

**UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS
CURSO DE MESTRADO EM METEOROLOGIA**

***PADRÕES DE ECOS DE RADAR METEOROLÓGICO NO SEMI-
ÁRIDO BRASILEIRO E CONDIÇÕES ATMOSFÉRICAS
ASSOCIADAS***

**POR
HERÁCLIO ALVES DE ARAÚJO**

**CAMPINA GRANDE - PB
JULHO DE 1996**

HERÁCLIO ALVES DE ARAÚJO

**PADRÕES DE ECOS DE RADAR METEOROLÓGICO NO SEMI-ÁRIDO
BRASILEIRO E CONDIÇÕES ATMOSFÉRICAS ASSOCIADAS**

**Dissertação apresentada ao curso de
Mestrado em Meteorologia da Universidade
Federal da Paraíba - UFPb, em cumprimento
às exigências para obtenção do Grau de
Mestre.**

Ph.D. MARIA REGINA DA SILVA ARAGÃO

Orientadora

M.Sc. MAGALY DE FÁTIMA CORREIA

Co-Orientadora

CAMPINA GRANDE

JULHO DE 1996

215
15/08/96 (M.A.)
A. F. B. P.



A663p Araujo, Heraclio Alves de
Padroes de ecos de radar meteorologico no semi-arido brasileiro e condicoes atmosfericas associadas / Heraclio Alves de Araujo. - Campina Grande, 1996.
130 f. : il.

Dissertacao (Mestrado em Meteorologia) - Universidade Federal da Paraiba, Centro de Ciencias e Tecnologia.

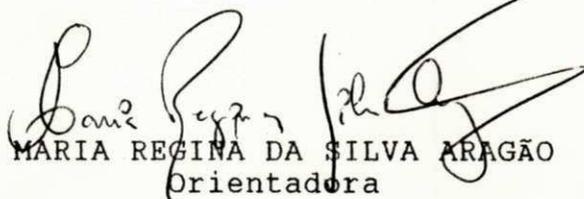
1. Radar Meteorologico Banda C 2. Meteorologia 3. Dissertacao I. Aragao, Maria Regina da Silva, Dra. II. Correia, Magaly de Fatima, M.Sc. III. Universidade Federal da Paraiba - Campina Grande (PB)

CDU 551.508.85(043)

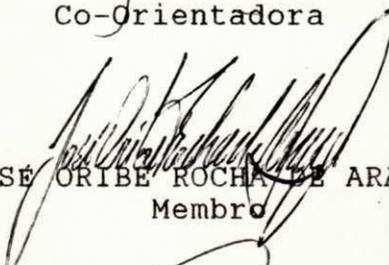
PADRÕES DE ECOS DE RADAR METEOROLÓGICO NO SEMI-ÁRIDO BRASILEIRO E
CONDIÇÕES ATMOSFÉRICAS ASSOCIADAS.

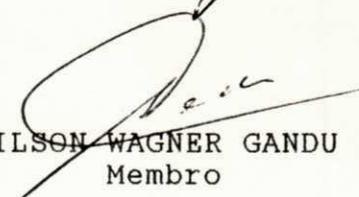
HERÁCLIO ALVES DE ARAÚJO

DISSERTAÇÃO APROVADA COM DISTINÇÃO EM 30/7/96


MARIA REGINA DA SILVA ARAGÃO
Orientadora


MAGALY DE FATIMA CORREIA
Co-Orientadora


JOSÉ ORIBE ROCHA DE ARAGÃO
Membro


ADILSON WAGNER GANDU
Membro

CAMPINA GRANDE
JULHO - 1996

DEDICATÓRIA

A meus pais, Izabel e Severino, fiéis companheiros de luta, dedico-lhes com o meu reconhecimento, pois sem vocês minha existência e este trabalho não teriam sentido.

Dedico também este trabalho a meus irmãos, sobrinhos, familiares e amigos que compartilharam deste ideal e o alimentaram incentivando-me a prosseguir e nunca desistir daquilo em que acreditava, fossem quais fossem os obstáculos.

AGRADECIMENTOS

À Direção do Instituto de Atividades Espaciais (IAE) do Centro Tecnológico da Aeronáutica (CTA), pelo acesso aos dados de radar, radiossondagens e superfície.

Em especial, às professoras Maria Regina da Silva Aragão e Magaly de Fátima Correia pela imprescindível orientação, paciência e amizade.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão da bolsa de estudo.

À Universidade Federal da Paraíba - UFPb (Departamento de Ciências Atmosféricas - DCA), pela oportunidade de realizar este trabalho.

À engenheira Eyres Diana Ventura Silva pelo auxílio na obtenção e tratamento dos dados de precipitação e radiossondagem, à desenhista Cleide dos Santos pela confecção dos desenhos e a secretária Divanete Cruz Rocha pelo apoio e compreensão.

Ao coordenador deste Curso de Mestrado em Meteorologia, Dr. Pedro Vieira de Azevedo, pelo apoio e incentivo.

Às amigas Denilde Meira, Albanise Barbosa Marinho e a minha família pelo carinho e incentivo que me foram um afago durante a realização deste trabalho.

E, finalmente, a todos aqueles que das mais variadas formas contribuíram para a realização deste trabalho.

ABSTRACT

A unique set of C-band meteorological radar echoes is analyzed. The data were obtained in Petrolina-PE (9°24'S, 40°30'W), located in the semi-arid region of Northeast Brazil, during the first semester of 1985. The role played by thermodynamic and dynamic forcings during the period of study is investigated. A linear correlation analysis between the parcel convective energy and the number of echoes within different classes of horizontal area gave significant positive correlations for echoes with area ≤ 400 km². Similar results were found for echo height. The parcel convective energy and rainfall measured by raingages were found to be correlated in April only. The echoes were classified following two criteria. The first one, based on the reflectivity gradients seen on the PPI and RHI images, allowed to identify convective, stratiform and stratoconvective echoes. The second classification, based on the apparent degree of organization seen on the PPI images, allowed to identify five main distinct patterns: scattered echoes, zone of echoes, line of echoes, strip of echoes and band of echoes. Results show convective echoes to account for 98,78% of the total number of echoes. They occurred throughout the observation period being more frequent in the southeast quadrant of the radar coverage. A relatively high frequency (0,8%) of stratiform echoes occurred in January only. Extensive and long-lasting predominantly stratiform precipitation fields covering about 35,000 km² are found to be associated with upper tropospheric cyclonic vortices. Scattered echoes and zones of echoes were seen during the entire observation period. Lines and strips of echoes were more frequent in March and April. Bands of echoes occurred almost entirely in June. A system of frontal origin penetrating in the radar area provided the dynamic forcing to form the bands of echoes. All five distinct patterns were more frequent in the southeast quadrant of the radar coverage. It is hypothesized that this preferential location may be explained by, among other factors, the availability of moisture brought in by the southeast trade winds and the penetration and/or *in situ* formation of organized weather systems.

RESUMO

O único conjunto de dados de radar meteorológico banda-C já obtidos na região semi-árida do Nordeste do Brasil é analisado. Os dados foram coletados pelo IAE-CTA em Petrolina-PE (9°24'S, 40°30'W) durante o primeiro semestre de 1985. Neste trabalho também é investigado o papel desempenhado por forçantes de natureza termodinâmica e dinâmica durante o período de estudo. Uma análise de correlação linear entre a energia convectiva da parcela e o número de ecos pertencentes a diferentes classes de área horizontal resulta em correlações significativas positivas somente para ecos com área $\leq 400 \text{ km}^2$. Correlações positivas também são encontradas com a altura do topo dos ecos. A energia convectiva da parcela e a precipitação medida por pluviômetros estão correlacionadas apenas em abril. Os ecos foram classificados segundo dois critérios. O primeiro, baseado no gradiente de refletividade visto nas imagens PPI e RHI, permitiu identificar ecos convectivos, estratiformes e estratoconvectivos. A segunda classificação, baseada no grau aparente de organização visto nas imagens PPI, permitiu identificar cinco padrões distintos: ecos dispersos, zonas de ecos, linhas de ecos, faixas de ecos e bandas de ecos. Os resultados mostram que os ecos convectivos são responsáveis por 98,8% do número total de ecos. Sua maior frequência é encontrada no quadrante sudeste da área de cobertura do radar. Os ecos estratiformes tem frequência relativamente alta (0,8%) apenas em janeiro. Extensas e duradouras áreas de precipitação predominantemente estratiforme cobrindo aproximadamente 35.000 km^2 são encontradas em associação a vórtices ciclônicos da alta troposfera. Ecos dispersos e zonas de ecos foram observados em todo o período de estudo. Linhas e faixas de ecos foram mais frequentes em março e abril. Bandas de ecos ocorreram quase que totalmente em junho provocadas pela forçante dinâmica associada a um sistema de origem frontal que penetrou na região. Os cinco diferentes padrões de ecos foram mais frequentes no quadrante sudeste da área de cobertura do radar. Uma hipótese é formulada de que essa localização preferencial pode ser explicada por vários fatores, entre os quais estão a disponibilidade de umidade trazida pelos alísios de sudeste e a penetração e/ou formação *in situ* de sistemas de tempo organizados.

ÍNDICE

	Pág.
ABSTRACT	
RESUMO	
I. LISTA DE FIGURAS	i
II. LISTA DE TABELAS	vi
III. LISTA DE ABREVIATURAS	vii
IV. LISTA DE SÍMBOLOS	x
CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	01
CAPÍTULO 2 - REVISÃO DA LITERATURA	06
2.1. Estudos Observacionais dos Ecos do Radar de Petrolina-PE	06
2.2. Fenômenos Atmosféricos de Grande Escala e o Nordeste do Brasil	10
CAPÍTULO 3 - DADOS E METODOLOGIA	15
3.1. Definição do Período de Estudo	15
3.2. Dados Utilizados	15
3.2.1. Descrição do radar de Petrolina-PE	19
3.2.1.1. Seleção dos parâmetros A e b da relação Z x R	21
3.2.1.2. Resolução espacial das imagens do radar	22
3.2.2. Dados de precipitação via radar e suas limitações	22
3.2.3. Dados de precipitação via pluviômetros e suas limitações	25

3.3. Metodologia	25
3.3.1. Classificação dos tipos e padrões dos ecos do radar de Petrolina-PE	27
3.3.2. Dimensões horizontal e vertical dos ecos do radar de Petrolina-PE....	35
3.3.3. Energia máxima da parcela à superfície (Emáx)	36
3.3.3.1. Cálculo de Emáx	37
3.3.4. Análise da estabilidade vertical	37
3.3.5. Identificação de sistemas atmosféricos de grande escala atuantes no Nordeste do Brasil	42
CAPÍTULO 4 - DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	45
4.1. Características do Campo de Precipitação via Radar	45
4.1.1. Dimensões típicas dos ecos do radar de Petrolina-PE.....	45
4.1.2. Classificação dos sistemas de precipitação	49
4.2. Energia Máxima da Parcela à Superfície (Emáx) e a Precipitação.....	66
4.2.1. Emáx e os ecos do radar de Petrolina-PE	66
4.2.1.1. Emáx e as dimensões horizontais dos ecos	67
4.2.1.2. Emáx e as dimensões verticais dos ecos	74
4.2.2. Emáx e a precipitação via pluviômetros.....	76
4.3. Sistemas de Circulação Atmosférica e os Ecos do Radar de Petrolina- PE	81
4.3.1. Fenômenos atmosféricos de grande escala e sua atuação no Nordeste do Brasil	82
4.3.1.1. Janeiro de 1985	86
4.3.1.2. Fevereiro de 1985.....	89
4.3.1.3. Março de 1985	91

4.3.1.4. Abril de 1985.....	93
4.3.1.5. Maio de 1985.....	96
4.3.1.6. Junho de 1985.....	100
4.3.2. Campos de precipitação via radar e condições atmosféricas associadas: Estudos de caso.....	103
4.3.2.1. Extensas áreas disformes de precipitação predominantemente estratiforme.....	103
4.3.2.2. Bandas de ecos.....	108
CAPÍTULO 5 - SUMÁRIO E CONCLUSÕES.....	120
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	128

I - LISTA DE FIGURAS

	Pág.
1.1 - Mapa do relevo da Região Nordeste do Brasil, com localização do radar de Petrolina-PE (9°24'S, 40°29'W) e respectiva área de cobertura limitada pelo círculo externo cujo raio é 400 km. O círculo interno, cujo raio é 250 km, corresponde à área na qual foi feita a contagem dos ecos. Os círculos aparecem subdivididos nos quadrantes nordeste (NE), sudeste (SE), sudoeste (SW) e noroeste (NW). Caravelas-BA (17°44'S, 39°15'W) está localizada no extremo sul do Nordeste. A convenção utilizada para o relevo é vista no canto inferior esquerdo da figura. (Fonte: Farah e Justo).....	03
3.1 - Área geográfica coberta pelas imagens do satélite meteorológico METEOSAT. (Fonte: EUMETSAT/ESA, 1990) ...	16
3.2 - PPI's obtidos pelo radar meteorológico de Petrolina para os dias 09 e 18 de janeiro de 1985 são vistos em (a). A distância entre os círculos concêntricos ao local do radar é de 50 km. O seguimento de reta OA corresponde ao azimute de 221,4° ao longo do qual foi feito o RHI mostrado em (b). A convenção utilizada para a taxa de precipitação é vista em (c). A hora local (HL), a elevação da antena (EL) e a escala de chuva (EC) são indicadas nos PPI's e RHI. A seta indica o Norte Verdadeiro (N) (Fonte: Correia, 1989).....	24
3.3 - Distribuição espacial dos postos pluviométricos localizados na área de cobertura do radar. A distância entre os círculos concêntricos ao local do radar é de 50 km. Os estados são identificados por suas siglas.	26
3.4 - Representação esquemática dos padrões de ecos observados pelo radar de Petrolina-PE: (A) ecos dispersos, (B) zonas de ecos, (C) linhas de ecos, (D) faixas de ecos e (E) bandas de ecos. Os ecos são mostrados no quadrante nordeste da área de cobertura do radar apenas para ilustração. Os semicírculos estão afastados entre si de 50 km. O semicírculo externo corresponde ao raio de 350 km.....	30
3.5 - Representação dos padrões de ecos observados pelo radar de Petrolina-PE: (A) ecos dispersos (Ed), (B) zonas de ecos (Ze), (C) linhas de ecos (Le), (D) faixas de ecos (Fe) e (E) bandas de ecos (Be). Os círculos concêntricos ao local do radar estão afastados entre si de 50 km. O círculo externo corresponde ao raio de 250 km. A convenção utilizada para a	

	taxa de precipitação (EC) é vista em (F). A seta indica o norte verdadeiro (N). Os PPI's foram obtidos com escala de chuva 1.	31
3.6 -	Radiossondagem do dia 29 de março de 1985, realizada às 11:56 TMG, plotada em um tefigrama. A temperatura (T) e a temperatura do ponto de orvalho (T_d) à superfície são indicadas pela letra (a). O valor máximo da temperatura potencial do bulbo úmido ($((\theta_w)_{m\acute{a}x})$) utilizado no cálculo da energia máxima da parcela à superfície ($E_{m\acute{a}x}$) também é indicado na figura. A área hachurada corresponde a $E_{m\acute{a}x}$	38
4.1 -	Distribuição de freqüência relativa e acumulada das dimensões horizontais dos ecos observados pelo radar de Petrolina-PE no período de janeiro a junho de 1985.....	46
4.2 -	Distribuição mensal de freqüência relativa e acumulada das dimensões horizontais dos ecos observados pelo radar meteorológico de Petrolina-PE no período de janeiro a junho de 1985.....	48
4.3 -	Variação temporal do percentual de área coberta por chuva observada pelo radar meteorológico de Petrolina-PE num círculo de 250 km de raio no dia: (a) 9, (b) 18 e (c) 24 de janeiro de 1985.....	50
4.4 -	Distribuição mensal do número relativo percentual de ocorrências de: (a) ecos convectivos (E_c), (b) ecos estratiformes (E_{st}) e (c) ecos estratoconvectivos (E_{stc}), obtidos pelo radar meteorológico de Petrolina-PE num círculo de 400 km de raio no período de janeiro a junho de 1985.....	54
4.5 -	Distribuição mensal dos valores percentuais de ocorrências de: (a) ecos dispersos (E_d), (b) zonas de ecos (Z_e), (c) linhas de ecos (L_e), (d) faixas de ecos (F_e) e (e) bandas de ecos (B_e), obtidos pelo radar meteorológico de Petrolina-PE num círculo de 250 km de raio no período de janeiro a junho de 1985.....	57
4.6 -	Distribuição percentual por quadrante, para o período de janeiro a junho de 1985, de: (a) ecos dispersos (E_d), (b) zonas de ecos (Z_e), (c) linhas de ecos (L_e), (d) faixas de ecos (F_e) e (e) bandas de ecos (B_e). O número percentual total de cada padrão de ecos no período de estudo foi considerado como sendo 100%.....	61
4.7 -	Distribuição percentual, por quadrante, de ecos dispersos (E_d) para o mês de: (a) janeiro, (b) fevereiro, (c) março, (d) abril, (e) maio e (f) junho de 1985. O número percentual total de ecos dispersos (E_d), para cada mês, foi considerado como sendo 100%.....	63

4.8 -	Distribuição percentual, por quadrante, de zonas de ecos (Ze), linhas de ecos (Le), faixas de ecos (Fe) e bandas de ecos (Be) para o mês de: (a) janeiro, (b) fevereiro, (c) março, (d) abril, (e) maio e (e) junho de 1985. O número percentual total do conjunto de padrões (excluídos os Ed), para cada mês, foi considerado como sendo 100%	64
4.9 -	Distribuição percentual, por quadrante, de zonas de ecos (Ze), linhas de ecos (Le), faixas de ecos (Fe) e bandas de ecos (Be), para o período de janeiro a junho de 1985. O número percentual total do conjunto de padrões (excluídos os Ed) foi considerado como sendo 100%	65
4.10 -	Diagrama de dispersão entre a energia máxima da parcela à superfície ($E_{m\acute{a}x}$) e o número de ecos com áreas menores ou iguais a 400 km ² para o período de janeiro a junho de 1985. A seta assinala o ponto correspondente ao dia 4 de junho	69
4.11 -	Diagrama de dispersão entre a energia máxima da parcela à superfície ($E_{m\acute{a}x}$) e o número de ecos com áreas menores ou iguais a 400 km ² para o período de janeiro a junho de 1985, excluído o dia 04 de junho.....	71
4.12 -	Perfis verticais de θ , θ_e e θ_{es} do dia 26 de fevereiro de 1985 para os horários das: (a) 11:15 TMG e (b) 18:15 TMG.....	73
4.13 -	Perfis verticais de θ , θ_e e θ_{es} do dia 01 de abril de 1985 para o horário das 12:00 TMG.....	73
4.14 -	Diagrama de dispersão entre a energia máxima da parcela à superfície ($E_{m\acute{a}x}$) e a altura média diária dos topos dos ecos....	74
4.15 -	Diagrama de dispersão entre as médias mensais da energia máxima da parcela à superfície ($E_{m\acute{a}x}$) e a médias mensais das alturas dos topos dos ecos	75
4.16 -	Diagrama de dispersão entre a energia máxima da parcela à superfície ($E_{m\acute{a}x}$) e o total diário de precipitação coletado pelos postos pluviométricos dentro do círculo com raio de 100 km centrado no local do radar	80
4.17 -	Pressão (mb) e temperatura do bulbo úmido (°C) médias diárias para janeiro em: (a) Caravelas e (b) Petrolina.....	85
4.18 -	Pressão (mb) e temperatura do bulbo úmido (°C) médias diárias para março em: (a) Caravelas e (b) Petrolina.....	85
4.19 -	Pressão (mb) e temperatura do bulbo úmido (°C) médias diárias para abril em: (a) Caravelas e (b) Petrolina.....	85

4.20 - Pressão (mb) e temperatura do bulbo úmido (°C) médias diárias para maio em: (a) Caravelas e (b) Petrolina.....	86
4.21 - Pressão (mb) e temperatura do bulbo úmido (°C) médias diárias para junho em: (a) Caravelas e (b) Petrolina.....	86
4.22 - Componentes zonal (u) e meridional (v) médias diárias (m/s) do vento à superfície e precipitação total diária (cm) para janeiro de 1985 em: (a)-(b) Caravelas e (c)-(d) Petrolina. Valores positivos (negativos) de u representam componente de oeste (leste). Valores positivos (negativos) de v representam componente de sul (norte).....	88
4.23 - Esquema ilustrando a circulação para os casos tipo S em (a) baixos níveis e (b) altos níveis (Fonte: Lacava, 1995)	89
4.24 - Componentes zonal (u) e meridional (v) médias diárias (m/s) do vento à superfície e precipitação total diária (cm) para março de 1985 em: (a)-(b) Caravelas e (c)-(d) Petrolina. Valores positivos (negativos) de u representam componente de oeste (leste). Valores positivos (negativos) de v representam componente de sul (norte).....	93
4.25 - Componentes zonal (u) e meridional (v) médias diárias (m/s) do vento à superfície e precipitação total diária (cm) para abril de 1985 em: (a)-(b) Caravelas e (c)-(d) Petrolina. Valores positivos (negativos) de u representam componente de oeste (leste). Valores positivos (negativos) de v representam componente de sul (norte).....	96
4.26 - Componentes zonal (u) e meridional (v) médias diárias (m/s) do vento à superfície e precipitação total diária (cm) para maio de 1985 em: (a)-(b) Caravelas e (c)-(d) Petrolina. Valores positivos (negativos) de u representam componente de oeste (leste). Valores positivos (negativos) de v representam componente de sul (norte).....	99
4.27 - Componentes zonal (u) e meridional (v) médias diárias (m/s) do vento à superfície e precipitação total diária (cm) para junho de 1985 em: (a)-(b) Caravelas e (c)-(d) Petrolina. Valores positivos (negativos) de u representam componente de oeste (leste). Valores positivos (negativos) de v representam componente de sul (norte).....	102
4.28 - PPI obtido pelo radar meteorológico de Petrolina-PE às 13 HL do dia 24 de janeiro de 1985 é visto em (a). A distância entre os círculos concêntricos ao local do radar é de 50 km. O seguimento de reta OA corresponde ao azimute de 311,9° ao longo do qual foi feito o RHI das 12:56 HL mostrado em (b) e a convenção utilizada para a taxa de precipitação (mm/h) é vista	

- em (c). A escala de intensidade de chuva utilizada no PPI (RHI) é a 2 (1). A seta indica o Norte Verdadeiro (N)..... 105
- 4.29 - Imagem do satélite METEOSAT na banda do infravermelho obtida às 08:55 HL do dia 24 de janeiro de 1985, ilustrando a nebulosidade em forma de arco associada ao vórtice ciclônico da alta troposfera. A ponta da flecha situada no lado esquerdo da imagem assinala a localização aproximada de Petrolina-PE (9°24'S, 40°29'W) 106
- 4.30 - Perfil vertical das componentes zonal (u) e meridional (v) (m/s) do vento obtido pela sondagem realizada às 09:51 HL do dia 24 de janeiro de 1985. Valores positivos (negativos) de u representam componente de oeste (leste). Valores positivos (negativos) de v representam componente de sul (norte) 107
- 4.31 - Perfis verticais de θ , θ_e e θ_{es} obtidos pela sondagem das 09:51 HL do dia 24 de janeiro de 1985 108
- 4.32 - PPI obtido pelo radar meteorológico de Petrolina-PE às 08:22 HL do dia 06 de junho de 1985 mostrando duas Be nos quadrantes SE e SW é visto em (a) e a convenção utilizada para a taxa de precipitação (mm/h) é vista em (b). A seta indica o Norte Verdadeiro. A escala de intensidade de chuva utilizada é a 1 (EC - 1) 110
- 4.33 - Carta de superfície para as 15:00 HL do dia: (a) 04/06/85, (b) 05/06/85 e (c) 06/06/85. O pequeno círculo branco (negro) assinala a localização de Petrolina (Caravelas). (Fonte: IAE-CTA) 112
- 4.34 - Imagem do satélite METEOSAT na banda do infravermelho obtida às 08:55 HL do dia 06 de junho de 1985, ilustrando a nebulosidade provocada pelo sistema frontal. A ponta da flecha situada no no lado esquerdo da imagem assinala a localização aproximada de Petrolina-PE (09°24'S, 40°29'W) 115
- 4.35 - Perfis verticais de θ , θ_e e θ_{es} obtidos das sondagens realizadas nos dias (a) 03/06/85 às 09:00 HL, (b) 04/06/85 às 09:10 HL, (c) 05/06/85 às 09:02 HL e (d) 06/06/85 às 08:58 HL 116
- 4.36 - Perfis verticais das componentes zonal (u) e meridional (v) do vento (m/s) obtidos pelas sondagens realizadas nos dias (a) 03/06/85 às 09:00 HL, (b) 04/06/85 às 09:10 HL, (c) 05/06/85 às 09:02 HL e (d) 06/06/85 às 08:58 HL. Valores positivos (negativos) de u representam componente de oeste (leste). Valores positivos (negativos) de v representam componente de sul (norte) 117

II - LISTA DE TABELAS

	Pág.
3.1 - Resumo mensal dos dados coletados pelo IAE-CTA em Petrolina no primeiro semestre de 1985.....	18
3.2 - Versão normal de precipitação.....	20
3.3 - Versão alta de precipitação.....	21
4.1 - Distribuição mensal de tipos de ecos, números de PPI's e RHI's e período com observação de radar (dias e horas).....	51
4.2 - Resumo mensal dos valores absolutos e relativos dos tipos de ecos.....	54
4.3 - Resumo mensal dos valores absolutos e relativos dos padrões de ecos.....	56
4.4 - Número relativo de ocorrências de tipos e padrões de ecos por hora.....	60
4.5 - Energia máxima da parcela à superfície ($E_{máx}$) e número de ecos com áreas A_1 , A_2 e $(A_1 + A_2)$	68
4.6 - Coeficientes de correlação entre $E_{máx}$ e o total de precipitação num raio de 50, 100, 150, 200 e 250 km, centrados em Petrolina-PE.....	77
4.7 - Energia máxima da parcela à superfície ($E_{máx}$) e o total de precipitação via pluviômetros.....	79
4.8 - Precipitação mensal (mm) e número de dias com chuva.....	83
4.9 - Número de passagens frontais e respectivos dias de ocorrência em Caravelas-BA.....	83

III - LISTA DE ABREVIATURAS

A	-	Dia com observação de altitude
ABR	-	Abril
ASAS	-	Alta Subtropical do Atlântico Sul
BA	-	Bahia
Be	-	Banda de eco
CTA	-	Centro Técnico Aeroespacial
DHN	-	Diretoria de Hidrografia e Navegação
EC	-	Escala de chuva
Ec	-	Eco do tipo convectivo
Ed	-	Eco disperso
EL	-	Elevação da antena
Emáx	-	Energia máxima da parcela à superfície
Est	-	Eco do tipo estratiforme
Estc	-	Eco do tipo estratoconvectivo
EUMETSAT/ESA	-	European Organization for the Exploitation of Meteorological Satellites/European Space Agency
Fe	-	Faixa de eco
FEV	-	Fevereiro
GATE	-	Global Atmospheric Research Program's Atlantic Tropical Experiment
HL	-	Hora local
IAE	-	Instituto de Atividades Espaciais
INMET	-	Instituto Nacional de Meteorologia
JAN	-	Janeiro

JUN	-	Junho
Le	-	Linha de eco
MAI	-	Maio
MAR	-	Março
METEOSAT	-	Meteorological Satellite
MODART	-	Modificação Artificial do Tempo
M-P	-	Marshall e Palmer
N	-	Norte verdadeiro
NCL	-	Nível de condensação por levantamento
NE	-	Quadrante nordeste da área de cobertura do radar
NPO	-	Número percentual de ocorrências de ecos
NRO	-	Número relativo de ocorrências de ecos
NW	-	Quadrante noroeste da área de cobertura do radar
PE	-	Pernambuco
PPI	-	(Plan-Position Indicator) Indicador de Posição no Plano
R	-	Dia com observação de radar
RHI	-	(Range, Height Indicator) Indicador de Distância e Altura
ROLE	-	Radiação de Onda Longa Emergente
S	-	Sul
S	-	Dia com observação de superfície
SE	-	Quadrante sudeste da área de cobertura do radar
SUDENE	-	Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste
SP	-	São Paulo
SW	-	Quadrante sudoeste da área de cobertura do radar
TE	-	Total de ecos observados

TMG	-	Tempo médio de Greenwich
UR	-	Umidade relativa
W	-	Oeste
ZCAS	-	Zona de Convergência do Atlântico Sul
ZCIT	-	Zona de Convergência Intertropical
Ze	-	Zona de eco

IV - LISTA DE SÍMBOLOS

T	-	Temperatura do ar (°C)
Td	-	Temperatura do ponto de orvalho (°C)
T _w	-	Temperatura do búlbo úmido média diária (°C)
°	-	Grau
'	-	Minuto geográfico
°C	-	Grau Celsius
K	-	Grau Kelvin
T _k	-	Temperatura do ar (K)
T _L	-	Temperatura no nível de condensação (K)
(T _w) _{máx}	-	Temperatura do búlbo úmido máxima (°C)
(θ _w) _{máx}	-	Temperatura potencial máxima (°C)
θ	-	Temperatura potencial (K)
θ _w	-	Temperatura potencial do bulbo úmido (°C)
θ _e	-	Temperatura potencial equivalente (K)
θ _{es}	-	Temperatura potencial equivalente de saturação (K)
$\frac{\partial \theta_e}{\partial Z}$	-	Gradiente vertical da temperatura potencial equivalente (K/km)
r	-	Razão de mistura (g/kg)
r _s	-	Razão de mistura de saturação (g/kg)
mb	-	Milibar
e	-	Pressão de vapor (mb)
e _s	-	Pressão de vapor de saturação (mb)
hPa	-	Hectopascal

Z(dBZ)	-	Fator de refletividade do radar
R(mm/h)	-	Intensidade de precipitação
y	-	representa PPI ou hora
T(y)	-	Total de PPI's ou de horas
x	-	representa tipo ou padrão de ecos
TE(x)	-	Total de ecos de um determinado tipo ou padrão
i	-	representa mês ou quadrante
p	-	representa período total
u	-	Componente zonal do vento (m/s)
v	-	Componente meridional do vento (m/s)
cm	-	Centímetro
m	-	Metro
m ²	-	Metro quadrado
mm	-	Milímetro
km	-	Quilômetro
km ²	-	Quilômetro quadrado
h	-	Hora
g	-	Gramma
MHz	-	Megahertz
kW	-	Quilowatts
μs	-	Microsssegundo
J	-	Joule

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

A alta variabilidade espacial e temporal do regime pluviométrico do Nordeste e, em particular, de sua região semi-árida, gera uma instabilidade sócio-econômica que se faz sentir de forma particularmente acentuada na agricultura e na pecuária. A irregularidade é parcialmente explicada pela diversidade dos fenômenos que influenciam a Região. Eles vão desde aqueles de escala interanual e planetária como o El Niño-Oscilação do Sul até fenômenos de curta duração e pequena escala como a convecção isolada.

A grande maioria dos estudos já realizados que busca diagnosticar os sistemas atmosféricos que provocam ou inibem a precipitação no Nordeste aborda fenômenos das escalas planetária e sinótica. A razão para isso está no fato de que a maior parte das informações meteorológicas disponíveis não têm a resolução espacial e temporal necessária ao estudo adequado de fenômenos que são essencialmente de meso e pequena escala ou mesmo, a estrutura de meso e pequena escala de sistemas de escala maior.

Um conjunto de dados que foge à regra acima são as imagens obtidas por um radar meteorológico banda-C instalado e operado pelo Instituto de Atividades Espaciais do Centro Tecnológico Aeroespacial (IAE-CTA, atual Instituto de Aeronáutica e Espaço do Centro Técnico Aeroespacial) em Petrolina, Pernambuco, durante o primeiro semestre de 1985. A área válida coberta pelo radar é a de um círculo de 400 km de raio centrado na sede do radar (Fig. 1.1).

Até o presente, esse é o único conjunto de dados já coletados na região semi-árida que permite acompanhar a evolução temporal e espacial de sistemas precipitantes em pequena e mesoescala.

Petrolina (9°24'S, 40°29'W) está localizada a 370 m de altitude na margem esquerda do Rio São Francisco. Serras com altitude média de 700 m localizadas 40 km a oeste-noroeste da cidade são a principal influência orográfica sobre a mesma.

A atmosfera em Petrolina se caracteriza pela presença, na baixa troposfera, de uma inversão térmica de subsidência devido ao domínio da alta subtropical do Atlântico Sul (ASAS). Essa inversão é enfraquecida ou mesmo eliminada quando atuam outros sistemas atmosféricos organizados. Resultados encontrados para o período chuvoso sugerem que a frequência de inversões está inversamente correlacionada com a quantidade de chuva caída (Ramos, 1975; Farah e Justo, 1979).

A estação chuvosa em Petrolina começa em novembro-dezembro e termina em abril. Seu início tem sido atribuído à penetração de sistemas frontais (Abreu, 1979) enquanto que as chuvas de final de período são normalmente creditadas à influência da zona de convergência intertropical (ZCIT). Segundo Ramos (1975), sistemas atmosféricos organizados que se movem de leste para oeste parecem ser os responsáveis pela maior parte da chuva caída em Petrolina no período de janeiro a abril de 1972. Ramos sugere ainda que a interação entre

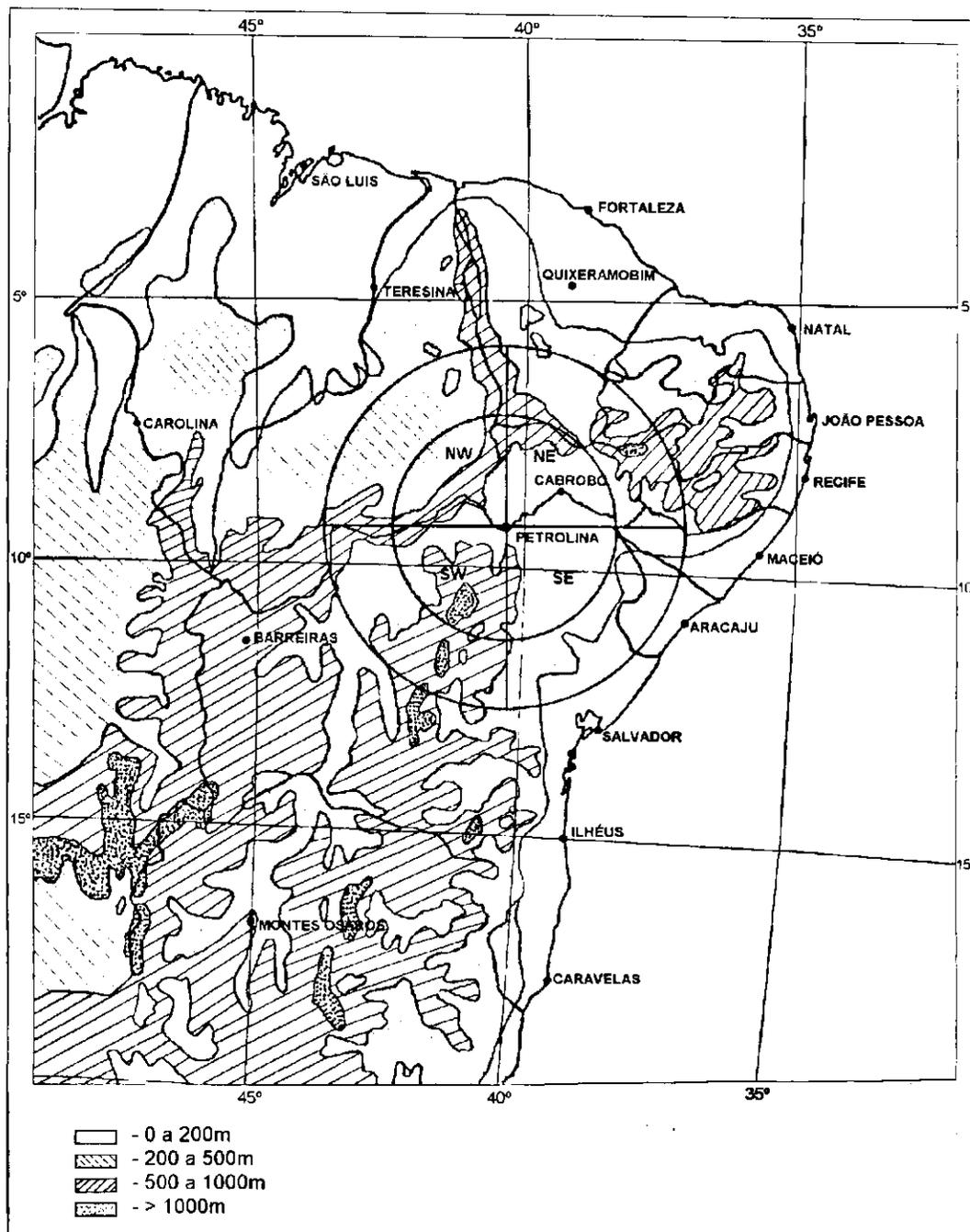


Fig. 1.1- Mapa do relevo da Região Nordeste do Brasil, com a localização do radar de Petrolina-PE ($9^{\circ}24'S$, $40^{\circ}29'W$) e respectiva área de cobertura limitada pelo círculo externo cujo raio é 400 km. O círculo interno, cujo raio é 250 km, corresponde à área na qual foi feita a contagem dos ecos. Os círculos aparecem subdivididos nos quadrantes nordeste (NE), sudeste (SE), sudoeste (SW) e noroeste (NW). Caravelas-BA ($17^{\circ}44'S$, $39^{\circ}15'W$) está localizada no extremo sul do Nordeste. A convenção utilizada para o relevo é vista no canto inferior esquerdo da figura. (Fonte: Farah e Justo, 1979).

o escoamento de grande escala e as correntes descendentes provenientes das serras seria a responsável pela maior frequência de chuvas no período da madrugada em Petrolina.

Os estudos já realizados com os dados do radar de Petrolina (Massambani e Correia, 1988; Correia, 1989; Correia e Massambani, 1990a,b; Vitorino et alii, 1991; Araújo et alii, 1992, Araújo et alii, 1994) mostram análises estatísticas da distribuição espacial de ecos indicando áreas preferenciais de formação da precipitação e dimensões características das células observadas, além de relacionar o campo de chuva via radar com parâmetros termodinâmicos obtidos de radiossondagens.

Os resultados sugerem que mecanismos dinâmicos de diferentes escalas foram responsáveis pelas características da população de ecos analisada. Um aspecto ainda não explorado é o da organização dos ecos e de sua relação com os sistemas atmosféricos atuantes. Dessa forma, a realização deste trabalho tem os seguintes objetivos:

- (a) Identificar tipos e padrões de ecos típicos do período de estudo;
- (b) Fazer uma estatística dos tipos e padrões encontrados;
- (c) Determinar a importância de fatores locais (termodinâmicos) versus fatores de grande escala (dinâmicos) para a existência dos ecos;
- (d) Identificar os sistemas atmosféricos de grande escala que atuaram no período de estudo;
- (e) Selecionar situações nas quais a distribuição dos ecos pareça ser típica de sistemas de grande escala específicos;

(f) Diagnosticar a estrutura termodinâmica e o perfil vertical do vento em Petrolina nas situações selecionadas;

O conseguimento dos objetivos acima possibilita adicionar ao conhecimento já existente uma nova visão sobre a atuação de sistemas atmosféricos que influenciam o tempo e o clima do Nordeste do Brasil.

CAPÍTULO 2

REVISÃO DA LITERATURA

A análise dos ecos detectados pelo radar meteorológico banda-C de Petrolina-PE e a identificação de fatores de natureza termodinâmica e dinâmica que contribuíram para a existência dos ecos são os objetivos básicos desta pesquisa. Dessa forma, a revisão aqui apresentada está dividida em duas partes. Na primeira são abordados os trabalhos já realizados com os dados do radar de Petrolina. Na segunda é feita uma revisão de trabalhos que visam identificar e caracterizar os sistemas atmosféricos de grande escala que atuam no Nordeste e, em particular, em sua porção semi-árida.

2.1 Estudos Observacionais dos Ecos do Radar de Petrolina-PE

O primeiro trabalho publicado sobre os dados do radar de Petrolina foi o de Massambani e Correia (1988). Utilizando também dados de radiossondagens de Petrolina, os autores constataram existir uma relação direta entre a energia máxima da parcela à superfície e o número de células com áreas inferiores a 300 km². Eles determinaram ainda que os episódios de precipitação tiveram origem em sistemas frontais que penetraram na região e em sistemas isolados ou aglomerados cujos topos atingiram alturas próximas à tropopausa.

Correia (1989) verificou, analisando os registros centrados nos horários das 12:00, 14:00 e 16:00 HL, que aproximadamente 90% dos ecos tem áreas de precipitação menores que 300 km². Assim, essas áreas representam a maior

parte da atividade convectiva total no período analisado. Os ecos com áreas maiores que 300 km² representam apenas 8% das células observadas mas contribuem de forma significativa devido às grandes áreas cobertas com precipitação. Utilizando análises de distribuição de frequência acumulada obtidas para dimensões horizontais e alturas máximas dos ecos, ela sugeriu que os processos convectivos na região do semi-árido produzem elementos com dimensões características, dependendo da atuação de fatores dinâmicos e termodinâmicos tais como convergência e estabilidade térmica. Ressaltou, porém, que tais fatores teriam um maior ou menor grau de influência dependendo da dimensão dos primeiros ecos formados.

Correia e Massambani (1990a) submeteram as dimensões horizontal e vertical dos ecos a uma análise estatística. As distribuições de frequência encontradas evidenciaram que os ecos se formam e crescem de acordo com uma lei de efeitos proporcionais, produzindo distribuições denominadas log-normais.

Correia e Massambani (1990b) fizeram um estudo estatístico das dimensões típicas de 3.581 ecos, correspondentes aos registros centrados nos horários das 12:00, 14:00 e 16:00 HL. Eles verificaram que 90% desses ecos tinham áreas menores que 300 km². Determinaram ainda que nos meses de janeiro, fevereiro e março as dimensões predominantes ficaram entre 100 e 300 km², enquanto que foram iguais ou menores que 100 km² nos meses de abril, maio e junho. Por outro lado, nos meses de janeiro, março e abril a contribuição maior para os totais de precipitação foi proveniente de ecos com áreas $300 \text{ km}^2 \leq \text{área} < 600 \text{ km}^2$ e $\text{área} \geq 600 \text{ km}^2$. Tal resultado os levou a concluir que os

grandes eventos de chuva foram provenientes de grandes aglomerados de nuvens.

Vitorino et alii (1991), em um estudo sobre a natureza da chuva em Petrolina, analisaram o grau de influência dos efeitos locais na distribuição e desenvolvimento da precipitação para os meses de março e abril de 1985. Correlações entre a energia da parcela à superfície e o número de ecos com áreas A1 (área $\leq 100 \text{ km}^2$) e A2 ($100 \text{ km}^2 < \text{área} \leq 400 \text{ km}^2$) foram obtidas separadamente para os quadrantes nordeste, sudeste, sudoeste e noroeste da região de cobertura do radar. Os resultados encontrados evidenciaram uma relação direta entre as condições termodinâmicas à superfície e os sistemas de precipitação observados. Por outro lado, forçantes de grande escala foram necessárias para iniciar a instabilidade e produzir sistemas mais profundos. Eles sugerem que o relevo, apesar de suave, representa um fator fundamental para a formação de pequenas células convectivas.

Araújo et alii (1992), analisando o mesmo período de dados em um estudo sobre o desenvolvimento da convecção profunda no semi-árido, verificaram que as condições termodinâmicas observadas eram quase sempre favoráveis à formação de sistemas intensos. Entretanto, em alguns dias não foi observada convecção profunda, embora as condições termodinâmicas favorecessem sua ocorrência.

Araújo et alii (1994) fizeram um estudo estatístico dos padrões de ecos de radar meteorológico observados no semi-árido brasileiro, durante o primeiro

semestre de 1985. A contabilização dos ecos evidenciou uma grande incidência (96,9%) de ecos isolados (Ei). As zonas de ecos (Ze) tiveram frequência percentual de 1,8% enquanto que os padrões organizados de forma quase linear resultaram em 0,9% de linhas de ecos (Le), 0,1% de faixas de ecos (Fe) e 0,08% de bandas de ecos (Be). Eles verificaram também que, apesar da baixa frequência apresentada pelos padrões organizados, eles são de fundamental importância para a identificação dos sistemas precipitantes na região.

Os resultados apresentados sugerem que o alto índice pluviométrico registrado na região do semi-árido nordestino, durante a estação chuvosa de 1985, foi ocasionado pela atuação de sistemas de circulação atmosférica de diferentes escalas. Os ecos do radar de Petrolina mostram que a chuva nesta região é predominantemente de origem convectiva. Por outro lado, no caso de sistemas estratiformes apresentando extensas áreas precipitantes, os mecanismos dinâmicos de larga escala parecem predominar quando comparados com efeitos termodinâmicos locais.

Vale assinalar que há vários aspectos ainda não esclarecidos no que diz respeito à natureza da distribuição dos ecos. A organização dos ecos em linhas, faixas ou bandas sugere situações atmosféricas produzidas por sistemas de circulação específicos. Dessa forma, é objetivo deste trabalho contribuir para identificar os sistemas meteorológicos atuantes no semi-árido brasileiro no período de janeiro a junho de 1985.

2.2 Fenômenos Atmosféricos de Grande Escala e o Nordeste do Brasil

A Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) é um dos principais sistemas de circulação atmosférica responsáveis pela definição da qualidade e duração da estação chuvosa no norte da Região Nordeste do Brasil. O deslocamento anômalo da ZCIT (mais para norte ou para sul em relação à média de longo prazo) tem sido o critério que define anos secos e anos chuvosos no Nordeste. Sua influência sobre a precipitação nesta região foi estudada por vários pesquisadores dentre os quais estão Namias (1972), Hastenrath e Heller (1977) e Uvo (1989).

Os resultados obtidos por Namias (1972) e Hastenrath e Heller (1977) indicam que a ZCIT tende a se localizar fora das regiões de ventos mais fortes. Dessa forma, se os alísios de nordeste (sudeste) forem mais intensos a ZCIT tende a se localizar em regiões mais ao sul (norte).

Uvo (1989) verificou que a ZCIT está intimamente ligada com a definição e a qualidade da estação chuvosa do norte do Nordeste, dependendo de sua intensidade, da latitude mais ao sul por ela atingida e do seu tempo de permanência próximo a essa latitude. Ela mostrou ainda que no ano de 1985 a ZCIT atingiu a posição de 6°S, permanecendo em torno dessa latitude por um período de tempo acima da média, o que causou alto índice pluviométrico em todo o Nordeste.

Os vórtices ciclônicos da alta troposfera são outro sistema atmosférico causador de precipitação no nordeste brasileiro. Sua influência na Região foi discutida por vários pesquisadores entre os quais estão Aragão (1975), Kousky e Gan (1981) e Lacava (1995).

Aragão (1975) detectou na troposfera da região Norte-Nordeste do Brasil, em um período chuvoso, a presença de vórtices ciclônicos desde o nível de 700 mb até o nível de 300 mb, e que movimentos ascendentes estão presentes em toda a troposfera. Aragão observou, em um período seco, que a ASAS domina a baixa e média troposfera e que movimentos ascendentes e descendentes aparecem alternadamente em vários níveis. Ele constatou ainda que durante os períodos de estiagem na Região Nordeste há suficiente umidade nos baixos níveis da atmosfera, mas inexistente um mecanismo dinâmico capaz de provocar movimentos ascendentes que resultem na formação de nuvens suficientemente desenvolvidas para produzir precipitação.

Kousky e Gan (1981), através de imagens do satélite geoestacionário SMS/GOES, estudaram a atuação de vórtices ciclônicos da alta troposfera sobre o nordeste brasileiro, para um período de cinco anos (1975-79). Eles constataram que nos meses de maio a setembro não ocorreram esses vórtices e que tais sistemas são mais frequentes nos meses de verão, sendo janeiro o mês que apresentou o maior número de ocorrências (24 casos, dos quais apenas 6 apresentaram condições de tempo severo). Eles determinaram que a formação desses sistemas ocorre em associação à penetração de sistemas frontais austrais em latitudes baixas. Os autores concluíram ainda que a época favorável

à formação dos vórtices está positivamente correlacionada com o caráter meridional do fluxo médio aos 200 hPa o qual, por sua vez, está ligado a intensidade do anticiclone continental (anticiclone da Bolívia) presente no nível de 200 hPa.

Lacava (1995) realizou uma climatologia da ocorrência de faixas de nebulosidade convectiva associadas a zonas de convergência no Nordeste do Brasil complementando sua pesquisa com estudos de caso. Uma das situações identificadas por Lacava envolve interações entre vórtices ciclônicos da alta troposfera com centro a leste do Nordeste e a faixa de nebulosidade convectiva que, nesse caso, se apresenta meridionalmente alinhada sobre o oeste e centro do Nordeste. Os resultados da climatologia, feita com base em seis anos de imagens de satélite (1980 a 1983, 1987 e 1988), mostram que tais situações são mais frequentes nos meses de janeiro, fevereiro e março. Tais casos estão associados a sistemas frontais que atingem a Região Sudeste e organizam a convecção tropical. A evolução desses casos é tal que a baixa frontal se desloca para leste em latitudes médias enquanto que a faixa de nebulosidade convectiva se mantém semi-estacionária sobre o continente.

A influência de sistemas frontais oriundos das latitudes altas do hemisfério sul no regime de precipitação do Nordeste tem sido discutida por vários autores (Farah e Justo, 1979; Kousky, 1979; Abreu, 1979; Cavalcanti, 1986; Correia, 1989; Silva Aragão e Correia, 1994; Lacava, 1995) havendo consenso no que diz respeito ao aumento no volume de chuva com a aproximação ou penetração desses sistemas na Região.

Kousky (1979) estudou a penetração de sistemas frontais na região Nordeste do Brasil com base em três observações diárias de superfície para um período de 10 anos (1961-70). Ele mostrou que a precipitação na parte sul do nordeste brasileiro é influenciada por frentes frias que se movem no sentido pólo-equador e interagem com o ar úmido tropical. Kousky demonstrou que a penetração das frentes também causa acréscimo de chuva ao longo da costa, desde a Bahia até o Rio Grande do Norte, durante a estação chuvosa, e que algumas vezes as frentes influenciam até a parte norte, tal como o Estado do Ceará. Ele mostrou ainda que, mesmo que esses sistemas frontais não penetrem no Nordeste, eles atuam de forma tal que provocam, na Bahia, forte atividade convectiva.

Utilizando dados pluviométricos do nordeste brasileiro e, mais precisamente, da área de Petrolina-PE, para um período de cinco anos (outubro/67-setembro/72), Abreu (1979) concluiu que sistemas frontais austrais que atingem a Região nos meses de novembro e dezembro são responsáveis pelo início da estação chuvosa e que a entrada de tais sistemas é mais freqüente nessa época do ano.

As características meteorológicas associadas a precipitações intensas no nordeste brasileiro, para o período de janeiro a abril de 1985, foram estudadas por Cavalcanti (1986). Ela obteve coeficientes de correlação entre os valores da radiação de onda longa emergente (ROLE) para diferentes regiões na área da América do Sul. As regiões escolhidas foram aquelas nas quais a ZCIT, os vórtices ciclônicos da alta troposfera, o anticiclone da Bolívia e os sistemas

frontais são usualmente notados. Ela verificou que vários fatores influenciaram a ocorrência de precipitação acima da normal climatológica: a forte intensidade e a posição mais ao sul (em relação à posição média) da ZCIT, a temperatura da superfície do mar acima da média no litoral do Nordeste, a posição mais a leste do anticiclone da Bolívia, a presença de vórtices ciclônicos da alta troposfera no Nordeste e a quase permanência de zonas frontais no sudeste do Brasil.

A revisão apresentada sugere que, considerada a grande escala, diversos sistemas atmosféricos influenciam o Nordeste do Brasil e atuaram no primeiro semestre de 1985 provocando elevados totais pluviométricos naquele período.

CAPÍTULO 3

DADOS E METODOLOGIA

Neste capítulo são descritos o período de estudo, os dados utilizados e a metodologia usada nas análises desenvolvidas.

3.1. Definição do Período de Estudo

O período escolhido para este estudo abrange o primeiro semestre de 1985. A razão fundamental para essa escolha foi a disponibilidade das imagens obtidas pelo radar meteorológico banda-C de Petrolina.

3.2. Dados Utilizados

Os dados utilizados na realização deste trabalho são os seguintes: imagens de satélite, informações de superfície e de ar superior e imagens de radar.

As imagens utilizadas são as do satélite METEOSAT para o horário das 11:55 TMG, nos canais do visível, do infravermelho térmico e do vapor d'água. A cobertura espacial das imagens utilizadas é ilustrada na Figura 3.1.

As informações de superfície estão constituídas por:

(a) mapas de superfície das 12:00 TMG plotados e analisados pela DHN;

(b) mapas de superfície das 18:00 TMG fornecidos pelo IAE-CTA;

(c) totais diários de precipitação de postos pluviométricos pertencentes à rede da SUDENE;

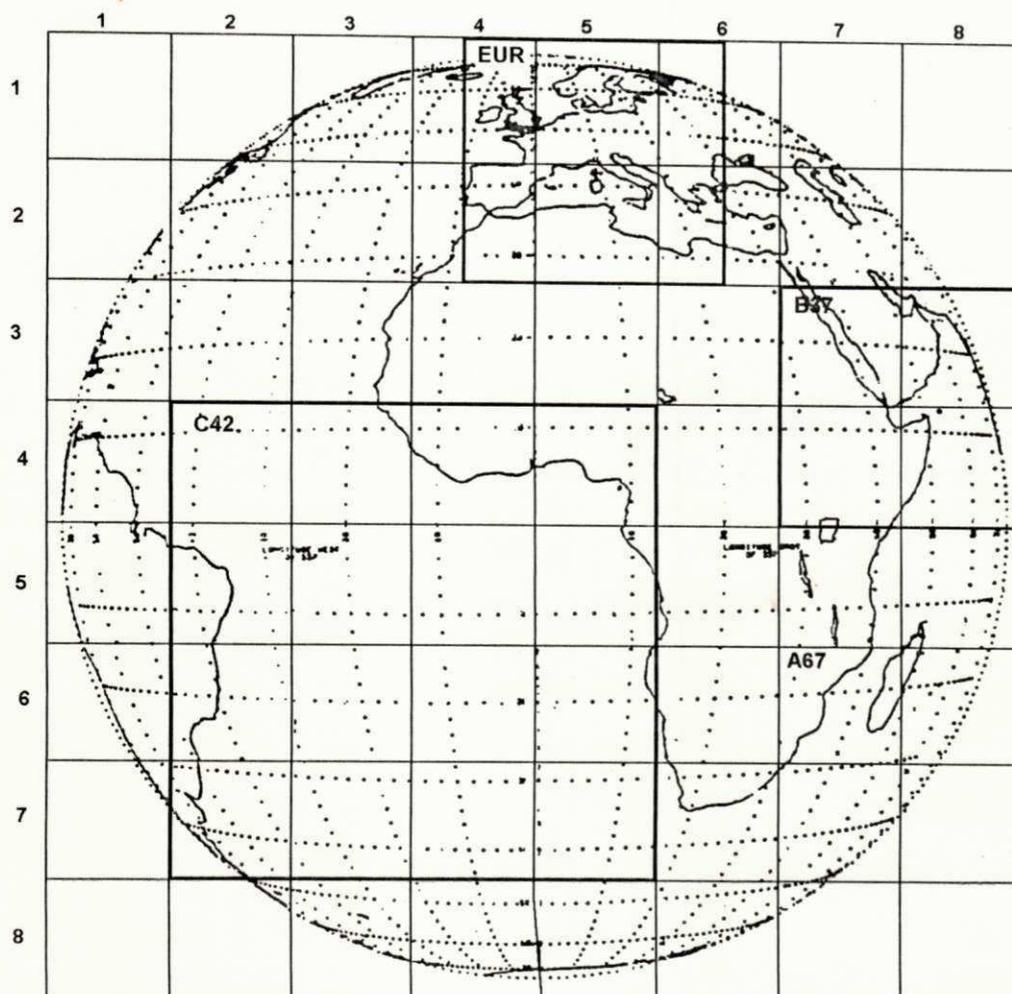


Fig. 3.1 - Área geográfica coberta pelas imagens do satélite meteorológico METEOSAT. (Fonte: EUMETSAT/ESA, 1990).

(d) dados das observações sinóticas de superfície das 12:00, 18:00 e 24:00 TMG realizadas na estação de Caravelas-BA ($17^{\circ}44'S$, $39^{\circ}15'W$), operada pelo INMET, e na estação de Petrolina-PE ($9^{\circ}24'S$, $40^{\circ}29'W$), operada pelo IAE-CTA.

Os dados de ar superior estão constituídos por sondagens de radiossonda-vento feitas a partir da sede do radar. Foram realizadas 83 sondagens das quais 84% no horário das 12:00 TMG e os restantes 16% no horário das 18:00 TMG.

O principal conjunto de dados utilizado neste trabalho é uma série de registros de ecos observados pelo radar meteorológico de Petrolina-PE. Grande parte de sua importância está no fato de serem as únicas observações via radar já feitas na região semi-árida do Nordeste. As observações foram feitas predominantemente no período diurno, entre 09:00 e 18:00 HL. Esses dados constituem um acervo de 964 imagens, com seqüências temporais de 881 PPI's (Plan Position Indicator) para várias elevações e 83 RHI's (Range, Height Indicator).

A Tabela 3.1 mostra o número total de dias com observações de radar (R), de ar superior (A) e de superfície (S) feitas pelo IAE-CTA no primeiro semestre de 1985 em Petrolina-PE. A tabela evidencia que o mês de fevereiro é o que apresenta maior deficiência de dados: seis dias com dados de altitude e quatro dias com dados de radar. Junho é outro mês que tem apenas quatro dias com dados de radar.

TABELA 3.1

RESUMO MENSAL DOS DADOS COLETADOS PELO IAE-CTA EM PETROLINA
NO PRIMEIRO SEMESTRE DE 1985

DIA	MÊS					
	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN
1	() () (S)	(A) () ()	() (R) (S)	(A) (R) (S)	() () (S)	() () (S)
2	() () (S)	() () ()	() () (S)	(A) (R) (S)	() (R) (S)	() () (S)
3	() () (S)	() () ()	() () (S)	() () (S)	() () (S)	(A) (R) (S)
4	() (R) (S)	(A) () ()	() (R) (S)	() () (S)	(A) () (S)	(A) (R) (S)
5	() () (S)	(A) () ()	() (R) (S)	() () (S)	() () (S)	(A) (R) (S)
6	() () (S)	() () ()	() (R) (S)	() () (S)	(A) (R) (S)	(A) (R) (S)
7	() (R) (S)	() () ()	(A) (R) (S)	() (R) (S)	(A) (R) (S)	() () (S)
8	() (R) (S)	() () ()	() (R) (S)	(A) (R) (S)	(A) () (S)	() () (S)
9	() (R) (S)	() () ()	() () (S)	(A) (R) (S)	(A) () (S)	() () (S)
10	() () (S)	() () ()	() () (S)	(A) (R) (S)	(A) () (S)	(A) () (S)
11	(A) () (S)	() () ()	() (R) (S)	(A) (R) (S)	() () (S)	(A) () (S)
12	() () (S)	() () ()	(A) () (S)	(A) (R) (S)	() () (S)	(A) () (S)
13	() () (S)	() () ()	() () (S)	() () (S)	(A) () (S)	(A) () (S)
14	() () (S)	() () ()	() () (S)	() () (S)	(A) () (S)	(A) () (S)
15	() () (S)	() () ()	() () (S)	(A) () (S)	(A) () (S)	() () (S)
16	() () (S)	() () ()	() () (S)	(A) () (S)	(A) () (S)	() () (S)
17	(A) () (S)	() () ()	() () (S)	(A) () (S)	(A) () (S)	(A) () (S)
18	(A) (R) (S)	() () ()	() () (S)	(A) () (S)	() () (S)	(A) () (S)
19	(A) () (S)	() () ()	() (R) (S)	(A) () (S)	() () (S)	(A) () (S)
20	() () (S)	() () ()	() (R) (S)	() () (S)	(A) () (S)	(A) () (S)
21	(A) (R) (S)	() () ()	(A) () (S)	() () (S)	(A) () (S)	(A) () (S)
22	(A) (R) (S)	() (R) ()	(A) (R) (S)	() () (S)	(A) () (S)	() () (S)
23	(A) (R) (S)	() () ()	() () (S)	(A) () (S)	(A) (R) (S)	() () (S)
24	(A) (R) (S)	() () ()	() () (S)	(A) (R) (S)	() (R) (S)	() () (S)
25	(A) () (S)	() () ()	(A) (R) (S)	(A) (R) (S)	() () (S)	(A) () (S)
26	() () (S)	(A) (R) ()	() () (S)	(A) (R) (S)	() () (S)	(A) () (S)
27	() () (S)	(A) (R) ()	(A) (R) (S)	() () (S)	(A) (R) (S)	() () (S)
28	(A) () (S)	(A) (R) ()	(A) (R) (S)	() () (S)	(A) (R) (S)	() () (S)
29	() (R) (S)	-	(A) (R) (S)	(A) (R) (S)	(A) (R) (S)	() () (S)
30	(A) () (S)	-	() () (S)	(A) () (S)	(A) (R) (S)	() () (S)
31	(A) () (S)	-	() () (S)	-	(A) (R) (S)	() () (S)

(A) indica existência de dados de ar superior

(R) indica existência de dados de radar

(S) indica existência de dados de superfície

() indica ausência de dados

3.2.1 Descrição do radar de Petrolina-PE

O radar meteorológico banda-C, pertencente ao IAE-CTA, foi adquirido pelo Ministério da Aeronáutica para o Projeto MODART (Modificação Artificial do Tempo), com o objetivo de auxiliar nas pesquisas sobre a natureza das nuvens precipitantes na região do Polígono das Secas.

O radar foi implantado no núcleo MODART de Petrolina-PE e teve seu período de operação limitado à estação chuvosa de 1985. As principais características desse equipamento são:

Frequência de Emissão:	5.625 MHz
Antena Parabólica:	3,66m de diâmetro
Largura do Feixe:	1°
Potência de Pico:	250 kW
Frequência de Repetição do Pulso:	2 μ s
Altura da Antena:	17m.

A unidade de processamento possui um painel de controle através do qual é possível definir o formato da imagem na tela do monitor. Esse controle permite selecionar:

(1) o modo PPI (Plan Position Indicator), imagem cobrindo toda a área de alcance do radar, ou RHI (Range, Height Indicator), imagem cuja distância radial é apresentada na horizontal e a altura, na vertical;

(2) uma escala de intensidade de chuva, entre duas versões, cada uma contendo seu próprio código de cor, incluídas no microprocessador. A versão normal é mostrada na Tabela 3.2 e a versão alternativa, indicada para regiões com precipitação muito intensa, é vista na Tabela 3.3.

(3) o fator (b) da relação $Z \times R$, o qual depende das características da precipitação observada, sendo Z o fator de refletividade do radar (dBZ) e R a intensidade de precipitação (mm/h);

(4) a resolução da imagem através da escolha de uma grade sendo que a opção de 256 X 256 pixels horizontais, equivale a células de aproximadamente 1mm X 1mm na tela e a opção de 128 X 128 pixels horizontais equivale a células de aproximadamente 2mm X 2mm na tela.

TABELA 3.2

VERSÃO NORMAL DE PRECIPITAÇÃO

INTENSIDADE DE PRECIPITAÇÃO (mm/h)		
COR	ESCALA BAIXA (1)	ESCALA ALTA (2)
Magenta	> 10	> 60
Amarelo	5 - 10	20 - 60
Vermelho	2 - 5	6 - 20
Ciano	1 - 2	2 - 6
Azul	0,4 - 1	0,6 - 2
Verde	0,2 - 0,4	0,2 - 0,6
Preto	< 0,2	< 0,2
Branco	Alfanuméricos	Alfanuméricos

TABELA 3.3

VERSÃO ALTA DE PRECIPITAÇÃO

INTENSIDADE DE PRECIPITAÇÃO (mm/h)		
COR	ESCALA BAIXA (1)	ESCALA ALTA (2)
Magenta	> 10	> 180
Amarelo	5 - 10	60 - 180
Vermelho	2 - 5	18 - 60
Ciano	1 - 2	6 - 18
Azul	0,4 - 1	1,8 - 6
Verde	0,2 - 0,4	0,6 - 1,8
Preto	< 0,2	< 0,6
Branco	Alfanuméricos	Alfanuméricos

3.2.1.1 Seleção dos parâmetros A e b da relação Z X R

Uma das dificuldades mais comuns encontradas nas estimativas de precipitação via radar é a determinação dos parâmetros **A** e **b** da relação **Z x R**, em virtude da grande variabilidade dessas constantes em função da localização geográfica e do tipo de precipitação observada.

Relações do tipo exponencial como $Z = A \times R^b$ têm sido adotadas na prática e diversos métodos empíricos são utilizados na determinação dos parâmetros **A** e **b**. Entretanto, estudos demonstram que resultados satisfatórios podem ser obtidos usando a relação de Marshall e Palmer (M-P) (1948), $Z = 200R^{1,6}$, para a maioria dos tipos de chuva. Massambani e Rodriguez (1988), analisando a evolução cíclica dos parâmetros **A** e **b** da relação **Z x R** durante 3 eventos convectivos observados no verão de 1985 em Baurú-SP,

verificaram que a relação (M-P) constitui, em média, uma forma adequada para a obtenção do campo de precipitação, mesmo no caso de sistemas convectivos.

No caso do radar de Petrolina-PE, foi utilizada a relação (M-P), principalmente por não existirem registros suficientes para determinar uma relação $Z \times R$ específica para a região.

3.2.1.2 Resolução espacial das imagens do radar

A resolução espacial das imagens digitais pode ser especificada para dimensões de 0,5; 1,0; 2,0; 5,0 e 10 km. Por exemplo, no caso de uma grade de 256 X 256 células, cada célula representa a taxa de precipitação média em áreas quadráticas de 0,5; 1,0; 2,0 ou 5,0 km. O comprimento de 10 km pode ser considerado somente no caso da escolha da grade de 128 X 128 células. O tamanho de célula escolhido define a área amostrada. No caso específico do RHI, o tamanho de célula é fixado em 0,5 km. Esse ajuste é automático.

3.2.2 Dados de precipitação via radar e suas limitações

A série de registros obtida com o radar de Petrolina-PE apresenta limitações fundamentais que contribuíram para a redução do número de imagens disponíveis para análise neste trabalho.

Além da operação do radar não ter sido feita em intervalos regulares de tempo, o sistema não possuía uma unidade adequada de armazenamento dos

dados, de forma que a coleta foi feita através de diapositivos extraídos diretamente da tela do monitor. O processamento dessas imagens foi realizado por meio de um exaustivo trabalho de retroprojeção, utilizando um equipamento construído na Divisão de Ciências Atmosféricas do IAE-CTA. As imagens foram projetadas sobre planilhas e os contornos das várias intensidades de precipitação copiados e identificados por um código associado a cada cor (Correia, 1989). Um exemplo do resultado final é mostrado na Figura 3.2.

No processo de redução dos dados do radar de Petrolina-PE, Correia observou que as imagens correspondentes ao início do período de operação do equipamento apresentavam distorções, indicando que a câmara fotográfica usada para obter os diapositivos não tinha uma posição fixa em relação ao monitor. Essa imprecisão ocasionou contração ou expansão, de forma desigual, em algumas imagens, dificultando principalmente o posicionamento correto dos ecos.

Um outro fator que reduziu consideravelmente o tamanho da amostra foi a existência de imagens expandidas mostrando setores variados da área de cobertura do radar, muitas vezes sem legenda de identificação. É importante ressaltar que, apesar de todas as limitações, foi possível selecionar 964 imagens para análise.

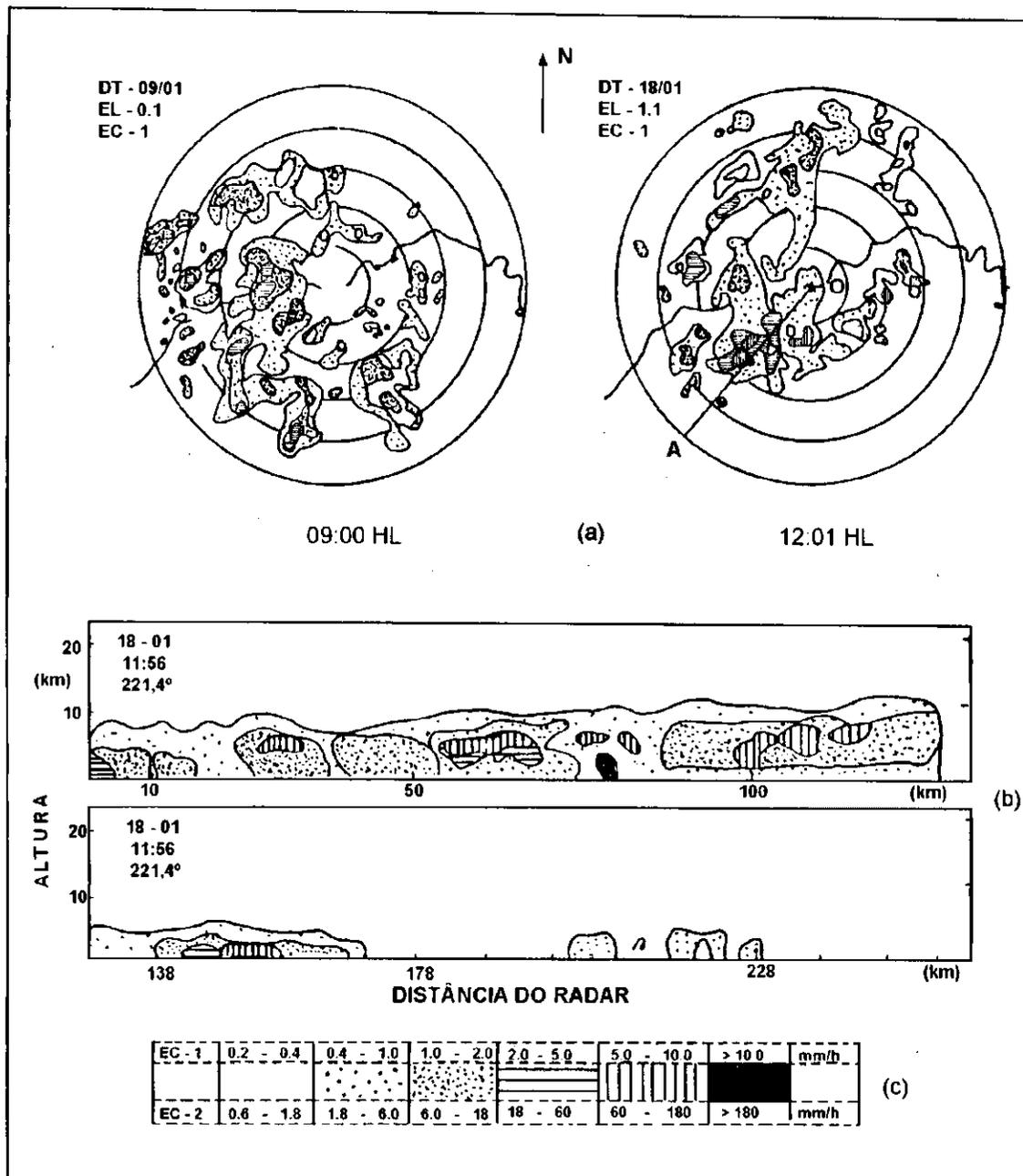


Fig. 3.2 - PPI's obtidos pelo radar meteorológico de Petrolina para os dias 09 e 18 de janeiro de 1985 são vistos em (a). A distância entre os círculos concêntricos ao local do radar é de 50 km. O seguimento de reta OA corresponde ao azimute de $221,4^\circ$ ao longo do qual foi feito o RHI mostrado em (b). A convenção utilizada para a taxa de precipitação é vista em (c). A hora local (H.L), a elevação da antena (EL) e a escala de chuva (EC) são indicadas nos PPI's e RHI. A seta indica o Norte Verdadeiro (N) (Fonte: Correia, 1989).

3.2.3 Dados de precipitação via pluviômetros e suas limitações

Os dados de precipitação via pluviômetros utilizados neste trabalho foram coletados na rede gerenciada pela Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste (SUDENE). São totais diários de precipitação referentes a 520 postos distribuídos dentro da área de alcance do radar (raio de 400 km). A coleta de dados na rede é feita às 12:00 TMG de cada dia, correspondendo ao acumulado das últimas 24 horas. Foram utilizados todos os postos nos quais não houve interrupção da coleta durante o período de estudo.

A distribuição espacial dos postos na área em estudo é mostrada na Figura 3.3. É evidente que ela não é homogênea, já que de um total de 520 postos selecionados, 45% estão no quadrante nordeste e 21% no quadrante sudeste, enquanto que os quadrantes sudoeste e noroeste tem 17% cada.

3.3. Metodologia

Esta seção está subdividida em cinco partes. Na primeira são discutidos os critérios e métodos utilizados na classificação e tratamento estatístico dos tipos e padrões de ecos obtidos pelo radar meteorológico banda-C de Petrolina-PE. Na segunda são apresentados os métodos e critérios utilizados na determinação das dimensões horizontal e vertical dos ecos. A terceira aborda a definição e método de obtenção da energia máxima da parcela à superfície. A quarta e quinta partes tratam, respectivamente, da estabilidade vertical e dos métodos utilizados na

identificação dos sistemas atmosféricos de grande escala atuantes no Nordeste no período de estudo.

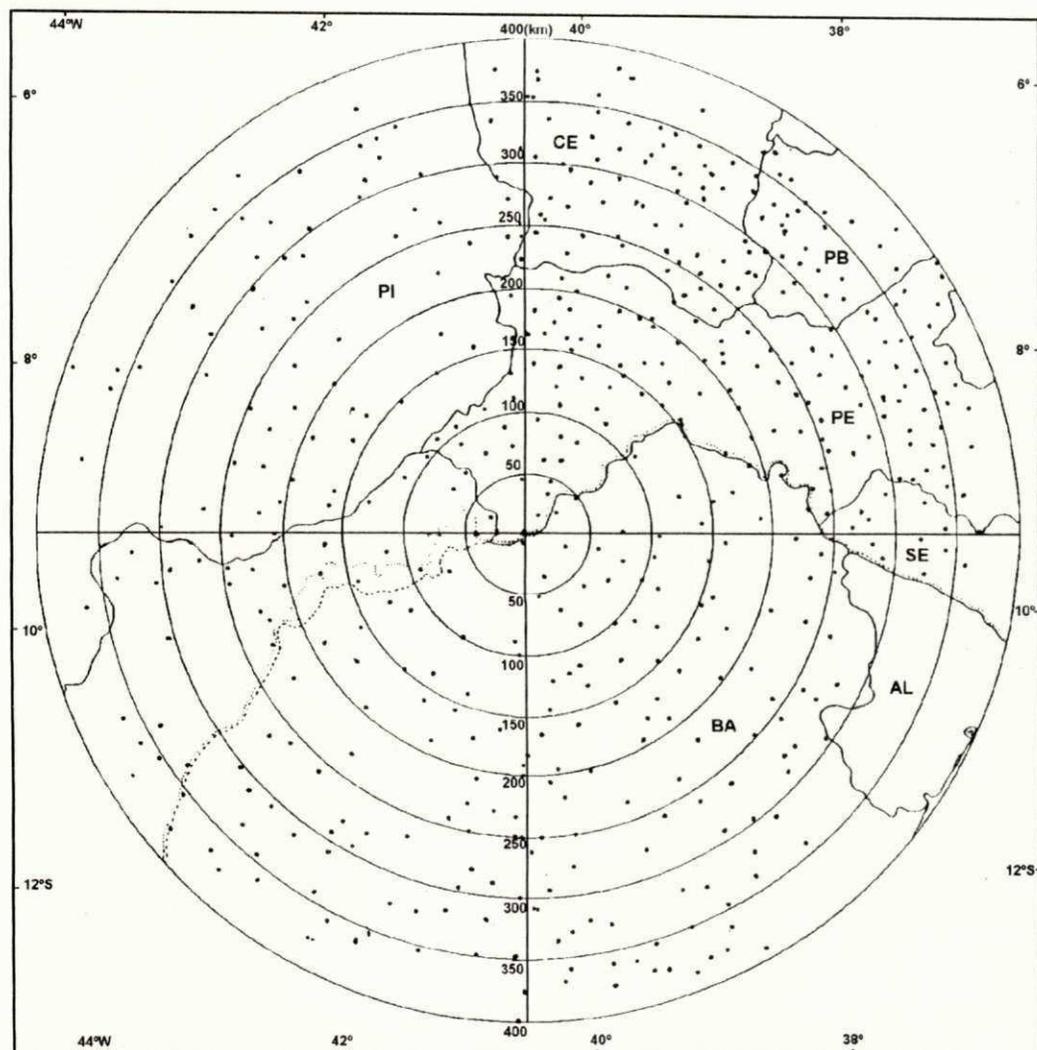


Fig. 3.3 - Distribuição espacial dos postos pluviométricos localizados na área de cobertura do radar. A distância entre os círculos concêntricos ao local do radar é de 50 km. Os estados são identificados por suas siglas.

3.3.1. Classificação dos tipos e padrões dos ecos do radar de Petrolina-PE

A classificação dos sistemas de precipitação detectados pelo radar meteorológico de Petrolina-PE foi baseada numa análise subjetiva dos ecos observados nos modos PPI e RHI. Assim, a classificação não levou em conta quaisquer características dinâmicas dos sistemas precipitantes sendo considerados apenas os aspectos estruturais de quantidade, distribuição, duração e arranjo dos ecos.

A grande diversidade no formato das imagens que constituem a série de registros do radar de Petrolina exigiu a seleção das imagens utilizadas neste trabalho. O critério de seleção utilizado foi o de escolher o tipo correspondente ao maior número de planilhas disponíveis. As características que definem o formato escolhido são: escala de chuva 1, elevação da antena 0,1° e tamanho de célula 2 (resolução). Foram analisadas 674 planilhas, sendo 588 no modo PPI e 86 no modo RHI. A primeira etapa da análise consistiu em identificar os diferentes tipos e padrões de ecos comumente observados no período de estudo e fazer uma estatística dos mesmos.

A classificação dos ecos foi feita com base em dois critérios. O primeiro, que se baseia no gradiente horizontal de refletividade observado nas imagens PPI e RHI, permitiu identificar os seguintes tipos de ecos: convectivos (Ec), estratiformes (Est) e estratoconvectivos (Estc).

Os ecos convectivos (Ec) apresentam forte gradiente horizontal de refletividade, tem dimensões horizontais bastante variáveis e estão associados a aguaceiros isolados. Os ecos que apresentam gradiente horizontal de refletividade fraco, com precipitação cobrindo extensas áreas num longo período de tempo, são classificados como ecos estratiformes (Est). Uma classificação intermediária foi adotada para o caso de células de precipitação intensa inseridas em regiões de chuva estratiforme: ecos estratoconvectivos (Estc).

O segundo critério adotado está baseado na organização aparente dos ecos nos PPI's. Nesse caso, não foi considerada nenhuma característica dinâmica, sendo observado apenas o aspecto da distribuição horizontal dos ecos. Foram identificados os seguintes padrões: ecos dispersos (Ed), zonas de ecos (Ze), linhas de ecos (Le), faixas de ecos (Fe) e bandas de ecos (Be) (Fig. 3.4).

Os ecos dispersos (Ed) são de dimensões horizontal e vertical variáveis e tem como característica não apresentar nenhum grau de organização aparente, podendo estar distribuídos sobre parte ou mesmo toda a área de alcance do radar (Fig. 3.4A). As zonas de ecos (Ze) tem dimensão horizontal variável e se caracterizam por constituir um aglomerado de ecos com pouca ou nenhuma organização aparente. A diferenciação entre as Ze e os Ed é feita considerando a distância entre os ecos em relação a sua distribuição espacial. Assim, as Ze são identificadas como um grupo de ecos distribuídos numa pequena região, sendo que a distância entre ecos adjacentes é menor do que a distância que separa os demais ecos que se encontram em outras partes da área de cobertura do radar (Fig. 3.4B). Os ecos que se apresentam organizados de forma quase linear são

classificados como linhas de ecos (Le), faixas de ecos (Fe) e bandas de ecos (Be). A diferenciação entre elas é feita através das dimensões (comprimento e largura). As Le, formadas por ecos isolados alinhados ou núcleos intensos alinhados dentro de uma única célula, tem largura média de 17 km e comprimento variando entre 50 e 100 km (Figs. 3.4C). As Fe, formadas por várias Le ou por uma única célula de dimensões superiores as das Le, tem largura média de 30 km e comprimento variando entre 70 e 150 km (Fig. 3.4D). As Be apresentam-se como áreas extensas de precipitação de contorno externo único, com largura média de 80 km e comprimento variando entre 120 e 300 km (Fig. 3.4E).

O esquema de identificação dos padrões de ecos apresentado na Figura 3.4 é representado na Figura 3.5 utilizando exemplos de PPI's obtidos pelo radar de Petrolina-PE. O PPI selecionado para representar os ecos dispersos (Ed) foi obtido às 15:05 HL do dia 04 de maio (Fig. 3.5A). Ele apresenta ecos isolados, sem nenhum grau de organização aparente, distribuídos em toda a área de cobertura do radar. Um aglomerado de ecos localizado no quadrante sudeste da área de cobertura do radar caracteriza uma zona de ecos (Ze) observada no PPI obtido às 14:43 HL do dia 22 de março (Fig. 3.5B). O PPI obtido às 15:24 HL do dia 30 de maio mostra uma linha de ecos (Le) localizada no quadrante sudeste constituída por núcleos intensos alinhados dentro de uma única célula orientada na direção noroeste-sudeste (Fig. 3.5C). O PPI obtido às 17:30 HL do dia 04 de janeiro ilustra no quadrante sudoeste uma faixa de ecos (Fe), orientada de sudoeste-nordeste (Fig. 3.5D). O PPI obtido às 08:22 HL do dia 06 de junho (Fig. 3.5E) apresenta duas bandas de ecos (Be), orientadas de noroeste-sudeste, constituídas por núcleos intensos inseridos em áreas de chuva estratiforme.

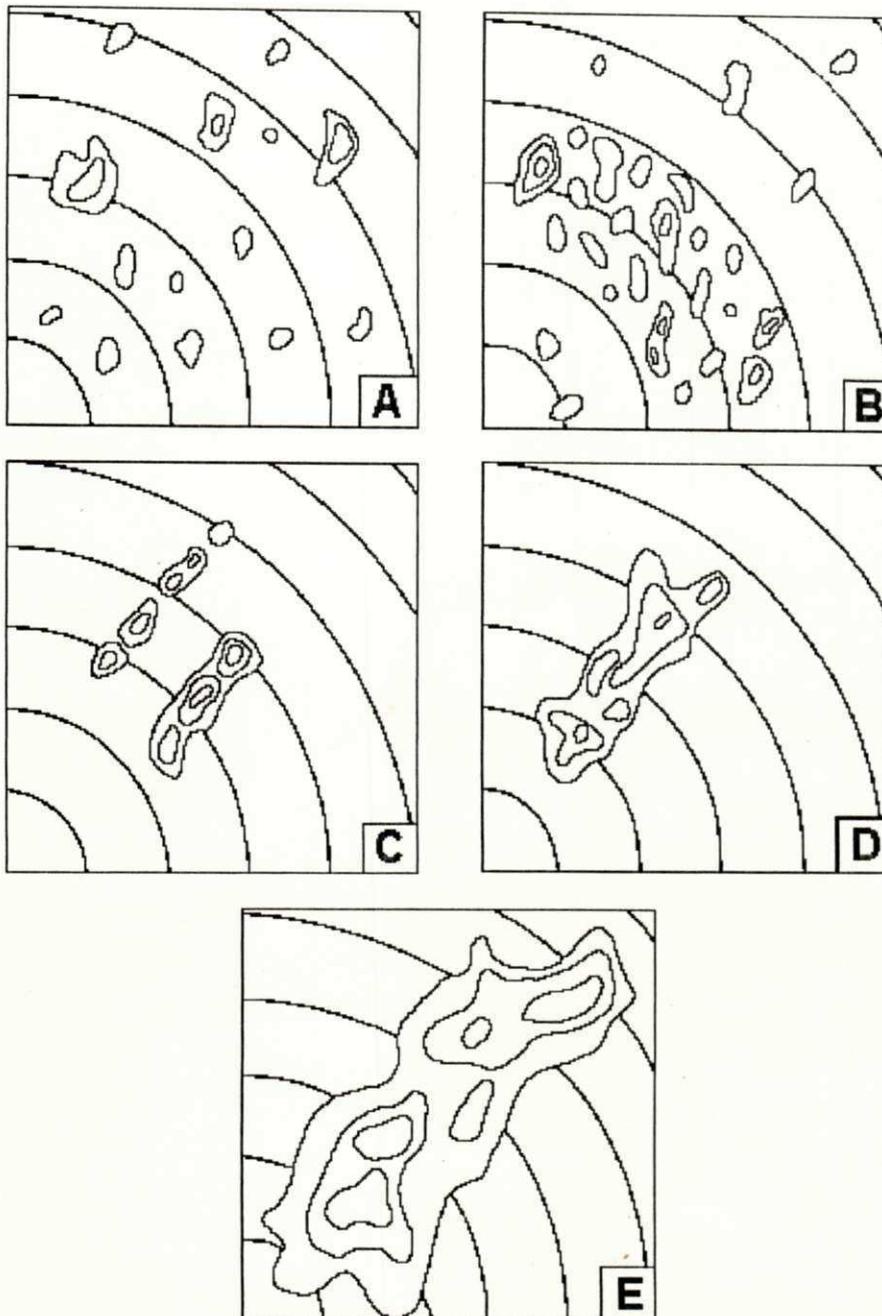
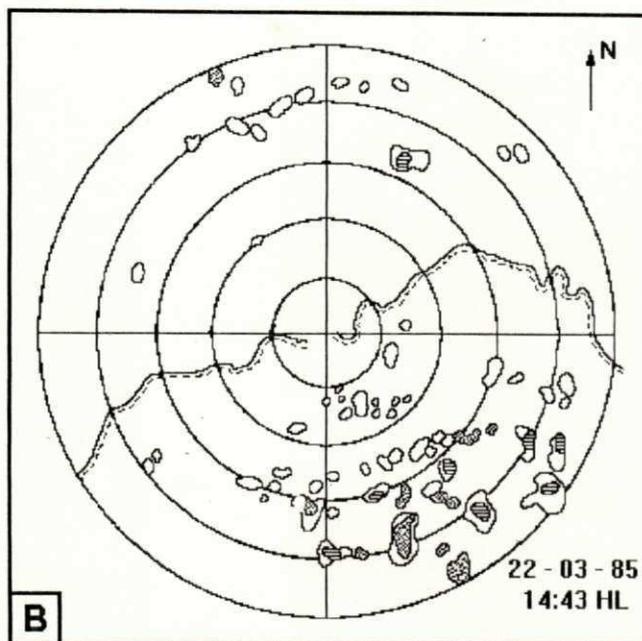
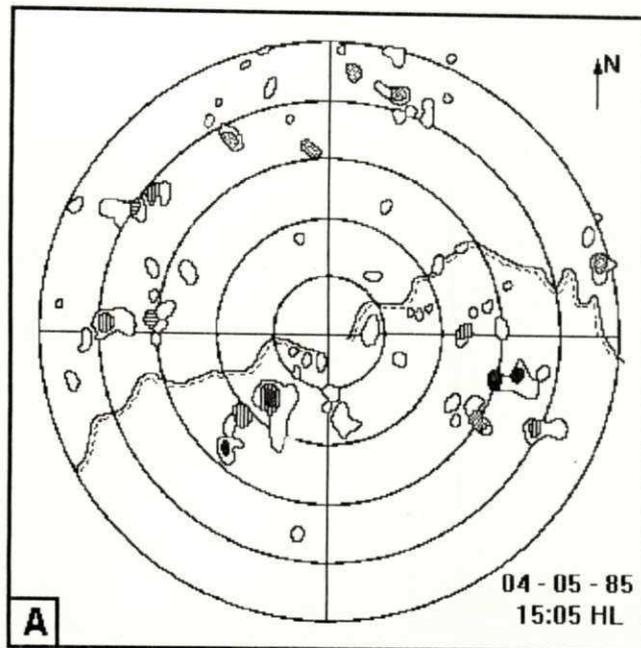


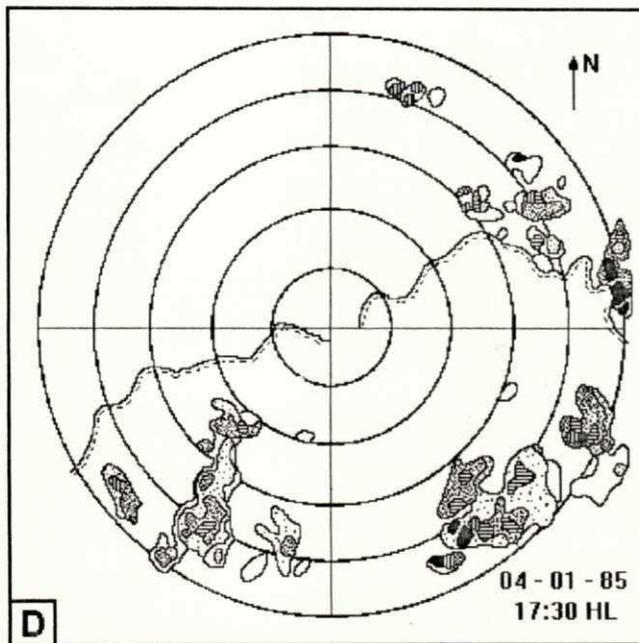
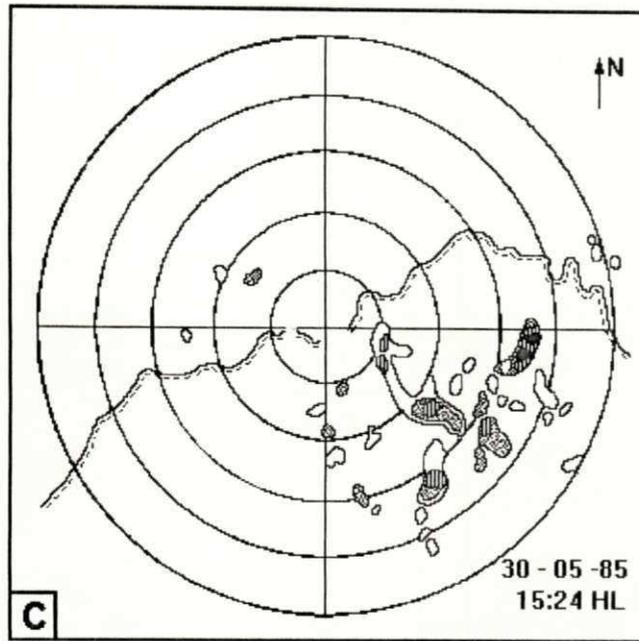
Fig. 3.4 - Representação esquemática dos padrões de ecos observados pelo radar de Petrolina-PE: (A) ecos dispersos, (B) zonas de ecos, (C) linhas de ecos, (D) faixas de ecos e (E) bandas de ecos. Os ecos são mostrados no quadrante nordeste da área de cobertura do radar apenas para ilustração. Os semicírculos estão afastados entre si de 50 km. O semicírculo externo corresponde ao raio de 350 km.



EC - 1	0.2 - 0.4	0.4 - 1.0	1.0 - 2.0	2.0 - 5.0	5.0 - 10.0	> 10.0	mm/h
EC - 2	0.6 - 1.8	1.8 - 6.0	6.0 - 18	18 - 60	60 - 180	> 180	mm/h

(F)

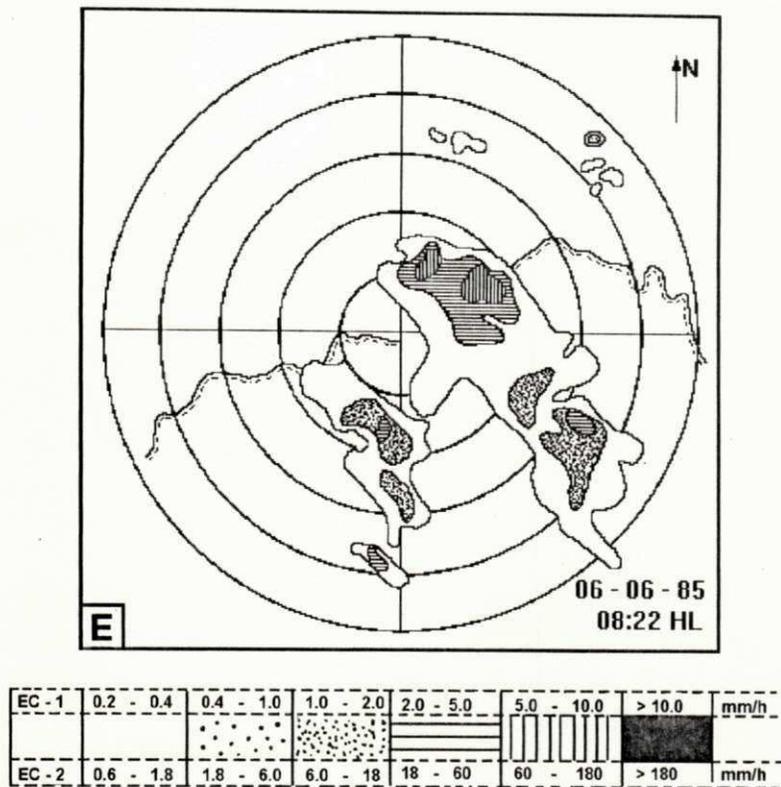
Fig. 3.5 - Representação dos padrões de ecos observados pelo radar de Petrolina-PE: (A) ecos dispersos (E_d), (B) zonas de ecos (Z_e), (C) linhas de ecos (L_e), (D) faixas de ecos (F_e) e (E) bandas de ecos (B_e). Os círculos concêntricos ao local do radar estão afastados entre si de 50 km. O círculo externo corresponde ao raio de 250 km. A convenção utilizada para a taxa de precipitação (EC) é vista em (F). A seta indica o norte verdadeiro (N). Os PPI's foram obtidos com escala de chuva 1.



EC - 1	0.2 - 0.4	0.4 - 1.0	1.0 - 2.0	2.0 - 5.0	5.0 - 10.0	> 10.0	mm/h
EC - 2	0.6 - 1.8	1.8 - 6.0	6.0 - 18	18 - 60	60 - 180	> 180	mm/h

(F)

Fig. 3.5 - continuação



(F)

Fig. 3.5 - conclusão.

Considerando que o tamanho das amostras diárias e mensais dos ecos varia enormemente em função da irregularidade no intervalo de observação entre um registro e outro, foram aplicados alguns métodos de filtragem aos dados a fim de que a população disponível fosse representativa do período analisado. Essa etapa da análise dos ecos consistiu na obtenção de relativos do número de ecos.

O número relativo de ocorrências de ecos (**NRO**) foi determinado pela fórmula

$$\text{NRO} = \frac{\text{TE}}{\text{T}(y)}$$

onde

TE é o total de ecos observados,

y representa PPI ou hora,

T(y) é o total de PPI's ou de horas.

A existência de uma área preferencial de localização de cada tipo ou padrão de ecos foi investigada considerando a área de cobertura do radar dividida nos quadrantes nordeste (NE), sudeste (SE), sudoeste (SW) e noroeste (NW). Outro aspecto também investigado foi o de uma época preferencial para a ocorrência de cada tipo ou padrão de ecos. O número percentual de ocorrências de cada tipo ou padrão de ecos (**NPO**) foi obtido separadamente, para cada mês e/ou quadrante, utilizando a seguinte fórmula

$$\text{NPO}(\mathbf{x}) = \frac{\text{NRO}_i(\mathbf{x})}{\text{NRO}_p(\mathbf{x})} \times 100$$

onde

x representa o tipo ou padrão de ecos,

i representa mês e/ou quadrante,

p representa o período total,

NRO(x) é o número relativo de ocorrências de um determinado tipo ou padrão de ecos, dado por:

$$\text{NRO}(\mathbf{x}) = \frac{\text{TE}(\mathbf{x})}{\text{T}(\mathbf{y})}$$

onde

$TE(x)$ é o total de ecos de um determinado tipo ou padrão,

$T(y)$ é o total de PPI's ou de horas.

3.3.2 Dimensões horizontal e vertical dos ecos do radar de Petrolina-PE

O método usado na determinação das dimensões horizontal e vertical dos ecos de Petrolina foi o mesmo de Correia (1989). As áreas horizontais foram obtidas utilizando uma grade em transparência, constituída por quadrículas de 0,5cm X 0,5cm, cada quadrícula correspondendo a uma área de 100 km². Posteriormente, conhecido o número de quadrículas equivalente à área coberta por cada eco, foram feitas as transformações de escala e obtidos os valores correspondentes.

A classificação dos ecos foi feita de acordo com a área observada em cada PPI. Foram definidas 10 classes:

	$A_1 \leq 10^2 \text{ km}^2$
10^2 km^2	$< A_2 \leq 4 \times 10^2 \text{ km}^2$
$4 \times 10^2 \text{ km}^2$	$< A_3 \leq 8 \times 10^2 \text{ km}^2$
$8 \times 10^2 \text{ km}^2$	$< A_4 \leq 12 \times 10^2 \text{ km}^2$
$12 \times 10^2 \text{ km}^2$	$< A_5 \leq 16 \times 10^2 \text{ km}^2$
$16 \times 10^2 \text{ km}^2$	$< A_6 \leq 20 \times 10^2 \text{ km}^2$
$20 \times 10^2 \text{ km}^2$	$< A_7 \leq 24 \times 10^2 \text{ km}^2$
$24 \times 10^2 \text{ km}^2$	$< A_8 \leq 48 \times 10^2 \text{ km}^2$
$48 \times 10^2 \text{ km}^2$	$< A_9 \leq 96 \times 10^2 \text{ km}^2$
$96 \times 10^2 \text{ km}^2$	$< A_{10} \leq 144 \times 10^2 \text{ km}^2$

Os topos dos ecos foram determinados através dos RHI's obtidos no período de observação. Foram utilizadas duas grandezas relacionadas aos topos dos ecos: (a) a altura máxima, definida como sendo a altura máxima atingida pelos ecos no horário da observação e (b) a altura média, definida como sendo a média aritmética dos topos máximos de cada dia.

3.3.3 Energia máxima da parcela à superfície (Emáx)

Usando a metodologia desenvolvida por Zawadzki e Ro (1978) e modificada por Correia (1989), a importância relativa das condições do meio ambiente na precipitação de Petrolina foi avaliada e estimado o grau de dependência entre alguns parâmetros de mesoescala e a convecção.

O campo de precipitação é diagnosticado de duas formas, quais sejam: totais diários de precipitação de postos pluviométricos pertencentes a SUDENE e ecos observados pelo radar de Petrolina-PE. O parâmetro de mesoescala utilizado neste trabalho é a energia máxima da parcela à superfície (Emáx).

O valor desse parâmetro indica a possibilidade de haver ou não convecção em função das condições termodinâmicas em superfície ou, em outras palavras, o método permite avaliar a quantidade de energia disponível para formação de nuvens convectivas na região.

3.3.3.1 Cálculo de $E_{máx}$

A obtenção da energia da parcela à superfície foi feita pelo método gráfico. Ele era o método mais prático tendo em vista que os dados de sondagem já se encontravam plotados em tefigramas.

Na obtenção desse parâmetro, a sondagem de Petrolina foi considerada como representativa da área de um círculo de raio igual a 250 km. A energia máxima da parcela à superfície foi obtida a partir do valor mais alto da temperatura potencial do bulbo úmido (θ_w), determinado com base nos dados diários de superfície. A área positiva (desde o nível de condensação por levantamento até a interseção da pseudoadiabática com a sondagem) foi calculada para a parcela definida por esse ponto no tefigrama. O procedimento usado é ilustrado na Figura 3.6.

A quantificação da área positiva e, portanto, do valor da energia convectiva, foi feita com um planímetro devidamente calibrado. Posteriormente, com base na escala de energia apresentada no tefigrama, foram feitas as devidas transformações de escala para obtenção dos valores da energia.

3.3.4 Análise da estabilidade vertical

O conjunto de dados de altitude gerado pelas sondagens efetuadas na sede do rada de Petrolina-PE permite caracterizar a estrutura termodinâmica do

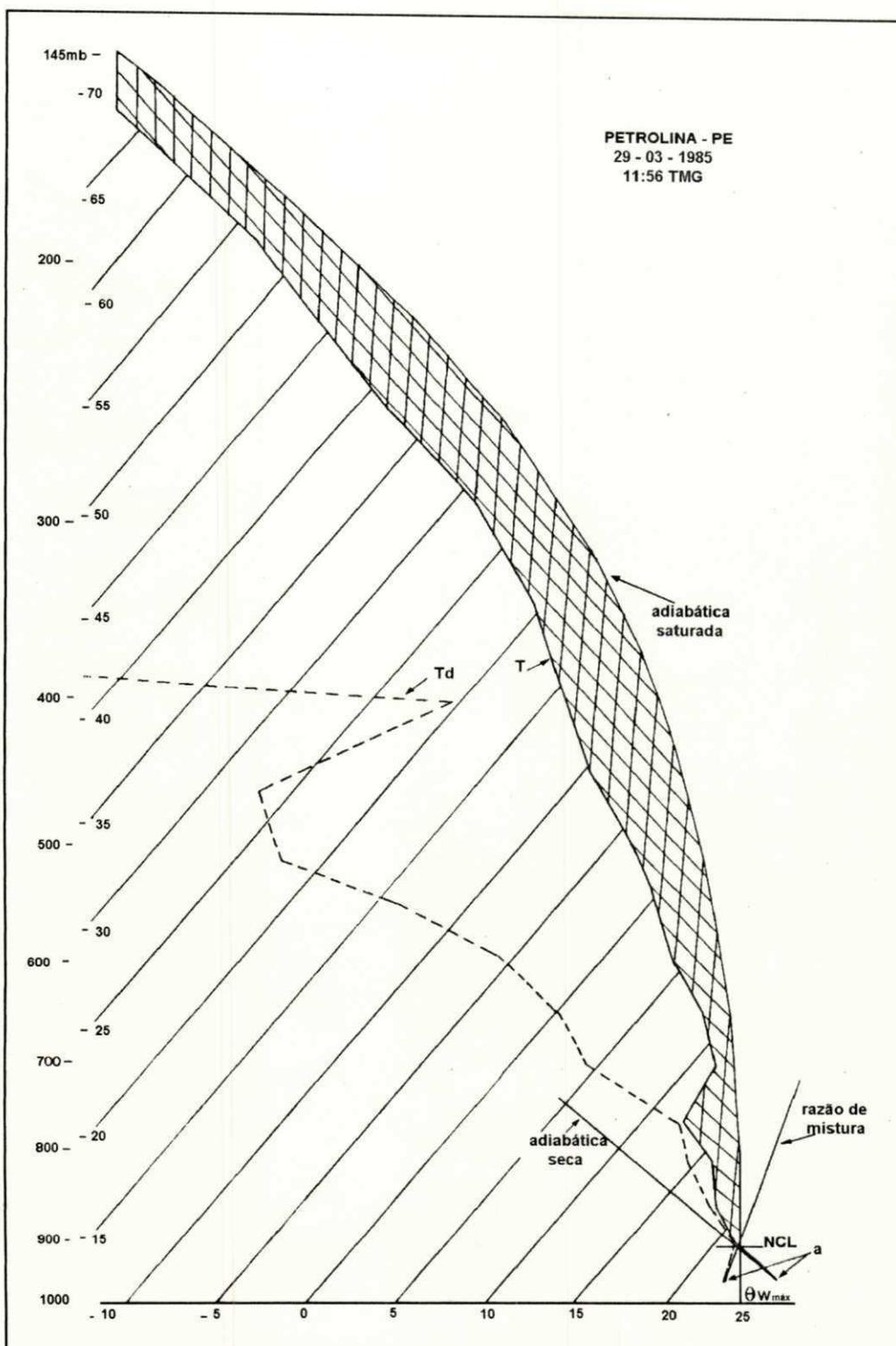


Fig 3.6 - Radiossondagem do dia 29 de março de 1985, realizada às 11:56 TMG, plotada em um tefigrama. A temperatura (T) e a temperatura do ponto de orvalho (T_d) à superfície são indicadas pela letra (a). O valor máximo da temperatura potencial do bulbo úmido ($(\theta_w)_{max}$) utilizado no cálculo da energia máxima da parcela à superfície (E_{max}) também é indicada na figura. A área hachurada corresponde a E_{max} .

ambiente, no período em estudo. A definição das condições reinantes numa determinada situação atmosférica requer a consideração de vários parâmetros obtidos a partir dos dados coletados em superfície e em ar superior.

Não é suficiente usar apenas as características de uma parcela de ar à superfície para prever o desenvolvimento da convecção. Como o comportamento das parcelas de ar submetidas a deslocamentos verticais é determinado basicamente pela distribuição vertical da pressão (P), umidade relativa (U), temperatura (T) e vento (V), quantidades termodinâmicas calculadas a partir dessas variáveis permitem avaliar a estabilidade atmosférica e definir situações favoráveis ou não ao desenvolvimento de sistemas convectivos intensos. Assim, a ocorrência de inversões térmicas de subsidência pode criar condições propícias ao desenvolvimento de sistemas convectivos severos ou inibir completamente o crescimento das nuvens, dependendo do comportamento de outras variáveis termodinâmicas ou da presença de forçantes de natureza dinâmica ou mecânica.

Situações atmosféricas com umidade relativa alta nos baixos níveis, associadas a uma estrutura térmica condicionalmente instável, caracterizam um ambiente potencialmente favorável ao desenvolvimento de tempestades severas, sendo necessário apenas um mecanismo de levantamento do ar instável localizado próximo à superfície.

Neste trabalho, perfis verticais da temperatura potencial (θ), temperatura potencial equivalente (θ_e) e temperatura potencial equivalente de saturação (θ_{es}) são usados para analisar o grau da estabilidade da atmosfera e verificar se as

condições ambientais são favoráveis, ou não, ao desenvolvimento de sistemas convectivos intensos.

O gradiente vertical da temperatura potencial equivalente (θ_e) é um indicativo da instabilidade convectiva ou potencial de uma camada da atmosfera da seguinte forma:

(a) se $\frac{\partial \theta_e}{\partial z} < 0$, a camada é convectivamente instável,

(b) se $\frac{\partial \theta_e}{\partial z} = 0$, a camada é convectivamente neutra,

(c) se $\frac{\partial \theta_e}{\partial z} > 0$, a camada é convectivamente estável.

Esses parâmetros termodinâmicos foram calculados segundo as equações propostas por Betts e Dugan (1973) e modificadas por Bolton (1980), dadas abaixo:

$$\theta = T_k \left(\frac{1000}{P} \right)^{0,2854(1 - 0,28 \times 10^{-3} r)} \quad \text{é a temperatura potencial (K),}$$

$$\theta_e = \theta \times \exp \left[\left(\frac{3,376}{T_L} - 0,00254 \right) \times r \left(1 + 0,81 \times 10^{-3} r \right) \right] \quad \text{é a temperatura}$$

potencial equivalente (K),

$\theta_{es} = \theta \times \exp\left(\frac{2,64r_s}{T_k}\right)$ é a temperatura potencial equivalente de saturação (K),

onde,

$T_k = T + 273,15$ é a temperatura absoluta (K),

T é a temperatura do ar (°C),

P é a pressão atmosférica (mb),

$r = \frac{0,622 \times e}{(P - e)}$ é a razão de mistura (g/kg),

$T_L = \frac{1}{\frac{1}{T_k} - \frac{\ln(UR/100)}{2840}} + 55$ é a temperatura no nível de condensação por

levantamento (NCL) (K),

UR é a umidade relativa do ar (%),

$e = \frac{UR \times e_s}{100}$ é a pressão de vapor (mb),

$e_s(T) = 6,11 \times \exp\left[\frac{(17,67T)}{T + 243,5}\right]$ é a pressão de vapor de saturação (mb),

$r_s = \frac{0,622 \times e_s}{(P - e_s)}$ é a razão de mistura de saturação (g/kg).

3.3.5 Identificação de sistemas atmosféricos de grande escala atuantes no Nordeste do Brasil

Uma das características mais importantes da Região Nordeste do Brasil é a diversidade de fenômenos atmosféricos que a influenciam. Uma consequência disso é que todo trabalho que envolva o diagnóstico de aspectos sinótico-dinâmicos da atmosfera na Região requer a utilização, dentre outros, de dados de superfície e altitude que permitam uma cobertura em escala sinótica.

No conjunto de dados utilizados nesta pesquisa os únicos dados de altitude disponíveis são aqueles coletados na estação de Petrolina, operada pelo IAE-CTA. Dessa forma, não foi possível identificar e diagnosticar de forma completa, sob o ponto de vista quantitativo, os diferentes sistemas que atuaram no primeiro semestre de 1985. Por outro lado, as imagens diárias do satélite METEOSAT, disponíveis nos três canais, permitiram a detecção de sistemas cuja identificação seria inviável sem dados de altitude e imagens de satélites como, por exemplo, os vórtices ciclônicos da alta troposfera.

As imagens de satélite foram, em realidade, os dados fundamentais na identificação da zona de convergência intertropical (ZCIT) e de vórtices ciclônicos da alta troposfera. No caso da ZCIT, as cartas de superfície também auxiliaram, embora com importância menor.

Os sistemas de origem frontal foram aqueles detectados de forma mais completa devido às mudanças por eles provocadas nas variáveis meteorológicas, tanto em superfície quanto em altitude.

A primeira fase da análise de dados, realizada com o objetivo específico de detectar a influência de sistemas de origem frontal na área de cobertura do radar, seguiu uma variante da metodologia utilizada por Kousky (1979). Inicialmente, foi verificada a ocorrência de passagens frontais em Caravelas-BA. Uma passagem frontal era detectada desde que fossem satisfeitos os seguintes requisitos:

(1º) queda na temperatura do bulbo úmido média diária de, pelo menos, 2°C;

(2º) mudança na direção do vento de forma a apresentar componente de sul observada em, pelo menos, três horários sinóticos consecutivos;

(3º) continuidade com áreas ao sul de Caravelas, verificada através dos mapas de superfície da DHN.

Kousky denominou passagens frontais frias àquelas que satisfizessem os três requisitos e mudanças no vento àquelas que obedecessem apenas aos dois últimos. Neste trabalho, o primeiro caso é identificado como passagem frontal do Tipo I e o segundo como passagem frontal do Tipo II.

A segunda fase da análise teve como objetivo verificar se os sistemas frontais que afetaram Caravelas também influenciaram Petrolina. Foram utilizados os valores médios diários da pressão e da temperatura do bulbo úmido a fim de filtrar as flutuações que ocorrem em um período de 24 horas.

Inicialmente, foi feita uma simples comparação visual, mês a mês, entre as séries temporais da pressão média diária de Caravelas e Petrolina, na suposição de que deveria haver uma correspondência entre as variações existentes nas duas séries, caso as localidades sofressem a atuação dos mesmos sistemas de pressão. O mesmo procedimento foi usado para as séries de temperatura do bulbo úmido média diária, já que essa seria a variável que permitiria detectar a penetração de massas de ar. A seguir, foi feita uma análise de correlação linear entre os dois pares de séries a fim de quantificar a relação existente entre elas. Os coeficientes de correlação foram obtidos ao nível de significância de 95%.

Valores de precipitação total diária e valores médios diários das componentes zonal e meridional do vento à superfície nas duas localidades também foram analisados para cada mês. Perfis verticais extraídos das radiossondagens realizadas em Petrolina foram utilizados para verificar a existência de mudanças nos parâmetros meteorológicos em altitude.

CAPÍTULO 4

DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Este capítulo apresenta discussões e resultados de uma série de análises estatísticas dos ecos do radar de Petrolina, bem como de sua relação com os sistemas meteorológicos atuantes na região. Apresenta também uma discussão acerca da natureza do campo de precipitação via radar, em função da distribuição e arranjo dos ecos e de sua relação com alguns parâmetros de mesoescala. A relação entre a precipitação e a energia convectiva da parcela é analisada considerando registros de radar e pluviômetros. A estrutura termodinâmica da atmosfera é discutida e associada com a ocorrência de convecção profunda. Os sistemas atmosféricos de grande escala atuantes no período de estudo são identificados para cada mês. Finalmente, são apresentados estudos de caso nos quais a distribuição e característica do campo de precipitação via radar em conjunto com a estrutura vertical da atmosfera, permitem descrever situações típicas de sistemas de circulação atmosférica atuantes na região.

4.1 Características do Campo de Precipitação via Radar

4.1.1 Dimensões típicas dos ecos do radar de Petrolina-PE

A Figura 4.1 ilustra a distribuição relativa e acumulada das dimensões horizontais dos ecos observados pelo radar de Petrolina-PE no período de janeiro a junho de 1985.

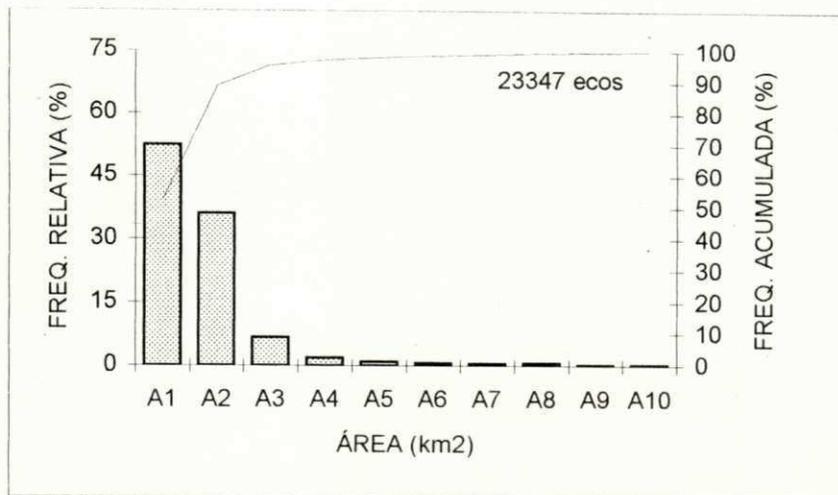


Fig. 4.1 - Distribuição de frequência relativa e acumulada das dimensões horizontais dos ecos observados pelo radar de Petrolina-PE no período de janeiro a junho de 1985.

A figura evidencia que numa amostra de 23.347 ecos, cerca de 87% tem áreas menores que A_3 ($4 \times 10^2 \text{ km}^2 < A_3 \leq 8 \times 10^2 \text{ km}^2$). Esse valor está de acordo com os resultados obtidos por Correia e Massambani (1990b), em um estudo sobre dimensões típicas dos ecos do radar de Petrolina com análises centradas nos horários das 12:00, 14:00 e 16:00 HL. Eles verificaram que 90% dos ecos tinham áreas menores que 300 km^2 . Resultados semelhantes foram obtidos por Houze e Cheng (1977), em um estudo realizado com dados coletados durante o Global Atmospheric Research Program's Atlantic Tropical Experiment (GATE). Eles verificaram que 67% dos ecos tinham áreas menores que 100 km^2 , aproximadamente 25% tinham áreas entre 100 e 1.000 km^2 e somente 8% tinham áreas maiores que 1.000 km^2 .

A distribuição de frequência relativa e acumulada das dimensões horizontais dos ecos, para cada mês, é apresentada na Figura 4.2. No mês de janeiro, para um total de 2.470 ecos observados, 78% tinham áreas menores que A_3 , sendo que 40% deles eram de área A_1 ($A_1 \leq 10^2 \text{ km}^2$). Entretanto, a característica marcante do mês de janeiro foi a grande incidência de ecos com áreas iguais ou maiores que A_3 ($4 \times 10^2 \text{ km}^2 < A_3 \leq 8 \times 10^2 \text{ km}^2$) (aproximadamente 23%) em comparação com todo o período analisado. No mês de fevereiro, de um total de 1.398 ecos observados, 91% tinham áreas menores que A_3 , dos quais 67% eram de área A_1 e apenas 9% tinham áreas maiores que 400 km^2 . O mês de março merece destaque por apresentar a maior frequência de ecos com área A_2 : num total de 8.351 ecos observados, 91% tinham áreas menores que A_3 e destes somente 41% eram de área A_1 . No mês de abril, 89% dos 7.886 ecos observados tinham áreas menores que A_3 , sendo que 60% deles tinham áreas iguais a A_1 . O mês de maio merece destaque por apresentar a maior incidência de ecos com áreas A_1 (74%). No mês de junho de um total de 1.324 ecos observados, 85% tinham áreas menores que A_3 .

Com base nessa estatística, foi possível verificar que apesar da grande predominância de ecos pequenos ou seja, ecos com área A_1 ($A_1 \leq 100 \text{ km}^2$), aproximadamente 13% dos ecos observados em janeiro e 5% dos ecos observados em abril, tinham áreas iguais ou maiores que A_4 ($8 \times 10^2 \text{ km}^2 < A_4 \leq 12 \times 10^2 \text{ km}^2$), escala B/C para o GATE. Coincidentemente, esses foram os meses com maiores índices pluviométricos no período de estudo. Este fato sugere que

as grandes chuvas observadas na região foram provenientes de aglomerados de nuvens, apesar da alta frequência de ecos pequenos.

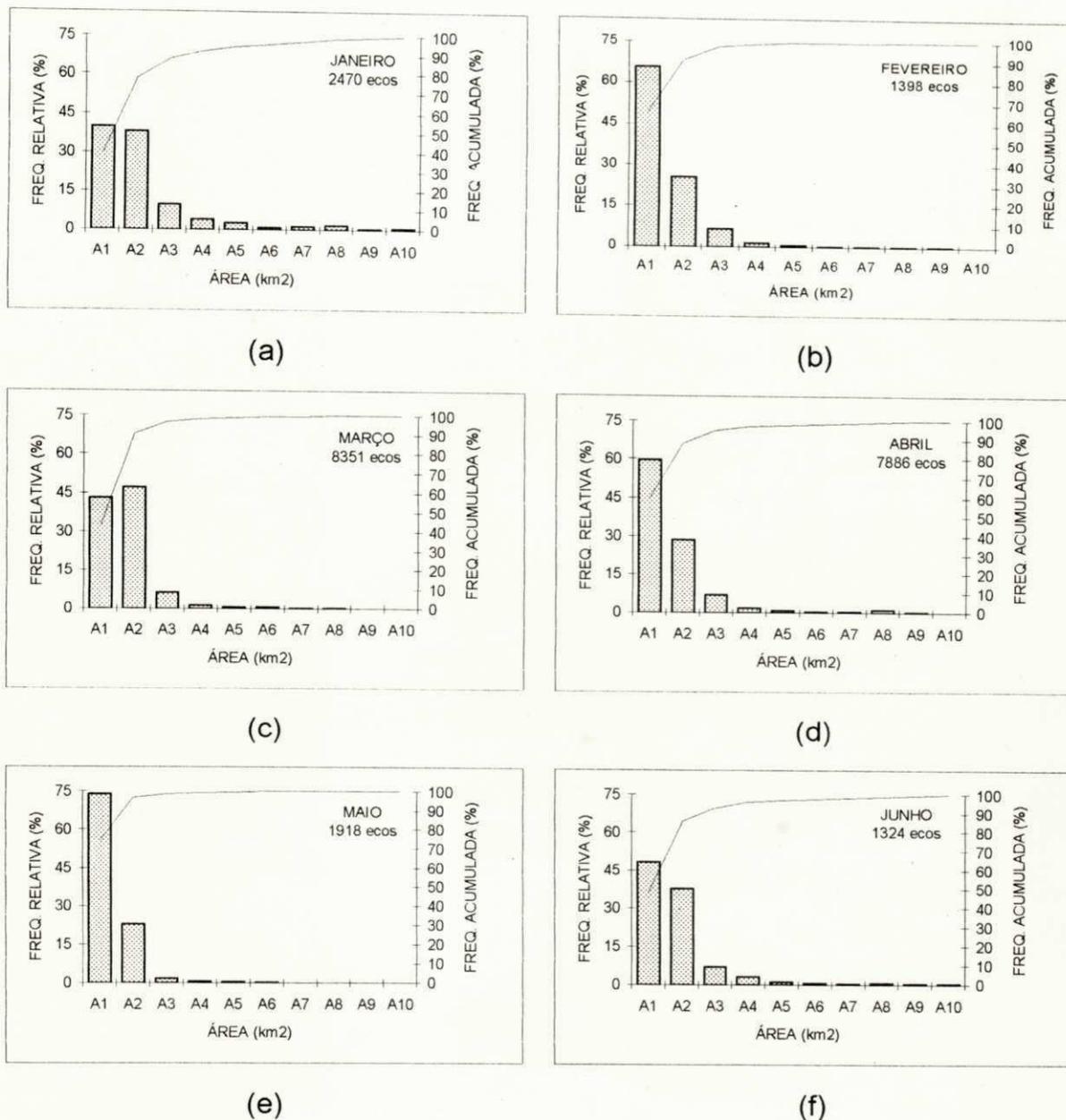


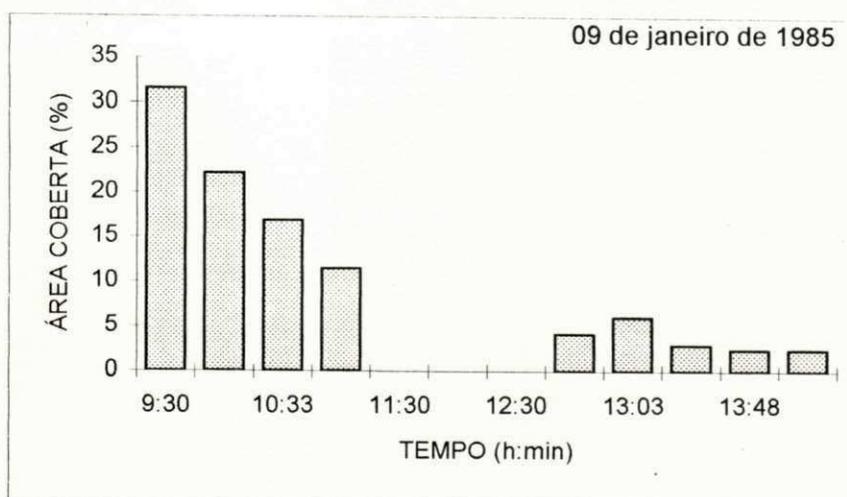
Fig. 4.2 - Distribuição mensal de frequência relativa e acumulada das dimensões horizontais dos ecos observados pelo radar meteorológico de Petrolina-PE no período de janeiro a junho de 1985.

4.1.2 Classificação dos sistemas de precipitação

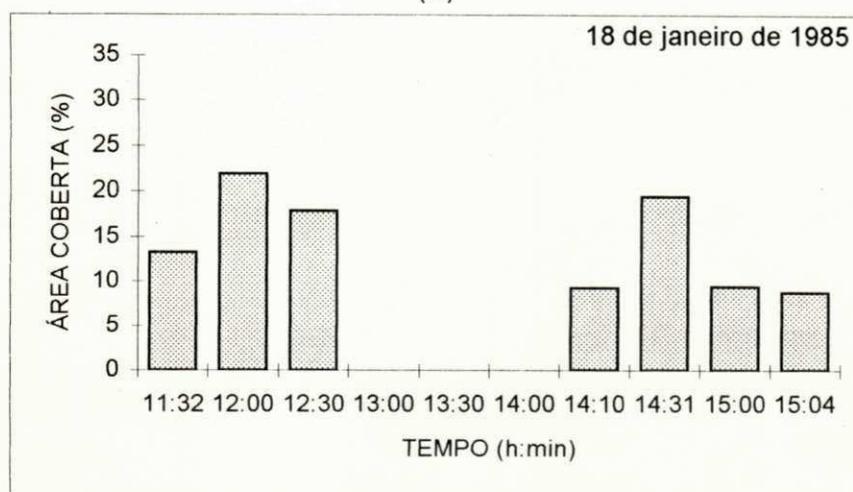
Na determinação da frequência de ecos por tipo e padrão os dias 9, 18 e 24 de janeiro não foram computados, pois os campos de precipitação desses dias correspondem a extensas áreas de aproximadamente 35.000 km², com características predominantemente estratiformes e aparência disforme, o que tornou difícil enquadrá-las nas escalas definidas para especificação do espectro de dimensões dos ecos.

A Figura 4.3 ilustra a variação temporal do percentual de área coberta com chuva num círculo de 250 km de raio para os dias 9, 18 e 24 de janeiro. Convém assinalar que o valor nulo em horários intermediários não significa necessariamente ausência de chuva. Tais lacunas nos dados estão normalmente associadas a interrupções na operação do radar. O aspecto fundamental nesses gráficos é o fato de que essas extensas áreas de chuva predominantemente estratiforme perduram por horas, o que concorda com resultados obtidos por outros autores (Leary e Houze, 1979).

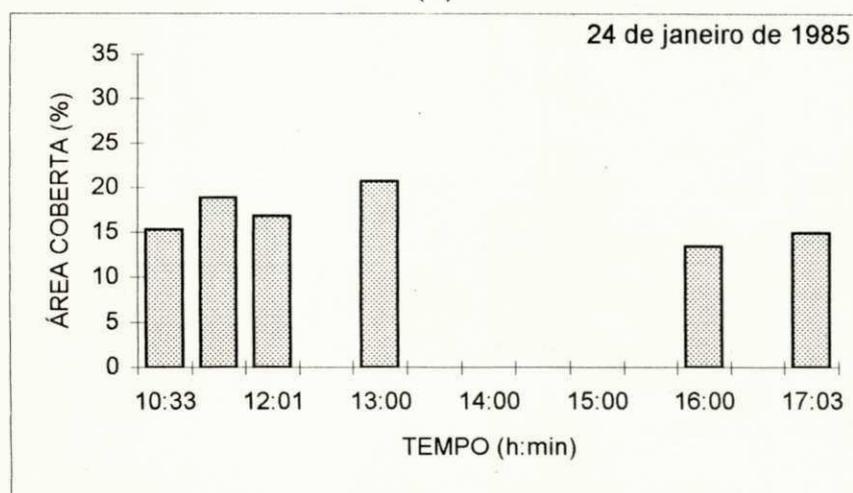
A Tabela 4.1 mostra a distribuição mensal dos tipos de ecos do radar de Petrolina. O total de ecos de cada tipo é apresentado em conjunto com o período de observação, em dias e horas, para cada mês. Nessa tabela também está incluído o número de PPI's e RHI's obtidos no período.



(a)



(b)



(c)

Fig. 4.3 - Variação temporal do percentual de área coberta por chuva observada pelo radar meteorológico de Petrolina-PE num círculo de 250 km de raio no dia: (a) 9, (b) 18 e (c) 24 de janeiro de 1985.

TABELA 4.1

DISTRIBUIÇÃO MENSAL DE TIPOS DE ECOS, NÚMERO DE PPI'S E RHI'S E PERÍODO COM OBSERVAÇÃO DE RADAR (DIAS E HORAS)

Mês	Nº de dias com obs.	Nº de horas com obs.	Nº de PPI's	Nº de RHI's	Nº de Ec	Nº de Est	Nº de Estc	Total
JAN	06	31,36	69	28	1971	16	14	2001
FEV	05	09,32	34	06	1394	04	00	1398
MAR	14	54,13	209	17	8274	09	68	8351
ABR	11	38,12	149	13	7803	03	80	7886
MAI	07	22,17	90	05	1898	96	14	1918
JUN	04	11,26	37	17	1283	00	41	1324
Total	46	166,36	588	86	22623	38	217	22878

Esses dados evidenciam a grande variação no número mensal de dias amostrados e seus respectivos períodos de observação. Dessa forma, não é possível comparar diretamente as frequências mensais de cada tipo de eco. Por outro lado, informações bastante úteis podem ser obtidas com uma análise adequada dos campos de precipitação observados.

Considerando que os registros do radar de Petrolina são únicos para a região e representam as únicas medidas capazes de precisar, com excelente resolução espacial e temporal, a formação, o desenvolvimento, o deslocamento e a distribuição de células precipitantes num raio de até 400 km, a premissa básica é a de que, independentemente do número de dias com observação em cada mês, as amostras são igualmente importantes para a análise do período chuvoso de 1985. Análises desse tipo podem fornecer informações bastante valiosas sobre os mecanismos responsáveis pela precipitação na Região.

Uma solução para o problema de amostragem desigual foi encontrada com a obtenção de relativos do número de ecos. Esses relativos são valores que

podem ser usados para obter uma idéia qualitativa do comportamento da precipitação no período estudado.

A interpretação com base no relativo do número de ecos implica no pressuposto de que as observações realizadas em cada mês tem a mesma importância na determinação dos fatores responsáveis pelo grande volume de chuva registrado no ano de 1985. Entretanto, cada mês tem seu número relativo e, conseqüentemente, sua importância relativa dentro do conjunto dos dados.

O problema é abordado em diferentes estágios. Numa primeira etapa, a premissa básica é a de que existe uma relação entre as características do campo observado e os sistemas de circulação atmosférica atuantes no período. Determinados os diferentes tipos e padrões de ecos e suas respectivas distribuições mensais de freqüência, as cartas de superfície, os registros pluviométricos, os dados de ar superior e as imagens de satélites são usados para completar a análise.

Numa segunda etapa, a distribuição de freqüência de tipos e padrões de ecos é feita por quadrante num círculo de 250 km de raio com centro na sede do radar. Nessa etapa o objetivo é verificar se há regiões preferenciais de formação e/ou desenvolvimento dos ecos e observar se existe alguma relação com fatores de mesoescala.

A interpretação adequada dos dados da Tabela 4.1 exigiu a obtenção de um valor relativo para cada mês. O relativo do número mensal de ecos é,

portanto, analisado em função do período de observação e do número de PPI's obtidos, de acordo com as equações apresentadas na seção 3.3.1.

O resultado da divisão do número mensal total de cada tipo de eco pelo intervalo de tempo com observação é uma estimativa da ocorrência de células precipitantes por hora, o que dá uma indicação da atividade convectiva na região.

O quociente da divisão do número mensal total de cada tipo de eco pelo número de PPI's obtidos no período permite estimar a frequência de células precipitantes por PPI, possibilitando uma avaliação sobre o volume e intensidade da chuva na região observada. Os relativos do número de ecos para cada mês são apresentados na Tabela 4.2. A distribuição mensal de frequência de cada tipo de eco obtida com base nos valores relativos é ilustrada na Figura 4.4.

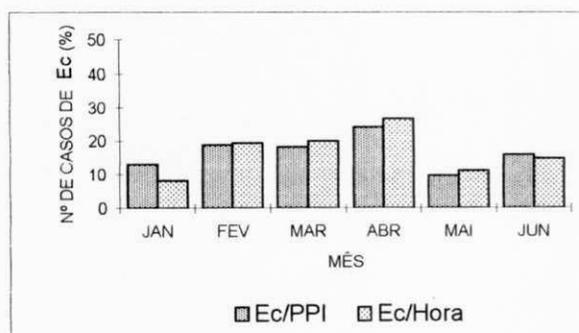
A maior frequência de ecos convectivos por hora e por PPI ocorreu no mês de abril (Fig. 4.4a) indicando, não apenas um período com atividade convectiva intensa, como também uma maior concentração de células precipitantes.

A maior incidência de ecos Est ocorreu no mês de janeiro (Fig. 4.4b) mesmo sem incluir os campos de precipitação predominantemente estratiforme observados nos dias 09, 18 e 24 de janeiro. PPI's obtidos nos dias 09 e 18 de janeiro são ilustrados na Figura 3.1 que também inclui um RHI obtido ao longo do azimute de $221,4^\circ$, três minutos após a obtenção do PPI do dia 18. Esse RHI é um excelente exemplo de uma das características básicas desse tipo de eco: o topo contínuo, com altura quase uniforme situada em torno de 10 km.

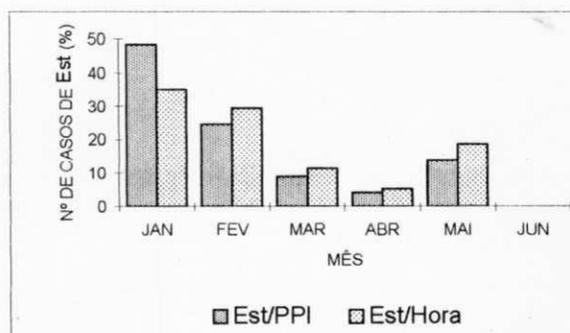
TABELA 4.2

RESUMO MENSAL DOS VALORES ABSOLUTOS E RELATIVOS DOS TIPOS DE ECOS

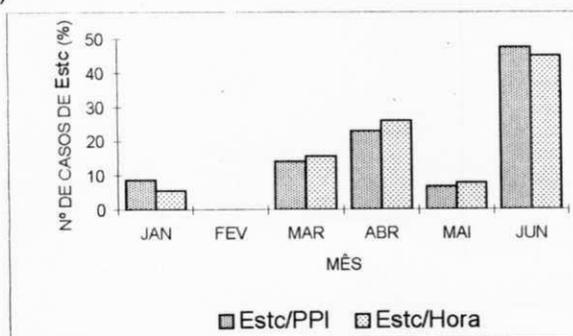
TIPO	NÚMERO DE OCORRÊNCIAS DE TIPOS DE ECOS						
	VALOR ABSOLUTO						
	Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Maio	Junho	Total
Ec	1971	1394	8274	7803	1898	1283	22623
Est	16	04	09	03	06	0,0	38
Estc	14	0,0	68	80	14	41	217
TIPO	VALOR/PPI						
	Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Maio	Junho	Total
	Ec	28,5	41,0	39,5	52,3	21,1	34,6
Est	0,23	0,11	0,04	0,02	0,06	0,0	0,50
Estc	0,20	0,0	0,32	0,53	0,15	1,10	2,32
TIPO	VALOR/HORA						
	Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Maio	Junho	Total
	Ec	62,85	149,57	152,85	204,69	85,61	113,94
Est	0,51	0,42	0,16	0,07	0,27	0,0	1,48
Estc	0,44	0,0	1,25	2,09	0,63	3,64	8,07



(a)



(b)



(c)

Fig. 4.4 - Distribuição mensal do número relativo percentual de ocorrências de: (a) ecos convectivos (Ec), (b) ecos estratiformes (Est) e (c) ecos estratoconvectivos (Estc), obtidos pelo radar meteorológico de Petrolina-PE num círculo de 250 km de raio no período de janeiro a junho de 1985.

Os meses de março, abril e junho apresentaram a maior incidência de ecos Estc (Fig. 4.4c). No caso dos meses de março e abril esses resultados eram esperados, pois em períodos de alta frequência de células convectivas profundas há geralmente uma maior incidência de chuvas com características típicas de mesoescala. A precipitação em mesoescala é normalmente proveniente de extensas nuvens de bigorna e é consideravelmente menos intensa sendo, porém, mais persistente e cobrindo áreas bem maiores do que os ecos associados a chuvas puramente convectivas (Cheng e Houze, 1979).

O percentual aparentemente superior do mês de junho, em comparação com os valores de março e abril, tem um significado puramente relativo, já que este é um mês considerado seco na região, pois a normal climatológica de Petrolina é de 10 mm. Entretanto, nos 5 primeiros dias do mês (período com observação de radar), a área esteve sob a influência de um sistema frontal que atingiu o Nordeste do Brasil intensificando e organizando a convecção local. No campo de precipitação via radar foram observados ecos organizados em bandas, com características uniformes e persistentes, mostrando extensas áreas com chuva fraca coexistindo com núcleos convectivos intensos.

Usando o mesmo critério da distribuição mensal relativa dos tipos de ecos, foi determinada a frequência de padrões por hora e por PPI. Os resultados são mostrados na Tabela 4.3.

TABELA 4.3

RESUMO MENSAL DOS VALORES ABSOLUTOS E RELATIVOS DOS PADRÕES DE ECOS

PADRÃO	NÚMERO DE OCORRÊNCIAS DE PADRÕES DE ECOS						
	VALOR ABSOLUTO						
	Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Maio	Junho	Total
Ed	1922	1386	8107	7637	1858	1858	22193
Ze	58	12	176	139	35	04	425
Le	17	0,0	60	93	25	25	220
Fe	03	0,0	08	17	0,0	0,0	28
Be	01	0,0	0,0	0,0	0,0	11	12
PADRÃO	VALOR/PPI						
	Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Maio	Junho	Total
Ed	27,8	40,7	38,8	51,3	20,6	34,7	213,9
Ze	0,8	0,4	0,8	0,9	0,4	0,1	3,4
Le	0,2	0,0	0,3	0,6	0,3	0,7	2,1
Fe	0,04	0,0	0,04	0,1	0,0	0,0	0,18
Be	0,01	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,31
PADRÃO	VALOR/HORA						
	Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Maio	Junho	Total
Ed	61,3	148,7	149,8	200,3	83,8	113,9	757,8
Ze	1,8	1,3	3,3	3,6	1,6	0,4	12
Le	0,5	0,0	1,1	2,3	1,1	2,2	7,2
Fe	0,1	0,0	0,15	0,45	0,0	0,0	0,7
Be	0,03	0,0	0,0	0,0	0,0	0,98	1,01

A maior frequência de Ed, Ze e Fe (Fig. 4.5 a,b,d) é vista no mês de abril. As Le (Fig.4.5c) tem um percentual ligeiramente maior no mês de junho. As Be (Fig. 4.5e) tem sua quase totalidade (96%) observada no mês de junho.

Convém lembrar que no processo de classificação dos padrões não foram consideradas as características dinâmicas dos sistemas já que as análises foram feitas em função da distribuição espacial dos ecos. Dessa forma, os ecos dispersos (Ed) podem representar: (a) em termos da dimensão vertical, desde células rasas a profundas (células com topos em torno de 17 km) e (b) em termos das dimensões horizontais, desde células pequenas (área $\leq 10^2$ km²) a células

grandes ($10^2 \text{ km}^2 < \text{área} \leq 24 \times 10^2 \text{ km}^2$). Na contagem dos ecos dispersos também foram incluídos alguns casos de células com áreas em torno de 10.000 km^2 registrados nos meses de março e abril.

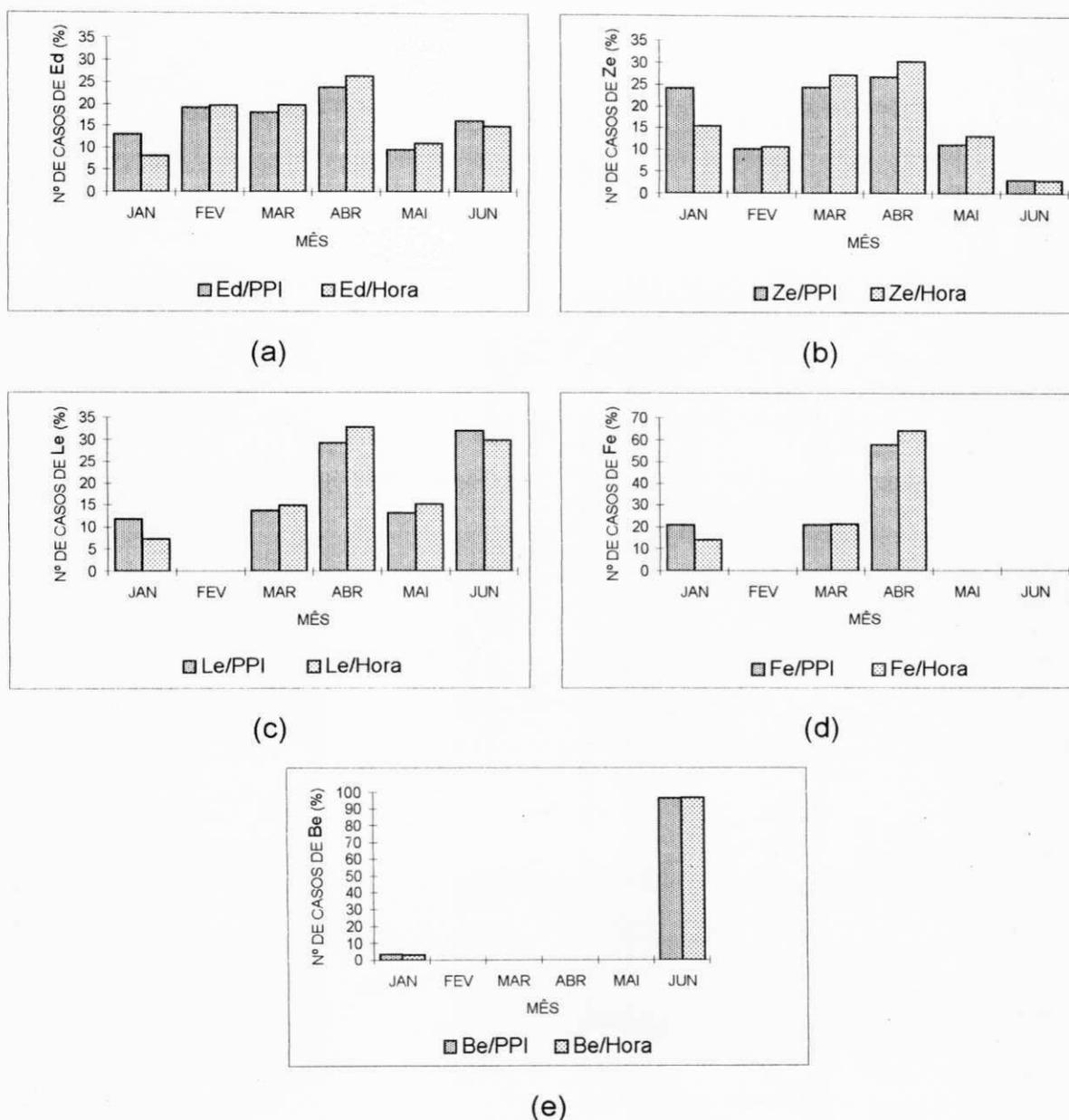


Fig. 4.5 - Distribuição mensal dos valores percentuais de ocorrências de: (a) ecos dispersos (Ed), (b) zonas de ecos (Ze), (c) linhas de ecos (Le), (d) faixas de ecos (Fe) e (e) bandas de ecos (Be), obtidos pelo radar meteorológico de Petrolina-PE num círculo de 250 km de raio no período de janeiro a junho de 1985.

Características não uniformes da superfície tais como montanhas, vales, litoral, etc. podem exercer um forte controle no desenvolvimento de tempestades convectivas associadas a circulações locais de mesoescala (Hill e Browing, 1979). Por outro lado, as condições atmosféricas de grande escala são determinantes na preparação de um ambiente adequado para o desenvolvimento desses sistemas. Assim, a distribuição e organização do campo de precipitação devem estar relacionadas com características típicas da circulação dominante. Uma consequência desse raciocínio foi a busca de alguma relação entre ecos organizados (padrões) e as condições sinóticas predominantes no período de observação.

A grande predominância das Be no mês de junho evidenciada na Figura 4.5e a torna um dos padrões típicos apenas desse mês, ao mesmo tempo que sugere que elas devem estar associadas a um sistema de circulação atmosférica específico. Cartas sinóticas de superfície, elaboradas pela Diretoria de Hidrografia e Navegação, mostram que um sistema frontal atingiu o Nordeste nos primeiros dias de junho. Convecção intensa sobre a região foi observada em imagens de satélite. Discussões mais detalhadas sobre a penetração desse sistema frontal serão apresentadas posteriormente neste capítulo.

Os demais padrões não parecem ser típicos de um mês determinado, o que sugere que eles podem ocorrer associados a mais de um tipo de sistema de circulação atmosférica. Os Ed e as Ze são vistos em todos os meses (Fig. 4.5a-b). As linhas de ecos (Le) também são observadas em todos os meses, à exceção de fevereiro (Fig. 4.5c), enquanto que as faixas de ecos (Fe) são vistas

apenas em janeiro, março e abril (Fig. 4.5d). A aparência linear dos ecos, independentemente de ser um sistema isolado com forma linear ou ecos organizados em linhas, é determinada pelo campo de vento. Houze e Cheng (1977), analisando as características dos ecos de radar observados durante o GATE, verificaram que grupos de ecos alinhados estavam fortemente relacionados com o campo do vento na baixa troposfera. Análises de linhas de corrente em diferentes níveis permitiriam diagnosticar o nível do vento predominante.

Um aspecto evidente nos gráficos da Figura 4.5 é que, à exceção das bandas de ecos (Be), todos os demais padrões tem maior frequência no mês de abril. A análise das imagens de satélite indica que a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) foi a principal responsável pela grande atividade de precipitação existente nesse mês. As imagens sugerem ainda uma interação entre a ZCIT e o cavado de ar superior em alguns dias do mês. A grande atividade convectiva verificada também no mês de março parece ter sido provocada tanto por vórtices ciclônicos da alta troposfera quanto pela ZCIT.

Os extensos campos de precipitação estratiforme e aparência disforme observados nos dias 9, 18, e 24 de janeiro parecem estar associados a vórtices ciclônicos de ar superior detectados nas imagens de satélite. É importante registrar que PPI's com características semelhantes foram obtidos no dia 19 de março, quando um vórtice ciclônico de ar superior atuava no Nordeste conforme detectado nas imagens de satélite.

A Tabela 4.4 mostra o número de células observadas no período de estudo para cada tipo e padrão. Os valores são números relativos considerando o total de horas com observação. É óbvia a absoluta supremacia dos Ec com percentual de 98,78%. Os Estc representam 1,03% e os Est apenas 0,19%. É evidente também a absoluta predominância dos Ed (97,32%). Os demais padrões tem freqüência de apenas 1,54% no caso das Ze e valores menores para as Le, Fe e Be.

TABELA 4.4

NÚMERO RELATIVO DE OCORRÊNCIAS DE TIPOS E PADRÕES DE ECOS POR HORA

TIPO DE ECO	PADRÃO DE ECOS						
	Ed	Ze	Le	Fe	Be	TOTAL	PERCENTUAL
Ec	751,46	11,23	6,58	0,15	0,00	769,44	98,78
Est	1,34	0,10	0,00	0,00	0,00	1,45	0,19
Estc	4,95	0,62	0,94	0,53	1,00	8,07	1,03
Total	757,8	12	7,2	0,7	1,01	778,71	100
%	97,32	1,54	0,92	0,09	0,13	100	

Uma análise da distribuição espacial dos ecos pode indicar regiões preferenciais de formação de células precipitantes além de ser um indicativo dos mecanismos responsáveis por essa formação.

A Figura 4.6 mostra a distribuição percentual de cada padrão de ecos por quadrante para todo o período de estudo. É importante observar que cada gráfico foi obtido considerando o número total do padrão correspondente como equivalente a 100%. É fácil verificar que o quadrante sudeste (SE) se destaca por apresentar a maior freqüência de ecos, independentemente do padrão. A predominância do quadrante SE é particularmente acentuada no caso das Ze

(Fig. 4.6b) e Le (Fig. 4.6c). As Fe (Fig. 4.6d) são o padrão que apresenta a distribuição mais homogênea quando considerados todos os quadrantes. Os gráficos também evidenciam que, à exceção das Be (Fig. 4.6e), os padrões ocorrem em todos os quadrantes. Os quadrantes NW e SW são, de maneira geral, os que apresentam as menores contribuições.

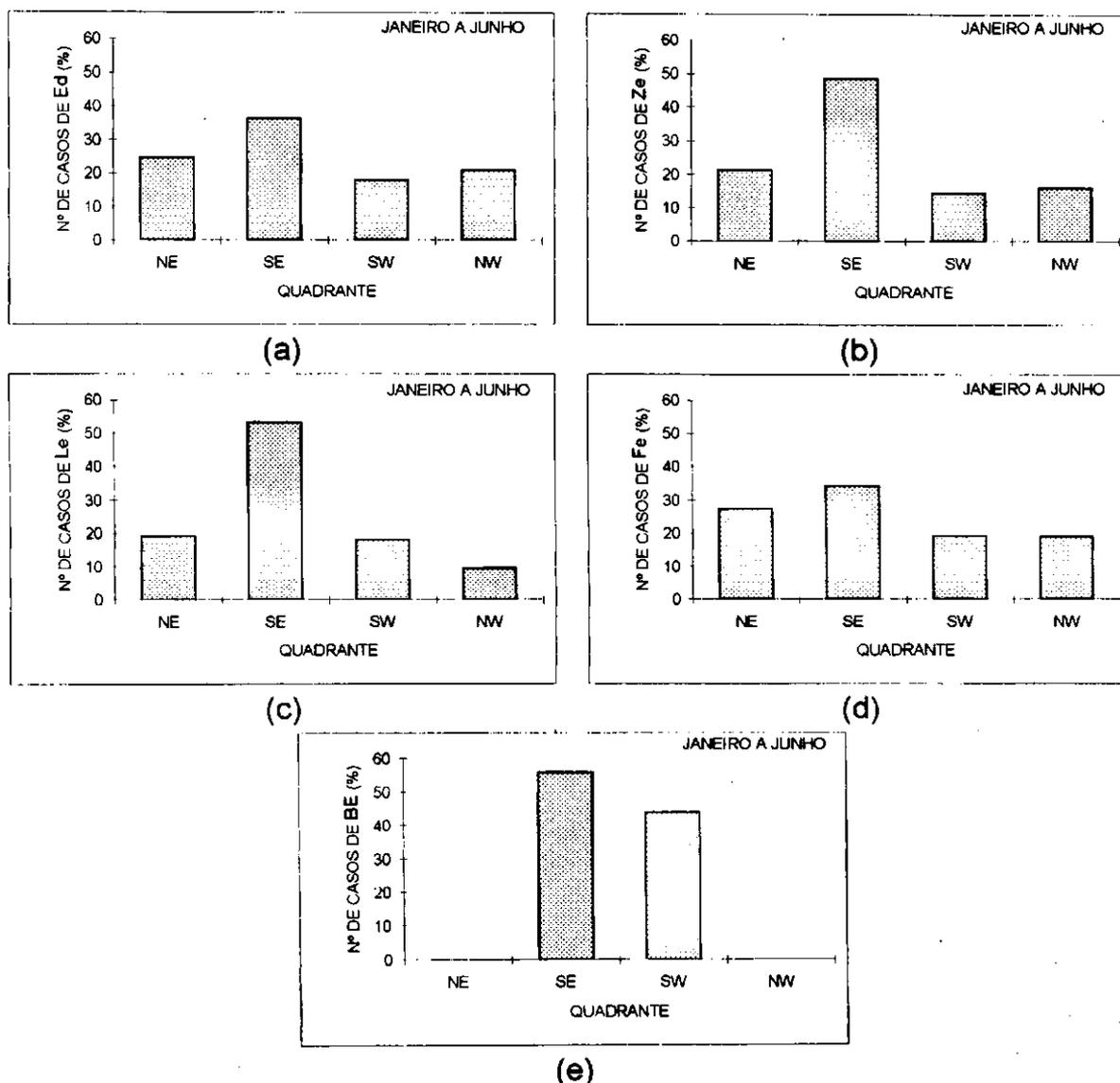


Fig. 4.6 - Distribuição percentual por quadrante, para o período de janeiro a junho de 1985, de: (a) ecos dispersos (Ed), (b) zonas de ecos (Ze), (c) linhas de ecos (Le), (d) faixas de ecos (Fe) e (e) bandas de ecos (Be). O número percentual total de cada padrão de ecos no período de estudo foi considerado como sendo 100%.

É importante verificar se a preferência pelo quadrante SE também ocorre em cada mês isoladamente. As Tabelas 4.3 e 4.4 mostram que os Ed constituem a grande maioria dos padrões em todos os meses analisados. Dessa forma, é necessário analisá-los separadamente dos outros padrões, a fim de evidenciar não só sua contribuição como também a dos demais. O procedimento utilizado foi o de analisar cada mês separadamente considerando: (a) apenas os Ed como equivalente a 100% e (b) o conjunto dos demais padrões como equivalente a 100%.

A Figura 4.7 ilustra os resultados encontrados para os Ed. A preferência pelo quadrante SE evidenciada na Figura 4.6a, para todo o período, ocorre de forma evidente apenas nos meses de março (Fig. 4.7c), abril (Fig. 4.7d) e maio (Fig. 4.7e). Por outro lado, o quadrante SE está sempre entre os dois quadrantes com maiores contribuições, à exceção do mês de janeiro (Fig. 4.7a), quando predominam os quadrantes SW e NW. Semelhantemente ao que foi visto para o período total, os quadrantes SW e N'V são, de maneira geral, os que apresentam as menores contribuições.

A Figura 4.8 ilustra os resultados encontrados para o conjunto dos padrões (excluídos os Ed) para cada mês analisado. Neste caso, a preferência pelo quadrante SE é vista apenas nos meses de março a junho (Fig. 4.8c-f). Os quadrantes SW e NW predominam no mês de janeiro (Fig. 4.8a), a exemplo do que foi visto no caso dos Ed (Fig. 4.7a). O mês de fevereiro (Fig. 4.8b) apresenta um comportamento diferente devido à predominância dos quadrantes NE e NW e ocorrência de Ze somente. O mês de junho (Fig. 4.8f) também merece destaque

devido à predominância de Le e Be nos quadrantes SE e SW, sendo que este último padrão tem sua quase totalidade neste mês.

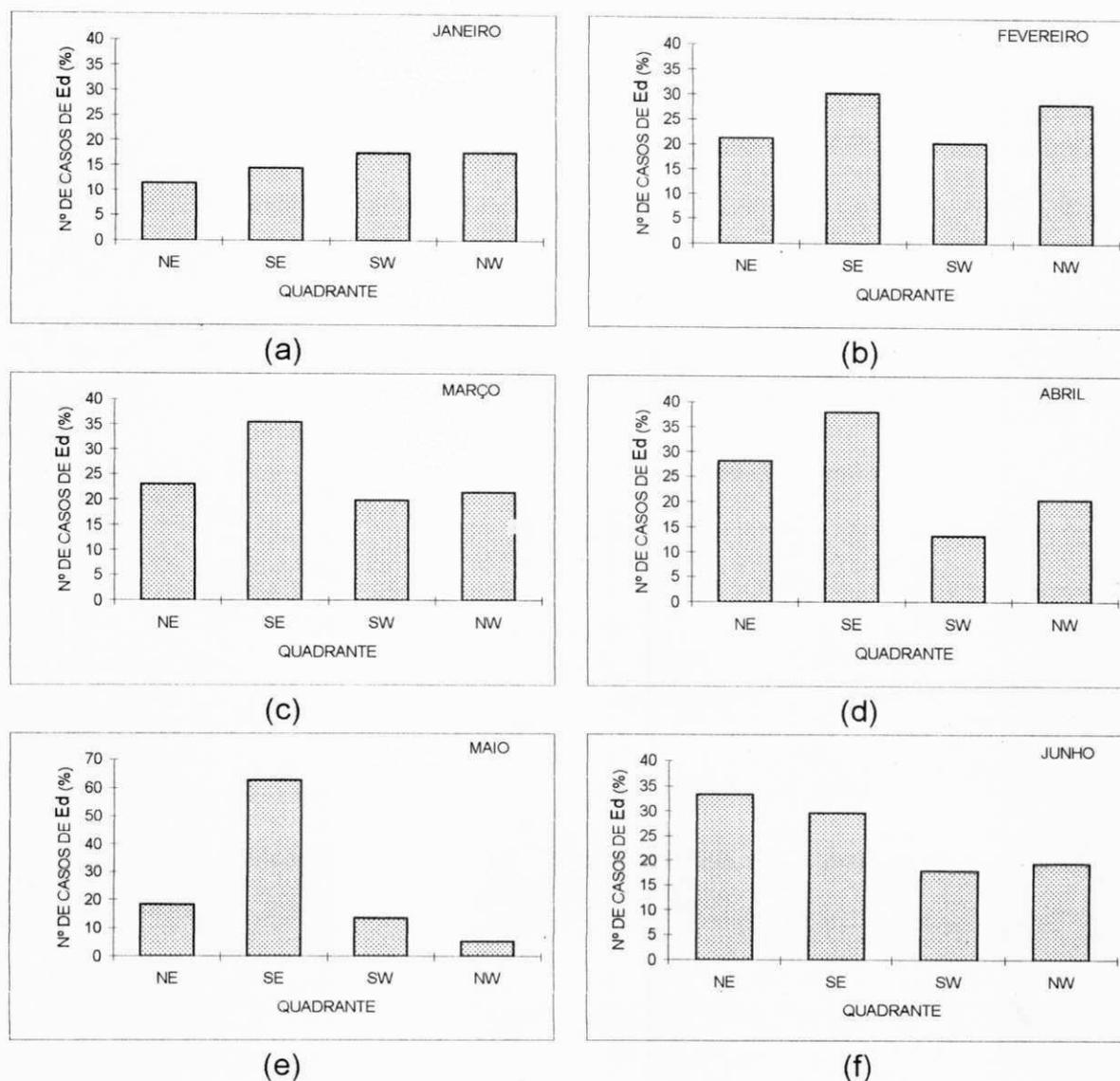


Fig. 4.7 - Distribuição percentual, por quadrante, de ecos dispersos (Ed) para o mês de: (a) janeiro, (b) fevereiro, (c) março, (d) abril, (e) maio e (f) junho de 1985. O número percentual total de ecos dispersos (Ed), para cada mês, foi considerado como sendo 100%.

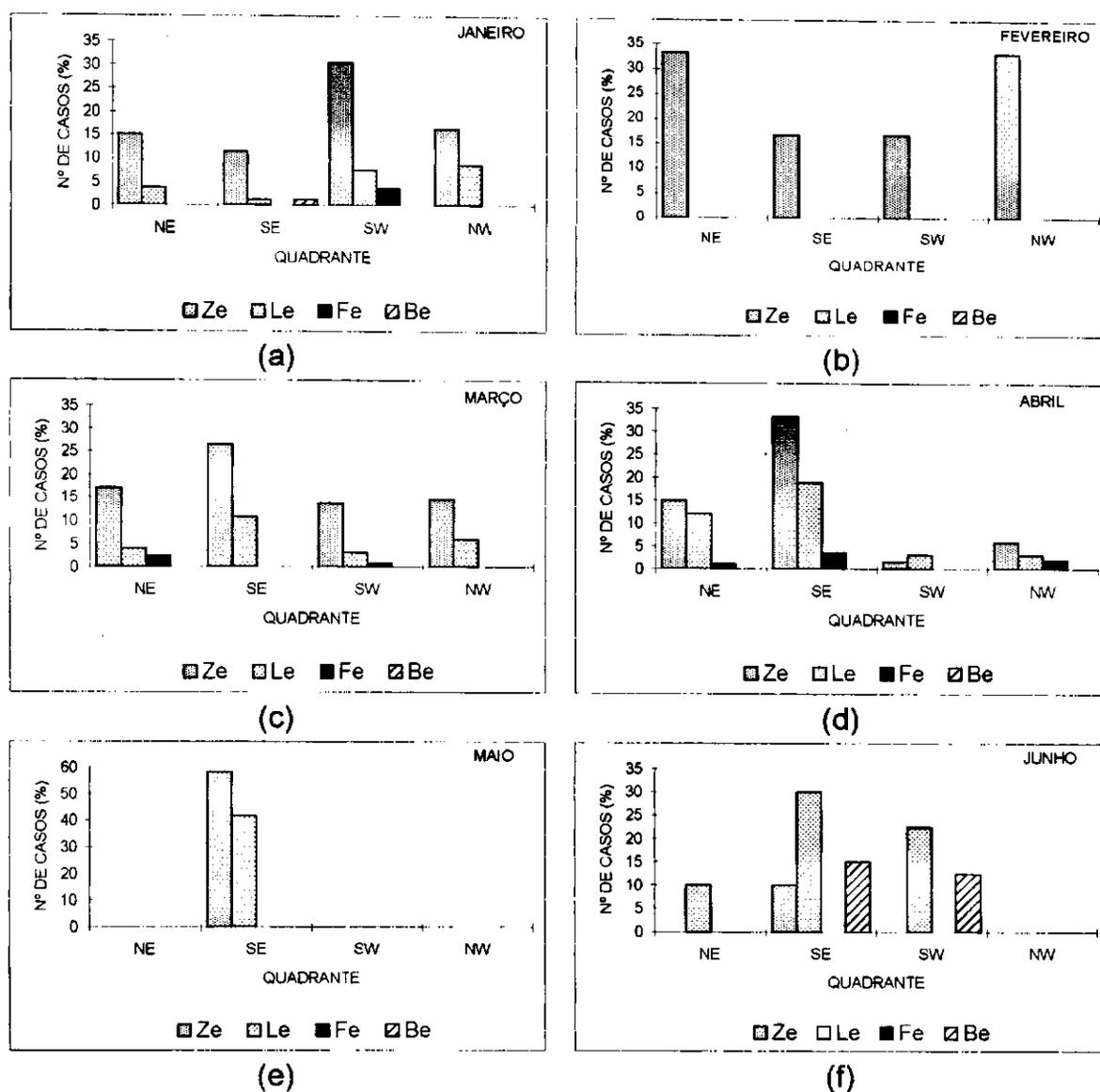


Fig. 4.8 - Distribuição percentual, por quadrante, de zonas de ecos (Ze), linhas de ecos (Le), faixas de ecos (Fe) e bandas de ecos (Be) para o mês de: (a) janeiro, (b) fevereiro, (c) março, (d) abril, (e) maio e (f) junho de 1985. O número percentual total do conjunto de padrões (excluídos os Ed), para cada mês, foi considerado como sendo 100%.

A Figura 4.9 ilustra os resultados encontrados para o conjunto dos padrões (excluídos os Ed) nos seis meses analisados. Essa figura permite avaliar a importância relativa dos padrões já que ela foi obtida considerando o conjunto dos padrões como equivalente a 100% para todo o período de estudo. É evidente

a predominância do quadrante SE para todos os padrões e, em particular, para as Ze e Le.

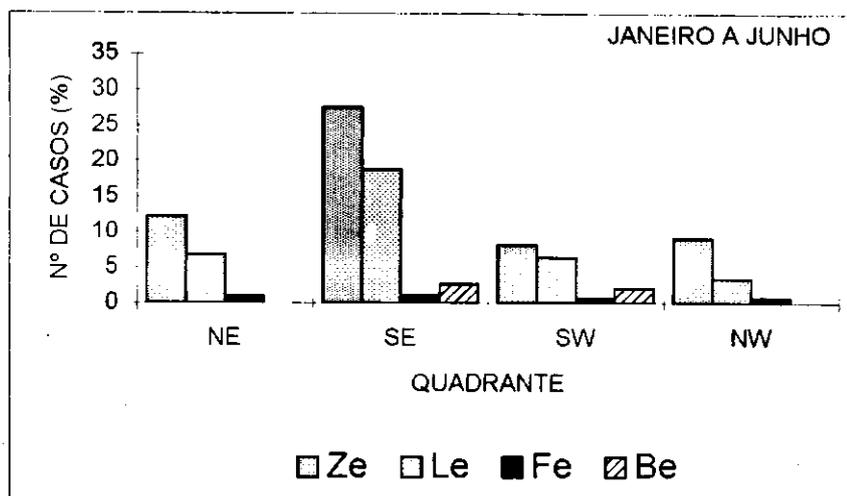


Fig. 4.9 - Distribuição percentual, por quadrante, de zonas de ecos (Ze), linhas de ecos (Le), faixas de ecos (Fe) e bandas de ecos (Be), para o período de janeiro a junho de 1985. O número percentual total do conjunto de padrões (excluídos os Ed) foi considerado como sendo 100%.

É importante assinalar que as Be ocorreram somente nos quadrantes SE (56%) e SW (44%). É provável que essa área aparentemente preferencial de formação, desenvolvimento e/ou penetração de ecos organizados em bandas resulte da influência direta de sistemas de origem frontal provenientes do sul do País. Por outro lado, a acentuada predominância de ecos no quadrante SE caracteriza esse setor como dominante na ocorrência de células precipitantes. É provável que a relativa proximidade do litoral, aliada ao vento predominante nos baixos níveis (sudeste), torne a região sujeita a uma maior influência de sistemas atmosféricos organizados oriundos do oceano tais como os distúrbios (ondas) de leste. Além disso, o relevo, mesmo que suave, aliado à advecção de umidade

pelos alísios, deixa a atmosfera mais favorável à formação de nuvens e, conseqüentemente, de precipitação.

4.2 Energia Máxima da Parcela à Superfície ($E_{máx}$) e a Precipitação

4.2.1 $E_{máx}$ e os ecos do radar de Petrolina-PE

Foi descrito na metodologia, que os valores da energia máxima da parcela à superfície foram obtidos graficamente, a partir das áreas positivas (energia disponível para formação das nuvens) definidas pela curva de estratificação da atmosfera (sondagem de Petrolina) e a curva de estado (em função de $(\theta_w)_{máx}$) plotadas em tefigramas.

Energia alta (área positiva grande) contribui para a existência de movimentos convectivos intensos, podendo gerar desde nuvens cumulus humilis até cumulonimbus. Essa situação é bastante comum no verão durante o dia. Nesses casos, a condição de estabilidade da atmosfera nas camadas mais baixas é, em geral, instável, podendo ser estável em camadas mais elevadas.

Dependendo de como a temperatura varie com a altura, a posição do nível de condensação é definida em função da umidade relativa da parcela no nível inicial (superfície). Este é o caso da estratificação atmosférica condicionalmente estável, típico da região tropical.

O nível de condensação é mais baixo e a área positiva tende a ser maior quando a umidade relativa é alta. Pequenos impulsos são suficientes para tornar instáveis as parcelas de ar em situações dessa natureza.

O nível de condensação é alto e são necessários grandes impulsos para levar as parcelas à condição de instabilidade quando a umidade relativa é baixa. Por outro lado, o desenvolvimento das nuvens não depende apenas das características da parcela à superfície. Camadas atmosféricas estáveis em níveis mais altos podem inibir esse processo.

4.2.1.1 Emáx e as dimensões horizontais dos ecos

Tendo como objetivo avaliar o grau de relação entre parâmetros de mesoescala e a precipitação via radar, a energia máxima da parcela à superfície (Emáx) foi correlacionada com o número de ecos considerando dois grupos específicos de tamanhos de células: A_1 (área $\leq 100 \text{ km}^2$) e A_2 ($100 \text{ km}^2 < \text{área} \leq 400 \text{ km}^2$). A razão para a escolha dos tamanhos A_1 e A_2 foi a grande predominância dos ecos com áreas $\leq 400 \text{ km}^2$ (87%).

A Tabela 4.5 mostra os valores de Emáx e o número de ecos observados por PPI para os dias com observações simultâneas de radar e ar superior. Os dados indicam que, de forma geral, o número de ecos com áreas menores ou iguais a 400 km^2 cresce com o aumento da energia convectiva. Por outro lado, essa relação parece ser completamente inversa em alguns casos.

TABELA 4.5

ENERGIA MÁXIMA DA PARCELA À SUPERFÍCIE ($E_{máx}$) E NÚMERO DE ECOS COM ÁREAS A_1 , A_2 E $(A_1 + A_2)$

DIA/MÊS	$E_{máx}$ (J/g)	NÚMERO DE PPI's	NÚMERO DE ECOS POR PPI		
			ÁREA A_1 ($A_1 \leq 100 \text{km}^2$)	ÁREA A_2 ($100 \text{km}^2 < A_2 \leq 400 \text{km}^2$)	ÁREA ($A_1 + A_2$)
18/jan	1,67	6	4,8	12,5	17,3
21/jan	1,59	11	21,7	13,7	35,4
22/jan	1,64	10	21,6	17,4	39
23/jan	1,48	5	18	13,8	31,8
24/jan	1,09	6	7,3	5,5	12,8
26/fev	3,02	6	18,3	5,3	23,6
27/fev	1,98	2	9	4	13
28/fev	1,21	11	11,6	8,3	19,9
07/mar	2,08	6	13,5	21	34,5
22/mar	2,55	15	18,8	25,9	44,7
25/mar	0,69	21	11,8	5,6	17,4
27/mar	1,24	17	18,05	17,8	35,85
28/mar	2,17	18	9,6	15,4	25
29/mar	1,68	30	19,7	22,9	42,6
01/abr	3,06	26	33,9	15,2	49,1
02/abr	2,18	6	67,7	19,7	87,4
08/abr	1,55	4	28,5	34,25	62,75
09/abr	3,28	23	39,65	11,95	51,6
10/abr	1,93	27	28,04	17,4	45,44
11/abr	0,69	6	25,7	16,5	42,2
12/abr	1,63	23	28,6	18,6	47,2
24/abr	0,95	3	13,3	12,3	25,6
25/abr	0,95	17	32,1	10,5	42,6
26/abr	0,58	12	18,08	7,8	25,88
29/abr	2,1	2	11,5	7	18,5
23/mai	0,06	14	13,64	4,64	18,28
24/mai	0,22	16	15,06	2,31	17,37
27/mai	0,51	11	9,6	4,4	14
28/mai	0,98	9	10,1	0,77	10,87
30/mai	0,28	23	21,78	9,22	31
31/mai	0,45	9	15,1	6,8	21,9
03/jun	0,07	3	7,7	0,66	8,36
04/jun	0,71	9	38,8	18,8	57,6
05/jun	0,8	15	11,8	14,4	26,2
06/jun	1,59	10	8,9	11,1	20
MÉDIA	1,39	12,34	19,52	12,38	31,91

Na determinação do coeficiente de correlação entre as variáveis foram excluídos das análises os dias para os quais o número de registros (número de PPI's) era igual ou menor que 6 já que tais amostras foram consideradas insuficientes para avaliar o grau de relação entre a $E_{máx}$ e a atividade de precipitação no dia.

A Figura 4.10 mostra o diagrama de dispersão entre a $E_{máx}$ e o número de ecos com áreas menores ou iguais a 400 km^2 . A princípio, o relativamente baixo coeficiente de correlação ($r = 0,59$) indica que existe uma relação fraca entre as duas variáveis. Entretanto, esse resultado é baseado num conceito essencialmente estatístico e é praticamente neutro sob o ponto de vista de casualidade. Esse fato motivou a investigação sobre a existência de algum fator dinâmico ou termodinâmico de escala maior que teria sido responsável por esse comportamento.

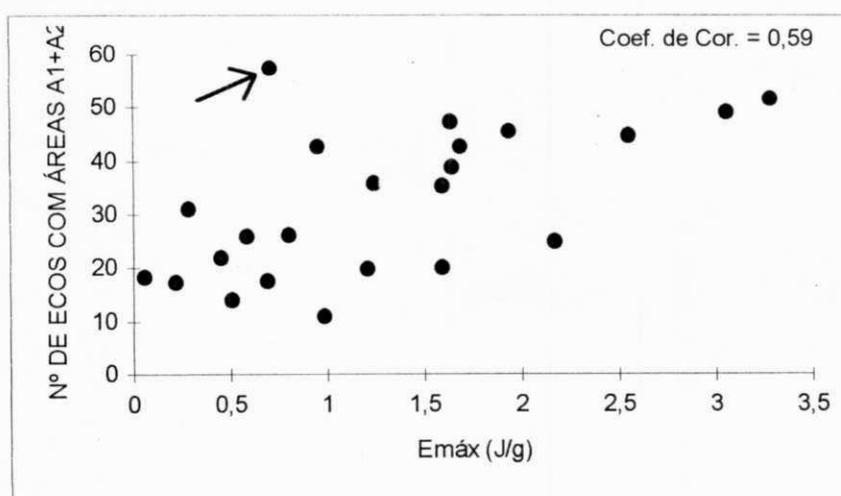


Fig. 4.10 - Diagrama de dispersão entre a energia máxima da parcela à superfície ($E_{máx}$) e o número de ecos com áreas menores ou iguais a 400 km^2 para o período de janeiro a junho de 1985. A seta assinala o ponto correspondente ao dia 4 de junho.

É provável que parte do espalhamento dos pontos na Figura 4.10 seja uma consequência da simplificação imposta pelo método da parcela usado no cálculo da Emáx, já que pressupõe que a parcela se desloca sem que haja mistura com o ambiente. A grande variação no período de amostragem dos dados do radar também é um fator que afeta a análise de correlação entre as variáveis. Entretanto, a principal responsável pela distribuição desordenada dos pontos deve ter sido a contribuição de forçantes de grande escala que influenciaram não apenas o desenvolvimento das nuvens como também sua formação, mesmo nos casos em que a energia da parcela foi muito baixa. Segundo Zawadzki e Ro (1978), movimento em escala sinótica pode produzir precipitação mesmo com energia convectiva nula.

Um exemplo do discutido acima consta da Tabela 4.5. No dia 4 de junho, cujo ponto é assinalado pela flecha na Figura 4.10, o valor da energia foi extremamente baixo em relação à atividade de precipitação observada. Será visto mais adiante que os campos de precipitação desse dia foram produzidos por um sistema de origem frontal que atingiu o Nordeste. Há um aumento gradativo da energia convectiva entre o dia 30 de maio e 06 de junho, em virtude da aproximação do sistema.

A Figura 4.11 mostra o diagrama de dispersão entre a Emáx e o número de ecos com áreas $\leq 400 \text{ km}^2$, excluído o dia 04 de junho. Nessa situação o valor do coeficiente de correlação subiu para 0,72, indicando que as condições termodinâmicas em superfície são realmente importantes para a formação das células convectivas.

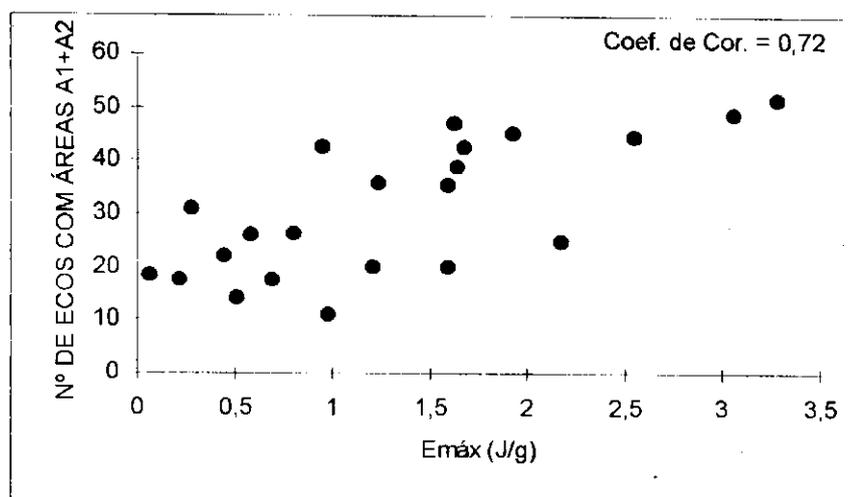


Fig. 4.11 - Diagrama de dispersão entre a energia máxima da parcela à superfície ($E_{máx}$) e o número de ecos com áreas menores ou iguais a 400 km^2 para o período de janeiro a junho de 1985, excluído o dia 04 de junho.

Por outro lado, nos dias 23 e 24 de maio, quando a energia positiva foi quase nula e o número de ecos relativamente grande, a precipitação parece ter sido produzida por um efeito de circulação de mesoescala pois nenhum sistema de escala maior causador de chuva foi observado. Convém salientar que, em algumas situações, não foi possível determinar se os sistemas de nuvens observados apresentavam deslocamento ou intensificação no decorrer do dia já que havia apenas uma imagem de satélite por dia. Os campos de precipitação via radar obtidos nesses dias mostraram células convectivas com dimensões horizontais predominantemente menores que 100 km^2 localizadas no quadrante sudeste. Os RHI's indicam que a chuva foi proveniente de nuvens rasas. A análise dos dados de superfície evidenciou que o dia 23 foi o dia mais quente do mês, com registros de 8/8 de nuvens baixas às 12:00 e 24:00 TMG e apenas 1/8 de nuvens às 18:00 TMG.

É fácil constatar, para todo o período, que há formação de células convectivas quando a energia convectiva da parcela é alta, independentemente do sistema de circulação atuante. Por outro lado, convém ressaltar que a grande escala teve papel fundamental no volume total de chuva observado no período, pois sistemas de origem frontal oriundos do sul do País e vórtices ciclônicos de ar superior foram responsáveis pelas maiores áreas cobertas com chuva observadas via radar.

A região de Petrolina está localizada numa área sujeita à influência quase permanente da ASAS, responsável por uma grande incidência de inversões térmicas acompanhadas de secagem atmosférica, produzida pelo ar subsidente em grande escala cujo efeito é inibir o desenvolvimento vertical das nuvens e, conseqüentemente, a precipitação local.

É provável que a ASAS tenha sido responsável pelo número de ecos relativamente baixo registrado no dia 26 de fevereiro, quando a energia convectiva da parcela foi uma das mais altas no período, ou seja, 3,02 J/g. A Figura 4.12 mostra perfis verticais de θ , θ_e e θ_{es} para o dia 26 de fevereiro. Ambas as sondagens mostram a presença de inversões de subsidência com camadas convectivamente instáveis abaixo da base da inversão e camadas estáveis acima. As sondagens evidenciam também o aquecimento nos baixos níveis em virtude da irradiação, com uma camada bem misturada da superfície até a base da inversão. Os registros de radar mostram poucas células de precipitação, sendo que 77% delas tinham áreas menores que 100 km².

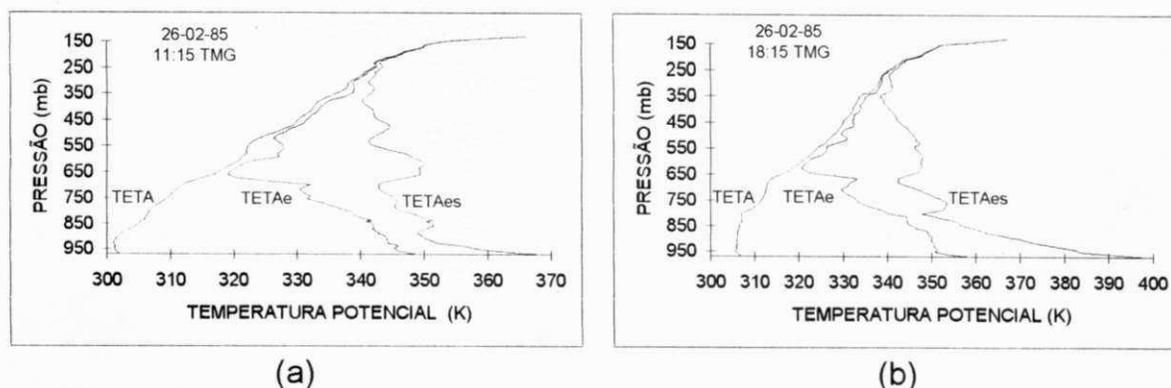


Fig. 4.12 - Perfis verticais de θ , θ_e e θ_{es} do dia 26 de fevereiro de 1985 para os horários das: (a) 11:15 TMG e (b) 18:15 TMG.

Convém ressaltar que no dia 01 de abril de 1985, quando a energia convectiva foi de 3,06 J/g e o número de ecos observados proporcionalmente alto, a sondagem das 12:00 TMG evidenciou a presença de uma inversão de subsidência intensa, com uma camada convectivamente instável e úmida entre a superfície e a base da inversão e uma camada estável e seca acima dela (Fig. 4.13). Os RHI's mostram ecos profundos e intensos. Nesse caso a convergência em grande escala contribuiu para vencer as forças estabilizantes e liberar a instabilidade, produzindo células intensas. No mês de abril a ZCIT foi o sistema de circulação dominante.

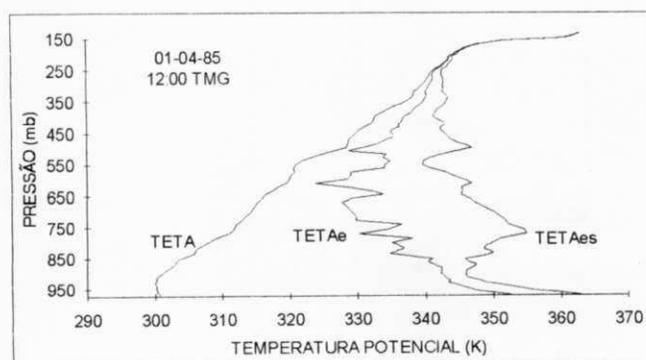


Fig. 4.13 - Perfis verticais de θ , θ_e e θ_{es} do dia 01 de abril de 1985 para o horário das 12:00 TMG.

4.2.1.2 Emáx e as dimensões verticais dos ecos

As grandes áreas positivas observadas nos tefigramas no processo do cálculo da Emáx mostrou que, à exceção de poucos dias, a instabilidade estática necessária para formação de nuvens esteve sempre presente favorecendo a ocorrência da convecção. Esse fato motivou avaliar o grau de influência das condições de superfície no desenvolvimento vertical das nuvens, através da obtenção da correlação entre a Emáx e a altura média dos ecos observados. Como já discutido anteriormente, a forma de obtenção dos dados do radar impossibilitou determinar a altura máxima atingida pelos ecos durante seu ciclo de vida. A Figura 4.14 mostra o diagrama de dispersão entre a Emáx e a altura média dos ecos. O grande espalhamento dos pontos bem como o baixo coeficiente de correlação (0,49), sugerem uma relação fraca entre as variáveis.

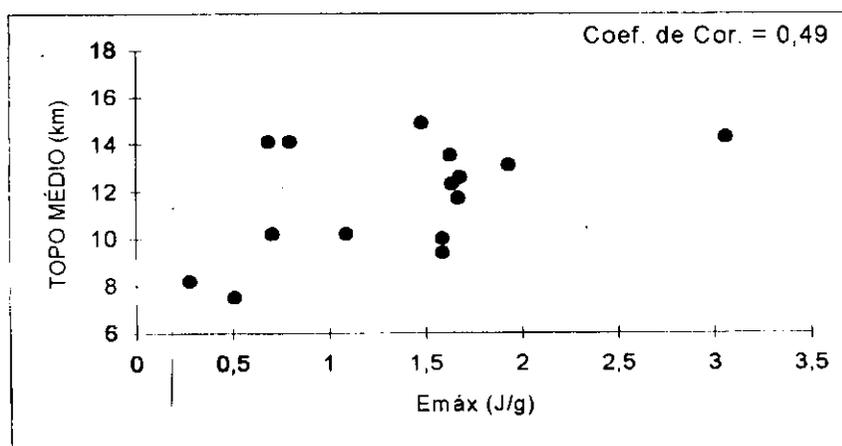


Fig. 4.14 - Diagrama de dispersão entre a energia máxima da parcela à superfície (Emáx) e a altura média diária dos topos dos ecos.

Diante do resultado inesperado e considerando a completa ausência de critérios na obtenção dos RHI's, foram correlacionados valores médios mensais da $E_{máx}$ com valores médios mensais das alturas médias dos ecos.

O diagrama de espalhamento entre a média mensal da $E_{máx}$ e a média mensal das alturas médias dos ecos é apresentado na Figura 4.15. O coeficiente de correlação igual a 0,87 caracteriza a relação direta entre as variáveis.

É importante ressaltar que os valores médios mensais dos topos de ecos podem não representar os valores exatos da profundidade atingida pelos sistemas em cada mês. O cálculo da correlação usando valores médios mensais, embora com uma amostragem pequena, permitiu avaliar se existe dependência entre as variáveis analisadas enquanto filtra efeitos importantes como o conteúdo de água presente na atmosfera e a contribuição do ciclo diurno diretamente associada à transferência de energia proveniente da radiação solar.

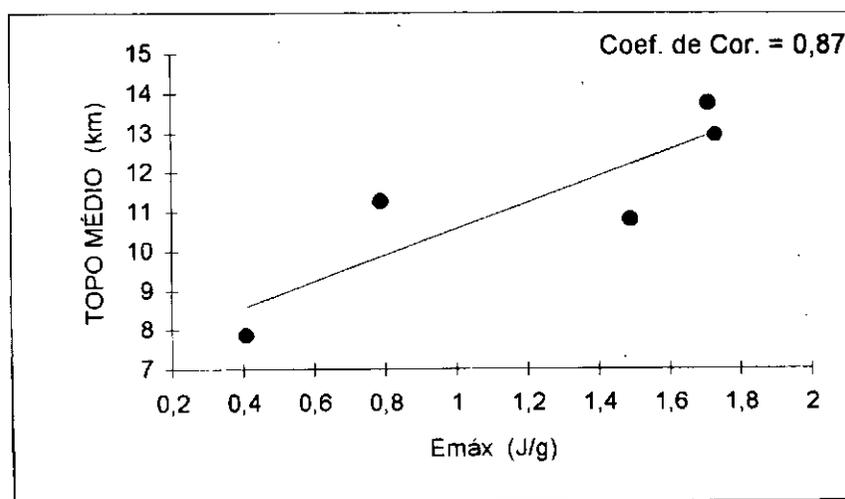


Fig. 4.15 - Diagrama de dispersão entre as médias mensais da energia máxima da parcela à superfície ($E_{máx}$) e a médias mensais das alturas dos topos dos ecos.

Os resultados obtidos também indicam que, em algumas situações, os movimentos em escala sinótica foram fundamentais para liberar a instabilidade latente e produzir convecção profunda. Cheng e Houze (1979), analisando ecos de radar observados no GATE, verificaram que grandes eventos de precipitação em mesoescala estavam associados a forçantes de grande escala em conjunto com a convecção profunda cujos topos atingiram níveis próximos ou superiores ao nível de flutuação zero.

4.2.2 Em_{áx} e a precipitação via pluviômetros

Ainda com o objetivo de quantificar o grau de dependência entre parâmetros termodinâmicos do meio ambiente e o efeito da convecção, foi obtida a correlação entre Em_{áx} e a precipitação acumulada em 24 horas de uma rede de 235 postos pluviométricos distribuídos dentro de um círculo com raio de 250 km centrado em Petrolina-PE.

A correlação entre a Em_{áx} e a precipitação foi analisada separadamente, considerando o total diário de chuva dentro dos raios de 50, 100, 150, 200 e 250 km. Os valores dos coeficientes de correlação para cada mês são apresentados na Tabela 4.6. É evidente que apenas o mês de abril apresenta valores significativos de correlação.

Estatisticamente, os baixíssimos valores dos coeficientes de correlação sugerem uma completa independência entre as variáveis. Por outro lado, a análise anterior, usando ecos de radar, mostrou que existe uma relação positiva

TABELA 4.6

COEFICIENTES DE CORRELAÇÃO ENTRE $E_{máx}$ E O TOTAL DE PRECIPITAÇÃO NUM RAIO DE 50, 100, 150, 200 E 250 KM, CENTRADOS EM PETROLINA-PE.

Raio (km)	Número de postos	Coeficiente de Correlação (r)					
		Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Maio	Junho
50	14	-0,29	-0,02	0,29	0,47	-0,20	0,13
100	40	-0,36	-0,19	0,21	0,68	-0,17	0,20
150	86	-0,32	-0,24	0,29	0,68	-0,02	0,15
200	154	-0,20	-0,23	0,14	0,67	0,19	0,06
250	235	-0,14	-0,45	0,24	0,56	0,28	0,03

entre a $E_{máx}$ e a atividade de precipitação. Esses resultados evidenciam a grande importância da estimativa da precipitação convectiva através do radar meteorológico. A alta resolução espacial das medidas permite monitorar a formação e o desenvolvimento das células precipitantes distribuídas numa determinada área. Avaliação dessa natureza é impossível através de registros pluviométricos. É importante ressaltar que um alto valor de energia convectiva obtido através da sondagem efetuada na sede do radar, não implica necessariamente que a precipitação decorrente dessa instabilidade ocorra naquele exato local.

Os coeficientes de correlação calculados para o mês de janeiro indicam que existe uma relação negativa entre as variáveis. Esse resultado é inaceitável quando considerada a relação causa efeito. É mais coerente supor que a probabilidade da formação de nuvens aumente em função da quantidade de energia convectiva. Ocorre que nesse mês o total pluviométrico foi bem acima da normal e, de acordo com os PPI's, houve uma alta frequência de ecos com áreas maiores que 400 km². Assim, a ausência de correlação positiva sugere que a

grande escala determinou a formação e a distribuição da chuva observada. É importante lembrar que, em média, a $E_{máx}$ de janeiro não é baixa e varia pouco de um dia para outro. Logo, é razoável supor que movimentos verticais de intensidade moderada seriam suficientes para liberar a instabilidade latente mesmo nos dias em que a grande escala não atuou de forma predominante.

Os valores da $E_{máx}$ e o total diário da precipitação para os postos dentro de um raio de 100 km são apresentados na Tabela 4.7. Os diagramas de dispersão para cada mês são ilustrados na Figura 4.16.

É provável que o grande espalhamento dos pontos nos diagramas de dispersão resulte principalmente da má distribuição espacial dos postos pluviométricos para este tipo de análise. Essa é uma agravante particularmente importante em regiões nas quais a precipitação é predominantemente do tipo convectivo como aquela coberta pelo radar de Petrolina-PE. Nessas regiões registros de pluviômetros situados em localidades próximas podem ser bastante diferentes já que a chuva ocorre em áreas isoladas. É importante assinalar que a dispersão dos pontos é muito grande mesmo no caso das análises efetuadas com os registros dentro dos raios de 100 e 150 km, cujos valores dos coeficientes de correlação foram consideravelmente maiores. Esse resultado sugere que, além da orografia, mecanismos dinâmicos de diferentes escalas foram responsáveis pela formação e distribuição da chuva no período observado.

TABELA 4.7

ENERGIA MÁXIMA DA PARCELA À SUPERFÍCIE ($E_{máx}$) E TOTAL DE PRECIPITAÇÃO VIA PLUVIÔMETROS

DIAS	Janeiro		Fevereiro		Março		Abril		Maio		Junho	
	$E_{máx}$ (J/g)	Chuva (mm)										
1			1,37	238,8			3,06	340,8				
2							2,18	96,1				
3											0,07	10,0
4			0,94	16,4					1,59	23,9	0,71	137,9
5			1,95	4,8							0,80	819,7
6											1,59	147,7
7					2,08	19,6						
8							1,55	618,0	1,21	42,3		
9							3,28	672,3	0,87	24,7		
10							1,93	322,6	0,45	17,8	0,62	236,7
11							0,69	248,6				
12					1,68	63,4	1,63	343,4			0,55	5,2
13												
14									0,23	10,3		
15							0,78	54,9	0,63	33,0		
16							1,01	26,0	1,43	2,0		
17	2,49	433,9					0,75	8,9	0,27	5,8		
18	1,67	680,1					0,99	6,6				
19	2,09	383,3					0,50	52,0				
20									0,64	10,6		
21	1,59	91,6			1,71	26,2			1,20	10,4		
22	1,64	800,6			2,55	780,5			1,68	40,6		
23	1,48	736,2					0,18	26,7	0,06	43,3		
24	1,09	863,4					0,95	126,1	0,22	57,4		
25	1,61	239,0			0,69	10,8	0,95	216,7				
26			3,02	19,0			0,58	72,9				
27			1,98	38,4	1,24	538,7			0,51	31,8		
28	1,67	256,1	1,21	0	2,17	202,2			0,98	15,5		
29	1,90	510,5			1,68	1298	2,10	221,8				
30	1,75	545,5					1,27	53,3	0,28	43,6		
31	1,85	171,6							0,48	24,8		

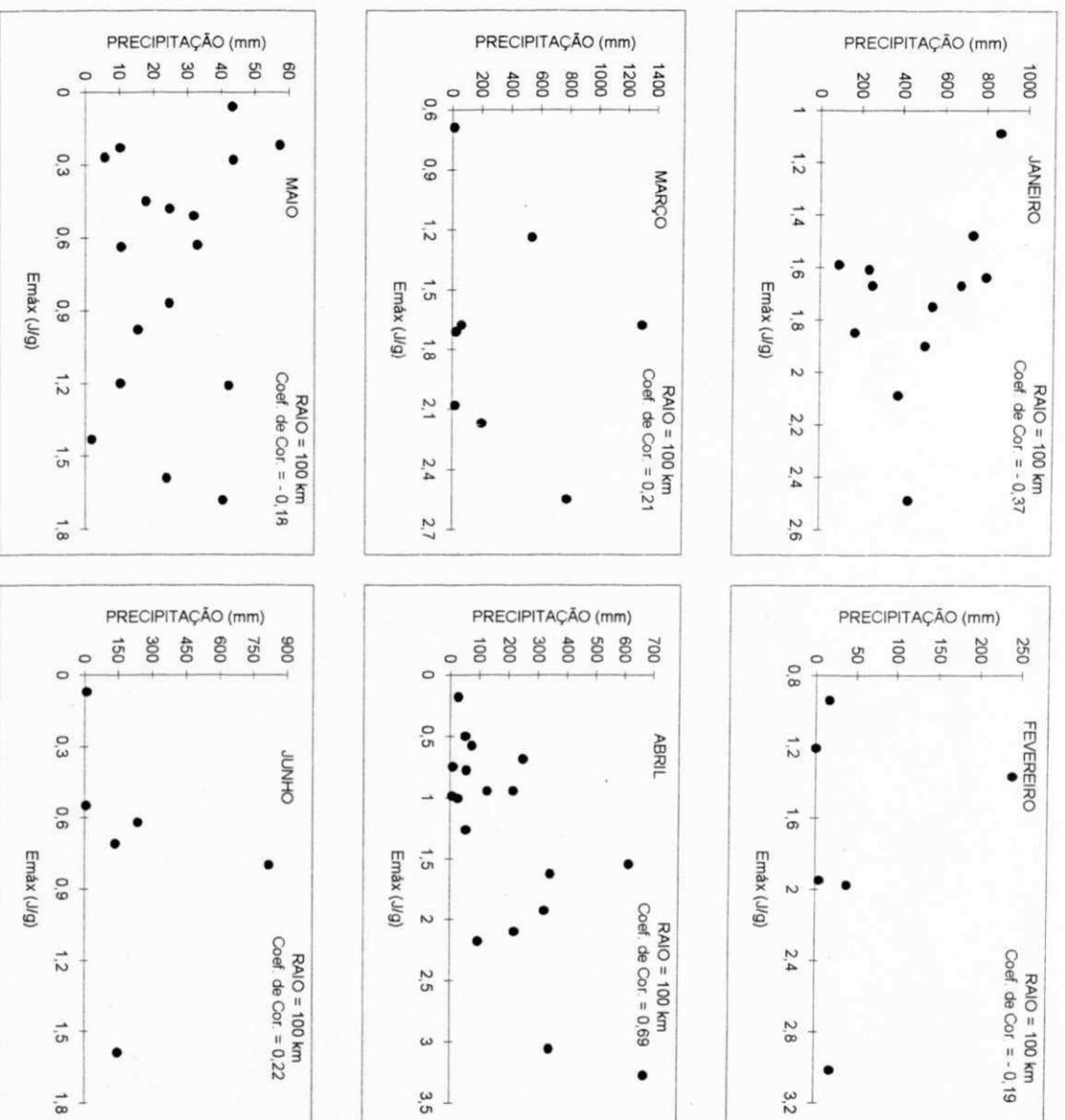


Fig. 4.16 - Diagrama de dispersão entre a energia máxima da parcela à superfície ($E_{m\acute{a}x}$) e o total diário de precipitação coletado pelos postos pluviométricos dentro do círculo com raio de 100 km centrado no local do radar.

O grau de influência de fatores mais localizados na precipitação registrada foi analisado por meio da análise de correlação por quadrante. Os resultados encontrados não apresentaram diferenças significativas em relação aqueles já obtidos, indicando que a distribuição da chuva foi determinada por circulação de escala maior.

No caso específico do mês de abril, as grandes áreas cobertas com precipitação, distribuídas em toda a área de alcance do radar, devem ter sido responsáveis por campos de chuva mais homogêneos e, conseqüentemente, por registros pluviométricos mais uniformes e uma melhor correlação. No mês de abril a convergência em grande escala associada a ZCIT favoreceu a ocorrência de convecção profunda ocasionando uma maior incidência de precipitação em mesoescala proveniente das bigornas das nuvens cumulonimbus.

4.3 Sistemas de Circulação Atmosférica e os Ecos do Radar de Petrolina-PE

Na primeira sub-seção são identificados os sistemas atmosféricos de grande escala que, no período de estudo, atuaram no Nordeste e, conseqüentemente, na área de cobertura do radar. O material apresentado está organizado de forma tal que inicialmente são abordados os sistemas de origem frontal. A razão básica para isso está no fato de que eles são os sistemas identificados de forma mais completa com o conjunto de dados disponível. O mês de fevereiro não é utilizado nessa etapa devido a não disponibilidade dos dados de superfície de Caravelas para esse mês. A seguir, é feita uma discussão, mês a mês, com o objetivo de identificar outros sistemas que atuaram no Nordeste em cada um dos meses estudados.

Na segunda sub-seção são discutidos exemplos de campos de precipitação obtidos via radar procurando relacioná-los, não só com os sistemas atmosféricos atuantes, como também com aspectos dinâmicos e termodinâmicos da atmosfera em Petrolina.

4.3.1 Fenômenos atmosféricos de grande escala e sua atuação no Nordeste do Brasil

Kousky (1985), Cavalcanti (1986) e Silva Aragão e Correia (1994) procuraram identificar os fenômenos atmosféricos que atuaram no Nordeste em 1985, ano classificado por Uvo (1989) como chuvoso na região norte do Nordeste do Brasil. Os valores constantes da Tabela 4.8 evidenciam que no primeiro semestre de 1985 Petrolina foi beneficiada com totais pluviométricos mensais que, em sua maioria, estiveram acima dos valores constantes das Normais Climatológicas (1961 - 1990) publicadas pelo INMET. Fevereiro e março tiveram chuva abaixo da normal em Petrolina. Apesar disso, o total pluviométrico registrado no período de janeiro a junho (775,4 mm) foi 27% acima da normal anual, que é de 609,8 mm, e 80% acima da normal do semestre. Os meses de janeiro e abril foram os que mais contribuíram para esses percentuais. A tabela também evidencia que o total semestral observado em Caravelas foi, pelo menos, 34% acima da normal do semestre, uma vez que o valor de fevereiro não está disponível. Os meses de janeiro e abril foram também os que mais contribuíram para esse percentual. É razoável supor que diferentes sistemas atmosféricos contribuíram para os elevados totais pluviométricos observados. Inicialmente, foi investigada a influência de sistemas de origem frontal no Nordeste.

A metodologia apresentada na seção 3.3.5 foi utilizada na detecção de passagens frontais ocorridas em Caravelas-BA, no primeiro semestre de 1985, com exceção do mês de fevereiro. Os resultados são apresentados na Tabela 4.9.

TABELA 4.8

PRECIPITAÇÃO MENSAL (mm) E NÚMERO DE DIAS COM CHUVA

MÊS	NOME DA ESTAÇÃO							
	PETROLINA				CARAVELAS			
	VALOR DA NORMAL	VALOR DE 1985			VALOR DA NORMAL	VALOR DE 1985		
	CHUVA	CHUVA	% DA NORMAL	Nº DIAS COM CHUVA	CHUVA	CHUVA	% DA NORMAL	Nº DIAS COM CHUVA
Jan	72,2	318,4	441,0	20	125,9	398,6	316,6	16
Fev	90,3	83,9	92,9	09	64,8	-	-	
Mar	147,9	119,0	80,5	09	112,3	67,5	60,1	07
Abr	81,7	184,0	225,2	12	144,0	257,5	178,8	22
Mai	28,5	41,0	143,9	09	119,7	150,8	126,6	17
Jun	10,1	29,1	288,1	07	97,3	16,2	16,4	06
Total	430,7	775,4	180,0	66	664,0	890,6	134,1	68

TABELA 4.9

NÚMERO DE PASSAGENS FRONTAIS E RESPECTIVOS DIAS DE OCORRÊNCIA EM CARAVELAS-BA

MÊS	PASSAGEM FRONTAL			
	TIPO I		TIPO II	
	NÚMERO TOTAL	DIAS DA OCORRÊNCIA	NÚMERO TOTAL	DIAS DA OCORRÊNCIA
Janeiro	0		0	
Fevereiro	-		-	
Março	0		02	23, 27
Abril	0		03	06, 12, 19
Maio	01	22	03	01, 10, 29
Junho	01	10	03	04, 19, 23
Total	02		11	

Os valores constantes da Tabela 4.9 são comparáveis, em média, àqueles obtidos por Kousky (1979). É interessante observar que não foram detectadas passagens frontais em janeiro, mês em que o total pluviométrico foi 217% e 340% acima da normal em Caravelas e Petrolina, respectivamente.

As Figuras 4.17 a 4.21 ilustram as séries temporais da pressão e temperatura do bulbo úmido médias diárias para o período de janeiro a junho de 1985, com exceção de fevereiro. A simples comparação visual, mês a mês, entre as séries que constituem cada par evidencia que as variações ocorridas em Caravelas são maiores do que as de Petrolina. Ela ainda sugere uma boa concordância entre as variações existentes nas séries das duas localidades nos meses de maio e junho. Uma análise de correlação linear aplicada às séries de pressão resultou em valores altos para os coeficientes de correlação somente nos meses de março (0,72), maio (0,71) e junho (0,90). No caso das séries de temperatura do bulbo úmido, coeficiente alto foi obtido somente no mês de junho (0,68). O conjunto desses resultados sugere que apenas no mês de junho houve mudança de massa de ar na região de Petrolina. Tais resultados são semelhantes aqueles obtidos por Silva Aragão e Correia (1994), com exceção do mês de maio, já que as autoras obtiveram coeficientes de correlação altos para os dois pares de séries.

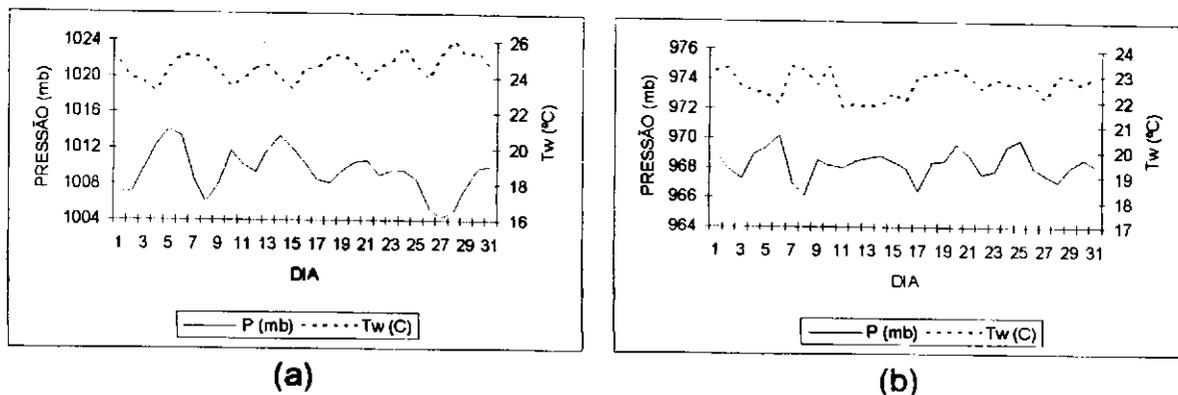


Fig. 4.17 - Pressão (mb) e temperatura do bulbo úmido (°C) médias diárias para janeiro em: (a) Caravelas e (b) Petrolina.

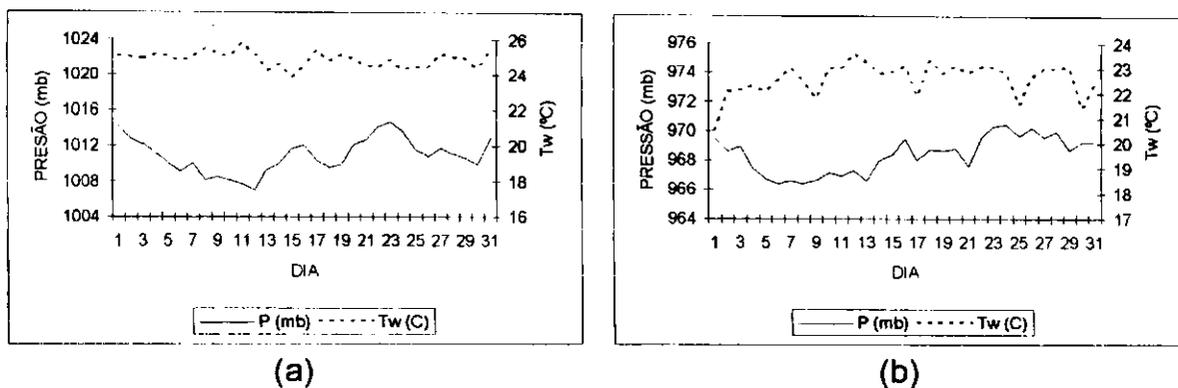


Fig. 4.18 - Pressão (mb) e temperatura do bulbo úmido (°C) médias diárias para março em: (a) Caravelas e (b) Petrolina.

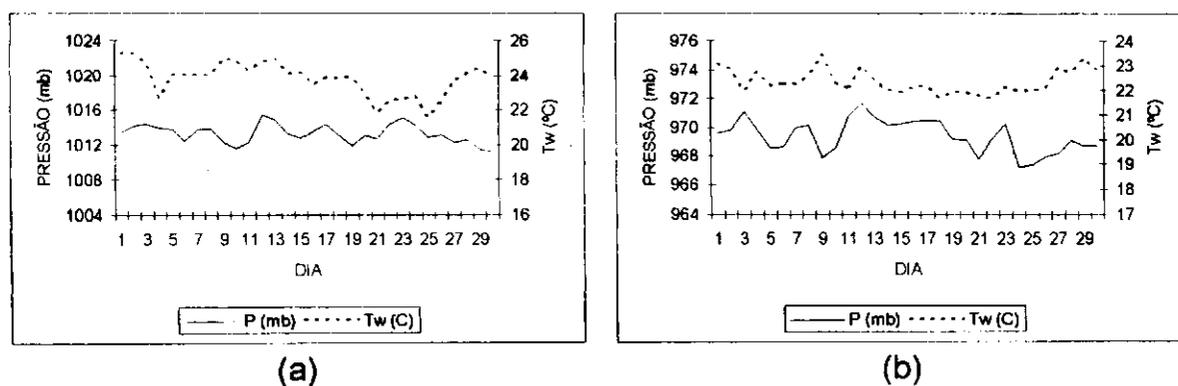


Fig. 4.19 - Pressão (mb) e temperatura do bulbo úmido (°C) médias diárias para abril em: (a) Caravelas e (b) Petrolina.

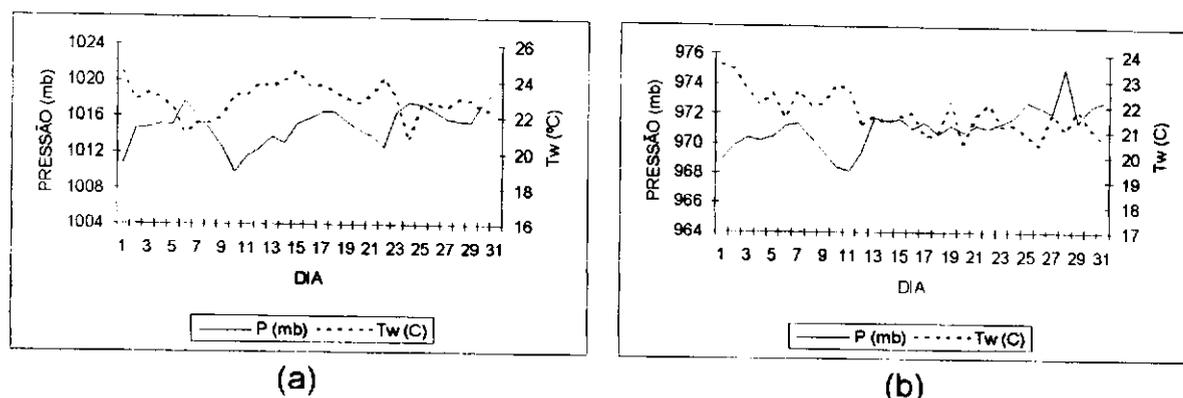


Fig. 4.20 - Pressão (mb) e temperatura do bulbo úmido (°C) médias diárias para maio em: (a) Caravelas e (b) Petrolina.

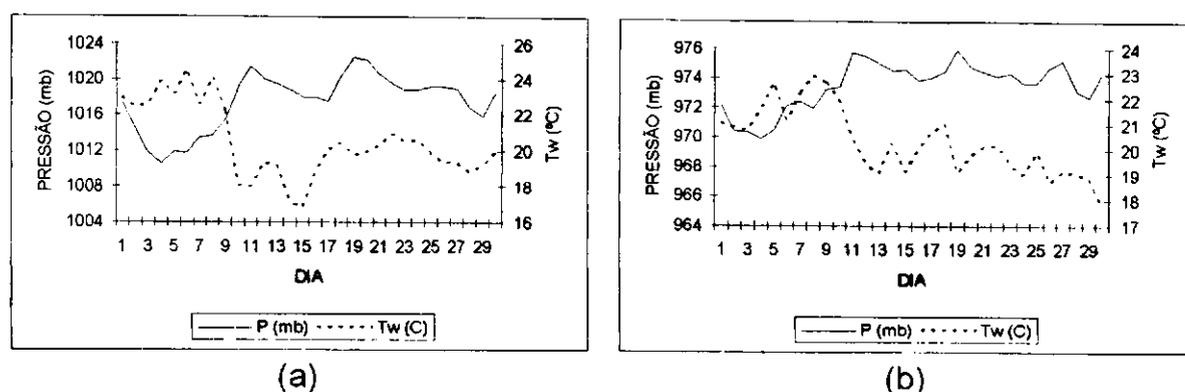


Fig. 4.21 - Pressão (mb) e temperatura do bulbo úmido (°C) médias diárias para junho em: (a) Caravelas e (b) Petrolina.

É interessante relacionar agora, para cada mês, as informações contidas na Tabela 4.8 com os resultados da análise de correlação linear, as imagens de satélite e as demais informações meteorológicas em superfície.

4.3.1.1 Janeiro de 1985

As imagens de satélite indicam que durante esse mês a nebulosidade da ZCIT se manteve próxima ou ao norte do equador na parte central e leste do Atlântico. O Nordeste e regiões oceânicas adjacentes estiveram sob a influência

do cavado do Nordeste (cavado da alta troposfera) nos primeiros oito dias do mês. Um vórtice ciclônico da alta troposfera dominou no restante do período o que foi evidenciado pela nebulosidade em forma de arco típica de tais sistemas (Kousky e Gan, 1981). É interessante assinalar que o Nordeste e, mais especificamente, a área de cobertura do radar, esteve sob a influência do setor oeste do vórtice enquanto que a extremidade leste da nebulosidade do setor norte do vórtice se unia a da ZCIT situada sobre o centro e leste do Atlântico.

Os mapas de superfície mostram que, na maioria dos dias do mês, o Nordeste esteve dominado por pressão relativamente baixa devido a presença, a oeste, de um anticiclone sobre a Amazônia e, a leste, da ASAS. Os mapas mostram ainda que nesse mês os sistemas frontais não conseguiram avançar além do Estado do Espírito Santo. Essas características são confirmadas pelas séries de vento de Caravelas (Fig. 4.22a) e Petrolina (Fig. 4.22c). É evidente a presença em Caravelas de ventos de nordeste na quase totalidade do mês enquanto que em Petrolina o vento é bastante variável.

A constância na direção do vento em Caravelas indica o domínio da ASAS e sugere uma situação de bloqueio, na qual os sistemas frontais estariam impedidos de avançar para nordeste reforçando, assim, a faixa de nebulosidade convectiva associada à zona de convergência do Atlântico Sul (ZCAS). Lacava (1995) propôs um esquema idealizado da circulação atmosférica existente em tais situações (Fig. 4.23). Nos baixos níveis (Fig. 4.23a), a circulação da ASAS transporta umidade do oceano para o continente enquanto que outro anticiclone, situado sobre a Amazônia, favorece o transporte de umidade para leste até

próximo de 50°W. Nos altos níveis (Fig. 4.23b), o anticiclone da Bolívia associado a um vórtice ciclônico da alta troposfera com centro a leste do Nordeste, provoca uma configuração de bloqueio que impede o avanço para nordeste dos sistemas de origem frontal.

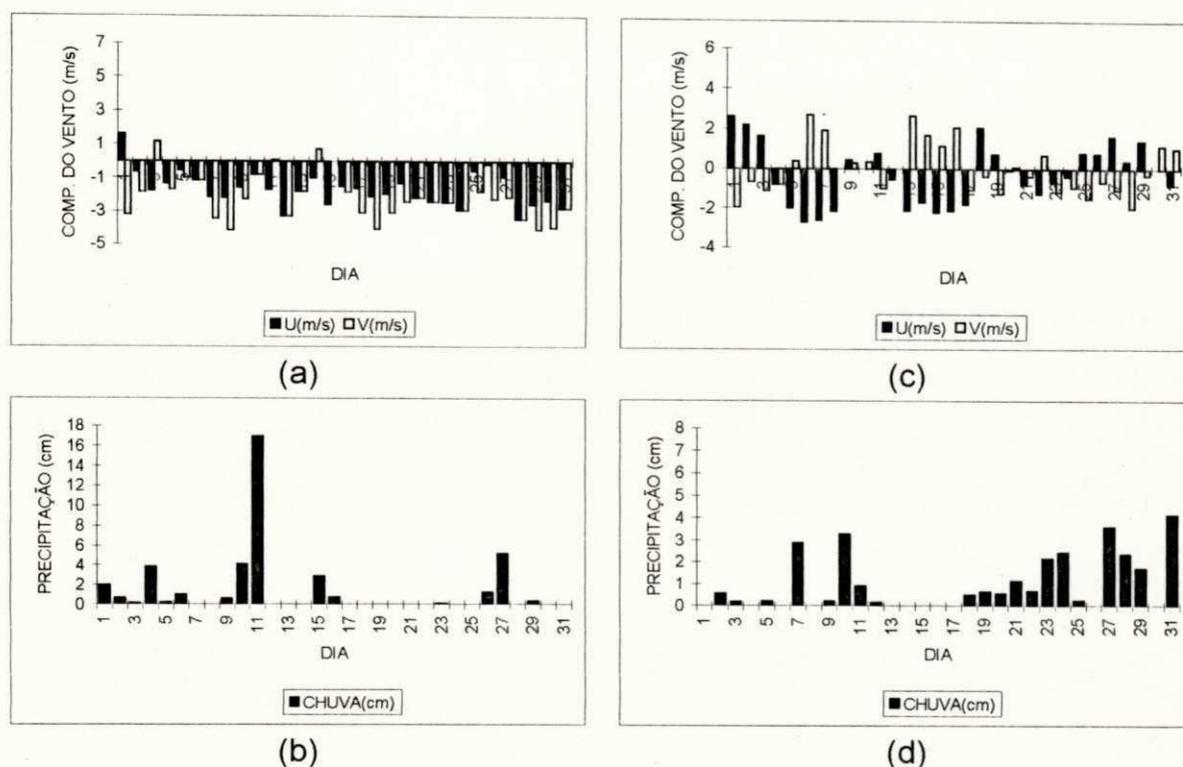
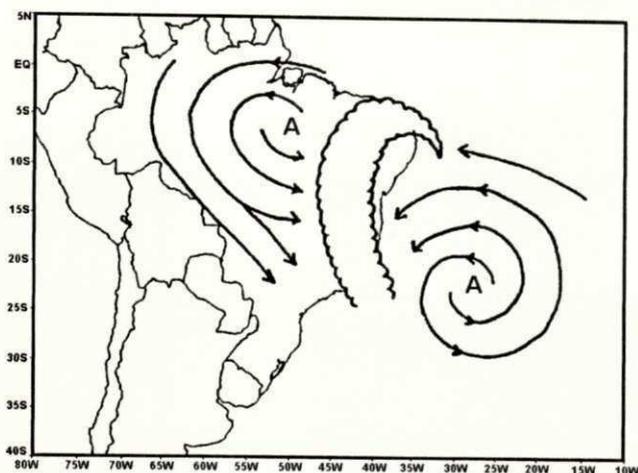
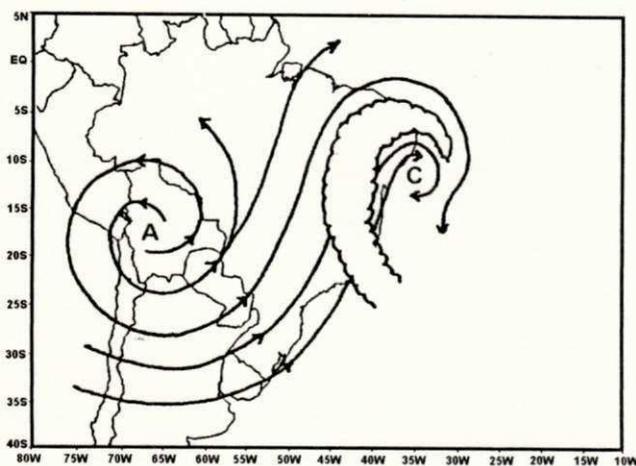


Fig. 4.22 - Componentes zonal (u) e meridional (v) médias diárias (m/s) do vento à superfície e precipitação total diária (cm) para janeiro de 1985 em: (a)-(b) Caravelas e (c)-(d) Petrolina. Valores positivos (negativos) de u representam componente de oeste (leste). Valores positivos (negativos) de v representam componente de sul (norte).

É interessante lembrar que nesse mês Petrolina teve 20 dias de chuva (Fig. 4.22d e Tab. 4.8), sendo que o total pluviométrico foi 441% da normal mensal enquanto que Caravelas teve 16 dias de chuva (Fig. 4.22b e Tab. 4.8) e precipitação de 317% da normal. Convém observar que o percentual de Caravelas foi bastante influenciado pelo total pluviométrico do dia 11.



(a)



(b)

Fig. 4.23 - Esquema ilustrando a circulação para os casos tipo S em (a) baixos níveis e (b) altos níveis (Fonte: Lacava, 1995).

A discussão aqui apresentada será complementada na segunda parte deste capítulo com o estudo de caso de um vórtice ciclônico da alta troposfera.

4.3.1.2 Fevereiro de 1985

Nos primeiros nove dias deste mês a ZCIT pode ser identificada nas imagens de satélite como uma banda de nebulosidade convectiva zonalmente

orientada sobre o Atlântico, próximo ao equador. Aglomerados convectivos a ela associados penetram no Nordeste vindos de norte.

No período entre os dias 10 e 15 a ZCIT se apresenta menos ativa, com exceção da área oceânica imediatamente a norte e leste do Nordeste. A partir do dia 16 ela se reorganiza, orientada de sudoeste-nordeste, desde a costa da África, próximo ao ponto de coordenadas (06°N, 10°W), até a extremidade nordeste do Estado do Rio Grande do Norte. Essa configuração permanece até o final do mês, embora apresente pouca convecção profunda em alguns dias.

A presença do cavado do Nordeste ou de um vórtice ciclônico da alta troposfera também é evidente em vários dias deste mês. A exemplo de janeiro, nesses casos a nebulosidade associada a ZCIT se confunde com aquela situada no setor norte do cavado/vórtice ciclônico da alta troposfera.

Há várias ocasiões nos últimos vinte dias do mês em que aglomerados convectivos influenciam a parte norte do Nordeste. Esses casos parecem se subdividir em dois tipos: um corresponde a aglomerados associados a ZCIT que atingem o Nordeste vindos de norte e outro corresponde a aglomerados que parecem se formar no norte do Nordeste associados à circulação no setor norte de um vórtice ciclônico da alta troposfera.

As imagens sugerem ainda que, durante todo o mês, aglomerados de nuvens baixas e médias, possivelmente associados a distúrbios de leste, se deslocam na área da ASAS atingindo o litoral leste do Nordeste. Há ocasiões em

que esses aglomerados parecem se intensificar próximo ao litoral, já que passam a apresentar áreas de convecção profunda. Evidentemente, o acompanhamento adequado da evolução de tais sistemas de nuvens requer a utilização de, pelo menos, quatro imagens diárias, o que não estava disponível para este trabalho.

O campo da pressão ao nível médio do mar se apresenta mais diversificado sobre o Nordeste neste mês. Três configurações básicas podem ser mencionadas: (a) aquela predominante no mês de janeiro, (b) domínio da circulação da ASAS e (c) domínio de cavados fracos situados no flanco equatorial da ASAS. Vale salientar que essa diversidade no campo da pressão é, de maneira geral, compatível com as características observadas nas imagens de satélite.

4.3.1.3. Março de 1985

Nas imagens de satélite deste mês a ZCIT se apresenta pouco ativa até o dia 5. No período de 6 a 13, intensos aglomerados convectivos de escala sub-sinótica originários da África atingem o norte do Nordeste após se deslocar zonalmente sobre o Oceano Atlântico em latitudes próximas ao equador. Esses aglomerados deixam a África próximo ao ponto (0°, 10°E) e são mais freqüentes, mais intensos e de área maior do que aqueles vistos em fevereiro. No restante do mês, a ZCIT se apresenta orientada de sudoeste-nordeste na quase totalidade dos dias, orientação essa análoga a que foi vista em fevereiro. Alguns dias desse último período apresentam aglomerados convectivos como aqueles vistos no período de 6 a 13.

A presença do cavado do Nordeste ou de um vórtice ciclônico da alta troposfera é evidente na maior parte dos dias deste mês. Nesses casos, a nebulosidade associada a ZCIT se confunde com aquela situada no setor norte do cavado/vórtice ciclônico da alta troposfera. Há três períodos nos quais a presença de um vórtice ciclônico da alta troposfera é bem evidente nas imagens de satélite: 07 a 11, 18 a 23 e 28 a 31.

Semelhantemente ao mês de fevereiro, as imagens deste mês sugerem que sistemas de nuvens baixas e médias se deslocam na área da ASAS atingindo o litoral leste do Nordeste.

O campo de pressão ao nível médio do mar mostra as mesmas configurações básicas existentes em fevereiro, embora a frequência de cavados fracos seja maior, o que é compatível com a maior frequência de aglomerados convectivos vista nas imagens. Um aspecto diferente visto em alguns dias deste mês é a presença sobre o Nordeste de um centro de baixa pressão definido por uma isóbara fechada. Os mapas também mostram a ZCIT próxima a costa norte do Nordeste em alguns dias do mês. Ventos do quadrante nordeste dominam Caravelas (Fig. 4.24a) também neste mês. Essa direção muda para sudeste com as passagens frontais dos dias 23 e 27 (Tab. 4.9). Caravelas registra precipitação associada à segunda passagem frontal (Fig. 4.24b). Petrolina apresenta ventos do quadrante sudeste, com exceção de alguns dias no meio e final do mês (Fig. 4.24c). É interessante observar que a quase totalidade dos dias com precipitação (Fig. 4.23d) ocorreu nesses períodos de interrupção dos ventos alísios de sudeste devido ao enfraquecimento da ASAS. Vale salientar que esses

períodos coincidem com os dias de atuação de vórtices ciclônicos da alta troposfera, o que sugere que tais sistemas se estenderam até o nível médio do mar. Petrolina teve 7 dias de chuva e precipitação de 80% da normal.

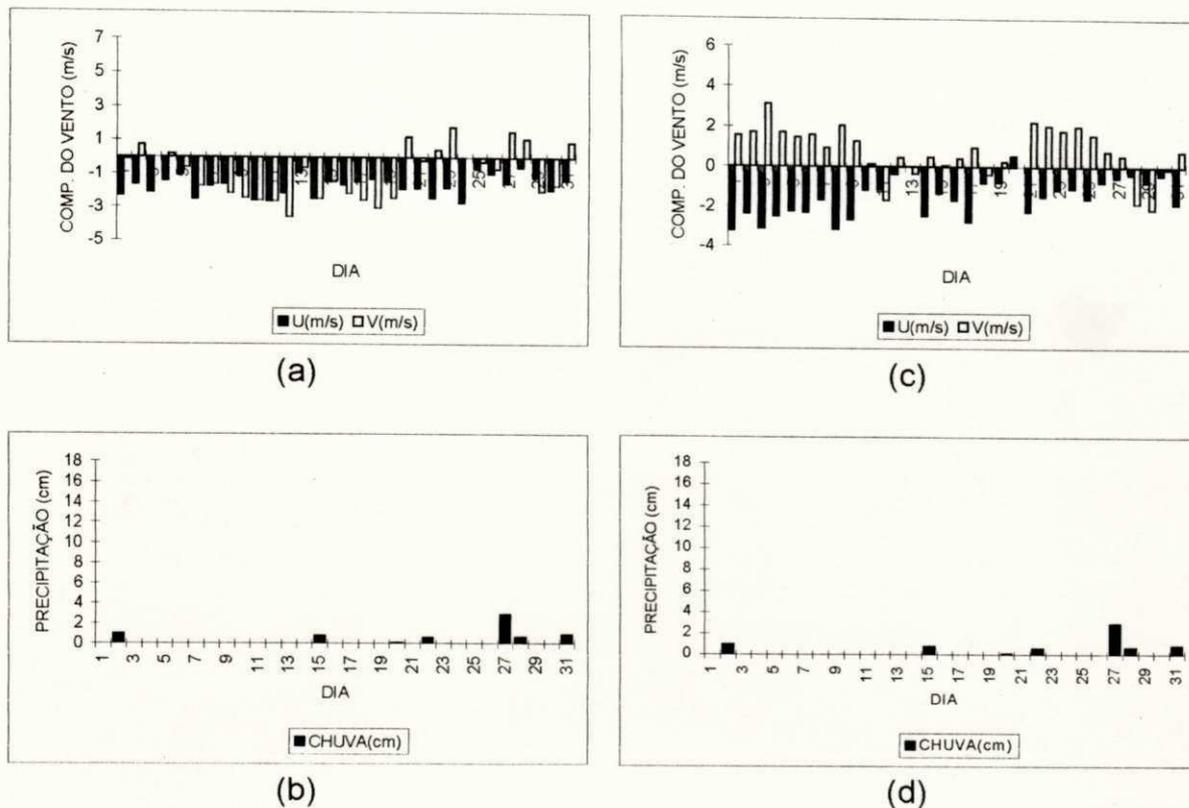


Fig. 4.24 - Componentes zonal (u) e meridional (v) médias diárias (m/s) do vento à superfície e precipitação total diária (cm) para março de 1985 em: (a)-(b) Caravelas e (c)-(d) Petrolina. Valores positivos (negativos) de u representam componente de oeste (leste). Valores positivos (negativos) de v representam componente de sul (norte).

4.3.1.4 Abril de 1985

As imagens de satélite mostram a ZCIT com orientação de sudoeste-nordeste em todos os dias do mês, embora em alguns poucos dias ela quase não apresente convecção profunda. As extremidades leste e oeste dessa banda de nebulosidade ficam em torno dos pontos de coordenadas (8°N, 10°W) e (2°S,

38°W), respectivamente. Por outro lado, há vários dias em que podem ser vistas duas ZCIT (dupla ZCIT), já que há também uma banda de nebulosidade convectiva zonalmente orientada cuja extremidade leste é identificada próximo a (0°, 10°E), na África. Há alguns dias nos quais essa extremidade leste está situada em torno de (7°S, 14°E). Vale assinalar que os aglomerados convectivos vistos neste mês tem, em sua grande maioria, áreas menores do que aqueles vistos no mês de março. Um aspecto importante a assinalar é que a nebulosidade associada a ZCIT atua sobre o norte e extremo leste do Nordeste na maioria dos dias do mês.

O mês de abril também apresenta sistemas de nuvens baixas e médias que se deslocam na área da ASAS atingindo o litoral leste do Nordeste. Geralmente eles se intensificam quando estão próximos ou sobre o litoral. Esses sistemas são essencialmente de dois tipos: (a) um que é visto se deslocar a partir (aparentemente) do centro da ASAS e (b) outro que são resquícios de bandas frontais associadas a centros de baixa pressão que se deslocam para leste-sudeste sobre o Atlântico Sul.

Outro sistema atmosférico identificado neste mês são os vórtices ciclônicos da alta troposfera. Sua frequência é consideravelmente menor do que nos meses anteriores mas podem ser facilmente identificados nos períodos de 4 a 9 e 15 a 17. O cavado da alta troposfera está presente em poucos dias do mês.

Vale salientar que as imagens mostram claramente um processo de ciclogênese em áreas oceânicas subtropicais no período de 16 a 18. Outro

aspecto importante visto em alguns dias do mês é a presença de nebulosidade baixa numa faixa litorânea que se estende do Rio Grande do Norte ao Espírito Santo com, no máximo, 300 km de extensão longitudinal. Fatores orográficos devem desempenhar algum papel na existência dessa nebulosidade.

Neste mês duas características presentes nas cartas de superfície merecem destaque especial: (a) a presença da ZCIT próxima ou sobre a costa norte do Nordeste na maior parte dos dias do mês e (b) a presença, também na maior parte dos dias do mês, de cavados situados na borda equatorial da ASAS. O vento em Caravelas se apresenta bastante variável (Fig. 4.25a) em contraste com os dois meses discutidos anteriormente. As passagens frontais dos dias 6, 12 e 19 (Tab. 4.9) ocorrem associadas a ventos fracos do quadrante sudeste e ocorrência de precipitação (Fig. 4.25b). Petrolina neste mês esteve dominada por ventos do quadrante sudeste (Fig. 4.25c), com intensidade variável, à exceção dos dias 11 e 28 quando o regime dos alísios é interrompido.

Neste mês Caravelas teve 22 dias de chuva e precipitação de 179% da normal (Tab. 4.8 e Fig. 4.25b). Petrolina teve 3 episódios de chuva, totalizando 12 dias de precipitação e um percentual de 225,2% da normal (Tab. 4.8 e Fig. 4.25d).

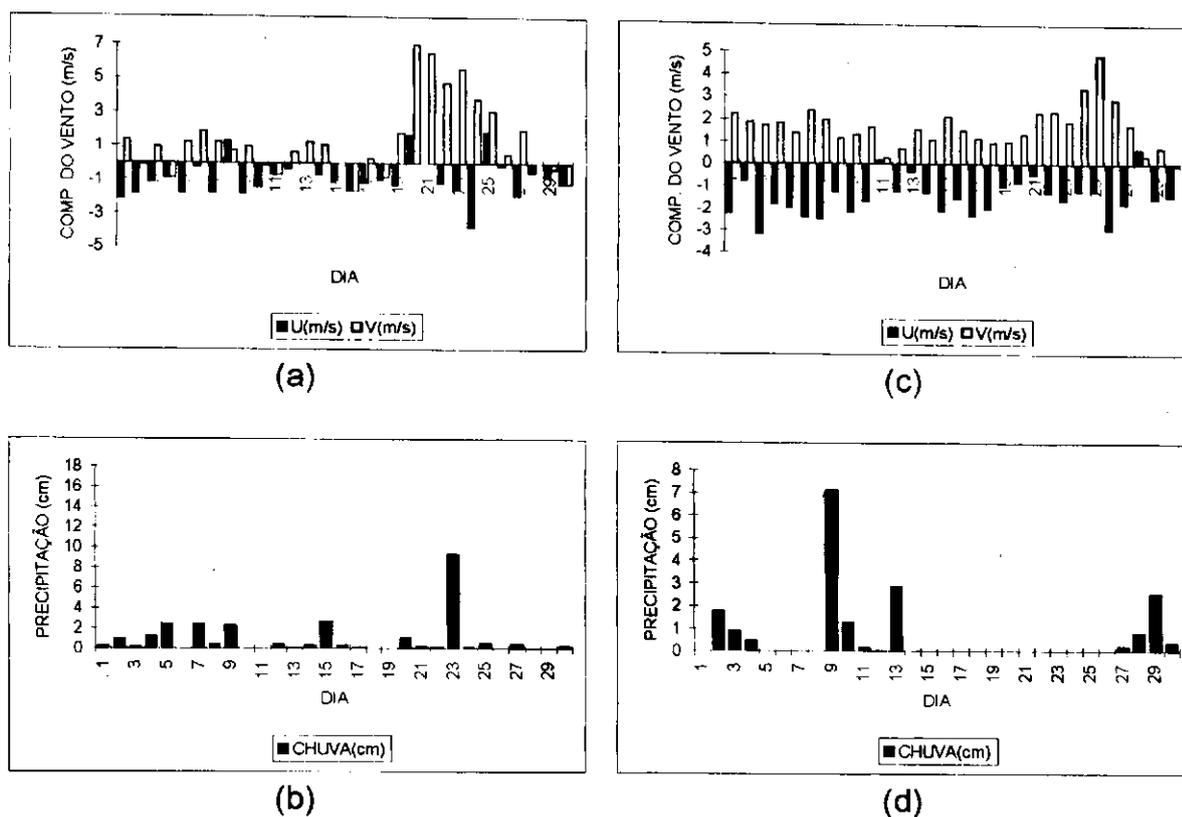


Fig. 4.25 - Componentes zonal (u) e meridional (v) médias diárias (m/s) do vento à superfície e precipitação total diária (cm) para abril de 1985 em: (a)-(b) Caravelas e (c)-(d) Petrolina. Valores positivos (negativos) de u representam componente de oeste (leste). Valores positivos (negativos) de v representam componente de sul (norte).

4.3.1.5. Maio de 1985

Nos primeiros três dias do mês, a banda de nebulosidade associada a ZCIT tem orientação zonal e sua extremidade leste fica em torno de (4°N , 10°E), onde intensos aglomerados convectivos de escala sub-sinótica deixam o continente africano. No período de 4 a 16, a ZCIT se apresenta orientada de sudoeste-nordeste, com extremidades em torno dos pontos (6°N , 10°W) e (4°S , 38°W). Durante esse período também podem ser vistos aglomerados convectivos deixando a África próximo ao ponto (4°N , 10°E). Nos dias 17 a 19 a ZCIT sofre uma gradual mudança de orientação de forma que a partir do dia 20 ela assume

uma orientação zonal estando sua extremidade leste em torno de (6°N, 10°W). Há vários dias no mês em que o litoral norte do Nordeste é influenciado pela nebulosidade associada a ZCIT.

Sistemas de nuvens baixas e médias (distúrbios de leste) que se propagam na área da ASAS influenciam o leste do Nordeste durante todo o mês, a exemplo do que foi visto em meses anteriores. Sistemas desse tipo se deslocando no flanco equatorial da ASAS também afetam o litoral norte do Nordeste. Alguns desses sistemas desenvolvem convecção profunda quando estão próximo ou sobre o litoral, a exemplo do que foi visto em meses anteriores. Vale salientar que há vários dias nos quais o litoral norte é afetado por nebulosidade que parece ser resultado de interação entre a ZCIT e distúrbios de leste.

Uma característica importante que é evidente neste mês é o deslocamento de bandas de nebulosidade frontal, orientadas de noroeste-sudeste, que avançam sobre o leste do continente no sentido sudoeste-nordeste, atingindo latitudes baixas.

Semelhantemente ao mês anterior, nebulosidade baixa é vista numa faixa do leste do Nordeste, com cerca de 300 km de extensão que se estende do Rio Grande do Norte ao sul da Bahia.

Na sequência de mapas de superfície deste mês é consideravelmente menor o número de dias em que a ZCIT esteve próxima do litoral norte do

Nordeste, o que também foi visto nas imagens de satélite. Outro aspecto diferente é que os mapas sugerem que a penetração de sistemas frontais em latitudes baixas provoca a formação de cavados fracos a leste do Nordeste, na área da ASAS. Tal tipo de formação é visto em associação às quatro passagens frontais detectadas em Caravelas neste mês (Tab. 4.9), ou seja, nos dias 01, 10, 22 e 29. Por outro lado, essa formação de cavados devido a penetrações frontais não é evidente nas imagens de satélite embora, como já foi dito anteriormente, elas mostrem, durante todo o mês, sistemas de nuvens baixas e médias que atingem o litoral leste do Nordeste após se deslocar na área da ASAS.

Nas duas séries temporais da pressão média diária (Fig. 4.20) é evidente o mínimo associado à passagem frontal do dia 1. Esse mínimo é seguido do aumento da pressão em resposta à penetração do anticiclone de origem polar. Posteriormente, a pressão volta a diminuir precedendo a passagem frontal do dia 10. Variações de pressão associadas às passagens frontais dos dias 22 e 29 só são percebidas na série de Caravelas.

O vento médio diário em Caravelas sopra dos quadrantes sudeste e sudoeste (Fig. 4.26a) na quase totalidade dos dias desse mês em que o total pluviométrico foi 126% da normal e houve 17 dias de chuva (Tab. 4.8), a maioria dos quais com valor inferior a 10 mm (Fig. 4.26b). As imagens de satélite dos dias 3 e 4 indicam que o total pluviométrico mais elevado do mês, observado no dia 4, foi provocado por uma banda de nebulosidade de origem frontal. Ventos do quadrante sudeste dominam Petrolina (Fig. 4.26c) durante todo o mês. Intensidade mais fraca nos dias 01 e 10 sugere a influência dos sistemas de

origem frontal. Petrolina teve 9 dias de chuva (Tab. 4.8) mas apenas um com total acima de 10 mm (Fig. 4.26d). Essa chuva, com valor acima de 30 mm registrada no dia 2, parece ter sido provocada por um processo de interação entre a ZCIT e o sistema de origem frontal detectado em Caravelas no dia anterior. Vale salientar que esse valor foi acima da normal e que a precipitação total do mês foi 126% da normal (Tab. 4.8)

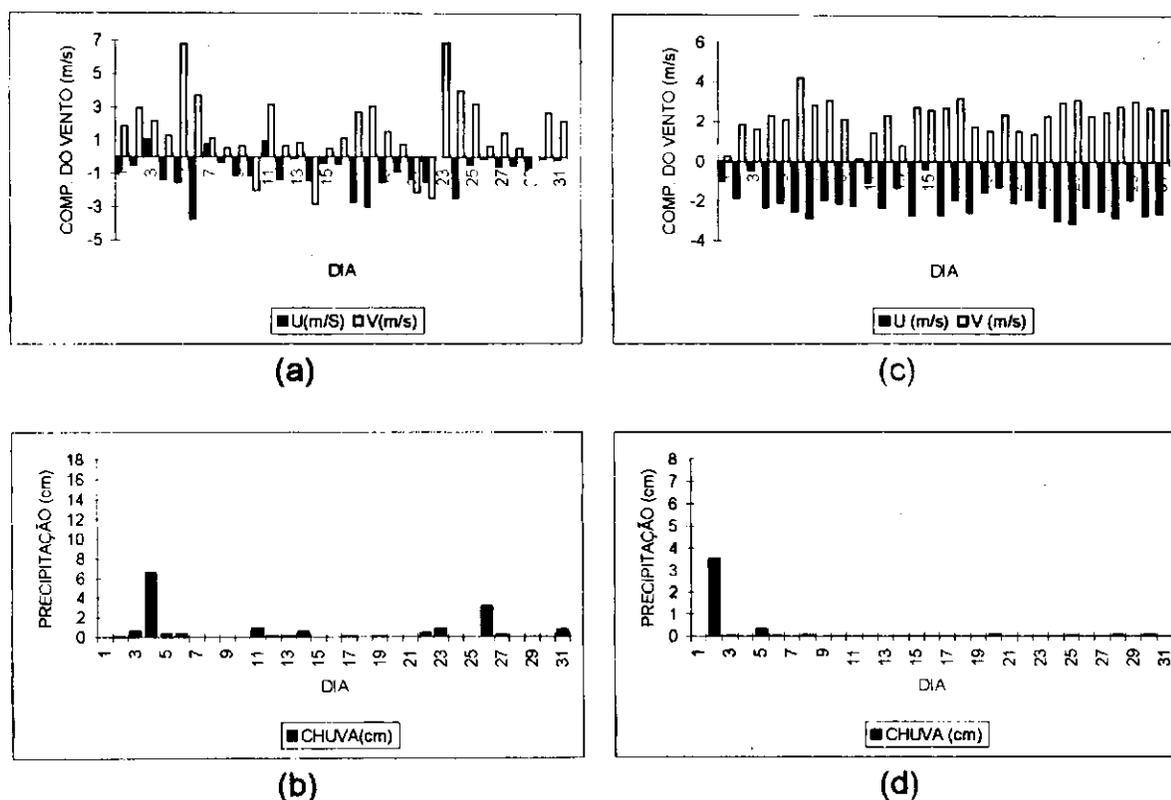


Fig. 4.26 - Componentes zonal (u) e meridional (v) médias diárias (m/s) do vento à superfície e precipitação total diária (cm) para maio de 1985 em: (a)-(b) Caravelas e (c)-(d) Petrolina. Valores positivos (negativos) de u representam componente de oeste (leste). Valores positivos (negativos) de v representam componente de sul (norte).

4.3.1.6. Junho de 1985

Neste mês o Nordeste não é diretamente afetado pela ZCIT, já que a banda de nebulosidade convectiva a ela associada fica situada ao norte do equador, em torno da latitude de 4°N.

As imagens mostram que os sistemas frontais deste mês provocam aumento de nebulosidade sobre o Nordeste ao se aproximarem da Região. Isso é evidente nas passagens frontais dos dias 4 e 10 (Tab. 4.9). No caso do primeiro sistema, a formação de nebulosidade convectiva sobre o continente ocorre a partir do dia 5. É interessante observar que a aproximação desse sistema não pode ser acompanhada nas imagens pelo deslocamento de uma banda frontal. É somente a partir do dia 7 que uma banda de nebulosidade pode ser vista cruzando o litoral sul da Bahia. Seu deslocamento ao longo da costa no sentido sudoeste-nordeste pode ser acompanhado até o dia 13. Esse sistema também provoca aumento de nebulosidade convectiva sobre o Nordeste, a exemplo do que é visto com o primeiro sistema frontal. A passagem frontal do dia 19 ocorre devido a um processo de frontogênese em latitudes subtropicais do Atlântico Sul.

Contrariamente ao mês anterior, é evidente a formação de cavados (formação de nebulosidade) a leste do Nordeste em associação a penetrações frontais em latitudes baixas. Uma formação desse tipo é particularmente evidente com a passagem frontal do dia 10. Na maioria dos casos essa nebulosidade atinge o Nordeste provocando aumento da cobertura de nuvens. Vale assinalar que uma outra explicação para a nebulosidade formada pode estar na

intensificação de um cavado pré-existente. Essa hipótese parece válida tendo em vista que também neste mês sistemas de nuvens baixas e médias (distúrbios de leste) se deslocam na borda equatorial da ASAS.

As cartas de superfície mostram a ZCIT ao norte do equador em todos os dias deste mês. Cavados fracos parecem se formar em resposta à penetração de sistemas de origem frontal no Nordeste o que é confirmado pelas imagens de satélite. Por outro lado, centros de baixa pressão com fraca intensidade podem ser vistos sobre o Nordeste em alguns dias da primeira quinzena do mês.

As séries temporais da pressão média diária de Caravelas e Petrolina (Fig. 4.21) mostram claramente a diminuição de pressão que precede a passagem frontal do dia 4, seguida do aumento de pressão associado à penetração do anticiclone de origem polar. É interessante observar que essa última variação ocorre paralelamente à diminuição da temperatura do bulbo úmido média diária, que mostra uma tendência de decréscimo ao longo do mês. As demais passagens frontais também podem ser vistas nas duas séries devido aos mínimos de pressão por elas provocados.

O vento médio diário em Caravelas (Fig. 4.27a) se apresenta dos quadrantes nordeste e sudeste sendo que ventos fracos desse último caracterizam as passagens frontais ocorridas neste mês. Petrolina mostra sinais evidentes de duas passagens frontais somente, as dos dias 4 e 10, devido a interrupção ou enfraquecimento dos ventos alísios de sudeste (Fig.4.26c). Caravelas teve 6 dias de chuva (Fig. 4.27b) e precipitação com percentual de

16,6% da normal (Tab. 4.8) enquanto que Petrolina teve 7 dias de chuva (Fig.4.27d) e total mensal de precipitação de 288,1% da normal (Tab. 4.8). Vale salientar que o sistema do dia 4 causou chuva acima da normal mensal em Petrolina.

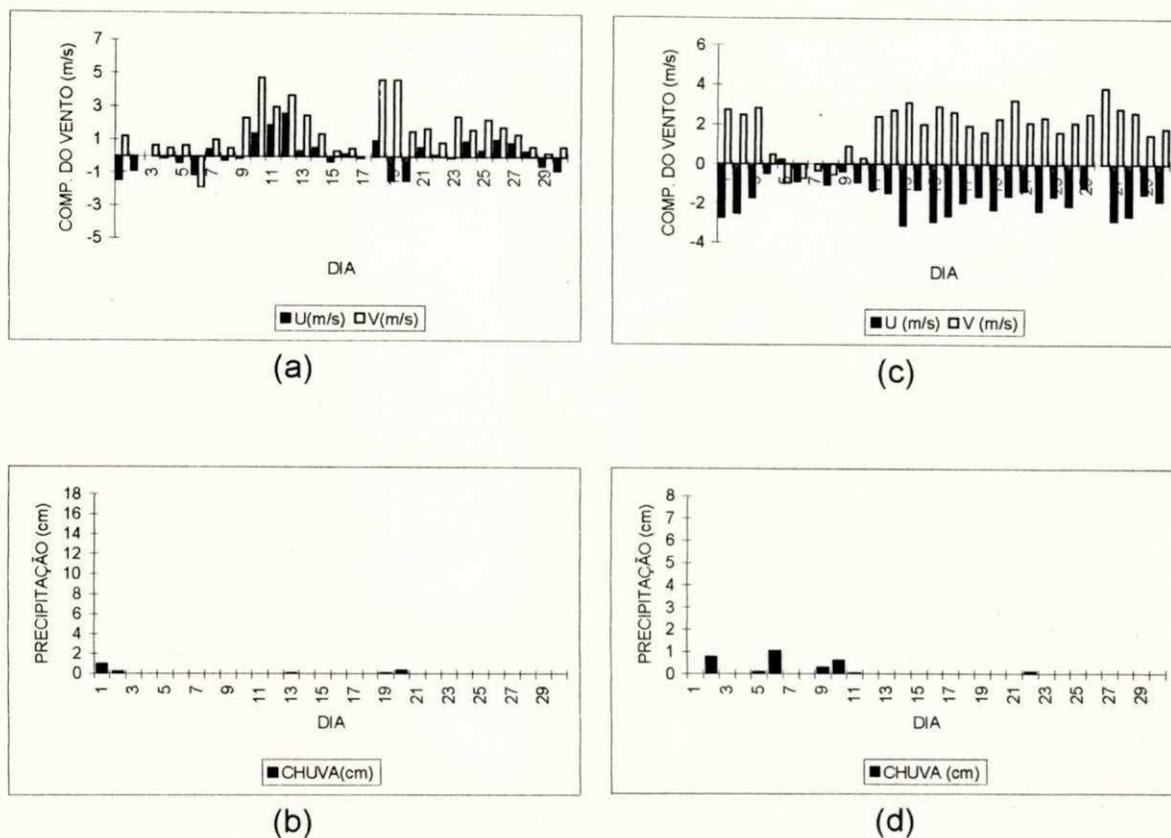


Fig. 4.27 - Componentes zonal (u) e meridional (v) médias diárias (m/s) do vento à superfície e precipitação total diária (cm) para junho de 1985 em: (a)-(b) Caravelas e (c)-(d) Petrolina. Valores positivos (negativos) de u representam componente de oeste (leste). Valores positivos (negativos) de v representam componente de sul (norte)

4.3.2 Campos de precipitação via radar e condições atmosféricas associadas: Estudos de caso

Foi visto anteriormente que os campos de precipitação observados pelo radar meteorológico banda-C de Petrolina-PE podem ser classificados em cinco padrões básicos. Foram observados ainda campos disformes com características predominantemente estratiformes cuja grande extensão horizontal inviabilizou sua inclusão na contabilidade dos ecos. Tais campos também não se enquadram em nenhum dos padrões considerados. Por outro lado, eles parecem constituir, juntamente com as Be, os únicos campos de precipitação via radar associados a fenômenos de grande escala específicos. Considerando as grandes áreas cobertas com chuva que caracterizam esses campos foi escolhido um exemplo de cada para análise. Esse estudo pode auxiliar tanto na identificação das condições atmosféricas que favorecem sua ocorrência como também no entendimento da dinâmica dos sistemas atmosféricos aos quais estão associados.

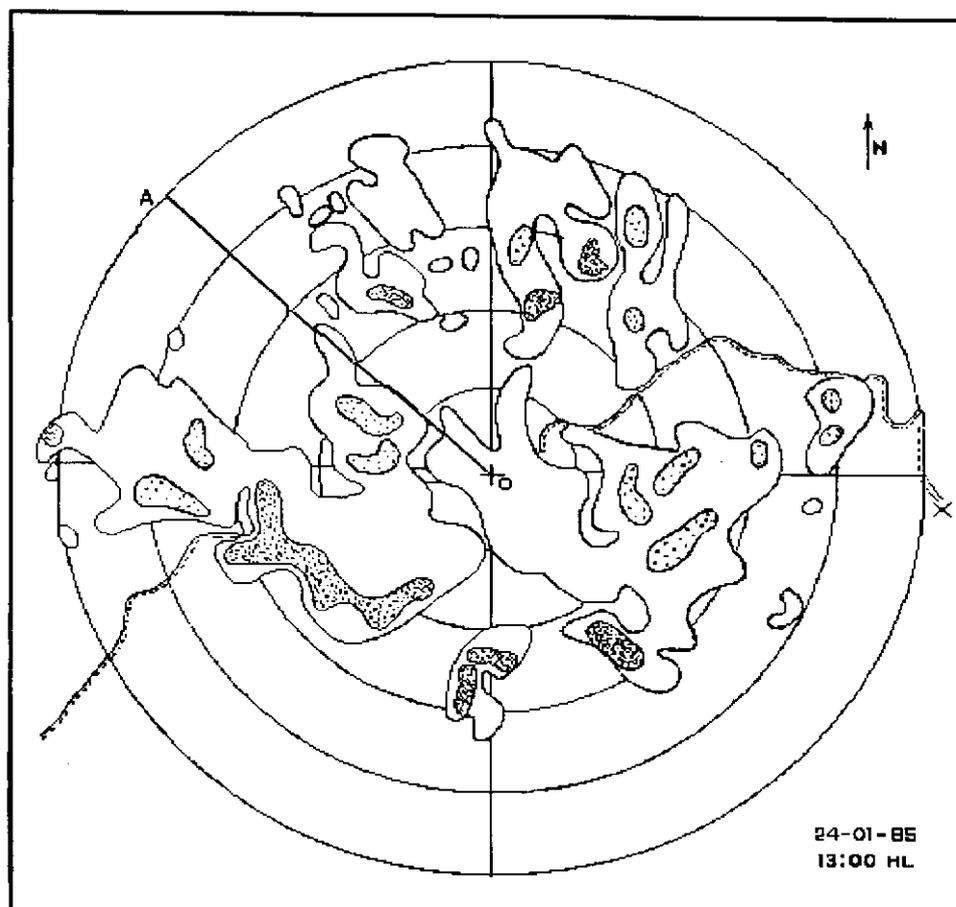
4.3.2.1 Extensos campos disformes com características predominantemente estratiformes

O PPI selecionado para análise foi obtido às 13:00 HL do dia 24 de janeiro, dia no qual foram feitos 22 registros, entre PPI's e RHI's, no intervalo de 10:33 às 17:05 HL. Todos os PPI's desse dia mostram as mesmas características. O PPI é apresentado na Figura 4.28 juntamente com o RHI obtido

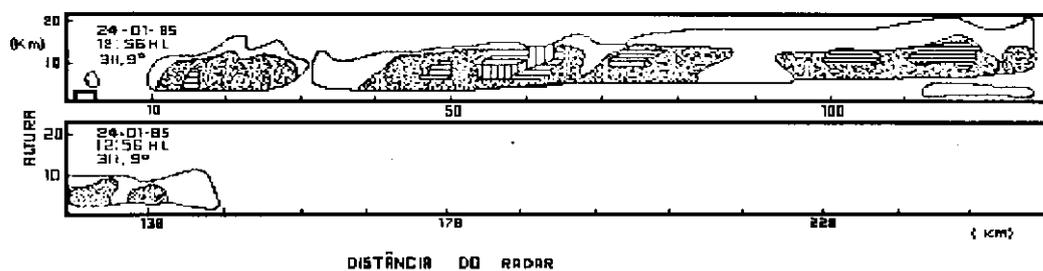
ao longo do azimute de $311,9^\circ$ às 12:56 HL. A área coberta por precipitação predominantemente estratiforme no PPI (Fig. 4.28a) representa, aproximadamente, a metade da área do círculo com raio de 250 km enquanto que o RHI (Fig. 4.28b) mostra o topo contínuo, com altura em torno de 10 km, característico desses campos.

A nebulosidade em forma de arco vista na imagem de satélite das 08:55 HL (Fig. 4.29) evidencia a presença de um vórtice ciclônico da alta troposfera com centro a leste do Nordeste. Vale salientar que as imagens mostram a presença desse tipo de sistema nos dias 9 e 18 de janeiro e 29 de março, dias nos quais também foram observados extensos campos predominantemente estratiformes.

A análise cuidadosa da imagem sugere que a região de Petrolina está sob a influência do setor oeste do vórtice, área essa favorável à ocorrência de nebulosidade conforme o modelo proposto por Kousky e Gan (1981). Essa hipótese é confirmada pelo perfil vertical das componentes zonal e meridional do vento obtido pela sondagem realizada às 09:51 HL (Fig. 4.30). O vento se apresenta do quadrante sudeste na alta troposfera o que confirma que a região de Petrolina está situada no setor oeste do vórtice. É possível notar ainda que o vento tem intensidade fraca, particularmente na baixa e média troposfera.



(a)



(b)



(c)

Fig. 4.28 - PPI obtido pelo radar meteorológico de Petrolina-PE às 13:00 HL do dia 24 de janeiro de 1985 é visto em (a). A distância entre os círculos concêntricos ao local do radar é de 50 km. O seguimento de reta OA corresponde ao azimute de $311,9^\circ$ ao longo do qual foi feito o RHI das 12:56 HL mostrado em (b) e a convenção utilizada para a taxa de precipitação (mm/h) é vista em (c). A escala de intensidade de chuva utilizada no PPI (RHI) é a 2 (1). A seta indica o Norte Verdadeiro (N).

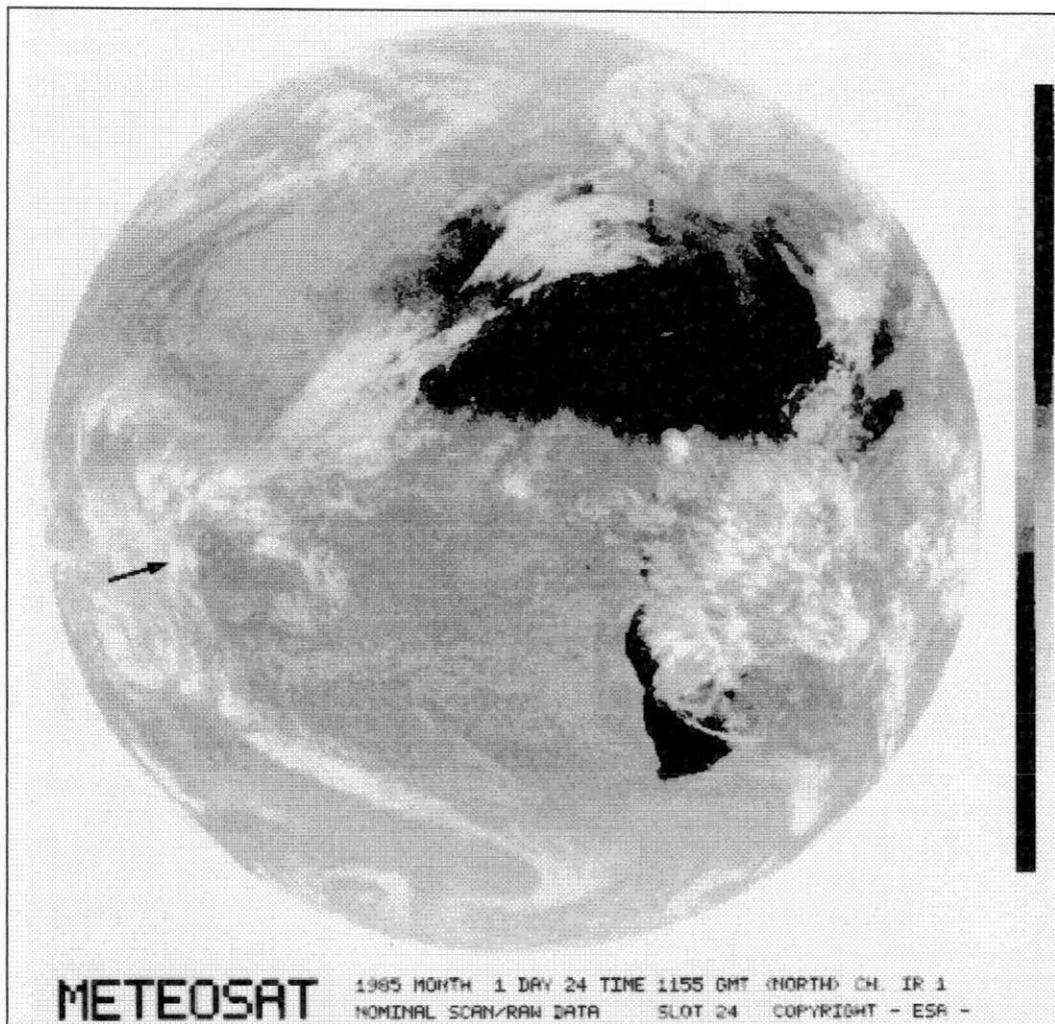


Fig. 4.29 - Imagem do satélite METEOSAT na banda do infravermelho obtida às 08:55 HL do dia 24 de janeiro de 1985, ilustrando a nebulosidade em forma de arco associada ao vórtice ciclônico da alta troposfera. A ponta da flecha situada no lado esquerdo da imagem assinala a localização aproximada de Petrolina-PE (9°24'S, 40°29'W).

A estrutura termodinâmica da atmosfera é mostrada na Figura 4.31. A proximidade entre as curvas de θ_e e θ_{es} evidencia o alto teor de umidade em toda a troposfera. Os perfis também mostram duas fracas inversões do tipo de subsidência.

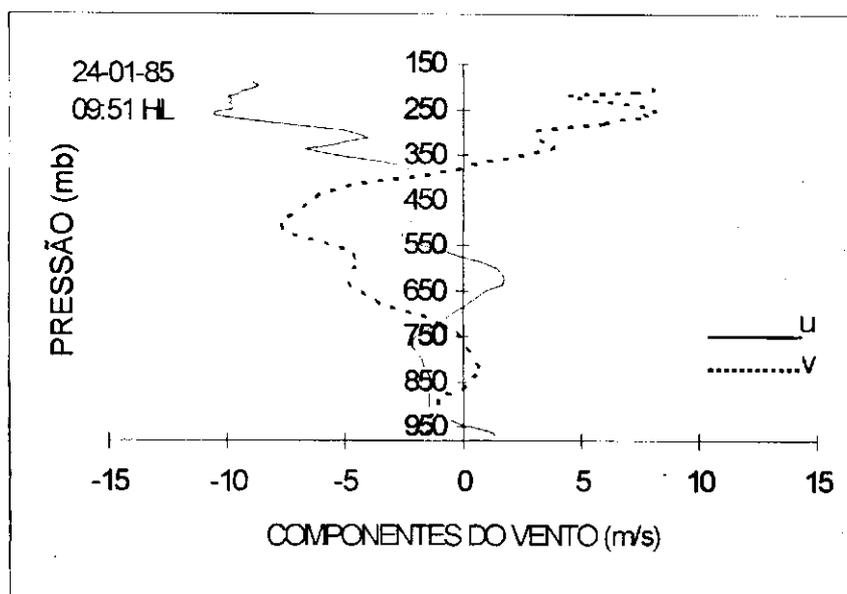


Fig. 4.30 - Perfil vertical das componentes zonal (u) e meridional (v) (m/s) do vento obtido pela sondagem realizada às 09:51 HL do dia 24 de janeiro de 1985. Valores positivos (negativos) de u representam componente de oeste (leste). Valores positivos (negativos) de v representam componente de sul (norte).

É importante assinalar que campos de precipitação semelhantes ao da Figura 4.28a não são os únicos possíveis na presença de vórtices ciclônicos da alta troposfera. O campo de precipitação observado depende, dentre outros fatores, da posição do local de observação em relação ao centro do vórtice e do estágio do ciclo de vida do vórtice.

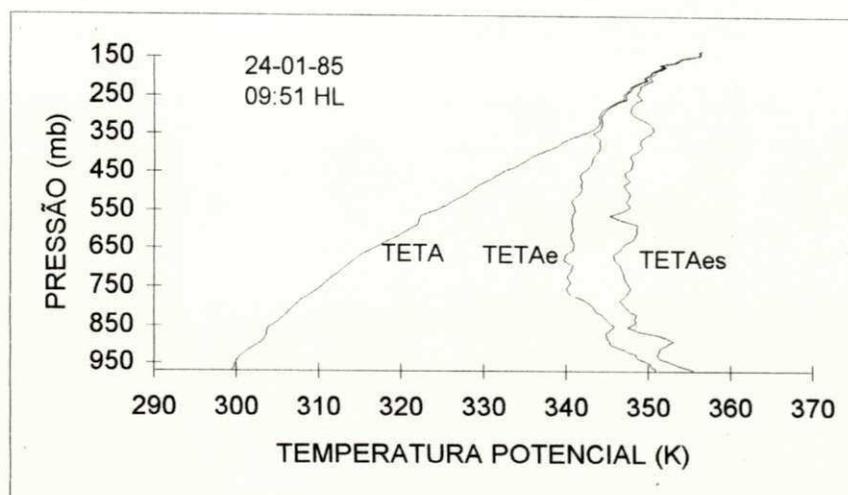


Fig. 4.31 - Perfis verticais de θ , θ_e e θ_{es} obtidos pela sondagem das 09:51 HL do dia 24 de janeiro de 1985.

Estudos realizados para outras regiões tropicais do globo (Houze, 1993; Cheng e Houze, 1979) associam campos estratiformes ao estágio de dissipação de grandes aglomerados convectivos. No caso dos campos observados neste dia em Petrolina, as áreas cobertas e a duração são maiores, sugerindo que movimentos verticais ascendentes em escala sinótica associados ao vórtice desempenharam papel fundamental no seu ciclo de vida.

4.3.2.2 Bandas de ecos (Be)

A Be é, dentre os padrões organizados, o que possui a maior área. Ele foi observado somente nos meses de janeiro e junho (Fig. 4.5), ocorrendo apenas nos quadrantes SE e SW (Fig. 4.8).

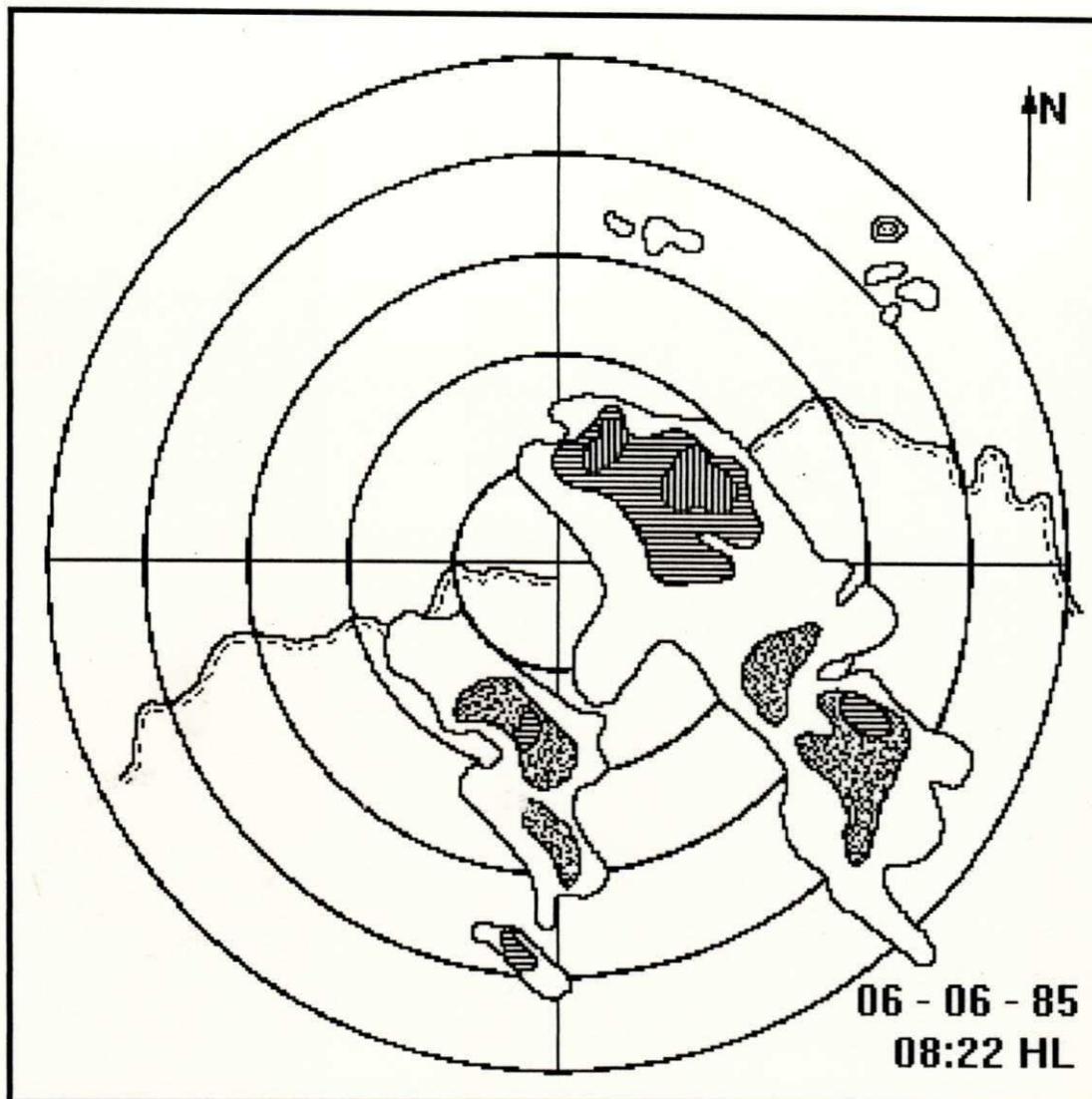
Foi escolhida para análise a situação correspondente ao PPI obtido às 08:22 HL do dia 06 de junho (Fig. 4.32). Ele apresenta duas bandas de ecos,

orientadas de noroeste-sudeste, constituídas por células intensas inseridas em áreas de chuva estratiforme. A área coberta pelas bandas equivale à área de um quadrante, aproximadamente.

Massambani e Correia (1988) foram os primeiros a estudar essas bandas de ecos associando-as à penetração de um sistema frontal no Nordeste. Correia (1989) aprofundou a discussão apresentando mapas de superfície que mostravam, já no dia 04 de junho, a formação de um centro de baixa pressão sobre o Nordeste em resposta à entrada de um sistema frontal no Espírito Santo.

Os baixos valores da energia máxima da parcela à superfície ($E_{máx}$) aliados ao seu gradual aumento no início de junho (Tab. 4.5) sugerem que fatores dinâmicos de grande escala foram os responsáveis pelas B_e observadas no dia 06.

A situação sinótica que levou à formação dos ecos mostrados na Fig. 4.32 foi discutida na sub-seção 4.3.1.6 com base nas cartas de superfície, imagens de satélite e dados de superfície de Caravelas e Petrolina. As diferentes análises realizadas evidenciam que um sistema de origem frontal detectado em Caravelas também influenciou Petrolina. Particularmente importante é o comportamento semelhante mostrado nos primeiros dez dias do mês pelas séries de pressão média diária e de temperatura do bulbo úmido média diária das duas localidades (Fig. 4.21). O mínimo de pressão provocado pela passagem do sistema em Caravelas no dia 04 (Fig. 4.21a) tem seu correspondente no mesmo dia na série de Petrolina (Fig. 4.21b). A interrupção/enfraquecimento do regime dos alísios de



(a)

EC-1	0.2-0.4	0.4-1.0	1.0-2.0	2.0-5.0	5.0-10.0	> 10.0	mm/h
EC-2	0.6-1.8	1.8-6.0	6.0-18	18-50	80-180	≥ 180	mm/h

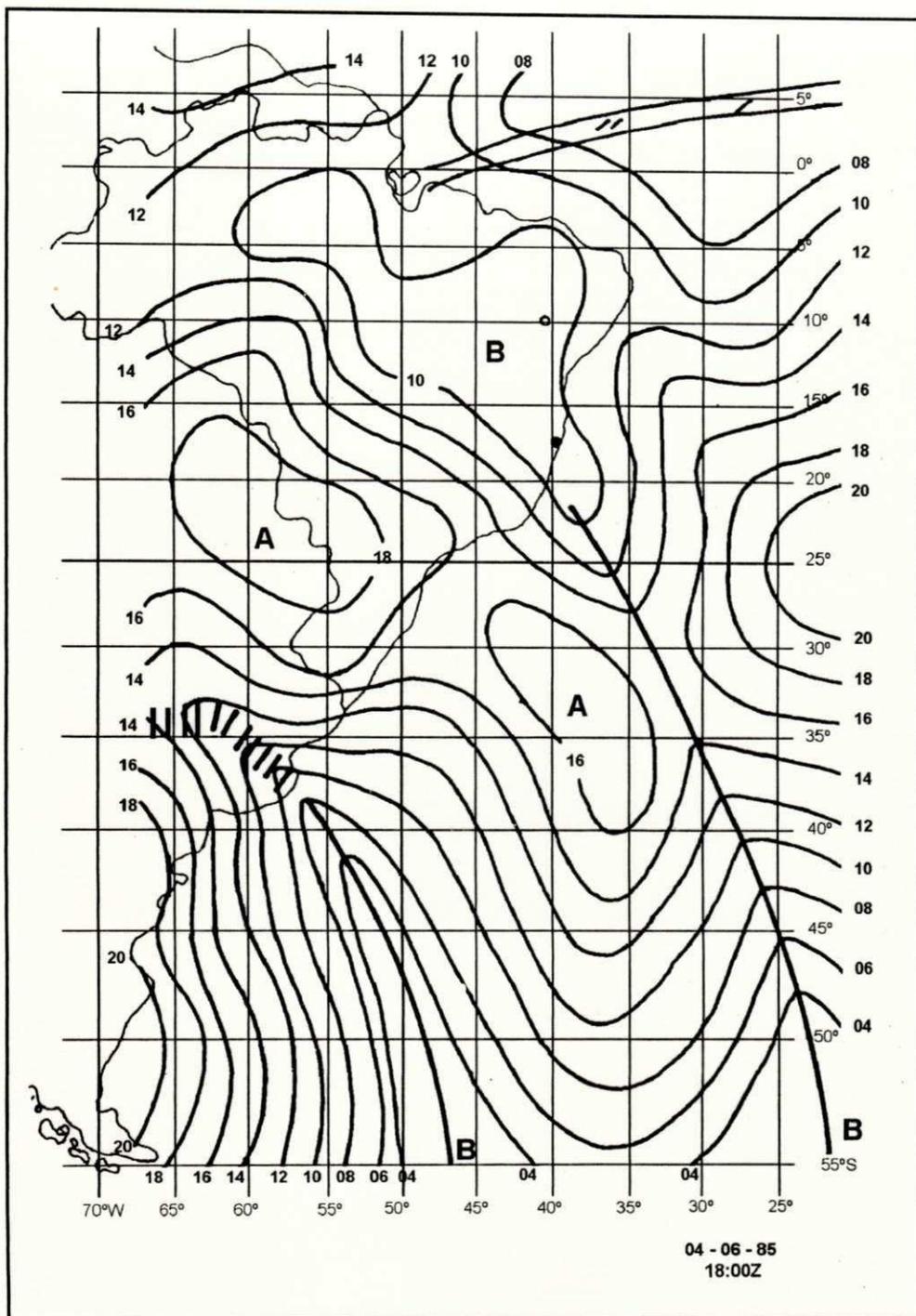
(b)

Fig. 4.32 - PPI obtido pelo radar meteorológico de Petrolina-PE às 08:22 HL do dia 06 de junho de 1985 mostrando duas Be nos quadrantes SE e SW é visto em (a) e a convenção utilizada para a taxa de precipitação (mm/h) é vista em (b). A distância entre os círculos concêntricos ao local do radar é de 50 km. A seta indica o Norte Verdadeiro (N). A escala de intensidade de chuva utilizada no PPI é a 1 (EC - 1).

sudeste entre os dias 04 e 10 (Fig. 4.27c) e a ocorrência de precipitação acima da normal mensal (Fig. 4.27d e Tab. 4.8) são também uma medida das mudanças provocadas pelo sistema na área de Petrolina.

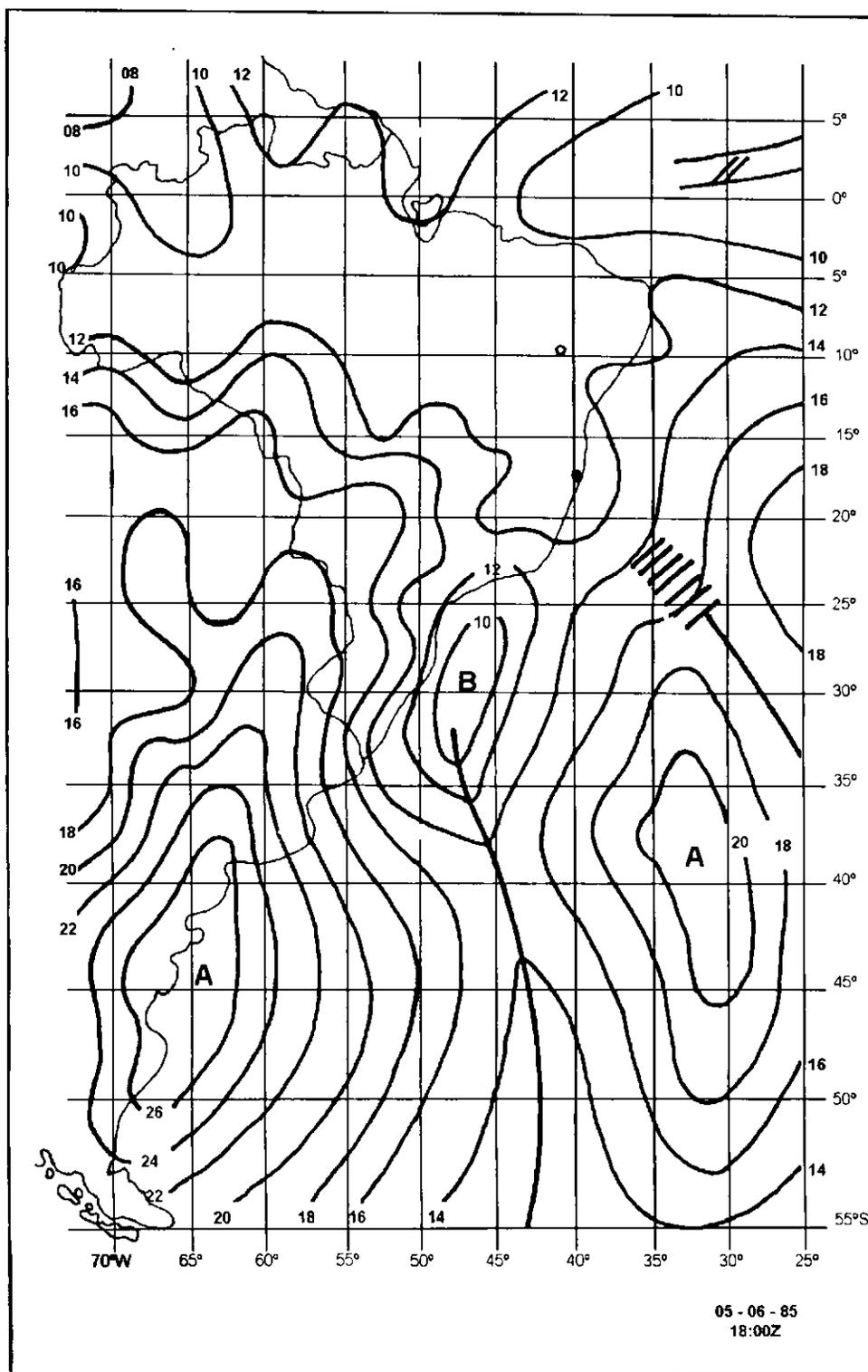
Os mapas de superfície para os dias 04, 05 e 06 (Fig. 4.33) mostram pressão relativamente baixa na área do Nordeste enquanto que as imagens de satélite evidenciam aumento de nebulosidade na Região a partir do dia 05. Na imagem das 08:55 HL do dia 06 (Fig. 4.34) o Nordeste se apresenta quase que totalmente coberto por nebulosidade. É interessante observar que o PPI mostrado na Figura 4.31 foi obtido 33 minutos antes do horário dessa imagem.

Perfis verticais da temperatura potencial (θ), temperatura potencial equivalente (θ_e) e temperatura potencial equivalente saturada (θ_{es}) obtidos de radiossondagens diárias realizadas em Petrolina demonstram a entrada do sistema de origem frontal. As mudanças acentuadas ocorridas na estrutura termodinâmica da atmosfera na região podem ser vistas na Figura 4.35. Os três perfis do dia 03 (Fig. 4.35a) ilustram uma situação típica em Petrolina. O perfil de θ mostra atmosfera bem misturada entre a superfície e o nível de 850 mb, aproximadamente, enquanto os perfis de θ_e e θ_{es} mostram uma forte inversão de subsidência na baixa troposfera, característica do domínio da ASAS na região. No dia 04 (Fig. 4.35b) a camada bem misturada tem espessura consideravelmente menor enquanto que os perfis de θ_e e θ_{es} continuam apresentando a inversão de subsidência, embora mais fraca. Os perfis também



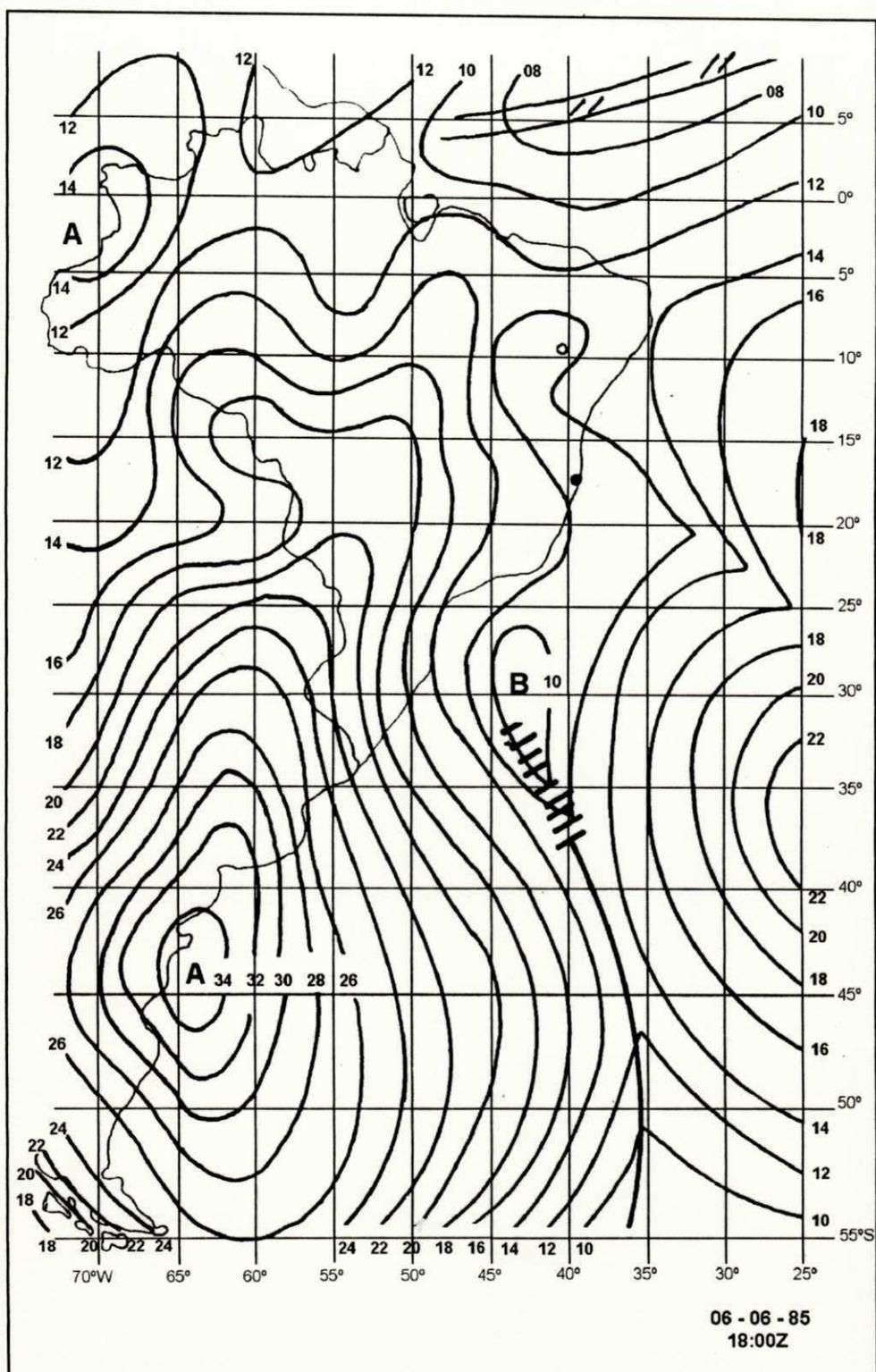
(a)

Fig. 4.33 - Carta de superfície para as 15:00 HL do dia: (a) 04/06/85, (b) 05/06/85 e (c) 06/06/85. O pequeno círculo branco (negro) assinala a localização de Petrolina (Caravelas). (Fonte: IAE-CTA).



(b)

Fig. 4.33 - continuação



(c)

Fig. 4.33 - conclusão.

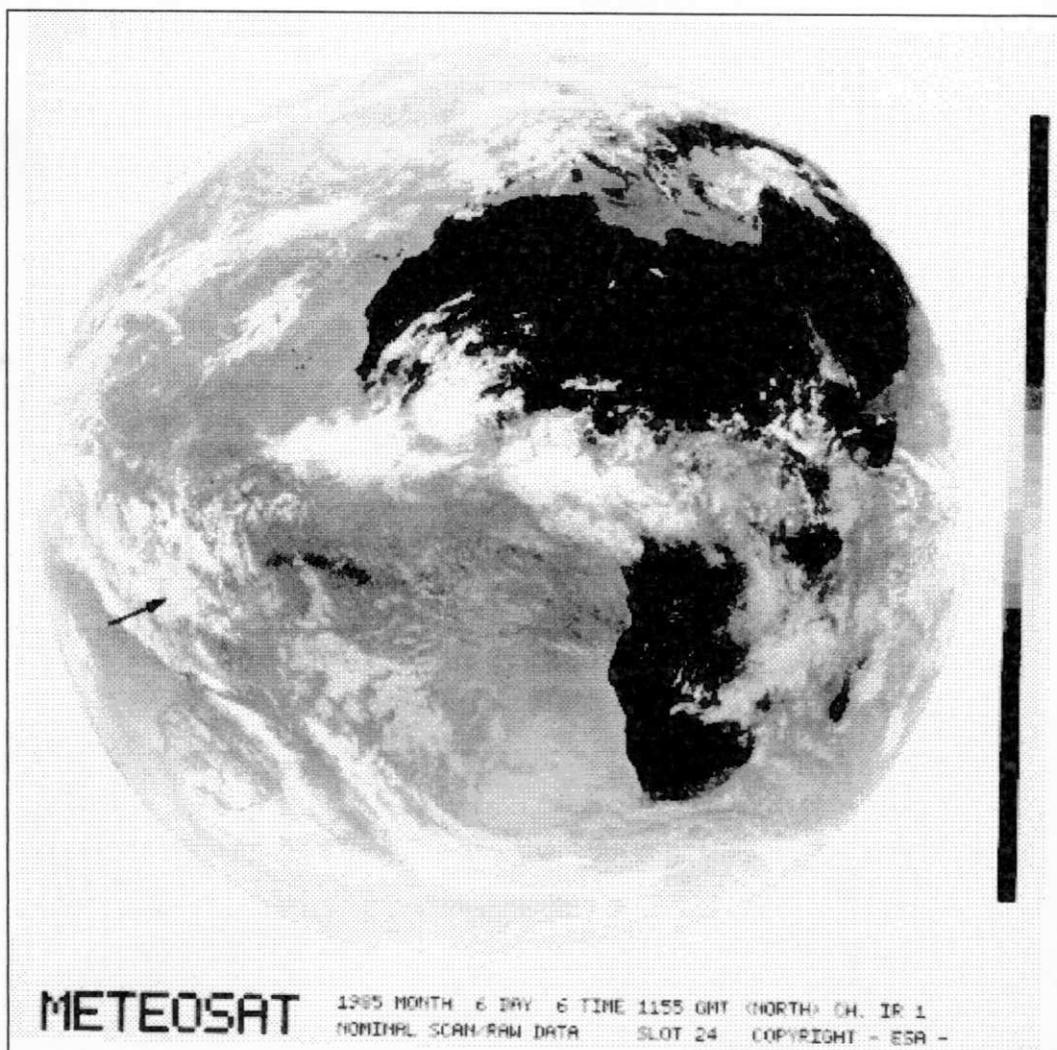


Fig. 4.34 - Imagem do satélite METEOSAT na banda do infravermelho obtida às 08:55 HL do dia 06 de junho de 1985, ilustrando a nebulosidade provocada pelo sistema de origem frontal. A ponta da flecha situada no lado esquerdo da imagem assinala a localização aproximada de Petrolina-PE (9°24'S, 40°29'W).

indicam um considerável aumento no conteúdo de umidade da atmosfera. No dia 05 (Fig. 4.35c) a situação é completamente diferente. Os perfis evidenciam que a inversão de subsidência cedeu lugar a uma inversão do tipo frontal. A proximidade dos perfis de θ_e e θ_{es} demonstra o alto teor de umidade em toda a troposfera nesse dia. No dia 06 (Fig. 4.35d) os perfis apresentam basicamente as

mesmas características. A análise dos perfis sugere que o sistema atingiu Petrolina entre os dias 04 e 05.

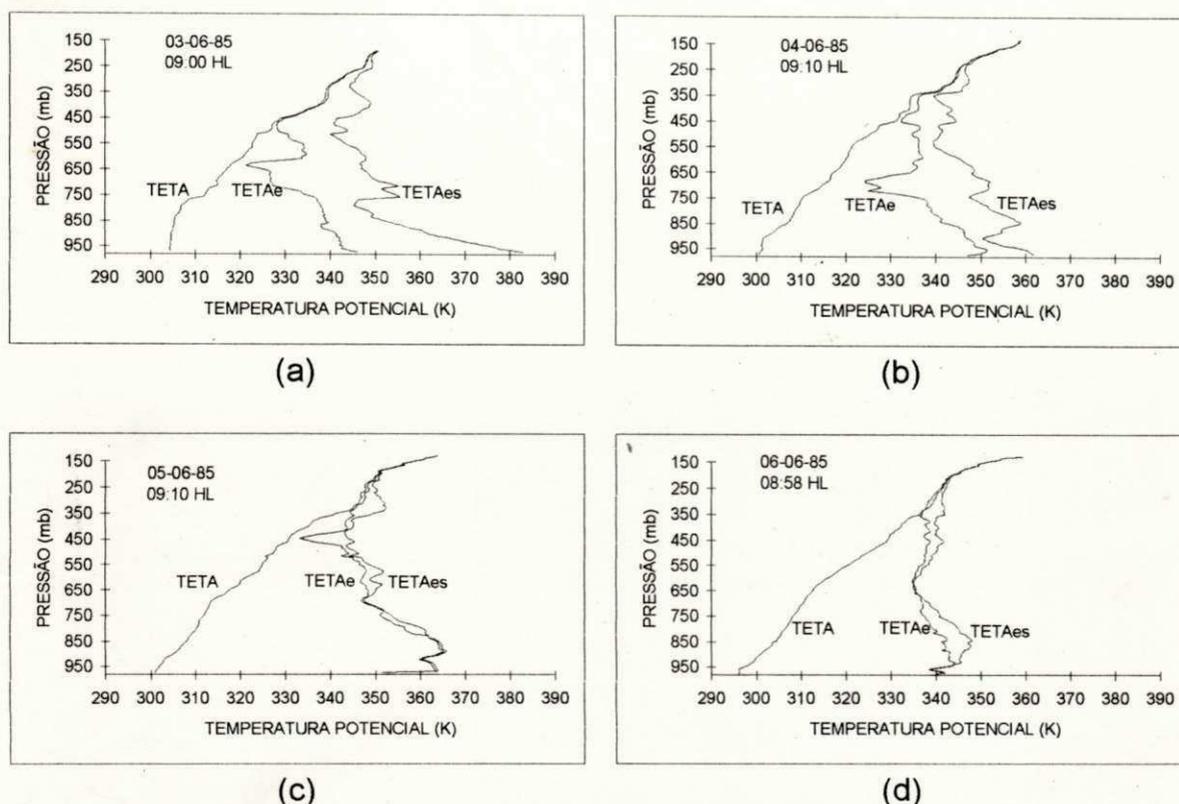
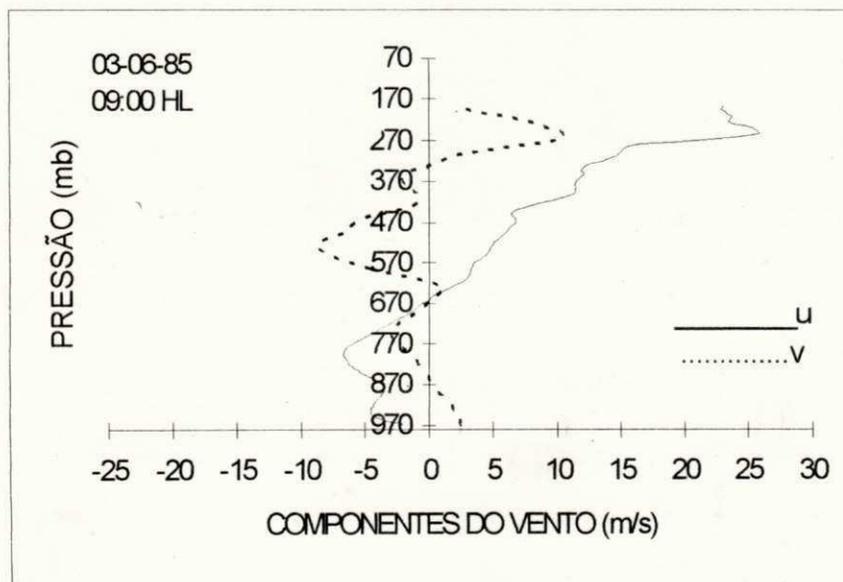


Fig. 4.35 - Perfis verticais de θ , θ_e e θ_{es} obtidos das sondagens realizadas nos dias: (a) 03/06/85 às 09:00 HL, (b) 04/06/85 às 09:10 HL, (c) 05/06/85 às 09:02 HL e (d) 06/06/85 às 08:58 HL.

A hipótese da entrada de um sistema de origem frontal em Petrolina é fortalecida com os perfis verticais das componentes zonal e meridional do vento observado em Petrolina. Os perfis (Fig. 4.36) mostram ventos fracos na baixa troposfera e máximos de intensidade do vento na alta troposfera. A intensidade é particularmente elevada nos dias 03 e 04 (Fig. 4.36a,b), quando o vento tem, respectivamente, 54 nós com direção de 248 graus no nível de 253 mb e 52 nós com 263 graus no nível de 301 mb. É importante assinalar que esses valores são, pelo menos, o dobro do valor médio mensal para a região, o que sugere que

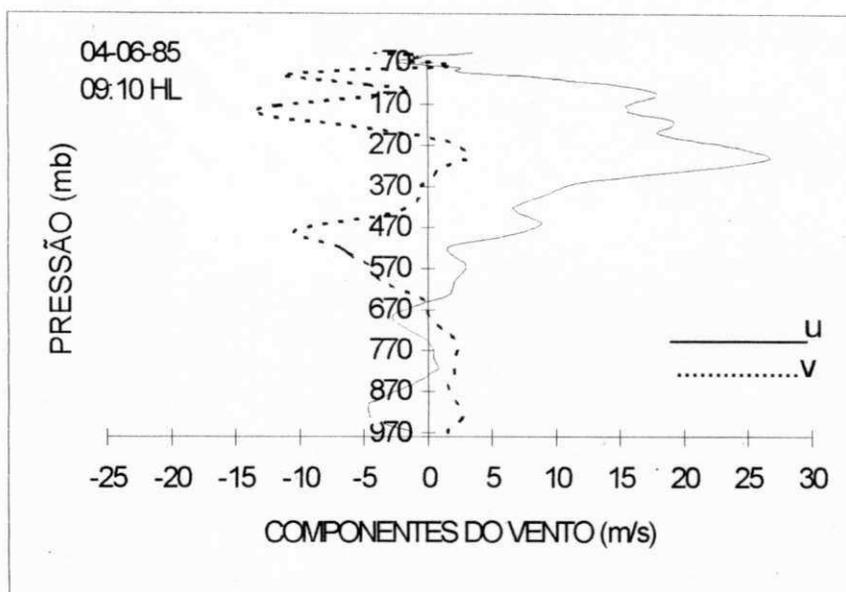
esses máximos de vento estão associados ao sistema de latitudes médias que penetrou na região. As velocidades são mais baixas no dia 05 (Fig. 4.36c), que apresenta dois máximos: o principal, situado no nível de 190 mb com 344 graus e 44 nós e o secundário, localizado no nível de 307 mb, com 276 graus e 36 nós. Máximo menos intenso é registrado no dia 06 (Fig. 4.36d): 36 nós com direção de 269 graus no nível de 147 mb.

O conjunto de análises apresentadas sugere que convergência de umidade nos baixos níveis deve ter desempenhado papel fundamental nas mudanças observadas na região de Petrolina no início de junho de 1985.

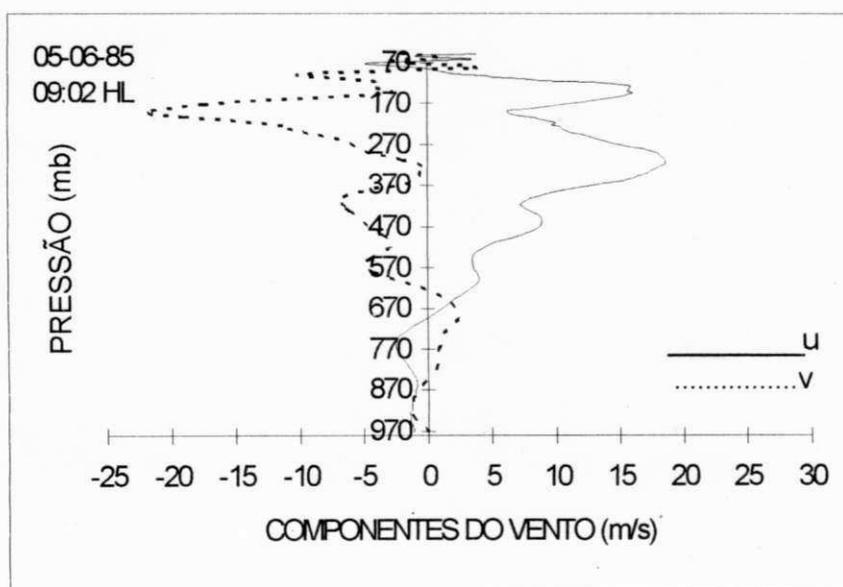


(a)

Fig. 4.36 - Perfis verticais das componentes zonal (u) e meridional (v) do vento (m/s) obtidos pelas sondagens realizadas nos dias: (a) 03/06/85 às 09:00 HL, (b) 04/06/85 às 09:10 HL, (c) 05/06/85 às 09:02 HL e (d) 06/06/85 às 08:58 HL. Valores positivos (negativos) de u representam componentes de oeste (leste). Valores positivos (negativos) de v representam componentes de sul (norte).

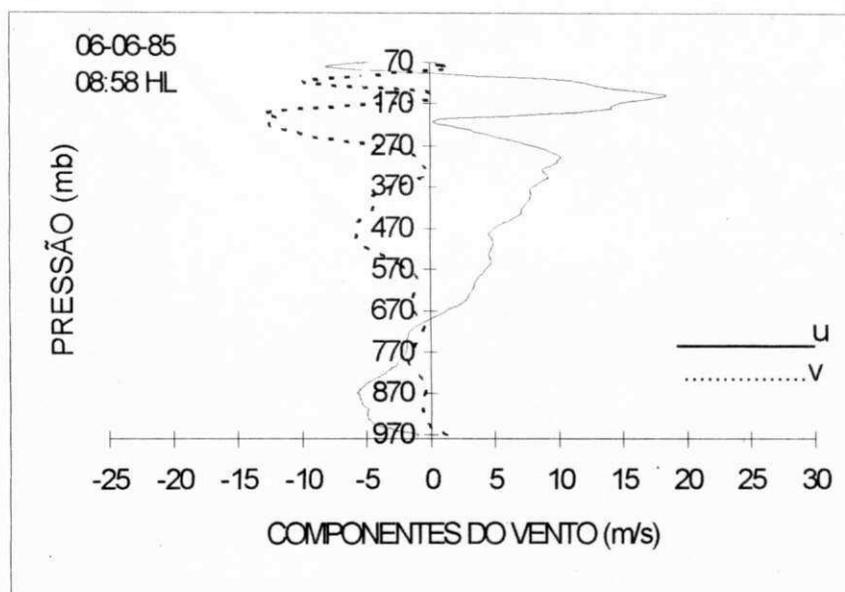


(b)



(c)

Fig. 4.36 - continuação



(d)

Fig. 4.36 - conclusão.

CAPÍTULO 5

SUMÁRIO E CONCLUSÕES

A grande motivação para a realização desta pesquisa foi a disponibilidade dos únicos dados de radar meteorológico já coletados na região semi-árida do Nordeste do Brasil. Os dados foram obtidos por um radar banda-C operado pelo IAE-CTA em Petrolina-PE (9°24'S, 40°29'W) no primeiro semestre de 1985.

Um dos objetivos desta pesquisa foi a identificação dos tipos e padrões dos ecos observados e a determinação de sua importância relativa nos diferentes períodos e áreas preferenciais de ocorrência. Outro objetivo foi verificar o papel desempenhado por fatores locais (termodinâmicos) e fatores de grande escala (dinâmicos) na existência dos ecos.

Os objetivos propostos foram alcançados a despeito da existência de algumas restrições nos dados de radar. A ausência de uma unidade adequada de armazenamento aliada à inexistência de critérios específicos na técnica de operação do radar ocasionaram inúmeras limitações, apesar do equipamento ser capaz de gerar informações com excelente resolução espacial e temporal. A operação do radar restrita ao período diurno, sem qualquer regularidade nos intervalos de observação, foi a principal causa de limitações nos dados. Esse fato impossibilitou a obtenção de informações importantes tais como a observação do ciclo de vida das células precipitantes bem como as características da população inicial dos ecos.

Um dos objetivos desta pesquisa exigiu a identificação dos sistemas atmosféricos de grande escala que influenciaram a área de cobertura do radar no período de estudo. O mês de janeiro se caracterizou pela presença do cavado do Nordeste (cavado da alta troposfera) ou de vórtices ciclônicos da alta troposfera. No mês de fevereiro houve atuação tanto de vórtices ciclônicos da alta troposfera quanto da ZCIT, particularmente no norte do Nordeste. No mês de março atuaram, com igual frequência, a ZCIT e os vórtices ciclônicos da alta troposfera. No mês de abril houve o domínio quase que total da ZCIT, havendo apenas alguns poucos dias com a presença do cavado do Nordeste ou de um vórtice ciclônico da alta troposfera. Os meses de maio e junho mostraram domínio da ASAS, que foi interrompido apenas pela entrada de sistemas de origem frontal. Duas passagens frontais influenciaram Petrolina no mês de maio enquanto que em junho foram quatro. A primeira passagem de junho, em particular, causou chuva acima da normal mensal e a interrupção/enfraquecimento do regime dos ventos alíseos de sudeste.

Todos os meses, à exceção de janeiro, apresentaram sistemas de nuvens baixas e médias que se deslocavam para oeste na área da ASAS atingindo o litoral leste do Nordeste. Nos meses de maio e junho eles também atingiram o litoral norte. Aparentemente, esses sistemas de nuvens não influenciaram diretamente a área de Petrolina. Por outro lado, eles não puderam ser adequadamente acompanhados devido à disponibilidade de imagem de satélite para apenas um horário por dia.

Considerando os objetivos deste trabalho, o aspecto mais importante do sistema de origem frontal de junho é que ele foi responsável pela ocorrência de um padrão de ecos que parece ser típico desse tipo de sistema: a banda de ecos. Um dos campos de precipitação via radar associados aos vórtices ciclônicos da alta troposfera também parece ser exclusivo dos vórtices: extensas áreas disformes de precipitação predominantemente estratiforme.

Os ecos analisados, totalizando 23.347, foram classificados em dez grupos de acordo com a área coberta no horário de observação. Foi determinado que 87% tem áreas menores que A_3 ($400 \text{ km}^2 < A_3 \leq 800 \text{ km}^2$), dos quais 53% tem áreas A_1 ($A_1 \leq 100 \text{ km}^2$). Por outro lado, apesar da predominância de células pequenas, 13% dos ecos observados em janeiro e 5% dos ecos observados em abril tem dimensões horizontais iguais ou maiores que A_4 ($800 \text{ km}^2 < A_4 \leq 1.200 \text{ km}^2$). Coincidentemente, esses foram os meses com maiores índices pluviométricos no período estudado, o que sugere que as grandes chuvas registradas na região foram provenientes de aglomerados de nuvens.

A classificação dos ecos por tipo, baseada nos gradientes de refletividade vistos nos PPI's e RHI's, resultou em 98,8% convectivos (Ec), 1% estratoconvectivos (Estc) e 0,2% estratiformes (Est). Esse resultado mostra que a chuva no semi-árido provém basicamente de sistemas convectivos isolados. Por outro lado, as pequenas percentagens de Estc e Est representam uma parcela importante do volume total de chuvas em virtude das grandes áreas cobertas com precipitação. A maior incidência de ecos estratiformes ocorreu em janeiro

enquanto que os estratoconvectivos foram mais freqüentes nos meses de março e abril.

Ecos predominantemente estratiformes observados em três dias do mês de janeiro não foram incluídos na contagem dos ecos devido às grandes áreas cobertas, de cerca de 35.000 km² de extensão. Ecos dessa natureza também foram registrados em um dia de março. A presença de vórtices ciclônicos da alta troposfera foi detectada em todos os casos.

A classificação dos ecos por padrão, baseada no grau aparente de organização visto nos PPI's, resultou em cinco padrões distintos. Os ecos dispersos (Ed) não tem organização aparente enquanto que as zonas de ecos (Ze) tem pouca ou nenhuma organização. Os demais padrões tem aparência linear e estão classificados, em ordem crescente de suas dimensões horizontais, em: linhas de ecos (Le), faixas de ecos (Fe) e bandas de ecos (Be).

A contabilização dos ecos por padrão, para todo o período de estudo, resultou em 97,3% de Ed, 1,5% de Ze, 1,0% de Le, 0,1% de Fe e 0,1% de Be. Esse resultado mostra a absoluta predominância dos Ed que podem representar desde pequenas células convectivas (área ≤ 100 km²) a células de grandes dimensões horizontais, (100 km² < área ≤ 2.400 km²).

A contabilização mensal dos padrões mostrou as Be apenas nos meses de janeiro e junho. As Be tem sua quase totalidade no mês de junho, formadas

devido a forçante dinâmica associada a um sistema de origem frontal que penetrou no Nordeste. Os demais padrões não parecem ser típicos de um mês determinado, o que sugere que eles podem ocorrer associados a diferentes sistemas de circulação atmosférica. Os Ed e as Ze são vistos em todos os meses. As Le também são encontradas em todos os meses, à exceção de fevereiro. É provável que o pequeno número de registros obtidos nesse mês tenha sido a razão principal para a ausência das Le. As Fe são observadas apenas em janeiro, março e abril. Os resultados também mostram, à exceção das Be, que todos os padrões tem maior frequência de ocorrência em abril, mês em que a ZCIT dominou. As Ze tem frequências muito próximas em março e abril, o mesmo ocorrendo com as Le em abril e junho.

A contabilização dos padrões por quadrante, para todo o período de estudo, resultou em maior frequência de todos os padrões no quadrante SE. Os quadrantes SW e NW são, de maneira geral, os que apresentam as menores contribuições. Os padrões são vistos em todos os quadrantes, com exceção das Be, que aparecem apenas nos quadrantes SE e SW.

A contabilização mensal dos Ed, por quadrante, resultou em predominância do quadrante sudeste apenas nos meses de março, abril e maio. É importante assinalar que o quadrante SE está sempre entre os dois quadrantes com maiores contribuições, à exceção do mês de janeiro, quando predominam os quadrantes SW e NW. No caso específico dos Ed, os quadrantes SW e NW também são, em geral, os que apresentam as menores contribuições. No caso dos demais padrões a preferência pelo quadrante SE é vista nos meses de março

a junho. No mês de janeiro predominam os quadrantes SW e NW, a exemplo dos Ed. No mês de fevereiro há predominância dos quadrantes NE e NW e ocorrência de Ze somente.

A acentuada predominância de ecos no quadrante SE caracteriza esse setor como dominante na ocorrência de células precipitantes. É provável que a relativa proximidade do litoral, aliada ao vento predominante nos baixos níveis (sudeste), torne a região sujeita a uma maior influência de sistemas atmosféricos organizados oriundos do oceano tais como os distúrbios (ondas) de leste. Além disso, o relevo, embora suave, aliado à advecção de umidade pelos alísios, deixa a atmosfera mais favorável à formação de nuvens e, conseqüentemente, de precipitação.

O grau de relação entre parâmetros de mesoescala e a precipitação via radar foi avaliado através da análise de correlação entre a energia convectiva determinada pelo método da parcela ($E_{máx}$) e o número de células precipitantes. O resultado mostrou que existe uma relação positiva no caso de dimensões horizontais $\leq 400 \text{ km}^2$. A relação entre $E_{máx}$ e o topo dos ecos também é direta. No caso de células com dimensões horizontais superiores a 400 km^2 não foi observada nenhuma relação com $E_{máx}$. Uma análise de correlação também foi feita entre $E_{máx}$ e o total diário de chuva coletado por 235 postos pluviométricos distribuídos dentro de um círculo com raio de 250 km centrado em Petrolina-PE. O mês de abril foi o único a apresentar coeficientes elevados, provavelmente devido aos grandes aglomerados convectivos presentes nesse mês, o que possibilitou a captação de chuva pelos pluviômetros.

A análise dos perfis verticais de θ , θ_e e θ_{es} em Petrolina mostra uma grande incidência de inversões térmicas na atmosfera da região, em virtude da subsidência em grande escala associada a ASAS. Sob o domínio desse mecanismo dinâmico, os sistemas precipitantes não se desenvolvem e a chuva provém, em geral, de nuvens rasas. Por outro lado, foi observado na maior parte do período analisado que forçantes de grande escala contribuíram para vencer as forças estabilizantes e liberar a instabilidade latente, produzindo convecção profunda. Análises da estrutura termodinâmica da atmosfera mostram que a instabilidade necessária ao desenvolvimento de sistemas convectivos intensos esteve quase sempre presente no primeiro semestre de 1985.

A experiência adquirida no trabalho com os dados do radar meteorológico banda-C de Petrolina, aliada aos resultados aqui apresentados, permite fazer as seguintes sugestões:

(a) diagnosticar os sistemas atmosféricos detectados nos dias 24 de janeiro e 3 a 6 de junho utilizando informações de superfície e altitude que permitam cobertura espacial em escala sinótica;

(b) realizar o mesmo tipo de diagnóstico para períodos com diferentes padrões de ecos;

(c) investigar a possível relação existente entre o cisalhamento vertical do vento e a orientação das linhas de ecos (L_e).

Considerando que a chuva na região semi-árida do Nordeste do Brasil é essencialmente de natureza convectiva, o que torna difícil a sua detecção por uma rede de pluviômetros, é sugerido ainda a instalação de, pelo menos, um

radar meteorológico banda-C nessa região a fim de atender a necessidades de pesquisa e de gerenciamento dos recursos hídricos regionais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABREU, I. P. (1979): Estudo da Variabilidade de Precipitação na Região de Petrolina. **Relatório Técnico do ECA-01/79, IAE-CTA**. São José dos Campos, SP.
- ARAGÃO, J. O. R. (1975): Um Estudo da Estrutura das Perturbações Sinóticas do Nordeste do Brasil. **Dissertação de Mestrado**, INPE, São José dos Campos, SP.
- ARAÚJO, H. A., CORREIA, M. F., RODRIGUES, R. S. (1992): Convecção Profunda em Regiões Semi-áridas. VII Congresso Brasileiro de Meteorologia. **Anais 2**, pp. 626-631, São Paulo-SP.
- ARAÚJO, H. A., CORREIA, M. F., SILVA ARAGÃO, M. R. (1994): Padrões de Ecos de Radar Meteorológico Observados no Semi-árido Brasileiro. VIII Congresso Brasileiro de Meteorologia e II Congresso Latino-Americano e Ibérico de Meteorologia. **Anais 1**, pp. 238-241. Belo Horizonte-MG.
- BETTS, A. K. e DUGAN, F. J. (1973): Empirical Formula for Saturation Pseudoadiabats and Saturation Equivalent Potential Temperature. **Journal of Applied Meteorology**. v. 12, pp. 731-732.
- BOLTON, D. (1980): The Computation of Equivalent Potential Temperature. **Mon. Wea. Rev.**. v.108, pp.1046-1053.
- CAVALCANTI, I. F. A. (1986): The Anomalous Rainfall in Northeastern Brazil in 1985. Second International Conference on Southern Hemisphere Meteorology. pp. 446-448. Wellington, New Zealand.
- CORREIA, M. F. (1989): **Diagnóstico via Radar dos Sistemas Precipitantes do Semi-árido Brasileiro: O Evento de 1985**. Dissertação de Mestrado em Meteorologia. USP. São Paulo- SP.
- CORREIA, M. F. e MASSAMBANI, O. (1990a): Características da Convecção no Semi-árido Brasileiro Determinadas através de Observações via Radar. VI Congresso Brasileiro de Meteorologia. **Anais I**, pp. 39-43. Salvador-BA.
- CORREIA, M. F. e MASSAMBANI, O. (1990b): Dimensões Típicas de Ecos de Radar Observadas no Semi-árido Brasileiro para o Evento de 1985. VI Congresso Brasileiro de Meteorologia. **Anais II**, pp. 763-767. Salvador-BA.
- CHENG, C. P. e HOUZE, R. A., Jr. (1979): The Distribution of Convective and Mesoscale Precipitation in GATE: Radar Echo Patterns. **Mon. Wea. Rev.**. v. 107, pp. 1370-1381.
- FARAH, A. C. e JUSTO, M. L. V. (1979): Estudo das Inversões Térmicas da Atmosfera em Petrolina e seus Efeitos na Quantidade de Chuva Caída.

Relatório Técnico. ECA-05/79. IAE-CTA. São José dos Campos. São Paulo-SP, 58p.

- HASTENRATH, S. e HELLER, L. (1977): Dynamics of Climatic Hazards in Northeast Brazil. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society.** 103(435): 77-92.
- HILL, F. F. e BROWING, K. A. (1979): Persistence and Orographic Modulation of Mesoscale Precipitation Areas in a Potentially Unstable Warm Sector. **Quart. J. R. Met. Soc.**, v.105, pp. 57-70.
- HOUZE, R. A., Jr. (1993): Cloud Dynamics. International Geophysics Series. v. 53. Academic Press, Inc.
- HOUZE, R. A., Jr. e CHENG, C. P. (1977): Radar Characteristics of Tropical Convection Observed During GATE: Mean Properties and Trends Over the Summer Season. **Mon. Wea. Rev.**, v. 80, pp. 1665-1678.
- KOUSKY, V. E. (1979): Frontal Influences on Northeast Brazil. **Mon. Wea. Rev.**, v.107, pp.1140-1153.
- KOUSKY, V. E. e GAN, M. A. (1981): Upper Tropospheric Cyclonic Vortices in the Tropical South Atlantic. **Tellus.** v. 33, pp. 538-550.
- KOUSKY, V. E. (1985): The Global Climate for December 1984 - February 1985: A Case of Strong Intraseasonal Oscillations. **Mon. Wea. Rev.**, v. 113, pp. 2158-2172.
- LACAVAL, C. I. V. (1995): **Influências de Zonas de Convergência na Organização da Convecção Tropical sobre o Nordeste do Brasil.** Dissertação de Mestrado em Meteorologia. UFPB, Campina Grande-PB.
- LEARY, C. A. e HOUZE, R. A. (1979): The Structure and Evolution in Tropical Cloud Cluster. **J. Atmos. Sci.**, v. 36, pp. 437-457.
- MARSHALL, J. S. e PALMER, W. M. K. (1948): The Distribution of Raindrop with Size. **J. of Meteorology.** v. 5, pp. 165-166.
- MASSAMBANI, O. e RODRIGUEZ, C. A. M. (1988): Evolução Temporal da Relação Z-R. V Congresso Brasileiro de Meteorologia. **Anais 2.** pp. VII-53 - VII-57. Rio de Janeiro-RJ.
- MASSAMBANI, O. e CORREIA, M. F. (1988): A Natureza da Precipitação no Semi-árido Brasileiro: Uma Análise dos Dados do Radar Meteorológico de Petrolina-Pe. V Congresso Brasileiro de Meteorologia. **Anais 2.** pp. VIII.9-VIII.13. Rio de Janeiro-RJ.
- NAMIAS, J. (1972): Influence of Northern Hemisphere General Circulation on Drought in Northeast Brazil. **Tellus.** 24(4): 336-342.

- RAMOS, R. P. L. (1975): Precipitation Characteristics in the Northeast Brazil Dry Region. **J. Geophys. Res.**, v. 80, pp. 1965-1978.
- SILVA ARAGÃO, M. R. e CORREIA, M. F. (1994): Uma Investigação sobre a Influência de Sistemas Frontais em Petrolina-PE: O Ano de 1985. VIII Congresso Brasileiro de Meteorologia - II Congresso Latino-Americano e Ibérico de Meteorologia. **Anais 2**, pp. 586-589. Belo Horizonte-MG.
- UVO, C. R. B. (1989): **A Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) e sua Relação com a Precipitação da Região Norte do Nordeste Brasileiro**. Dissertação de Mestrado em Meteorologia. INPE. São Paulo-SP.
- VITORINO, M. I., ARAÚJO, H. A., CORREIA, M. F. (1991): A Natureza da Chuva na Região de Petrolina-PE. VII Congresso Brasileiro de Agrometeorologia. **Anais**, pp. 274-276. Viçosa-MG.
- ZAWADZKI, I. I. e RO, C. U. (1978): Correlation Between Maximum Rate of Precipitation and Mesoscale Parameters. **Journal of Applied Meteorology**, v. 17, pp. 1327-1334.