

## ANÁLISE DAS CONDIÇÕES ATMOSFÉRICAS DURANTE A 2ª CAMPANHA DO EXPERIMENTO INTERDISCIPLINAR DO PANTANAL SUL MATO-GROSSENSE

MARGARETE OLIVEIRA DOMINGUES<sup>1</sup>, ODIM MENDES JR.<sup>2</sup>, SIN CHAN CHOU<sup>3</sup>,  
LEONARDO DEANE DE ABREU SÁ<sup>3,4</sup> E ANTONIO OCIMAR MANZI<sup>3,5</sup>  
<sup>1</sup>LAC/INPE, <sup>2</sup>CEA/INPE, <sup>3</sup>CPTEC/INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais  
Av. dos Astronautas, 1758, Cx. P. 515, 12245-970 - São José dos Campos, São Paulo  
<sup>4</sup>MPEG - Museu Paraense Emílio Goeldi - Av. Perimetral, 1901, 66077-530 - Belém, Pará  
<sup>5</sup>INPA - Av. André Araújo, 2936, Petrópolis, 69083-000 - Manaus, Amazonas  
E-mail: margarete@lac.inpe.br

Recebido Fevereiro 2003 - Aceito Janeiro 2004

### RESUMO

Como parte de um projeto científico para estudar as características do tempo e do clima da região central do Brasil, medidas experimentais têm sido tomadas em um sítio localizado em Miranda, uma cidade na região do Pantanal no Mato Grosso do Sul. No período de 14 a 23 de setembro de 1999, realizou-se uma campanha intensiva de coleta de dados. O objetivo deste artigo é analisar as condições do tempo local durante essa campanha. Essa análise baseou-se em imagens de satélite, documentação visual de elementos meteorológicos, perfis atmosféricos e dados de relâmpagos. Concluiu-se que o período foi caracterizado por condições atmosféricas estáveis nos dias 14, 16 a 19 à tarde, e 22 a 23 de setembro, e condições instáveis nos dias 15 e 19 a 20 de setembro, associadas à ocorrência de convecção induzida pela passagem de duas frentes frias.

**Palavras-chave:** Tempo local, campanha IPE, termodinâmica atmosférica, descargas elétricas atmosféricas

### ABSTRACT: ON THE WEATHER CONDITIONS IN THE 2<sup>ND</sup> INTERDISCIPLINARY PANTANAL EXPERIMENT CAMPAIGN

As part of a scientific project to study the characteristics of weather and climate of the central region of Brazil, measurements have been taken on a site located in Miranda, a town in the South Pantanal region. From September 14<sup>th</sup>. to 23<sup>rd</sup>. in 1999, an intensive experimental campaign was carried out. The purpose of this article is to analyze the local weather during this campaign. The analysis is based on GOES 8 images, sky imagery, radiosonde dataset, and electrical discharge data. The observations showed that the period was generally characterized by stable atmospheric conditions (Sep. 14<sup>th</sup>., 16<sup>th</sup>. to 19<sup>th</sup>. mornings, and 22<sup>nd</sup>. to 23<sup>rd</sup>.), except for two cold front disruptions (Sep. 15<sup>th</sup>. and 19<sup>th</sup>. to 20<sup>th</sup>.).

**Key words:** Weather conditions, IPE campaign, Atmospheric thermodynamics, Electrical discharge

## 1. INTRODUÇÃO

A região do Pantanal Sul Mato-grossense carece de medidas meteorológicas "in situ". Por outro lado, nessa região, existe uma variedade de fenômenos meteorológicos, da micro a grande escala, que necessitam de um maior entendimento, por exemplo, os processos de interação solo-vegetação-atmosfera durante períodos secos e alagados, que tem efeitos locais e climáticos.

Apresentam-se neste trabalho as análises do tempo local durante a campanha intensiva de coleta de dados do estudo da camada limite superficial do Pantanal no Mato Grosso do Sul (Manzi et al, 1998) na estação não-alagada (Pantanal seco), no período de 14 a 23 de setembro de 1999, denominada IPE-2, ver maiores detalhes em Manzi et al. (1999). A base experimental situa-se na Fazenda São Bento (19° 33' 48,2"S; 57° 00' 53,8"W), sítio representativo da região, próximo 1,5 km da Base de Estudos do Pantanal da Universidade Federal

Mato Grosso do Sul, em Passo do Lontra, município de Corumbá, MS. Nesse local foi instalada, no final de 1997, uma torre micrometeorológica com 21 m de altura, que serviu de suporte tanto para a instalação de sensores de resposta rápida (para medidas de turbulência, em quatro alturas diferentes), quanto de instrumentos meteorológicos convencionais, com o objetivo de determinar os perfis verticais de vento, temperatura, umidade específica, assim como o balanço de radiação. Além disso, dentro de um esforço de colaboração científica, para uma visão multidisciplinar dos processos físicos dessa região, uma documentação visual nessa campanha foi realizada pelo Projeto Via-Lux, que tem promovido uma análise observacional e de simulação numérica de relâmpagos (Mendes et al., 1999)

A importância deste tipo de análise é elaborar um registro das condições meteorológicas durante o experimento. Esse tipo de registro é importante para a interpretação futura dos resultados quantitativos, que são produzidos prontamente pelas ferramentas físico-matemáticas embutidas nas

facilidades computacionais atuais. Todo aumento de poder para extrair significado dos dados processados dependerá da clareza, completude e autoconsistência da base de dados coletada (Curtis e Maurer, 2000). Como as medidas micrometeorológicas estão sujeitas também as condições macrometeorológicas, é interessante destacar como estava o estado do tempo durante o experimento, facilitando assim a análise dos dados e uma maior compreensão dos fenômenos estudados. Por exemplo, situações associadas a tempestades podem influenciar os dados de sensores de resposta rápida, inclusive introduzindo alguma perturbação transiente que de outra forma pode ser detectada como um erro de funcionamento ou descartada em um processo de análise de qualidade. Esse experimento, apesar de ter uma grande componente de micrometeorologia, também possui dados para outros tipos de análises, como estudos atmosféricos associados a tempestades (como os desenvolvidos no Projeto Via-Lux, financiado pela FAPESP). Além disso, essa região carece de estudos nesse contexto e a grande quantidade de informações, que esse tipo de campanha experimental gera, pode beneficiar uma gama ampla de estudos. Por exemplo, o projeto Cb-IPE, atualmente financiado pelo CNPq, utiliza dados dessa e de outras campanhas nessa região.

Assim, o objetivo deste trabalho é analisar as condições atmosféricas predominantes durante esse experimento e auxiliar, desta forma, futuras integrações dos dados obtidos dentro desse experimento interdisciplinar. Documentação que propicia, porém, o uso por uma gama maior de pesquisadores que se interessem por fenômenos relacionados a essa região. São analisadas imagens de satélite meteorológico, imagens do céu, dados de radiossondagens, dados de precipitação e dados de relâmpagos.

## 2. METODOLOGIA E DADOS

### 2.1. Imagens de satélite

Foram utilizadas as imagens do satélite geoestacionário GOES-8 nos canais visível (Canal 1), vapor de água (Canal 3) e infravermelho (Canal 4). O canal visível produz imagens equivalentes a fotos monocromáticas da Terra tiradas do espaço. Esse último dado somente está disponível durante as horas em que a luz solar ilumina o disco da Terra observado. O canal de vapor de água apresenta o vapor de água e nuvens nos níveis médio a alto da troposfera (de 500 a 200 hPa). O canal infravermelho é o canal em que a radiação em 10,7  $\mu\text{m}$  não é significativamente absorvida pelos gases atmosféricos (Bader et al., 1995). Essas imagens permitiram identificar a evolução da nebulosidade em uma região mais extensa do que a região do experimento e auxiliaram, juntamente com os dados da rede sinótica e as análises do NCEP (National Centers for Environmental Prediction), a localização da frente fria e da convecção induzida por essa.

### 2.2. Documentação visual

O experimento de documentação visual do Projeto Via-

Lux constitui-se de vários recursos materiais e procedimentos técnico-científicos. Nessa campanha experimental utilizou-se uma filmadora convencional portátil de maior qualidade técnica (Handycam Sony, CCD-TRV65H18, zoom óptico 18X, tela de cristal líquido colorido) para obter imagens panorâmicas e também detalhes do estado do céu. Diferentemente das outras filmadoras comerciais, esse modelo dispõe de recursos de visão noturna, uma característica conveniente para observação de fenômenos de menor intensidade luminosa. Como outro recurso de obtenção de imagem, utilizou-se uma máquina fotográfica Yashica FX-3 Super 2000, com lente Yashica ML 50mm 1:1.9 C. Para aquisição digital das imagens, utilizou-se um vídeo-cassete de ótima qualidade (Panasonic NV-L26HQ), uma placa de captura de imagens (PixelView PV-BT848P + (W/FM), padrão NTSC) e um scanner (HP Scanjet 6200C, de alta resolução óptica e não interpolada, 600x1200 pixels). Para tratamento das imagens obtidas, selecionou-se, com base em métodos avançados de correlação de pixels, o programa de computador Ulead Cool 360, da Ulead Systems. O programa Cool 360 permite montar um painel panorâmico ou exibir dinamicamente uma imagem de 360° do cenário fotografado ou filmado. Para obter melhores resultados, as imagens foram fotografadas ou filmadas com um enquadramento do cenário dentro de ângulos sobrepostos, a prática mostrou ser aconselhável um ângulo entre 15 e 30°. Neste trabalho o campo de visão de cada imagem era de 34° horizontal e 26° vertical.

Os procedimentos experimentais de documentação visual no campo foram de tomar basicamente imagens em 3 períodos do dia: ao amanhecer, ao meio do dia e ao final da tarde. Situações especiais ou inusitadas determinavam a aquisição de outras imagens. Documentou-se um total de 6 horas de filmagens e cerca de 300 fotos, na base e na torre micrometeorológica. Essas imagens procuraram caracterizar o tipo de nebulosidade, a fração de cobertura do céu, a visibilidade horizontal, as plumas de fumaça e outros elementos meteorológicos, tomando por referência o trabalho observacional de Simpson (1994), em que se descrevem vários fenômenos atmosféricos por meio de imagens e modelos conceituais. Posteriormente, as imagens obtidas foram digitalizadas, e reunidas a outras, de forma a integrar várias informações do estado do céu nesse experimento. Esse material compôs uma nota técnica científica (Domingues et al., 2002). Evidencia-se o aspecto inovador e complementar da documentação visual realizada neste tipo de experimento no Brasil, que se revelou um valioso instrumento de recuperação da memória do experimento e de esclarecedor nas interpretações dos resultados.

### 2.3. Perfil atmosférico

As medições das condições atmosféricas por meio de radiossondagens foram realizadas no período entre 1200 UTC 14 de setembro e 2100 UTC 23 de setembro de 1999. Foi obtido um total de 55 sondagens, com 1 perda de sonda e

3 perdas de sinal de recepção em partes das sondagens. Havia 2 tipos de sondas, um com Sistema de Posicionamento Global (GPS) e outro com Sistema Omega (Dottori e Negraes, 1997; Cogo, 1999). O GPS consiste em um sistema eletrônico de navegação, isto é, um sistema que permite o usuário localizar-se instantaneamente em qualquer posição da superfície da Terra. A determinação da posição é estabelecida por meio das relações das posições dos satélites localizadores, que se distribuem numa constelação, e o tempo que sinais adequadamente codificados levam para alcançarem um receptor na Terra. Além da posição, o tempo é estabelecido com alta precisão. O Sistema Omega é baseado em transmissão na frequência de rádio, embora tenha cobertura mundial, o seu ponto fraco é a pouca precisão. Durante essa campanha foram medidos dados de vento de radiossondagens somente com o sistema GPS, devido ao equipamento de recepção utilizado.

Nos horários sinóticos, 0000, 0600, 1200 e 1800 UTC foram lançadas sondas medindo pressão, temperatura, umidade e vento, enquanto que nos horários intermediários de 0900, 1500 e 2100 UTC foram utilizadas sondas medindo somente pressão, temperatura e umidade; exceto nos dois últimos dias (Tabela 1). Medições mais intensivas ocorreram entre os dias 17 e 21. Para assegurar e aprimorar a qualidade das medições das radiossondagens, os perfis verticais foram analisados em tempo real por meio dos diagramas termodinâmicos tipo SkewT-logP, que se encontram disponíveis em Domingues et al. (2002).

A avaliação da estabilidade atmosférica muitas vezes é expressa na forma de um índice de estabilidade, em que o objetivo é quantificar de uma forma simples as informações termodinâmicas do perfil atmosférico. Um índice utilizado foi o conhecido índice K, expresso por:

$$K = (T_{850} + Td_{850}) - (T_{500} + T_{700}) + Td_{700}$$

em que T indica a temperatura do ar (em °C), Td a temperatura do ponto de orvalho (em °C), e os sub-índices representam os níveis de pressão atmosférica em hPa. Esse índice atinge seus valores máximos para situações em que a baixa atmosfera está instável, geralmente  $K > 25$  (MAC, 1979). Do ponto de vista prático, valores desse índice entre 20 e 30 indicam células convectivas isoladas e valores acima de 35 estão associados a aglomerados convectivos profundos.

A energia potencial disponível para a convecção é baseada na teoria da parcela e foi introduzida conceitualmente, em 1905, por Margules e mais tarde recebeu a denominação CAPE (Williams, 1995). Esse índice é quantificador da energia máxima de uma nuvem convectiva e da máxima velocidade vertical da parcela sem sofrer diluição. Tradicionalmente, o índice CAPE avalia a energia cinética de uma parcela entre o nível de convecção livre, LFC, e o nível de equilíbrio, EL. O LFC é a altura em que uma parcela de ar torna-se flutuante ao ser levantada em um processo adiabático (Iribarne e Godson, 1981). O EL é o nível em que a temperatura da parcela ascendente flutuante torna-se novamente igual à temperatura do ambiente (Iribarne e Godson, 1981). O outro índice é a energia associada à inibição da convecção, denominada CINE, CIN ou CINH, que avalia a energia cinética associada à inibição do levantamento de uma parcela, dado pela área negativa entre a superfície e o LFC. O CINE é conhecido como “anti-CAPE” ou CAPE negativo. Os índices CAPE e CINE são obtidos dos dados de um perfil atmosférico, pela expressão a seguir:

$$\text{CAPE ou CINE (em J/kg)} = \int g (T_{v_p} - T_{v_e}) / T_{v_e} dz,$$

em que g é a aceleração da gravidade, Tv é a temperatura virtual, os sub-índices p e e se referem à parcela de ar e ao

Data/hora	0600 UTC	0900 UTC	1200 UTC	1500 UTC	1800 UTC	2100 UTC	2400 UTC
14-set-99			♦		♦		♦
15-set-99	♦*		♦		♦*		♦
16-set-99	♦		♦		♦		♦
17-set-99	♦	×	♦	□	♦	□	♦
18-set-99	♦	□	♦	□	♦	□	♦
19-set-99	♦	□	♦	□	♦	□	♦
20-set-99	♦	×	♦	□	♦	□	♦
21-set-99	♦	×	♦	□	♦	□	♦
22-set-99	□		□	□	□	□*	□
23-set-99	□		□	□	□	□	
♦	- Sondagens com temperatura, umidade e vento. - Sondagens com temperatura e umidade.						
×	- Sondagens canceladas por razões técnicas						
*	- Sondagens interrompidas antes de 500 hPa						

Tabela 1: Radiossondagens IPE-2

ambiente, respectivamente, e  $z$  é a altura da coluna de ar, sendo que os limites dessa integração definem qual o índice está sendo considerado (Williams, 1995). Para essa integração, utiliza-se o programa elaborado por Hart (2001). Na prática existem várias formas de se escolher a parcela para esse cálculo, sendo que, neste trabalho utilizou-se a parcela do nível de máxima instabilidade, como sugerido por Doswell e Rasmussen (1994) para padronização dos cálculos. Esse nível foi escolhido como o nível em que a temperatura potencial equivalente é máxima.

## 2.4. Relâmpagos

Os dados de descarga elétrica atmosférica foram obtidos pela Rede Integrada de Detecção Atmosférica (RIDAT), descrita em Beneti et al. (2000). Essa rede consiste de sensores LPATS (Lightning Positioning and Tracking System, da Global Atmospheric Inc.), que utilizam a metodologia de detecção do tempo de chegada do sinal produzido pela descarga de retorno, e sensores batizados de Impact, da mesma companhia, que combinam essa metodologia com aquela baseada na determinação direcional magnética da descarga (Bent e Lyons, 1984; Kride et al., 1976). O sistema de detecção registra, entre outras informações, o instante de ocorrência da descarga, a localização em longitude e latitude, o pico de corrente elétrica estimado e a polaridade da carga.

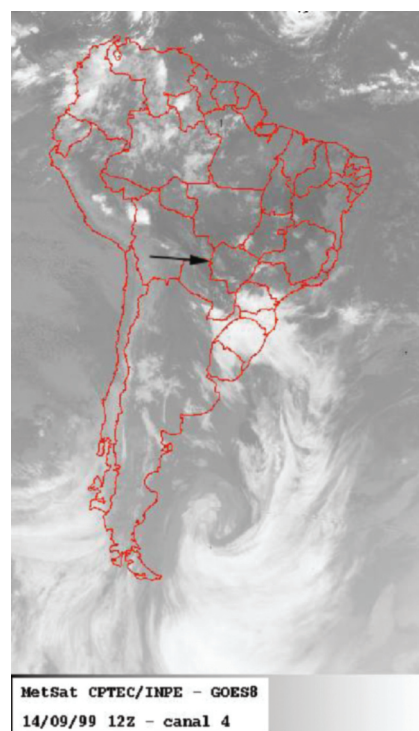
De forma a caracterizar os relâmpagos em uma região em torno do experimento (definida por latitude de 22 a 18 graus Sul e longitude de 58 a 54 graus Oeste), analisou-se as descargas elétricas nuvem-solo detectadas pelo RIDAT nessa região por meio do programa ThoR-SLA (Mendes e Domingues, 2000), versão 3.0. Nesta caracterização, utilizaram-se os seguintes parâmetros de identificação dos relâmpagos a partir dos registros de descargas: tempo total de descarga = 2,0 s, intervalo temporal entre descargas = 0,5 s, e distância entre descargas = 10,0 km (Mendes et al., 1998). Na região do experimento, neste período, o sistema comportava-se com uma eficiência de detecção entre 20 e 30%. A estimativa dessa eficiência, calculada a partir de um algoritmo do fabricante, pode ser compreendida como a fração das descargas, de um total ocorrido, que o sistema foi capaz de detectar. A detecção depende de inúmeros fatores, por exemplo, a configuração geométrica dos sensores que participam do sistema, a sua localização com respeito ao evento e a influência do relevo. A informação apresentada aqui é a distribuição horária da atividade de relâmpagos, para complementar as informações da dinâmica da atividade convectiva.

## 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

O experimento foi caracterizado por condições de estabilidade atmosférica, gerada por sistemas de alta pressão à superfície, nos dias 14 pela manhã e tarde, 16 a 18 pela manhã, 22 e 23. O dia 14 está exemplificado na imagem de satélite da Figura 1a. Até a tarde desse dia, essas condições atmosféricas de estabilidade, anteriores a uma frente fria no sul do país,

favoreceram a ocorrência de queimadas antropogênicas na região, gerando uma condição de fumaça à superfície e reduzindo significativamente a visibilidade, como mostradas nas Figuras 1b e 1c. No final do dia 14 ocorreu a organização dessa frente fria, que se deslocou pela região do Mato Grosso do Sul, alcançando a base no início do dia 15. Na base do experimento, essa passagem de frente fria foi acompanhada de jatos de baixos níveis, atividade elétrica local e precipitação acumulada de 4,8 mm (entre 0300 e 1100 UTC do dia 15, integrada do pluviômetro de balsa Digcot na região do experimento). Esse jato foi estudado detalhadamente em Andrade (2003), classificando-o como um jato no sentido micrometeorológico, baseada na definição proposta por Stull (1988).

a)



b)



c)



Figura 1: Condições atmosféricas do dia 14 de setembro de 1999 na região do Pantanal do Mato Grosso do Sul: a) imagem do satélite GOES 8 no canal infravermelho das 1200 UTC, mostrando a aproximação da frente fria na base; b) imagem local próxima da torre micrometeorológica na fazenda São Bento, às 1400 UTC. A baixa visibilidade foi devido à fumaça e ao céu obscurecido; e c) imagem mais aproximada das árvores a 400 m da torre micrometeorológica na fazenda São Bento, às 1800 UTC. Nota-se a espessa camada de fumaça estratiforme, resultando em baixa visibilidade e céu obscurecido.

Com respeito ao dia 15, apresenta-se uma vista do céu com a nebulosidade presente (*Stratocumulus castellanus opacus*) e uma imagem de satélite no canal visível, indicando a faixa de nebulosidade associada a essa frente fria, que se estendia desde o Peru até o Oceano Atlântico, passando pelos estados do Mato Grosso do Sul e São Paulo (Figura 2). No dia 16, pela manhã o céu permaneceu encoberto por *Stratocumulus castellanus undulatus*, que foram se dissipando, e à tarde o céu já estava claro, caracterizando o final da influência da frente fria (Figura 3). O dia 17 é caracterizado pelo deslocamento da frente fria para o oceano e pela presença, na base, de *Cumulus humilis* pela manhã e *Alto cumulus flocus radiatus* pela tarde (Figura 4). Com essa alteração no tempo, houve uma melhora temporária da visibilidade até o dia 18. Animações que registram uma visão panorâmica de 360 graus do alto da torre micrometeorológica foram feitas dando uma visão mais completa da abóbada celeste (ver Domingues et al., 2002), de forma a auxiliar na caracterização da variabilidade espacial da nebulosidade observada localmente.

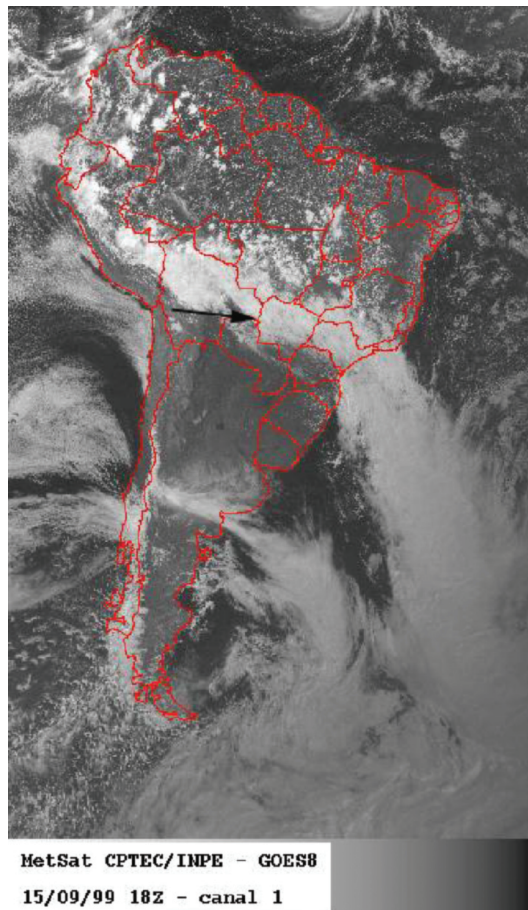
Nas descrições a seguir, apresentam-se o estado do céu e a evolução das condições de tempo nos dias 18 e 19, iniciando com condições atmosféricas estáveis, evidenciadas pelas queimadas e baixa visibilidade, evoluindo para condições de tempo severo com a formação de *Cumulonimbus* associadas a passagem da frente fria.

No dia 18 e na manhã do 19, nas imagens de satélite, nota-se uma região ampla com pouca nebulosidade devido à subsidência predominante na região do Pantanal do Mato

Grosso do Sul (Figura 5). Houve retorno à condição de fumaça à superfície na manhã do dia 19 (Figura 6) até a tarde desse dia, quando ocorreu atividade convectiva induzida pela passagem de uma frente fria mais deslocada para o litoral entre o Sul e Sudeste do Brasil (Figura 7), com ventos fortes, atividade elétrica local e precipitação acumulada de 3 mm entre as 2200 UTC do dia 19 e 0300 UTC do dia 20. A evolução do estado do céu desse evento é mostrada na Figura 8. Pela manhã do dia 19 observa-se a presença de nuvens *Alto cumulus flocus radiatus*, com visibilidade reduzida pela fumaça. À tarde, observou-se *Stratocumulus stratiforme opacus* e aglomerados de *Cumulonimbus*, com base em *Stratocumulus castellanus opacus mamma*, que encobriam a maior parte do céu. Constatou-se que aglomerados de *Cumulus*, com grande desenvolvimento vertical, formaram-se na região central do continente neste dia, como pode ser observado nas imagens do infravermelho do satélite GOES 8 (Figura 7).

Por meio de uma seqüência de imagens de satélite, a evolução do tempo entre os dias 20 e 23 é apresentada na Figura 9. No dia 20, o céu já estava claro pela manhã, com a presença de pequenos filamentos de *Cirrus*. A visibilidade foi se reduzindo um pouco durante o dia devido às queimadas locais (Figura 10a). No dia 21, o céu estava encoberto por *Alto cumulus*, mais tarde surgiram também *Stratocumulus* (Figura 10b). No dia 22, por outro lado, o céu estava claro, com

a)



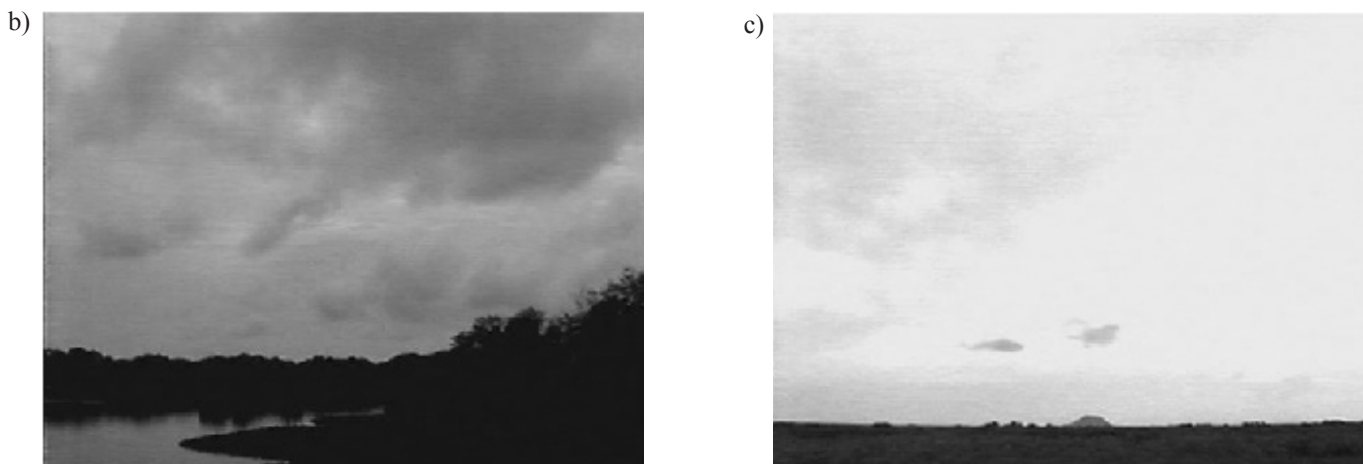


Figura 2: Condições atmosféricas do dia 15 de setembro de 1999 na região do Pantanal do Mato Grosso do Sul: a) imagem do satélite GOES 8 no canal visível às 1800 UTC; b) imagem próxima a base ao lado do Rio Miranda, às 1400 UTC, com boa visibilidade e céu encoberto por Stratocumulus; e c) imagem a partir da torre micrometeorológica do Morro do Azeite, às 1700 UTC, caracterizando um momento de boa visibilidade.

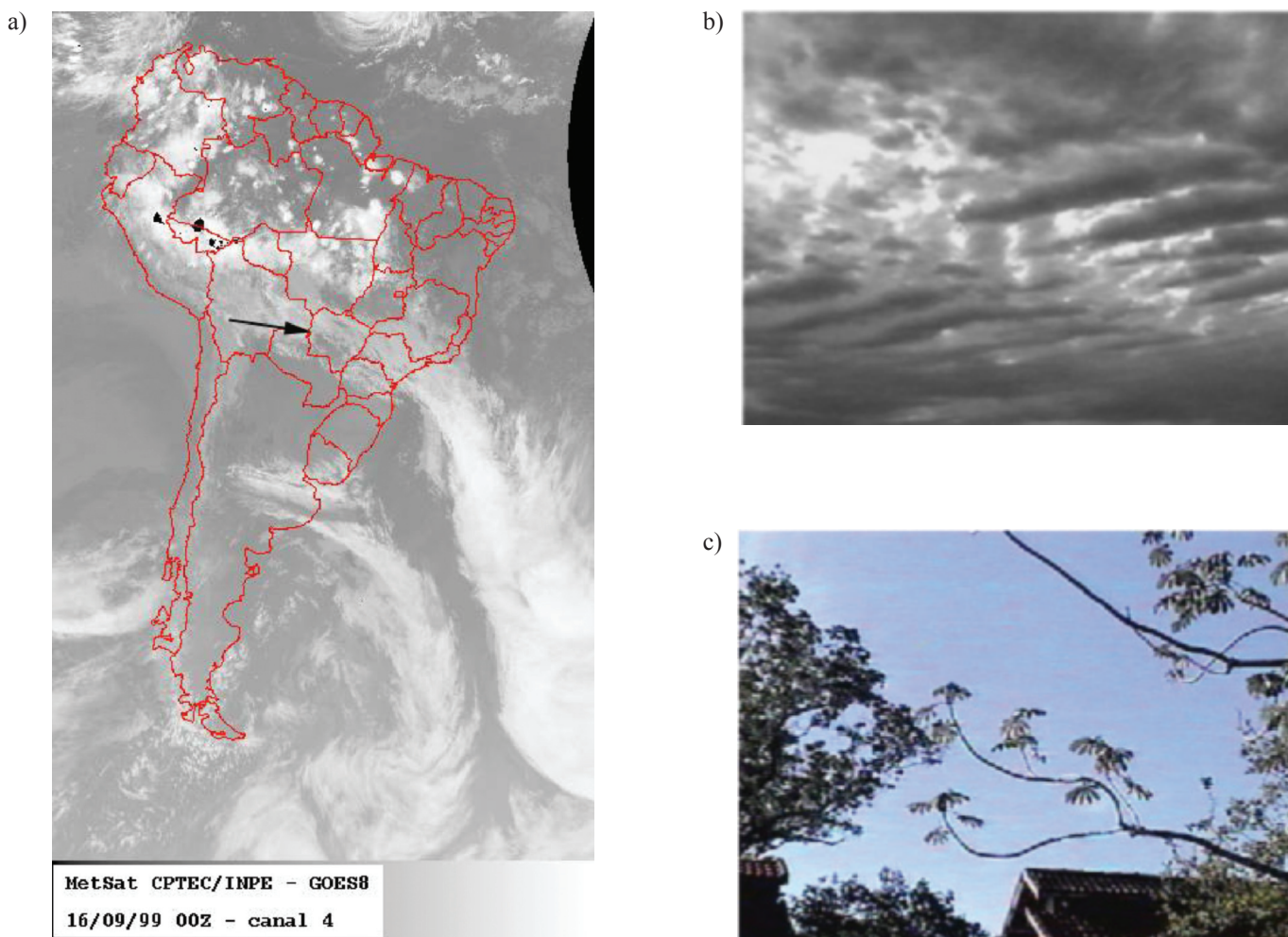


Figura 3: Condições atmosféricas do dia 16 de setembro de 1999 na região do Pantanal do Mato Grosso do Sul: a) imagem do satélite GOES 8 no canal infravermelho, às 0000 UTC, caracterizando a passagem da frente fria, b) imagem próxima da base, às 1100 UTC, céu encoberto por Stratocumulus; e c) imagem na base, às 2000 UTC, caracterizando céu claro.

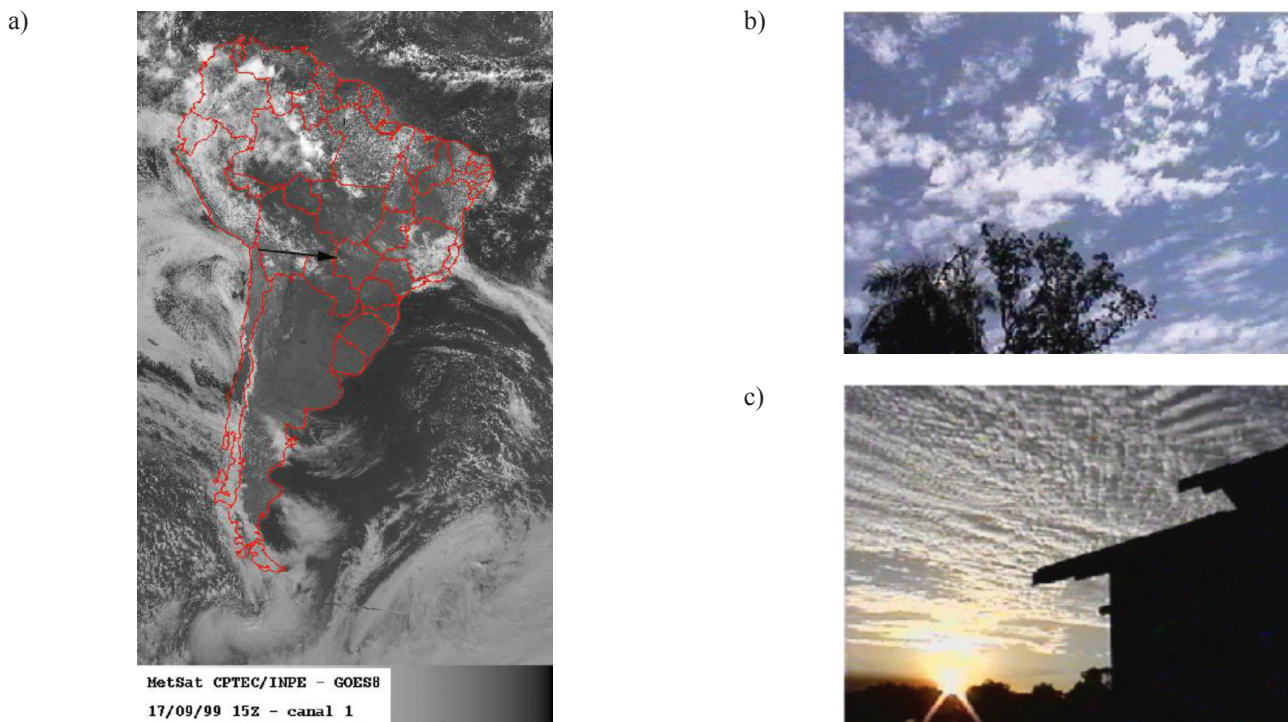


Figura 4: Condições atmosféricas do dia 17 de setembro de 1999 na região do Pantanal do Mato Grosso do Sul: a) imagem do satélite GOES 8 no canal visível, às 1500 UTC, caracterizando o deslocamento da frente fria para o oceano, b) imagem na base, às 1400 UTC, com boa visibilidade e nuvens Cumulus Humilis; e c) imagem na base, às 2000 UTC, caracterizando um momento de boa visibilidade, com a presença de Altocumulus invadindo o céu progressivamente.

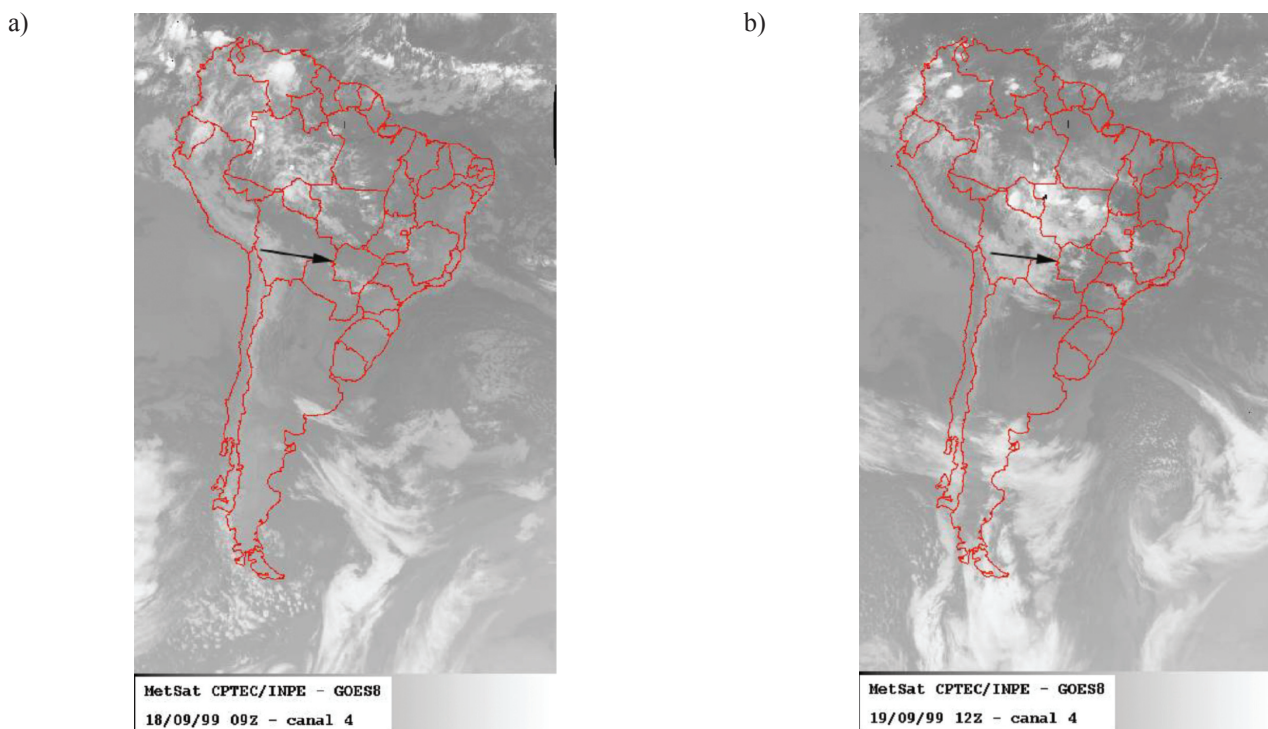


Figura 5: Imagem do satélite GOES 8 no canal infravermelho: a) do dia 18 de setembro de 1999 às 0900 UTC e b) do dia 19 de setembro de 1999 às 1200 UTC. Em ambas as imagens nota-se uma região ampla com pouca nebulosidade (associada à subsidência em grande escala) na região do Pantanal do Mato Grosso do Sul.

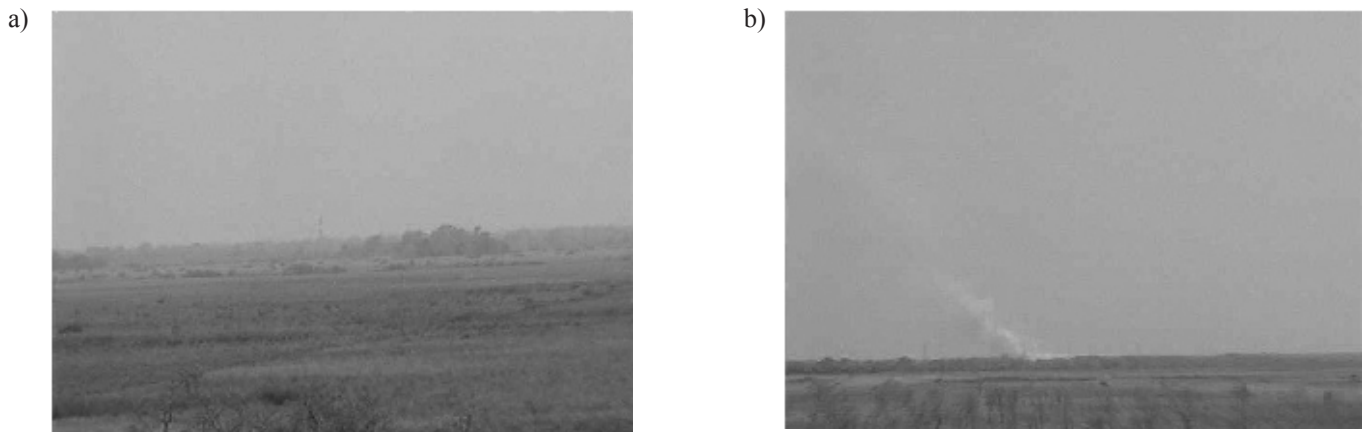


Figura 6: Exemplo de atmosfera enfumaçada do dia 19 de setembro de 1999, reduzindo a visibilidade: a) às 1224 UTC e b) detalhe de pluma de queimada, às 1300 UTC.

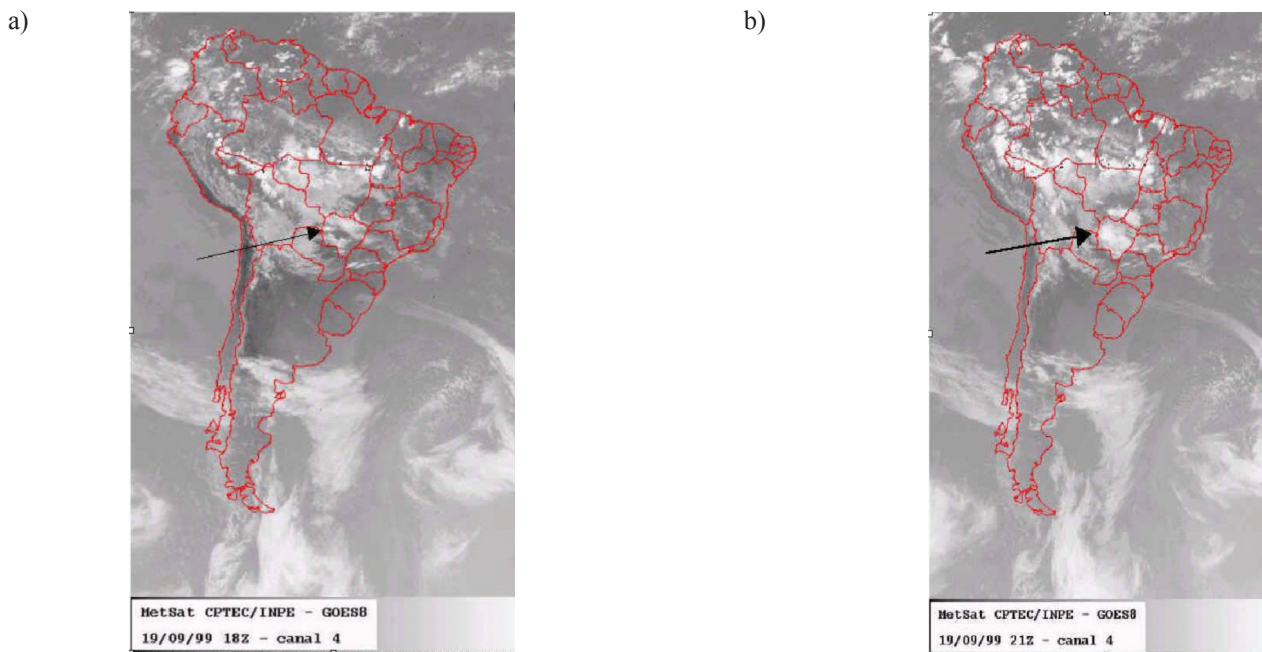
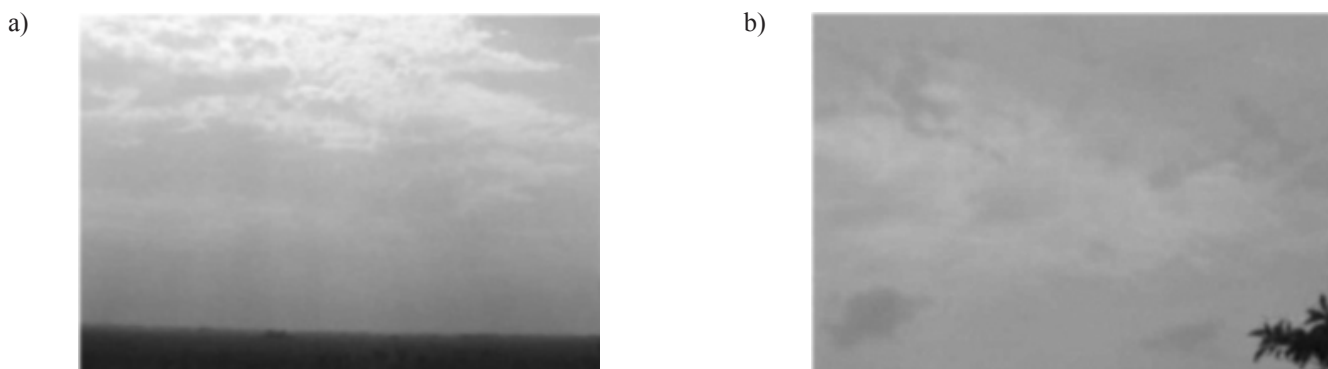


Figura 7: Condições atmosféricas do dia 19 de setembro de 1999 na região do Pantanal do Mato Grosso do Sul: imagem do satélite GOES 8 no canal infravermelho (a) às 1800 UTC e (b) às 2100 UTC





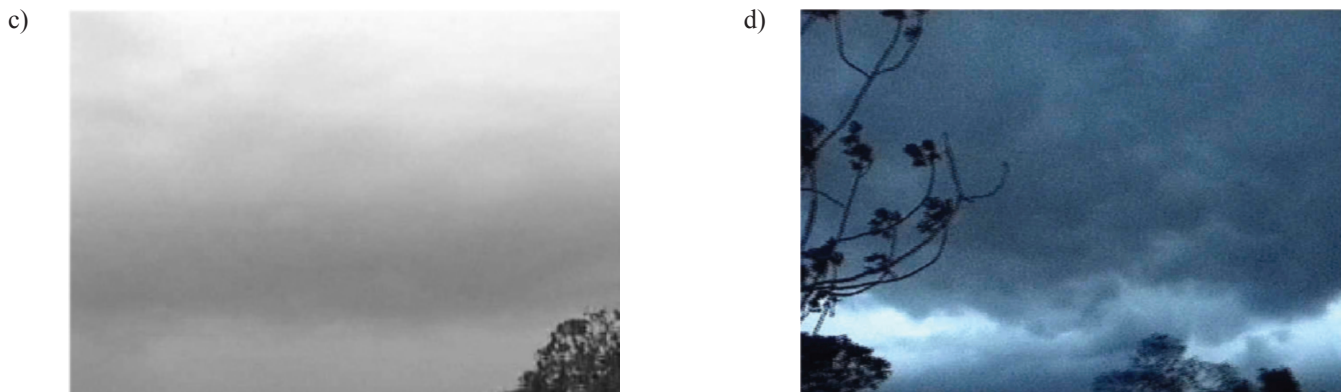


Figura 8: A evolução do estado do céu durante a manhã e tarde do dia 19 de setembro de 1999, às 1113, 1617, 2013 e 2040 UTC, observada da base. O dia amanhece com o céu obscurecido pela fumaça, depois passa a se observar nuvens Altocumulus, em seguida, a cobertura de nuvens se altera para Stratocumulus; e ao final da tarde há a ocorrência de Cumulonimbus com base em Stratocumulus.

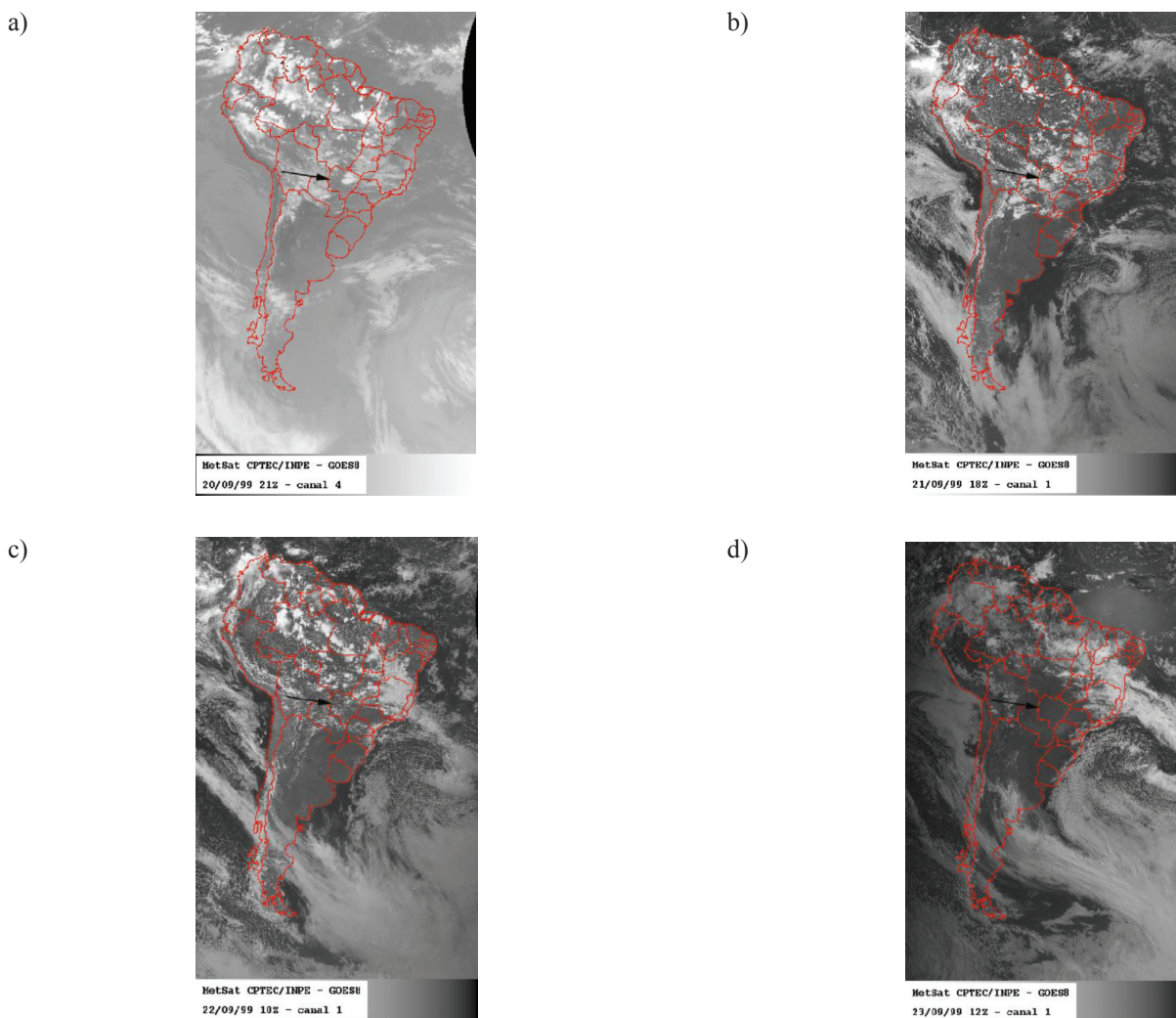


Figura 9: Imagens do satélite GOES 8: a) no canal infravermelho no dia 20 de setembro de 1999, às 2100 UTC, indicando a presença de um aglomerado convectivo a nordeste da base do experimento, b) no dia 21, às 1800 UTC, indicando a presença de Altocumulus e Cumulus na região do Mato Grosso do Sul, c) no dia 22, às 1800 UTC, indicando Cumulus no Mato Grosso do Sul, e d) no dia 23, às 1200 UTC, indicando céu claro na região da base do experimento.

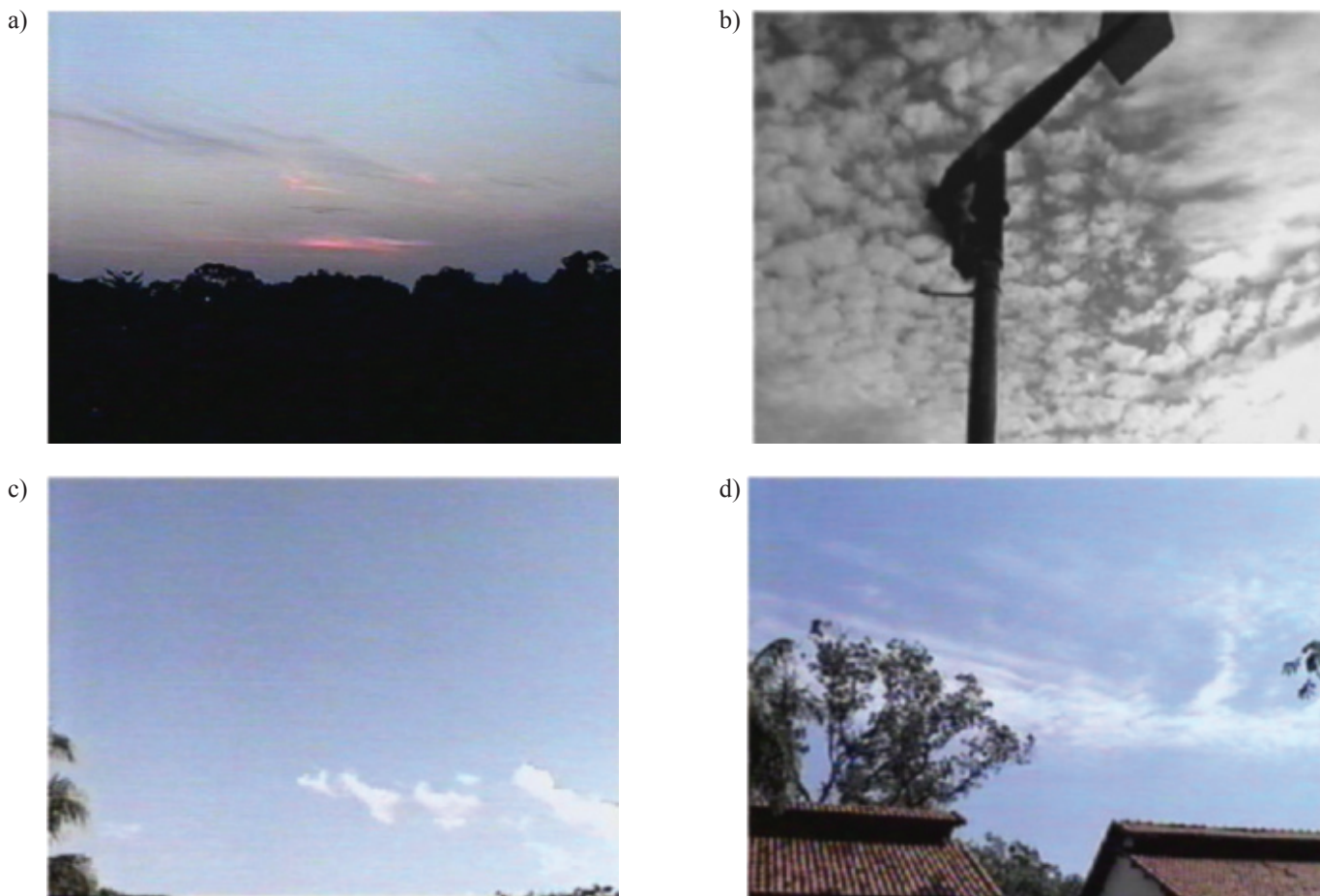


Figura 10: Imagens do céu a) na base no dia 20 de setembro de 1999, às 2100 UTC, indicando a presença de Cirrus, b) na torre micrometeorológica no dia 21 às 1900 UTC, indicando a presença de Altocumulus, c) na base no dia 22, às 2000 UTC, indicando Cumulus Humilis, e d) na base no dia 23, às 1200 UTC, indicando filamento de Cirrus e Altocumulus.

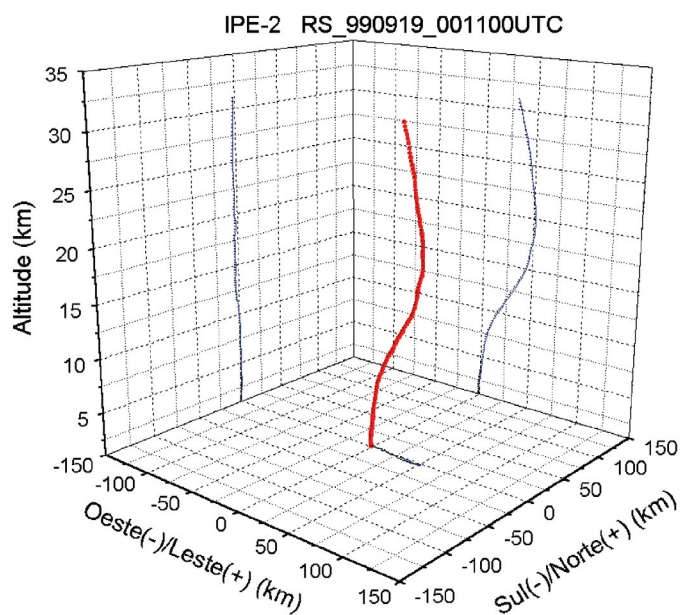


Figura 11: Trajetória da radiossonda de 19 de setembro de 1999, às 0011 UTC. A curva central é a trajetória da sonda, enquanto que as curvas nos outros planos são as projeções da trajetória nos planos determinados pelas direções norte-sul, leste-oeste e vertical.

aproximadamente 1/8 de céu encoberto por *Cumulus Humilis* (Figura 10c). No dia 23, último dia do experimento, o céu apresentou-se claro, com filamentos de *Cirrus* e *Alto cumululus* (Figura 10d).

Durante a campanha de coleta de dados, o comportamento da trajetória tridimensional das radiossondagens foi calculado com auxílio da informação de vento e taxa de ascensão da sonda. As trajetórias não apresentaram grandes variações, mostrando semelhança ao caso exemplificado na Figura 11. As sondagens apresentaram alguma diferença de altitude alcançada e velocidade de ascensão (Domingues et al., 2002). As sondas subiram praticamente na vertical nos três primeiros quilômetros de altura, apresentando uma deriva mais significativa para leste a partir desses níveis. As distâncias que as sondas se afastaram do ponto de origem podem ser consideradas pequenas, pois foram de, no máximo, 150 km.

A Figura 12 apresenta a evolução temporal da temperatura, umidade específica e das componentes zonal e meridional do vento durante o experimento. Estes perfis foram obtidos das medidas de radiossondagens. Houve uma variação de temperatura e direção do vento durante a passagem das frentes frias. Algumas horas antes da passagem da segunda frente, final do dia 19, a umidade específica nos níveis baixos aumentou significativamente. Ao final deste dia, a umidade sofreu queda brusca e o vento virou de sul próxima à superfície. De uma forma geral, a umidade variou em torno de 6 a 10 g/kg nos baixos níveis, chegando a 16 g/kg próximo à superfície, o que representou 80% de umidade relativa. Os ventos em baixos níveis foram predominantemente de leste e fracos, em torno de 5 m/s.

A Figura 13 apresenta a temperatura, umidade e pressão atmosférica na torre meteorológica a 22 metros de altura. As curvas mostram declínio da temperatura e da pressão ao final do dia 14, indicando a chegada da frente fria. A partir do dia 15 a região é dominada pela massa de ar relativamente mais fria e seca que segue na retaguarda da frente fria, o mesmo ocorre após o dia 20, durante a passagem da segunda frente. O ciclo diurno pode ser percebido nas três variáveis da figura. Essas medidas obtidas da torre micrometeorológica concordam com as das sondagens próximas da superfície.

A Figura 14 apresenta a variação do índice de estabilidade K. Neste experimento, foi verificado que para valores de  $K > 35$  ocorreu atividade elétrica local. Este limiar foi ultrapassado nos dias 15 e 19. Por outro lado valores de K maiores que 25 ocorreram nos dias 14 e entre os dias 18 e 24, indicando a possibilidade de atividade convectiva espalhada na região de influência da radiossondagem. Isso foi constatado nos dados de relâmpagos, apresentados na distribuição horária da Figura 15. Observa-se que os dias 14-15, final do dia 18, dia 19 para o dia 20, dia 20 para 21 e final do dia 21 apresentaram atividade elétrica. Por outro lado, durante os dias 22 e 23 ocorreu uma situação dinâmica desfavorável à ocorrência da convecção. Os dois eventos de máximo valor de K ocorreram nos dias 14-15 e 19-20. Os valores de atividade elétrica registrados estão subestimados devido à eficiência do sistema de detecção nessa

região do experimento. Mais detalhadamente, por exemplo, no dia 19 nota-se que K cresce acentuadamente a partir das 1600 UTC e atinge o máximo às 1800 UTC, indicando o momento de maior instabilidade convectiva na atmosfera da região em estudo. Constataram-se quanto à atividade elétrica, na região, uma primeira ocorrência em torno das 1000-1200 UTC, que não foi percebido no sítio do experimento, apesar de haver estruturas convectivas na imagem de satélite. Uma segunda atividade mais intensa ocorreu entre 1700 e 2300 UTC, com constatação visual no sítio do experimento, a partir das 2000 UTC. A Figura 12 mostra que a umidade específica atingiu o valor máximo em torno de 900 a 850 hPa no período de maior instabilidade convectiva, enquanto que os ventos em altos níveis atingiram a intensidade de 30 m/s provenientes de oeste. Após as 2100 UTC, a instabilidade convectiva se dissipou.

O comportamento do índice K assemelha-se bastante ao comportamento do índice CAPE (Figura 16). Entre o entardecer do dia 15 até o início da manhã do dia 18 ocorreram os valores mínimos de K e CAPE. Por outro lado, os valores de CAPE chegaram próximo a 3000 J/kg no dia 14 e superaram esse valor no dia 20; estes valores estão relacionados as tempestades de maior intensidade que ocorreram durante o experimento. Foi observado nesses dados que, após o período de atividade convectiva, a CAPE foi consumida e a instabilidade foi rapidamente reduzida. Como esperado, CINE é bem menor que CAPE nos momentos em que a atmosfera está instável, por exemplo às 2100 UTC do dia 20 os valores de CAPE e CINE foram 3465 e 1 J/kg, respectivamente. Ambos são pequenos ou nulos em condições atmosféricas convectivamente estáveis, como entre os dias 15, à tarde, e o dia 18, pela manhã. A Figura 16 mostra a evolução temporal de CAPE e de CINE para valores maiores que 100 J/kg. Na maioria dos casos, a parcela mais instável originou-se à superfície.

O parâmetro K é um indicador de estabilidade atmosférica, que muitas vezes é utilizado para auxiliar na previsão de tempestades a curto prazo. Não existe nenhuma relação direta conhecida entre o parâmetro K e a polaridade das descargas. O mesmo ocorre com o valor do índice CAPE. Por outro lado, valores altos desses parâmetros podem estar associados a granizo e convecção profunda. Por sua vez, a ocorrência desses hidrometeoros parece estar associada a ocorrência de descargas elétricas positivas (MacGorman e Rust, 1998). Além dessa causa, relâmpagos positivos também podem estar associados a outras origens, como, por exemplo, fumaças de queimadas (Murray et al., 2000), como é o caso nesse período nessa região. Constatou-se, para essa mesma região, atividades convectivas com distintas percentagens de polaridades no transcorrer do evento. Por exemplo, houve predominância de relâmpagos positivos entre os dias 14 e 15 e relâmpagos negativos nos outros eventos. Essas diferenças motivam um estudo mais específico do comportamento das atividades elétricas das células convectivas atuantes na região.



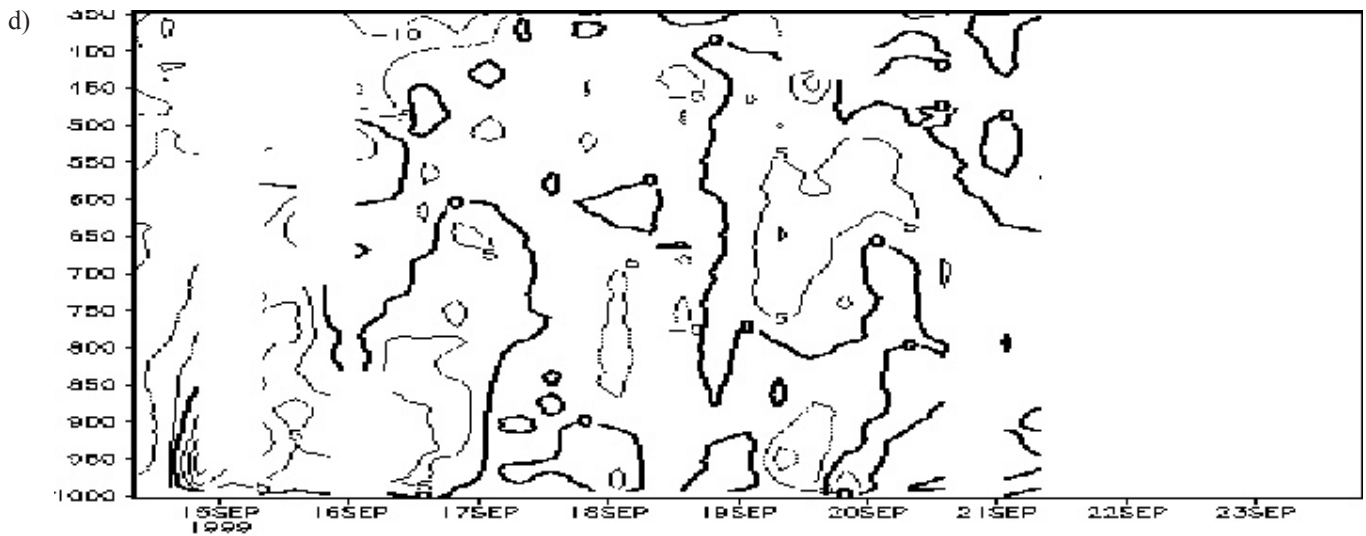


Figura 12: Evolução temporal dos perfis de: a) temperatura do ar (°C), b) umidade específica (g/kg), componentes c) zonal e d) meridional do vento (m/s), de 14 a 23 de setembro de 1999 na base experimental.

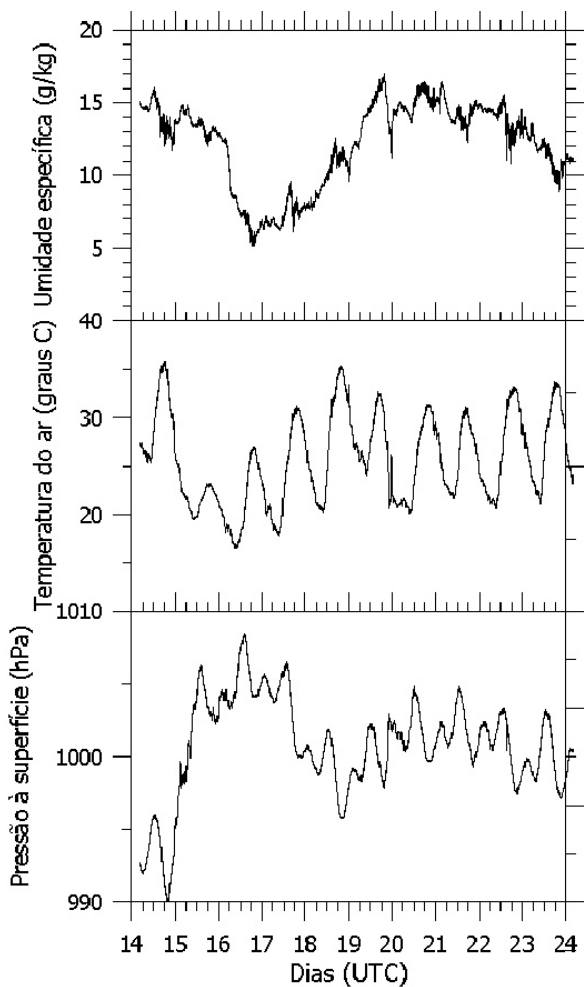


Figura 13: Evolução temporal da pressão atmosférica à superfície, da temperatura do ar (°C) e da umidade específica (g/kg) na estação automática da torre micrometeorológica, de 14 a 23 de setembro de 1999.

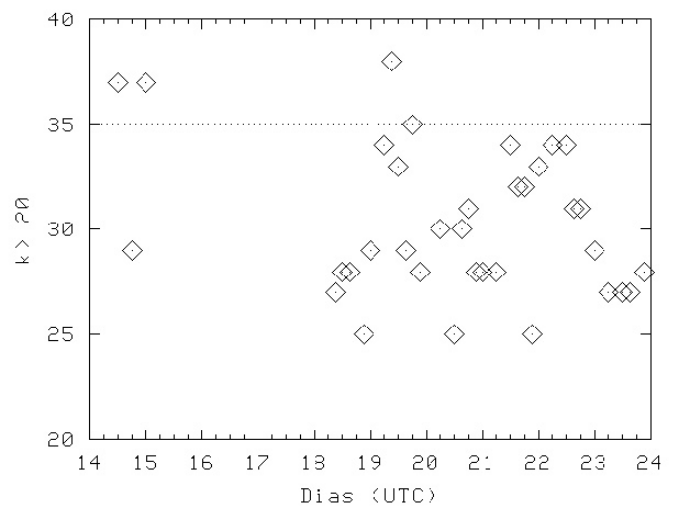
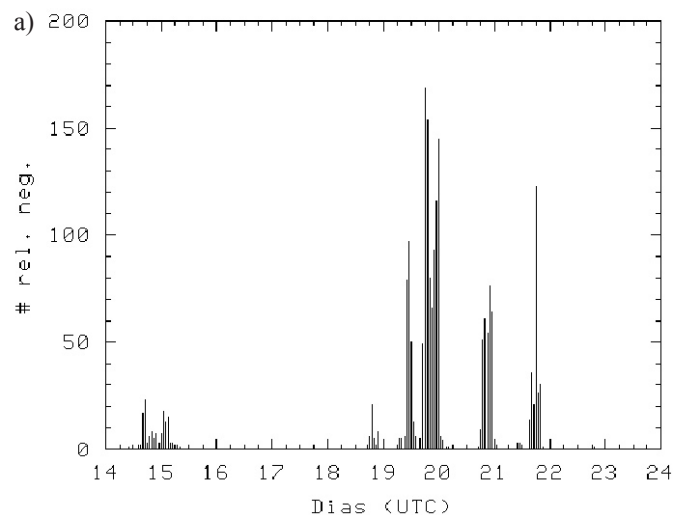


Figura 14: Índice de estabilidade K no período da campanha (de 14 a 24 de setembro de 1999).



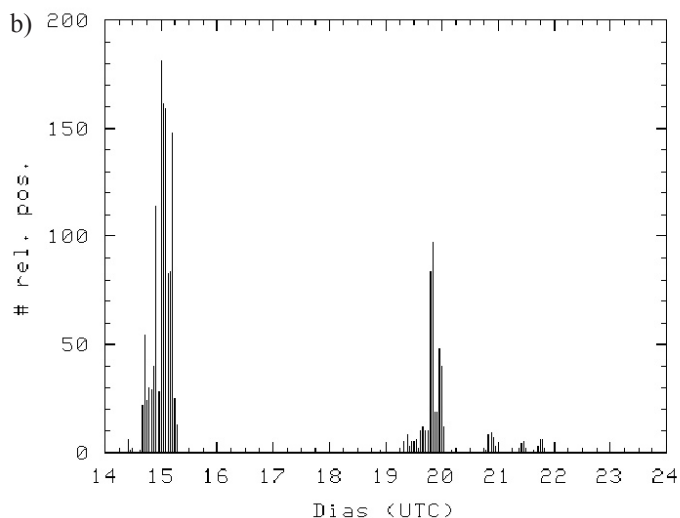


Figura 15: Distribuição horária de relâmpagos na região do experimento, no Pantanal do Mato Grosso do Sul, para o período de 14 a 24 de setembro de 1999: polaridade a) negativa e b) positiva.

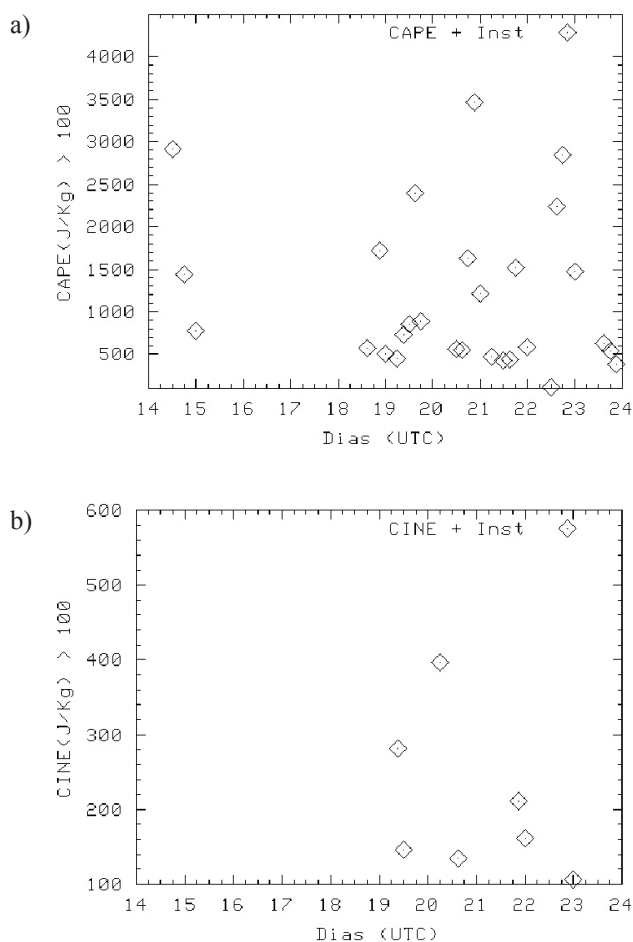


Figura 16: Os índices CAPE e CINE (J/kg) no período da campanha, de 14 a 24 de setembro de 1999 na base experimental.

#### 4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho procura atender não somente a comunidade de micrometeorologia, mas também pesquisas de tempo e de estudos climáticos no Pantanal Sul Mato-grossense.

Durante essa campanha experimental, constatou-se que a circulação predominante foi anticiclônica nos dias 14 pela manhã, 17 a 19 pela manhã, e 22 a 23, favorecendo a estabilidade atmosférica. Favorecidos por essas situações, ocorreram diversas queimadas antropogênicas, que provocaram significativa redução de visibilidade, documentadas visualmente. Ocorreram as passagens de duas frentes frias que induziram a convecção na região do experimento nos dias 14-15 e 19-20. De um modo geral, os ventos em baixos níveis foram de leste, enquanto que em altos níveis de oeste. Observou-se também um pronunciado ciclo diurno nas variáveis de umidade específica, temperatura do ar e pressão à superfície.

Os valores elevados de CAPE estavam associados a valores pequenos de CINE e a valores altos do índice K. Os valores destes índices refletem a situação dinâmica organizada em grande escala e foram precursores da atividade elétrica. Quanto à ocorrência de relâmpagos, constataram-se distintas percentagens de polaridades no transcorrer dos eventos convectivos nessa mesma região, fato que implica a necessidade de se estudar mais detalhadamente as atividades elétricas de células convectivas e o acompanhamento da evolução dessas células na região estudada.

Todas as informações de tempo obtidas durante experimentos micrometeorológicos são de grande auxílio para o entendimento dos fenômenos físicos ocorridos e para a análise consistente dos dados. Com este trabalho, buscou-se integrar diversas informações já usuais e outras complementares, tais como imagens de satélite meteorológico, imagens do céu, medidas de radiossondagens, dados de precipitação e dados de relâmpagos, para auxiliar de maneira mais abrangente os estudos decorrentes desse experimento. Como uma visão mais aplicada a micrometeorologia, ressalta-se ainda neste trabalho, para exemplo, alguns estudos que envolveram esses dados. Zeri (2002) estudou a representatividade das medidas de fluxo e ondas de gravidade; Andrade (2003) estudou casos de turbulência noturna e jatos de baixos níveis; e Cássia (2002) estudou o balanço de radiação no Pantanal Sul Mato-grossense.

#### 5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à FAPESP (Projeto Via-Lux, Proc. N° 1998/3860-9 e Projeto IPE, Proc. N° 1998/0105-5) e ao CNPq (PQs N° 300329-1996-2, 477819-2003-6 e 478707-2003-7) o apoio financeiro recebido. Agradecem à Universidade Federal do Mato-Grosso do Sul pelas instalações e todo apoio logístico e, em especial, ao Dr. Amauri de Souza. Agradecem ainda à Dra. Regina Célia dos Santos Alvalá e ao Meteorologista César A. A. Beneti o apoio científico, como

também aos colegas que participaram do experimento IPE 2 e à Fundação Tecnológica SIMEPAR o fornecimento dos dados de descargas elétricas do RIDAT.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANDRADE, E. S. **Estudo da influência de jatos de baixos níveis na estrutura da camada limite estável acima do Pantanal Mato-grossense**. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, abr. 2003. (Em publicação).
- BADER, M. J.; FORBES, G. I.; GRANT, J. R.; LILLEY, R. B. E.; WATERS, A. J. **Images in weather forecasting. A practical guide for interpreting satellite and radar imagery**. Cambridge: Cambridge University, 1995. 500 p.
- BENETI, C. A. A.; ALVIM, E. L.; ANDRADE, S. M. G.; ASSUNÇÃO, L. A. R.; CAZETTA, A. F.; REIS, R. J. RIDAT – Rede integrada de detecção de descargas atmosféricas no Brasil: situação atual, aplicações e perspectivas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 11., 2000, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: Sbm, 2000. Seminário de Meteorologia por radar e física de nuvens (MR00013). 1 CD-ROM.
- BENT, R. B.; LYONS, W. A. Theoretical evaluations and initial operational experiences of LPATS (Lightning Positioning and Tracking System) to monitor lightning ground strikes using a Time-Of-Arrival (TOA) technique. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ATMOSPHERIC ELECTRICITY, 7., 1984, Albany. **Proceedings...** Albany: American Meteorological Society, 1984. p. 317-324.
- CÁSSIA, R. S. **Estudo do balanço de radiação no Pantanal Sul Mato-grossense**. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, set. 2002. (Em publicação).
- CURTIS, A.; MAURER, H. Optimizing the design of geophysical experiments: it is worthwhile? **EOS-Transaction**, Washington, v. 81, n. 20, p. 224-225, 2000.
- DOMINGUES, M. O.; MENDES JR., O.; SÁ, L. D. A.; CHOU, S. C.; MANZI, A. O. **Estado do céu durante o experimento IPE 2 do projeto de estudo da camada limite superficial do Pantanal Sul Mato-grossense**. São José dos Campos, 2002. (INPE-8861 - NTC/438). 1 CD-ROM.
- DOSWELL, C. A.; RASMUSSEN, E. R. The effect of neglecting the virtual temperature correction on CAPE calculation. **Weather and Forecasting**, v. 9, p. 625-629, 1994.
- DOTTORI, M.; NEGRAES, R. **GPS Global Positioning System: manual prático**. São Paulo: Fittipaldi, 1997. 64 p.
- HART, R. **GrADS script to plot a SkewT/LogP diagram**. [on-line]. Disponível em: <<http://www.ems.psu.edu/~hart/skew.html>>. Acesso em: 23 jan. 2001.
- IRIBARNE, J. V.; GODSON, W. L. **Atmospheric thermodynamics**. Dordrecht: Reidel, 1981. p. 259.
- KRIDER, E. P.; NOGGLE, R. C.; UMAN, M. A. A gated, wideband magnetic direction finder for lightning return strokes. **Journal of Applied Meteorology**, v. 15, p. 301-306, Mar. 1976.
- MAC. **The use of the skew T, Log P diagram in analysis and forecasting**. Illinois: Air Weather Service. Scott AFB, Dec. 1979. (AWS/TR-79/006).
- MACGORMAN, D. R.; RUST, W. D. **The electrical nature of storms**. New York : Oxford University Press, 1998. 422 p.
- MANZI, A. O. et al. **Estudo da camada limite do Pantanal Mato-grossense**. [on-line]. São José dos Campos, 1998. (Projeto, FAPESP 98/00105-5). Disponível em: <<http://www.cptec.inpe.br/ipe2/html/publicacoes.htm>>.
- MANZI, A. O. et al. **Estudo da camada limite do Pantanal Mato-grossense**. [online]. São José dos Campos, 1999. (Relatório técnico parcial, FAPESP 98/00105-5). Disponível em: <<http://www.cptec.inpe.br/ipe2/html/publicacoes.htm>>.
- MENDES JR., O.; DOMINGUES, M. O.; GIN, R. B. B.; PINTO JR., O.; PINTO, I. R. C. A. Climatological evaluation of parameters for a more realistic lightning modeling. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 10., CONGRESSO DA FLISMET, 8., 1998, Brasília. **Proceedings**. Brasília: Sbm, 1998. 1 CD-ROM.
- MENDES JR., O.; DOMINGUES, M. O.; PINTO JR., O.; PINTO, I. R. C. A.; SABA, M. M. F. Via-Lux Project: a quantitative imagery method for lightning event analysis. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF GEOPHYSICS, 6., 1999, Rio de Janeiro. **Proceedings**. Rio de Janeiro: Brazilian Geophysics Society, set. 1999. (SBGf-212). 1 CD-ROM.
- MENDES JR., O.; DOMINGUES, M. O. Programa para análises de relâmpagos: ThoR-SLA. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 11., 2000, Rio de Janeiro. **Anais**. Rio de Janeiro: Sbm, 2000. p. 2077-2081. 1 CD-ROM.

MURRAY, N. D.; ORVILLE, R. E.; HUFFINES, G. R. Effect of pollution from Central American fires on cloud-to-ground lightning. **Geophysical Research Letter**, v. 27, n. 15, p. 2249-2252, Aug. 2000.

SÁ, N. C. **GPS: fundamentos e aplicações**. São Paulo: IAG/USP, 1999. 87 p. (Apostila do curso: introdução à geodésia).

SIMPSON, J. E. **Sea breeze and local winds**. Cambridge; New York : Cambridge University Press, 1994. 234 p.

STULL, R. B. **An introduction to boundary layer meteorology**. Dordrecht: Kluwer, 1988. 666 p.

WILLIAMS, E. Meteorological aspects of thunderstorms. In: VOLLAND, H. (Ed.). **Handbook of atmospheric electrostatics. I**. London: CRC, 1995. p. 27-60.

ZERI, L. M. M. **Estudo comparativo da estrutura da turbulência atmosférica na camada limite superficial acima do Pantanal Mato-grossense nos períodos úmido e seco**. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, set. 2002.