciada a adiante no mapa de vento em altos níveis.

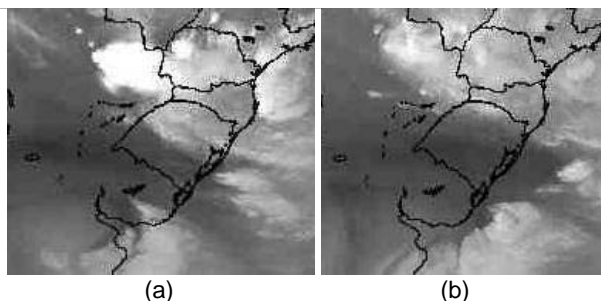


Figura 6 – Imagem no canal de vapor d’água – 04/03/2006, (a) 00:00 UTC, (b) 06:30 UTC. Fonte: <http://satelite.cptec.inpe.br> para o dia 04/03/2006.

A posição e intensidade dos centros de velocidade máxima do jato subtropical, além da curvatura do escoamento em altos níveis, são apresentados na Figura 7. A posição do jato confere com a imagem de satélite vista anteriormente (Figura 6), o jato está sobre o Rio Grande do Sul e o Uruguai. Pelo campo de vento das 00 UTC e 06 UTC, pode-se observar que, nos dois períodos (iniciação e dissipação) em 200hPa havia um JAN de oeste. Nos dois períodos de interesse do SCM, observou-se que os eixos dos JBN (norte) e JAN (oeste) eram aproximadamente ortogonais, o que segundo Ucellini & Johnson (1979) favorece o aumento da advecção de temperatura e a instabilidade convectiva.

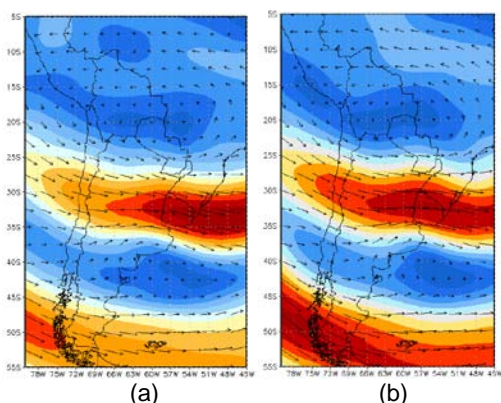


Figura 7 – Direção e Velocidade do Vento em 200hPa – 04/03/2006, (a) 00 UTC, (b) 06 UTC

A velocidade vertical, para as 00 UTC, temos movimentos ascendentes (valores negativos) sobre a região de estudo são mostradas na Figura 8. Para favorecer a formação de nuvens com desenvolvimento vertical (nuvens cumulonimbus), é necessário que a parcela de ar úmida seja resfriada até que atinja seu ponto de orvalho (saturação) e que a atmosfera esteja instável. A forma mais comum de resfriamento de parcelas de ar na atmosfera é pela expansão adiabática promovida pelo ar ascendente. Esses valores estão associados à desestabilização da atmosfera, conseqüentemente, à nebulosidade e precipitação. No mapa as 00 UTC, temos valores muito negativos no norte da Argentina, em regiões com alto teor de umidade visto anteriormente na imagem de satélite. Quando regiões de amplo e intenso movimento ascendente se conjugam

com regiões de alta umidade, há probabilidade de maiores taxas de precipitação. No mapa das 06 UTC temos movimento ascendentes, porém, como visto na imagem de satélite de vapor d’água das 06 UTC, a uma significativa diminuição de umidade na atmosfera.

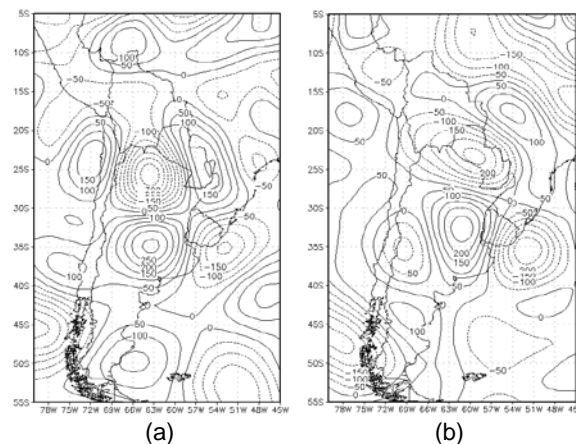


Figura 8 – Velocidade Vertical (mb/dia) - 04/03/2006, (a) 00 UTC, (b) 06 UTC.

Na noite do dia 04/03/2006 foram feitas 4 horas e 55 minutos de filmagem dos eventos, esse período compreendeu entre às 01:38 UTC e 05:33 UTC. Durante a campanha foram observadas a formação de diversas células convectivas no SCM. A seqüência das imagens a

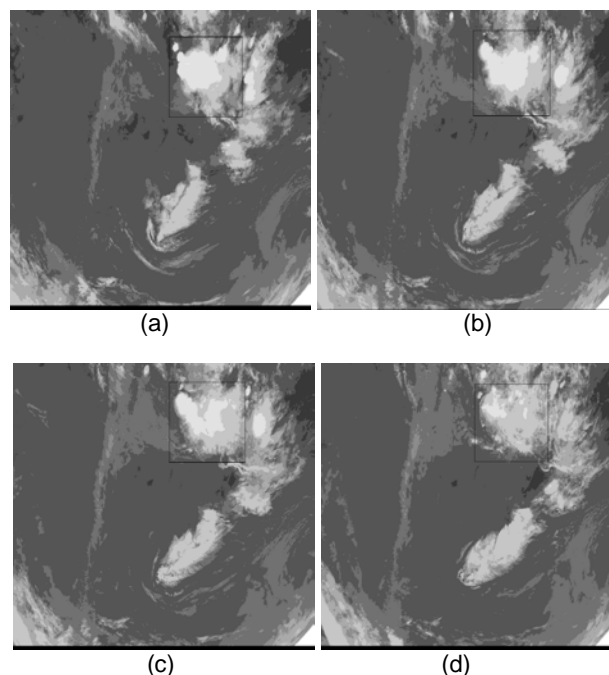


Figura 9 – Imagens no canal do IR, (a) 01:09 UTC, (b) 02:09 UTC, (c) 04:09 UTC, (d) 06:40 UTC.

Apresentada na Figura 9 mostra quatro estágios do SCM que remetem o processo de crescimento das células convectivas até sua união e dissipação. As nuvens do tipo Cb se formam em uma atmosfera bastante instável, o ar rapidamente em ascensão causa à nuvem um grande desenvolvimento vertical. Nas imagens de satélites meteorológicos essas nuvens aparecem muito brilhantes na imagem IR, por ser uma nuvem muito densa e com o topo muito alto, portanto com a temperatura muito baixa (topo frio). Nessas imagens, no canal do IR, foram diminuídos os tons de cinza para uma melhor visualização das células convectivas e seu processo de dissipação de nuvens Cumulonimbus (Cb).

Durante a campanha foram observados um total de 94 sprites, até o horário das 02:09 UTC (Figura 9(b)) foram observados 14 eventos (14,9% dos eventos). A imagem de satélite na Figura 9(b) mostra que as células convectivas que estavam separadas na imagem anterior se desenvolveram e se uniram, formando uma grande área de nuvens Cb, representada pela área de branco mais intenso na figura. A imagem de um *sprite* que ocorreu dentro do período de observação até as 02:09 UTC, teve um evento registrado as 01:40:13.224 UTC, Figura 10.



Figura 10 – Imagem de um *sprite* - 01:40:13.224 (04/03/2006), observado no OES/CRS/INPE-MCT.

No período entre 02:09 UTC (Figura 9(b)) e 04:09 UTC (Figura 9(c)) foram observados 66 *sprites* (~70,2% dos eventos). A imagem das 03:09 UTC não foi mostrada anteriormente, mas no período entre 02:09 UTC e 03:09 UTC foram registrados a maioria dos eventos, um total de 57 *sprites* (~61% dos eventos). Nesse período temos o estágio onde o SCM atinge sua maior extensão e maior área de nuvens Cb. Resultados semelhantes foram encontrados por São Sabbas & Sentman (2003), onde foi observado que o número máximo de *sprites* ocorreu



Figura 11 – Imagem de um *sprite* - 02:39:51.564 (04/03/2006), observado no OES/CRS/INPE-MCT.

entre as fases de crescimento e decaimento de um SCM, sendo que um *sprite* que ocorreu dentro desse período e mostrado na imagem da Figura 11.

No período após as 04:09 UTC (Figura 9(c)) até o fim das filmagens foram registrados 14 *sprites* (~14,9% dos eventos). Na imagem da 06:40 UTC podemos perceber que o sistema se desintensificou, diminuindo quase que totalmente o número de nuvens Cb. A imagem abaixo (Figura 12) mostra um dos eventos filmados durante esse período.

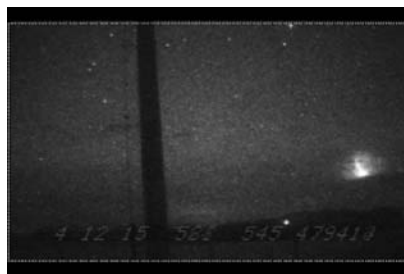


Figura 12 – Imagem de um *sprite* - 04:12:15.545 (04/03/2006), observado no OES/CRS/INPE-MCT.

Conclusão

O Sistema Sistema Convectivo de Mesoescala que se formou sobre o Paraguai é resultado do ciclone, gerado devido a uma área de baixa pressão sobre a Argentina. A ciclogênese desencadeou um sistema frontal que se deslocou para leste, e essa frente fria foi a responsável pela formação da tempestade sobre o Paraguai que produziu os TLEs observados durante a campanha.

O período de iniciação apresentou uma região com o desenvolvimento de tempestades individuais, formadas por nuvens Cb, que com o decorrer do tempo foram crescendo e se unificando. O SCM se desintensificou e se dissipou ~11 horas depois.

Durante todo o período tivemos em 200hPa um JAN de oeste, que persistiu durante o período de iniciação e de dissipação do SCM. No período de iniciação tivemos a presença em baixos níveis (850hPa) de um JBN de norte que transportava umidade e ar quente para a região de formação do SCM, com o levantamento da parcela de ar, favorecido pela velocidade vertical ascendente. A imagem de satélite no canal do vapor d'água acusou presença de bastante umidade no período de iniciação e pouca umidade no período de dissipação.

Considerando os mapas mostrados, temos que as condições na região eram propícias para a formação do SCM, o qual estava associado a passagem de uma frente fria.

Ao longo da noite de observação de *sprites* foram observados um total de 94 eventos. A maioria dos eventos, 57 *sprites* (~61% dos eventos), ocorreu entre o período das 02:09 UTC e 03:09 UTC. Esse horário que representa o período em que os aglomerados convectivos (tempestades individuais) desenvolvidos se

tornarem um único aglomerado de nuvens Cb. Esse período representa o ápice do SCM, onde o sistema tem sua maior extensão. No período entre 03:09 UTC e 04:09 UTC foram registrados apenas 9 eventos, a queda de eventos está relacionada com a significativa diminuição (dissipação) de nuvens do tipo Cb.

Wescott, E. M.; Sentman, D. D.; Heavner, M. J.; Hampton, D. L.; Vaughan, O. H. Jr. Blue Jets: their relationship to lightning and very large hailfall, and their physical mechanisms for their production. *J. Atmos. and Solar-Terr. Physics*, v. 60, p. 713-724, fev. 1998.

Agradecimentos

Os autores agradecem aos Drs. Vagner Anabor e Everson Dal Piva, do Grupo de Modelagem Atmosférica da Universidade Federal de Santa Maria (GruMA/UFSM), pelas úteis discussões sobre a meteorologia local. Agradecem a Alessandra de Pádua Pereira, responsável pelo acervo de dados da DSA/CPTEC/INPE-MCT, pelas imagens de satélite disponibilizadas.

Referências Bibliográficas

Boccippio, K. J.; Williams, E. R.; Heckman, S. J.; Lyons, W. A.; Baker, I. T.; Boldi, R. Sprites, ELF transients, and positive ground strokes. *Science*, 269, 1088, 1995.

Houze Jr, R. A. 1993. Mesoscale convective systems. In: HOUZE Jr, R. A. (ed.) *Cloud Dynamics*. Academic Press, Inc., v. 53, p. 334-404.

Inan, U. S. Lightning effects at high altitudes: sprites, elves and terrestrial gamma ray flashes. *C. R. Physique* 3 (2002) 1411-1421.

M. J. Taylor, M. A. Bailey, P. D. Pautet, S. A. Cummer, N. Jaugey, J. N. Thomas, N. N. Solorzano, F. Sao Sabbas, R. H. Holzworth, O. Pinto, and N. J. Schuch. Rare measurements of a sprite with halo event driven by a negative lightning discharge over Argentina. *GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS*, VOL. 35, 2008.

Pasko, P. P.; Stanley, M. A. Mathews, J. D.; Inan, U. S.; Wood, T. G. Electrical discharge from a thunderstorm to the cloud lower ionosphere. *Nature*, v. 416, p. 152, 14 mar. 2002.

Pinto Jr., O.; Pinto, I. R. C. de A. Tempestades e Relâmpagos no Brasil. *Belo Horizonte*, 2000, 193 p.

Sabbas, F. T.; Sentman D. D. Dynamical relationship of infrared cloudtop temperatures with occurrence rates of cloud-to-ground lightning and sprites. *GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS*, VOL. 30, NO. 5, 2003.

Tavares, M.; Santiago, M. A. M. Eletricidade atmosférica e fenômenos correlatos. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, vol. 24, n. 4, 2002.

Uccellini, L. W. & Johnson, D. R. The Coupling of Upper and Lower Tropospheric Jet Streaks and Implications for the Development of Severe Convective Storms. *Monthly Weather Review*, 107: 682-703. 1979.