



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
CENTRO DE CIÊNCIAS MATEMÁTICAS E DA NATUREZA
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE METEOROLOGIA

AVALIAÇÃO DE MÉTODO DE PREVISÃO PARA TEMPESTADES
CONVECTIVAS SEVERAS POR MUDANÇA DA TEMPERATURA DO
AR E DO PONTO DE ORVALHO JUNTO À SUPERFÍCIE EM
SONDAGENS ATMOSFÉRICAS

Lúcio Henrique Daou Robalinho de Azevedo

Monografia de fim de curso como parte dos requisitos necessários à obtenção do Grau de Bacharelado em Meteorologia pelo Departamento de Meteorologia da Universidade Federal do Rio de Janeiro.

Orientador: DSc. Wallace Figueiredo Menezes

Rio de Janeiro
Outubro, 2009

FICHA CATALOGRÁFICA

Robalinho, Lúcio Henrique Daou

Avaliação de método de previsão para tempestades convectivas severas por mudança da temperatura do ar e do ponto de orvalho junto à superfície em sondagens atmosféricas / Lúcio Henrique Daou Robalinho de Azevedo.

Rio de Janeiro: UFRJ/ Departamento de Meteorologia, 2009.

viii, 48 p.; il.

Monografia – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Departamento de Meteorologia, 2009.

Orientador: DSc. Wallace Figueiredo Menezes

1. Meteorologia Física 2. Tempestades Convectivas 3. Sondagem Atmosférica 4. Índices de Instabilidade 5. Monografia (Graduação UFRJ/IGEO) 6. Wallace Figueiredo Menezes I. Título

AVALIAÇÃO DE MÉTODO DE PREVISÃO PARA TEMPESTADES
CONVECTIVAS SEVERAS POR MUDANÇA DA TEMPERATURA DO
AR E DO PONTO DE ORVALHO JUNTO À SUPERFÍCIE EM
SONDAGENS ATMOSFÉRICAS

Lúcio Henrique Daou Robalinho de Azevedo

Monografia submetida à banca examinadora, como parte dos requisitos para obtenção
do grau de Bacharel em Meteorologia

Aprovada por:

DSc. Wallace Figueiredo Menezes

Departamento de Meteorologia – IGEO – UFRJ

DSc. Maria Gertrudes Alvarez Justi da Silva

Departamento de Meteorologia – IGEO – UFRJ

MSc. Daniele Rodrigues Ornelas de Lima

FURNAS Centrais Elétricas

Dedico este trabalho para 3 pessoas muito importantes, Henrique, Helena e meu avô Robert Phillippe Daou, cujos sacrifícios, valores, ensinamentos, labor e dedicação para prover o bem-estar e desenvolvimento integral de seus descendentes permitiram tornar-me o ser humano que sou hoje, e que melhor serei no futuro.

Agradecimentos

Aos meus pais, que me trouxeram a este mundo, meu primeiro agradecimento. Pela compreensão, pelo porto seguro que sempre foram; pelo exemplo constante de caráter e pela valorização da cultura e do respeito ao próximo na minha formação.

Às minhas irmãs, avôs e avós, tias, tios, primo e primas, meu muito obrigado pelo acolhimento, imensurável apoio nesta longa caminhada até aqui. As lembranças e os valores, a verdadeira herança familiar, permanecerão gravados para sempre comigo.

Aos amigos Jefferson e Felícia, pelos exemplos de união, liderança, apoio e solidez diante de todos os desafios e revezes da vida. A todos os amigos-irmãos espalhados pelo Brasil e pelo mundo, não há palavras que demonstrem a minha gratidão de poder conviver e evoluirmos juntos: Alan, Vitor, Humberto, Mário, família Blikstad, Sylvia, Edison, Jefferson P., Danilo G., Danilo R., Camila, Henrique J., Fernanda G., Marcelo L. e Ana, Marcelo M. e Fabíola, Marcos M., Cristina M. e Fábio M..

Na UFRJ, agradeço aos colegas de laboratório e de tantas turmas, que também se tornaram amigos nesta caminhada acadêmica: Carol Mourão, Cris, Igor, Marcos, Eliana, Natália, Nathália, Alessandro, Victor “Gut”, Denise, Renato, Rodrigo Barreto e Rafael Le Masson. A todos do Laboratório de Prognósticos e Mesoescala, meus agradecimentos pelo acolhimento e apoio em especial aos professores Justi, Wallace e Claudine, que se tornaram amigos e conselheiros ao longo desta graduação. Agradecimentos mais do que especiais para as grandes amigas formadas: Luciana e David, Bruno Duarte, Guilherme Chagas, Jessica e Tozzi.

Agradeço também aos amigos petropolitanos Carol W., Bernardo, Cadu, Renata, Otavio, Erich, Guilherme L., Ana Paula e ao motorista Chiquinho, que tornaram a desgastante viagem diária de/para Petrópolis em momentos de amizade, alegria e bom-humor, apesar de alguns sustos. E também os amigos de escola Filipe, Rodrigo e Albert.

Agradeço por fim à UFRJ pela oportunidade de obter meu diploma de nível superior nesta instituição tão importante e renomada. Apesar de todos os seus defeitos, é com muito orgulho que eu direi que sou formado na Universidade Federal do Rio de Janeiro.

A todos vocês, o meu sincero Obrigado,

Lúcio Henrique Daou Robalinho de Azevedo

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

CAPE - *Convective Available Potential Energy* – Energia Potencial Convectível Disponível

CINE - *Convective INhibition Energy* – Energia de Inibição da Convecção

CPTEC/INPE – Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

GEMPAK - *GEneral MEteorology PAcKage* – Pacote Geral de Meteorologia – Pacote de softwares destinados à análise, visualização e geração de dados meteorológicos

IPMet/UNESP – Instituto de Pesquisas Meteorológicas da Universidade Estadual de São Paulo

METAR - *METeorological Aerodrome Report* - Relatório Meteorológico de Aeródromo

NCL - Nível de Condensação por Levantamento

NSHARP – Programa do pacote GEMPAK, responsável pela manipulação de sondagens

Skew-T x Log P – Diagrama termodinâmico onde no eixo vertical encontra-se a pressão em escala logarítmica e em linhas inclinadas para a esquerda e direita, escalas de temperatura

T – Temperatura do Ar

Td – Temperatura do Ponto de Orvalho

TroCCiBras – *Tropical Convection and Cirrus Experiment* Brasil – Experimento de Convecção Tropical e Cirrus

Z – Hora Universal, também conhecida como UTC (*Coordinated Universal Time*), utilizada na meteorologia e aviação como referência de tempo de modo a evitar confusão com fusos horários

ZCAS – Zona de Convergência do Atlântico Sul

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo verificar a validade de um método descrito por Doswell III (2001) que visa modificar sondagens atmosféricas de modo a gerar uma estimativa da ocorrência de tempestades severas durante o período da tarde, quando há maior atividade convectiva. São utilizados dados obtidos durante a campanha internacional TroCCiBras/Hibiscus realizada no verão 2003/2004 no IPMet/UNESP em Bauru, SP. Durante 27 dias, foram realizadas quatro sondagens diárias, nos horários padronizados 00Z, 06Z, 12Z e 18Z, para dar suporte às experiências científicas realizadas durante a campanha. O método proposto consiste na alteração da temperatura do ar em uma sondagem matutina, visando estimar o perfil termodinâmico mais instável do dia, sendo que neste trabalho também a temperatura do ponto de orvalho é modificada. A partir de uma sondagem realizada às 12Z, valores de ambas as temperaturas são trocados pelos valores observados às 18Z do mesmo dia no aeroporto de Bauru (dados originados de mensagens METAR). Considerando a hipótese de pouca alteração nos altos e médios níveis da atmosfera entre estes horários, espera-se que seja gerada uma boa estimativa para as condições atmosféricas às 18Z, especialmente do índice CAPE, cujos valores estimados são comparados com os valores observados nas sondagens reais deste horário. Os resultados indicam um bom desempenho deste método, com as sondagens e índices estimados se aproximando satisfatoriamente das sondagens efetivamente realizadas às 18Z. Seu uso operacional demanda cuidados devido à grande sensibilidade a pequenas alterações nos valores das temperaturas do ar e do ponto de orvalho, que resultam em significativas variações nos valores estimados para a CAPE.

ABSTRACT

This work aims to verify the applicability of a method described by Doswell III (2001) to modify atmospheric soundings, in way to estimate the probability of severe convective storms occurrence during the afternoon, when the convective activity is increased. The sounding data used in this work were measured during the scientific experiment TroCCiBras/Hibiscus in the 2003/2004 summer at IPMet/UNESP, located in Bauru, SP. For 27 days, there were 4 diary soundings on the standard meteorological times 00Z, 06Z, 12Z and 18Z, to support the other activities related to the experiment. The method consists in the change of the ground air temperature of a morning sounding, aiming to estimate the most unstable atmospheric profile for the day, with dew temperature being changed too. Both temperatures are modified from the 12Z sounding values to the observed ones at 18Z in the Bauru airport, from METAR reports. As long as the atmospheric structure at medium and high levels stays mostly unchanged between 12Z and 18Z, a good estimate of the instability indexes is expected. The estimated CAPE index values are verified and compared against the 18Z real soundings. The results show a good performance of the proposed method, with the modified 12Z soundings CAPE index estimate values very close to the ones from the 18Z soundings. Due to the significant sensitivity to small air and/or dew temperature changes resulting in expressive CAPE value differences, the use of this method in operational forecast environments should be done with care. A low-quality air or dew temperature forecast can lead to completely wrong estimates, so this method should be used as an aid, not as a main severe convective storm forecast tool.

Sumário

Agradecimentos	iii
LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS.....	iv
RESUMO	v
ABSTRACT	vi
Índice de Figuras.....	viii
1 Introdução.....	1
2 Revisão Bibliográfica.....	5
2.1 Tempestades Convectivas Severas	5
2.2 Diagrama Skew-T x Log P.....	8
2.3 CAPE	9
2.4 Correção da Temperatura Virtual para a CAPE	10
2.5 Método de Substituição das Temperaturas do Ar e do Ponto de Orvalho na Superfície	12
3 Metodologia.....	13
3.1 Estação Meteorológica de Altitude (Radiossondagens).....	13
3.2 Processamento dos Dados	14
4 Uma Breve Análise Sinótico-Climática	16
4.1 Janeiro/2004	16
4.2 Fevereiro/2004.....	17
5 Resultados	18
5.1 Dia 01/Fev/2004	21
5.2 Dia 02/Fev/2004	24
5.3 Dia 03/Fev/2004	27
5.4 Dia 05/Fev/2004	29
5.5 Dia 06/Fev/2004	31
5.6 Dia 10/Fev/2004	33
6 Conclusão	36
7 Bibliografia.....	38

Índice de Figuras

Figura 2.1: Estágios de uma célula convectiva simples: (a) Desenvolvimento, (b) Maduro, (c) Dissipação.	6
Figura 2.2: Sondagem atmosférica de um ambiente propício ao desenvolvimento de tempestade severa com ventos fortes	7
Figura 2.3: Diagrama Skew-T x Log P	8
Figura 4.1: Média da Temp. de Brilho pelo satélite GOES para os dias 25 a 29 de Janeiro de 2004	16
Figura 4.2: Indicativo de atuação de frentes frias do Boletim Climanálise de Fevereiro de 2004. Fonte: CPTEC/INPE.....	17
Figura 5.1: CAPE observada às 12Z (pontos azuis) 18Z (linha vermelha) e estimada para as 18Z.(linha amarela).....	18
Figura 5.2: CAPE observada às 12Z e 18Z e estimativa alterando T e Td superfície.....	19
Figura 5.3: Comparação entre erros dos métodos substituindo T (linha azul) e substituindo T e Td (linha vermelha).....	20
Figura 5.4: Sondagens do dia 01/Fev/2004, (a) Observada às 1200Z, (b) Observada às 1800Z, (c) Estimada com T das 18Z, (d) Estimada com T e Td às 18Z.	23
Figura 5.5: Sondagens do dia 02/Fev/2004, (a) Observada às 1200Z, (b) Observada às 1800Z, (c) Estimada com T das 18Z, (d) Estimada com T e Td às 18Z.	25
Figura 5.6: Arredores do IPMet/UNESP em Bauru, SP. Data da imagem: 11/Ago/2004 Fonte: Google Earth.....	26
Figura 5.7: Arredores do Aeroporto de Bauru, SP. Data da imagem: 11/Ago/2004 Fonte: Google Earth.....	26
Figura 5.8: Sondagens do dia 03/Fev/2004, (a) Observada às 1200Z, (b) Observada às 1800Z, (c) Estimada com T das 18Z, (d) Estimada com T e Td às 18Z.	28
Figura 5.9: Sondagens do dia 05/Fev/2004, (a) Observada às 1200Z, (b) Observada às 1800Z, (c) Estimada com T das 18Z, (d) Estimada com T e Td às 18Z.	30
Figura 5.10: Sondagens do dia 06/Fev/2004, (a) Observada às 1200Z, (b) Observada às 1800Z, (c) Estimada com T das 18Z, (d) Estimada com T e Td às 18Z.	32
Figura 5.11: Sondagens do dia 10/Fev/2004, (a) Observada às 1200Z, (b) Observada às 1800Z, (c) Estimada com T das 18Z, (d) Estimada com T e Td às 18Z.	34

1 Introdução

Tempestades convectivas severas são a causa de grandes prejuízos, devido à intensidade das chuvas e dos demais eventos meteorológicos associados, como ventos e granizo, que levam a muitas perdas materiais e em casos extremos, podendo até causar perda de vidas humanas (Silva Paiva, 2000) e (Menezes, Silva Paiva, *et al.*, 2000). A previsão de sua ocorrência não é simples, pois elas podem se formar num curto período de tempo, com grande intensidade. Uma forma de previsão destas tempestades é através do diagnóstico das condições necessárias à sua formação. Conhecendo-se bem estas condições, o meteorologista tem um subsídio melhor para elaborar previsões, que podem ser baseadas em modelos conceituais para a formação de convecção vigorosa. Entre muitos métodos, ao longo dos anos foram criados alguns índices que tentam condensar as informações termodinâmicas em números mais objetivos, visando facilitar o trabalho do previsor.

Muitos destes índices são discutidos na literatura, sendo alguns mais explorados em trabalhos recentes, que é o caso dos índices K, CK, Totals-Totals, e a CAPE (*Convective Available Potential Energy* – Energia Potencial Convectível Disponível), entre outros (Nascimento, 2005), (Lima, 2005) e (Mourão, 2007), sendo a CAPE foco deste trabalho.

Estes índices termodinâmicos são calculados a partir de informações oriundas de sondagens atmosféricas, que mensuram e registram as três principais variáveis meteorológicas: pressão atmosférica, temperatura do ar e umidade relativa (comumente indicadas pela sigla PTU). O primeiro, e até hoje eficaz método de coletar estes dados é o lançamento de radiossondas, cujo desenvolvimento inicial data das décadas de 1920 e 1930 por meteorologistas dos Estados Unidos da América (EUA), Rússia, França e Finlândia, de forma independente em cada local.

Hoje, no Brasil, as sondagens são realizadas diariamente às 12Z, 9h da manhã. Entretanto, uma sondagem realizada neste horário tem uma grande limitação prática para a previsão de tempestades convectivas, pois estas ocorrem principalmente à tarde, no momento em que a atmosfera normalmente se encontra muito mais instável do que no horário em que a sondagem é realizada. A presença de uma sondagem às 18Z (15h no horário oficial de Brasília) resolveria apenas parcialmente o problema da previsão destas tempestades, pois neste horário a atividade convectiva já está ocorrendo, não servindo como auxílio à previsão, que deve ser feita várias horas antes do evento e não durante o mesmo.

Porém, desta forma, o ideal seria que o meteorologista já conhecesse, a priori, qual seria o perfil termodinâmico das 18Z, e desta forma, tivesse um dado mais útil para ajudar na previsão da convecção do meio e fim de tarde. Diagnosticamente falando, a realização de sondagens às 12Z e também às 18Z dá suporte à criação de métodos de previsão que possam ser verificados, como o descrito por Doswell III (2001) e estudado neste trabalho. Este método consiste em alterar a temperatura à superfície de uma sondagem realizada na parte da manhã (12Z) para o valor previsto para a parte da tarde (18Z). Desta forma, pode-se comparar a sondagem estimada para as 18Z com a sondagem observada das 18Z, e assim, é possível verificar a eficiência do método, cujos detalhes serão apresentados ao longo do trabalho.

De posse uma estimativa da sondagem das 18Z e de como estarão definidos os perfis das temperaturas, umidade e valores estimados de índices termodinâmicos, o meteorologista tem em suas mãos uma ferramenta muito valiosa. Com a previsão de uma tempestade convectiva severa, é possível então alertar os órgãos de defesa civil, de modo que a população esteja o menos exposta possível aos danos que possam ocorrer.

Entre os vários índices termodinâmicos, destaca-se a CAPE, cuja variação é a principal consequência da aplicação do método. A CAPE não é um dos índices mais simples de ser calculado, pois seu valor final depende do método utilizado e também do número de registros ao longo de toda a trajetória da radiossonda, bem como também há um método de correção da CAPE utilizando a Temperatura Virtual. Foi utilizado o programa para calcular e gerar os gráficos das sondagens, o programa NSHARP, integrante do pacote de softwares GEMPAK da Unidata e *University Corporation for Atmospheric Research* (UCAR).

Os dados obtidos são oriundos das 4 radiossondagens diárias (00Z, 06Z, 12Z e 18Z) realizadas durante a campanha internacional *Tropical Convection and Cirrus Experiment Brasil* (TroCCiBras), junto com o projeto Hibiscus, ambos realizados em Janeiro e Fevereiro de 2004 nas instalações do Instituto de Pesquisas Meteorológicas da Universidade do Estado de São Paulo (IPMET/UNESP), localizado em Bauru, no estado de São Paulo. O autor participou desta campanha como integrante da equipe de lançamento de radiossondagens junto com outros 3 alunos de graduação em Meteorologia, oriundos da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) e da Universidade Federal de Pelotas (UFPel).

No Brasil, este método possui um enorme potencial de uso, devido à frequência de duas (00Z e 12Z) ou apenas uma (12Z) sondagem diária nos locais onde são realizadas, em sua maioria grandes cidades, e justamente no período da manhã, não havendo assim a realização regular de sondagens na parte da tarde. Diante desta rara realização de sondagens reais às 18Z em território nacional, foi possível então estudar e comparar as sondagens estimadas e reais.

O objetivo deste trabalho é analisar o comportamento da aplicação deste método nas condições de verão numa região tropical e de intensa atividade convectiva, tendo

sondagens reais realizadas às 18Z para comparação. Ao aplicar o método, a curva que define a CAPE num diagrama termodinâmico Skew T x Log P começa mais à direita e por conseqüência o valor da CAPE é aumentado. Este método fornece para o previsor uma estimativa do valor aproximado da CAPE de modo a facilitar a previsão de ocorrência de tempestades severas. Por fim, cabe alertar que a utilização deste método não substitui nem justifica a ausência de mais sondagens diárias realizadas em território nacional.

No Cap. 2 é apresentada a revisão da literatura sobre as tempestades convectivas severas, o diagrama termodinâmico Skew T x Log P, a CAPE e sua correção e o método proposto por Doswell. No Cap. 3 é apresentada a metodologia, como foram realizadas as sondagens reais e como foram geradas as sondagens modificadas. No Cap. 4 são apresentadas as análises sinóticas e climáticas, que definem a possibilidade de uso ou não do método., e no Cap.5 os resultados e comparações. No Cap. 6 são apresentadas as conclusões e em seguida a bibliografia consultada.

2 Revisão Bibliográfica

Nesta revisão serão demonstradas algumas das principais características das tempestades convectivas severas, decorrentes de sistemas convectivos. Também serão abordados o conceito da CAPE e as ferramentas utilizadas.

2.1 Tempestades Convectivas Severas

Diversos sistemas convectivos de mesoescala formados pelas nuvens Cumulonimbus (CBs) têm uma denominação usual que é o termo “tempestades convectivas”, sendo que existem diversos tipos de tempestades, cada uma com sua denominação específica, como “Linhas de Instabilidade” (Hane, 2001), “Tempestades Isoladas” (Weisman e Klemp, 1986), “Tempestades em Supercélulas” (Weisman e Klemp, 1986), “Nuvens Vírgula” (Reed, 1979), entre outros. Cotton e Anthes (1989) ressaltam que as nuvens cumulonimbus são sistemas convectivos que desempenham um importante papel no balanço energético global e na circulação geral da atmosfera, pelo seu eficiente transporte de umidade, calor sensível e latente dentro de porções da troposfera superior e baixa estratosfera

Quando uma tempestade convectiva produz grandes pedras de granizo, rajadas de vento muito intensas, ou qualquer tipo de destruição substancial (prejuízos materiais e humanos) no local onde ela atinge, ela recebe a denominação clássica de “Tempestade Severa” (Doswell III, 2001)

As principais trocas de energia entre a convecção (CBs) e o ambiente ao seu redor se devem a processos de aquecimento ligados à liberação de calor latente na condensação (formação das nuvens) e processos de resfriamento intenso relacionados à absorção de calor latente na evaporação (gotas de chuva evaporando na atmosfera seca em níveis médios ou, em alguns casos, baixos).

Cotton e Anthes (1989) e Byers e Braham (1949) identificaram três estágios de evolução de uma nuvem cumulonimbus ou tempestade convectiva, como pode ser visto na Figura 2.1, o estágio cúmulos (a), o estágio maduro (b) e o estágio de dissipação (c). Durante o estágio cúmulos, nuvens em forma de torres, alimentadas por convergência de umidade em baixos níveis e associadas a movimentos ascendentes, caracterizam este estágio de desenvolvimento. Movimentos descendentes associados às frentes de rajada e o início da precipitação na camada inferior da nuvem são caracterizados pela transição da fase cúmulos (a) para a fase madura (b). Tais movimentos descendentes são provocados pelo resfriamento do ar durante o processo de evaporação de gotas de nuvem e de chuva quando estão em contato com ar subsaturado de níveis médios e/ou baixos (dentro ou fora da nuvem). Quando o ar resfria devido aos processos evaporativos, ele se torna mais denso que a atmosfera ao redor, adquirindo flutuabilidade negativa e, conseqüentemente, inicia sua descida. Os ventos fortes associados às nuvens CBs são conseqüência da divergência destas correntes descendentes, quando elas atingem o solo. Este é o principal processo físico que gera as rajadas de vento associadas com as tempestades. Quando as correntes descendentes predominam, a nuvem está no estágio dissipativo.

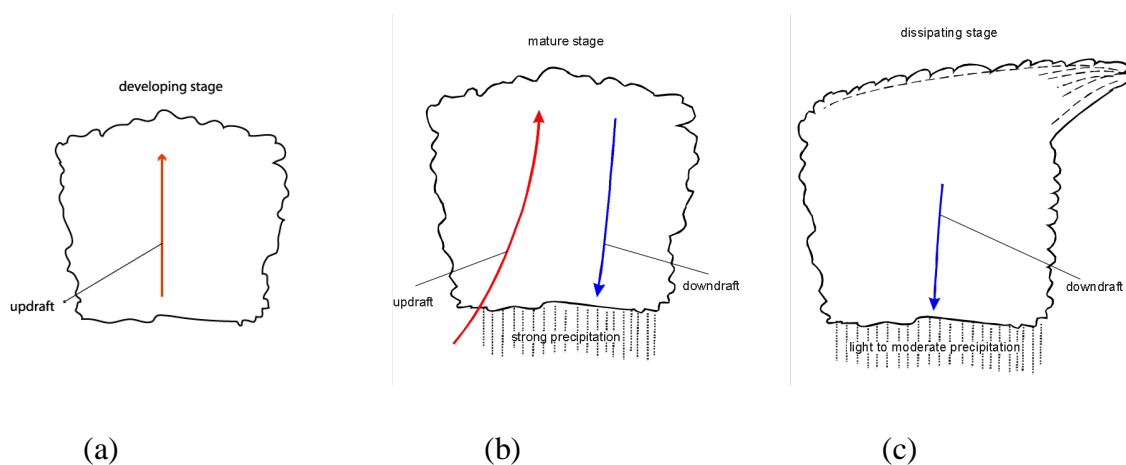


Figura 2.1: Estágios de uma célula convectiva simples: (a) Desenvolvimento, (b) Maduro, (c) Dissipação. Adaptado de (Byers e Braham Jr., 1949) – retirado de (Weisman e Klemp, 1986)]

Desta forma, tempestades de caráter mais severo, que podem provocar ventanias, grandes quantidade de chuva e até granizo, geralmente se formam em ambientes que possuem um forte gradiente vertical de umidade, ou seja, ar bastante úmido em níveis baixos (que atua como “combustível” para formar a célula convectiva pela convergência de umidade) e uma camada de ar bastante seco (ou subsaturado) situada imediatamente acima do ar úmido de baixos níveis (Hane, 2001). A figura 2.2 ilustra uma sondagem atmosférica de um ambiente propício a tempestades severas e ventanias. Nesta sondagem pode-se perceber a presença de ar úmido em baixos níveis e uma camada com grande subsaturação imediatamente acima da camada úmida, onde a linha verde (Td) se afasta da linha vermelha (T). Tal configuração é indicativa de grande instabilidade convectiva mostrando um ambiente bastante favorável à ocorrência de tempestades.

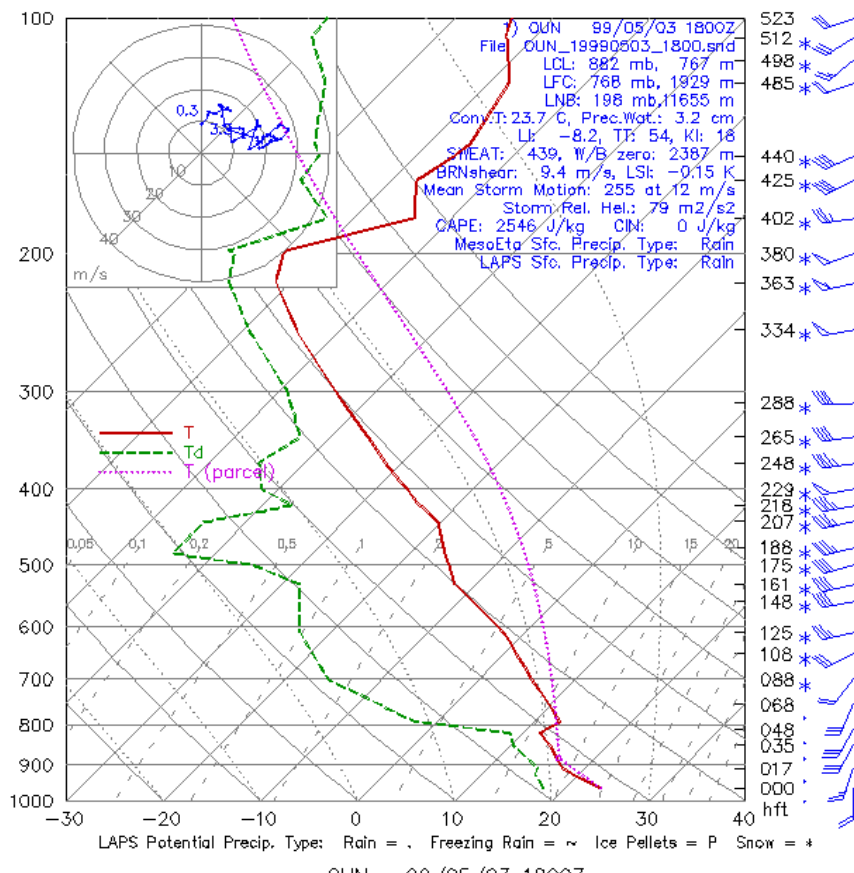


Figura 2.2: Sondagem atmosférica de um ambiente propício ao desenvolvimento de tempestade severa com ventos fortes

2.2 Diagrama Skew-T x Log P

Na figura 2.3, assim como na figura 2.2, temos diagramas Skew T x Log P, onde no eixo vertical está plotada a pressão atmosférica em escala logarítmica (Log P), e no eixo horizontal, temos 2 escalas inclinadas de temperatura (Skew T). As inclinadas para a direita (tracejadas) denotam a escala da temperatura do ar, ao longo da qual uma parcela que sobe pela atmosfera não muda de temperatura (isotermas). As linhas inclinadas para a esquerda (cheias) indicam a escala da temperatura potencial, também conhecidas como linhas adiabáticas secas. Estas linhas possuem este nome pelo fato de representarem uma trajetória termodinâmica de uma parcela hipotética que sobe na atmosfera sem mudança de fase, isto é, de forma adiabática seca.

As linhas vermelha e verde, representam, respectivamente, a temperatura do ar e do ponto de orvalho observadas ao longo da atmosfera, conforme medido pela radiossonda. A linha tracejado-pontilhada em azul-escuro representa a trajetória de uma parcela subindo na atmosfera, saindo da superfície: primeiramente por um processo

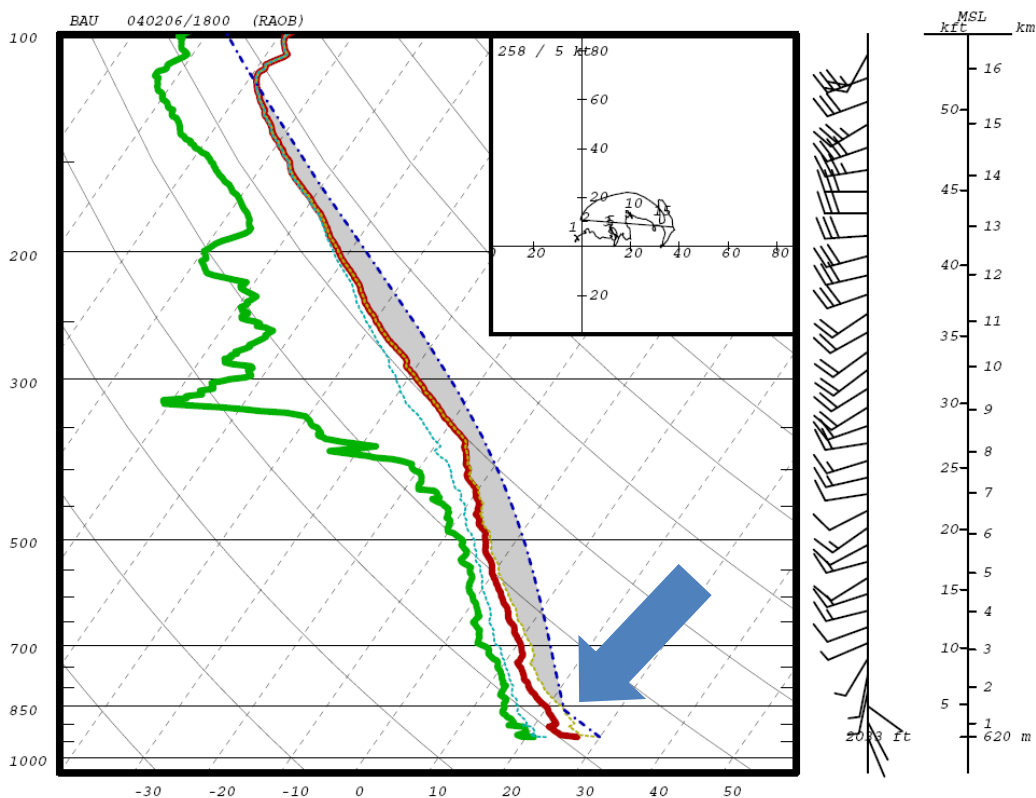


Figura 2.3: Diagrama Skew-T x Log P

adiabático seco, antes de atingir a saturação no nível de condensação por levantamento (NCL), e depois por um processo adiabático saturado com mudança de fase da água (parte curva da linha tracejada azul).

Para representar isto, devemos “subir” utilizando a linha adiabática seca que passa pela origem da parcela, até que esta cruze com a linha tracejada em cinza (inclinada para a direita), que passa pela temperatura do ponto de orvalho na superfície. Tal procedimento representa uma ascensão adiabática até atingir a saturação, mantendo-se a umidade constante.

A saturação é atingida quando a linha tracejada cinza se encontra com a linha tracejado-pontilhada azul no ponto denominado Nível de Condensação por Levantamento (NCL, indicado por uma seta azul em 850mb). É nesta altitude, portanto, onde a parcela se resfria tanto que o vapor nela contido passa a se tornar líquido, liberando calor latente a partir deste ponto. Ocorre então uma diminuição na razão de resfriamento da parcela, que passa a subir na atmosfera através das linhas adiabáticas úmidas, sendo representada nesta figura apenas a utilizada pela parcela. Deve-se notar que na baixa e média troposfera a razão de resfriamento da parcela subindo pelas linhas adiabáticas úmidas é muito menor do que a das adiabáticas secas, inclinadas para a esquerda, razão só igualada na alta troposfera, após 300 hPa.

2.3 CAPE

Na figura 2.3, há uma região em cinza delimitada pela trajetória da parcela (tracejado-pontilhada em azul). Esta região é o que se refere como *Convective Available Potential Energy* (Energia Potencial Convectiva Disponível), mais conhecida pelas iniciais em inglês: CAPE. A sondagem da figura 2.3 foi gerada usando o cálculo da correção da Temperatura Virtual, que faz com que a região da CAPE seja limitada à esquerda pela linha dourada ao invés da linha vermelha da Temperatura do Ar. A

definição que se segue não leva em conta esta correção, cuja importância é explicada na seção 2.4.

Ao analisar um determinado nível, a presença de CAPE indica que naquela região, uma parcela levantada da superfície (ou outro nível) possui densidade menor que o ambiente ao seu redor. Isto significa que se for elevada até este nível, a parcela continuará subindo espontaneamente, até o nível em que a região cinza não esteja presente. É possível haver regiões com e sem CAPE (ou com seu inverso, a CINE¹, onde a parcela desce espontaneamente), intercaladas ao longo do perfil da atmosfera.

Weissman, et al (1986) definem a CAPE como *Buoyant Energy* (B), numa tradução livre, “Energia de Flutuação”, disponível para uma parcela que se eleva numa atmosfera não-perturbada. Seu valor é calculado através da seguinte integral:

$$B = g \int \frac{\theta(z) - \bar{\theta}(z)}{\bar{\theta}(z)} dz \left[\frac{m^2}{s^2} = \frac{Kg \cdot m^2}{Kg \cdot s^2} = \frac{J}{Kg} \right]$$

Onde $\theta(z)$ é a Temperatura Potencial da parcela ascendente, oriunda da superfície; $\bar{\theta}(z)$ é a Temperatura Potencial do ambiente; g a aceleração gravitacional. Ao dividir a diferença entre estas temperaturas pelo valor da temperatura potencial do ambiente, há uma normalização desta diferença, que passa a ser proporcional ao próprio valor desta última. Esta equação deve então ser integrada em todo lugar que a diferença for positiva (isto é, quando a Temperatura Potencial da Parcela for maior que a do ambiente). Aplicando-se a correção da Temperatura Virtual, explicada a seguir, esta integral passa a equivaler à área em cinza na figura 2.3.

2.4 Correção da Temperatura Virtual para a CAPE

A equação dos gases ideais não é aplicável ao vapor d’água, criando um problema para se descobrir a densidade de uma parcela não-seca. Este problema foi

¹ *Convective INhibition Energy* – Energia de Inibição da Convecção

resolvido com a definição da Temperatura Virtual de uma parcela, que é a temperatura que o ar seco deve ter para que sua pressão e densidade sejam iguais à da parcela úmida:

$$T_v = T(1 + \epsilon \cdot q)$$

Onde T é a temperatura do ar; ϵ a razão entre a constante do ar seco e do vapor d'água, 0,608 (Doswell III e Rasmussen, 1994); q a razão de mistura em $[g \cdot g^{-1}]$. A correção é sempre positiva, pois o vapor d'água é menos denso que o ar atmosférico, logo a sua presença equivale a um aquecimento da parcela. Após a correção, a equação da CAPE se torna:

$$CAPE = g \int \frac{\delta\theta_v}{\theta_v} dz$$

Onde θ_v é Temperatura Potencial do Ambiente; $\delta\theta_v$ a diferença entre as Temperaturas Potenciais Virtuais da Parcela e do Ambiente. Assim como a equação clássica, esta também só é integrada nas regiões onde a temperatura potencial da parcela é maior do que a do ambiente, isto é, onde $\delta\theta > 0$. A importância do uso da correção da temperatura virtual para cálculo da CAPE foi destacada por Doswell e Rasmussen:

“Uma vez que a CAPE trata da diferença de densidade entre uma parcela ascendente e o ambiente, e que para o cálculo acurado da densidade é necessário usar a temperatura virtual, deveria ser óbvio que a correção da temperatura virtual é necessária quando se estima a CAPE”² (Doswell III e Rasmussen, 1994)

No trabalho citado, os autores expõem as diferenças entre o cálculo da CAPE com e sem a correção da Temperatura Virtual, resultando em diferenças significativas para valores baixos de CAPE.

Há que se destacar também que para eventos severos estas diferenças não são tão importantes, pois os valores de CAPE associados são elevados.

² Original: “Since CAPE concerns *difference* in density between a rising parcel and its environment, and since an accurate calculation of density requires the virtual temperature, it should be obvious that the virtual correction is necessary when estimating CAPE.”

2.5 Método de Substituição das Temperaturas do Ar e do Ponto de Orvalho na Superfície

O método descrito por Doswell III (2001) propõe a substituição da temperatura do ar de uma sondagem por outra mais elevada, a fim de estimar o valor da CAPE num outro momento do dia. Seu maior uso é em sondagens matutinas, alterando-se a temperatura do ar à superfície por outra, oriunda de previsão subjetiva ou de uma previsão numérica, por exemplo. Deste modo, assumindo-se que a média e a alta troposfera não sofrerão mudanças significativas, isto é, não haverá passagem de frente ou presença de outros fenômenos de escala sinótica ou maior, é possível estimar o valor da CAPE no horário da tarde, quando o aquecimento é maior. Assim, a previsão de formação de grandes tempestades e/ou sistemas convectivos de mesoescala pode ser complementada com a sondagem modificada.

Neste trabalho, além de substituir a temperatura do ar, também foi gerado outro conjunto contendo também a substituição da temperatura do ponto de orvalho (T_d) observada. Esta substituição adicional poderia resultar num erro menor e valores mais próximos dos reais, uma vez que o valor de T_d em superfície tem grande influência no valor da CAPE (Weisman e Klemp, 1986).

As mensagens METAR (*METEorological Aerodrome Report* - Relatório Meteorológico de Aeródromo) horárias do aeroporto de Bauru, localizado a 3 quilômetros do IPMet/UNESP, foram utilizadas como fonte para a substituição das temperaturas, uma vez que estão disponíveis gratuitamente na *Internet*, tendo aquisição bastante facilitada devido às várias fontes que guardam estes dados. Apesar da pequena distância, alguns casos apresentaram pequenas variações entre os valores de temperatura observados à superfície no aeroporto e no IPMet/UNESP, o que levou a diferenças (algumas significativas) nos valores da CAPE, que é justamente mais sensível a essa medida inicial.

3 Metodologia

3.1 Estação Meteorológica de Altitude (Radiossondagens)

As radiossondas utilizadas na campanha de 2004 do projeto TroCCiBras, durante o período de 24 de janeiro a 19 de fevereiro, foram todas do modelo RS-80, fabricadas na Finlândia pela empresa Vaisala. Apesar de não ser o modelo mais avançado, esta radiossonda possui um custo mais acessível por já estar consolidada e em uso já há algumas décadas, o que a torna vantajosa para uso em projetos de pesquisa. Este modelo se adéqua às necessidades de uma campanha, onde as radiossondagens são muito mais frequentes que em operações de rotina, sendo necessária também uma regularidade e consistência dos equipamentos utilizados, para melhor apoio aos demais experimentos científicos. Os balões utilizados eram de 350 gramas, de fabricação japonesa, com algumas radiossondagens atingindo 28km de altitude em alguns casos. Estes foram preenchidos com gás hélio (He) na primeira semana de radiossondagens, sendo substituídos pelo gás hidrogênio (H₂), financeiramente mais vantajoso pelo fato de poder ser gerado por processos químicos, sem aparente mudança nas sondagens. Todas as sondagens elegíveis para este trabalho foram realizadas com gás hidrogênio.

Para receber e processar os dados das radiossondagens, foi utilizado o sistema de sondagem DigiCORA III MW21 de propriedade do IPMet/UNESP, do mesmo fabricante das radiossondas, acoplado a um computador PC para análise, visualização e armazenamento dos dados. Cada radiossonda foi inspecionada visualmente e colocada no berço de calibração por pelo menos 10 minutos antes de cada sondagem, sendo necessária em poucos casos a substituição. Após a calibração, a sonda seguia para campo 5 minutos antes do lançamento, onde era acoplada ao balão, e em seguida, lançada.

3.2 Processamento dos Dados

Os dados das sondagens reais foram armazenados em vários formatos, como arquivos de texto e dados binários. Porém, diante da utilização do software GEMPAK, foi preciso descobrir como este importava dados de sondagens, e também escolher o formato de saída mais apropriado visando o mínimo de custo computacional.

A cada sondagem foram gerados 3 arquivos de texto em formato ASCII³: o arquivo APA indica a localização da estação, horário de lançamento da sonda, correções de calibração entre outras informações técnicas; o arquivo AST possui um resumo da sondagem, com Altitude, Temperatura, Umidade e Vento em níveis-padrão, prático, porém não utilizável pelo programa GEMPAK; E o arquivo AED, com Altitude, Pressão, Temperatura, Umidade e Vento registrados a cada 10 segundos, organizados em colunas, formato similar ao que pode ser importado pelo GEMPAK.

Para efetuar a conversão de formatos e automaticamente gerar as sondagens modificadas, foram utilizados scripts em linguagem BASH (*shell script*), que controlavam os programas manipuladores de texto SED e AWK. A versatilidade destes dois programas permitiu a criação de um sistema geração de sondagens modificadas para qualquer situação a partir de passos simplificados, onde todos os dados estão em arquivos texto de fácil edição e manipulação.

Inicialmente, os *scripts* invalidam dados incorretos e ausentes para que o GEMPAK os ignore, e em seguida, aplicam na sondagem real as modificações das temperaturas do ar e do ponto de orvalho, substituindo o primeiro valor das mesmas junto à superfície e também a data dos cabeçalhos de cada arquivo gerado. As temperaturas são oriundas das mensagens METAR do aeroporto de Bauru, salvas em um arquivo para cada data. Para evitar confusões e padronizar as modificações, foram

³ *American Standard Code for Information Interchange*, Código Padrão Americano para o Intercâmbio de Informação. Este é um formato texto, legível por seres humanos.

criadas as designações 1810Z como a sondagem das 12Z modificada com a temperatura do METAR de Bauru às 18Z; e 1820Z como a sondagem das 12Z modificada com as temperaturas do ar e do ponto de orvalho, também do aeroporto de Bauru, também às 18Z. Com um arquivo texto para cada sondagem real ou modificada, estes podem ser verificados manualmente antes da última etapa, bem como vão permitir a visualização individual das sondagens dentro do GEMPAK, cada uma com sua CAPE e demais índices termodinâmicos calculados separadamente para cada horário.

Com o total de 4 arquivos de sondagem por dia (12Z, 18Z, 1810Z e 1820Z), o número de arquivos se torna elevado, bem como não permite a visualização das sondagens em seqüência dentro do GEMPAK. Para solucionar isto, os arquivos das sondagens reais e modificadas foram importados e agrupados em um arquivo binário para cada dia, compatível com o programa NSHARP, dedicado exclusivamente à exibição de dados de sondagens. Todos os gráficos de sondagens presentes na seção de Resultados são oriundos de relatórios gerados para cada sondagem por este programa, com todas as informações técnicas das mesmas, como por exemplo, vários índices termodinâmicos.

4 Uma Breve Análise Sinótico-Climática

Por se basear na hipótese de que a estrutura vertical da temperatura do ar sofre apenas pequenas alterações ao longo do dia em médios e altos níveis, o método utilizado requer que não haja nenhum evento significativo de escala sinótica atuando que possa alterar excessivamente o ambiente. Em caso de escalas maiores, é necessário que o sistema em questão não esteja numa fase que possa influenciar a alteração da estrutura conforme acima descrito. Para efetuar esta análise foi consultado o *site* Climanalise⁴ do CPTEC/INPE e verificados os boletins dos meses de Janeiro⁵ e Fevereiro⁶ de 2004, para que o método fosse testado apenas em dias que cumprissem requisitos supracitados.

Nos meses de verão do Hemisfério Sul, os 2 principais sistemas que agem nas escalas citadas e inviabilizam o uso do método na região, quando atuantes, são as Frentes Frias e a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS). Por estar localizado no centro do estado de São Paulo, é possível descartar quaisquer atividades de escalas menores relacionadas com a proximidade do mar e sua interação com o continente.

4.1 Janeiro/2004

No mês de Janeiro de 2004, foram observadas chuvas acima da média em vários estados da região Sudeste, incluindo o estado de São Paulo, devido à atividade convectiva

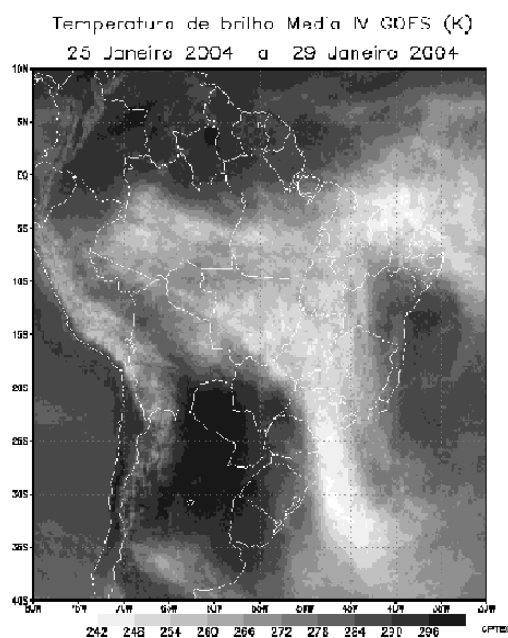


Figura 4.1: Média da Temp. de Brilho pelo satélite GOES para os dias 25 a 29 de Janeiro de 2004

⁴ Em Julho/2009 no endereço <http://climanalise.cptec.inpe.br/~rclimanl/boletim>

⁵ <http://climanalise.cptec.inpe.br/~rclimanl/boletim/0104/index.html>

⁶ <http://climanalise.cptec.inpe.br/~rclimanl/boletim/0204/index.html>

intensificada durante os meses de verão bem como a uma ocorrência de ZCAS. As radiossondagens foram iniciadas no dia 24 de Janeiro de 2004, com algumas interrupções e com sondagens vespertinas em horários não-padronizados. Como houve também uma ocorrência de ZCAS entre os dias 25 e 29 de Janeiro, ilustrada na figura 4.1, foi necessário efetuar o total descarte dos dados das sondagens deste mês.

4.2 Fevereiro/2004

As radiossondagens no mês de Fevereiro ocorreram ininterruptamente até o dia 19. O único descarte técnico foi do dia 04, por terem ocorrido vários erros e falhas nas sondagens deste dia. Neste mês, houve 2 ocorrências da ZCAS, a 1ª entre os dias 07 e 11, afastada do local de estudo, não servindo como razão para o descarte. A 2ª ocorrência foi entre os dias 20 e 24, desta vez atuando no interior de SP, porém já fora da janela de estudos desde trabalho (24/Jan a 19/Fev).

De acordo com o registro de frentes frias do Climanálise (figura 4.2), 4 frentes frias passaram pelo litoral da região sudeste até o dia 19 de Fevereiro de 2004, porém apenas 1 no interior de SP (no caso, considera-se Presidente Prudente e Catanduva), a partir do dia 20, fora do estudo.

Desta forma, sem a atuação de nenhum outro sistema de escala sinótica ou climatológica, não foi necessário efetuar nenhum descarte, o que favoreceu a análise dos resultados durante uma longa seqüência de dias.

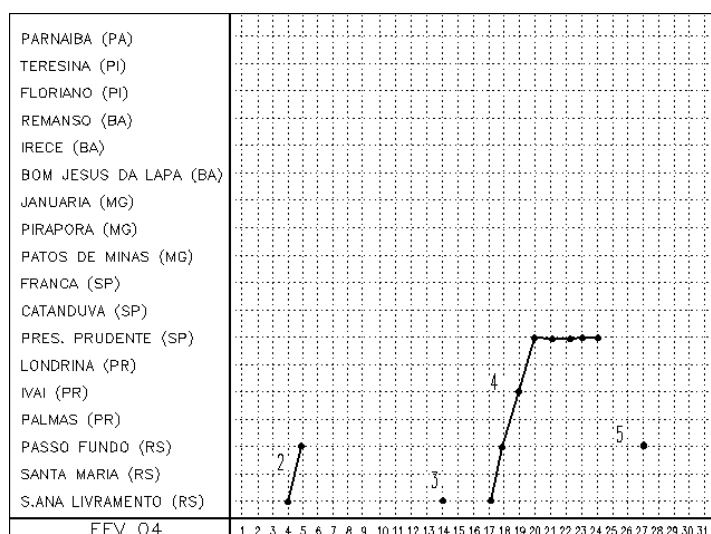


Figura 4.2: Indicativo de atuação de frentes frias do Boletim Climanálise de Fevereiro de 2004. Fonte: CPTEC/INPE

5 Resultados

Após a separação dos dias válidos para a comparação, os valores da CAPE observada e estimada pelo método foram plotados no gráfico da figura 5.1. Neste gráfico é possível notar que de 18 ocorrências analisadas (não houve sondagem das 18Z no dia 4 de fevereiro, impedindo a verificação), apenas três estimativas (5, 14 e 16 de fevereiro) destoam bastante do comportamento da CAPE observada, como um alarme falso, e há apenas dois casos de subestimativa (12 e 15 de fevereiro). No caso dos dias 13 e 19 de Fevereiro, a superestimativa não foi considerada significativa uma vez que as CAPE das 12Z e 18Z neste dia podem ser consideradas iguais, o que leva a crer que algum fator externo, talvez em grande escala e não identificado na análise sinótica realizada, possa ter influenciado de alguma forma a não permitir a elevação da CAPE ao longo do dia.

De uma forma geral, é possível notar o bom comportamento do método nestas condições, não só pelas estimativas próximas dos valores reais, mas principalmente pelo

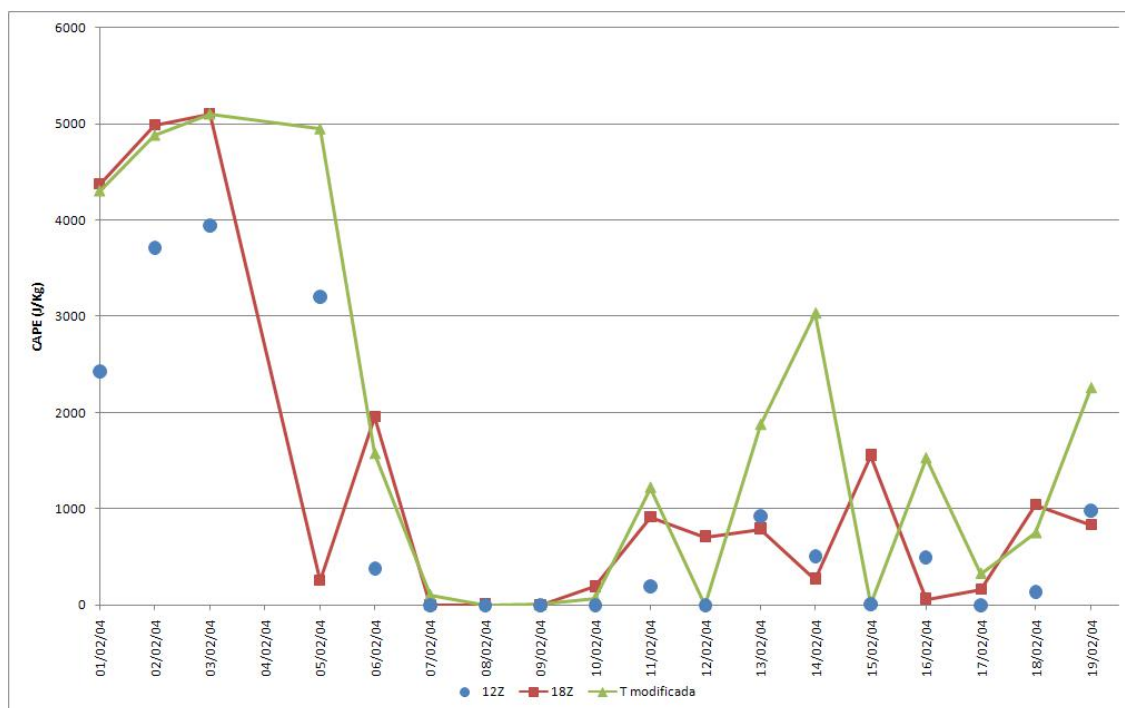


Figura 5.1: CAPE observada às 12Z (pontos azuis) 18Z (linha vermelha) e estimada para as 18Z (linha amarela)

bom desempenho acompanhando o sinal da CAPE, e pela baixa quantidade de subestimativas, muito mais “perigosas” que as superestimativas. A média dos erros para o método substituindo T é de 489 J/Kg, e de 74 J/Kg retirando-se os dois valores extremos dos dias 5 e 14 de fevereiro. Uma vez que a média pode mascarar tendências, foi feita também a média dos desvios, encontrando-se 847 J/Kg e que cai para apenas 432 J/Kg retirando-se os dois valores extremos.

É importante notar também o comportamento do valor estimado em relação ao valor original das 12Z (pontos azuis). No caso do dia 5, a CAPE às 12Z já estava acima de 3000 J/Kg, mas depois diminuiu para menos de 500 J/Kg ao longo do dia, o que não é esperado. Tal fato leva a crer, também, que algum fator sinótico externo tenha agido para diminuir significativamente a CAPE ao longo do dia. Esta ocorrência mostra a importância de uma análise subjetiva que utilize também imagens de satélite e/ou radar a fim de confeccionar uma previsão mais correta do que a deste método, principalmente verificando a possibilidade de mudanças em escala sinótica, que tornam o método ineficaz.

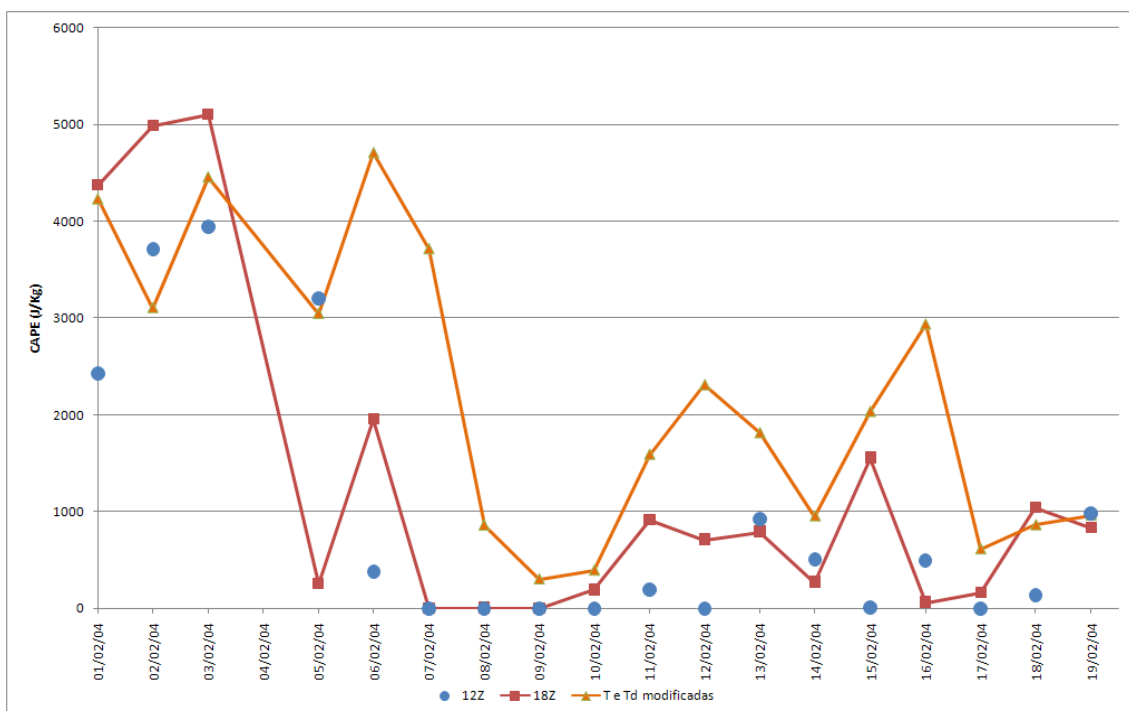


Figura 5.2: CAPE observada às 12Z e 18Z e estimativa alterando T e Td superfície.

A figura 5.2 mostra o gráfico com os valores estimados para CAPE substituindo além da temperatura do ar à superfície, também a temperatura do ponto de orvalho (Td). Somente pela análise visual do gráfico, já é possível notar uma clara tendência de superestimativa, com apenas 4 ocorrências de subestimativa (1, 2, 3 e 18 de fevereiro), com apenas uma delas (2 de fevereiro), sendo realmente expressiva. É bem clara também a capacidade do método modificado de acompanhar o sinal da CAPE realmente observada às 18Z, a despeito dos valores muito superestimados, que ficam bem demonstrados nas médias: 870 J/Kg para os erros, e 1187 J/Kg para os desvios (erro absoluto).

A figura 5.3 demonstra os erros em relação ao valor real da CAPE às 18Z de ambos os métodos num mesmo gráfico, onde é possível notar certa coerência entre ambos os métodos na maioria dos casos, havendo apenas 3 casos significativos de sinal oposto, isto é, um superestimando e outro subestimando o valor da CAPE para 18Z, nos dias 6, 12 e 15 de fevereiro.

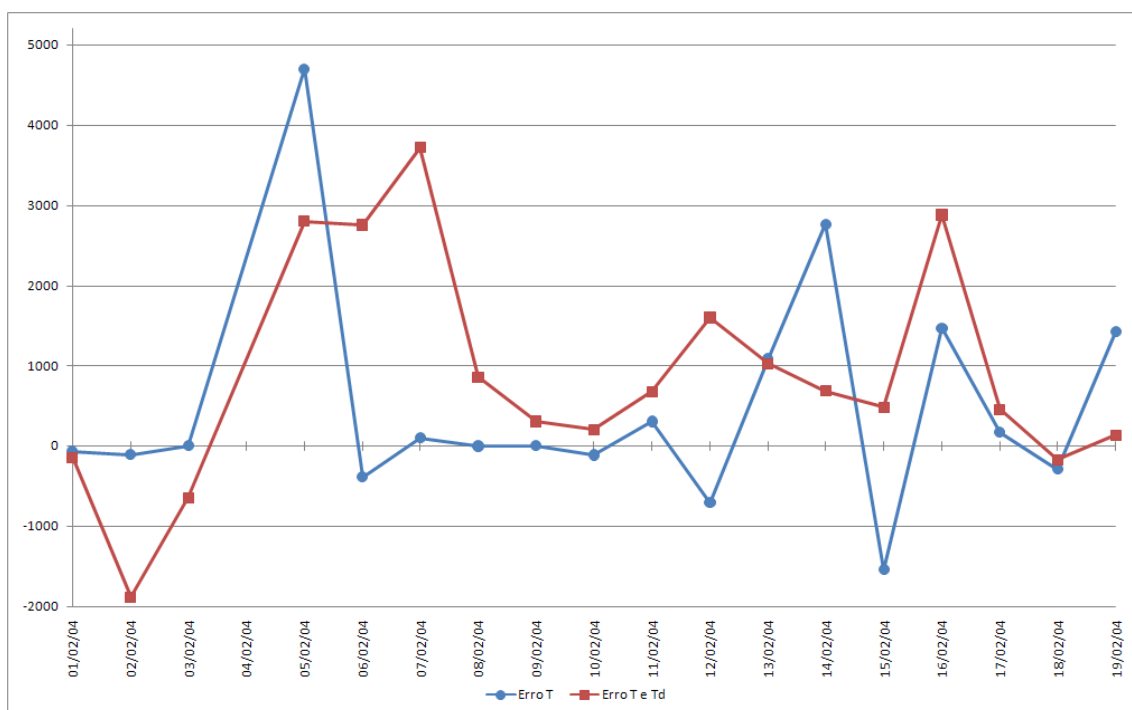


Figura 5.3: Comparação entre erros dos métodos substituindo T (linha azul) e substituindo T e Td (linha vermelha)

A partir deste gráfico foram escolhidos 6 dias para serem analisados com mais detalhe: as seqüências de 1 a 3 e 5 e 6, e o dia 10, todos de fevereiro de 2004. Os três primeiros dias foram escolhidos por terem demonstrado estimativas bastante acuradas dos valores realmente observados, enquanto o método modificado com T e Td flutuou entre valores diferentes nos 3 dias. O dia 5 apresenta uma superestimativa expressiva, cujos motivos são de suma importância serem conhecidos. O dia 6 foi escolhido pela oposição entre o resultado dos métodos, com o método que substitui apenas a temperatura do ar subestimando, e método que substitui ambas T e Td superestimando. E por fim, o dia 10 por ambos os métodos apresentarem erros pequenos numa condição de CAPE também pequena (vide figura 5.1, 5.2 e 5.3 para os valores).

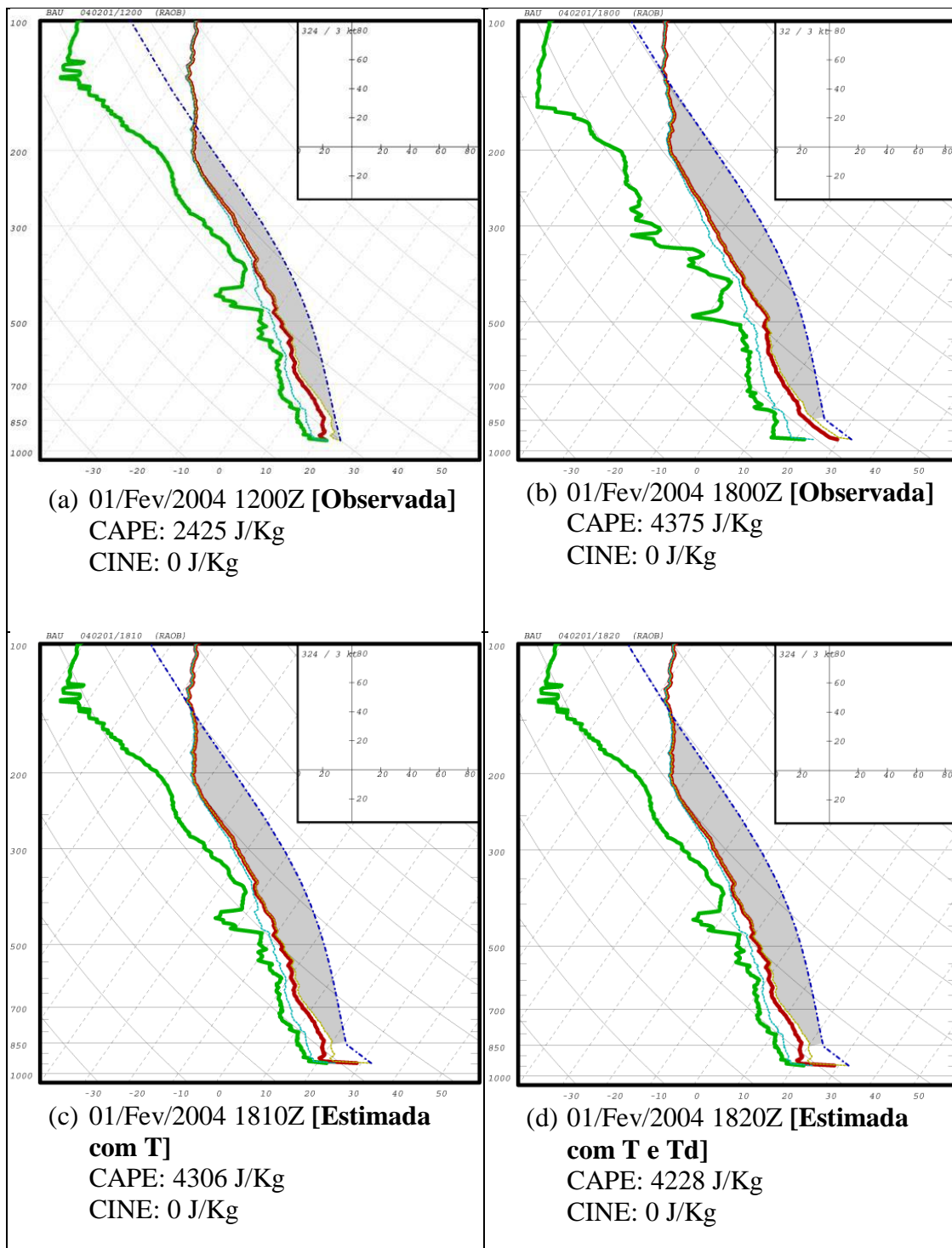
As figuras 5.4, 5-5 e 5-8 a 5.11 reúnem as quatro sondagens de cada dia, sendo que as definidas como (a) e (b), das 1200Z e 1800Z, respectivamente, são as radiossondagens reais. As definidas como (c) e (d) são as sondagens modificadas a partir da original das 1200Z, sendo que as sondagens (c) são as com apenas a temperatura do ar substituída (1810Z), e as (d) as com temperatura do ar e do ponto de orvalho substituídas (1820Z). Abaixo de cada sondagem estão indicados os valores dos índices termodinâmicos CAPE e CINE das mesmas.

5.1 Dia 01/Fev/2004

No caso do dia 01/Fev/2004 (figura 5.4) chama a atenção o alto valor da CAPE já na sondagem matutina (12Z, figura 5.4a), bem como o nível de convecção por levantamento (NCL) estar junto à superfície devido ao valor igual de T e Td (22°C). A área da CAPE (em cinza) se estende até um pouco além do nível de 200mb, configuração bastante propícia para a formação de nuvens de grande desenvolvimento vertical. Passando para a configuração real às 18Z, vemos que a Td se manteve em 22°C, mas a temperatura do ar subiu até 30°C, fazendo o nível de levantamento ir para

próximo de 850mb, com a área da CAPE alcançando os 150mb, já dentro de uma tropopausa bem pouco definida neste dia (região onde a curva vermelha de T se torna mais vertical). A configuração deste dia ilustra bem a dependência do método à manutenção da estrutura vertical da temperatura do ar ao longo da atmosfera, que se manteve praticamente a mesma entre os horários de 12Z e 18Z até bem perto da superfície, como pode ser comparado através das figuras 5.4a e 5.4b, respectivamente.

O resultado é animador, com valores previstos de CAPE muito próximos dos reais, desviando do valor real em menos de 3,5%, demonstrando a eficiência do método nestas condições.



METAR

```

SBBU 011200Z 29006KT 9999 SCT010 BKN130 BKN300 21/21 Q1020=
SBBU 011300Z 36004KT 9999 FEW015 BKN130 BKN300 23/21 Q1019=
SBBU 011400Z 26006KT 9999 FEW020 BKN130 BKN300 25/21 Q1019=
SBBU 011500Z 29005KT 9999 FEW030 SCT090 BKN300 27/22 Q1018=
SBBU 011600Z 33004KT 9999 FEW035 SCT090 BKN300 28/22 Q1017=
SBBU 011700Z 35006KT 9999 FEW040 SCT300 28/21 Q1016=
SBBU 011800Z 33008KT 7000 VCSH FEW045 29/22 Q1015=

```

Figura 5.4: Sondagens do dia 01/Fev/2004, (a) Observada às 1200Z, (b) Observada às 1800Z, (c) Estimada com T das 18Z, (d) Estimada com T e Td às 18Z.

5.2 Dia 02/Fev/2004

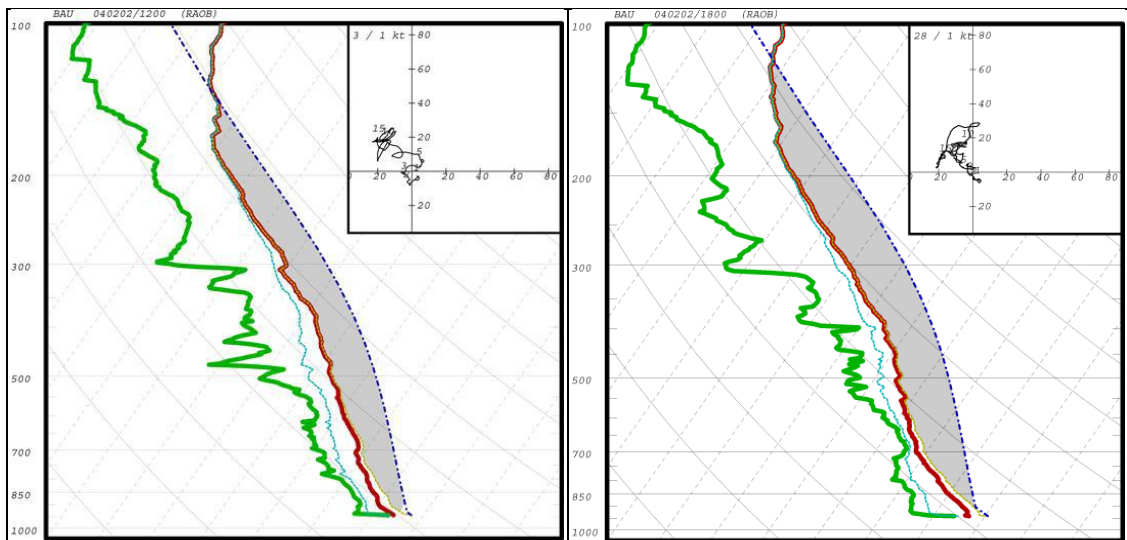
Neste dia, há na sondagem matutina (12Z, figura 5.5a) uma camada muito úmida, quase saturada, junto à superfície, que também se mostra presente na sondagem às 18Z (fig.5.5b). Em ambos os horários esta camada estava limitada ao nível de 937mb, indo a aproximadamente 60 metros às 12Z e 28 metros às 18Z⁷.

Esta camada fez com que o valor da CAPE estivesse elevado mesmo na parte da manhã, com 3710 J/Kg, alcançado 4991 J/Kg na parte da tarde. A presença da camada úmida junto à superfície, com Td variando de 23°C às 12Z para 24°C às 18Z pode ter compensado as pequenas mudanças no perfil vertical de T, pois ao substituir T (fig. 5.5c) foi encontrada uma estimativa extremamente precisa de 4884 J/Kg, um erro de apenas 2,2%.

Ao substituir Td (fig. 5.5d), foi observada uma redução no valor da CAPE em comparação com o valor da substituição de T apenas, para 3104 J/Kg, causada pelo menor valor de Td observado às 18Z no aeroporto de Bauru, de 21°C enquanto a sondagem real das 18Z realizada no IPMet/UNESP indicava 24°C.

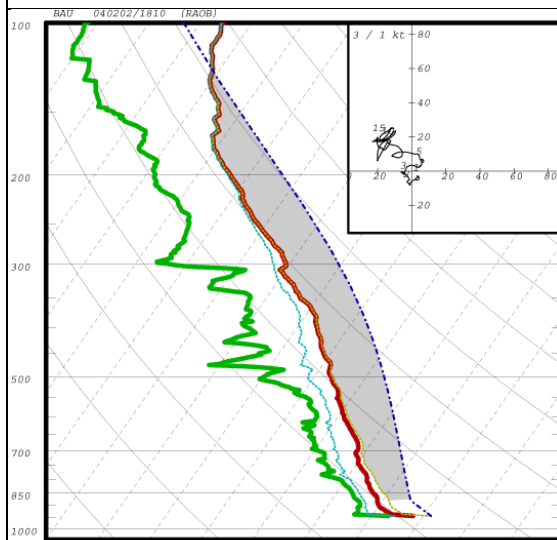
Apesar de estarem distantes por apenas 3 Km, uma possível explicação para esta variação de 3 graus é a cobertura do solo ao redor de cada local, uma vez que o aeroporto está cercado pela cidade de Bauru (fig. 5.6) enquanto o IPMet/UNESP está afastado da cidade, cercado por florestas (fig. 5.7), que podem ter elevado Td por evapotranspiração.

⁷ Dados oriundos das sondagens observadas, item *Top of Moist Layer* dos relatórios gerados pelo GEMPAK.

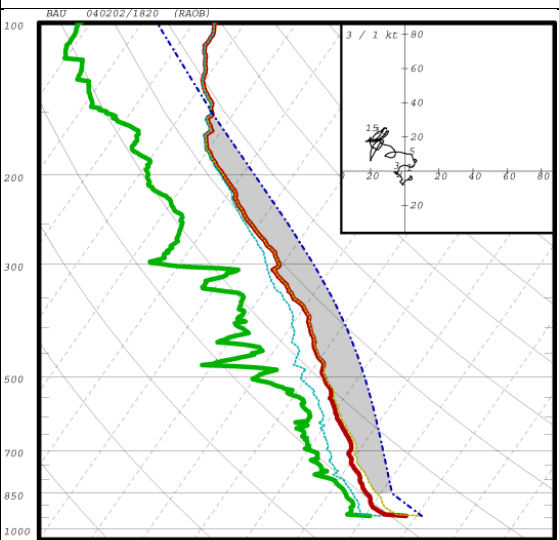


(a) 02/Fev/2004 1200Z [Observada]
 CAPE: 3710 J/Kg
 CINE: 0 J/Kg

(b) 02/Fev/2004 1800Z [Observada]
 CAPE: 4991 J/Kg
 CINE: 0 J/Kg



(c) 02/Fev/2004 1810Z [Estimada
 com T]
 CAPE: 4884 J/Kg
 CINE: 0 J/Kg



(d) 02/Fev/2004 1820Z [Estimada
 com T e Td]
 CAPE: 3104 J/Kg
 CINE: 0 J/Kg

METAR

SBBU 021200Z 32009KT 9999 FEW033 23/22 Q1017=
 SBBU 021300Z 32008KT 9999 SCT020 25/23 Q1016=
 SBBU 021400Z 29006KT 9999 FEW022 SCT045 26/23 Q1016=
 SBBU 021500Z 33007KT 9999 BKN040 27/22 Q1016=
 SBBU 021600Z 28005KT 9999 BKN035 FEW040TCU 28/22 Q1015=
 SBBU 021700Z 14004KT 9999 BKN040 FEW045TCU 27/21 Q1014=
 SBBU 021800Z 10008KT 9999 SCT040 FEW045TCU SCT090 28/21 Q1013=

Figura 5.5: Sondagens do dia 02/Fev/2004, (a) Observada às 1200Z, (b) Observada às 1800Z, (c) Estimada com T das 18Z, (d) Estimada com T e Td às 18Z.



Figura 5.6: Arredores do IPMet/UNESP em Bauru, SP. Data da imagem: 11/Ago/2004 Fonte: Google Earth



Figura 5.7: Arredores do Aeroporto de Bauru, SP. Data da imagem: 11/Ago/2004 Fonte: Google Earth

5.3 Dia 03/Fev/2004

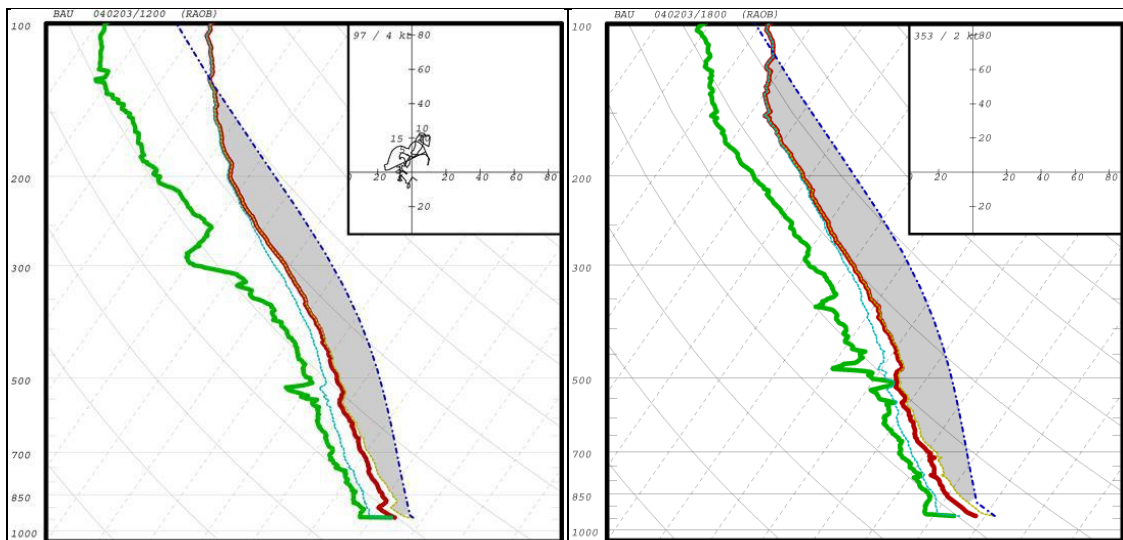
Pelo 3º dia consecutivo, foi observada uma camada saturada e com umidade junto à superfície, com Td aumentando significativamente, porém neste dia com alturas de apenas 4 e 7 metros, às 12Z e 18Z respectivamente⁸.

Como no dia anterior, esta camada fez com que o valor da CAPE pela manhã (fig 5.8a) fosse novamente muito elevado, com 3941 J/Kg. A manutenção de Td em 24°C e o aumento da temperatura do ar até às 18Z fez com que a CAPE atingisse o elevado valor de 5104 J/Kg neste horário (fig 5.8b).

A manutenção de Td e da estrutura vertical de T demonstraram que a atmosfera esteve praticamente idêntica ao longo do dia, fazendo com que o método mais uma vez previsse a CAPE com um valor extremamente próximo do observado, neste caso a superestimando por apenas 1 J/Kg (fig. 5.8c). O valor de Td às 18Z no aeroporto de Bauru mais uma vez foi menor que o do IPMet/UNESP, neste sendo de 23°C, apenas 1 grau menor que o observado na sondagem das 18Z, mas essa pequena variação causou uma redução de 10% no valor da CAPE (fig. 5.8d).

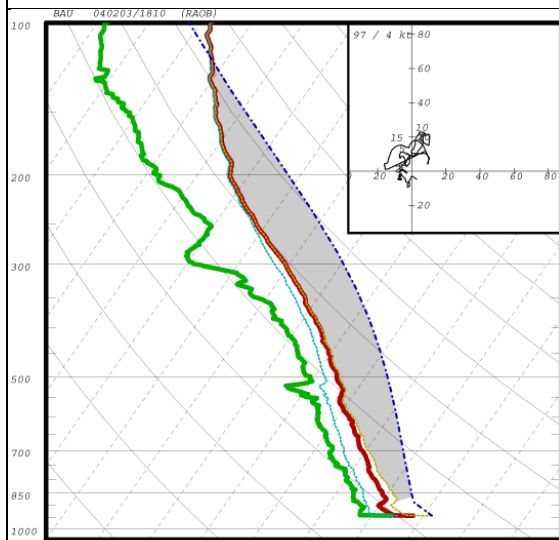
A partir dos resultados dos dias 02 e 03/Fev/2004, foi possível notar que o valor estimado da CAPE se torna mais sensível a pequenas variações de Td do que a pequenas variações no perfil atmosférico da temperatura do ar.

⁸ Dados oriundos das sondagens observadas, item *Top of Moist Layer* dos relatórios gerados pelo GEMPAK.

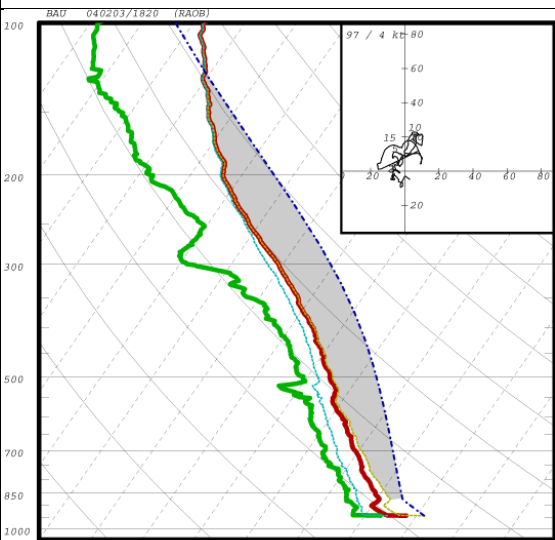


(a) 03/Fev/2004 1200Z [**Observada**]
 CAPE: 3941 J/Kg
 CINE: 0 J/Kg

(b) 03/Fev/2004 1800Z [**Observada**]
 CAPE: 5104 J/Kg
 CINE: 0 J/Kg



(c) 03/Fev/2004 1810Z [**Estimada com T**]
 CAPE: 5105 J/Kg
 CINE: 0 J/Kg



(d) 03/Fev/2004 1820Z [**Estimada com T e Td**]
 CAPE: 4455 J/Kg
 CINE: 0 J/Kg

METAR

SBBU 031200Z 03007KT 9999 FEW008 SCT300 24/20 Q1015=
 SBBU 031300Z 32003KT 9999 FEW008 SCT300 25/21 Q1015=
 SBBU 031400Z 01005KT 9999 BKN035 27/21 Q1015=
 SBBU 031500Z 36007KT 9999 BKN040 SCT045 28/21 Q1015=
 SBBU 031600Z 36008KT 8000 VCSH BKN040 SCT045TCU 28/22 Q1014=
 SBBU 031700Z 34010KT 8000 VCSH BKN030 SCT040TCU 28/23 Q1013=
 SBBU 031800Z 30006KT 7000 VCSH BKN030 SCT040TCU BKN300 28/23
 Q1012=
 SBBU 031848Z 30010KT 6000 TS VCSH BKN030 SCT040CB BKN300 26/23
 Q1012= =

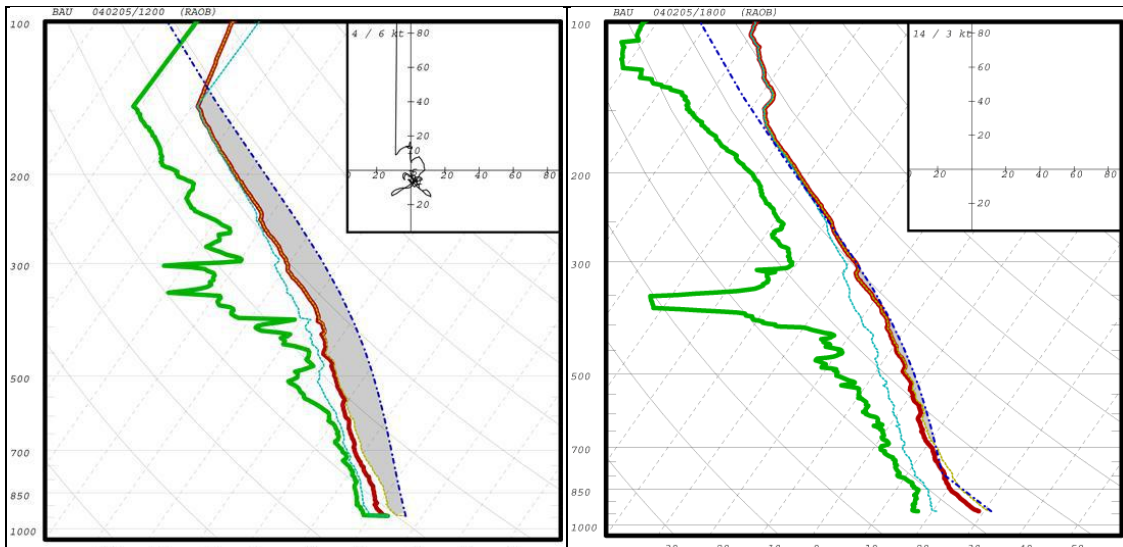
Figura 5.8: Sondagens do dia 03/Fev/2004, (a) Observada às 1200Z, (b) Observada às 1800Z, (c) Estimada com T das 18Z, (d) Estimada com T e Td às 18Z.

5.4 Dia 05/Fev/2004

No dia 5 de fevereiro, na parte da manhã (fig. 5.9a) ainda é observada a camada úmida e saturada junto à superfície, com 30 m, porém a mesma não está mais presente na sondagem das 18Z (fig. 5.9b). Neste dia ocorre uma grande queda na CAPE entre estes dois horários, de 3201 para 251 J/Kg, devido ao aquecimento do ar da superfície até 700mb e mais intensamente até 850mb, trecho cujo *lapse rate* demonstra estabilidade, e principalmente devido à dissolução da camada úmida, fazendo com que Td caísse de 23°C para 17°C.

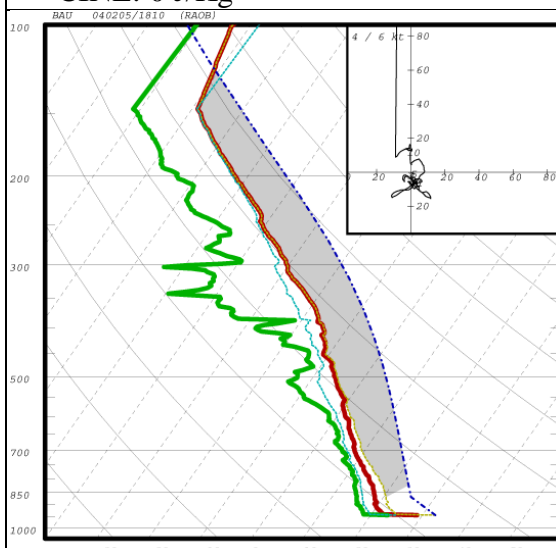
Com este aquecimento da atmosfera como um todo, provavelmente oriundo de uma advecção, a hipótese de poucas alterações na estrutura vertical da atmosfera em médios e altos níveis não é válida e por consequência o método é prejudicado, alteração refletida nos resultados bem distantes do observado. O método substituindo T (fig. 5.9c) previu 4950 J/Kg, resultado influenciado principalmente por esta queda de Td, uma vez que Td das 12Z foi mantida. Ao alterar T e Td (fig. 5.9d) a CAPE se manteve alta, em 3046 J/Kg, pois apesar de ambos aeroporto e IPMet/UNESP às 18Z estarem com a mesma temperatura do ar, 29°C, o primeiro observava Td de 23°C e o segundo apenas 17°C. Ao contrário dos dias 02 e 03/Fev/2004 em que o aeroporto estava com Td menor, neste dia ocorreu a situação oposta.

Este caso demonstra que os diferentes dos valores de Td causaram grandes variações e superestimação da CAPE para este dia. Este comportamento demonstrou a dependência do correto valor de Td para o cálculo da estimativa da CAPE, e que variações de apenas 2°C podem causar diferenças de até 2000 J/Kg, uma redução de quase 40% entre as estimativas das figuras 5.9c e 5.9d. Como a atmosfera em níveis médios e altos não se encaixou nos requisitos do método, o caso deste dia não se configura como uma fonte para que sejam feitas conclusões a respeito do método.

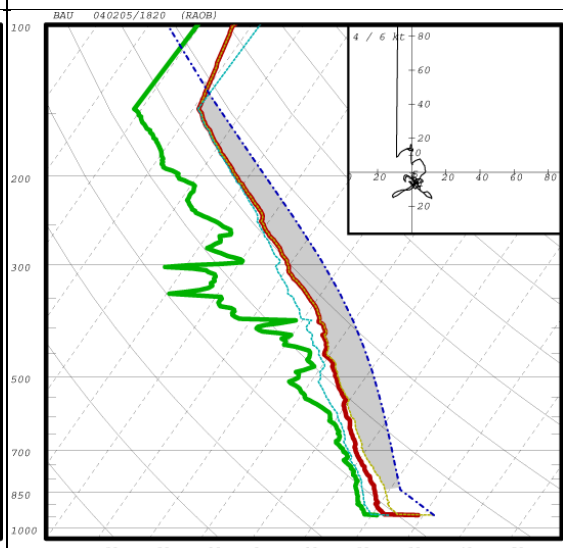


(a) 05/Fev/2004 1200Z [Observada]
[Observada]
CAPE: 3201 J/Kg
CINE: 0 J/Kg

(b) 05/Fev/2004 1800Z [Observada]
CAPE: 251 J/Kg
CINE: -31 J/Kg



(c) 05/Fev/2004 1810Z [Estimada
com T]
CAPE: 4950 J/Kg
CINE: 0 J/Kg



(d) 05/Fev/2004 1820Z [Estimada
com T e Td]
CAPE: 3046 J/Kg
CINE: 0 J/Kg

METAR

SBBU 051200Z 04003KT 8000 -RA BKN020 BKN100 BKN300 22/22 Q1017=
SBBU 051300Z 35005KT 9999 SCT010 SCT030 BKN300 23/22 Q1016=
SBBU 051400Z 09002KT 9999 SCT012 SCT100 BKN300 24/23 Q1016=
SBBU 051500Z 04004KT 9999 SCT020 BKN300 26/23 Q1014=
SBBU 051600Z 01005KT 9999 SCT025 BKN300 27/23 Q1013=
SBBU 051700Z 03005KT 9999 SCT035 BKN300 28/23 Q1013=
SBBU 051800Z 34007KT 9999 SCT035 BKN300 29/23 Q1012=

Figura 5.9: Sondagens do dia 05/Fev/2004, (a) Observada às 1200Z, (b) Observada às 1800Z, (c) Estimada com T das 18Z, (d) Estimada com T e Td às 18Z.

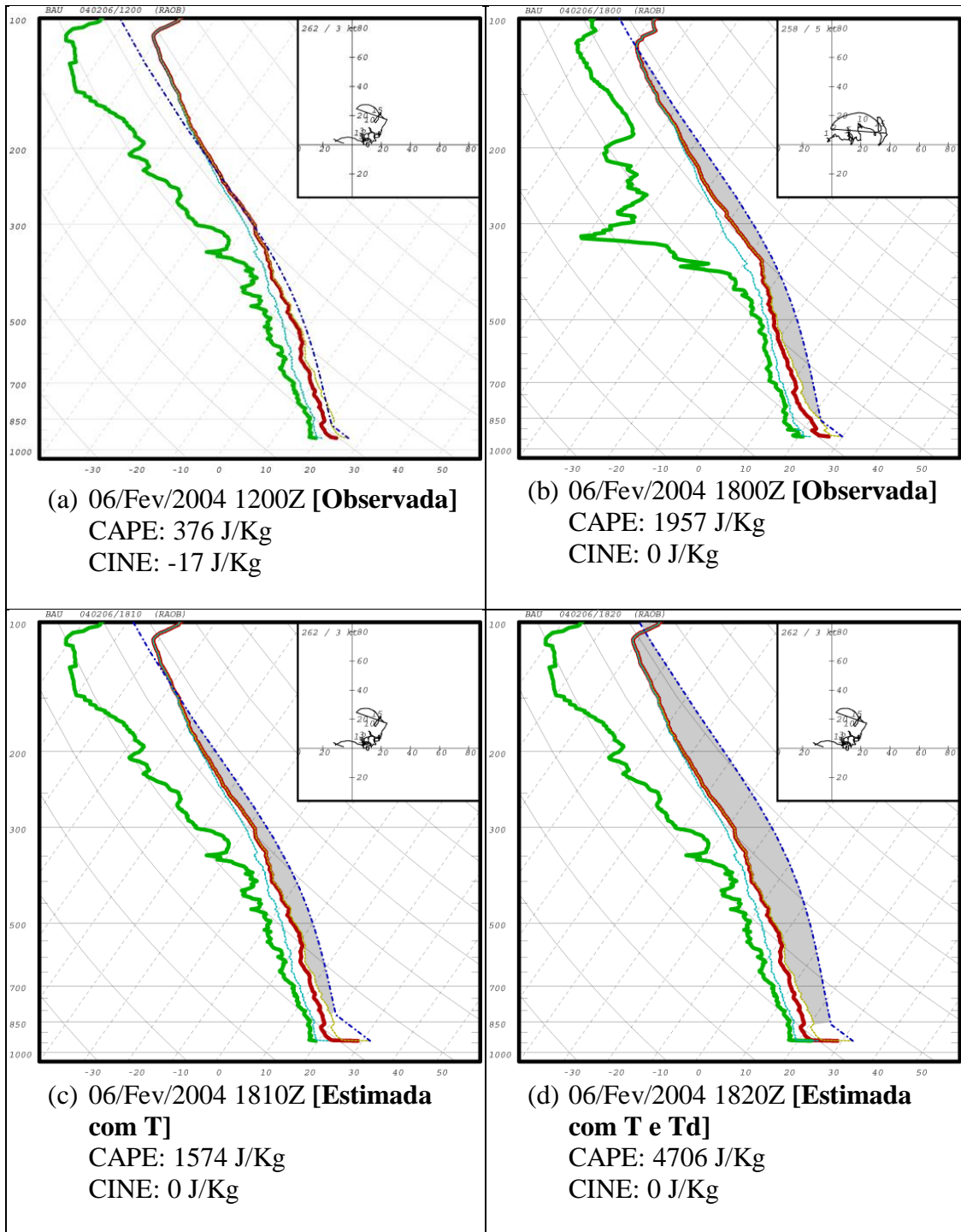
5.5 Dia 06/Fev/2004

O caso deste dia é um bom exemplo de como o método de estimativa pode ajudar a prever condições favoráveis à convecção profunda, pois o valor da CAPE no meio da manhã é considerado baixo para a formação de tempestades convectivas severas. Há uma boa similaridade entre os perfis da temperatura da manhã (12Z, fig. 5.10a) e tarde (18Z, fig. 5.10b), podendo ser notada na parte da tarde um aquecimento da superfície até 800mb, bem como um ligeiro aumento de Td abaixo de 900mb. Estas duas mudanças se refletem no aumento do valor da CAPE de 376 J/Kg para 1957 J/Kg na parte da tarde.

Assim como no dia anterior, a temperatura do ponto de orvalho no aeroporto de Bauru era mais elevada que a observada no IPMet/UNESP para o mesmo horário. Esta diferença prejudica a geração de uma boa estimativa, pois como pode ser observada na estimativa da fig. 5.10d, apenas 2°C a mais de Td causaram um aumento de 3 vezes no valor calculado da CAPE.

Como houve um aumento de 2°C de Td na sondagem das 18Z (fig. 5.10b), ao aplicar o método substituindo T (fig. 5.10c) a estimativa de 1574 J/Kg ficou 20% abaixo do valor real observado às 18Z. Porém ao substituir Td (fig. 5.10d), o maior valor desta variável no aeroporto de Bauru, 23°C, 2°C acima do observado na sondagem das 18Z, causou superestimativa da CAPE, com 4706 J/Kg.

Apesar destes desvios e desta superestimativa exagerada, o fato de ter uma estimativa de aumento significativo da CAPE na parte da tarde serve como ferramenta de auxílio ao meteorologista, de modo que uma tempestade convectiva possa ser prevista com algumas horas de antecedência.



METAR

SBBU 061200Z 11007KT 9999 BKN015 SCT030 BKN300 24/21 Q1013=
 SBBU 061300Z 09009KT 9999 BKN015 BKN025 BKN300 26/21 Q1013=
 SBBU 061400Z 06007KT 9999 BKN025 BKN100 25/21 Q1013=
 SBBU 061500Z 06008KT 9999 SCT025 BKN070 BKN300 27/20 Q1013=
 SBBU 061600Z 12006KT 8000 VCSH FEW025 BKN075 BKN300 28/21
 Q1012=
 SBBU 061700Z 12007KT 8000 VCSH FEW022 FEW045TCU BKN090 BKN300
 28/21 Q1011=
 SBBU 061800Z 14010KT 7000 VCSH FEW030 FEW045TCU BKN090 BKN300
 27/22 Q1010=

Figura 5.10: Sondagens do dia 06/Fev/2004, (a) Observada às 1200Z, (b) Observada às 1800Z, (c) Estimada com T das 18Z, (d) Estimada com T e Td às 18Z.

5.6 Dia 10/Fev/2004

O caso do dia 10 de Fevereiro de 2004 é diferente dos analisados anteriormente, diferindo não apenas nos baixos valores da CAPE observada, mas também do perfil vertical da temperatura do ar. Por serem menos regular do que os anteriores, os perfis verificados neste dia fizeram com que a área da CAPE não fosse contínua ao longo da atmosfera, condição que dificulta a formação de nuvens de convecção profunda.

No horário das 12Z (fig. 5.11a) a CAPE tem valor zero, devido à inversão térmica, havendo em 650 mb uma temperatura potencial mais elevada que a da superfície (944 mb neste horário). A estabilidade decorrente desta inversão térmica pode ser verificada através da concentração da umidade até 700mb como pode ser verificado no perfil de Td.

Na parte da tarde (fig. 5.11b) o perfil de T foi mantido, havendo apenas um aquecimento mais pronunciado abaixo de 850 mb. A inversão térmica se manteve em 700 mb e limitou a presença da CAPE, que teve um valor muito baixo e ficou restrita entre 550 e 400 mb, praticamente impossibilitando qualquer convecção. A temperatura do ponto de orvalho aumentou apenas 1°C na parte da tarde, fato que baseado nos resultados anteriores, leva a acreditar na possibilidade de uma boa estimativa.

Aplicar o método nestas sondagens serviu como avaliação do mesmo em condições não propícias à convecção, o que poderia deixar clara alguma falha ou resultado não compatível com os valores reais. Porém, foi observado um desempenho satisfatório das duas estimativas.

Ao aplicar somente a substituição de T com os dados do aeroporto de Bauru (fig. 5.11c), a CAPE foi estimada em 75 J/Kg, apenas na mesma região onde a mesma estava presente na sondagem real das 18Z. Ao substituir T e Td, o valor estimado foi de 392 J/Kg, também na mesma região mas se estendendo até 340 mb.

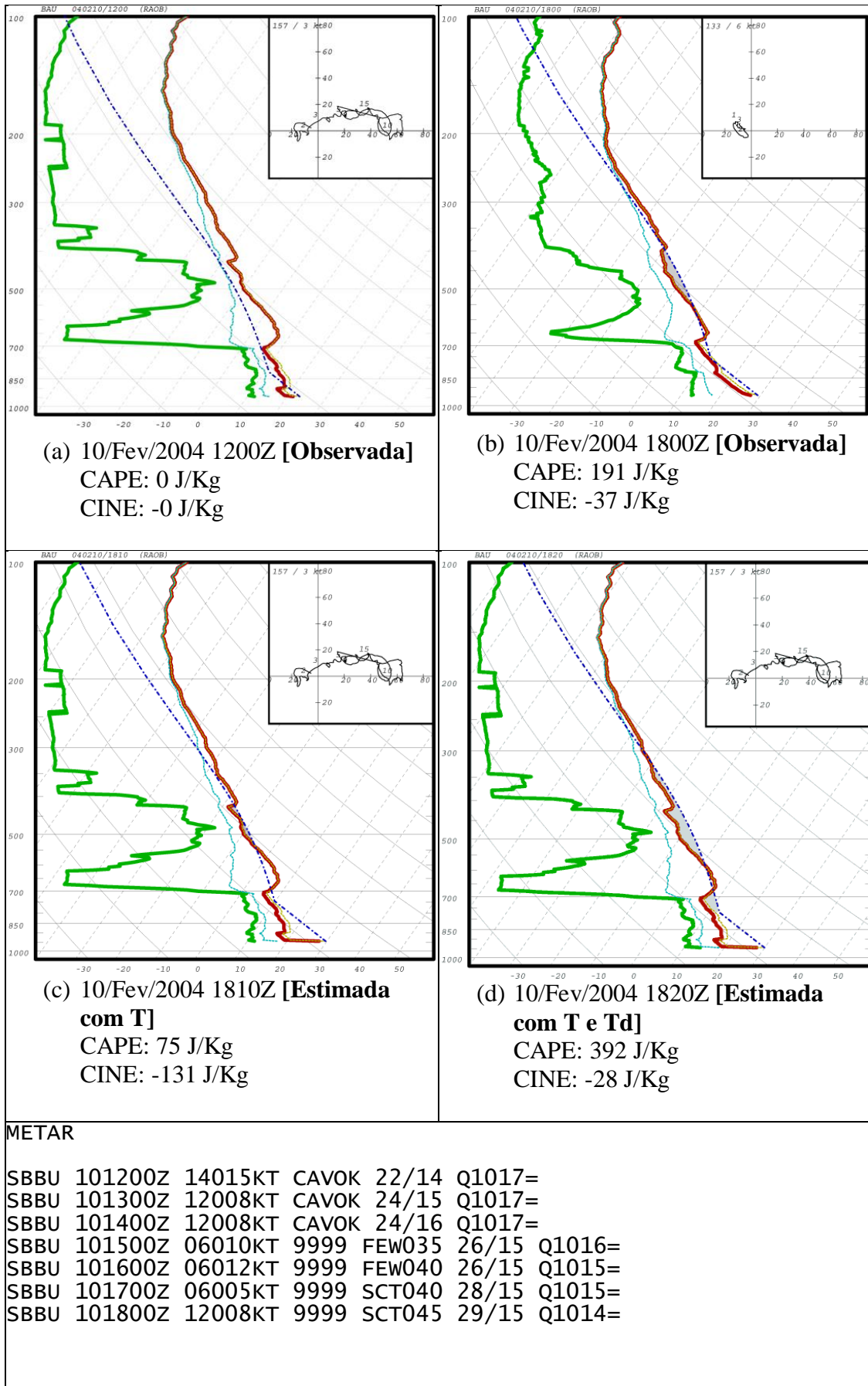


Figura 5.11: Sondagens do dia 10/Fev/2004, (a) Observada às 1200Z, (b) Observada às 1800Z, (c) Estimada com T das 18Z, (d) Estimada com T e Td às 18Z.

O valor bem mais elevado na estimativa da fig. 5.11d se deve a T_d estar apenas 1°C mais elevada no aeroporto que no IPMet/UNESP. Ainda assim, os valores baixos em ambas as estimativas e a coerência com as sondagens reais, demonstram que mesmo numa atmosfera não favorável à convecção, este método é um importante aliado para uma análise subjetiva por um meteorologista.

6 Conclusão

Após a análise de seis casos, foi possível concluir que o método proposto por Doswell é uma ferramenta extremamente útil na previsão de sistemas convectivos, tendo apresentado na maioria dos casos erros muito pequenos, sendo apenas 5 de um total de 18 com erros acima de 1000 J/Kg e apenas uma subestimativa além deste mesmo patamar.

Ao efetuar a alteração de T e Td, o método apresentou um comportamento diferente, com uma tendência recorrente de superestimativa da CAPE. Porém, o cálculo se torna muito sensível a variações de apenas 1°C para mais ou para menos tanto em T como em Td. Este comportamento demonstra que num ambiente operacional, uma prática de verificação com pequenas variações dos valores previstos pode indicar ao previsor uma situação favorável à formação de sistemas convectivos ou confirmar a pouca probabilidade de formação destes.

É importante ressaltar também a diferença freqüente entre os valores de Td observados no aeroporto de Bauru (aplicados nas sondagens modificadas) e os valores de Td observados no IPMet/UNESP (local de lançamento das sondagens). Esta diferença representou uma fonte de erros significativos na aplicação do método, uma vez que aliada à sensibilidade do cálculo da CAPE, gerou valores bem diferentes dos reais. Isto demonstra a necessidade de utilização de valores de Td representativos do local da sondagem, de preferência do próprio local.

Diante da presença de erros grosseiros de sub ou superestimativa, fica bem claro que em caso de aplicação deste método operacionalmente, onde seriam utilizadas T e Td oriundas de uma previsão numérica ou subjetiva, uma previsão acurada destas variáveis é de suma importância para o bom funcionamento do método.

A ausência de sondagens às 18Z em território brasileiro dificulta qualquer estudo de verificação deste método em outras regiões e/ou outras estações do ano. O período estudado, não completando um mês, é curto para representar as condições climatológicas do verão. Porém, este estudo demonstrou um grande potencial de uso do método como auxílio à previsão do tempo, desde que seu uso seja supervisionado.

7 Bibliografia

BYERS, H. R.; BRAHAM JR., R. R. **The Thunderstorm**. Washington, DC: U.S. Government Printing Office, 1949.

COTTON, W. R.; ANTHES, R. A. **Storm and Cloud Dynamics**. [S.l.]: Academic Press Inc., 1989.

DOSWELL III, C. A. Severe Convective Storms - A Meteorological Monograph. In: _____ **Severe Convective Storms - An Overview**. Norman, Oklahoma: The American Meteorological Society, 2001. p. 1-69.

DOSWELL III, C. A.; RASMUSSEN, E. N. The Effect of Neglecting the Virtual Temperature Correction on CAPE Calculations. **Weather and Forecasting, Volume 9, Issue 4**, Dezembro 1994. 625-629.

HANE, C. E. Extratropical Squall Lines and Rainbands. In: RAY, P. S. **Mesoscale Meteorology and Forecasting**. Boston: American Meteorological Society, 2001. p. 359-389.

LIMA, D. R. O. **Diagnóstico de chuvas e previsão meteorológica para a bacia hidrográfica do rio Manso**. Tese – COPPE - Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2005.

MENEZES, W. F. et al. **Estudo do ambiente favorável à propagação de sistemas convectivos de mesoescala sobre o município do Rio de Janeiro**. Anais do XI Congresso Brasileiro de Meteorologia. Rio de Janeiro. 2000.

MOURÃO, C. E. F. **Estudo do Comportamento de Indicadores de Tempo Severo em Casos de Tempestades sobre o Rio de Janeiro utilizando o Modelo RAMS**. Departamento de Meteorologia – Instituto de Geociências – Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2007.

NASCIMENTO, E. L. Previsão de tempestades Severas utilizando-se parâmetros convectivos e modelos de mesoescala: uma estratégia operacional adotável no Brasil? **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 20 (1), p. 121-140, 2005.

REED, R. J. Cyclogenesis in Polar Air Streams. **Monthly Weather Review**, 107, Janeiro 1979. 38-52.

SILVA PAIVA, L. M. **Tempestades e chuvas de verão no Estado do Rio de Janeiro**. Departamento de Meteorologia – Instituto de Geociências – Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2000.

WEISMAN, M. L.; KLEMP, J. B. Characteristics of Isolated Convective Storms. In: RAY, P. S. **Mesoscale Meteorology and Forecasting**. Boston: American Meteorological Society, 1986. Cap. 15, p. 331-358.