



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
UNIDADE ACADÊMICA DE METEOROLOGIA

**VARIABILIDADE CLIMÁTICA E OCORRÊNCIA DE CHEIAS NA ZONA SEMI-
ÁRIDA DA BACIA HIDROGRÁFICA DO SÃO FRANCISCO**

MARYFRANCE DE CÁSSIA S. DINIZ

Dissertação apresentada à Universidade Federal de
Campina Grande-UFPG, para a obtenção do grau
de mestre em Meteorologia. Área de concentração:
Meteorologia de Meso e Grande Escalas.

CAMPINA GRANDE
Estado da Paraíba-Brasil
Julho - 2007

**VARIABILIDADE CLIMÁTICA E OCORRÊNCIA DE CHEIAS NA ZONA SEMI-
ÁRIDA DA BACIA HIDROGRÁFICA DO SÃO FRANCISCO**

MARYFRANCE DE CÁSSIA S. DINIZ

Orientador (a): Prof^ª. Dra. **MAGALY DE FÁTIMA CORREIA**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de
Campina Grande-UFCG, para a obtenção do grau
de mestre em Meteorologia. Área de concentração:
Meteorologia de Meso e Grande Escalas.

CAMPINA GRANDE
Estado da Paraíba-Brasil
Março - 2007

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais por estarem sempre presentes.

D585v Diniz, Maryfrance de Cassia S.
 Variabilidade climática e ocorrência de cheias na zona
 semi-árida da bacia hidrográfica do São Francisco /
 Maryfrance de Cassia S. Diniz. - Campina Grande, 2007.
 85 f. : il.

 Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Universidade
 Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos
 Naturais.

 1. Climatologia 2. Clima - 3. Variação Climática 4.
 Dissertação I. Correia, Magaly de Fátima, Dra. II.
 Universidade Federal de Campina Grande - Campina Grande
 (PB) III. Título

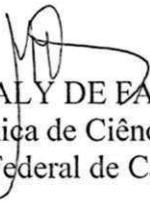
CDU 551.583(043)

MARYFRANCE DE CÁSSIA SANTOS DINIZ

VARIABILIDADE CLIMÁTICA E OCORRÊNCIA DE CHEIAS NA ZONA SEMI-ÁRIDA
DA BACIA HIDROGRÁFICA DO SÃO FRANCISCO

DISSERTAÇÃO APROVADA EM 23/07/2007

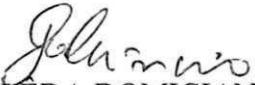
BANCA EXAMINADORA



Profa. Dra. MAGALY DE FATIMA CORREIA
Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas
Universidade Federal de Campina Grande



Profa. Dra. MARIA REGINA DA SILVA ARAGÃO
Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas
Universidade Federal de Campina Grande



Profa. Dra. JOSICLÊDA DOMICIANO GALVÊNCIO
Departamento de Ciências Geográficas
Universidade Federal de Pernambuco

À professora Dr^a Magaly de Fátima Correia pela orientação e ensinamentos transmitidos e, principalmente pela amizade, atenção, compreensão, paciência e incentivo nos momentos de falhas em todas as fases deste trabalho;

A professora Maria Regina da Silva Aragão pelo apoio em várias etapas da minha vida acadêmica e principalmente pela colaboração na fase da aplicação do FORTRAN essencial para realização de parte desse trabalho;

Em especial aos mestres, Wendell Rondinelli, Ewerton Cleudson e Ronaldo Menezes, agradeço por toda ajuda e total disposição incondicional oferecidos para condução deste trabalho;

Aos amigos Lincoln, Djane e Weber pelo auxílio e apoio irrestrito nas horas necessárias;

Aos companheiros paraenses pela convivência e novas amizades;

Aos amigos (ao pessoal) do Laboratório de Meteorologia de Pernambuco (LAMEPE), por compartilhar conhecimentos dos mais variados fins, especialmente a coordenadora Francis Lacerda pela oportunidade e apoio irrestrito;

A secretária do Programa do Curso de Pós graduação em Meteorologia, Divanete Cruz pela eficiência, atenção, dedicação e amizade concedidas durante o curso.

À engenheira Eyres Diana Ventura Silva e a meteorologista Miriam Carmen Costa, pela assistência.

A coordenação do Curso de Graduação em Meteorologia pela oportunidade concedida;

A CAPES pelo apoio financeiro através da concessão da bolsa de estudo;

Ao CNPq (Processos 480266/2004-2 - 504189/2003-4) e a UFCG que me concederam a oportunidade de colocar em prática conhecimentos teóricos aprendidos em sala de aula, contribuindo para o meu desenvolvimento como profissional e pesquisador;

Finalmente, a Deus, por tudo que me proporcionou e por ter colocado cada um daqueles que me apoiaram nessa etapa, pois sem isto, seria muito mais difícil chegar até aqui.

SUMÁRIO

	Página
RESUMO	6
ABSTRACT	7
I. LISTA DE FIGURAS	8
II. LISTA DE TABELAS	11
III. LISTA DE ABREVIATURAS	13
IV. LISTA DE SÍMBOLOS	15
1. INTRODUÇÃO	17
2. DESCRIÇÕES DA REGIÃO DE ESTUDO	19
2.1 Clima	20
2.2. Vegetação	21
3. O PROBLEMA DAS ENCHENTES E SECAS	23
4. REVISÃO DA LITERATURA	25
4.1. Cheias e inundações	25
4.2 Processos Chuva-Vazão	26
4.3 Relações entre chuvas extremas em bacias hidrográficas e o fenômeno ENOS (El Niño – Oscilação Sul).	26
4.4 Sistemas Convectivos de Mesoescala (SCM)	28
4.5 Utilização de índices meteorológicos para avaliação de eventos extremos.	30
5. DADOS E METODOLOGIA	32
5.1. Dados	32
5.2 Metodologia	33
5.2.1. Impacto das chuvas na zona semi-árida da bacia do São Francisco	33
5.2.1.1 Índice de Anomalia de Precipitação (RAI)	33
5.2.1.2 Campo de precipitação via radar	35
5.2.2 Estrutura termodinâmica da atmosfera	36
5.2.3 Análise estatística – o Método de Componentes Principais	38

6. RESULTADOS E DISCUSSÕES	42
6.1 Aspectos meteorológicos e hidrológicos das cheias de 1985 e 2004	42
6.1.1 O episódio de 1985	42
6.1.1.1 Características ambientais e natureza da precipitação em abril de 1985	43
6.1.2. O episódio de 2004	48
6.2. Análise Pluviométrica – Índice de Anomalia de Precipitação RAI	51
6.2.1. Índice RAI para eventos históricos selecionados	60
6.3. Análise de Componentes Principais (ACP)	62
6.3.1. Influência regional: abril de 1985 e janeiro de 2004	62
6.3.2. Influência da escala sinótica: abril de 1985	67
6.4. Configurações espaciais no nível de 925 hPa	74
7. CONCLUSÕES	90
7.1 – Aspectos meteorológicos das cheias no Submédio São Francisco – Aplicação do índice RAI	90
7.2 - Análise de Componentes Principais (ACP)	91
7.2.1 – Aspectos locais e regionais	91
7.2.2 – Aspectos de escala sinótica	92
7.2.2.1 – Conjunto completo de dados	92
7.2.2.2 – Subconjunto de dados (925 hPa)	92
7.3 – Imagens do radar Meteorológico de Petrolina	93
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	94

RESUMO

Neste trabalho são analisados eventos extremos de precipitação e formação de cheias à jusante do reservatório de Sobradinho na bacia hidrográfica do Rio São Francisco. Aspectos meteorológicos e hidrológicos das cheias de 1979, 1985 e 2004 são avaliados. Enfoque especial é dado ao episódio de 1985. Com o propósito de investigar a importância relativa da associação entre variáveis atmosféricas na evolução de sistemas convectivos e ocorrência de chuvas extremas utilizou-se a técnica de análise fatorial através de componentes principais. Os resultados mostram que um modelo com 4 componentes é adequado para representar a estrutura inicial das variáveis num domínio de grande escala. As duas primeiras componentes explicam 52,51% da variabilidade total dos dados e indicam que fatores dinâmicos foram preponderantes na definição das condições ambientais analisadas. Nas análises locais a primeira componente mostra que no evento de 1985 as variáveis de maior peso estão altamente correlacionadas com o teor de umidade nos baixos níveis e com o grau de instabilidade da atmosfera. A segunda componente mostra que as variáveis de maior peso estão associadas com processos de aquecimento e resfriamento radiativo. Os resultados para 2004 indicam padrão inverso. A obtenção do RAI (Rainfall Anomaly Index) para estações situadas no Submédio São Francisco mostram a grande predominância de secas em áreas igualmente vulneráveis à ocorrência de cheias e inundações. Valores positivos do RAI mais frequentes nos meses de março e abril indicam maior vulnerabilidade da região à ocorrência de cheias neste período. A disponibilidade de imagens de radar meteorológico para o ano de 1985 foi fundamental na análise da distribuição espacial, localização, duração e intensidade das células precipitantes. Verificou-se que a localização dos sistemas convectivos em relação aos afluentes do São Francisco foi o fator determinante no processo de formação das cheias.

ABSTRACT

In this work extreme rainfall events and flooding downstream of the Sobradinho reservoir in the São Francisco hydrographic basin are analyzed. Meteorological and hydrological aspects of the 1979, 1985 and 2004 floods are evaluated. Special attention is given to the 1985 event. The factorial analysis technique by means of principal components was used to investigate the relative importance of the association of convective systems and extreme rainfall occurrence. The results show that a model with 4 components is adequate to represent the initial structure of the variables in a large-scale domain. The first two components explain 52.51% of the total data variability and indicate that dynamical factors were determinant in the definition of the ambient conditions analyzed. In the local analyses the first component shows that in the 1985 event the variables that have more weight are highly correlated with the low-level moisture content and the degree of atmospheric instability. The second component shows that the variables that have more weight are associated with radiative heating and cooling. The results for 2004 have an inverse pattern. RAI (Rainfall Anomaly Index) values for stations located in the sub-middle São Francisco show that droughts dominate in areas that are equally vulnerable to flooding and inundation. A higher frequency of positive RAI values in March and April indicate that the region is more vulnerable to flooding in this period. Meteorological radar images for 1985 were fundamental in the analysis of the spatial distribution, location, duration and intensity of the precipitating cells. It was verified that the location of the convective systems with respect to the São Francisco tributaries was the determining factor in the process of flood formation.

LISTA DE FIGURAS

	Página
Figura 1 – Bacia Hidrográfica do São Francisco dividida em regiões fisiográficas. Fonte: Filho et al (www.ana.gov.br/).	04
Figura 2 – Posição geográfica da bacia do São Francisco e localização das 16 estações pluviométricas.	19
Figura 3. Distribuição do trecho a jusante de Sobradinho. Fonte: CHESF, 1986.	27
Figura 4 – Localização dos principais afluentes no Submédio São Francisco. O círculo indica a região num raio de 200 km dentro da área de cobertura do radar de Petrolina. A circunferência com raio de 200 km equivale á circunferência mais externa nas imagens de radar.	28
Figura 5. Seqüência de PPI's e RHI's obtidos nos dias 9, 10, 11 e 12 de abril de 1985. A distância entre os círculos concêntricos ao local do radar é de 50 km. A convenção utilizada para taxa de precipitação é EC – 1, vista na escala mostrada abaixo da figura. A seta no canto superior direito dos PPI's indica o norte verdadeiro (N). Os horários são indicados em cada PPI. A linha sinuosa, nos quadrantes nordeste e sudoeste representa o Rio São Francisco.	30
Figura 6. Seqüência de PPI's e RHI obtidos pelo radar meteorológico de Petrolina-PE no dia 10 de abril de 1985. A distância entre os círculos concêntricos ao local do radar é de 50 km. A convenção utilizada para taxa de precipitação é EC – 1, vista na escala mostrada abaixo da figura. A seta no canto superior direito em (a) indica o norte verdadeiro (N). Os horários são indicados em cada PPI. A linha sinuosa vista nos quadrantes nordeste e sudoeste representa o Rio São Francisco.	31
Figura 7 - PPI e RHI obtido no dias 11 de abril de 1985. A distância entre os círculos concêntricos ao local do radar é de 50 km. A convenção utilizada para taxa de precipitação é EC – 1 vista na escala mostrada abaixo da figura. A seta no canto superior direito dos PPI indica o norte verdadeiro (N). O horário é indicado no PPI.	31
Figura 8 - PPI e RHI obtido no dia 12 de abril de 1985. A distância entre os círculos concêntricos ao local do radar é de 50 km. A convenção utilizada para taxa de precipitação é EC – 1 vista na escala mostrada abaixo da figura. A seta no canto superior direito dos PPI indica o norte verdadeiro (N). O horário é indicado no PPI. A linha sinuosa vista nos quadrantes nordeste e sudoeste representa o Rio São Francisco.	32
Figura 9 – Evolução do total diário de chuva e da energia potencial disponível convectiva $CAPE_{MAX}$, para janeiro de 2004.	34

Figura 10 - Pêntadas de temperatura de brilho média (K) para o mês de Janeiro/2004. (Fonte: Climanálise, jan 2004, Satélite GOES 12, CPTEC/INPE).	36
Figura 11 – Comportamento mensal do índice RAI para estação de Bebedouro no período de 1969 a 2004.	38
Figura 12 - Índice RAI correspondente a 15 estações situadas no Submédio no período de 1979 a 2004. Os valores obtidos para 1979, 1985 e 2004 são destacados pelos círculos.	40
Figura 13 - Anomalias de precipitações: (a) janeiro, (b) fevereiro, (c) março e (d) abril de 1979. (Fonte: modificado de Gonçalves, et al, 2006).	45
Figura 14. Contribuição das variáveis atmosféricas aos fatores através da análise de componentes principais: (a) abril de 1985 e (b) janeiro de 2004.	49
Figura 15. Distribuição espacial da umidade específica, q (g/kg) no nível de 925 hPa.	60
Figura 16. Distribuição espacial da temperatura, T (°C) no nível de 925 hPa.	61
Figura 17. Distribuição espacial da componente meridional do vento, v (m/s) no nível de 925 hPa.	62
Figura 18. Distribuição espacial da componente zonal do vento, u (m/s) no nível de 925 hPa.	63
Figura 19. Distribuição espacial da componente meridional do vento, v (m/s) no nível de 200 hPa.	64
Figura 20. Distribuição espacial da componente zonal do vento, v (m/s) no nível de 200 hPa.	65
Figura 21 – Cargas fatoriais (correlações) diárias dos três primeiros fatores comuns temporais.	66
Figura 22. Padrão espacial do primeiro fator (escores) para a umidade específica q (g/kg) dos dias 09, 10, 11 e 12 de abril de 1985.	67
Figura 23 – Cargas fatoriais (correlações) diárias dos três primeiros fatores comuns temporais.	68
Figura 24 - Padrão espacial (escores) do primeiro fator para T (°C) dos dias 09, 10, 11 e 12 de abril de 1985.	69
Figura 25 - Cargas fatoriais (correlações) diárias dos três primeiros fatores comuns temporais	70
Figura 26 - Padrão espacial do primeiro fator (escores) para a componente meridional do vento v (m/s) dos dias 09, 10, 11 e 12 de abril de 1985.	71

- Figura 27 – Cargas fatoriais (correlações) diárias dos três primeiros fatores comuns temporais. 72
- Figura 28 - Padrão espacial do primeiro fator (escores) para a componente zonal do vento u (m/s) dos dias 09, 10, 11 e 12 de abril. 73

LISTA DE TABELAS

	Página
Tabela 1 – Características climatológicas da bacia do rio São Francisco. Fonte: ANA/SPR e Programa de Ações Estratégicas – PAE (Filho et al, 2004).	5
Tabela 2 – Relação dos postos (das estações) pluviométricas utilizadas na obtenção do índice RAI.	18
Tabela 3 Valores do IK e condições de tempo esperadas	21
Tabela 4. Classificação de CAPE segundo Bluestein, 1993	22
Tabela 5 - Índices de instabilidade e condições de tempo esperadas em abril de 1985.	29
Tabela 6. Índices de instabilidade e condições de tempo esperadas em janeiro de 2004.	33
Tabela 7. Classificação de anos secos ou úmidos de acordo com os valores do índice RAI.	44
Tabela 8. Contribuição das CP's para a variância total dos dados nos meses de Abril/1985 e Janeiro/2004.	47
Tabela 9 – Matriz de correlações encontrada para abril de 1985, em que T é a temperatura do ar, UR é a umidade relativa do ar, r é a razão de mistura, P é a pressão, Tw é a temperatura do bulbo úmido, T _{MAX} é a temperatura máxima, T _{MIN} é a temperatura mínima, U é a componente zonal do vento, V é a componente meridional do vento, CH é a chuva, EV é a evaporação, INS é a insolação e CAPE _{MAX} é a energia potencial convectiva disponível máxima.	48
Tabela 10. Matriz de correlações encontrada para abril de 1985, em que T é a temperatura do ar, UR é a umidade relativa do ar, r é a razão de mistura, T _{MIN} é a temperatura mínima, CAPE _{MAX} é a energia potencial convectiva disponível máxima, T _{MAX} é a temperatura máxima, RG é a radiação global, P é a pressão, CH é a chuva, EV é a evaporação, T _D é a temperatura do ponto de orvalho, Tw é a temperatura do bulbo úmido, u é a componente zonal do vento e v é a componente meridional do vento.	48
Tabela 11. Contribuição das componentes principais para variação total dos dados.	51
Tabela 12 – Contribuição das variáveis atmosféricas ao primeiro fator através da análise de componentes principais.	52

Tabela 13 – Contribuição das variáveis atmosféricas ao segundo fator através da análise de componentes principais.	53
Tabela 14 – Cargas das variáveis em cada fator (rotação VARIMAX). As cargas fatoriais representam correlações entre os fatores e as variáveis umidade específica diária (q_{925}) e temperatura diária (T_{925}) em 925 hPa.	55
Tabela 15 – Cargas das variáveis em cada fator (rotação VARIMAX). As cargas fatoriais representam correlações entre os fatores e as variáveis vento zonal diário (u_{925}) e vento meridional diário (v_{925}) em 925 hPa.	56
Tabela 16 – Total de precipitação via pluviômetros. Fonte: modificado de Araújo (1996)	57

LISTA DE ABREVIATURAS

ACP	Análise de Componentes Principais
ANA	Agência Nacional das Águas
BA	Bahia
CAPE	Convective Available Potential Energy (Energia
Potencial Convectiva)	
Cb	Cumulunimbus
CCM	Complexos Convectivos de Mesoescala
CHESF	Companhia Hidroelétrica do São Francisco
CP	Componente Principal
CPATSA	Centro de Pesquisa Agropecuária do Trópico
Semi-árido	
CPTEC/INPE	Centro de Previsão de Tempo e Estudos
Climáticos do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais	
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa e Agropecuária
ENOS	El Niño Oscilação Sul
EN/LN	El Niño / La Niña
EOF	Empiric Orthogonal Function (Função Ortogonal
Empírica)	
EP	Precipitação Efetiva
GIS	Geographic Information System (Sistema de
Informação Geográfica)	
GOES	Geostationary Operational Environmental
Satellite (Satélite Geoestacionário de Operação Ambiental)	
HL	Hora Local
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
IP	Índice de Precipitação
MG	Minas Gerais
N	Norte
NE	Nordeste
NEB	Nordeste do Brasil

NCAR/NCEP	National Center for Atmospheric Research – National Centers for Environmental Prediction
NW-SE	Noroeste – Sudeste
PDSI	Palmer Drought Severity Index
PE	Pernambuco
PPI	Plan Position Indicator (Indicador de Posição no Plano)
RAI	Rainfall Anomaly Index
RHI	Range Height Indicator (Indicador de Distância e Altura)
RJ	Rio de Janeiro
ROL	Radiação de Onda Longa
S	Sul
SC	Sistemas Convectivos
SCM	Sistemas Convectivos de Mesoescala
SPI	Standardized Precipitation Index
SRPV	Serviços Regionais de Proteção ao Vôo
SVATS	Solo Vegetação Atmosfera
TSM	Temperatura da Superfície do Mar
VCAN	Vórtice Ciclônico de Altos Níveis
W	West (Oeste)
ZCAS	Zona de Convergência do Atlântico Sul
ZCIT	Zona de Convergência Intertropical

LISTA DE SÍMBOLOS

A	matriz de mudança de base
A^{-1}	matriz inversa
A^t	matriz transposta
a_{ij}	coeficiente da i-ésima linha na j-ésima
coluna dos autovalores	
°	grau
C	Celsius
D	matriz diagonal
h	hora
hab	habitante
hPa	hectopascal
j	joule
k	número de variáveis de um conjunto em
estudo	
kg	quilograma
km	quilômetro
km^2	quilômetro quadrado
λ	autovalores
m	metro
m^3/s	metro cúbico por segundo
mm	milímetro
n	número de observações
q	umidade específica
R	matriz de correlação
S	direção sul
s	segundo
T	temperatura do ar
T_d	temperatura do ponto de orvalho
T_{va}	temperatura virtual do ambiente
T_{vp}	temperatura virtual da parcela
u	componente zonal do vento
v	componente meridional do vento
(X)	matriz dos dados originais

$\%$

porcentagem

‘

minuto geográfico

 θ_w

temperatura potencial do bulbo úmido

1 – INTRODUÇÃO

A realização de estudos sobre o impacto da variabilidade climática nos recursos hídricos superficiais no Brasil tem sido cada vez mais freqüente nas últimas décadas. Uma constatação unânime dessas investigações é que o efeito desse impacto, dependendo da região, pode trazer conseqüências sociais e econômicas graves como a destruição de lavouras, desemprego e fome. A vulnerabilidade é maior em regiões semi-áridas cuja irregularidade na distribuição espacial e temporal das chuvas constitui um fator crítico ao desenvolvimento local.

O grau de vulnerabilidade, entretanto, depende também das alterações ambientais resultantes das restrições impostas pela disponibilidade limitada da água. O regime natural dos rios é substancialmente alterado pela ação do homem, principalmente decorrente da construção de represas. A migração da população para localidades próximas dos grandes reservatórios de água leva normalmente a ocupação desordenada do solo contribuindo para urbanização em áreas de risco em períodos de cheia.

Por outro lado, embora a interferência do homem em áreas vulneráveis decorrente da ocupação desordenada do solo ou de mudanças radicais no uso da terra represente um agravante substancial, não constitui um fator determinante de eventos extremos como enchentes e secas; esses episódios estão geralmente associados com condições atmosféricas específicas, decorrentes da ação conjunta de sistemas atmosféricos de diferentes escalas. Entretanto, processos de urbanização acelerada em áreas com solos rasos e vegetação esparsa, agravam os picos de cheias por causa da baixa capacidade desses solos para reter a água da chuva, fazendo com que a mesma escoe rapidamente para os rios.

Em relação a eventos de secas o problema está mais relacionado com a distribuição irregular das chuvas do que propriamente com a falta das mesmas. Outros fatores, como a baixa capacidade de retenção de umidade no solo e altas taxas de evaporação e evapotranspiração, contribuem para agravar o problema (<http://www.mma.gov.br/port/srh/>).

Este trabalho trata de questões relativas ao rio São Francisco e tem como objetivo geral detectar condições atmosféricas favoráveis à ocorrência de eventos meteorológicos extremos. Situações de fortes estiagens e formação de cheias com inundações no trecho denominado Submédio da bacia hidrográfica são analisadas. Enfoque especial é dado ao episódio de enchentes e inundações observadas em abril de 1985. Para atingir o objetivo proposto, as análises desse evento foram comparadas com padrões meteorológicos observados em dois outros episódios importantes de cheias registradas na bacia do São Francisco: os eventos de 1979 e 2004. Procurou-se também identificar padrões atmosféricos que possam ser usados como dados complementares no planejamento de operação de reservatórios e gerenciamento de recursos hídricos.

Com esse propósito, é feito no capítulo 2 (dois) uma descrição sucinta da região de estudo quanto à localização, características das regiões fisiográficas, condições de clima, vegetação, relevo e regime pluviométrico. No capítulo 3 é abordado o problema das enchentes na Bacia do São Francisco enfatizando dois eventos de grande importância na bacia: a cheia de 1985 e de 2004. No capítulo 4 é apresentada uma síntese de estudos relacionados com o fenômeno de cheias. No capítulo 5 são descritos os métodos de análises e dados usados no desenvolvimento deste estudo. Finalmente, no capítulo 6 é feita uma discussão detalhada dos resultados obtidos e no capítulo 7 são apresentadas conclusões do estudo e sugestões para futuros trabalhos.

2 – DESCRIÇÕES DA REGIÃO DE ESTUDO

A bacia hidrográfica do rio São Francisco situada entre as latitudes de 7° e 21°S e longitudes de 35° e 47°40'W possui uma área de drenagem da ordem de 640.000 km². Dividida em quatro regiões fisiográficas, (Alto, Médio, Submédio e Baixo São Francisco) ocupa 8% do território nacional. A maior área da bacia (83%) está localizada nos estados de Minas Gerais e Bahia, 16% em Pernambuco, Sergipe e Alagoas e 1% em Goiás e Distrito Federal (Figura 1).

O rio São Francisco possui 36 tributários considerados de porte significativo, dos quais apenas 19 deles são perenes. Os principais contribuintes são os rios Paracatu, Urucuia, Carinhanha, Corrente e Grande todos situados na margem esquerda do rio e responsáveis por 70% das águas. Os principais tributários da margem direita do rio são os rios Paraopeba, das Velhas, Jequitaiá e Verde Grande.

A região do Submédio São Francisco, foco central deste estudo encontra-se localizada entre os paralelos de 7° e 11°30'S e os meridianos de 37° e 43°W e ocupa uma extensão territorial que corresponde a 19,8% da bacia. Situados numa distância de aproximadamente 40 km da represa de Sobradinho, os municípios de Petrolina em Pernambuco e Juazeiro na Bahia formam atualmente um pólo de desenvolvimento da região.

Entre os principais setores de crescimento econômico da região destaca-se a agricultura irrigada favorecida pelas condições climáticas locais aliadas a disponibilidade de água após a construção do Lago de Sobradinho. O projeto, Senador Nilo Coelho, situado no Submédio São Francisco é um dos maiores perímetros de irrigação, explorado no país (Gomes, 2001).

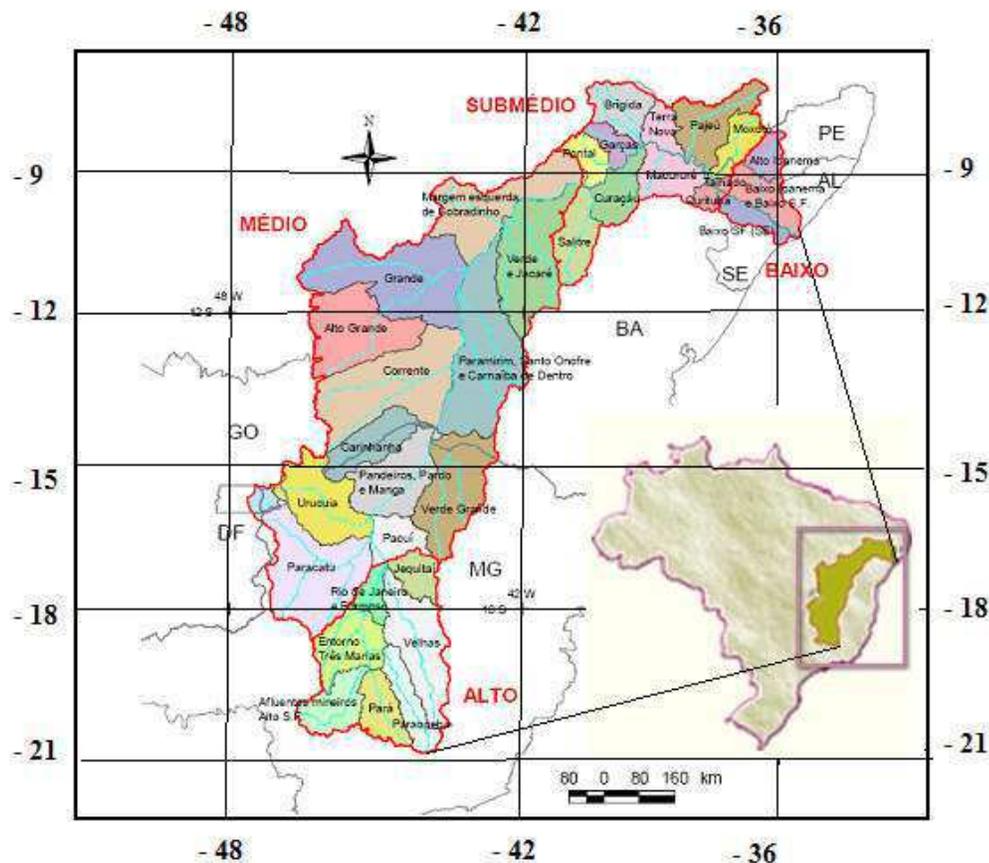


Figura 1 – Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco dividida em regiões fisiográficas. (Fonte: www.ana.gov.br).

2.1 - Clima

O clima apresenta uma alta diversidade decorrente da grande extensão da bacia hidrográfica. Tem características que vai do úmido ao tipicamente árido. A temperatura média anual varia entre 18 e 27°C.

Do escoamento total do rio São Francisco, 70% têm origem na precipitação que ocorre no Estado de Minas Gerais, que corresponde a apenas 37% da área da bacia. Uma síntese das características climáticas mais importantes é apresentada na Tabela 1.

Tabela 1 – Características climatológicas da bacia do rio São Francisco. Fonte: ANA/SPR e Programa de Ações Estratégicas – PAE (Filho et al, 2004).

Características				
	Alto	Médio	Submédio	Baixo
Clima	Tropical úmido e temperado e de altitude	Tropical semi-árido e úmido seco	Semi-árido e árido	Sub-úmido
Precipitação anual (mm)	2000 a 1100	1400 a 600	800 a 350	350 a 1500
Estação Chuvosa	Novembro a abril	Novembro a abril	Novembro a abril	Março a setembro
Temperatura média (°C)	23	24	27	25
Insolação média (h)	2400	2600 a 3300	2800	2800
Evapotranspiração média anual (mm)	1000	1300	1550	1500

A porção semi-árida do Vale é constituída por regiões situadas no Médio, Submédio e parte do Baixo São Francisco.

2.2 - Vegetação

A cobertura vegetativa de qualquer área ecológica representa uma resposta ao conjunto de relações entre os componentes naturais do meio ambiente.

A cobertura vegetativa da bacia do rio São Francisco é bastante diversificada. No entanto, a maior parte é formada por cerrados e caatingas. Nas zonas úmidas são encontradas áreas cobertas por matas decorrentes de chuvas em abundância associada com solos férteis e

profundos (vales dos rios Carinhanhas, Corrente e Grande na Bahia e do Verde Grande, na Bahia e Minas Gerais). Em regiões de mata a vegetação é alta e densa.

Na área objeto deste estudo, a vegetação dominante é a caatinga. É um complexo formado por um conjunto de plantas decíduas (plantas cujas folhas caem totalmente em determinadas épocas do ano) e xerófilas (plantas que possuem dispositivos anatômicos e fisiológicos para restringir a transpiração) formado por vegetais lenhosos e uma infinidade de cactáceas e bromeliáceas (Braga, et al., 2003). A característica marcante desta espécie é a perda das folhas no período de estiagem, como mecanismo de defesa da flora à limitação hídrica.

3 – O PROBLEMA DAS ENCHENTES E SECAS

Enchente ou cheia não significa necessariamente catástrofe e difere do fenômeno denominado inundação. A cheia ou enchente é um fenômeno natural dos regimes dos rios caracterizado por uma vazão relativamente grande do escoamento superficial. Não existe rio sem enchentes. A inundação, entretanto, caracteriza-se pelo extravasamento do canal.

Vale ressaltar, entretanto, que aumentos significativos do escoamento superficial, poderão acontecer e provocar inundações, caso haja obstruções no canal natural do rio (Villela e Mattos, 1975).

A Seca em bacias hidrológicas é um fenômeno típico de situações em que a chuva dentro do período considerado úmido ocorre tardiamente ou também quando a distribuição irregular da precipitação prejudica o crescimento ou desenvolvimento das plantações agrícolas.

Quando o total anual de chuvas é inferior ao mínimo necessário para as plantações, a seca é denominada de *absoluta*; entretanto, quando as chuvas são suficientes apenas para cobrir de folhas a caatinga e acumular um pouco de água nos barreiros e açudes, mas não permitem o desenvolvimento normal dos plantios agrícolas, dá-se o nome de *seca verde*.
Fonte: Andrade et al (www.fundaj.gov.br).

As cheias na bacia do São Francisco são normalmente causadas por superelevação do nível nos principais rios e alagamento das várzeas. No alto São Francisco esta elevação ocorre frequentemente associada com chuvas provenientes de sistemas frontais. Um outro tipo de cheia bem comum nesta região da bacia está associado com a urbanização nas sub-bacias gerando o fenômeno conhecido por cheias urbanas. Nestes casos as inundações surgem logo após a ocorrência de chuvas intensas, de natureza convectiva, geralmente de curta duração.

Resultados de um estudo técnico de apoio ao plano decenal de recursos hídricos da bacia hidrográfica do rio São Francisco (Filho et al, 2004), indicam que no Médio, parte do Submédio e no Baixo São Francisco, as enchentes ocorrem devido ao extravasamento das

águas para o leito maior e a planície de inundação. Os autores apontam como causa principal a ocupação desordenada do solo. Situações como a demanda por recursos naturais, cada vez maior, devido ao aumento da população, bem como o impacto ambiental gerado pelo uso inadequado do solo comprometem sua capacidade produtiva, afeta os recursos hídricos, a vegetação e o microclima. Por exemplo, o desmatamento indiscriminado realizado com objetivo de “liberar” terras para agricultura e pecuária influencia nas condições de interceptação, retenção e infiltração das chuvas, escoamento superficial e subsuperficial, reduz a evapotranspiração e, conseqüentemente a quantidade de vapor d’água necessária na atmosfera para a condensação. A retirada das matas ciliares principalmente na cabeceira principal do rio provoca o carreamento de terras férteis e assoreamento, causando enchentes nos períodos de alta pluviosidade (www.fundaj.gov.br).

Eles ressaltam o fato de que a maior parte das cidades nesta área está situada em planícies de inundação cujas características fisiográficas favorecem a expansão de atividades antrópicas como a pesca, recreação e lazer.

Em 1985, inundações com impacto significativo foram registradas em várias localidades do Submédio da bacia, decorrentes de chuvas intensas concentradas na primeira quinzena do mês de abril. Alguns estudos mostram que episódios significativos de chuva observados frequentemente nos meses de março e abril coincidem com a posição mais ao sul da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT). Neste ano, a posição atingida por este sistema foi de aproximadamente 6°S, permanecendo nessa posição durante um período de tempo superior à média (Diniz, et al, 2004; Barbosa e Correia, 2005).

Evento semelhante ocorreu recentemente. As cheias registradas na região nos meses de janeiro e fevereiro de 2004 se formaram em decorrência de chuvas fortes observadas predominantemente na região do Submédio São Francisco. Essas chuvas provocaram o extravasamento de diversos açudes na região, fazendo com que esses vertimentos ocorressem quase que simultaneamente, gerando assim uma onda de cheia na calha principal do rio São Francisco, principalmente no trecho da cidade de Belém do São Francisco, em Pernambuco, até a foz no Oceano Atlântico. Neste caso, a atuação dos Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis (VCAN) favoreceu a formação e desenvolvimento dos sistemas precipitantes intensos observados na região.

4 - REVISÃO DA LITERATURA

Neste item, foi feito um levantamento preliminar de estudos sobre a problemática das cheias, condições atmosféricas adversas e fatores climáticos associados, controle de enchentes e métodos de análise o qual serviu de suporte para definir as metas e critérios adotados na elaboração desta pesquisa.

4.1 - Cheias e inundações

Como mencionado anteriormente, as cheias nem sempre estão associadas com desastres ou danos. Trata-se de um fenômeno natural cuja ocorrência pode ou não causar inundações. A formação deste fenômeno está associada basicamente a fatores climáticos (intensidade e duração de chuvas na área da bacia) e fatores fisiográficos (declividade, cobertura vegetal, tipo de solo, etc.) os quais determinam o grau de complexidade dos efeitos da precipitação nas bacias hidrográficas.

As alterações climáticas também são muito significativas no agravamento dos efeitos e no aumento da frequência das enchentes e secas. Em regiões semi-áridas esses impactos podem atingir proporções significativas, uma vez que estas áreas são caracterizadas por climas do tipo predominantemente seco e a distribuição tanto espacial como temporal das chuvas é bastante irregular. (Magalhães et al., 1987).

É normal existir no entorno dos rios, áreas inundáveis. Entretanto, o fenômeno passa a ser um problema quando o homem ultrapassa os limites naturais dos rios. A ocupação desordenada em áreas ribeirinhas agrava os efeitos das chuvas responsáveis por enchentes e inundações.

Segundo Chow et al, (1988), existem dois efeitos fundamentais sobre os processos hidrológicos que resultam do crescimento urbano. A quantidade de água aumenta na mesma proporção em que crescem as áreas impermeabilizadas reduzindo o volume de água infiltrada, e a velocidade de drenagem superficial e o pico das cheias aumenta com a eficiência no sistema de drenagem.

4.2 – Processos Chuva-Vazão

A utilização de registros de vazão em estudos hidrológicos é extremamente importante por ser um dado que integra informações espaciais e temporais de impactos climáticos nas bacias hidrográficas. No entanto, sabe-se que a relação entre chuva e vazão é indireta e altamente não linear. No entanto, é bastante razoável esperar que haja uma correlação entre as anomalias de precipitação e da vazão.

O processo chuva-vazão é complexo e envolve não apenas a influência hidrológica. A influência da biologia e geologia é igualmente importante nas interações ambientais conforme descrito em Barp, (1999). É, portanto, necessário considerar hipóteses e utilizar leis empíricas que ajudem a entender melhor os mecanismos envolvidos. Neste contexto, a autora defende a utilização de modelos matemáticos como sendo uma ferramenta importante para compreensão e manejo de bacias hidrográficas.

Em meados da década de 80, com a necessidade de lidar com problemas ambientais no Brasil, surgiram os primeiros trabalhos utilizando o acoplamento entre modelos hidrológicos e atmosféricos. Estudos dos processos de balanço de água e energia exigiram o desenvolvimento de esquemas de transferência solo-vegetação-atmosfera, denominados de SVATS como citados nos trabalhos de O'Donnell e Canedo (1980), Araújo et al. (2001), Araújo e Rotunno Filho (2003) e Araújo et al. (2003). Previsões de vazão são feitas considerando o impacto de mudanças climáticas e alterações nas condições atmosféricas resultantes de ações antrópicas.

4.3 – Relações entre chuvas extremas em bacias hidrográficas e o fenômeno ENOS (El Niño – Oscilação Sul)

Vários estudos foram realizados com o objetivo de mostrar a associação entre eventos extremos de chuva e o fenômeno ENOS. No Brasil, o ENOS é responsável por uma parcela significativa da variabilidade do regime de chuvas e tem influência direta nos recursos hídricos superficiais.

Ronchail et al (2005) investigaram a relação entre a ocorrência de enchentes na bacia Mamoré, (sudoeste da Amazônia-Bolívia) e a variabilidade da Temperatura da Superfície do

Mar (TSM). Eles verificaram forte associação entre inundações de grande porte (1982 e 1992) e eventos El Niño. No entanto, mostraram também que essa associação não ocorre sistematicamente. No caso do episódio El Niño 1997-1998, considerado por muitos como o evento mais forte do século passado, foram registradas anomalias negativas de precipitação e ausência de inundações na região.

Outros estudos avaliaram o efeito de eventos intensos do ENOS na descarga fluvial de rios brasileiros (Marengo, 1992; Marengo, 1993; Grimm et al, 1998; Galvêncio e Sousa, 2002, Correia et al, 2005; Farias et al, 2005). No rio Amazonas, os valores da vazão observados no posto Óbidos, e da cota do rio Negro em Manaus foram acima da média nos episódios La Niña ocorridos em 1975-1976 e 1988-1989.

Molion e Carvalho (1987) analisaram a influência do ENOS 1982-1983 na descarga fluvial de alguns rios na Amazônia. Eles constataram que o Índice de Oscilação Sul (IOS) pode ser um preditor da variabilidade das chuvas na região.

Outros autores (Moura e Shukla, 1981; Liebmann et al., 1999, Satyamurty, et al., 1998.) concentraram suas análises na avaliação da influência de anomalias da Temperatura da Superfície do Mar do Atlântico intertropical sobre o regime de chuvas no Nordeste do Brasil.

Galvêncio e Sousa, (2002), utilizaram a técnica de correlação múltipla para avaliar o impacto do fenômeno El Niño na precipitação pluviométrica da bacia do rio São Francisco. Eles verificaram uma influência positiva com aumento das chuvas no Alto e Médio São Francisco. Impacto oposto foi observado na região do Baixo São Francisco.

Smith, Baeck e Zhang (2001), examinaram o papel das tempestades severas (supercélulas) como causadoras de inundações que ocorreram no Texas (1995), Flórida (1992), Nebraska e Pensilvânia (1996) usando dados de um radar meteorológico doppler (WSR-88). Eles verificaram que este tipo de sistema tem impacto mais significativo nos processos hidrológicos urbanos decorrentes das altas taxas de precipitação em intervalos curtos de tempo.

Carvalho et al, (2002) analisaram a relação entre eventos de precipitação extrema em São Paulo e atividade convectiva na Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS). Eles

verificaram que 65% dos casos ocorreram quando a atividade convectiva na ZCAS foi extensa e intensa. Segundo os autores esta categoria de eventos é modulada por episódios de El Niño.

Salvador, (2000), utilizando dados de satélite e anomalias da TSM, procurou identificar sistemas atmosféricos responsáveis pela ocorrência de eventos extremos de precipitação em janeiro de 2004 no Estado de Alagoas. O autor concluiu que a situação atípica de chuva com valores bem acima da média climática resultou da influência conjunta de três sistemas de grande escala: frentes frias que atingiram o sul da Bahia, a Zona de Convergência Intertropical e um Vórtice Ciclônico de Altos Níveis.

4.4 - Sistemas Convectivos de Mesoescala (SCM)

Tempo severo associado com SCM pode causar sérios danos à população tais como quedas de torres de transmissão de energia elétrica, inundações e deslizamentos de encosta. Essa é uma razão pelas quais esses sistemas tem sido tema de vários estudos nas áreas de climatologia, meteorologia e recursos hídricos.

De acordo com a classificação de escalas de Orlanski, (1975), os sistemas convectivos estão inseridos na denominada mesoescala, com dimensões espaciais que variam de dezenas até um milhar de quilômetros. Em ordem decrescente de dimensões espaciais tem-se:

- meso- α (2000 a 200 km) - inclui os complexos convectivos de mesoescala e os vórtices de ar frio do tipo vírgula;
- meso- β (200 a 20 km) - inclui linhas de instabilidade e circulações térmicas topograficamente induzidas, e
- meso- γ (20 a 2 km) - inclui as nuvens cumulonimbus individuais.

Na avaliação dos mecanismos físicos associados com atividade convectiva existe a necessidade de identificar e analisar o relacionamento entre processos dinâmicos e termodinâmicos na formação e organização dos sistemas convectivos (SC). Na literatura vários autores têm ressaltado a importância de maiores conhecimentos sobre os processos físicos associados ao desenvolvimento da convecção tropical (Machado et al, 1993; Cohen et al, 1995).

A análise da relação complexa entre os diversos componentes atmosféricos envolvidos no processo requer uma abordagem estatística multivariada. Neste sentido a análise fatorial tem sido amplamente utilizada para identificar características específicas de fenômenos meteorológicos em diversas regiões do país. (Mohan and Arumugam, 1996).

Uma situação extrema de desenvolvimento de tempestade severa foi registrada, em maio de 1994, na cidade de Ribeirão Preto no Estado de São Paulo causando perdas materiais da ordem de 11 milhões de dólares e três mortes. Neste caso, ventos muito fortes foram a principal razão dos prejuízos observados (Menezes, 1998; Menezes e Silva Dias, 2004).

Eventos de precipitação extrema também decorrente da formação de SCM foram observados no período entre 01 e 08 de janeiro de 2002, em São Paulo, Rio de Janeiro e Minas Gerais. Foram registrados totais de chuva da ordem de 439 mm em Campos do Jordão, 374 mm em Itajubá (MG) e 287 mm em Resende (RJ) (CPTEC/INPE 2000).

Outra situação de chuvas extremas proveniente desses sistemas foi registrada em 25 de janeiro no Estado do Rio de Janeiro. O evento atribuído ao desenvolvimento de linhas de instabilidade provocou inundações em várias regiões (Silva Paiva, 2000; Silva Paiva e Menezes, 2000 e Silva, 2003).

Pereira Filho et al, (2002), analisaram grandes eventos de enchentes na Região Metropolitana de São Paulo, ocorridos entre 1999 e 2002. Eles verificaram que 75% dos casos analisados estão associados com valores de temperatura do ponto de orvalho acima de 20°C e que 60% destes estão associados com a penetração da brisa marítima no período da tarde.

Condições atmosféricas associadas com um caso de evento de precipitação extrema ocorrido na Costa Leste do Nordeste entre 31 e 02 de agosto de 2000 foram analisadas por Silva e Molion, (2002). Eles verificaram que o episódio teve início numa perturbação no campo dos ventos alísios causada pela aproximação de um sistema frontal que culminou no desenvolvimento de intensos aglomerados de cumulonimbos atingindo profundidades da ordem de 13 km. No dia 01 de agosto foram registrados totais pluviométricos superiores a 260 mm/dia no litoral de Alagoas e 300 mm/dia no litoral sul de Pernambuco.

Eventos significativos de chuva no semi-árido brasileiro associados com SCM também tem sido foco de atenção de diversas investigações científicas (Ramos, 1975; Silva Aragão et

al, 2000; Diniz, et al, 2004; Barbosa e Correia, 2005). Na maioria destes trabalhos os autores estudaram mecanismos de circulação atmosférica que influenciam na formação e desenvolvimento dos SCM observados na região. O controle da grande escala é determinante na evolução destes sistemas.

Barbosa e Correia, (2005), investigaram a natureza de SCM responsáveis por altos índices pluviométricos e inundações no semi-árido brasileiro. Episódios extremos no período chuvoso da região e um evento incomum de intensa atividade convectiva registrado no mês de junho foram analisados. Os resultados mostram que a convergência do fluxo de umidade em grande escala nos baixos níveis é fundamental para a ocorrência da convecção profunda.

4.5. - Utilização de índices meteorológicos para avaliação de eventos extremos

Índices de seca meteorológica são indicadores utilizados frequentemente para quantificar, padronizar e comparar secas nos modos, temporal e espacial. A utilização dos índices tem como objetivo obter um valor numérico para precipitação, que permita a comparação entre diferentes áreas afetadas.

O Índice de Severidade de Seca de Palmer (PDSI) foi apresentado por Palmer (1965), como um procedimento de determinação do balanço de água. O PDSI é calculado com base em dados de evapotranspiração, infiltração e escoamento superficial, o qual indica uma medida para a diferença acumulada entre a precipitação e a precipitação necessária para a evapotranspiração. Segundo este autor, seca é o intervalo de tempo, geralmente da ordem de meses ou até anos, durante o qual o abastecimento hídrico de uma região diminui bastante em relação ao climatologicamente esperado ou apropriado.

O Índice Padronizado de Precipitação ("Standardized Precipitation Index", SPI), desenvolvido por Mckee et al., (1993 e 1995) é uma das poucas ferramentas capaz de quantificar e monitorar a seca em diferentes escalas de tempo. Para Mckee, tais escalas ao serem relacionadas ao déficit de precipitação pluvial, tornam-se extremamente importantes caracterizando os diferentes tipos de seca. (Brunini et al., 2005).

Um índice ainda pouco utilizado na região tropical e desenvolvido por Van Rooy (1965) é conhecido como Rainfall Anomaly Index (RAI). O uso deste índice permite comparar o desvio da precipitação em relação à condição normal climatológica de diversas

regiões, ou seja, comparar a precipitação de um lugar determinado com a média dos dez valores extremos de anomalias positivas e negativas de precipitação. Citado por Byun e Wilhite (1999), tem sido aplicado de forma experimental em áreas muito secas.

Alguns trabalhos (Loukas, 2003; Freitas, 2004; Freitas, 2005) foram desenvolvidos com objetivo de avaliar a eficiência do uso do índice RAI em comparação com índices tradicionalmente usados em estudos de secas. Loukas, (2003) através um estudo sobre monitoramento de secas na Grécia, verificou uma alta correlação entre os índices RAI e o Índice de Precipitação Padronizada SPI.

Gonçalves et al. (2006), utilizaram o índice RAI em um estudo sobre eventos extremos de precipitação na zona semi-árida da bacia hidrográfica do rio São Francisco. Os resultados mostram que a incidência de anos secos é substancialmente maior na região estudada. No entanto, os autores ressaltam que apenas o indicativo de ano seco não garante a ausência de cheias na região.

Modelos estatísticos baseados em índices de seca meteorológica foram aplicados para a previsão de secas na Bacia hidrográfica do Rio Parnaíba e no Estado do Ceará. Os resultados foram usados como suporte para monitorar a intensidade e duração de períodos secos, possibilitando com isso, tomar medidas efetivas a fim de minimizar os impactos provocados pelo fenômeno da seca em regiões semi-áridas (Freitas, 2004).

Em trabalho realizado por Moscati & Gan (2004), foram analisadas as condições sinóticas favoráveis para um caso de chuva intensa ocorrido em Dezembro de 1989 no interior semi-árido do Nordeste brasileiro. Eles definiram um Índice de Precipitação (IP) para determinar os maiores eventos de chuva do período e, com auxílio de outros parâmetros, puderam explicar que a ocorrência de precipitação extrema foi devido à interação dos vários sistemas sinóticos que atuaram durante o evento na região.

Byun & Wilhite (1999) analisaram um conjunto de novos índices e suas limitações para avaliar a seca e melhorar o monitoramento deste fenômeno. A análise foi baseada na precipitação diária definida como Precipitação Efetiva (EP), complementada por uma série de índices que mostram o início, o fim, duração de período de escassez da água e a severidade da seca. Segundo os autores o método foi eficaz para quantificar a intensidade da seca e

concluíram que também pode ser aplicado para avaliar o excesso de água em períodos de chuvas intensas.

Blain & Brunini (2005) avaliaram e adaptaram a metodologia do Índice de Severidade de Seca de Palmer (PDSI) e do Índice Padronizado de Precipitação (SPI) às condições climáticas do estado de São Paulo comparando seus valores a parâmetros do balanço hídrico climático de treze localidades. Eles verificaram que, o índice PDSI ajustado é de grande utilidade para o monitoramento da seca meteorológica no Estado de São Paulo e sua aplicação possibilita quantificar e monitorar o déficit hídrico em várias escalas de tempo, seja de curta (mensal) ou longa duração (anual).

5 – DADOS E METODOLOGIA

5.1 – Dados

Para alcançar os objetivos propostos neste estudo foram utilizados os seguintes dados:

- 1- Totais mensais de chuva provenientes da Agência Nacional de Águas (ANA); Disponível em <<http://www.ana.gov.br>>
- 2- Registros médios diários de precipitação do campo experimental de Bebedouro – PE do Centro de Pesquisa Agropecuária do Trópico Semi-Árido (CPATSA) da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA); Disponível em <<http://www.cpat.br>>
- 3-Campos de reanálises do NCAR/NCEP (National Center for Atmospheric Research/National Centers for Environmental Prediction) nos horários de 00, 06, 12 e 18 UTC e no domínio definido pelas latitudes de 5°N e 15°S e longitudes de 45° e 30°W; Disponível em <<http://www.cdc.noaa.gov/Composites/Hour>>.
- 4- Dados de sondagens realizadas as 12:00 UTC em Petrolina – PE nos anos de 1985 e 2004 para analisar a estrutura termodinâmica da atmosfera nos períodos de enchentes;
- 5- Imagens do satélite GOES;
Disponível em <http://www.cptec.inpe.br/products/temp_brilho>.

6- Normais Climatológicas do período (1961-1990) do INMET (Instituto Nacional de meteorologia);

7- Informações do Climanálise e mapas contidos no site do CPTEC (Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos). Estas informações foram utilizadas para avaliação das condições atmosféricas e sistemas sinóticos atuantes na região Nordeste do país no período de 2004 estudado; Disponível em <http://www.cptec.inpe.br/products/climanalise/>.

8- Imagens do Radar de Petrolina obtidas na primeira quinzena de abril de 1985 para analisar a atividade convectiva no período de cheias e inundações registradas na zona semi-árida da bacia.

5.2 - Metodologia

5.2.1 - Impacto das chuvas na zona semi-árida da bacia do São Francisco

5.2.1.1 - Índice de Anomalia de Precipitação (RAI)

A previsão e o monitoramento de eventos meteorológicos extremos são de grande relevância para projetos de irrigação, abastecimento de água, e atividades agrícolas. A partir do monitoramento meteorológico de secas e enchentes é possível obter informações no tempo e espaço de características como, intensidade, duração e severidade dos períodos secos e úmidos, possibilitando que medidas sejam tomadas em curto prazo, no intuito de minimizar os impactos causados por esses fenômenos.

A avaliação do grau de severidade e duração dos períodos secos e úmidos no presente estudo foi feita com base no Índice de Anomalia de Precipitação RAI (Rainfall Anomaly Index), desenvolvido por Van Rooy (1965). O RAI foi calculado usando dados mensais de precipitação de 15 estações situadas no Submédio São Francisco, no período entre 1975 e 2004, e dados diários coletados na estação de Bebedouro (PE) no período de 1969 a 2004 (Tabela 2; Figura 2).

Tabela 2 – Relação dos postos (das estações) pluviométricas utilizadas na obtenção do índice RAI.

	Posto / Sub- bacia	Longitude	Latitude	Altitude
1	AFOGADOS DA INGAZEIRA (DNOCS) / Rio Pajéu	-37,6	-7,7	525
2	FLORESTA / Rio Pajéu	-38,5	-8,6	317
3	AIRI (ROCHEDO) / Rio Pajéu	-38,2	-8,5	361
4	AÇUDE SERRINHA / Rio Pajéu	-38,5	-8,2	375
5	BELÉM DE SÃO FRANCISCO / Rio São Francisco	-38,9	-8,7	305
6	SERRA TALHADA / Rio São Francisco	-38,2	-8,0	435
7	JACARÉ / Rio São Pedro	-39,8	-8,2	390
8	POÇO DO FUMO / Rio Gravatá	-39,7	-8,1	350
9	FAZENDA TAPERA / Rio Brígida	-39,6	-8,5	0
10	FAZENDA SÃO BENTO / Rio Garças	-39,9	-8,6	350
11	LAGOA GRANDE / Rio Pontal	-40,2	-8,9	365
12	PRÓXIMO A CURAÇA II / Rio Curaçá	-39,9	-9,1	365
13	CAMPO DOS CAVALOS / Rio Salitre	-40,6	-9,5	377
14	LAGOA DO BOI / Poço Comprido	-40,2	-9,4	378
15	JUNCO / Rio Salitre	-40,6	-9,6	397
16	BEBEDOURO / Rio São Francisco	-40,3	-9,1	

Os valores do índice RAI foram obtidos a partir das seguintes equações:

$$RAI = 3 \left[\frac{(N - \bar{N})}{(\bar{M} - \bar{N})} \right], \text{ para anomalias positivas;} \quad (1)$$

$$RAI = -3 \left[\frac{(N - \bar{N})}{(\bar{X} - \bar{N})} \right], \text{ para anomalias negativas,} \quad (2)$$

Sendo:

N = precipitação medida (anual, mensal, semanal, diária);

\bar{N} = precipitação média da série histórica;

\bar{M} = média das dez maiores precipitações da série histórica

\bar{X} = média das dez menores precipitações da série histórica.

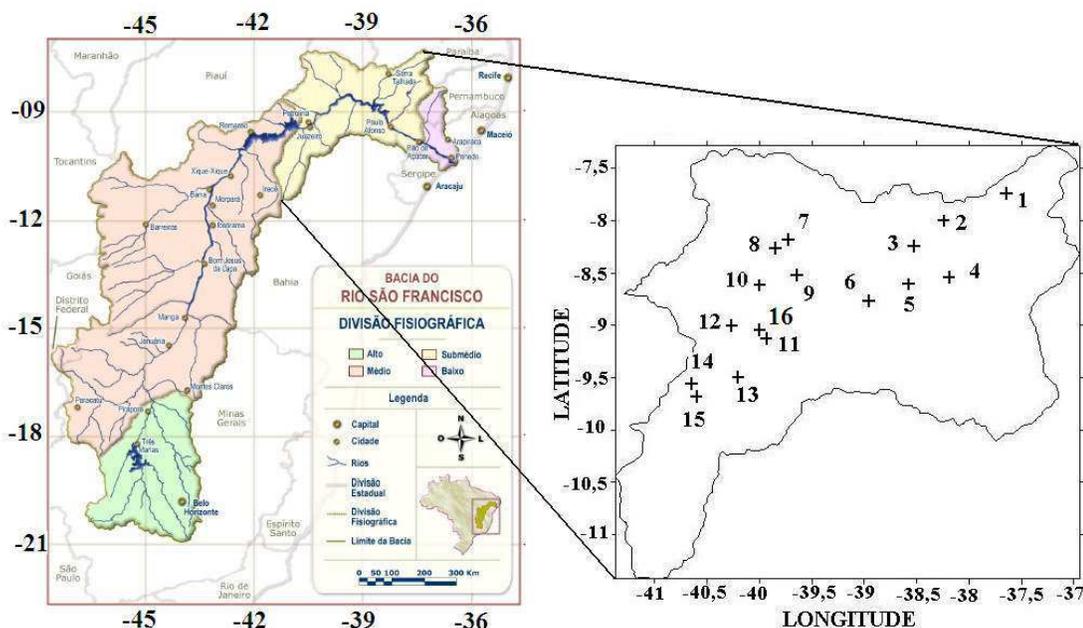


Figura 2 – Posição geográfica da bacia do São Francisco e localização das 16 estações pluviométricas.

5.2.1.2 - Campo de precipitação via radar

Imagens do radar de Petrolina (PE) foram analisadas com o objetivo de detectar o tipo e natureza dos SCM (Sistemas Convectivos de Mesoescala) observados no mês de abril de 1985. Estas imagens foram importantes na determinação da localização dos sistemas precipitantes, da intensidade da chuva, áreas preferenciais de formação dos SCM e na avaliação da dimensão horizontal e vertical dos sistemas observados na área de cobertura do radar.

Na avaliação da precipitação via radar, considerou-se como área de análise a região contida no raio de 250 km, com alcance quantitativo de aproximadamente 150 km. As imagens foram utilizadas nos modos PPI (Plan Position Indicator) e RHI (Range Height Indicator). A análise dos ecos de precipitação (sinais refletidos pelo radar), foi feita com base no gradiente horizontal de refletividade que permite identificar os tipos de ecos (convectivos e estratiformes).

5.2.2. - Estrutura termodinâmica da atmosfera

Dados de ar superior obtidos de radiossondagens realizadas em Petrolina (PE) foram utilizados como fonte de informação para avaliar o grau de instabilidade da atmosfera. Utilizou-se como critério de avaliação, a obtenção de índices de instabilidade comumente utilizados em setores operacionais a exemplo do INMET e dos Serviços Regionais de Proteção ao Voo (SRPV) do País.

Os índices de instabilidade são calculados a partir de variáveis termodinâmicas, de modo que permite determinar condições atmosféricas favoráveis a formação de tempestades. Estes índices possuem valores típicos e extremos que classificam áreas de maior risco quanto à ocorrência de sistemas convectivos que produzem tempo severo. Podem ser obtidos graficamente usando diagramas termodinâmicos ou através de equações específicas que permitem resultados mais precisos. A eficiência de cada índice varia com a região de estudo.

Os índices de instabilidade mais utilizados em centros operacionais são: índice K (IK), índice TT (*total totals*), índice de ameaça de tempo severo (SWEAT - *severe weather threat index*), índice Showalter – IS, índice de levantamento (LI -*lifted index*), energia potencial convectiva disponível (CAPE – *convective available potential energy*) e energia de inibição convectiva (CINE – *convective inhibition energy*).

Neste trabalho, o grau de instabilidade atmosférica foi determinado com base nos índices K e CAPE (energia potencial convectiva disponível).

O Índice K indica o grau de instabilidade atmosférica com base na análise conjunta do gradiente de temperatura entre os níveis de 850 e 500 hPa e do teor de umidade abaixo de 700 hPa. Têm-se valores mais altos em situações de grande teor de umidade nos baixos níveis da atmosfera e taxa de variação vertical de temperatura instável (Benetti e Silva Dias, 1986).

O índice K é obtido a partir da equação (3):

$$K = (T_{850} + Td_{850}) - (T_{700} - Td_{700}) - T_{500} \quad (3)$$

Em que,

T_{850} é a temperatura do ar em 850 hPa (°C);

T_{500} é a temperatura do ar em 500 hPa (°C);

T_{d850} é a temperatura do ponto de orvalho em 850 hPa (°C);

T_{700} é a temperatura do ar em 700 hPa (°C);

T_{d700} é a temperatura do ponto de orvalho em 700 hPa (°C)

O prognóstico da ocorrência de tempestade é feito com base na classificação descrita na Tabela 3.

Tabela 3 - Valores do IK e condições de tempo esperadas

Valores de IK (°C)	Condições esperadas
Entre 20 e 24	Cb's isolados
Entre 25 e 29	Cb's muito esparsos
Entre 30 e 35	Cb's esparsos
Acima de 35	Cb's numerosos

A energia potencial convectiva disponível (CAPE) representa um dos índices mais utilizados para avaliar a possibilidade de ocorrer ou não convecção em função das condições termodinâmicas em superfície. É uma medida da energia disponível para convecção e quando usada juntamente com parâmetros dinâmicos (tipo) como o cisalhamento do vento, permite determinar a natureza dos sistemas precipitantes resultantes da atividade convectiva.

A obtenção deste parâmetro segue a metodologia desenvolvida por Zawadzki e Ro (1978), modificada por Correia (1989) que foi denominado de energia potencial convectiva disponível máxima (CAPE_{MÁX}) e determinada pela equação (4).

$$CAPE_{max} = \int_{NE}^{NCE} (T_{vp} - T_{va}) R_d d \ln P \quad (4)$$

Sendo:

NE = nível de equilíbrio ($T_{va}=T_{vp}$);

NCE = nível de convecção espontânea;

T_{va} = ($T+0,61q$), a temperatura virtual do ambiente (°C);

T_{vp} = ($T_p+0,61q$), a temperatura virtual da parcela (°C);

T = temperatura do ambiente (°C);

T_p = temperatura da parcela ($^{\circ}\text{C}$) obtida através do diagrama termodinâmico a partir do valor mais alto da temperatura potencial do bulbo úmido ($\theta_{w\max}$), com base nos dados de superfície;

q = a umidade específica do ar (g/kg);

R_d = a constante dos gases para o ar seco ($\text{J Kg}^{-1}\text{K}^{-1}$) e,

P = pressão atmosférica (Pa).

Valores característicos de CAPE e condições de tempo esperadas são apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4 – Classificação de CAPE segundo Bluestein, 1993.

Valores de CAPE (m^2s^{-2})	Condições de tempo esperadas
$500 \leq \text{CAPE} < 1000$	Convecção fraca
$1000 \leq \text{CAPE} < 2500$	Convecção moderada
$\text{CAPE} \geq 2500$	Convecção forte

5.2.3.- Análise estatística – o Método de Componentes Principais

A técnica estatística multivariada com base na matriz de correlação pelo método de componentes principais foi escolhida como ferramenta de análise com o objetivo principal de explicar a estrutura de dependência entre as variáveis meteorológicas dominantes na ocorrência dos eventos extremos de chuva.

Em geral, a primeira solução obtida através de programas estatísticos não fornece fatores que tenham uma interpretação adequada. Neste trabalho, para melhorar a análise foi usado o procedimento de rotação de fatores através do método VARIMAX. Na escolha do número de fatores adequados ao estudo foi utilizado o critério desenvolvido por Kaiser, (Garayalde et al, 1986). Na aplicação deste critério são excluídos os fatores com autovalores menores que um. Efetivamente, este critério descarta aqueles fatores que tem grau de explicação menor que o de uma variável isolada.

Para se obter as componentes principais calculam-se os autovalores e correspondentes autovetores de uma matriz de variâncias-covariâncias ou de uma matriz de coeficientes de correlação entre variáveis.

Neste estudo a análise em componentes principais (ACP) foi aplicada a dois conjuntos de dados. O primeiro grupo é composto de observações de superfície e de ar superior feitas na região de Petrolina (PE). O objetivo é investigar a influência de mecanismos regionais no desenvolvimento de SC intensos e formação de cheia. Nas análises foram utilizados dados de abril de 1985 e janeiro de 2004.

O segundo grupo é constituído por dados de reanálises obtidos do NCEP (National Centers for Environmental Prediction) em pontos de grade ($2,5^\circ \times 2,5^\circ$) para abril de 1985. As variáveis utilizadas foram: temperatura do ar (T) e umidade específica (q), no nível de 925 hPa e componente zonal e meridional (u, v) do vento nos níveis de 925, 500 e 200 hPa.

Inicialmente a matriz dos dados originais (X) foi organizada da seguinte forma:

$$\mathbf{X}_{(n \times k)} = \begin{pmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdot & \cdot & \cdot & x_{1k} \\ x_{21} & x_{22} & \cdot & \cdot & \cdot & x_{2k} \\ \cdot & & & & & \\ \cdot & & & & & \\ x_{n1} & x_{n2} & \cdot & \cdot & \cdot & x_{nk} \end{pmatrix}$$

Em que n é o número de observações e k é o número de variáveis do conjunto em estudo.

Numa segunda etapa realiza-se a padronização dos dados em que se subtrai cada valor original da média da respectiva variável e divide-se pelo desvio padrão usando a relação (5):

$$Y_{ij} = \frac{X_{ij} - \overline{X}_i}{S_i} \quad (5)$$

Sendo,

Y_{ij} representa o valor dos dados normalizados da j-ésima repetição da i-ésima variável;

\overline{X}_i representa a média da variável i ;

S_i representa o desvio-padrão i -ésima variável e ;

X_{ij} representa as observações originais da j -ésima repetição da i -ésima variável.

A padronização ou normalização dos dados é feita para que os resultados não sejam influenciados pelas diferentes unidades de medidas das variáveis.

A partir das variáveis normalizadas, é construída a matriz de correlação com os dados padronizados. Essa matriz é a base para a transformação das variáveis ortogonais observadas em componentes. Hair et al. (1995; 1998) mostraram que para o sucesso de uma análise fatorial é necessário que exista um número razoável de correlações superiores (em módulo) a 30%, caso contrário a estrutura de interdependência será muito tênue para produzir resultados satisfatórios.

A matriz de transformação é calculada pela equação (6):

$$R = \frac{1}{n-1} (Y_{ij} \cdot Y_{ij}^t) \quad (6)$$

Sendo,

Y_{ij} a matriz normalizada;

Y_{ij}^t a matriz transposta de Y .

Como R é uma matriz simétrica positiva, é diagonalizada por uma matriz de mudança de base, denominada de autovetores, resultando na matriz diagonal D , equação (7), na qual a própria diagonal representa os autovalores (λ) de R , logo:

$$D = A^{-1} \cdot R \cdot A \quad (7)$$

Sendo a matriz A dos autovetores ortogonal, então sua inversa A^{-1} é igual a sua transposta A^t . Usando combinações lineares entre a transposta dos autovetores (A^t) normalizados e a matriz de observações (X), obtemos as componentes principais, equação (8):

$$C = A^t \cdot X \quad (8)$$

Cada linha de C indica uma componente principal associada aos autovalores α correspondente, dada pela equação (09), formando uma série temporal também chamada de pesos ou escores, na qual indica o índice de contribuição para ocorrência de um determinado evento em estudo.

$$C_i = a_{1j} \cdot x_{i1} + a_{1j} \cdot x_{i2} + \dots + a_{kj} + x_{ik} \quad (9)$$

Cada componente principal tem uma parte da variância total dos dados ordenados no sentido crescente dos autovalores mais significativos. Os fatores são obtidos pela relação entre os autovetores e autovalores.

Os fatores podem ser distribuídos espacialmente representando a contribuição (peso) destes em relação à variância total do conjunto de dados.

As componentes principais são as combinações lineares não correlacionadas cujas variâncias são tão grandes quanto possível. A primeira componente principal é a combinação linear com máxima variância. A segunda componente principal é aquela combinação que não está correlacionada com a primeira e representa a maior parte da variância restante.

6 - RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados do estudo realizado com base nos registros de chuva, campo de precipitação via radar, índices de instabilidade atmosférica, índice RAI, bem como da aplicação da técnica de análise de componentes principais aos dados de reanálises, dados de superfície e de sondagens realizadas em Petrolina (PE).

Para detectar padrões atmosféricos específicos e explicar os mecanismos responsáveis pelo desenvolvimento de SCM e formação de cheias no Submédio, em abril de 1985, os resultados das análises desse episódio foram comparados com padrões meteorológicos observados em dois eventos importantes registrados na bacia do São Francisco: as cheias de 1979 e 2004.

Aspectos importantes da cheia de 1985, foco central desse estudo são mostrados na seção 6.1. Na seção 6.1.2 são apresentadas algumas características do regime pluviométrico com base em dados de anomalias de precipitação observadas entre 1969 a 2004. O índice RAI é utilizado na definição de períodos úmidos e secos. Uma análise da relação entre os valores do índice RAI e o indicativo de formação de cheias é apresentada.

6.1 – Aspectos meteorológicos e hidrológicos das cheias de 1985 e 2004

6.1.1 – O episódio de 1985

Sob o ponto de vista estatístico, a cheia do rio São Francisco registrada no Submédio da bacia em abril de 1985 foi tratada como um evento raro, já que episódio de magnitude similar, na região do sertão pernambucano, havia ocorrido apenas uma vez, em 1960 (CHESF, 1986).

Segundo dados da CHESF, a enchente dos afluentes do São Francisco, observada no período entre 11 e 17 de abril de 1985 entre as hidrelétricas de Sobradinho e Paulo Afonso, foi causada pela intensificação de sistemas precipitantes que são comumente observados nesse período do ano. O principal sistema de circulação atmosférica gerador de chuvas na região nos meses de março e abril é a ZCIT (Zona de Convergência Intertropical).

O controle das cheias nesta região é feito através da represa de Sobradinho cujas regras de operação tem sido bastante eficientes para minimizar danos em situações críticas. Entretanto, em relação a esse evento o reservatório não pode ser usado para diminuir o pico de

descargas afluentes no baixo vale e evitar as inundações já que os SCM causadores de chuvas intensas se formaram também a jusante do lago.

O esquema mostrado na Figura 3 ilustra o setor de ocorrência da cheia dividido em sub-bacias com seus afluentes.

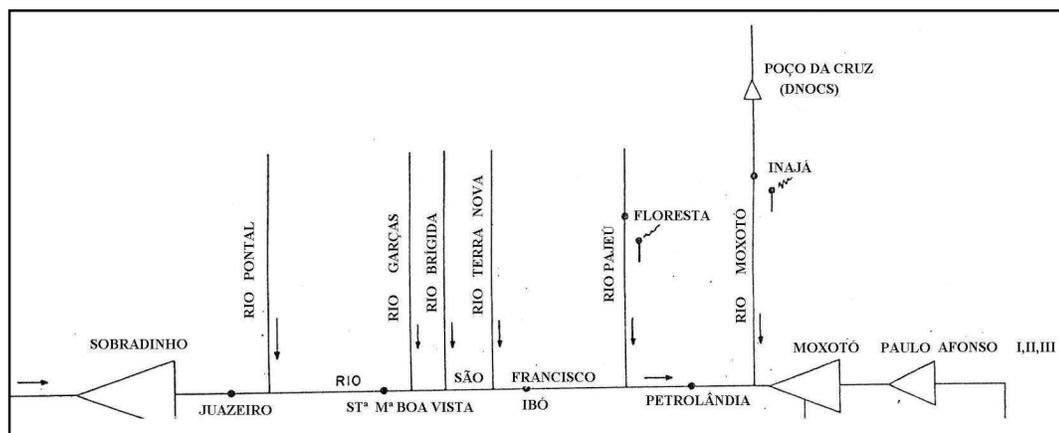


Figura 3 – Diagrama do trecho a jusante de Sobradinho. Fonte: CHESF, 1986.

No trecho entre Sobradinho e Santa Maria da Boa Vista o maior contribuinte é o rio Pontal. A descarga incremental neste setor foi de $300 \text{ m}^3/\text{s}$. Entre Santa Maria da Boa Vista e Ibó, com a contribuição dos rios Garças, Brígida e Terra Nova houve uma descarga adicional em torno de $3700 \text{ m}^3/\text{s}$. Entre Ibó e Petrolândia o aumento de descarga devido à contribuição do rio Pajeú foi de $2200 \text{ m}^3/\text{s}$ e no trecho final, entre Petrolândia e Paulo Afonso, o incremento de descarga pelo rio Moxotó foi de $800 \text{ m}^3/\text{s}$.

6.1.1.1 – Características ambientais e natureza da precipitação em abril de 1985

Estrutura termodinâmica vertical de alta instabilidade condicional ou convectiva, vapor de água abundante na baixa atmosfera e um mecanismo de grande ou meso-escala que possa liberar essa instabilidade constituem as principais características do ambiente associadas com a formação e desenvolvimento de convecção profunda.

As chuvas observadas no Submédio em abril de 1985 se concentraram na primeira quinzena do mês. A disponibilidade de imagens do radar meteorológico (banda-C) situado em Petrolina em conjunto com dados de sondagens, permitiu observar a estrutura dos SCM entre os dias 09 e 12 de abril, período em que foram registradas as chuvas mais fortes do

mês. A área de cobertura do radar e a localização dos principais afluentes no Submédio São Francisco são ilustradas na Figura 4.

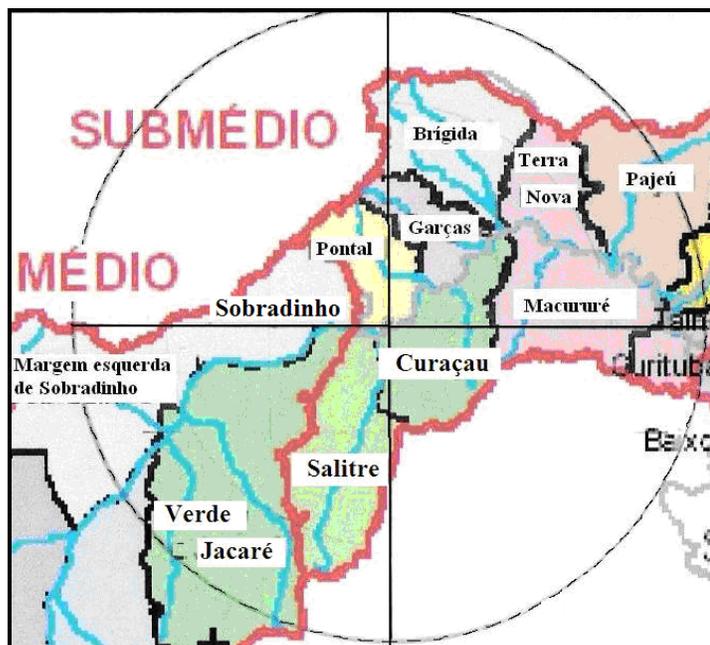


Figura 4 – Localização dos principais afluentes no Submédio São Francisco. O círculo indica a região num raio de 200 km dentro da área de cobertura do radar de Petrolina. A circunferência com raio de 200 km equivale à circunferência mais externa nas imagens de radar.

Através dos dados de ar superior foi possível calcular os índices de instabilidade K e CAPE, e as imagens de radar permitiram analisar a distribuição espacial e intensidade das células precipitantes. A eficiência dos índices de instabilidade no diagnóstico da atividade convectiva local foi avaliada.

Na apresentação dos resultados foi dado um enfoque especial aos dias para os quais havia simultaneamente dados de ar superior e campos de precipitação via radar. Esse período é constituído pelos seguintes dias: 01, 02, 08, 09, 10, 11 e 12 de abril.

Os valores obtidos para os índices de instabilidade com as respectivas condições de tempo esperadas são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 - Índices de instabilidade e condições de tempo esperadas em abril de 1985.

DIA	IK (°C)		CAPE _{MAX} (J/kg)	
	Valor	Tempo esperado	Valor	Tempo esperado
01	22	CB's isolados	3100	Convecção forte
02	31,1	CB's esparsos	2180	Convecção moderada
08	36,3	CB's esparsos	2000	Convecção moderada
09	33,6	CB's esparsos	3400	Convecção forte
10	33	CB's esparsos	2400	Convecção moderada
11	35,1	CB's numerosos	715	Convecção fraca
12	36,3	CB's numerosos	2300	Convecção moderada

Os resultados mostrados refletem condições atmosféricas favoráveis a ocorrência de atividade convectiva intensa. Observa-se que os valores da CAPE_{MAX} confirmam o indicativo de convecção profunda obtido com o índice K, exceto para o dia 11 de abril. Essa aparente contradição é possível já que o desenvolvimento e intensificação dos SC dependem do controle da grande escala (Barbosa e Correia, 2005).

A seguir é mostrada uma seqüência de imagens do radar para ilustrar a distribuição espacial da chuva entre os dias 9 e 12 de abril. Ecos formados por núcleos intensos organizados em linhas inseridos em áreas cobertas com chuvas fracas e contínuas são evidentes no quadrante nordeste do PPI para o dia 09 mostrado na Figura 5.

A alta freqüência de ecos registrados no dia 10 de abril (Figura 6) permitiu verificar que as chuvas registradas neste dia contribuíram de forma substancial para formação da cheia e inundações no trecho entre Sobradinho e Paulo Afonso. Os campos mostram vários sistemas localizados tanto na região dos principais tributários (quadrante nordeste) quanto na área do lago (quadrante sudoeste). Entre 16:47 HL e 18:40 HL, nota-se um grande aumento na quantidade de células precipitantes. O aumento no número de núcleos intensos é um forte indicativo da ocorrência de convecção forte neste dia. As células atingiram alturas de

aproximadamente 17 km como pode ser visto no RHI das 17:47 HL (Figura 6d). O desenvolvimento das células foi instantâneo entre 17:51 HL e 18:40 HL.

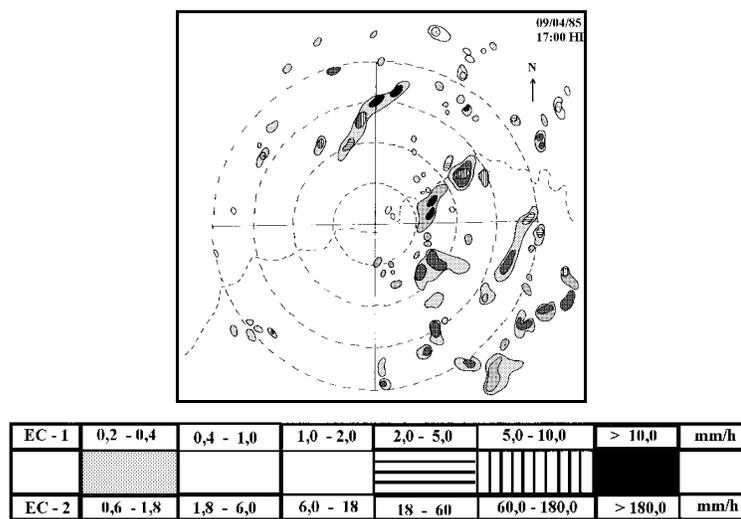


Figura 5 - PPI obtido pelo radar meteorológico de Petrolina-PE às 17:00 HL do dia 09 de abril de 1985 é visto em (a). A distância entre os círculos concêntricos ao local do radar é de 50 km. A convenção utilizada para taxa de precipitação é EC-1, vista na escala abaixo da figura. A seta no canto superior direito em (a) indica o norte verdadeiro (N). A linha sinuosa nos quadrantes nordeste e sudoeste representa o curso do Rio São Francisco. (Fonte dos dados: IAE/CTA).

O PPI do dia 11, as 17:02 HL (Figura 7a) mostra sistemas multicelulares localizados no setor dos afluentes da bacia no quadrante nordeste e no setor sudeste da área de cobertura do radar. Esses sistemas atingiram profundidades superiores a 15 km conforme indica o RHI das 16:54 HL na Figura 7b.

Sistemas multicelulares e células organizadas em linhas no dia 12 predominam na região de Sobradinho no quadrante sudoeste e em áreas próximas ao lago, no quadrante noroeste, (Figura 8a). Na região dos tributários da bacia (quadrante nordeste), é possível verificar uma redução das chuvas. A precipitação foi predominantemente do tipo estratiforme possivelmente associada a sistemas em fase de dissipação como indica o PPI (Figura 8a). Alguns sistemas intensos com estrutura vertical atingindo altura de aproximadamente 20 km podem ser vistos no RHI (Figura 8b).

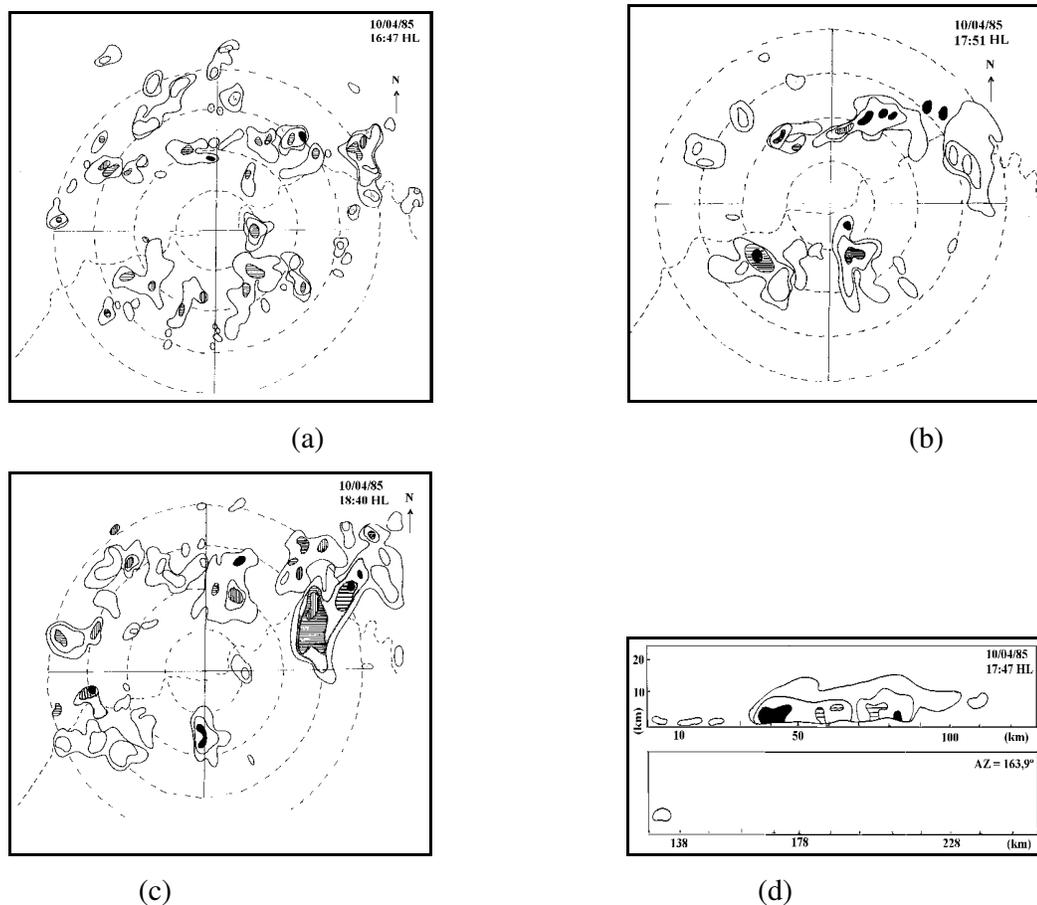


Figura 6 - Seqüência de PPI's e RHI obtidos pelo radar meteorológico de Petrolina-PE no dia 10 de abril de 1985. A distância entre os círculos concêntricos ao local do radar é de 50 km. A convenção utilizada para taxa de precipitação é EC – 1 vista na escala mostrada abaixo da figura. A seta no canto superior direito em (a) indica o norte verdadeiro (N). O horário é indicado no PPI.

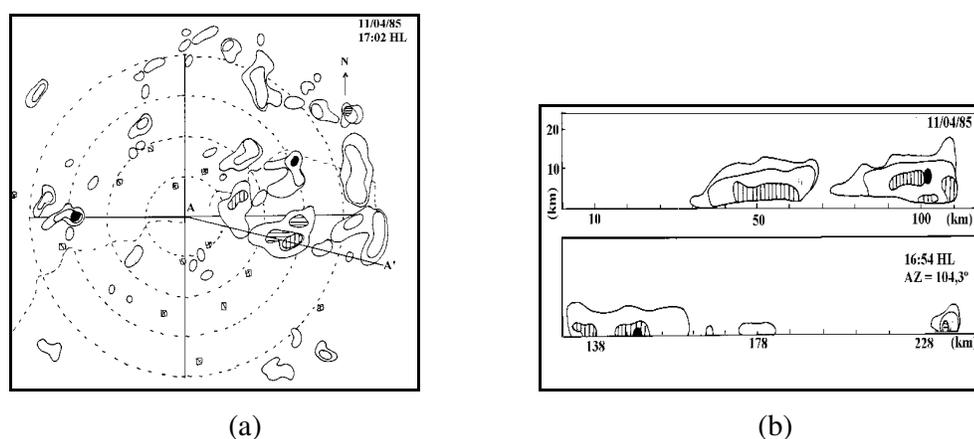
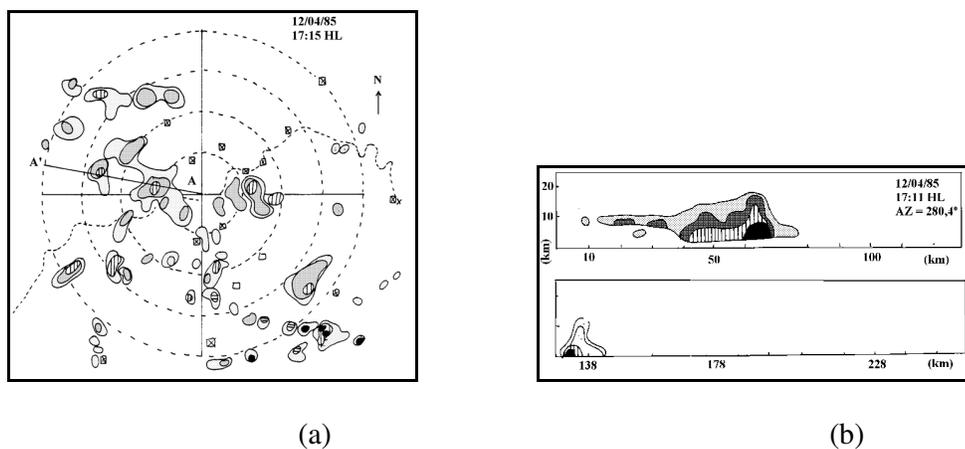


Figura 7 - PPI e RHI obtido no dias 11 de abril de 1985. A distância entre os círculos concêntricos ao local do radar é de 50 km. A convenção utilizada para taxa de precipitação é EC – 1 vista na escala mostrada abaixo da figura. A seta no canto superior direito dos PPI indica o norte verdadeiro (N). O horário é indicado no PPI.



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	60,0 - 180,0	> 180,0	mm/h

Figura 8 - PPI e RHI obtido no dia 12 de abril de 1985. A distância entre os círculos concêntricos ao local do radar é de 50 km. A convenção utilizada para taxa de precipitação é EC – 1 vista na escala mostrada abaixo da figura. A seta no canto superior direito dos PPI indica o norte verdadeiro (N). O horário é indicado no PPI. A linha sinuosa vista nos quadrantes nordeste e sudoeste representa o Rio São Francisco.

Sistemas com características multicelulares, com vários núcleos de precipitação intensa têm ciclo de vida superior a duas horas e nesse período estes sistemas se desenvolveram na região das micro-bacias a jusante de Sobradinho, situado no quadrante sudoeste das imagens de radar. Os ecos em média atingem dimensões horizontais da ordem de 2500 km² e profundidades superiores a 15 km como visto nas imagens.

6.1.2 – O episódio de 2004

As cheias e inundações observadas no Submédio São Francisco nos meses de janeiro e fevereiro foram causadas por precipitações intensas concentradas nos Estados de Pernambuco, Alagoas, Bahia e Sergipe com transbordamento de vários açudes na região.

Sistemas frontais que atingiram o Estado da Bahia e a atuação de vórtices ciclônicos de altos níveis foram os principais sistemas atmosféricos responsáveis pelo excesso de chuvas no período (Climanálise, jan 2004, INPE/CPTEC).

Por coincidir com o período úmido desta região, o grande volume d'água precipitado em poucos dias provocou uma das maiores enchentes na região do Submédio da bacia.

Conforme dados apresentados no Projeto de gerenciamento integrado das atividades desenvolvidas em terra na bacia do São Francisco (Filho et al, 2004), a vazão de pico incremental entre janeiro e fevereiro, dos principais afluentes, na região (Pontal, Garças, Brígida, Terra Nova, Pajeú, em Pernambuco, e na margem baiana, Salitre, Curaçá e Riacho Seco) foi à maior registrada até o momento.

Ao contrário do episódio de 1985, as chuvas responsáveis pela cheia e inundações em janeiro de 2004 concentraram-se na segunda quinzena do mês. Valores do índice K e $CAPE_{MAX}$ são mostrados na Tabela 6. Falhas nos dados de ar superior impediram a análise entre os dias 22 e 30. Os resultados mostram a possibilidade de formação de CB's em praticamente todo o período, entretanto, apenas para o dia 15 de janeiro, de acordo com o valor da $CAPE_{MAX}$ existe indicativo de convecção forte.

Tabela 6 - Índices de instabilidade e condições de tempo esperadas em janeiro de 2004.

Dia	$CAPE_{MAX}$		Índice K	
	Valor	Tempo esperado	Valor	Tempo esperado
1	120	Convecção fraca	19,3	
2	1031	Convecção moderada	27,7	CB's muito esparsos
3	2167	Convecção moderada	26,7	CB's muito esparsos
4	1357	Convecção moderada	27,7	CB's muito esparsos
5	141	Convecção fraca	21,2	Cb's isolados
6	0	Convecção fraca	10,3	
7	97	Convecção fraca	-24,1	
8	701	Convecção fraca	19	
9	833	Convecção fraca	24,2	CB's isolados
10	1131	Convecção moderada	25	CB's muito esparsos
11	1865	Convecção moderada	31,6	CB's esparsos
12	1788	Convecção moderada	27,2	CB's muito esparsos
13	1886	Convecção moderada	33,4	CB's esparsos
14	1219	Convecção moderada	32,9	CB's esparsos
15	3169	Convecção forte	28,8	CB's muito esparsos
16	1995	Convecção moderada	29,3	CB's muito esparsos
17	1622	Convecção moderada	29,7	CB's muito esparsos
18	1258	Convecção moderada	30,6	CB's esparsos
19	1899	Convecção moderada	31,2	CB's esparsos
20	1291	Convecção moderada	27,8	CB's muito esparsos
21	1677	Convecção moderada	33,2	CB's esparsos

Por outro lado, como pode ser visto na Figura 9, para valores de CAPE acima de 1000 J/kg já há registro de precipitação para a localidade de Petrolina (PE). Esse comportamento também foi observado em outros estudos sobre SCM (Barbosa e Correia, 2005; Benetti et al. 1986).

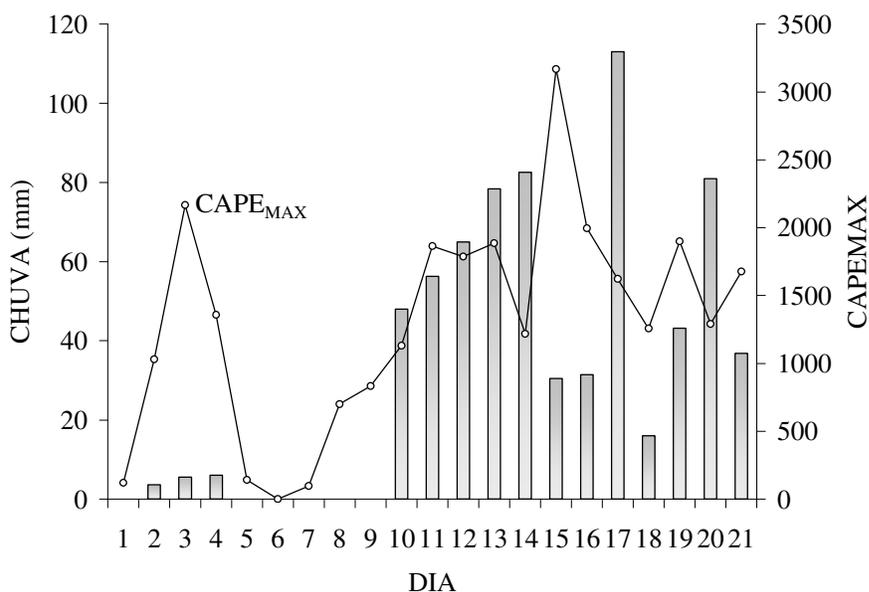


Figura 9 – Evolução do total diário de chuva e da energia potencial disponível convectiva $CAPE_{MAX}$, para janeiro de 2004.

A operação do radar de Petrolina foi restrita a estação chuvosa de 1985 (Correia, 1989), não sendo possível avaliar a distribuição espacial e intensidade da chuva no evento de 2004.

As chuvas que ocorreram em toda a Região Nordeste em 2004 apresentaram valores muito acima da média histórica. As chuvas intensas foram resultantes principalmente do deslocamento de frentes frias para o norte, da atuação da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) e da presença de Vórtices Ciclônicos em Altos Níveis (VCAN) sobre o Oceano Atlântico. Em alguns locais nos Estados do Piauí, Bahia e Ceará, os máximos de precipitação ultrapassaram 300 mm em relação à média climatológica mensal. (Fonte: Climanálise, jan 2004, INPE/CPTEC).

A disponibilidade das imagens do satélite GOES permitiu verificar que a forte atividade convectiva observada em janeiro de 2004, esteve associada principalmente com a

atuação de vórtices ciclônicos de altos níveis. A posição desses sistemas em relação à região Nordeste pode ser vista na Figura 10.

O primeiro VCAN atuou no período de 01 a 03, no sul do Piauí e Maranhão e no noroeste da Bahia. O segundo episódio iniciou no dia 04 e permaneceu estacionário sobre o Atlântico, entre as latitudes 8°S e 22°S(Figura 10a).

A partir do dia 10 de janeiro um aumento significativo da atividade convectiva sobre a região é causado pela atuação dos VCAN que permaneceram posicionados no Oceano Atlântico, visível na 3ª a 5ª pântada (Figuras 10c, d,e). Na última semana do mês, 6ª pântada (Figura 10f), nota-se o deslocamento dos vórtices para o continente. Na escala das temperaturas de brilho indicadas, os valores mais baixos estão associados com atividade convectiva intensa.

6.2 – Análise Pluviométrica – Índice de Anomalia de Precipitação RAI

Na determinação de períodos úmidos e secos foram consideradas séries históricas de dados provenientes de 16 estações localizadas no Submédio São Francisco (Tabela 2, Figura 2). Inicialmente foram analisados dados diários da estação de Bebedouro considerando apenas a estação chuvosa da região.

A Figura 11 ilustra o índice RAI para estação de Bebedouro no período de 1969 a 2004. Observa-se um alto índice de anomalias negativas mesmo no período chuvoso da região. A classificação de ano úmido ou seco depende fortemente do mês considerado.

A análise feita mês a mês permitiu detectar a duração dos períodos úmidos e secos. Essa é uma das vantagens da utilização do índice RAI no auxílio ao monitoramento de danos associados com eventos meteorológicos extremos, além da simplicidade do método que permite obter informações importantes através de poucos cálculos.

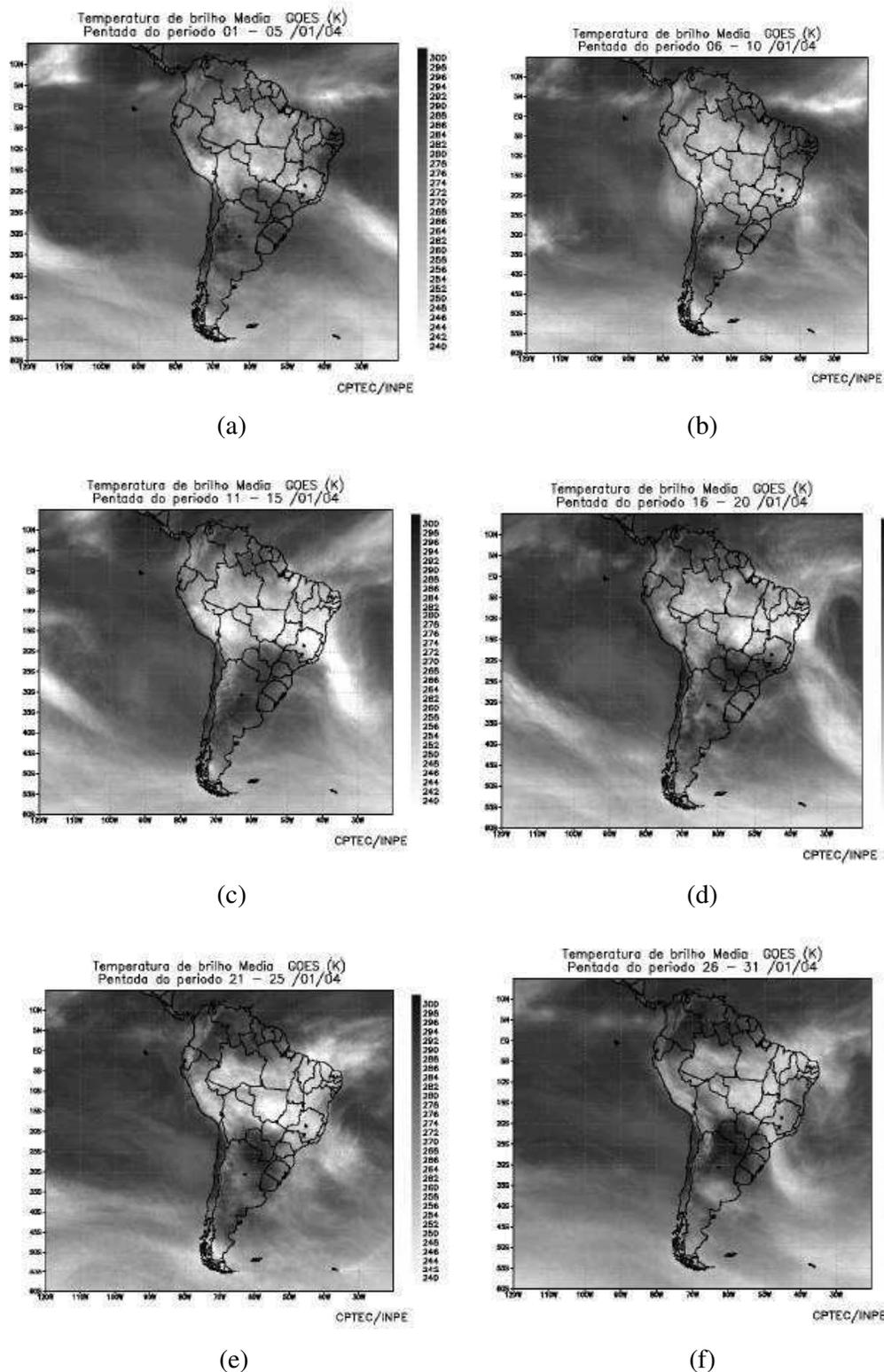


Figura 10 - Pêntadas de temperatura de brilho média (K) para o mês de Janeiro/2004. (Fonte: Climanálise, jan 2004, Satélite GOES 12, CPTEC/INPE).

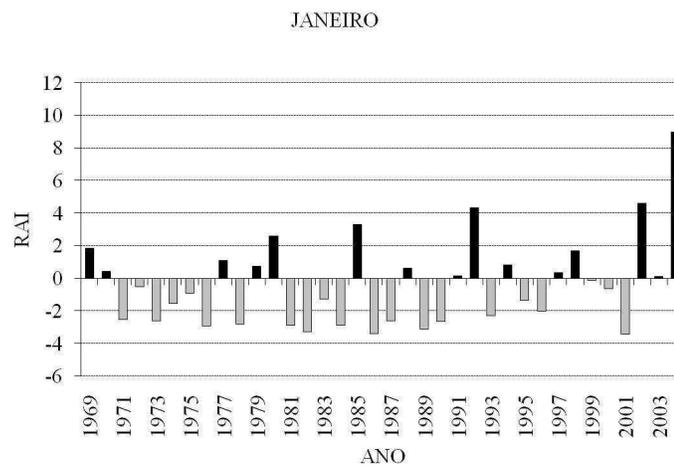
Por outro lado, convém ressaltar que em regiões com alta frequência de registros nulos de chuva, o índice RAI para anomalias negativas indicam valores extremamente altos em relação aos resultados obtidos para anomalias positivas. Esse comportamento é nitidamente observado nos gráficos mostrados na Figura 11. Esse resultado não necessariamente expressa o grau de severidade do fenômeno se forem confrontados períodos secos e úmidos.

Nesse contexto, consideramos que em áreas na qual a precipitação possui alta variabilidade no tempo e principalmente concentra-se em poucos dias do mês, como ocorre no semi-árido brasileiro, valores altos do índice RAI podem ser usados como indicativos da intensidade do fenômeno desde que comparados dentro de uma mesma categoria (anomalia positiva ou anomalia negativa).

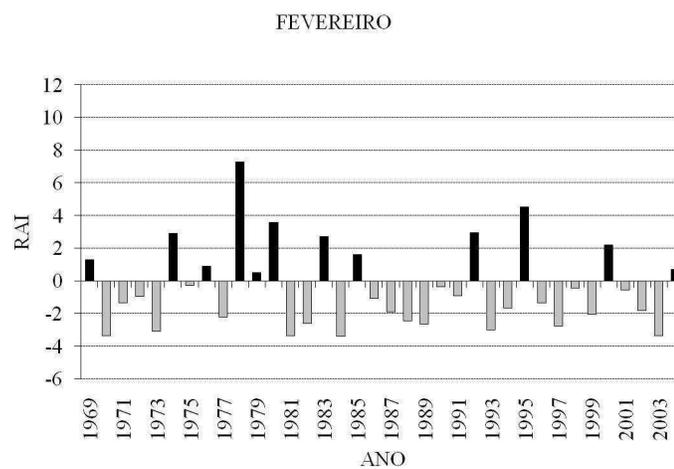
Valores positivos do índice RAI são mais frequentes nos meses de março e abril (Figura 11c e 11d). Esse resultado sugere maior vulnerabilidade da região à ocorrência de cheias neste período.

Análises do índice RAI também foram realizadas para avaliar a extensão da área afetada por eventos extremos. Os cálculos foram feitos a partir de totais mensais de precipitação das 15 estações situadas no Submédio relacionadas na Tabela 7. A variabilidade anual do índice entre 1975 e 2004 é mostrada na Figura 12.

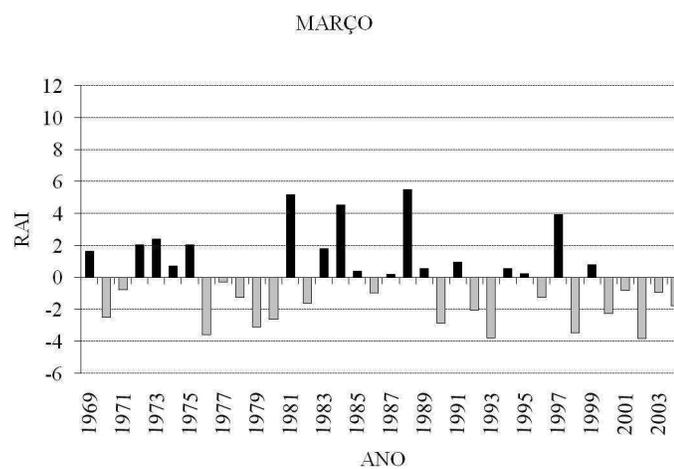
Nota-se que o número de postos com indicativo de anos secos engloba uma área bem maior (maior número de postos) do que no caso dos anos úmidos. Este resultado explica porque o fenômeno da seca é considerado bem mais danoso para a economia da região do que os eventos de cheias apesar dos prejuízos substanciais causados por inundações.



(a)

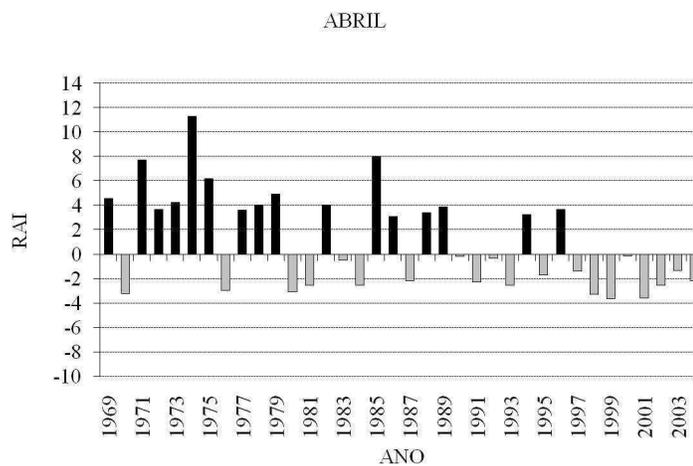


(b)

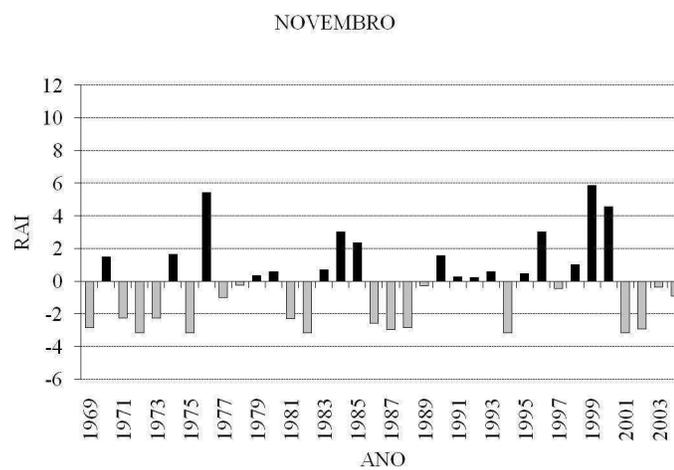


(c)

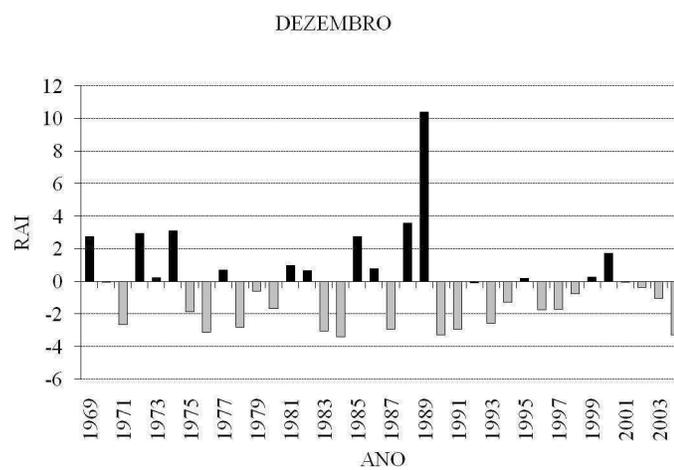
Figura 11 – Comportamento mensal do índice RAI para estação de Bebedouro no período de 1969 a 2004.



(d)

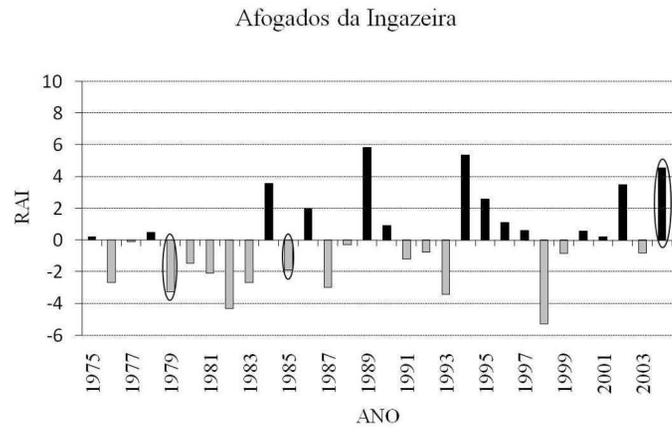


(e)

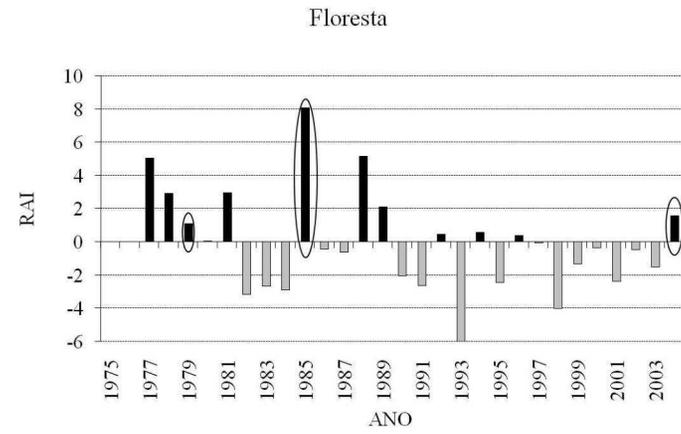


(f)

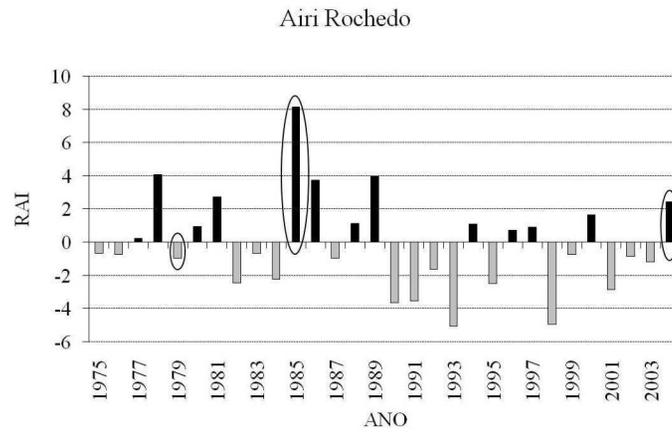
Figura 11 – Conclusão



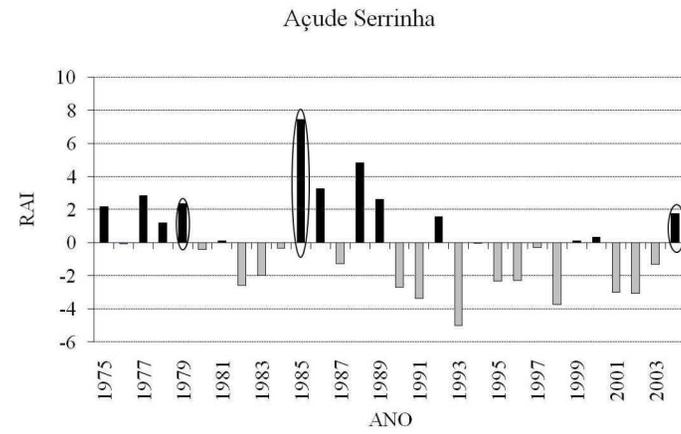
(a)



(b)

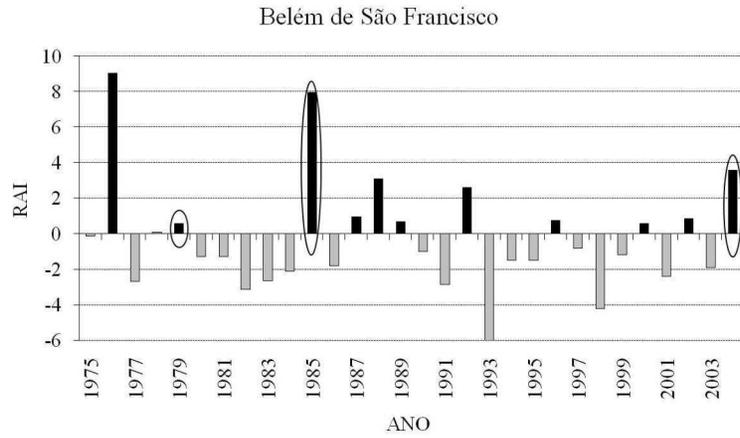


(c)

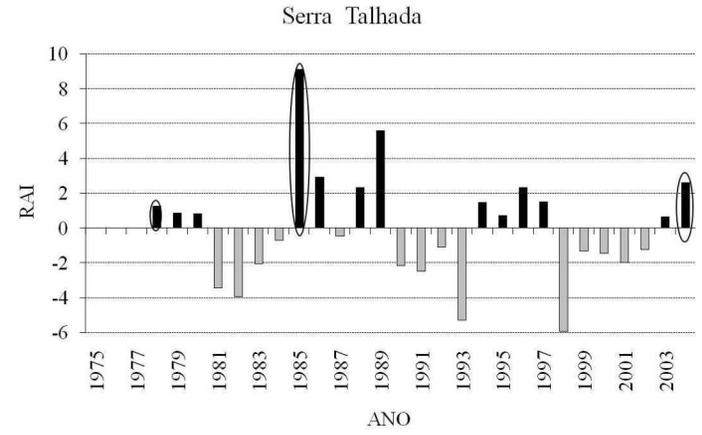


(d)

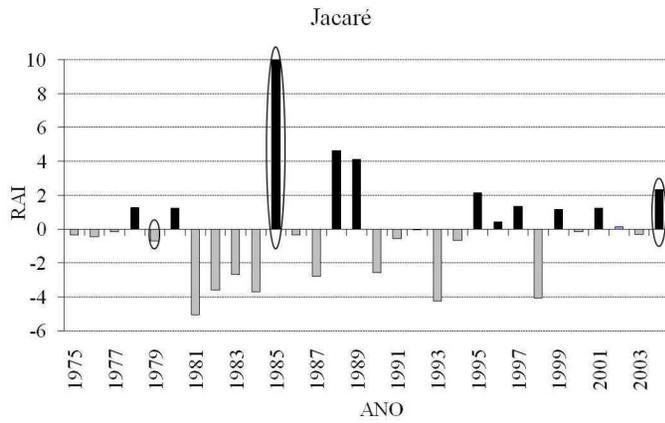
Figura 12 - Índice RAI correspondente a 15 estações situadas no Submédio no período de 1979 a 2004. Os valores obtidos para 1979, 1985 e 2004 são destacados pelos círculos.



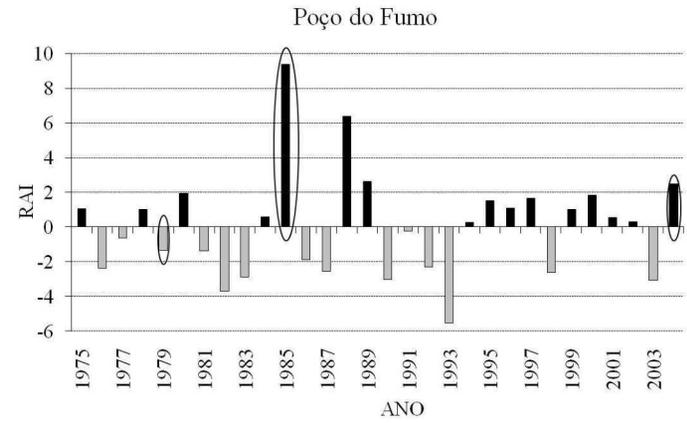
(e)



(f)

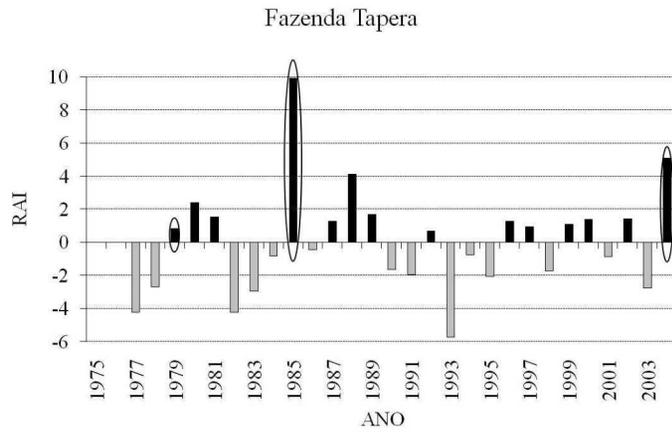


(g)

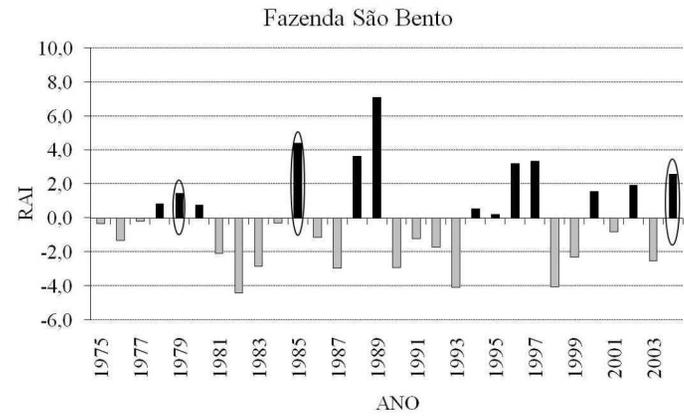


(h)

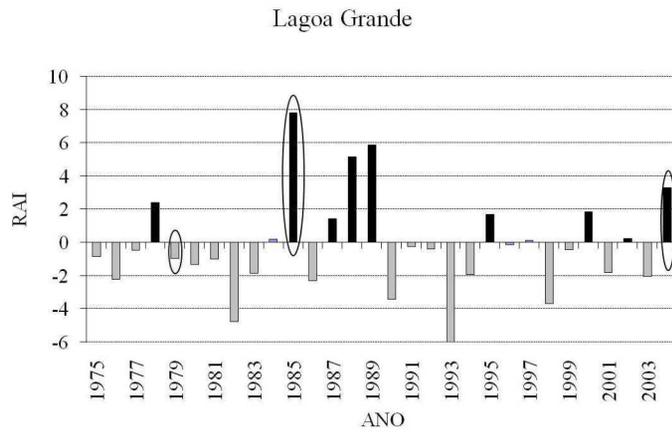
Figura 12- continuação.



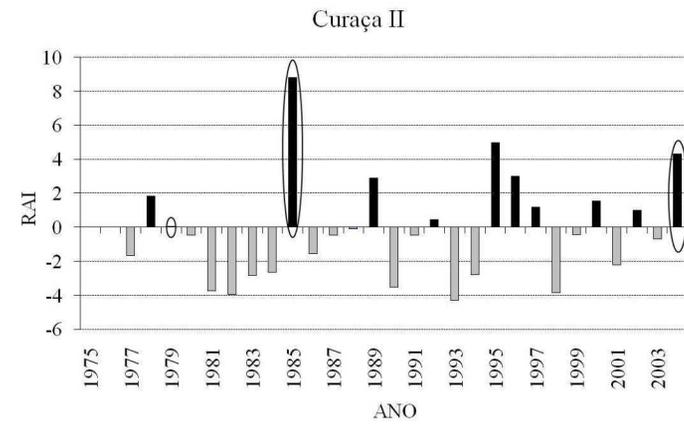
(i)



(j)

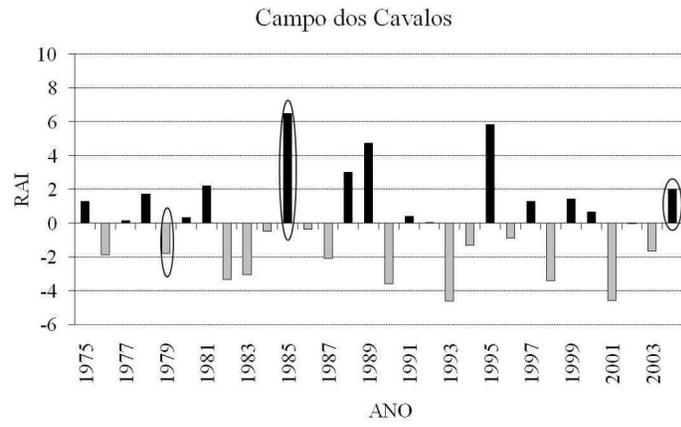


(k)

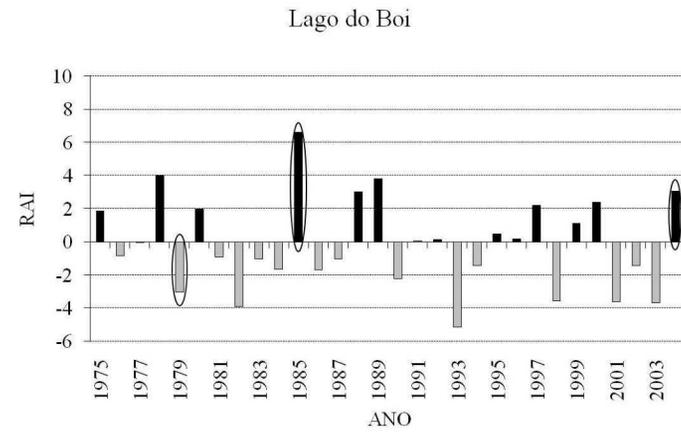


(l)

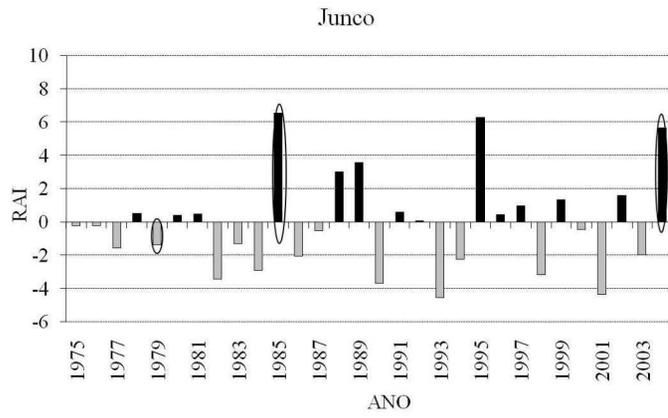
Figura 12- continuação.



(m)



(n)



(o)

Figura 12 – Conclusão.

6.2.1. - Índice RAI para eventos históricos selecionados

Além do ano de 1985, dois eventos históricos foram analisados com o objetivo de verificar o índice RAI em situações de seca e de períodos úmidos. Foram escolhidos o ano de 1979, com registros tanto de cheia como de estiagens prolongadas para várias localidades da bacia, e o ano de 2004, em decorrência dos eventos extremos de chuva no mês de janeiro com inundações em várias regiões do Nordeste brasileiro. Os valores do índice RAI e a classificação correspondente para 15 localidades situadas no Submédio são mostrados na Tabela 7.

Tabela 7 - Classificação de anos secos ou úmidos de acordo com os valores do índice RAI.

Estações	ÍNDICE RAI		
	Ano 1979	Ano 1985	Ano 2004
	Valor / classificação	Valor / classificação	Valor / classificação
1. Afogados da Ingazeira	-3,2 / seco	-1,8 / seco	4,5 / úmido
2. Floresta	1,1 / úmido	8,0 / úmido	1,6 / úmido
3. Airi Rochedo	-0,9 / seco	8,1 / úmido	2,4 / úmido
4. Açude Serrinha	2,4 / úmido	7,4 / úmido	1,7 / úmido
5. Belém de São Francisco	0,57 / úmido	7,9 / úmido	3,6 / úmido
6. Serra Talhada	1,3 / úmido	9,0 / úmido	2,6 / úmido
7. Jacaré	-0,69 / seco	10,5 / úmido	2,3 / úmido
8. Poço do Fumo	-1,3 / seco	9,4 / úmido	2,5 / úmido
9. Tapera	0,82 / úmido	9,9 / úmido	5,1 / úmido
10. Fazenda São Bento	1,5 / úmido	4,4 / úmido	2,6 / úmido
11. Lagoa Grande	-0,95 / seco	7,8 / úmido	3,3 / úmido
12. Curaçá II	0,05 / úmido	8,8 / úmido	4,3 / úmido
13. Campo dos Cavalos	-1,8 / seco	6,5 / úmido	1,9 / úmido
14. Lagoa do Boi	-3,0 / seco	6,6 / úmido	3,1 / úmido
15. Junco	-1,4 / seco	6,6 / úmido	5,7 / úmido

Pode-se observar que para o ano de 1979 tem-se a classificação de ano seco para 53% das localidades. Este ano é considerado significativo sob o ponto de vista hidrológico por corresponder ao período de uma das maiores cheias registradas na bacia do rio São Francisco. Embora este evento tenha afetado quase toda a extensão da bacia, teve origem em chuvas intensas nos meses de janeiro e fevereiro nas regiões do Alto e Médio São Francisco. Por outro lado, o ano de 1979 também foi marcado pelo início de uma das secas mais prolongadas (1979 a 1984) que atingiu a região Nordeste. As primeiras chuvas ocorreram com a regularidade esperada, entretanto, de março a

meados de abril (aproximadamente 50 dias), as chuvas cessaram completamente (SUDENE, 1981).

Esse comportamento irregular das chuvas na região semi-árida explica a variabilidade do índice RAI em 1979 vista na Tabela 7. Resultados semelhantes foram obtidos por Gonçalves et al (2006), em um estudo sobre vulnerabilidade climática do Nordeste brasileiro. A Figura 13 mostra anomalias de precipitações, positivas e negativas, para os meses de janeiro, fevereiro, março e abril de 1979.

Observa-se que os valores mais significativos de anomalias positivas nos meses de janeiro e fevereiro encontram-se no Médio São Francisco. É também evidente o aumento gradativo da área de anomalias negativas atingida pela seca entre o período de janeiro a abril.

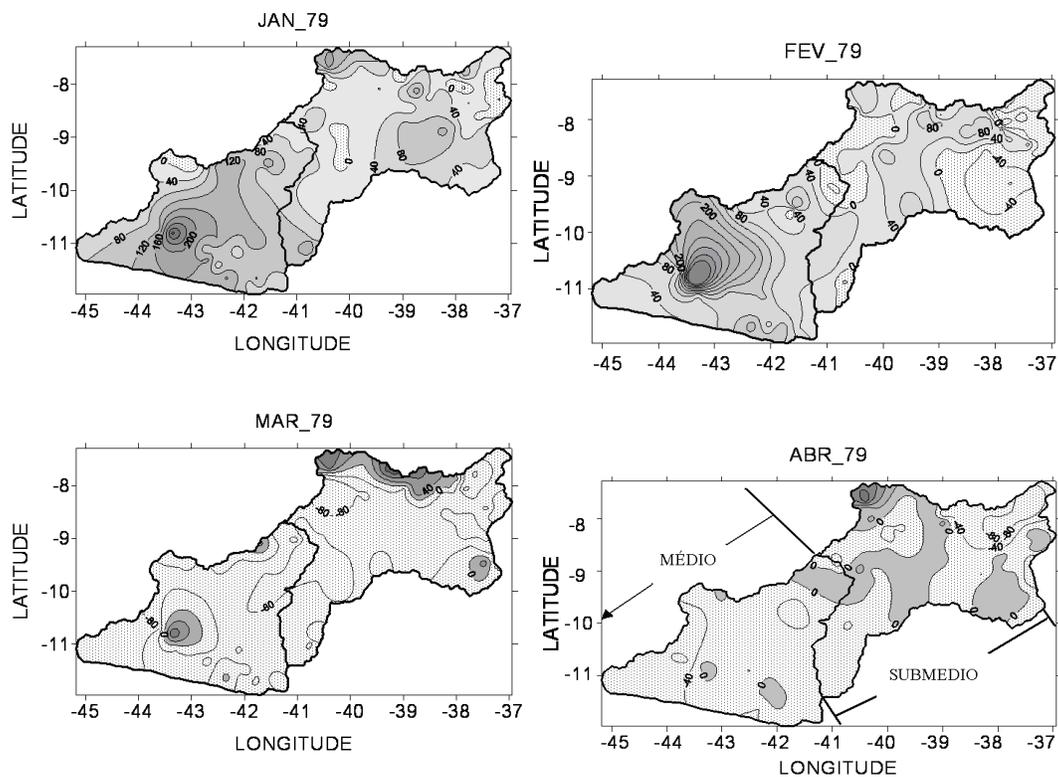


Figura 13 - Anomalias de precipitações: (a) janeiro, (b) fevereiro, (c) março e (d) abril de 1979 (Fonte: modificado de Gonçalves et al, 2006).

6.3 – Análise de Componentes Principais (ACP)

Os resultados apresentados até aqui mostram que as cheias de 1985 e 2004 registradas no Submédio do São Francisco foram geradas por chuvas decorrentes de SC intensos que se formaram ou se desenvolveram na própria região, diferentemente da grande cheia de 1979 que, apesar de atingir todo o vale, teve origem em chuvas ocorridas nas regiões do Alto e Médio da Bacia.

As semelhanças entre os eventos de 1985 e 2004, no entanto, existe principalmente sob o ponto de vista hidrológico pelo fato de ambos resultarem em formação de cheias e inundações. Sob o ponto de vista meteorológico, existem diferenças fundamentais. Essas diferenças são evidentes quando se considera o volume das chuvas e a extensão da área afetada por precipitações extremas.

Neste contexto, a técnica de estatística multivariada, denominada Análise de Componentes Principais (ACP) foi usada, entre outras finalidades, com o objetivo de identificar variáveis meteorológicas dominantes no processo de formação e evolução de SC intensos que contribuíram para os episódios de chuvas extremas e ocorrência de cheia.

Na aplicação desta técnica, foram adotadas duas abordagens distintas: uma incluindo parâmetros locais de forma a elucidar o efeito de características da região na evolução de sistemas precipitantes e outra, também quantitativa, usando dados de reanálises do NCEP que permitem avaliar a influência de mecanismos de escala maior no desenvolvimento destes sistemas.

6.3.1 – Influência regional: abril de 1985 e janeiro de 2004

A utilização da ACP apresentada nessa seção foi motivada por problemas normalmente encontrados para determinar causas de formação e desenvolvimento de SC intensos a partir de dados quantitativos que medem aspectos específicos de forma que as variáveis se agrupam em conjuntos determinados por características dinâmicas ou termodinâmicas da atmosfera. Para isso foram usadas observações de superfície e de ar superior feitas na região de Petrolina (PE).

Nessa avaliação foram consideradas de acordo com a disponibilidade de dados, as seguintes variáveis e parâmetros: temperatura do ar (T), pressão em superfície (P), temperatura do bulbo úmido (T_W), vento em superfície (componentes u e v), razão de mistura (r), temperaturas máxima e mínima (T_{MAX} e T_{MIN}), insolação (INS), radiação global (Rg), evaporação (EVAP), precipitação (CHUVA) e Energia Potencial Convectiva Disponível Máxima ($CAPE_{MAX}$).

A técnica de ACP foi aplicada simultaneamente aos dados de superfície e altitude para abril de 1985 e janeiro de 2004. A comparação entre os resultados obtidos nos dois casos permitiu detectar dados peculiares de cada situação. Com a aplicação da ACP verificou-se que um modelo gerado com três componentes foi suficiente para representar a estrutura das variáveis, retendo 74% da variância total para abril de 1985. No caso de janeiro de 2004, um modelo com apenas duas componentes explica 84% da variância total, como pode ser visto na Tabela 8.

Tabela 8 - Contribuição das CP's para a variância total dos dados nos meses de Abril/1985 e Janeiro/2004.

Componente	Abril – 1985	Janeiro – 2004
C1	36,15	55,88
C2	23,46	28,29
C3	14,55	
Total Acumulado	74,18	84,17

A matriz fatorial encontrada para abril de 1985 é apresentada na Tabela 9 e para janeiro de 2004 na Tabela 10. Como pode ser visto em ambos os casos observa-se um grande número de correlações significativas (maiores do que 0,30) entre as variáveis. Tem-se, portanto, que a ACP é adequada para análise dos dados. Valores de correlação iguais ou acima de 0,60 são realçados nas tabelas.

A aplicação da análise de componentes principais também foi usada com o propósito de avaliar o grau de importância das variáveis utilizadas no estudo. Nesse aspecto é fundamental interpretar a distribuição ou agrupamento de valores no gráfico de CP's e identificar não apenas as variáveis de maior peso no processo, mas, detectar com base no conjunto das variáveis agrupadas fatores dominantes em cada situação.

Nas análises foi utilizado o critério das correlações, em que se mede a contribuição das variáveis para cada um dos componentes principais.

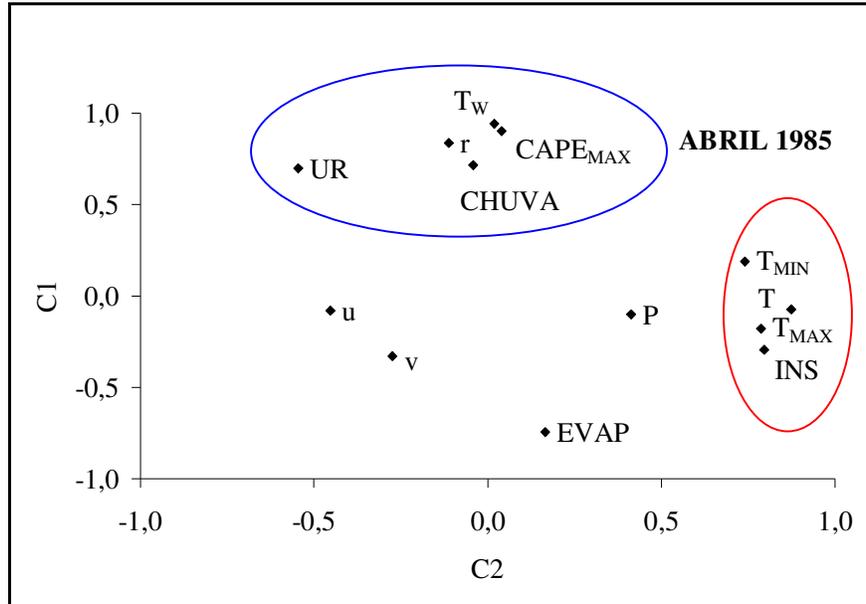
Tabela 9 – Matriz de correlações encontrada para abril de 1985, em que T é a temperatura do ar, UR é a umidade relativa do ar, r é a razão de mistura, P é a pressão, Tw é a temperatura do bulbo úmido, T_{MAX} é a temperatura máxima, T_{MIN} é a temperatura mínima, U é a componente zonal do vento, V é a componente meridional do vento, CH é a chuva, EV é a evaporação, INS é a insolação e CAPE_{MAX} é a energia potencial convectiva disponível máxima.

	T	UR	r	P	T _W	T _{MAX}	T _{MIN}	U	V	CH	EV	INS	CAPE (MAX)
T	1												
UR	-0,62	1											
r	-0,11	0,85	1										
P	0,26	-0,16	-0,03	1									
T _W	-0,03	0,61	0,77	-0,05	1								
T _{MAX}	0,76	-0,42	-0,01	0,40	-0,10	1							
T _{MIN}	0,45	-0,21	0,03	0,33	0,12	0,44	1						
U	-0,31	0,28	0,16	0,19	-0,04	0,04	-0,50	1					
V	-0,11	-0,14	-0,25	-0,58	-0,32	-0,22	-0,25	-0,21	1				
CH	-0,05	0,33	0,39	-0,35	0,65	-0,29	-0,08	-0,14	-0,14	1			
EV	0,11	-0,56	-0,64	-0,14	-0,70	0,24	-0,06	-0,28	0,49	-0,39	1		
INS	0,66	-0,55	-0,26	0,42	-0,28	0,78	0,38	-0,14	-0,23	-0,17	0,40	1	
CAPE (MAX)	-0,05	0,57	0,68	-0,17	0,84	-0,18	0,19	-0,14	-0,11	0,69	-0,53	-0,20	1

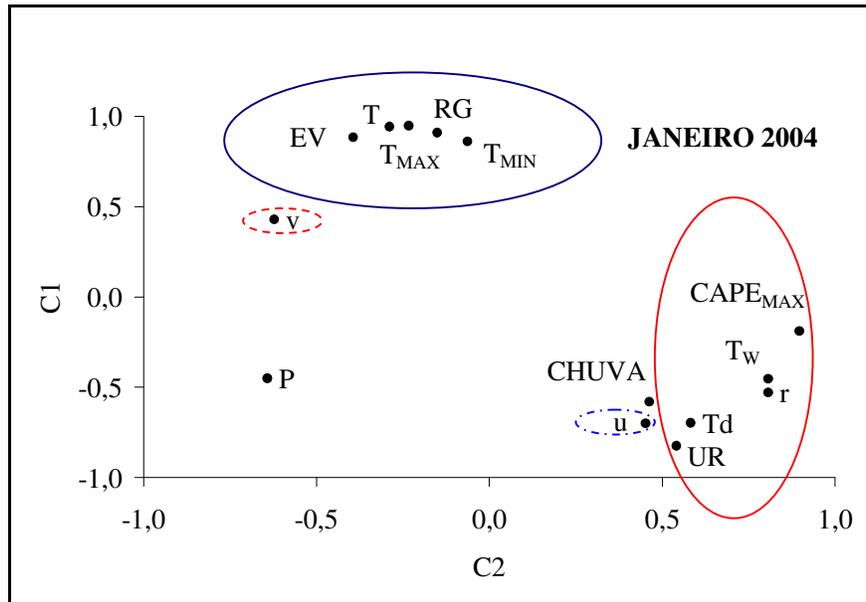
Tabela 10 – Matriz de correlações encontrada para janeiro de 2004, em que T é a temperatura do ar, UR é a umidade relativa do ar, r é a razão de mistura, T_{MIN} é a temperatura mínima, CAPE_{MAX} é a energia potencial convectiva disponível máxima, T_{MAX} é a temperatura máxima, RG é a radiação global, P é a pressão, CH é a chuva, EV é a evaporação, T_D é a temperatura do ponto de orvalho, Tw é a temperatura do bulbo úmido, u é a componente zonal do vento e v é a componente meridional do vento.

	T	UR	r	T _{MIN}	CAPE (MAX)	T _{MAX}	RG	P	CH	EV	T _D	T _W	u	v
T	1													
UR	-0,95	1												
r	-0,72	0,90	1											
T _{MIN}	0,87	-0,73	-0,43	1										
CAPE (MAX))	-0,46	0,67	0,85	-0,23	1									
T _{MAX}	0,96	-0,90	-0,67	0,82	-0,36	1								
RG	0,89	-0,82	-0,60	0,70	-0,28	0,93	1							
P	-0,22	0,06	-0,18	-0,22	-0,38	-0,19	-0,22	1						
CH	-0,64	0,71	0,69	-0,44	0,46	-0,63	-0,58	0,07	1					
EV	0,92	-0,94	-0,80	0,73	-0,51	0,94	0,93	-0,09	-0,68	1				
T _D	-0,67	0,83	0,94	-0,39	0,81	-0,61	-0,53	-0,22	0,68	-0,70	1			
T _W	-0,79	0,86	0,82	-0,63	0,62	-0,77	-0,73	-0,07	0,64	-0,87	0,68	1		
u	-0,80	0,83	0,73	-0,67	0,56	-0,78	-0,64	-0,04	0,49	-0,77	0,65	0,73	1	
v	0,58	-0,65	-0,65	0,49	-0,55	0,53	0,42	0,15	-0,55	0,54	-0,65	-0,78	-0,45	1

As Figuras 14a e 14b mostram gráficos da componente principal 1 versus a componente principal 2. Distinguem-se facilmente dois agrupamentos de variáveis. A linha azul foi usada para delimitar variáveis cuja correlação com a C1 é maior ou igual a 0,70. O grupo de variáveis mais correlacionadas com a C2 foi delimitado com a linha vermelha.



(a)



(b)

Figura 14 – Contribuição das variáveis atmosféricas aos fatores através da análise de componentes principais: (a) abril de 1985 e (b) janeiro de 2004.

Uma simples comparação entre as figuras 14a e 14b mostra com bastante clareza a separação de grupos distintos. O grupo que reúne Energia Potencial Convectiva Disponível Máxima ($CAPE_{MAX}$), temperatura do bulbo úmido (T_W), razão de mistura (r), CHUVA e temperatura do ponto de orvalho (T_d) reflete claramente, além da influência significativa de forçantes locais, a alta correlação entre a chuva, a instabilidade atmosférica e o teor de umidade nos baixos níveis (expresso através da razão de mistura).

O grupo constituído pela temperatura do ar (T), temperaturas máxima e mínima (T_{MAX} e T_{MIN}), insolação (INS), radiação global (R_g), evaporação ($EVAP$), está relacionado com processos de aquecimento radiativo.

Os resultados obtidos para abril de 1985 mostram que a C2 explica uma parcela substancial da variabilidade dos dados (23,5%) e, portanto, de acordo com a figura 14a, o fator aquecimento radiativo tem um grau de importância significativo na definição das condições atmosféricas no período analisado. Pesquisas realizadas anteriormente sobre atividade convectiva na região de Petrolina ressaltam que o aquecimento radiativo representa um fator importante no processo de formação e intensificação de SC (Barbosa e Correia, 2005).

Os resultados obtidos com as análises para janeiro de 2004 em que a C1 explica 56% da variabilidade total dos dados mostram que as variáveis de maior peso constituem o grupo formado pela radiação global (R_g), temperaturas máxima e mínima (T_{MAX} , T_{MIN}), temperatura do ar (T) e evaporação ($EVAP$). Neste caso observa-se também que apesar do período ser extremamente chuvoso, a ACP não mostra correlação significativa entre a chuva local e $CAPE_{MAX}$. Em contrapartida, a técnica revela uma correlação negativa de 60% entre a chuva e a temperatura do ar (T) não observada em abril de 1985. Esse comportamento indica que forçantes locais ou regionais não constituíram o fator determinante para a atividade convectiva observada no período.

A condição de temperaturas elevadas pode estar associada com subsidência atmosférica em escala sinótica e inibição da chuva. Esse mecanismo é mais comum em condições atmosféricas sob a influência de VCAN. Essa pode ser uma das explicações para a inversão de padrão quando comparados os dois episódios.

Resultados semelhantes foram obtidos em um estudo sobre eventos extremos no semi-árido brasileiro. Correia et al. (2006) mostraram que mecanismos dinâmicos de escala sinótica, associados com a atuação de vórtices ciclônicos de altos níveis (VCAN), foram determinantes na formação de sistemas convectivos produtores de precipitação intensa ou na supressão deles em janeiro de 2004.

6.3.2 – Influência da escala sinótica: abril de 1985

Nesta seção, a ACP é aplicada aos dados de reanálises obtidos do NCEP (National Centers for Environmental Prediction) espaçados de $2,5^\circ \times 2,5^\circ$ para abril de 1985. As variáveis utilizadas foram: temperatura do ar (T), umidade específica (q) no nível de 925 hPa e componente zonal (u) e meridional (v) do vento nos níveis de 925, 500 e 200 hPa.

Numa primeira etapa da análise estatística a ACP foi usada considerando todo o conjunto de dados. A matriz foi disposta na forma de 63 linhas correspondendo aos pontos de grade da área em estudo (espaçados de $2,5^\circ \times 2,5^\circ$) e 240 colunas contendo valores diários das variáveis nos níveis mencionados anteriormente.

Na Tabela 11 mostra-se que um modelo com 4 componentes foi adequado para representar a estrutura inicial das variáveis.

Tabela 11 – Contribuição das componentes principais para a variação total dos dados.

Componentes	Variância (%)	Variância acumulada (%)
CP1	31,35	31,35
CP2	21,14	52,51
CP3	14,71	67,21
CP4	7,40	74,62

As duas primeiras componentes explicam 52,51% da variabilidade total dos dados e indicam que processos em superfície são fundamentais para determinar as condições atmosféricas observadas no mês de abril de 1985. Nas Tabelas 12 e 13 são

mostradas as cargas fatoriais para o primeiro e segundo fator, respectivamente, (correlação superior a 0,60).

Observa-se que o primeiro fator possui correlação positiva com a maioria das variáveis. As cargas fatoriais mais significativas estão relacionadas com a componente meridional do vento e são observadas para todo o período analisado (Tabela 12).

Tabela 12 – Contribuição das variáveis atmosféricas ao primeiro fator através da análise de componentes principais.

DIA	Q ₉₂₅	T ₉₂₅	U ₉₂₅	V ₉₂₅	U ₅₀₀	V ₅₀₀	U ₂₀₀	V ₂₀₀
1		0,67	0,67	0,85				
2		0,65		0,90		0,78		0,63
3		0,71		0,94		0,76		
4		0,87		0,83			0,63	
5		0,87		0,89				
6		0,74		0,72				
7		0,76		0,85				-0,66
8	0,66	0,64		0,92				-0,83
9	0,70			0,94				-0,83
10	0,63			0,93				-0,88
11				0,86				-0,77
12				0,70				
13				0,91				
14				0,93		0,80		
15				0,94		0,62		
16		0,72		0,96				
17		0,74		0,83				
18				0,87	0,67			
19		0,67		0,85	0,83			0,75
20				0,79	0,91			
21	0,61			0,79	0,93			
22	0,63			0,80	0,89		0,66	
23				0,89	0,84		0,66	-0,84
24				0,82	0,72			-0,77
25				0,92	0,87			
26				0,96	0,82			
27	0,80			0,91	0,74			
28	0,74			0,66				-0,74
29				0,85		0,63	0,64	-0,84
30		0,67		0,62	0,75			

Os resultados encontrados nesta análise indicam que mecanismos dinâmicos em superfície foram determinantes na definição das condições atmosféricas observadas em abril de 1985. Entretanto, a aplicação da ACP aos dados de reanálises considerando todos os níveis de pressão (superfície e altitude) não favorece a obtenção de informações que ressaltam padrões atmosféricos diferenciados no período de eventos extremos de 09 a 12 de abril. Com esse propósito procurou-se então aplicar a ACP aos dados de reanálises considerando separadamente as variáveis para o nível de 925 hPa.

Para a umidade específica, quatro fatores comuns temporais, explicando 87% da variância, foram retidos pelo critério mínimo (autovalores maiores que 1). No caso da temperatura do ar, seis fatores comuns temporais foram retidos explicando 90,5% da variância.

Na análise das componentes do vento, três fatores comuns explicam 89,3% da variabilidade total para componente meridional e 4 fatores retidos pelo critério mínimo explicam 90,5% da variabilidade total para componente zonal.

As cargas fatoriais obtidas das análises feitas para umidade específica, temperatura do ar e para as componentes zonal e meridional do vento, todas as variáveis no nível 925 hPa, são apresentadas nas Tabelas 14 e 15 respectivamente.

Verifica-se claramente na Tabela 14 que o primeiro fator apresenta cargas fatoriais bastante significativas para umidade específica na primeira quinzena do mês. Já a temperatura do ar está mais correlacionada com o segundo fator. Em relação ao período de 09 a 12 de abril, denominado a partir desse ponto de “*período crítico*” pode-se observar que os valores são extremamente altos. Entre os dias 15 e 26 de abril, as cargas fatoriais (não mostradas) foram muito baixas.

Esse resultado indica a importância do teor de umidade nos baixos níveis para o desenvolvimento de sistemas precipitantes intensos e ocorrência de chuva forte. Essa relação pode ser comprovada através de dados pluviométricos coletados na área da região em estudo. Totais diários de precipitação medidos em abril incluindo os dias do período crítico são apresentados na Tabela 16. Os dados foram coletados num raio de 100 km dentro da área de cobertura do radar de Petrolina e mostram que no período de 09 a 12 de abril as chuvas foram excessivas quando comparadas com o total

Tabela 15 – Cargas das variáveis em cada fator (rotação VARIMAX). As cargas fatoriais representam correlações entre os fatores e as variáveis vento zonal diário (u_{925}) e vento meridional diário (v_{925}) em 925 hPa.

DIA	u_{925}				v_{925}		
	F1	F2	F3	F4	F1	F2	F3
1				0,86	C1	C2	C3
2				0,77	0,61		
3					0,62		
4		0,68					
5		0,81			0,84		
6		0,77					
7		0,78				0,89	
8		0,85				0,64	
9		0,64				0,61	
10	0,63					0,68	
11	0,87				0,68		
12	0,94					0,66	
13	0,82						0,84
14		0,72					0,65
15		0,71				0,62	
16			0,60		0,67		
17			0,73				
18			0,81				0,78
19	0,71				0,68		
20	0,90				0,68		
21	0,83					0,76	
22	0,63					0,69	
23	0,70						
24			0,68		0,76		
25			0,84				0,60
26		0,70				0,66	
27				0,72		0,64	
28				0,77	0,81		
29					0,88		
30	0,73				0,69		

Verifica-se ainda com base na Tabela 15, que dentro do período crítico, a componente zonal do vento se encontra bem correlacionada com o primeiro fator.

Tabela 16 – Total de precipitação via pluviômetros. Fonte: modificado de Araújo (1996)

Classificação (período)	Dia	Chuva (mm)
Crítico	9	672,3
	10	322,6
	11	248,6
	12	343,4
Não crítico	17	8,9
	18	6,6
	19	52,0

Os resultados obtidos até o momento mostram que o grau de importância das variáveis ou da associação entre elas com os diferentes fatores varia substancialmente com o período avaliado. O tipo de informação obtido com a utilização da ACP também varia de acordo com o conjunto de dados utilizados, mesmo que os subgrupos façam parte do conjunto total de dados.

Neste estudo especificamente, a necessidade de considerar diferentes estruturas de dados reflete o grau de complexidade para extrair informações sobre fenômenos em mesoescala dos dados de reanálises.

Esses dados permitem obter informações sobre condições atmosféricas em escala sinótica, associadas com atividade convectiva intensa, mas, não são dados com resolução suficiente para estudar fenômenos essencialmente de mesoescala.

Neste contexto, buscando maior clareza para interpretação e ilustração dos resultados, foi utilizada a ACP aos dados de reanálises para derivar padrões espaciais das variáveis meteorológicas.

6.4. - Configurações espaciais no nível de 925 hPa

Nesta seção a configuração espacial diária das variáveis q (g/kg), T ($^{\circ}\text{C}$), u (m/s) e v (m/s) e dos fatores mais significativos obtidos a partir dos resultados discutidos no item anterior é apresentada.

(a) Variáveis meteorológicas

A distribuição espacial da umidade específica no nível de 925 hPa para os dias 9, 10, 11 e 12 de abril é mostrada na Figura 15. Valores elevados da umidade específica se concentram na região semi-árida. Especificamente no dia 10, observa-se um núcleo com valores máximos na região de Pernambuco. Esse resultado sugere um alto teor de vapor d'água nos baixos níveis da atmosfera e indiretamente explica a forte atividade convectiva observada nas imagens de radar.

A configuração espacial da temperatura para o mesmo período (Figura 16) mostra pouca variabilidade e gradientes extremamente fracos. Apenas no dia 12 de abril pode-se observar uma mudança substancial no comportamento dessa variável. Um dipolo ao leste do NEB é visível com núcleo de valores máximos sobre os Estados da Paraíba e o Rio Grande do Norte e valores mínimos a leste da Bahia.

A característica marcante observada na distribuição espacial da componente meridional do vento (Figura 17) é o indicativo de confluência em torno da latitude de 10°S . Valores negativos ao norte desta latitude mostram a existência de vento na direção Norte e valores predominantemente positivos abaixo desta latitude indicam ventos na direção Sul.

A componente zonal do vento para os dias 09, 10, 11, e 12 de abril apresentado na Figura 18, mostra mudanças significativas na distribuição espacial dessa variável entre os dias 09 e 12. Apesar da predominância de ventos de leste no domínio analisado é visível uma faixa de ventos de oeste inicialmente centrada na região norte do Nordeste (dia 09). Pode-se observar que gradativamente a área com ventos de oeste se desloca

para sul. Verifica-se também que os ventos são extremamente fracos na região de Pernambuco nos dias 11 e 12 de abril.

Nas Figuras 19 e 20 são mostradas as configurações espaciais das componentes meridional e zonal do vento em 200 hPa. Verifica-se praticamente em todo período uma inversão na direção do vento em relação aos baixos níveis (925 hPa), no dia 09 observa-se uma difluência do vento neste nível. Esse comportamento reflete a existência do cisalhamento vertical do vento em direção e intensidade, que representa uma característica dinâmica fundamental para o desenvolvimento de SC intensos (Barbosa e Correia, 2005).

Os resultados encontrados são coerentes com os campos de precipitação observados nas imagens do radar de Petrolina. A evolução de sistemas convectivos multicelulares e com duração superior a duas horas está normalmente associada com estrutura termodinâmica instável e cisalhamento vertical do vento.

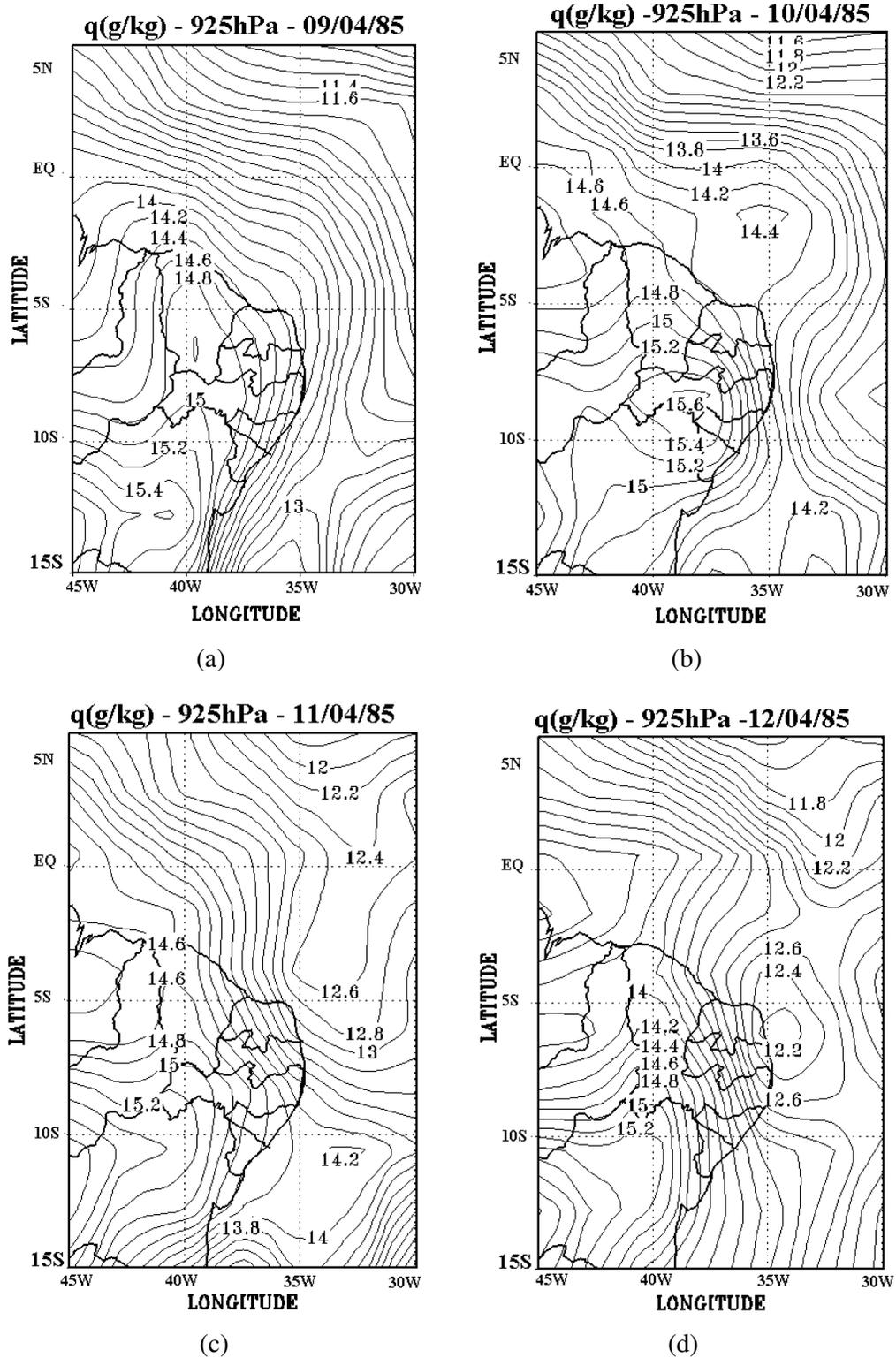


Figura. 15. Distribuição espacial da umidade específica, q (g/kg) no nível de 925 hPa.

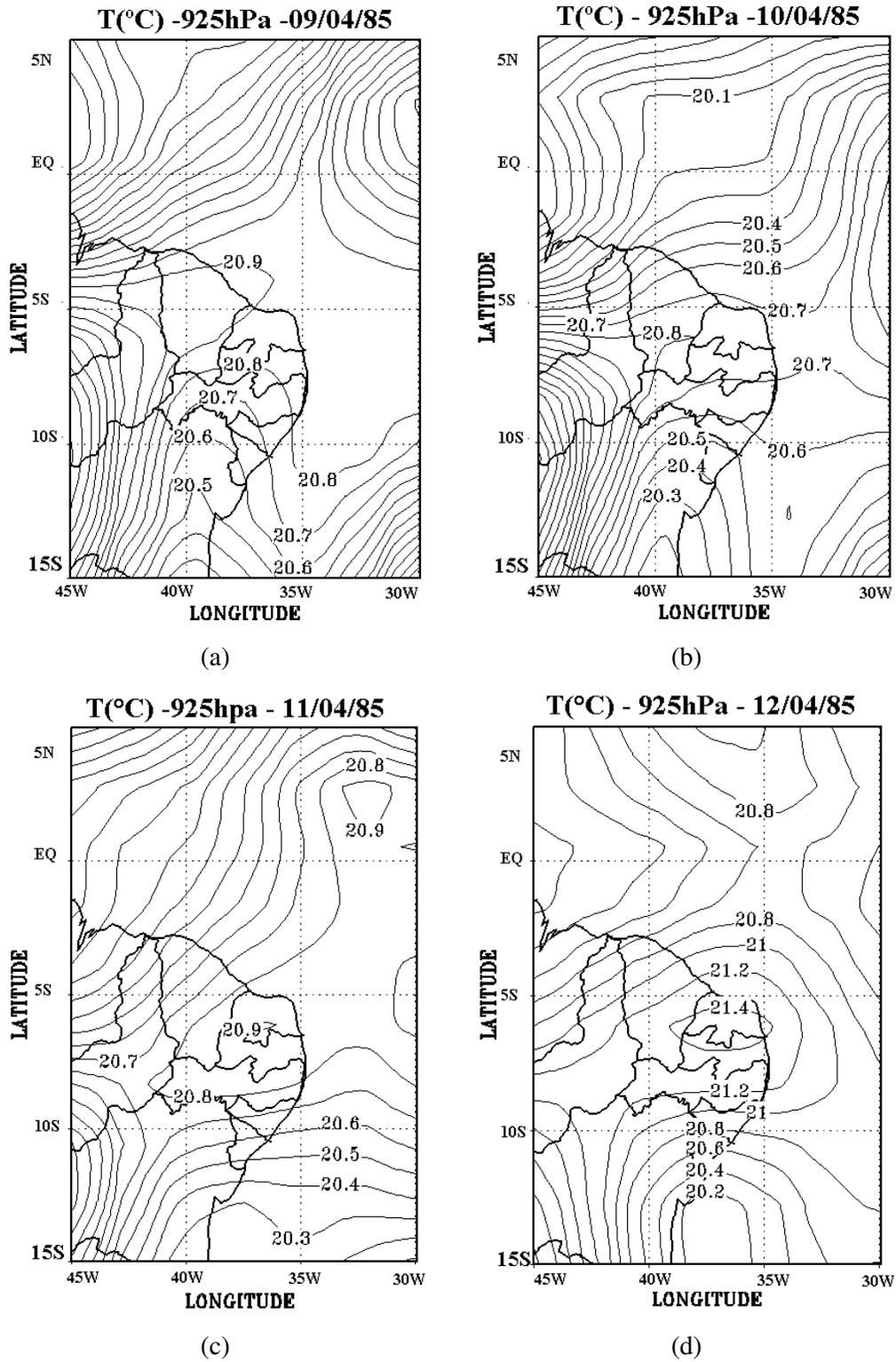


Figura 16. Distribuição espacial da temperatura, T (°C) no nível de 925 hPa.

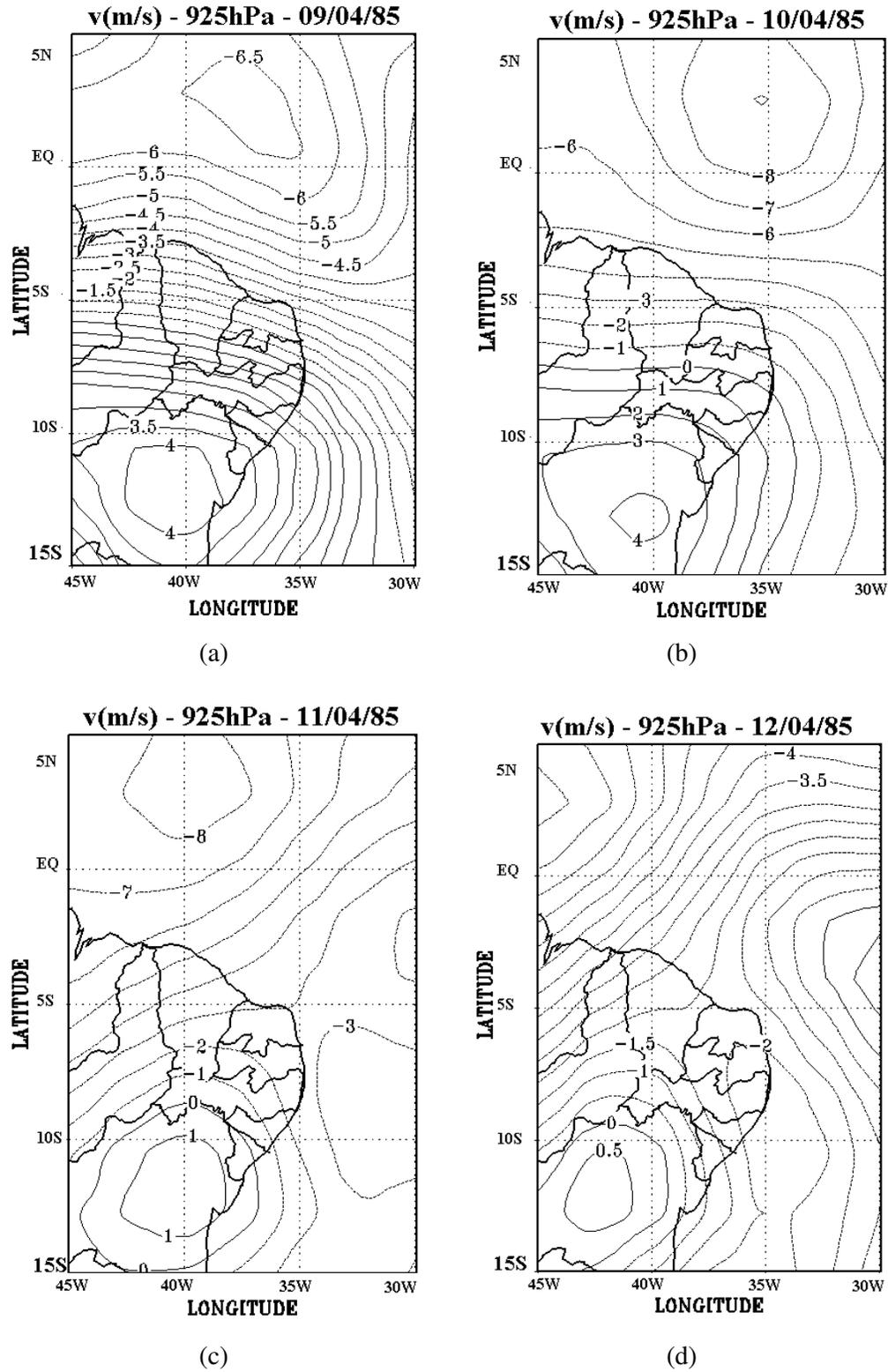


Figura 17. Distribuição espacial da componente meridional do vento, v (m/s) no nível de 925 hPa.

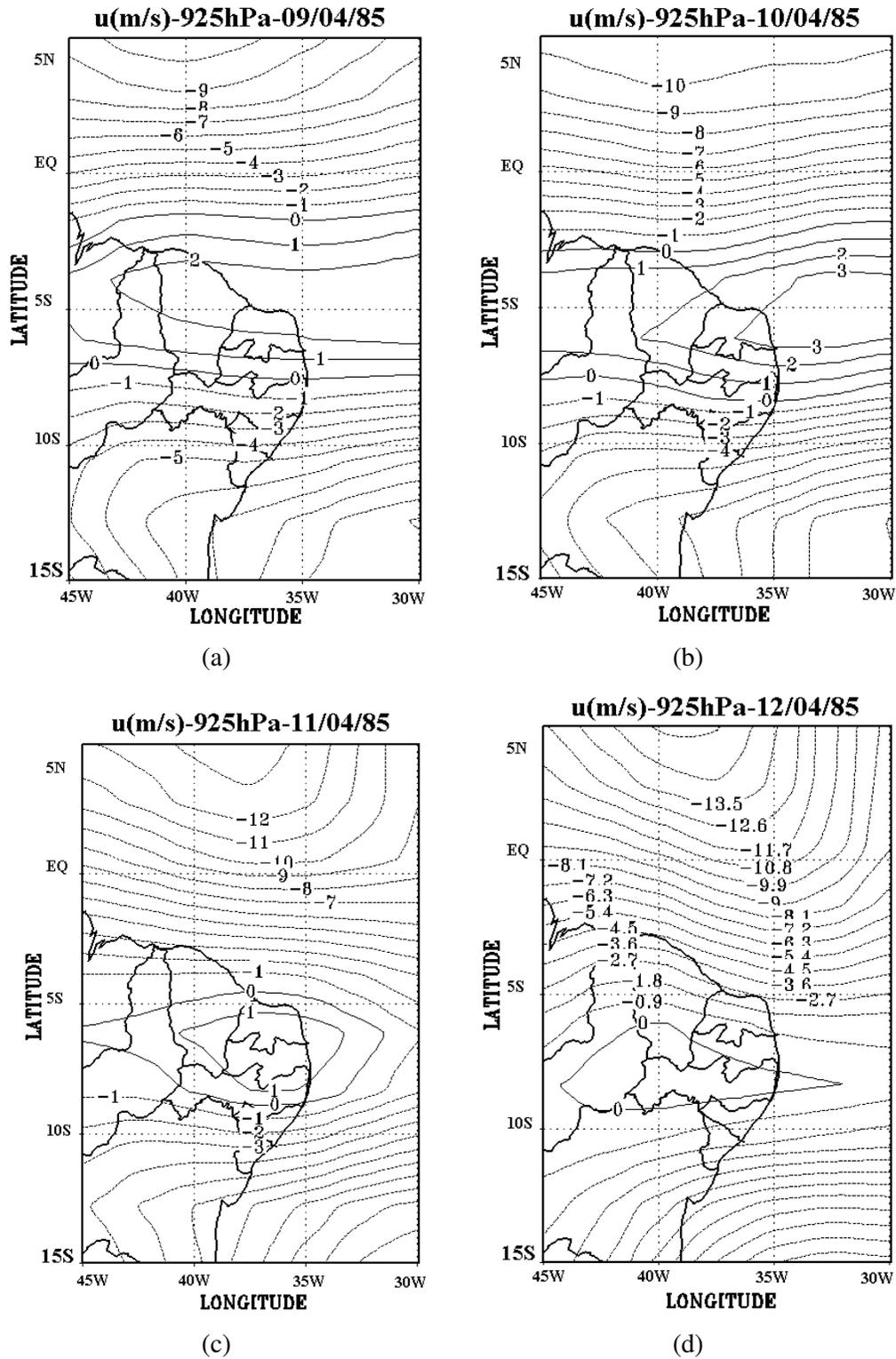


Figura 18. Distribuição espacial da componente zonal do vento, u (m/s) no nível de 925 hPa.

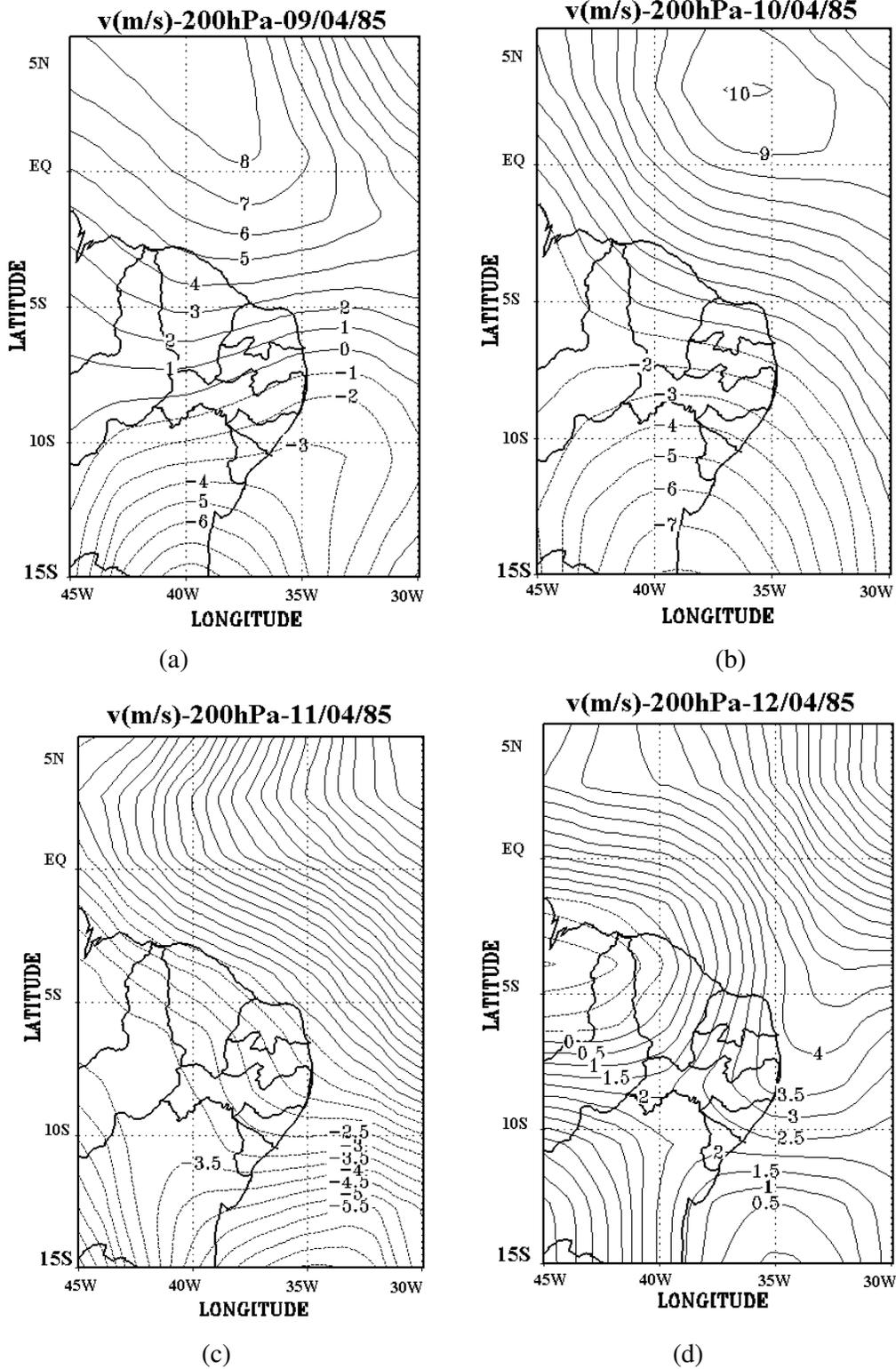


Figura 19. Distribuição espacial da componente meridional do vento, v (m/s) no nível de 200 hPa.

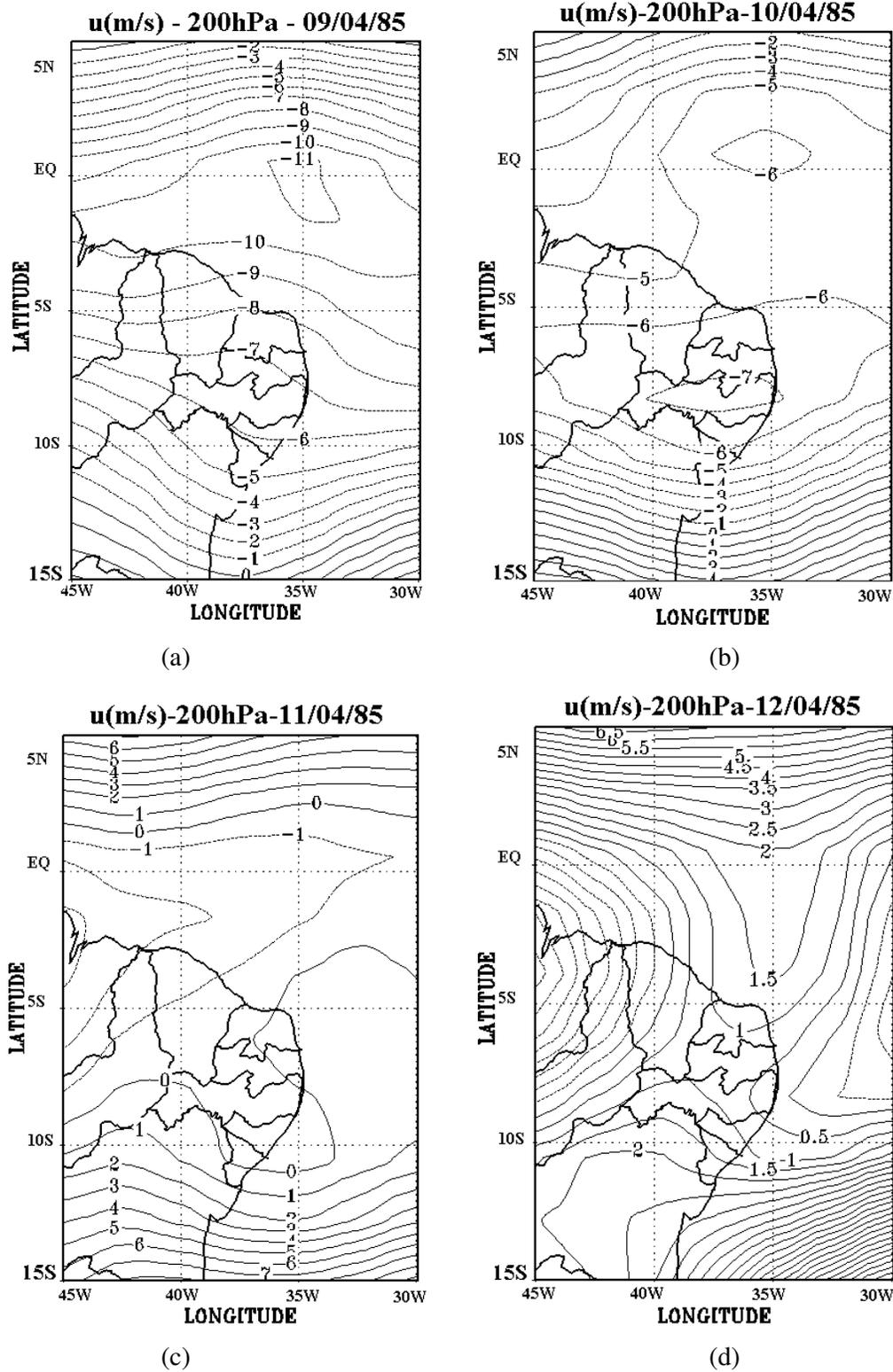


Figura 20. Distribuição espacial da componente zonal do vento, u (m/s) no nível de 200 hPa.

(b) Fatores

(b.1) Umidade específica em 925 hPa

Quatro fatores comuns temporais, explicando 84,7% (40,8% + 18,2% + 16,2% + 9,6%) da variância total dos dados foram retidos pelo critério mínimo (autovalores maiores que 1). As cargas fatoriais (correlações entre os fatores e a umidade específica diária) associadas ao primeiro fator são extremamente altas nos primeiros 12 dias do mês de abril (> 0,70) (Figura 21).

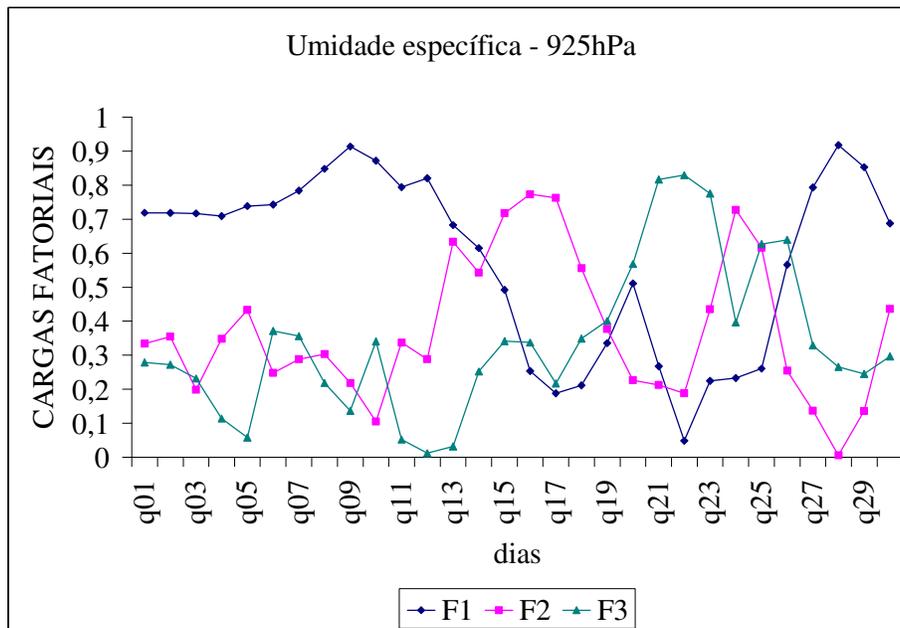


Figura 21 – Cargas fatoriais (correlações) diárias dos três primeiros fatores comuns temporais.

A configuração espacial do primeiro fator (escores) para os dias 09, 10, 11 e 12 (Figura 22) mostra valores positivos na região continental semi-árida superiores a um na área que cobre parte dos Estados de Pernambuco e da Bahia, e valores negativos na região costeira do Nordeste. Nos dias 10, 11 e 12 a área com valores negativos na parte leste do continente aumenta gradativamente.

Os resultados indicam um alto teor de umidade atmosférica nos baixos níveis sobre a região semi-árida no período crítico (9 a 12 de abril). A alta correlação entre os dias reflete o peso dessa variável (umidade) na definição do tempo observado no período. Alto teor de vapor d'água nos níveis mais baixos da atmosfera representa um elemento essencial para ocorrência de convecção profunda.

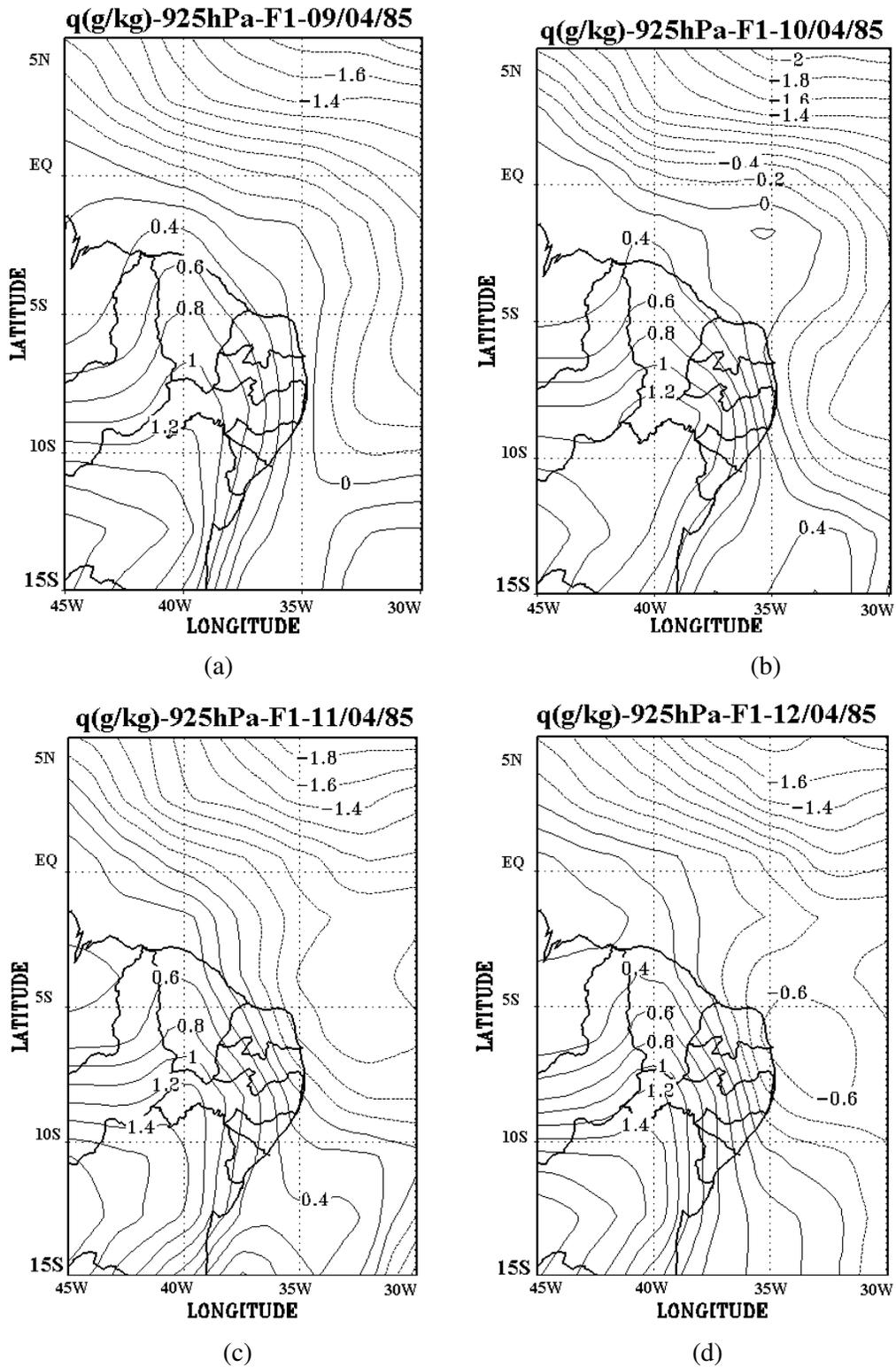


Figura 22. Padrão espacial do primeiro fator (escores) para a umidade específica q (g/kg) dos dias 09, 10, 11 e 12 de abril de 1985.

(b.2) – Temperatura em 925 hPa

No caso da ACP aplicada aos dados diários de temperatura no nível de 925 hPa, seis fatores comuns temporais, explicando 90,6% (24,5% + 19,1% + 14,4% + 12,5% + 12,3% + 7,8%) foram retidos pelo critério mínimo (autovalores maiores que 1). As cargas fatoriais (correlações entre os fatores e a temperatura diária) associadas aos três primeiros fatores são mostradas na Figura 23.

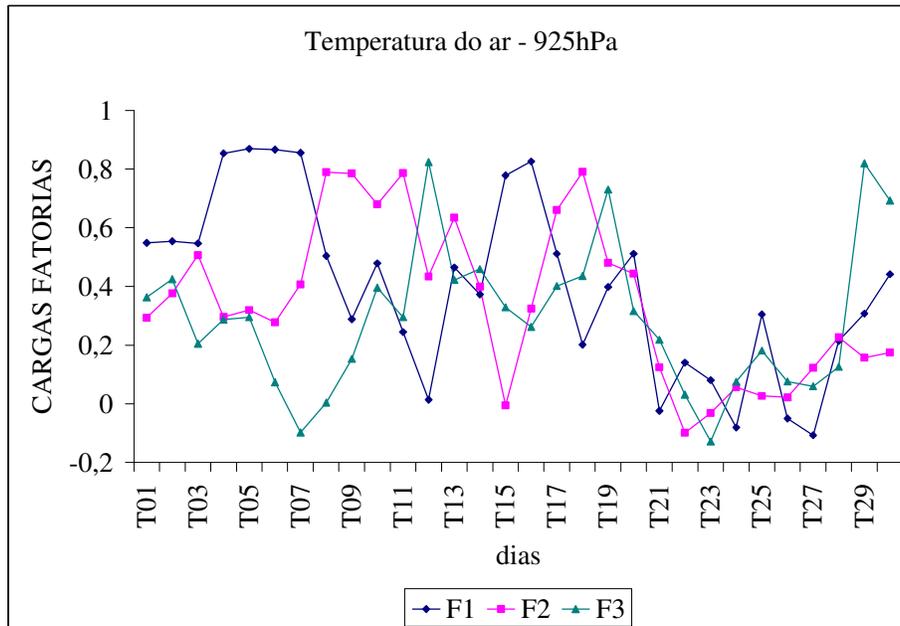


Figura 23 – Cargas fatoriais (correlações) diárias dos três primeiros fatores comuns temporais.

Os dias 09, 10 e 11 têm alta correlação com o segundo fator. O dia 12 está mais correlacionado com o terceiro fator. A distribuição espacial desses fatores é mostrada na Figura 24. Verifica-se que em relação aos eventos 09, 10 e 11, a configuração espacial do segundo fator tem sempre cargas positivas na região semi-árida ao norte da Bahia. Valores negativos predominam na região da Bahia. As magnitudes são relativamente baixas sobre o Nordeste. A configuração espacial do terceiro fator (bem correlacionado com o evento 12) tem cargas fatoriais com magnitudes significativas. Um dipolo com um núcleo de valores máximos (aumento da temperatura) na área sobre os Estados de Pernambuco, Paraíba e Rio Grande do Norte é evidente na distribuição espacial mostrada na Figura 24d. Efeitos locais podem ser responsáveis pelo padrão de dipolo observado no dia 12 de abril.

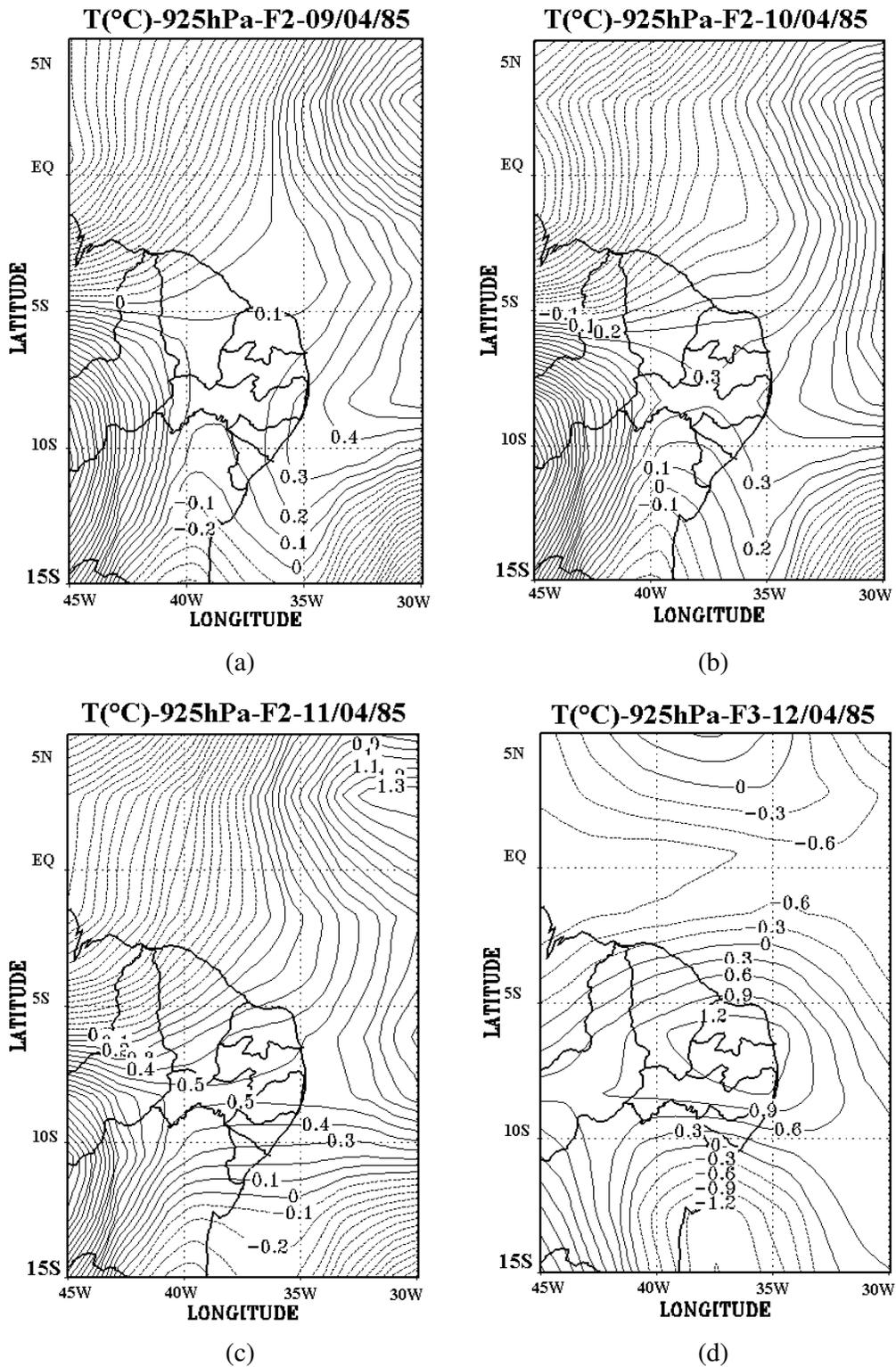


Figura 24 - Padrão espacial do primeiro fator(escores) para T (°C) dos dias 09, 10, 11 e 12 de abril de 1985.

(b.3) – Componente meridional do vento em 925 hPa

Três fatores comuns temporais, explicando 89,3% (34,7% + 29,3% + 25,3%) da variância total dos dados foram retidos pelo critério mínimo (autovalores maiores que 1). As cargas fatoriais (correlações entre os fatores e a componente meridional diária) são relativamente altas ($> 0,65$) no período entre 09 e 12 de abril (Figura 25).

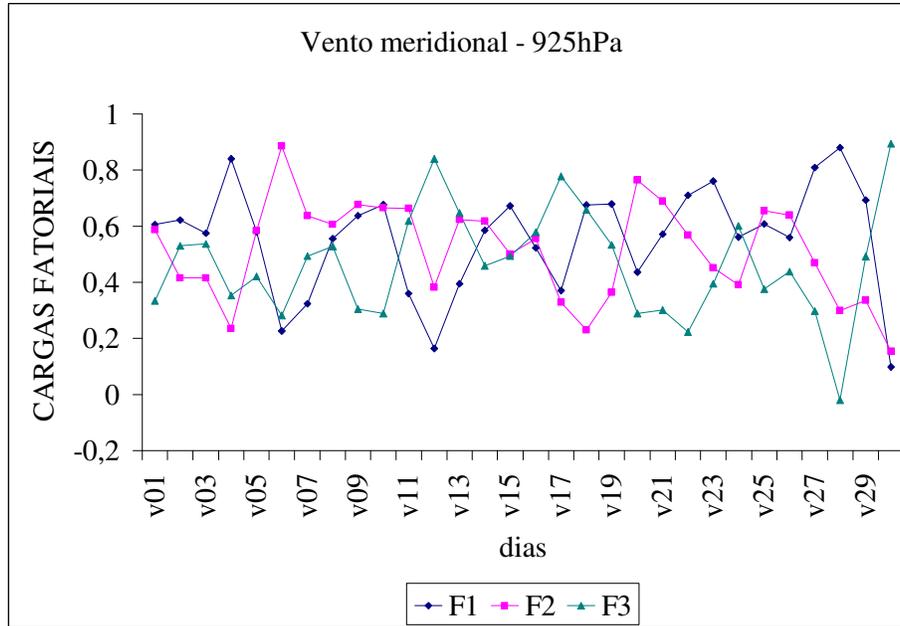


Figura 25 - Cargas fatoriais (correlações) diárias dos três primeiros fatores comuns temporais.

Os dias 09 e 10 têm alta correlação com o primeiro e o segundo fatores, o dia 11 está mais correlacionado com o segundo e o terceiro fatores e o dia 12 mostra correlação bastante significativa apenas com o terceiro fator.

Na configuração espacial dos fatores mostrada na Figura 26, verificam-se valores negativos no norte e positivos no sul do domínio. Nos dias 09, 10 e 11 têm-se núcleos de valores máximos positivos (intensificação de ventos de sul) com magnitudes superiores a um na região da Bahia. Núcleos com valores máximos negativos (intensificação de ventos de norte) podem ser vistos na distribuição espacial do segundo fator (Figuras 26a e 26c). Magnitudes substancialmente mais baixas são observadas na configuração espacial do terceiro fator mostrada na Figura 26d. Esses fatores estão associados a mecanismos dinâmicos e indicam áreas de convergência nos baixos níveis. Essa é uma condição que favorece a ascensão do ar e formação de nuvens.

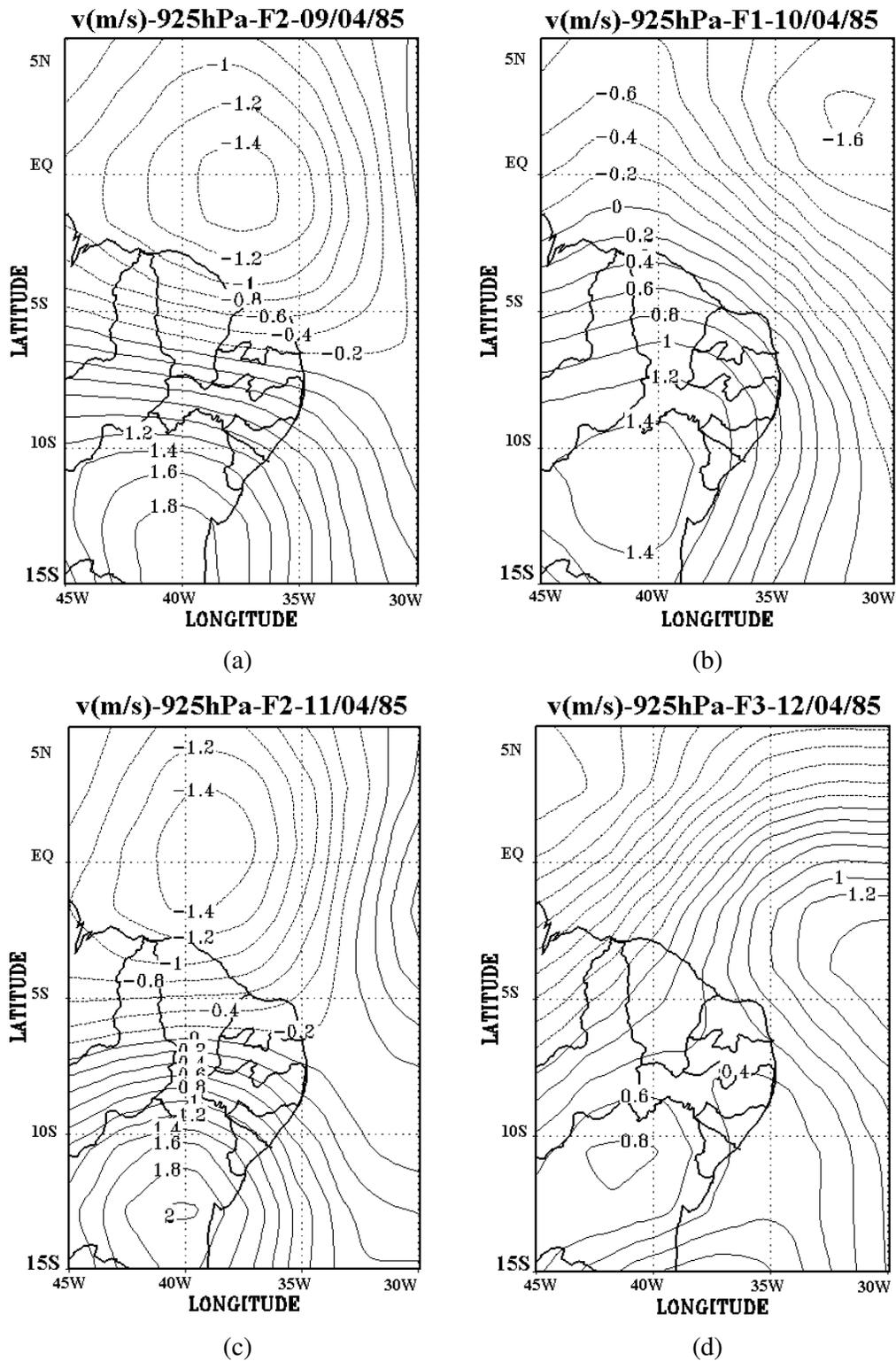


Figura 26 - Padrão espacial do primeiro fator (escores) para a componente meridional do vento v (m/s) dos dias 09, 10, 11 e 12 de abril de 1985.

(b.4) – Componente zonal do vento em 925 hPa

Quatro fatores comuns temporais, explicando 90,5% (29,7% + 26,9% + 20,4% + 13,6%) da variância total dos dados foram retidos pelo critério mínimo (autovalores maiores que 1). As cargas fatoriais (correlações entre os fatores e a componente zonal diária) são mostradas na Figura 27.

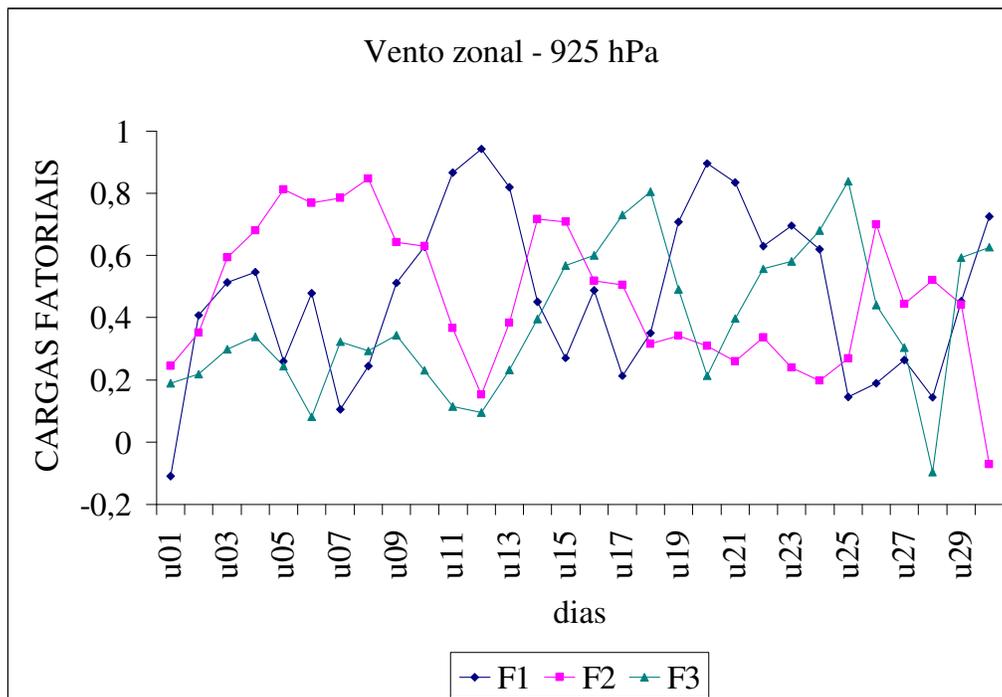


Figura 27 – Cargas fatoriais (correlações) diárias dos três primeiros fatores comuns temporais.

Os dias 11 e 12 têm alta correlação com o primeiro fator e o dia 09 com segundo fator. O dia 10 está mais correlacionado com o primeiro e segundo fatores.

Na configuração espacial dos fatores mostrada na Figura 28, verificam-se coeficientes negativos e positivos com magnitudes bem variadas. Os episódios referentes aos dias 11 e 12 de abril se destacam pela magnitude com coeficientes positivos superiores a um na região de estudo. Independente do fator dominante, a característica marcante observada nos quatro dias é a intensificação do vento de oeste na região Nordeste, ao norte da latitude de 10°S. Fisicamente são fatores associados a

mecanismos dinâmicos e também indicam processos de convergência/divergência nos baixos níveis.

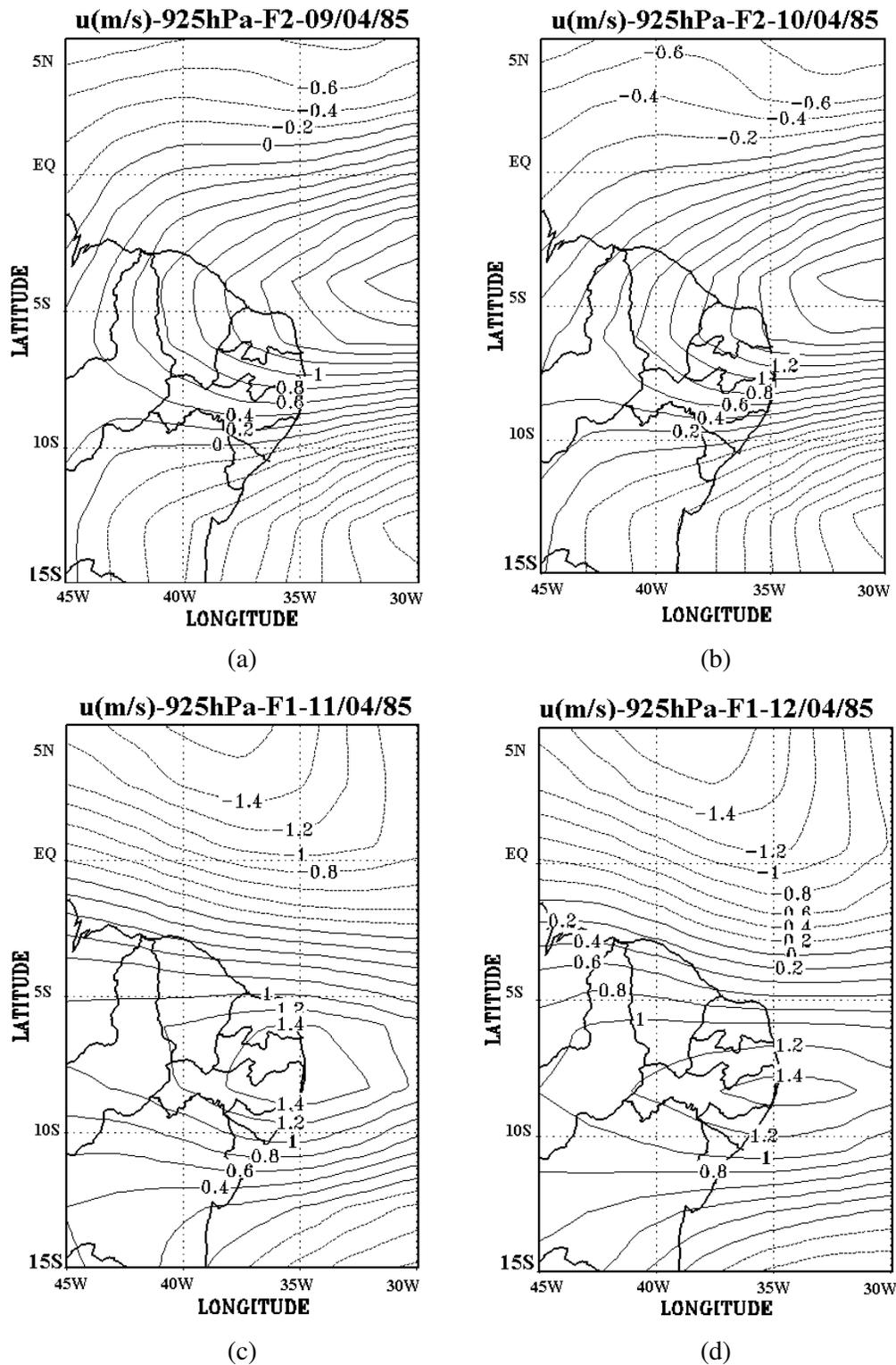


Figura 28 - Padrão espacial do primeiro fator (escores) para a componente zonal do vento u (m/s) dos dias 09, 10, 11 e 12 de abril de 1985.

7 - CONCLUSÕES

Com o desenvolvimento deste trabalho procurou-se fazer um diagnóstico das condições atmosféricas responsáveis pela formação e evolução de SC associados com chuvas intensas e formação de cheias no Submédio da bacia hidrográfica do rio São Francisco. Enfoque especial foi dado ao episódio de abril de 1985. Aspectos meteorológicos das cheias de 1979 e 2004 também foram analisados com o objetivo de detectar padrões atmosféricos associados com eventos extremos de chuva.

Os resultados permitiram concluir:

7.1 – Aspectos meteorológicos das cheias no Submédio São Francisco – Aplicação do índice RAI.

A enchente de 1985, registrada entre 11 e 17 de abril na região do Submédio São Francisco, foi causada por SC intensos desenvolvidos a jusante da represa de Sobradinho em condições atmosféricas sob influência da ZCIT.

A enchente de 2004 teve origem na atuação de sistemas frontais que atingiram o Estado da Bahia e de vórtices ciclônicos de altos níveis responsáveis pela atividade convectiva intensa e excesso de chuvas no período.

A obtenção dos índices de instabilidade, K e $CAPE_{MAX}$, representa um método eficaz como indicativo da possibilidade de formação de convecção profunda, no entanto, deve ser usado em conjunto com informações sobre condições atmosféricas de escala maior. O desenvolvimento ou inibição dos SC dependem do controle da grande escala.

O uso do índice RAI produziu resultados satisfatórios para detectar a duração de períodos secos e úmidos. A facilidade na obtenção do índice com cálculos simples constitui uma ferramenta de grande utilidade no auxílio do monitoramento de danos associados com eventos meteorológicos extremos.

Foi possível detectar que a incidência de anos secos é substancialmente maior na região estudada. Entretanto, os resultados obtidos com a análise do evento de 1979 permitiram concluir que apenas o indicativo de ano seco não garante a ausência de cheias na região.

Valores positivos do índice RAI são mais freqüentes nos meses de março e abril. Esse resultado sugere maior vulnerabilidade da região à ocorrência de cheias neste período.

A análise da distribuição espacial do índice RAI mostrou que valores com indicativo de anos secos atingem extensões relativamente maiores (maior número de postos) do que no caso dos anos úmidos. Este resultado explica porque o fenômeno das secas é considerado bem mais danoso para a economia da região do que os eventos de cheias, apesar dos prejuízos substanciais causados por inundações.

7.2 - Análise de Componentes Principais (ACP)

Conforme mencionado no texto, o uso da ACP teve como finalidade identificar padrões atmosféricos e variáveis meteorológicas dominantes no processo de formação e evolução de SC intensos que contribuíram para os episódios de chuvas extremas e ocorrência das cheias. Para isso foi avaliado separadamente o papel de mecanismos locais e de processos associados com fenômenos atmosféricos de escala maior.

7.2.1 – Aspectos locais e regionais

A aplicação da ACP permitiu verificar que efeitos locais foram significativos para evolução dos SC intensos observados em abril de 1985. A forte correlação entre $CAPE_{MAX}$, razão de mistura e chuva, indica que fatores termodinâmicos foram essenciais para intensificação dos sistemas.

No episódio de janeiro de 2004 fatores dinâmicos foram dominantes na definição das condições atmosféricas observadas. O domínio do grupo da temperatura, mostrando alta correlação entre as variáveis T , T_{MAX} , T_{MIN} , R_g e $EVAP$ indicam que processos adiabáticos (aquecimento / resfriamento) associados com ascendências e subsidências na área de atuação dos VCAN foram dominantes.

7.2.2 – Aspectos de escala sinótica

7.2.2.1 – Conjunto completo de dados

A ACP usada no conjunto completo de dados (reanálises) mostrou que um modelo com 4 componentes foi adequado para representar a estrutura inicial das variáveis. As duas primeiras componentes explicam 52,51% da variabilidade total dos dados e indicam que processos em superfície são fundamentais para determinar as condições atmosféricas observadas no mês de abril de 1985.

O primeiro fator possui correlação positiva com a maioria das variáveis. No entanto, as cargas fatoriais mais significativas estão relacionadas com a componente meridional do vento e são observadas para todo período analisado.

Esse resultado indica que o fator dinâmico foi preponderante na definição das condições atmosféricas observadas em abril de 1985. É possível concluir que convergência em superfície é uma condição essencial para ocorrência de convecção profunda (SC intensos).

7.2.2.2 – Subconjunto de dados (925 hPa)

A ACP aplicada aos subconjuntos formados pelas variáveis umidade específica, componentes zonal e meridional do vento e temperatura no nível de 925 hPa, permitiu extrair informações adicionais sobre as condições atmosféricas em abril de 1985 e detectar características peculiares do período crítico, entre 09 e 12 de abril.

Os resultados mostram que o excesso de umidade nos baixos níveis detectado nos primeiros dias de abril foi o fator determinante para a formação dos SC observados na região semi-árida. No entanto, apesar do método indicar a umidade específica como variável de maior peso na definição das condições atmosféricas do período analisado, a intensificação do vento (componentes u e v) observado na configuração espacial dos

fatores significativos, constitui o fator adicional para ocorrência de atividade convectiva intensa.

7.3 – Imagens do radar Meteorológico de Petrolina

Apesar da eficiência dos métodos estatísticos usados neste estudo, somente a utilização das imagens de radar permitiu explicar efetivamente a causa das enchentes nos tributários do São Francisco apesar das regras de operação de Sobradinho no controle de cheias.

A eficiência da represa de Sobradinho como controladora de cheias depende da distribuição espacial da chuva. Precipitação intensa a jusante da represa em situações de cota elevada do lago limita a importante função de controle das descargas.

Somente o radar meteorológico permite detectar a localização, deslocamento e evolução dos SC responsáveis por chuvas intensas e, com isso, definir regras de operação da represa de acordo com as condições atmosféricas vigentes.

8 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANA – Agência Nacional das Águas. <[http:// www.ana.gov.br](http://www.ana.gov.br) >.

ANDRADE, M.C. de. et al **Seca no nordeste brasileiro**. Disponível em: <<http://www.fundaj.gov.br>>.

ARAÚJO, A.A.M., ROTUNNO FILHO, O.C.R., XAVIER, L.N.R., et al “Análise de sensibilidade de modelos hidrológicos na perspectiva de SVATS de modelos atmosféricos”. In: XIV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS – IV SIMPÓSIO DE HIDRÁULICA E RECURSOS HÍDRICOS DOS PAÍSES DE LÍNGUA OFICIAL PORTUGUESA, 2001, Aracaju, SE, Brasil.

ARAÚJO, A.A.M., ROTUNNO FILHO, O.C.R. **Sistema de monitoramento regional da umidade do solo – componente**: obtenção dos campos espaciais de umidade do solo condicionados pela topografia utilizando krigagem bayesiana, Relatório Técnico, Laboratório de Hidrologia e Estudos do Meio Ambiente – Núcleo de Hidrologia Estratégica – COPPE/UFRJ, 2003, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

ARAÚJO, A.A.M., ROTUNNO FILHO, O.C.R., SANTOS, I.A., et al 2003. “Obtenção dos campos espaciais de umidade do solo condicionados pela topografia utilizando krigagem bayesiana”, In: XV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, Curitiba, PR, Brasil, 23 a 27 de novembro.

BARBOSA, T. F.; CORREIA, M. F. de **Sistemas convectivos de mesoescala e precipitação intensa no semi-árido brasileiro**. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Meteorologia) – Universidade Federal de Campina Grande, 2003.

BARBOSA, T. F.; CORREIA, M. F. de Sistema convectivos intensos no semi-árido brasileiro: o controle da grande escala. Revista Brasileira de Meteorologia, v.20, n.3, p.395-410, dez. 2005.

BARP, A. R. B. **Modelagem chuva-vazão em bacias hidrográficas com suporte em redes neurais artificiais.** 1999. 259 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, São Paulo, 1999.

BENETTI, C.A., DIAS, M.A.F.S. Análise da performance dos índices de instabilidade como previsores de tempestades na região de São Paulo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 4 Brasília, out. 1986. Belo Horizonte: Sociedade Brasileira de Meteorologia, 1986. v.2, p. 65-70.

BLAIN, G. C.; BRUNINI O. Avaliação e adaptação do Índice de Severidade de seca de Palmer (PDSI) e do Índice Padronizado de Precipitação (SPI) às condições climáticas do estado de São Paulo. *Bragantia*, Campinas, v.64, n.4, p.695-705, 2005.

BRAGA et al Tempo de resposta da vegetação às variabilidades sazonais da precipitação no Nordeste do Brasil, *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, Santa Maria, v.11, n.1, p.149-157, mar 2003.

BRUNINI, O.; BLAIN, G. C. Avaliação e adaptação do índice de severidade de seca de Palmer (PDSI) às condições climáticas do Estado de São Paulo, *Bragantia*, v.64, n.4, p. 695 – 705, jul. 2005.

BYUN, H. R.; WILHITE, D. A. Objective quantification of drought severity and duration *Journal of Climate*, vol 12, pp 2747 – 2756, set. 1999.

CARVALHO, L.M.V.; LIEBMANN, C. J. B. Extreme precipitation events in southeastern south América and large-scale convective patterns in the south Atlantic convergence zone. American Meteorological Society, *Journal of Climate*, v.15, p 2377-2393, set. 2002.

CHESF – Companhia Hidrelétrica do São Francisco. **Relatório da comissão interministerial de estudos para o controle das enchentes do rio São Francisco**, 1986.

CHOW, V.T.; MAIDMENT, D.R.; MAYS, L.W. *Applied hydrology*. New York, McGraw-Hill, 1988. 572p. processes: theory and applications. Bari, Instituto per.

CLIMANÁLISE. Boletim de monitoramento e análise climática, v.19, n. 01, janeiro, 2004, INPE/CPTEC, Cachoeira Paulista, São Paulo-SP.

COHEN, J. C. P., DIAS, M. A. F. S.; NOBRE C. A., 1995 Environmental conditions associated with Amazonian squall lines: A case study. Mon. Wea. Rev., **123**, 3163-3174.

CORREIA, M. F., **Diagnóstico via radar dos sistemas precipitantes do semi-árido brasileiro**: O evento de 1985. Dissertação de Mestrado em Meteorologia, USP São Paulo, SP, 1989.

CORREIA, M. F. et al Vulnerabilidade climática e interrupção no fornecimento de energia elétrica na área da Chesf: uma aplicação da análise de componentes principais. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE CLIMATOLOGIA, Fortaleza – Ceará – Brasil, 2005.

CORREIA, M. F. et al Eventos extremos de precipitação no semi-árido brasileiro uma análise da estrutura termodinâmica da atmosfera na presença de vórtices ciclônicos de ar superior. In: VII SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE, Gravatá – Pernambuco – Brasil, 2006.

CRUZ, H. P.; COIMBRA, R. M.; FREITAS, M. A. V. de. **O estado das águas no Brasil**: vulnerabilidade climática e recursos hídricos no nordeste. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/srh/>>.

DINIZ, M. C. S. et al **Atividade convectiva na área do aeroporto de Petrolina**: uma análise de condições meteorológicas significativas para aviação. 2003. 46f. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Meteorologia) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2003.

DINIZ, M. C. S. et al **Convecção profunda no submédio do Rio São Francisco**: uma avaliação das condições atmosféricas na área do aeroporto de Petrolina – PE. Revista Brasileira de Meteorologia, v.19, n.3, 273-285, 2004.

FARIAS, W. R. G. et al Avaliação através da análise observacional e de componentes principais na ocorrência de falhas no fornecimento de energia por descarga atmosférica em ano de la niña. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE CLIMATOLOGIA, Fortaleza – Ceará – Brasil, 2005.

FILHO, J. G. C. G. et al Projeto de gerenciamento integrado das atividades desenvolvidas em terra na bacia do São Francisco – ANA/GEF/PNUMA/OEA – estudo técnico de apoio ao plano da bacia hidrográfica do São Francisco, n. 10, controle de cheias, abril, 2004. Disponível em: <<http://www.ana.gov.br/prhbsf>>

FREITAS, M. A. S. **A Previsão de Secas e a Gestão Hidroenergética: O Caso da Bacia do Rio Parnaíba no Nordeste do Brasil.** In: Seminário Internacional sobre Represas y Operación de Embalses, 2004, Puerto Iguazú. Anais do Seminário Internacional sobre Represas y Operación de Embalses. Puerto Iguazú : CACIER, 2004. v. 1. p. 1-1.

FREITAS, M. A. S. Um Sistema de Suporte à Decisão para o Monitoramento de Secas Meteorológicas em Regiões Semi-Áridas. **Revista Tecnologia**, Fortaleza, v. Suplem, p. 84-95, 2005.

GALVÍNCIO, J. D.; SOUSA, F. A. S. de. Relação entre o fenômeno el Niño e os totais mensais precipitados na bacia do rio São Francisco. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v.7, n.4, p.113-119, out./dez. 2002.

GOMES, H. P. Análise do desempenho hidro-agrícola do perímetro de irrigação Nilo Coelho. Associação Brasileira de Recursos Hídricos. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos – RBRH*. Porto Alegre, v. 6, n. 2, p. 119-127. 2001.

GARAYALDE, E. J. G.; SILVA, M.G.A. da; TAVARES, A. SÁ de Classificação meso-climática da região sul do Brasil pela análise de componentes principais. In: CONGRESSO INTERAMERICANO DE METEOROLOGIA, 1., CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, Brasília, 1996.

GONÇALVES, W.A.; CORREIA, M.F.; ARAÚJO, L.E.; SILVA, D.F. da; ARAÚJO, H.A. Vulnerabilidade Climática do Nordeste Brasileiro: Uma análise de eventos

extremos na Zona Semi-árida da bacia hidrográfica do São Francisco, XIV Congresso Brasileiro de Meteorologia, **Anais**, Florianópolis, 2006.

GRIMM, A. M.; TEDESCHI, R. G. Influência de eventos El Niño e La Niña sobre a frequência de eventos extremos de precipitação no Brasil. In: XI CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 1998, Rio de Janeiro, p. 1-13.

HAIR, J.F. Jr; ANDERSON, R.E.; TATHAM, R.L.; BLACK, W.C. *Multivariate Data Analysis*. 5 ed. New Jersey: Prentice Hall, 1998.

LIEBMANN, B. G. N. et al Submonthly convective variability over South America and the South Atlantic convergence zone. *J. Climate*, 12, 1977–1891. 1999.

LOUKAS, A.; VASILIADES, L.; DALEZIOS, N. R. Intercomparison of meteorological drought indices for drought assessment and monitoring in Greece, 8th International Conference on Environmental Science and Technology Lemnos island, Greece, p.484-491, set. 2003.

MACHADO, L. A. T., ROSSOW, W. B., 1993: Structural characteristics and radiative properties of tropical cloud clusters. *Mon. Wea. Rev.*, 121, 3234-3259.

MAGALHÃES, H.C.F.; GARAGORRY, F.L.; GASQUES, J.G.; MOLION, L.B.; NETO, M.S.A.; NOBRE, C.A.; PORTO, E.R.; REBOUÇAS, O.E. **The effects of climatic variations on agriculture in the Northeast of Brazil**. Luxemburgo/Austria: [s.n.], 1987. 109p.

MARENGO, J. Interannual variability of surface climate in the Amazon basin. In: *Int. J. Climatology*, 12, 853-863. 1992.

MARENGO, J.; HASTENRATH, S. Case studies of extreme climatic events in the Amazon basin. *J. Climate*, 6, p. 617-617, 1993.

MENEZES, W. F.; DIAS, M. A. F. S. “Simulação numérica das tempestades ocorridas no estado de São Paulo em 14 de maio de 1994: O caso Ribeirão Preto”. In: X CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 1998, **Anais**, outubro de 1998, Brasília – DF.

MENEZES, W. F.; DIAS, M. A. F. S. “Aspectos da estrutura vertical da “baixa fria” profunda associada com as tempestades do caso Ribeirão Preto de 14 de maio de 1994”, In: XIII CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 2004, **Anais**, Fortaleza, CE, Agosto.

MOHAN, S.; ARUMUGAM, N. Relative importance of meteorological variables in evapotranspiration: factor analysis approach. *Water Resources Management, India*. V. 10. p. 1-20, 1996.

MOLION, L.C.B.; CARVALHO, J.C. Southern Oscillation and river discharge of selected rivers of tropical South America. In: CONFERENCE OF GEOPHYSICAL FLUID DYNAMICS WITH SPECIAL EMPHASIS ON EL NIÑO. São José dos Campos, Ministério da Ciência e Tecnologia e Centro Latino Americano de Física, p. 343-354. 1987.

MOURA, A.D.; SHUKLA, J. On the dynamics of droughts in Northeast Brazil: observations, theory and numerical experiments with a general circulation model. *J. Atmospheric Science*, 38 (12): 2653-2673, 1981.

MOSCATI, M. C. L.; GAN, M. A de. Um evento de precipitação extrema ocorrido no interior semiárido da região Nordeste do Brasil (NEB). Disponível em: <inpe.br/col/cptec.inpe.br/walmeida/2004>

O'DONNELL, T., CANEDO, P.M. “**The reliability of conceptual calibration**”, **Hydrological forecasting. Proceedings of the Oxford Symposium**, IAHS Publication, 1980, v.129.

ORLANSKI, I. “A rational subdivision of scales for atmospheric processes”, *Bulletin of the American Meteorological Society*, v.56 (5), pp. 527-534, 1975.

PALMER, W. C., 1965: Meteorological drought. U.S. Weather Bureau Tech Paper 45, 1-58.

PEREIRA FILHO, A. J.; HAAS, R.; AMBRIZZI, T. Caracterização de eventos de enchentes na bacia do Alto Tietê por meio do radar meteorológico e da modelagem numérica de mesoescala. In: XII Congresso Brasileiro de Meteorologia, Foz do Iguaçu, Paraná (CDROM), 2002.

RAMOS, R. P. L. Precipitation characteristics in the northeast Brazil dry region. *J. Geophysics. Res.* v. 80, pp. 1965-1978, 1975.

RONCHAIL, J. et al Inundations in Mamoré basin (south-western Amazon-**Bolivia**) and sea-surface temperature in the Pacific and Atlantic Oceans. *Journal of Hydrology*, n. 302, p.223-238, 2005.

ROOY, V M.P. **A Rainfall Anomaly Index Independent of Time and Space**, *Notos*, 14, 43, 1965.

SALVADOR, M. A de. Chuvas extremas em Alagoas durante Janeiro de 2004. XI CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, Rio de Janeiro, 2000.

SATYAMURTY, P.C.; NOBRE, P.L.; DIAS, S. South America. *Meteorology of the Southern Hemisphere*, D. J. Karoly and D.G. Vincent, Eds., *Amer. Meteor. Soc.*, 119–139. 1998.

SECRETARIA DE RECURSO HÍDRICOS DO MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE – SRH/ MMA. < <http://www.mma.gov.br/port/srh/>>.

SILVA ARAGÃO, M. R., CORREIA, M. F.; ARAÚJO, H.A. Characteristic of C-Band meteorological radar echoes at Petrolina, Northeast Brazil. *Inter. J. of Climat.*, v.20, p. 279-298, 2000.

SILVA, A.B. P.; MOLION, L. C. B.de. Extremos de precipitação sobre a costa leste do Nordeste do Brasil: O evento de agosto de 2000. In: XII CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 2002, Foz do Iguaçu-PR, p. 723-731.

SILVA PAIVA, L. M. **Tempestades e Chuvas de Verão no Estado do Rio de Janeiro**. 2000. Dissertação de Bacharelado, Departamento de Meteorologia da UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

SILVA PAIVA, L. M.; MENEZES, W. F. Comparação entre dois casos de linhas de instabilidade observados nos dias 25 e 31 de Janeiro de 2000 no Rio de Janeiro. In: XI CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, **Anais**, Rio de Janeiro, 2000.

SILVA, M. P. R. **Estudo das categorias de gelo e água presentes em uma tempestade tropical utilizando o módulo de microfísica do RAMS**. 2003. Dissertação de Mestrado, Departamento de Meteorologia da UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, 2003.

SMITH, J. A.; BAECK, M. L.; STEINER, M. Catastrophic rainfall from an upslope thunderstorm in the central Appalachians: The Rapidan storm of June 27, 1995. *Water Resources Research*, 32, 3099-3113, 1996.

SMITH, A. J.; BAECK, L. M.; ZHANG, Y. Extreme rainfall and flooding from supercell thunderstorms. *J. Hydrometeor.*, v. 02, p. 469-489, out. 2001.

SUDENE. As secas do Nordeste. Recife, DRN, 1981.

VILLELA, S. M.; MATTOS, A. **Hidrologia aplicada**. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1975. 245p.

ZAWADZKI, I. I.; RO,C.U. Correlation Between Maximum Rate of Precipitation and Mesoscale parameters. *Journal of Applied Meteorology*, v. 17, 1978.