

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAIBA
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
CURSO DE MESTRADO EM METEOROLOGIA

COMPORTAMENTO ESTATISTICO DE SERIES TEMPORAIS
DE PLUVIOMETRIA NO NORDESTE DO BRASIL

VICENTE DE PAULO RODRIGUES DA SILVA

CAMPINA GRANDE - PARAIBA
ABRIL - 1992

VICENTE DE PAULO RODRIGUES DA SILVA

COMPORTAMENTO ESTATISTICO DE SERIES TEMPORAIS
DE PLUVIOMETRIA NO NORDESTE DO BRASIL

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

AREA DE CONCENTRAÇÃO: CLIMATOLOGIA ESTATISTICA

Orientador: JUAN CARLOS CEBALLOS

Co-Orientador: PEDRO VIEIRA DE AZEVEDO

CAMPINA GRANDE - PARAIBA
ABRIL - 1992



S586c Silva, Vicente de Paulo Rodrigues da
Comportamento estatístico de series temporais de
pluviometria no Nordeste do Brasil / Vicente de Paulo
Rodrigues da Silva. - Campina Grande, 1992.
81f. : il.

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

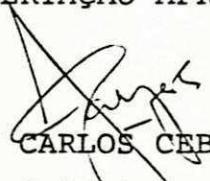
1. Meteorologia Climatologica 2. Pluviometria 3.
Precipitacao 4. Climatologia Estatistica 5. Dissertacao I.
Ceballos, Juan Carlos, Dr. II. Azevedo, Pedro Veira de, Dr.
III. Universidade Federal da Paraiba - Campina Grande (PB).
IV. Título

CDU 551.502.3(043)

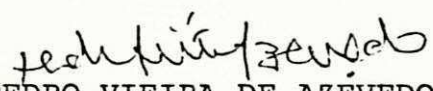
COMPORTAMENTO ESTATÍSTICO DE SÉRIES TEMPORAIS DE PLUVIOMETRIA NO
NORDESTE DO BRASIL

VICENTE DE PAULO RODRIGUES DA SILVA

DISSERTAÇÃO APROVADA COM DISTINÇÃO EM 14/4/92



JUAN CARLOS CEBALLOS
Orientador



PEDRO VIEIRA DE AZEVEDO
Co-Orientador



JOSÉ ORIBE ROCHA DE ARAGÃO
Membro



BERNARDO BARBOSA DA SILVA
Membro

CAMPINA GRANDE
ABRIL - 1992

OFERECIMENTO
(*in memoriam*)

Ofereço este trabalho à memória do meu pai, Vicente Francisco da Silva, como forma de agradecimento e reconhecimento a quem primeiro me encaminhou aos estudos, apoiou em todos os momentos e, principalmente, estimulou e motivou a conclusão desta etapa de minha vida.

DEDICATORIA

A minha mãe Alaide, à
minha esposa Tânia e
filhas Daniela e
Rafaela.

AGRADECIMENTOS

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
- CNPQ pela bolsa concedida.

Aos Drs. Juan Carlos Ceballos e Pedro Vieira de Azevedo pelas
valiosas orientações e sugestões.

A todos aqueles que de alguma forma contribuíram para a
realização deste trabalho.

RESUMO

Foram analisados os totais anuais de precipitação, referentes aos anos hidrológicos do período de 1911 a 1984, de 89 postos pluviométricos da Região Nordeste do Brasil. A análise Harmônica das séries de precipitação evidenciou ciclos característicos em torno de 74, 26, 13, 3-4 e 2-3 anos. Em apenas duas localidades (Fortaleza e Catolé do Rocha), os ciclos de 13 e 26 anos são simultaneamente significantes, a um nível de 5%, segundo o teste de Fisher. Correlacionou-se o Índice de Oscilação do Sul (IOS) (dos anos em que ocorreram forte ou moderado El Niño com o desvio de precipitação do período de 1935 a 1984.

Foram usados os testes de Fisher e de Student para determinar, respectivamente, níveis de significância das séries de precipitação associados à contribuição de cada harmônico para a variância e ao coeficiente de correlação entre IOS e desvios de precipitação. Com base no teste de Fisher, o ciclo de 13 anos está mais relacionado com o regime de chuvas da região Norte do Nordeste, enquanto o ciclo de 26 anos se encontra presente na pluviometria do litoral leste do Nordeste (ao sul da latitude de 9°S) e em regiões centrais do Estado da Bahia. Por outro lado, o teste de Student indicou que o relacionamento entre El Niño e secas no Nordeste é mais forte na faixa de latitude compreendida entre $4,5^{\circ}\text{S}$ e $14,5^{\circ}\text{S}$, decrescendo na direção Norte, onde o regime de chuvas ao norte da latitude de $4,5^{\circ}\text{S}$ é influenciado pela Zona de Convergência Intertropical, e sul desta faixa de latitude com uma maior influência da entrada de frentes oriundas do sul do país. Dentre as 89 estações analisadas, apenas 26 possuem ciclos significativos a um nível de 10%, segundo o teste de Fisher. Para estas estações, o modelo senoidal não consegue explicar mais de 50% da variância dos dados originais. Em geral, os resíduos de precipitação do Nordeste se ajustam melhor à Distribuição Normal. Tais resíduos se comportam como ruído branco.

ABSTRACT

This study employed the hidrological year to analyse the annual precipitation time series of 89 locations of the Northeast region of Brazil. The harmonic analyses showed characteristic cycles around 74, 26, 13 3-4 and 2-3 years. The 13 and 26 years cycles were simultaneously significant a 5% level for only two locations (Fortaleza and Catolé do Rocha), according to the Fisher's test. The South Oscilation Index (SOI) for the years of occurrence of moderate or strong El Niño was correlated to the precipitation residues for the period from 1935 to 1984.

The Fisher and Student test were used to determine the significance levels associated to the contribution to the precipitation variance and to the correlation between SOI and precipitation residues. According to the Fisher test, the 13 years cycle is more related to the rain regime of the north of Northeast region. While the 26 years cycle occurs more frequently in the pluviometry of the Northeast Brazil coast East (southern of 9°S latitudes) and in the central regions of Bahia State. On the other side, the Student test showed that the relationship between El Niño and droughts in Northeast Brazil is stronger in the 4.5°S to 14.5°S latitude belt, reducing in the directions north, with a greater influence of the Intertropical Convergence Zone, and south. With a greater influence of the southern frontal systems. Among the 89 series analysed, only 26 showed significant cycles at a 10% level, according to the Fisher test. For these series the senoidal model is not able to explain more than 50% of the variance of the original data. In general, the Northeast precipitation residues adjusts better to a Normal Distribution. These residues behave as a white noise.

SUMARIO

	Página
1 - INTRODUÇÃO	01
2 - REVISÃO BIBLIOGRAFICA	06
3 - MATERIAIS E METODOS	10
3.1 - Dados Utilizados	10
3.2 - Estações Representativas	10
3.3 - Ano Hidrológico	14
3.4 - Análise de Séries Temporais	14
3.4.1 - Modelo Aditivo	14
3.4.2 - Teste de Tendência	16
3.4.3 - Análise Harmônica Tradicional	16
3.4.4 - Teste de Significância para Coeficien - tes de Correlação	17
3.4.5 - Harmônicos Mais Representativos	18
3.4.6 - Ajuste de Senóides Não Harmônicas	24
3.4.7 - Teste de Distribuições: Normal, Trian - gular e Gama	27
3.4.8 - Teste Qui Quadrado	27
4 - DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	29
4.1 - Ciclos	29
4.1.1 - Ciclos de 3-4 (Região D) e 2-3 Anos (Região E)	35
4.1.2 - Ciclo de 13 Anos (Região C).....	38
4.1.3 - Ciclo de 26 Anos (Região B).....	41

4.1.4 - Ciclo de 74 Anos (Região A)	41
4.2 - Variância do Modelo Senoidal	46
4.3 - Espectro Contínuo das Séries	47
4.4 - Resíduos	53
4.5 - Distribuição Apropriada para os Resíduos	55
4.6 - Efeito ENOS Sobre a Precipitação do Nordeste do Brasil	58
4.7 - Correlação IOS X Desvios de Precipitação	69
5 - CONCLUSÕES E SUGESTÕES	76
6 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS	79

LISTAS DE FIGURAS

	Página
Figura 3.1 - Distribuição Espacial dos Postos Escolhidos sobre o Nordeste do Brasil	11
Figura 4.1 - Distribuição de Ciclos Predominantes (não - Necessariamente significantes)	34
Figura 4.2 - Distribuição Espacial da Contribuição à Variância (%) do Ciclo de 3-4 anos	36
Figura 4.3 - Distribuição Espacial da Contribuição à Variância (%) do Ciclo de 2-3 anos	37
Figura 4.4 - Níveis de Significância (em %) Associados ao Ciclo de 13 anos	39
Figura 4.5 - Distribuição Espacial da Contribuição à Variância do Ciclo (%) de 26 anos	42
Figura 4.6 - Níveis de Significância (em%) Associado ao Ciclo de 26 anos	43
Figura 4.7 - Distribuição Espacial da Contribuição à Variância (%) do Ciclo de 74 anos	44
Figura 4.8 - Níveis de Significância (em%) Associado ao Ciclo de 74 anos	45
Figura 4.9 - Função Representativa da Densidade Espectral para Estações do NEB, Incluindo o Espectro Associado ao Ruído Branco. a) São José do Belmonte (Região A, fig. 4.1); b) Aracaju (Região B, fig. 4.1)	50
Figura 4.9 - (Continuação). Idem c) Areia Branca (Região C, fig. 4.1); d) Petrolina (Região D, fig.	

4.1)	51
Figura 4.9 - (Continuação). Idem e) S. Bento do Una (Região E, fig. 4.1); f) Fortaleza (Região C, fig. 4.1)	52
Figura 4.10 - Funções de Autocorrelações de Resíduos de Precipitação para Estações do NEB. a) Caio Prado; b) Maceió	56
Figura 4.10 - (Continuação). Idem c) Campina Grande; d) Jequié	57
Figura 4.11 - Isolinhas dos Desvios da Precipitação (mm) no ano hidrológico de 1939/1940 - El Niño Moderado	61
Figura 4.12 - Isolinhas dos Desvios da Precipitação (mm) no ano hidrológico de 1941/1942 - El Niño Forte	62
Figura 4.13 - Isolinhas dos Desvios da Precipitação (mm) no ano hidrológico de 1953/1954 - El Niño Moderado	63
Figura 4.14 - Isolinhas dos Desvios da Precipitação (mm) no ano hidrológico de 1957/1958 - El Niño Forte	64
Figura 4.15 - Isolinhas dos Desvios da Precipitação (mm) no ano hidrológico de 1965/1966 - El Niño Moderado	65
Figura 4.16 - Isolinhas dos Desvios da Precipitação (mm) no ano hidrológico de 1972/1973 - El Niño Moderado	66

Figura 4.17 - Isolinhas dos Desvios da Precipitação (mm) no ano hidrológico de 1976/1977 - El Niño Moderado	67
Figura 4.18 - Isolinhas dos Desvios da Precipitação (mm) no ano hidrológico de 1982/1983 - El Niño Forte	68
Figura 4.19 - Distribuição do Coeficiente de Correlação (lag zero), em percentagem, entre Índice de Oscilação do Sul e Desvio de Precipitação...	70
Figura 4.20 - Nível de Significância (em%) Associado ao Coeficiente de Correlação (lag zero) entre Desvios de Precipitação e IOS	71
Figura 4.21 - Distribuição do Coeficiente de correlação (lag dois), em percentagem, entre Índice de Oscilação do Sul e desvio de precipitação...	74
Figura 4.22 - Nível de significância (em %) associado ao coeficiente de correlação (lag dois) entre desvio de precipitação e IOS	75

LISTA DE TABELAS

	Página
Tabela 3.1 - Postos Pluviométricos e suas Coordenadas Geográficas	12
Tabela 4.1 - Seleção dos Ciclos mais Fortes ordenados por ordem de Contribuição à Variância. Os Ciclos Significantes a um Nível de 10%, Segundo o Teste de Fisher, estão Marcados com Asteriscos	30
Tabela 4.2 - Contribuição à Variância (%) Associada aos Ciclos mais Fortes	32
Tabela 4.3 - Valores de $g(\text{crítico})$ correspondentes a diversos níveis de significância	40
Tabela 4.4 - Percentagem da variância (%) dos dados originais explicada pelo modelo senoidal	46
Tabela 4.5 - Períodos (anos) dos ciclos mais significativos de um conjunto de 14 estações do Nordeste do Brasil	53
Tabela 4.6 - Nível de significância correspondente as Distribuições Normal, Triangular e Gama	58
Tabela 4.7 - Valores médios do IOS (outubro a março) correspondentes aos anos de El Niño Moderado ou Forte	60

1 - INTRODUÇÃO

O Nordeste do Brasil (NEB) é uma região de grande dimensões abrangendo uma área de aproximadamente 1,5 milhão de quilômetros quadrados e sujeita a condições climáticas que variam de estado para estado. A seca no Nordeste do Brasil é um fenômeno climático de consequências desastrosas para a economia da região. Pesquisadores de várias partes do mundo têm voltado suas atenções para este problema, na tentativa de explicar e prever essas anomalias climáticas que afetam a região nordestina.

O anticiclone permanente do Atlântico Sul induz uma situação média de estabilidade atmosférica na região Nordeste. Com a chegada de perturbações, geram-se instabilidade e chuvas. Geralmente na costa do Nordeste do Brasil ocorre a formação de nuvens decorrentes de brisa marítima, provocando chuvas na região litorânea e às vezes no interior quando uma linha de instabilidade se propaga na direção Oeste.

A atmosfera sobre a região Nordeste do Brasil apresenta condições médias de estabilidade inibidoras de processos convectivos de grande escala. Tais condições são provocadas pelo ramo descendente da célula de circulação de Walker (ARAGÃO, 1986).

Dada a sua grande extensão, o NEB sofre a influência de, no mínimo, cinco sistemas atmosféricos que contribuem durante o ano, para gerar condições favoráveis à precipitação, como segue:

- a) Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), encontro dos ventos alísios de NE no Hemisfério Norte com os de SE no Hemisfério Sul, gerando intensa convecção, e o deslocamento norte-sul do anticiclone do Atlântico Sul.

- b) Ondas de este que geram condições favoráveis à convecção. Suas presenças são evidenciadas por conglomerados de nuvens que se formam no Atlântico.
- c) Frentes frias oriundas das regiões subantárticas, com influências sobre a parte sul do NEB e eventualmente avançando profundamente na região.
- d) As brisas terrestres e marítimas.
- e) Ciclones na alta troposfera.

O NEB possui uma topografia bastante irregular, o que somado à atuação dos vários sistemas de circulação atmosférica que atuam na região faz com que o mesmo apresente maior variabilidade na precipitação do que qualquer outra região do país. O desvio médio (positivo ou negativo) em relação à normal é superior a 25%. A estação chuvosa no Nordeste é geralmente curta e se concentra nos meses de março, abril e maio. Na faixa do litoral este a média da precipitação anual atinge 2.000 mm, enquanto na região do polígono das secas a média está em torno de 800mm, existindo localidades como Cabaceiras-PB onde a média anual não excede 300mm. Os totais pluviométricos da região Nordeste se distribuem decrescendo do litoral este e norte para o interior, atingem o mínimo no semi-árido e voltam a crescer em direção à Amazônia, como consequência da orientação dos sistemas de perturbações, cuja frequência de penetração diminui para o interior do sertão. A variação temporal e espacial da precipitação no Nordeste constitui-se em fator preponderante para a economia da região. Uma estação chuvosa mais longa, com totais anuais superiores a 1200mm, permite uma agricultura estável no litoral. No outro extremo, a concentração da estação chuvosa em poucos meses e as flutuações do seu início afetam sensivelmente a agricultura e a

pecuária do semi-árido. Em particular, a ocorrência de períodos com sucessivos anos secos produzem efeitos catastróficos no setor produtivo.

Teleconexões: El Niño - Oscilações do Sul

O fenômeno El Niño (ENOS) - definido como o aquecimento da água do mar do Oceano Pacífico na faixa da região equatorial - tem como consequência a diminuição da precipitação em algumas regiões tropicais, dentre as quais o Nordeste do Brasil. Essa relação é confirmada por observações e por modelos numéricos de circulação geral da atmosfera (Aragão, 1986). O fenômeno Oscilação do Sul (OS) - que pode ser interpretado como a resposta da atmosfera ao fenômeno El Niño - é definida por meios de índices, dentre os quais aquele da diferença normalizada de pressão atmosférica ao nível médio do mar entre Tahiti ($18^{\circ}\text{S}, 150^{\circ}\text{W}$) e Darwin ($12^{\circ}\text{S}, 130^{\circ}\text{E}$). Os dois fenômenos são conhecidos como El Niño/Oscilação do Sul (ENOS) na literatura atual.

A fase positiva da Oscilação do Sul ocorre quando o sistema de baixa pressão na Indonésia e o de alta pressão no Pacífico Central se intensificam. Como consequência, os ventos alísios se fortalecem com o aumento do gradiente horizontal de pressão. Com isso, aumenta a ressurgência das águas frias na faixa equatorial desde a costa do Equador e Peru até o Pacífico Central. Nessa fase positiva da Oscilação do Sul, ocorre o chamado fenômeno anti-El Niño que é o inverso do fenômeno El Niño, ou seja o resfriamento anômalo da água do mar do Oceano Pacífico na faixa da região equatorial.

Na fase negativa da Oscilação do Sul, os sistemas de alta pressão no Pacífico Central e de baixas pressões na Indonésia, se enfraquecem provocando uma acentuada diminuição no gradiente horizontal de pressão seguida de uma diminuição na intensidade

dos ventos alísios. Como os ventos alísios se encontram mais fracos do que o normal, a resurgência das águas frias diminui, causando um aquecimento anômalo das águas do Oceano Pacífico desde a costa do Equador/Peru até o Pacífico Central ou até próximo da Indonésia, dependendo da intensidade do fenômeno.

O fenômeno ENOS provoca uma mudança na circulação de Walker, a circulação térmica da atmosfera no sentido este-oeste sobre o Pacífico na faixa da região equatorial. Nos anos de anti-El Niño, ocorre convecção acentuada sobre a Amazônia e Nordeste do Brasil, reforçando assim os movimentos ascendentes convectivos que transportam a umidade para os altos níveis da atmosfera, formando mais nuvens e causando precipitação acima do normal. Já nos anos El Niño, o aquecimento anômalo das águas do mar no Oceano Pacífico aumenta a evaporação e acentua os movimentos convectivos sobre essa região, enquanto que sobre a Amazônia e Nordeste do Brasil o movimento ascendente normal é diminuído, acarretando uma diminuição considerável nos índices pluviométricos.

A variabilidade interanual da precipitação no Nordeste do Brasil é devido ao fenômeno ENOS e, também, a fenômenos oceânicos e atmosféricos que ocorrem no Oceano Atlântico, dentre outros. Assim, pode-se analisar no presente trabalho a relação entre ENOS (através do índice de Oscilação do Sul) e a precipitação no Nordeste.

O presente trabalho propõe uma contribuição à análise estatística da precipitação no NEB, com os objetivos seguintes:

geral

Separar os componentes temporais sistemáticos ("determinísticos") das flutuações complexas ("aleatórias") na precipitação do

Nordeste, com base em séries temporais de precipitação anual.

específicos

- (i) Analisar a significância estatística dos componentes cíclicos da precipitação.
- (ii) Regionalizar a distribuição de tais componentes cíclicos.
- (iii) Descrever o comportamento estatístico dos "ruídos" (desvios das séries com relação ao componente determinístico).
- (iv) Analisar a correlação entre ciclos e "ruídos" com fenômenos de larga escala como ENOS, tentando determinar regiões mais relacionadas com eles.

2 - REVISÃO BIBLIOGRAFICA

A pluviosidade no NEB tem sido intensamente estudada durante décadas por vários autores, na tentativa de encontrar formas de minimizar os efeitos da estiagem na região.

STRANG (1972) estudou as normais de chuva do Nordeste, com base em 56 estações da área de responsabilidade da SUDENE e mais 27 postos numa faixa adjacente. Verificou que seria possível trabalhar com um período climatológico padrão de 3 décadas (1931 a 1960). Foi constatado que atuam na região do Nordeste três sistemas pluviais, penetrando em direções diferentes e ocorrendo em épocas distintas do ciclo anual. Os meses centrais de cada sistema são: dezembro, março e maio.

HASTENRATH (1980) constatou que os anos de seca no Nordeste do Brasil são caracterizados por uma expansão da alta do Atlântico Sul na direção do equador e por uma retração da alta do Atlântico Norte na direção do pólo, com uma posição anômala do cavado equatorial de baixa pressão e da banda de convergência (deslocada para o norte).

MOURA & SHUKLA (1981) mostraram que as anomalias de temperaturas da superfície do mar (tsm) positivas no Atlântico Norte tropical e anomalias de TSM negativas no Atlântico Sul tropical, geralmente, são acompanhadas de anos de secas no Nordeste. Enquanto no caso de anomalias de temperaturas da superfície do mar negativas ou aproximadamente nulas no Atlântico Norte Tropical e anomalias de temperaturas da superfície do mar positivas no Atlântico Sul Tropical, geralmente, ocorrem antes dos anos de chuvas abundantes no NEB.

A análise de regularidades no regime pluviométrico do NEB, eventualmente ligados a fenômenos de larga escala, tem gerado diversos trabalhos que discutem a existência de ciclos.

A série temporal de precipitação de Fortaleza, iniciada em 1849, é particularmente atraente para uma análise de ciclos. SERRA (1956) sugere a existência de um ciclo de 13 anos, associado à ocorrência de grandes secas no NEB. MARKHAN (1974) estudou o período 1850-1970 através da análise de autocorrelação em intervalos de 40 e de 80 anos, concluindo que picos de 13 e 26 anos são significativos a nível de 1%. XAVIER & XAVIER (1982) reavaliaram os resultados de STRANG, a respeito da caracterização de tipos de regimes pluviométricos no Nordeste. Utilizaram-se de valores médios de pluviometria mensal e anual, para 928 postos selecionados na região, e classificaram os tipos ou padrões de precipitação mediante cartogramas e pluviogramas individuais. Mostraram como a influência dos sistemas de perturbações atmosféricas que presidem a formação de chuvas concentradas em torno do mês de março, decresce ao se deslocar de norte para o sul.

GIRARDI & TEIXEIRA (1978) utilizaram interpolações lineares de ciclos senoidais de 13 e 26 anos para prever a ocorrência de estiagens no período de 1979-1985. Foram atribuídas amplitudes de 1400 e 2000mm respectivamente, ajustada à fase dos ciclos com base na ocorrência de secas no passado. A confiabilidade do método foi criticado por diversos pesquisadores (XAVIER & XAVIER (1981), NOBRE et alii (1982)).

Por outro lado, estudos baseados em dados de Fortaleza poderiam não ser aplicáveis para o NEB em geral. O próprio trabalho de GIRARDI & TEIXEIRA (1978) mostra que a correlação entre Fortaleza e Quixeramobim não excede 0,79. Entretanto, KANE (1985) analisou os totais anuais para numerosas estações do NEB entre 1979 e 1983, encontrando que 36 delas apresentam valores inferiores à média (10%, 15%, 17%, 18% e 40%) no período mencionado.

XAVIER & XAVIER (1981) apresentaram uma análise harmônica para as séries de precipitação de Fortaleza, Mossoró e

Quixeramobim. Encontraram ciclos de 13 e 26 anos que, segundo os mesmos, possivelmente não sejam periodicidades mas de fato uma quase periodicidade.

KANTOR (1982) usou a análise espectral de entropia máxima para a série de precipitação de Fortaleza. De forma semelhante a NOBRE et alii (1982), concluiu que o nível de ruído é muito grande para fazer previsões confiáveis. Devido a aleatoriedade dos valores de ruídos sugere que estes devam ser tratados com modelos probabilísticos.

NOBRE et alii (1982) trabalharam com a série de precipitação de Fortaleza (1849 a 1979) e determinaram periodicidades de 13 e 26 anos, comprovaram suas significâncias estatísticas através do teste de Fisher. Finalmente, concluíram que as periodicidades permitem afirmar se o nível de precipitação será superior ou inferior ao normal, mas seu poder de previsão é em torno de 24%.

MONTE (1986) analisou as séries de precipitação de 96 estações do NEB. Detectou com frequência, períodos de 2; 2.5; 4,5; 13 e 26 anos distribuídos no Nordeste brasileiro. Concluiu que, ao nível de significância de 0,05, o número de picos significantes não se apresenta suficientemente grande para serem usados em previsões e que possivelmente existe um ciclo médio aproximado de 13 anos nas chuvas do Nordeste, associado a este mais de um sistema físico global atuando nas chuvas do Nordeste brasileiro.

KANE & SOUZA (1988), com base em várias séries de precipitação anual média para o Nordeste do Brasil e para locais como Rio de Janeiro, S. Paulo, P. Alegre e uma média de 8 estações do Centro-Oeste da Argentina, usando a técnica de análise espectral de entropia máxima e análise de regressão múltipla, encontraram periodicidades de 2-3; 5-6; 12-13 e 26-28 anos. Constataram, ainda, que uma associação de El Niño com secas no Nordeste do Brasil se mostra muito pobre, havendo, portanto, uma leve preferência para El Niño ser associado com enchentes no

sul do Brasil, contrariando os resultados obtidos por, dentre outros, WALKER (1928), CAVIEDES (1973), HASTENRATH & HELLER (1977), COVEY & HASTENRATH (1978), KAUSKY et alii (1984), HASTENRATH et alii (1984), RAO et alii (1986) e ARAGAO (1986), segundo citação de KANE & SOUZA (1988).

No trabalho a seguir, é utilizado um modelo aditivo de série temporal para analisar aspectos dos problemas enumerados abaixo.

- 1 - A maioria dos trabalhos anteriores se baseiam numa área reduzida, limitada a Fortaleza e vizinhanças. É conveniente ampliar a análise para o NEB.
- 2 - O resíduo de série temporal, descontados tais ciclos, constituiria um "ruído branco" (NOBRE et alii, 1982). Todavia, distribuições gaussianas não são as únicas associadas a tal ruído. Flutuações aleatórias, se convenientemente ajustadas, poderiam contribuir para previsões estatísticas.
- 3 - Pelo menos para alguns locais, os ciclos de 13 e 26 anos poderiam ser aceitos como significativos. A crítica corrente se baseia no fato de não explicarem senão uma fração relativamente reduzida da variância da série. No entanto, se esses (e outros) ciclos fossem observados em áreas significativas no NEB, seriam indicativos da presença de fenômenos atmosféricos ligados às respectivas frequências.
- 4 - Em anos recentes, o fenômeno ENOS vem sendo associado à indução de estiagem e chuvas intensas no NEB. Embora resultados de KANE & SOUZA (1988) possam ser contraditórios com aquela proposta, parece razoável uma reanálise da correlação do ENOS com a distribuição regional de ciclos e flutuações aparentemente aleatórias na região.

3 - MATERIAIS E METODOS

3.1 - Dados Utilizados

Na região Nordeste do Brasil existem mais de 2.000 estações e postos pluviométricos. Esses dados estão disponíveis na Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste (SUDENE). No presente trabalho foram usados dados pluviométricos mensais do Nordeste do Brasil, arquivados em fitas magnéticas no Departamento de Ciências Atmosféricas (DCA), no período de 1911 a 1972 na maioria das estações. Estas séries foram completadas até o ano de 1985 com os dados da SUDENE (1990). Dados dos Índices de Oscilação do Sul, para o período de 1935 a 1986, foram obtidos através de uma publicação do Climate Analysis Center.

Os postos pluviométricos selecionados estão enumerados na tabela 3.1 e a distribuição espacial dos mesmos é apresentada na figura 3.1.

3.2 - Estações Representativas

No presente trabalho foram selecionadas 89 estações, observando os seguintes critérios:

- (i) escolher as séries mais antigas e completas.
- (ii) procurar uma distribuição homogênea sobre o Nordeste.

Os registros de chuvas mensais provenientes de pluviômetros instalados e administrados tanto pela SUDENE como pelo DNOCS, possuem estações com 74 anos de registros em média, com exceção da estação de Fortaleza que foi usada com 130 anos de dados mensais de chuva.

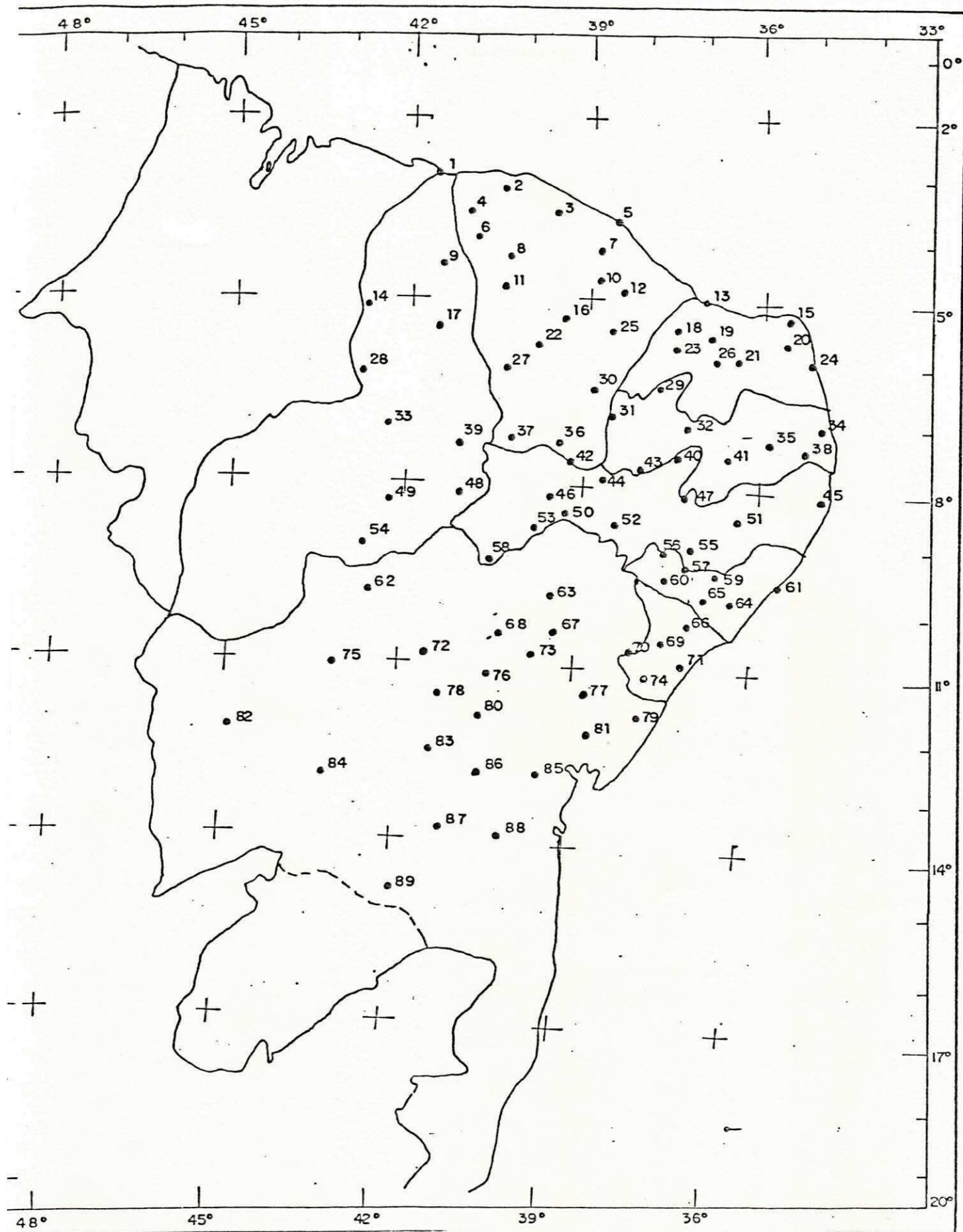


Fig. 3.1 - Distribuição Espacial dos Postos Escolhidos sobre o Nordeste do Brasil

Tabela 3.1 - Postos Pluviométricos e suas coordenadas geográficas

Nº	Nome Posto	Latitude (graus,mim)	Longitude (graus,mim)	Altitude (m)
01	- Luiz Correia	02 53	41 40	10
02	- Tucundubá	03 10	40 26	800
03	- Itapipoca	03 30	39 35	98
04	- Viçosa do Ceará	03 34	41 05	685
05	- Fortaleza	03 42	38 30	26
06	- S. Benedito	04 03	40 52	903
07	- Acarapé	04 13	38 43	76
08	- Sta. Quitéria	04 20	40 10	190
09	- Pedro II	04 25	41 28	580
10	- Caio Prado	04 39	38 58	111
11	- Tamboril	04 50	40 20	360
12	- Russas	04 50	38 10	40
13	- Areia Branca	04 57	37 08	5
14	- Teresina	05 05	41 34	250
15	- Touros	05 12	35 28	4
16	- Quixeramobim	05 12	39 18	187
17	- Castelo do Piauí	05 20	41 34	250
18	- Gov. Dix Sept Rosado	05 28	37 31	36
19	- Acu	05 35	36 54	68
20	- Taipu	05 37	35 36	50
21	- Lages	05 42	36 15	198
22	- Mombaça	05 45	39 38	223
23	- Caracás	05 47	37 34	146
24	- Natal	05 48	35 13	8
25	- Jaguaribe	05 53	38 37	120
26	- Santana do Matos	05 58	36 39	140
27	- Tauá	06 01	40 25	356
28	- Amarante	06 15	42 51	72
29	- Catolé do Rocha	06 21	37 45	250
30	- Icó	06 25	38 51	160
31	- Cajazeiras	06 53	38 34	291
32	- Patos	07 01	37 17	250
33	- Oeiras	07 01	42 08	170
34	- Sta. Rita	07 08	34 59	16
35	- Campina Grande	07 13	35 52	508
36	- Crato	07 13	39 23	421
37	- Araripe	07 13	40 08	605
38	- Itabaiana	07 20	35 20	45
39	- Jaicós	07 22	41 08	255
40	- S. José do Egito	07 28	31 17	575
41	- Cabaceiras	07 30	36 17	390
42	- Jardim	07 35	39 17	630
43	- Princesa Isabel	07 44	38 01	660
44	- S. José do Belmonte	07 52	38 47	460
45	- Recife	08 02	34 53	4

Continua

Continuação

Tabela 3.1 - Postos pluviométricos e suas coordenadas geográficas

Nº	Nome Posto	Latitude (graus,mim)	Longitude (graus,mim)	Altitude (m)
46	- Parnamirim	08 05	39 34	379
47	- Sertania	08 05	37 16	605
48	- Paulistana	08 08	41 09	350
49	- S. João do Piauí	08 22	42 15	244
50	- Cabrobó	08 30	39 19	350
51	- S. Bento do Una	08 31	36 22	645
52	- Floresta	08 36	38 35	317
53	- Sta. Maria da Boa Vista	08 48	39 50	452
54	- S. Raimundo Nonato	09 01	42 41	386
55	- Aguas Belas	09 07	37 07	376
56	- Mata Grande	09 08	37 44	633
57	- Santana do Ipanema	09 22	37 15	250
58	- Petrolina	09 23	40 30	376
59	- Palmeira dos Índios	09 24	36 39	342
60	- Piranhas	09 37	37 46	110
61	- Maceió	09 39	35 43	30
62	- Remanso	09 41	42 04	378
63	- Uauá	09 50	39 29	439
64	- Junqueiro	09 56	36 29	120
65	- Traipu	09 58	36 59	40
66	- N. Senhora da Glória	10 13	37 25	290
67	- Monte Santo	10 26	39 20	489
68	- Senhor do Bonfim	10 27	40 11	544
69	- Mocambo	10 33	37 38	204
70	- Simão Dias	10 44	37 48	283
71	- Aracaju	10 54	37 03	3
72	- Jaguaraci	10 54	41 35	450
73	- Queimadas	10 58	39 38	273
74	- Bonfim	11 03	37 51	230
75	- Barra	11 05	43 09	410
76	- Jacobina	11 10	40 31	460
77	- Araci	11 20	38 57	212
78	- Morro do Chapéu	11 32	41 08	1012
79	- Esplanada	11 47	37 57	181
80	- Mundo Novo	11 51	40 28	480
81	- Irará	12 02	38 45	283
82	- Barreiras	12 09	44 59	435
83	- Lençoes	12 34	41 23	394
84	- Paratinga	12 42	43 10	420
85	- Castro Alves	12 46	39 25	265
86	- João Amaro	12 47	40 21	249
87	- Ituaçu	13 49	41 18	527
88	- Jequié	13 52	40 05	199
89	- Condeubá	14 52	41 59	695

3.3 - Ano Hidrológico

Foram adotados como dados de precipitação anual para um local, a soma dos valores mensais correspondente ao ano hidrológico (outubro a setembro). O ano hidrológico de 1970, por exemplo, será considerado como a precipitação acumulada entre outubro de 1970 a setembro de 1971. Para tanto, é necessário contar com totais mensais das estações em estudo. Dados faltosos foram preenchidos seguindo o critério de preenchimento de lacunas com as médias aritméticas do mês faltoso para o período total de 130 anos dados para Fortaleza e 74 anos, em média, para as demais estações.

3.4 - Análise de Séries Temporais

O presente trabalho procurou definir dois aspectos das séries temporais de precipitação anual no NEB: 1) comportamento sistemático e sua distribuição regional; 2) características de flutuações pretensamente aleatórias nessas séries. Em geral, as séries disponíveis não excedem 75 anos (exceto Fortaleza, com 130 anos); portanto, as amostras são relativamente reduzidas. Por outro lado, existem diversos critérios de análise. Assim, considerou-se útil descrever nesta seção os critérios particulares escolhidos.

3.4.1 - Modelo Aditivo

Uma série temporal $\{Z\}$ é constituída por uma sequência de N valores $Z(t)$, correspondente a medições em instantes que podem ser enumerados como $t = 1, 2, 3, \dots, N$. Os valores $Z(t)$ corresponderão no âmbito deste trabalho às somas anuais, e N será

o número de anos.

A série $\{Z\}$ pode apresentar uma tendência secular $T_s(t)$, com flutuações de curto e longo prazo em torno dela. Neste trabalho, $T_s(t)$ foi considerada como incluindo só flutuações com período associado maior que a série de dados. Diversos modelos podem ser adotados para tentar separar componentes característicos do comportamento de $\{Z\}$ (MORETTIN & TOLOI, 1986). Neste trabalho, foi adotado o modelo aditivo:

$$Z(t) = T_s(t) + H(t) + R(t) \quad (3.1)$$

onde, a priori, supõe-se que $\{Z\}$ é a resultante de três componentes:

- $T_s(t)$ é uma tendência secular (ou de longo prazo, com relação à extensão da série temporal).
- $H(t)$ está composta pela soma de funções senoidais. Em particular, é a contribuição dos harmônicos mais representativos (estatisticamente significativos).
- $R(t)$ são desvios ou "ruídos", associados ao modelo, com média temporal nula.

A componente $T_s(t)$ não é necessariamente linear. Pode apresentar oscilações com períodos comparáveis ou maiores do que N , ou um comportamento monotônico. No caso de oscilações de longa duração, elas são denominadas como de baixa frequência.

Por outro lado, $H(t)$ é uma função com características cíclicas. Ela pode ser analisada a partir da análise harmônica tradicional. Neste caso, seu período característico deverá ser o

do maior harmônico (período $T = N$). Observe-se que, num sentido mais geral, ela pode ser construída com base em senóides cujos períodos não necessariamente são harmônicos de N .

3.4.2 - Teste de Tendência

Existe a possibilidade de que não exista tendência secular. Nesse caso, a média de 30 anos $\langle X \rangle$ é considerada representativa de um valor climatológico estável. Ao se comparar duas médias $\langle X \rangle_{30}$ e $\langle X \rangle_{30}^t$ correspondentes a intervalos bastantes distantes no tempo, sua diferença deveria ser meramente produto de flutuações aleatórias. Esta última situação pode ser adotada com "hipótese nula" H_0 , usando o teste de Student para julgar se houve mudança climática. Se a hipótese H_0 for rejeitada, adotar-se-á como função $T_s(t)$ uma função linear simples, do tipo $T_s(t) = A_s + B_s \cdot t$, ajustada pelo método dos mínimos quadrados.

3.4.3 - Análise Harmônica Tradicional

A análise harmônica é comumente utilizada com o objetivo de detectar flutuações periódicas de curto prazo, baseando-se no princípio matemático de que uma curva pode ser representada por uma série de funções trigonométricas

$$Z = Z_0 + \sum_{k=1}^{N/2} C_k \cos(\omega_0 t + \Phi_k) \quad (3.2)$$

onde Z_0 é a média aritmética dos dados, C_k é a amplitude dos harmônicos, ϕ_k é o ângulo de fase do harmônico correspondente e N é o número de observações. Observa-se que, por construção, o termo Z_0 da eq. (3.2) já está incluído no termo de tendência $Ts(t)$ da eq. (3.1); no que segue será considerado nulo.

Em princípio, aqueles harmônicos com maior contribuição à variância da série temporal permitem identificar períodos típicos das flutuações observadas.

3.4.4 - Teste de Significância para Coeficientes de Correlação

Frequentemente as flutuações de uma série temporal consistem de oscilações irregulares superpostas, as quais apresentam períodos diferentes e uma forte componente aleatória. Ao ser construído um correlograma, baseado nos coeficientes $\hat{r}_k$ de autocorrelação da série, observa-se um comportamento flutuante em função do "lag" k , por vezes sugerindo a existência de ciclos ($\hat{r}_k$ apresenta picos, separados por incrementos constantes de k). É conveniente definir um critério para aceitar tais picos como significativos. Definem-se o coeficiente de correlação serial e o coeficiente de autocorrelação, dados por:

$$r_{xy} = \frac{\frac{1}{N} \sum (y_i - \bar{y})(x_i - \bar{x})}{\sigma_x \sigma_y} \quad (3.3)$$

$$\hat{r}_k = \frac{\sum_t a_t a_{t-k}}{\sum_t a_t^2}, \quad a_t = Z_t - \langle Z \rangle. \quad (3.4)$$

Em particular, a análise de autocorrelação é útil quando aplicada aos resíduos resultantes da subtração da série $\{Z\}$ daquelas componentes consideradas determinísticas.

Se a série temporal de resíduos constituir um ruído branco, os estimadores das autocorrelações $\hat{r}$ não deverão diferir significativamente de zero ($\hat{r} \approx 0$). Em particular, os estimadores das autocorrelações deverão ser normalmente distribuídos com média zero e variância $1/N$ (MORETTIN & TOLOI 1986). Assumindo a hipótese nula de que a série dos resíduos é um ruído branco, os estimadores das autocorrelações não deverão diferir significativamente de zero exceto para lag zero, ou seja, a hipótese nula será aceita se o valor absoluto das autocorrelações estimadas for menor do que $1,96/\sqrt{N}$, para um nível de significância de 5%, onde N representa o número de observações. Como as séries de chuva no NEB possuem em média 74 anos de dados, o valor crítico é de 0,23 enquanto que para Fortaleza com 130 anos de dados é de 0,172. Deve-se esperar que em média 5% das correlações estejam fora do intervalo de confiança. Portanto, para Fortaleza podem ocorrer no máximo 7 autocorrelações acima de 0,172 e para as estações restantes, que possuem em média 74 valores pontuais, podem ocorrer no máximo 4 autocorrelações acima de 0,23. Observa-se que este tipo de análise pode ser aplicada à série $\{Z(t) - T_s(t)\}$, para julgar se um ciclo é aparente ou significativo do ponto de vista estatístico.

3.4.5 - Harmônicos Mais Representativos

A função $H(t)$ representa a contribuição de flutuações climáticas "determinísticas", no sentido de apresentarem comportamento oscilatório característico. Estas flutuações podem não ser propriamente senoidais, mas uma análise harmônica sobre o período total de dados permite estimar componentes senoidais cuja

soma total é uma aproximação cíclica ótima (no sentido dos mínimos quadrados) à série de flutuações.

Os coeficientes de Fourier são definidos como segue:

$$a_0 = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N Z(t) \quad (3.5)$$

$$a_j = \frac{2}{N} \sum_{t=0}^{N-1} Z(t) \cos(\omega_j t) \quad (3.6)$$

$$b_j = \frac{2}{N} \sum_{t=0}^{N-1} Z(t) \sin(\omega_j t) \quad (3.7)$$

onde $\omega_j = \frac{2\pi j}{N}$, $j = 1, 2, 3, \dots, N/2$

Assim a função cíclica $Z(t)$ será representada por:

$$Z(t) = a_0 + \sum_{j=1}^{N/2} (a_j \cos(\omega_j t) + b_j \sin(\omega_j t)) \quad (3.8)$$

As amplitudes das oscilações são definidas da seguinte forma:

$$C_j = (a_j^2 + b_j^2)^{1/2} \quad (3.9)$$

O teorema de Parseval (JENKINS & WATTS, 1968) estabelece que:

$$\frac{\sum (X - \bar{X})^2}{N} = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^{N/2} C_j^2 \quad (3.10)$$

que corresponde a uma formulação da variância (s^2) da série temporal.

Portanto, a contribuição à variância dada pela j -ésima harmônica é dada por:

$$CV_j(\%) = \frac{C_j^2}{2s^2} \times 100\% \quad (3.11)$$

onde C_j^2 corresponde à amplitude da harmônica e s^2 à vari -

ância da série temporal.

Os picos apresentados no periodograma podem não ser representativos de flutuações periódicas, uma vez que podem estar estimando uma componente harmônica de flutuações aleatórias. Portanto, é necessário testar a sua significância estatística.

O teste de Fisher permite separar harmônicos significativos. Suponha-se que um periodograma apresenta um conjunto de n "picos", aparentemente significativos. Para eles definem-se as estatísticas g_j , dadas por:

$$g_j = \frac{C_{j, \max}}{2s^2} \quad (3.12)$$

onde s^2 é a variância da série, e $C_j^2/2$ é a contribuição do j -ésimo pico à variância. Então, infere-se sobre $(g_1, \dots, g_m)$

$$H_0: C_1 = C_2 = \dots = C_m \quad (3.13)$$

Esta hipótese corresponde ao fato seguinte: se a série temporal $H(t)$ é devida exclusivamente a sinais aleatórios, a função de autocorrelação deve ser uma função delta: $R(k = 0) = 1$; $R(k > 0) = 0$; $k = \text{"lag"}$. O espectro de amplitudes desta função está constituído por valores idênticos para todos os harmônicos. Assim, a contribuição de cada harmônico à variância deve ser S^2/m ($m = \text{número máximo de harmônicos, } N/2$). Suposto que cada harmônico é construído com base em sinais puramente aleatórios (não correlacionados), e que o número de dados é razoavelmente

grande (no caso $N = 74$), a distribuição de probabilidades esperadas para uma contribuição $C_j^2/2$ isolada e independentes das outras é uma função χ_n^2 com dois graus de liberdade.

O teste de Fisher é um teste condicional, referido à situação de que uma contribuição fracional (g_1) à variância (s^2) seja maior do que as restantes. A probabilidade P de que g_1 exceda um valor g (adotado como crítico) é dado, segundo YEVJEVICH (1971) por:

$$P = m(1-g)^{m-1} \frac{m(m-1)}{2} (1-2g)^{m-1} + \dots + (-1)^{k-1} \frac{m!}{k!(m-k)!} (1-kg)^{m-1} \quad (3.14)$$

onde k é o maior inteiro menor que $1/g$. Usualmente, o primeiro termo do lado direito da equação (3.14) oferece uma aproximação suficiente para o valor de g crítico. Assim:

$$g = 1 - \left[\frac{P}{m} \right]^{\frac{1}{m-1}} \quad (3.15)$$

onde P representa o nível de significância desejado e m é o número de harmônicos ($N/2$).

Para testar se dois ou mais harmônicos são simultaneamente significantes, então usa-se a seguinte expressão: (Fisher, citado por YEVJEVICH, 1971):

$$P = \sum_{j=1}^k (-1)^{j-1} \frac{m!(1-jg)^{m-1}}{(m-j)!(j-i)!(i-1)!j!} \quad (3.16)$$

Onde os k harmônicos foram ordenados do maior para o menor ($g_1, g_2, \dots, g_k$), e está sendo testado a significância dos primeiros i harmônicos. Para $i = 1$ a equação (3.16) é idêntica a equação (3.14). Por outro lado, para $i = 2$ e $i = 3$, o primeiro termo do lado direito da equação (3.16) permanece oferecendo uma razoável aproximação para o valor crítico (g_i^*), respectivamente, dados por:

$$g_2^* = \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \left[\frac{2P}{m(m-1)} \right]^{\frac{1}{m-1}} \quad (3.17)$$

$$g_3^* = \frac{1}{3} - \frac{1}{3} \left[\frac{12P}{m(m-1)(m-2)} \right]^{\frac{1}{m-1}} \quad (3.18)$$

O teste rejeita a hipótese nula se g_1 for maior que g_1^* .

É importante observar que o teste de Fisher e suas variantes se baseiam na disponibilidade de uma única série de dados, sem qualquer outra informação adicional. Todavia, o local considerado pode estar rodeado por outros que também apresentam os mesmos picos. Nesse caso, adotar os valores usuais $P = 0,01$ ou $P = 0,05$ como nível de significância, pode conduzir a rejeitar sinais relativamente fracos com relação ao ruído de fundo, mas certamente presentes na região.

3.4.6 - Ajuste de Senóides Não Harmônicas

A análise harmônica tradicional constrói um espectro baseado em harmônicos do período de N observações, ou seja, com períodos $T_k = N/k$ ($k = 1, 2, \dots, N/2$). O teste de Fisher é aplicável a este tipo de espectro, baseando-se na ortogonalidade das funções harmônicas (isto é, a correlação entre duas delas é nula). Todavia, se uma série temporal não é muito extensa podem existir sinais com períodos $T' < T$ que se situam entre dois harmônicos sucessivos com períodos T_k, T_{k+1} bastante distantes entre si. Por exemplo, uma senóides com $T' = 50$ anos presente numa série com $T = 74$ anos pode apresentar vários problemas, dentre eles: a) sua média não é nula em $(0, T)$, e será subtraída de $H(t)$ pelo termo tendência $T_s(t)$; b) poderá não ser manifestada pelos harmônicos $T_1 = 74$ nem $T_2 = 37$ da série; c) sua presença na série deverá ser assumida construída pelos harmônicos T_1 até T_{37} , deformando-se a verdadeira distribuição espectral.

Com base nestas considerações, pode-se esperar que uma análise complementar deva incluir uma "varredura contínua de frequências", ajustando-se senóides com períodos T arbitrários, na procura de sinais senoidais (ou similares) que não são

claramente detectados pela análise harmônica tradicional.

KANTOR (1982) e KANE & SOUZA (1988) utilizaram métodos de análise avançada ("máxima entropia") para ajustar senóides e detectar picos em frequências não harmônicas. Neste trabalho utilizar-se-á o método descrito por BLOOMFIELD (1976), consistente num ajuste simples por mínimos quadrados. Dada uma função $X(t)$ e uma senóide:

$$G(t) = M + A \cos(f\omega_0 t) + B \sin(f\omega_0 t) + \varepsilon \quad (3.19)$$

onde $\omega_0 = 2\pi/N$ é a frequência fundamental da série e $f > 0$ um fator arbitrário, o critério de mínimos quadrados fornece os estimadores $\hat{M}$, $\hat{A}$ e $\hat{B}$ tais que obedecem à relação (CEBALLOS, comunicação pessoal):

$$\begin{bmatrix} 1 & \langle \cos \omega t \rangle & \langle \sin \omega t \rangle \\ \langle \cos \omega t \rangle & \langle \cos^2 \omega t \rangle & \langle \cos \omega t \sin \omega t \rangle \\ \langle \sin \omega t \rangle & \langle \cos \omega t \sin \omega t \rangle & \langle \sin^2 \omega t \rangle \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{M} \\ \hat{A} \\ \hat{B} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G \\ \langle G \cos f \omega t \rangle \\ \langle G \sin f \omega t \rangle \end{bmatrix}$$

Com $\omega = f\omega_0$, sendo que para $N > 10$ os coeficientes da

matriz podem ser expressos por:

$$\begin{bmatrix} 1 & F(2\pi f) & \pi f F^2(\pi f) \\ F(2\pi f) & \frac{1}{2} [1 + F(2\pi f) \cos \pi f] & \pi F^2(2\pi f) \\ \pi f F^2(\pi f) & \pi f F^2(2\pi f) & \frac{1}{2} [1 - F(2\pi f) \cos \pi f] \end{bmatrix}$$

Para f inteiro, os estimadores $\hat{M}$, $\hat{A}$ e $\hat{B}$ se reduzem àqueles previstos pela análise harmônica tradicional. Variando f continuamente, comportamentos senoidais podem ser evidenciados por um periodograma.

Deve ser observado que um sinal senoidal não harmônico, analisado por este método, se "espalha" no periodograma em torno da frequência real $\omega = f\omega_0$, apresentando inclusive lóbulos laterais ("sidelobes") que configuram pseudo-sinais. A informação fornecida pode ser ainda menos clara se vários sinais senoidais estão presentes na série $X(t)$, desde que podem mutuamente interferir no correlograma. Este efeito é reduzido pela utilização de "janelas" adequadas, modificando a função $X(t)$ antes de aplicar a análise. Neste trabalho utiliza-se um método simples ("tapering"), pelo qual a função $X(t)$ se transforma em outra $Y(t)$ mediante um fator multiplicativo $J(t)$ (BLOOMFIELD, 1976), sendo:

$$J(t) = \begin{cases} \frac{1}{2} \left[1 - \cos \left\{ \frac{\pi(t - 1/2)}{m} \right\} \right] & t = 0 \dots m-1, \\ 1 & t = m, \dots, n-m-1, \\ \frac{1}{2} \left[1 - \cos \left\{ \frac{\pi(n-t+1/2)}{m} \right\} \right] & t = n-m, \dots, n-1. \end{cases}$$

A componente $H(t)$ pode ser construída pela soma de senóides harmônicas e não harmônicas, escolhidas judiciosamente.

3.4.7 - Testes de Distribuições: Normal, Triangular e Gama

Dada uma série temporal de precipitação $P(t)$ observada num intervalo de tempo $(0, T)$, tem-se o modelo descrito pela equação (3.1). Onde a componente determinística $\langle P \rangle + H(t)$ representa o valor da precipitação num determinado instante t . A componente aleatória $R(t)$ usualmente é assumida normalmente distribuída, isto é $R(t) = N(0, \sigma^2)$, onde σ^2 é a variância dos resíduos.

Para testar o grau de ajustamento entre as distribuições empíricas (observadas) e diversos modelos teóricos de distribuição foi utilizado o teste χ^2 (qui quadrado).

3.4.8 - Teste Qui Quadrado

Considere-se uma série temporal $R(t)$ dos resíduos aleatórios, cujos valores seguem uma distribuição de probabilidades $\pi(R)$. Uma amostra de tamanho N pode ser organizada em K classes, cada uma delas com probabilidade P_k , e frequência amostral X_k , não necessariamente igual a frequência esperada Np_k . A estatística χ_n^2 é definida como:

$$\chi_n^2 = \sum_{k=1}^K (X_k - Np_k)^2 / Np_k \quad (3.20)$$

onde $n = K - 1 - M$ é o número de graus de liberdade da variável aleatória χ_n^2 , e M o número de parâmetros requerido para definir a distribuição $\Pi(R)$. A variável χ_n^2 tem uma distribuição bem definida e que pode ser utilizada para julgar a discrepância entre o conjunto de frequências amostrais X_k e suas esperanças matemáticas Np_k . Uma condição básica requerida é que as variáveis aleatórias $\tilde{Y}_k = X_k - Np_k$ se distribuam segundo normais $N[0, (Np_k)^{1/2}]$. Para que esta condição seja cumprida, é recomendável que cada intervalo de classe apresente uma frequência $X_k > 5$ (CRAMER, 1958).

Definido um modelo teórico $\Pi(R)$ para ajustar a distribuição amostral $P(R)$ de frequências, a expressão (3.20) permite estimar a precisão do ajuste. Obviamente, quanto menor o valor de χ_n^2 , mais apropriado será o modelo. Seja α um nível de significância proposto, de forma que

$$\alpha = P\{\chi_n^2 \geq x\} \quad (3.21)$$

Ajustes satisfatórios associados ao nível α deverão fornecer valores ("valor crítico"). Em outros termos: uma hipótese nula (H_0 : o modelo $\Pi(R)$ coincide com $P(R)$), será aceita se probabilidade de χ_n^2 exceder x for inferior ou igual a $1 - \alpha$). Escolhidos níveis de significância pequenos, valores grandes de χ_n^2 (correspondentes a discrepâncias consideráveis entre P e Π) poderão ser aceitos. Reciprocamente, se α for maior a exigência do ajuste aceitável também aumenta, desde que valores menores de χ_n^2 deverão ser aceitos como confiáveis. Embora pareça contraditório, definir um nível de significância maior permite delimitar como aceitáveis valores de χ_n^2 menores (portanto, aumenta o grau de exigência para considerar aceitável o ajuste). Tabelas apropriadas para relacionar níveis de significância (α) com valores críticos (x) podem ser consultadas em SPIEGEL, 1977

4 - DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

As componentes de alta e baixa frequências das séries de chuva estabelecem condições de não-aleatoriedade nas observações pluviométricas e definem variações temporais denominadas de tendências. Uma tendência pode ser secular (se de longo prazo, com relação à série disponível) ou cíclica (se exibir um comportamento periódico). Nas séries temporais de precipitação, determinados fatores climáticos produzem flutuações de larga escala (tendência secular) persistindo sobre um longo período de tempo, decorrente da componente de baixa frequência. Outros fatores climáticos provocam flutuações de pequena escala (tendência cíclica), persistindo sobre um pequeno período de tempo e em seguida repetindo-se, decorrente da componente de alta frequência da série.

4.1 - Ciclos

A técnica de análise harmônica, aplicada sobre as 89 séries de precipitação do Nordeste, revelou que apenas 26 apresentam ciclos significativos ao nível de 10%, segundo o teste de Fisher. As séries restantes apresentam ciclos relativamente fracos, conforme mostra a tabela 4.1. Em princípio, aqueles harmônicos com maior contribuição à variância da série temporal permitem identificar períodos típicos das flutuações observadas.

O espectro de Fourier permite escolher três ciclos, seguindo o critério daqueles que apresentam a maior contribuição à variância (tabela 4.1). As estações que possuem ciclos significantes a um nível de 10% segundo o teste de Fisher estão marcadas com asteriscos. O exame detalhado da tabela 4.1 mostra que os ciclos mais frequentes nas séries de chuva do Nordeste têm períodos característicos em torno de 74; 26; 13; 3-4; 2-3 anos.

Tabela 4.1 - Seleção dos ciclos mais fortes. ordenados por ordem de contribuição à variância. Os ciclos significativos a um nível de 10%, segundo o teste de Fisher, estão marcados com asteriscos.

Posto	T ₁	T ₂	T ₃	Posto	T ₁	T ₂	T ₃
01	36,0*	24,0	3,4	46	3,4	2,4	2,8
02	5,5	3,6	3,4	47	12,3	3,4	74,0
03	3,6	12,0	4,5	48	4,2	2,4	3,4
04	3,4	74,0	12,3	49	18,2	2,5	7,2
05	13,0*	26,0*	3,6	50	10,6	3,4	2,6
06	10,4	73,0*	2,3	51	21,3	64,0	2,7
07	12,2	4,3	10,3	52	70,0	3,3	6,3
08	12,2	5,6	2,3	53	3,4	24,6	2,4
09	3,6	5,5	12,0	54	23,7	3,4	4,7
10	3,4*	5,6*	12,0	55	64,0*	32,0*	3,4*
11	12,5	3,4	5,7	56	14,2	3,4	2,6
12	12,5	5,7	74,0	57	24,3*	73,0*	14,6
13	12,3*	3,4*	5,7	58	2,3	3,3	67,0
14	24,0	14,4	18,0	59	2,6	66,0	2,2
15	9,3	75,0*	2,2	60	2,6	2,1	3,4
16	4,2	12,0	2,3	61	36,0*	10,2	2,7
17	5,6	4,5	3,6	62	3,4	5,6	3,2
18	12,3*	5,7	3,5	63	24,7	3,4	2,6
19	12,6*	73,0*	3,3*	64	24,0*	2,7*	3,7
20	74,0*	3,5	10,6	65	72,0	3,0	10,3
21	69,0	34,5	9,7	66	56,0*	2,1	4,3
22	74,0	12,3	2,3	67	24,3	5,6	2,2
23	12,3*	24,7	3,4	68	2,1	2,6	24,7
24	34,0	68,0	4,2	69	67,0*	2,2*	3,3
25	12,8	5,8	3,5	70	2,6	10,4	2,1
26	12,3	3,4	10,6	71	24,3*	14,6*	18,0
27	5,6	12,2	2,3	72	2,1	68,0	3,4
28	36,5*	73,0*	24,3*	73	2,6	2,5	4,9
29	12,3*	10,6*	24,7*	74	72,0	24,0	9,0
30	4,7	13,2	3,3	75	10,2*	24,0*	5,5*
31	3,4	6,2	12,3	76	73,0*	24,3*	2,4
32	24,7	3,4	12,3	77	74,0	24,7	2,6
33	2,4	5,5	18,0	78	2,4	10,6	24,6
34	37,5	12,5	3,7	79	72,0	10,3	2,7
35	12,3	2,6	2,0	80	10,6	37,0	74,0
36	10,3	5,5	2,0	81	9,3	2,2	10,7
37	58,0*	4,5*	5,2	82	11,0*	6,0	66,0
38	73,0	12,0	2,3	83	74,0	24,7	37,0
39	3,3	2,3	24,3	84	74,0	10,6	18,5
40	71,0*	10,1*	35,5	85	3,5	23,3	70,0
41	37,0*	74,0*	2,6	86	74,0	2,4	4,1
42	3,3	10,4	2,3	87	7,5	17,0	3,4
43	2,6	3,4	24,6	88	67,0	9,6	13,4
44	74,0*	3,4*	3,5	89	2,8	10,6	12,3
45	7,0	3,3	2,3				

Por outro lado, apenas 26 estações dentre 89 apresentaram ciclos significativos ao nível mencionado.

A tabela 4.2 expõe a contribuição à variância dos ciclos médios mais frequentes de cada posto pluviométrico e a classificação de acordo com a escolha de três ciclos que possuem uma contribuição máxima à variância. Cada ciclo médio está associado a uma letra, ou seja: A=74; B=26; C=13; D=3-4 e E=2-3 anos. O par de letras indica os ciclos mais fortes, por ordem de contribuição à variância.

A figura 4.1 delimita algumas regiões do NEB em que alguns ciclos são predominantes. 1) No extremo Norte do NEB, numa área que se estende desde o centro-oeste do Ceará passando por toda a região oeste do estado do Rio Grande do Norte e finalmente atingindo o Planalto da Borborema, o ciclo de 13 anos é predominante e atinge contribuições à variância significativas em vários postos pluviométricos desta região. 2) Um ciclo longo de aproximadamente 74 anos é mais frequente numa extensa faixa que se estende desde o litoral norte do Rio Grande do Norte, passando pelo litoral do estado da Paraíba, deslocando-se a oeste para penetrar no centro do estado de Pernambuco, depois retornando ao litoral do estado de Alagoas, e descendo numa faixa estreita sobre o estado de Sergipe e, finalmente, penetrando na região central do Estado da Bahia. 3) O ciclo de 26 anos é predominante numa estreita área localizada no litoral dos estados de Alagoas e Sergipe. 4) O ciclo de 2-3 anos concentra-se em particular em toda região do litoral de Pernambuco e razoável parte do seu interior até o litoral norte do estado de Alagoas. 5) Nas demais regiões do Nordeste não existem ciclos caracterizando áreas, muito embora as periodicidades de 13 e 26 anos apareçam basicamente em todo o Nordeste, tendo obviamente regiões em que suas contribuições à variância são mais fortes.

E importante observar que existem algumas estações isoladas dentro das áreas A, B, C e E que não pertencem a esses grupos. Por

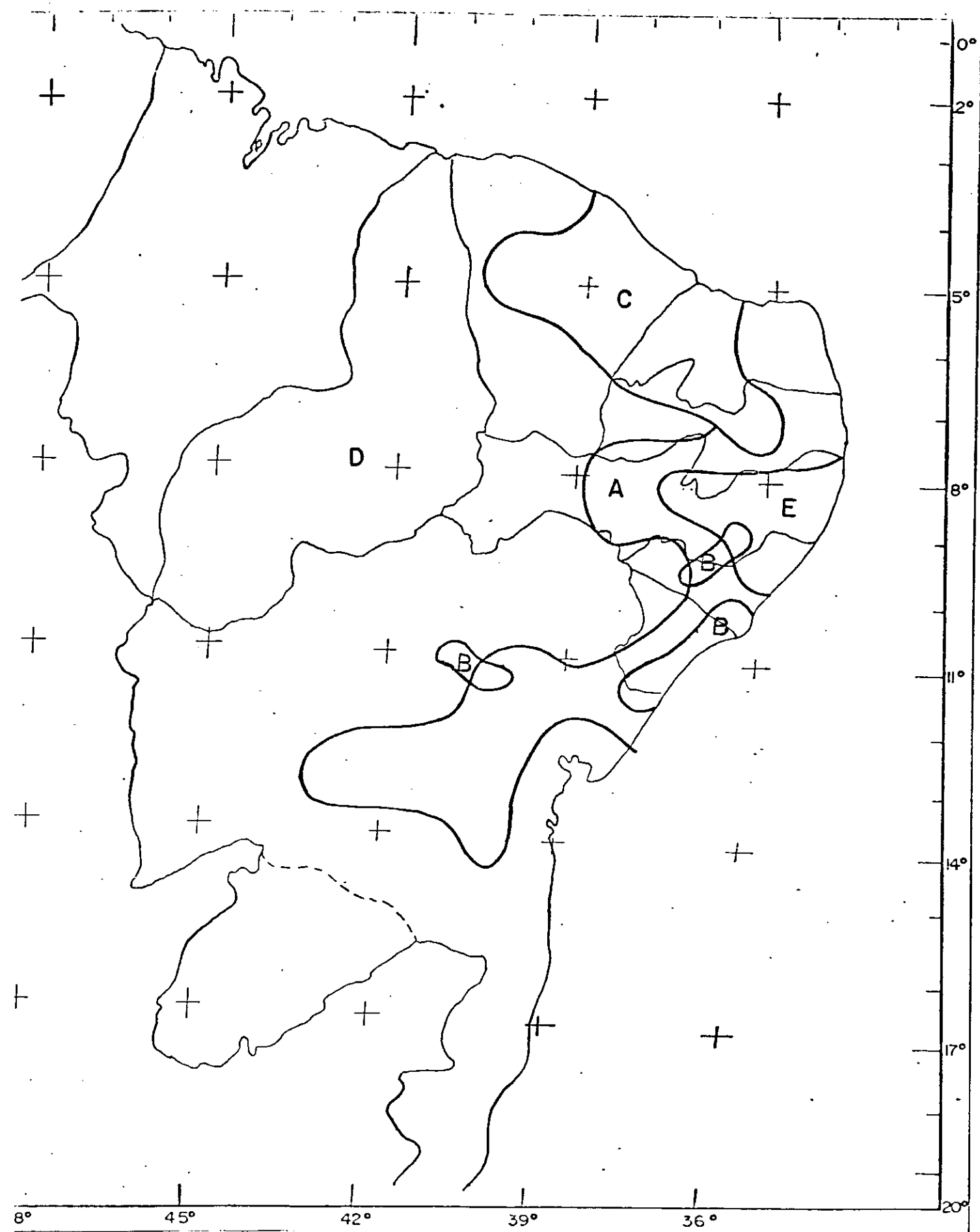
Tabela 4.2 - Contribuição à variância (%) associada aos ciclos mais fortes

Ciclos * Postos	74 anos	26 anos	13 anos	3-4 anos	2-3 anos	class.
01	3,2	8,1	1,5	3,6	4,5	Be
02	4,8	5,3	4,6	10,4	2,1	Db
03	1,3	2,2	8,5	10,1	8,0	Dc
04	13,0	1,2	9,9	8,5	2,9	Ac
05	4,5	8,5	13,5	5,0	2,5	Cb
06	26,7	1,6	3,9	5,8	6,2	Ae
07	6,9	6,9	11,3	5,5	5,1	Cb
08	5,1	4,3	12,3	4,1	11,4	Ce
09	6,5	1,9	7,5	10,4	1,4	De
10	2,0	3,9	9,9	17,9	4,9	De
11	5,0	3,0	13,5	10,1	6,6	Cd
12	9,3	0,5	12,9	8,6	2,5	Cd
13	3,4	0,6	18,3	11,7	5,4	Cd
14	0,7	11,1	8,0	2,6	1,2	Bc
15	16,4	1,8	5,8	4,2	3,4	Ac
16	5,1	6,4	7,3	4,3	6,3	Cb
17	1,0	0,1	2,1	8,5	3,6	De
18	2,0	0,9	19,3	7,9	4,6	Cd
19	13,8	4,7	19,1	9,9	1,8	Ca
20	29,9	5,0	4,0	7,5	4,0	Ad
21	13,2	4,2	5,6	3,1	5,3	Ac
22	10,5	4,2	7,4	7,3	7,1	Ac
23	6,4	9,8	17,1	8,0	4,1	Cb
24	9,4	5,6	3,2	4,3	5,2	Ab
25	6,4	6,1	8,0	8,8	3,6	Dc
26	5,3	3,0	12,6	12,2	3,5	Cd
27	2,4	2,9	8,0	7,7	8,9	Ec
28	10,8	10,6	4,8	2,3	4,7	Ab
29	1,6	8,6	16,1	7,1	2,5	Cb
30	7,3	2,9	8,8	9,9	4,3	Dc
31	4,4	1,9	6,3	14,6	5,4	Dc
32	6,3	10,7	7,3	11,8	3,6	Db
33	1,4	0,6	4,8	4,0	13,5	Ec
34	4,1	0,5	9,5	6,1	5,6	Cd
35	6,1	8,0	13,1	5,7	11,9	Ce
36	2,8	4,5	3,8	4,3	4,2	Bd
37	-	-	3,2	3,6	3,6	Bd
38	12,1	6,2	8,3	4,9	7,1	Ac
39	3,9	7,3	1,7	10,6	7,1	Db
40	23,3	2,0	1,2	5,9	4,2	Ad
41	12,4	1,2	3,4	4,3	6,5	Ae
42	7,0	1,4	10,8	12,2	7,2	Dc
43	0,3	7,2	3,4	8,0	9,6	Eb
44	22,3	1,2	2,6	12,6	3,2	Ad
45	5,0	2,1	2,7	9,1	8,3	De
46	0,2	3,5	4,7	9,5	8,2	Ed
47	7,8	3,8	12,4	12,4	7,4	Cd

Continua

Continuação

Ciclos * Postos	74 anos	26 anos	13 anos	3-4 anos	2-3 anos	Class.
48	5,5	2,5	2,8	6,2	6,4	Ed
49	2,6	4,2	0,8	5,9	7,2	Ed
50	7,0	5,0	9,3	9,8	9,1	Dc
51	7,0	14,5	4,0	5,1	9,8	Be
52	14,9	0,4	6,1	12,9	6,1	Ad
53	2,4	7,1	4,1	3,2	8,8	Eb
54	1,0	10,9	0,5	8,2	4,8	Bd
55	14,0	0,1	2,4	13,1	5,3	Ad
56	1,4	4,9	1,9	9,0	8,6	De
57	12,4	17,3	2,0	8,3	5,4	Ba
58	8,0	7,0	6,6	9,3	12,2	Ed
59	8,8	3,9	5,6	10,9	2,3	Da
60	3,7	3,2	0,9	7,9	12,8	Ed
61	2,3	1,6	3,8	2,8	5,7	Ec
62	1,9	0,2	3,6	3,1	4,8	Ec
63	4,2	10,9	1,6	10,3	9,2	Bd
64	3,0	16,6	1,6	2,1	10,6	Be
65	10,6	5,0	2,5	2,8	4,7	Ae
66	16,1	5,2	3,7	9,1	10,5	Ae
67	1,3	7,6	0,8	6,8	7,7	Eb
68	3,4	7,1	0,7	6,8	8,8	Eb
69	24,3	1,4	0,8	5,5	12,8	Ae
70	5,2	5,2	2,1	4,8	6,9	Ea
71	5,6	17,6	1,9	3,2	5,0	Ba
72	7,5	6,6	0,1	8,5	11,9	Ed
73	2,5	1,8	0,2	2,5	8,0	Ea
74	13,6	15,7	0,4	1,2	2,9	Ba
75	0,4	11,6	3,7	3,5	6,4	Be
76	17,2	18,6	2,9	1,1	7,8	Ba
77	13,0	12,1	0,9	4,5	5,2	Ab
78	5,2	8,2	0,7	2,2	7,0	Be
79	13,9	1,1	3,9	3,6	6,7	Ae
80	9,0	1,7	0,0	1,9	5,0	Ae
81	1,3	4,7	0,1	5,1	8,3	Ed
82	-	0,0	0,6	4,4	4,2	De
83	10,7	7,3	0,8	6,3	7,5	Ae
84	10,9	1,4	5,5	3,7	2,8	Ac
85	8,2	10,7	0,5	11,7	4,7	Db
86	9,3	3,4	1,0	2,8	8,2	Ae
87	-	0,5	1,9	6,5	5,5	De
88	14,0	6,0	6,1	2,3	3,9	Ac
89	3,1	2,2	7,9	2,8	10,2	Ec



3. 4.1 - Distribuição de Ciclos Predominantes (não necessaria -
mente significantes)

outro lado, as combinações de duas letras não alcançam a definir claramente sub-regiões. Alguma evidência de combinações Cd ou Dc observa-se na região C. A combinação Ad aparece no interior de Pernambuco.

4.1.1 - Ciclos de 3-4 anos (Região D) e 2-3 anos (Região E)

O ciclo médio de 3-4 anos também está presente na pluviometria do Nordeste (tabela 4.1) sendo mais frequente ao sul da latitude de 8°S. A figura 4.2 mostra a distribuição espacial da contribuição à variância do ciclo médio de 3-4 anos. Devido a gradiente das isolinhas ser muito forte alguns núcleos significantes de máxima não aparecem, muito embora nas localidades : Caio Prado-CE, Cajazeiras-PB, S. José do Belmonte-PE, Santana do Ipanema-AL e Floresta-PE, o ciclo médio de 3-4 anos seja estatisticamente significativo a um nível de 10%. ARAGÃO (1990), considerando todos os eventos de El Niño classificados como fracos, moderados e fortes durante o período de 1844 a 1976, observou que os mesmos têm uma média de ocorrência a cada 3,7 anos. Este resultado também sugere que as secas no Nordeste estão associadas com o aquecimento anômalo nas águas do Oceano Pacífico (fenômeno de El Niño).

A figura 4.3 mostra a distribuição espacial da contribuição à variância do ciclo de 2-3 anos e evidencia que este ciclo, embora esteja presente nas séries de chuva do Nordeste, apresenta contribuição à variância muito fraca. Apenas as estações de Junqueiro-AL, Mocambo-SE e N. Senhora da Glória-SE possuem ciclos significantes a um nível de 10% e os mesmos não são mostrados na figura 4.3 pois só a partir do segundo harmônico é que sua contribuição à variância é suficiente para considerá-lo como significativo. Na alta estratosfera os ventos possuem um comportamento zonal, apresentando uma certa periodicidade: 13 meses de este e 13 meses de oeste, fechando um ciclo aproximado a

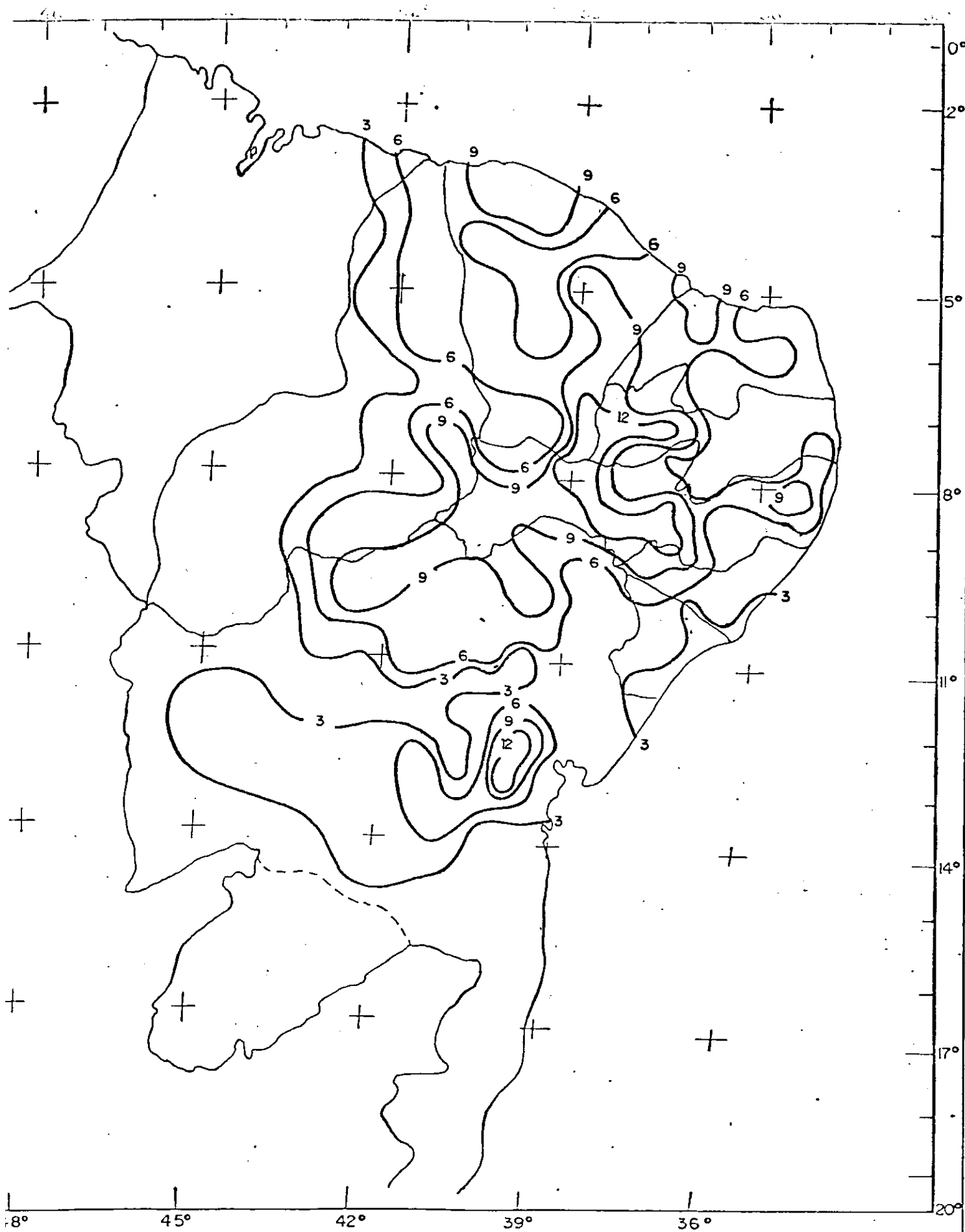


Fig. 4.2 - Distribuição Espacial da Contribuição à Variância (%)
do Ciclo de 3-4 anos

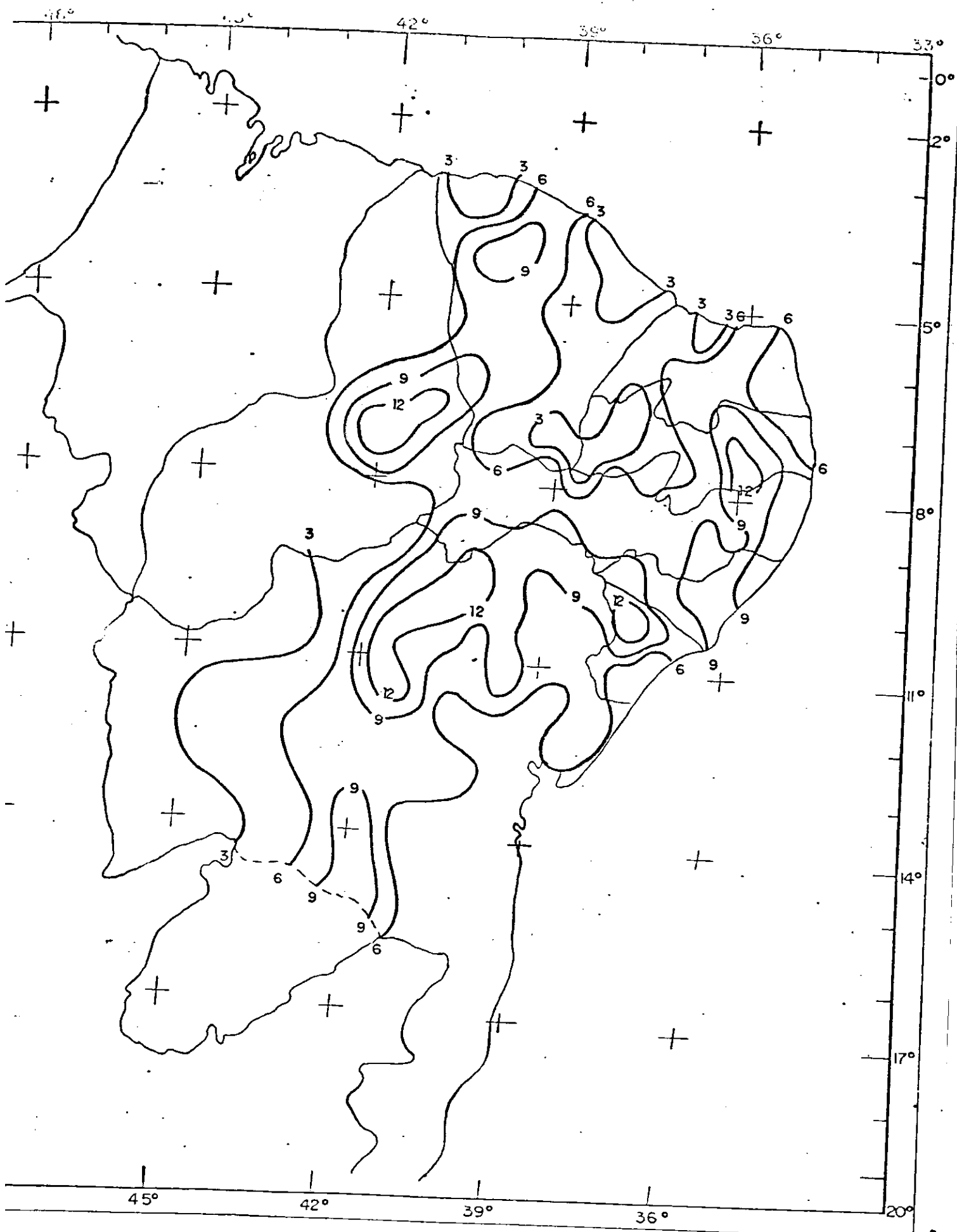


Fig. 4.3 - Distribuição Espacial da Contribuição à Variância (%)
do Ciclo de 2-3 anos

cada 26 meses, chamado de Oscilação Quase Bienal. Dada a proximidade do ciclo médio de 2-3 anos ao ciclo médio da Oscilação Quase Bienal, vários pesquisadores sugeriram o relacionamento entre ambos.

4.1.2 - Ciclo de 13 anos (Região C)

A relativa indefinição de áreas com ciclos predominantes sugere um segundo critério de análise estatística. De fato, o nível de significância escolhido para o teste de Fisher é, até certo ponto, arbitrário. Por outro lado, foi elaborado para definir critérios de julgamento a partir de uma série isolada de dados, sem qualquer informação adicional acerca do comportamento regional da precipitação. Por exemplo, a escolha de 1% tenta eliminar toda dúvida na rejeição da hipótese nula (ou seja, carácter aleatório do ciclo no espectro). Observando que, dada uma contribuição "g" do harmônico mais intenso para a variância da série, fica definido um nível "p" de probabilidade de que valores $\hat{g} < g$ sejam produtos de uma contribuição aleatória, pode ser regionalizado o valor de p correspondente a g observado. Esse valor representa um nível crítico de significância; dependendo da distribuição de p, deveriam ficar definidas regiões onde a probabilidade de uma contribuição aleatória ao espectro não possa, segundo uma evidência regional, ser rejeitada.

A tabela 4.2 evidencia que, à margem de uma contribuição significativa, o ciclo médio de 13 anos está presente basicamente em todas as séries de chuva do Nordeste. Segundo ARAGÃO (1990) considerando todos os eventos de El Niño fortes durante o período de 1763 a 1972 tem-se uma média de ocorrência de um evento a cada 12,3 anos. Dada a proximidade entre o ciclo médio de 13 anos contido nas séries de precipitação do Nordeste e a média de ocorrências de um forte El Niño, sugere-se que as anomalias de precipitação no Nordeste possam estar associadas com o fenômeno

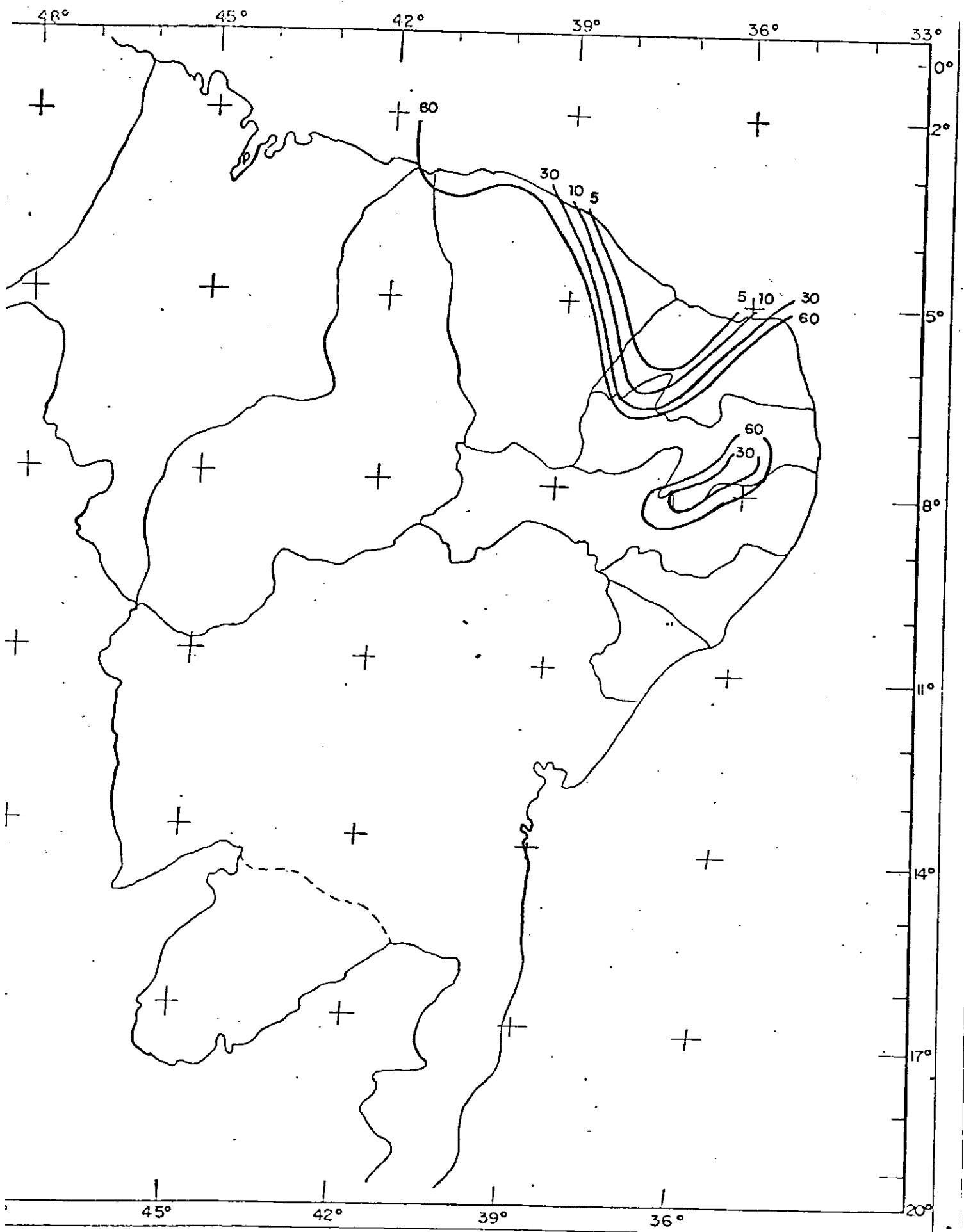


Fig. 4.4 - Níveis de Significância (em %) Associados ao Ciclo de

El Niño. A seção 4.6 examina alguns aspectos desta possível relação.

A figura 4.4. ilustra a distribuição regional do nível de significância segundo o teste de Fisher, associado à respectiva contribuição à variância, dado que o ciclo de 13 anos é o mais intenso no periodograma. Por exemplo, a isolinha de 10% corresponde a probabilidade $p = 0,1$ de que uma contribuição $\hat{g} < g$ seja aleatória, ou $q = 1 - 0,1 = 0,9$ de que $\hat{g} > g$ possa sê-lo. Valores reduzidos de p indicam pequeno risco de errar ao supor que um harmônico foi originado por uma oscilação determinística. A tabela 4.3 ilustra os valores de g (associados ao harmônico principal), correspondentes a diversos níveis de significância segundo a equação 3.14. Considera-se uma série temporal de tamanho $N = 74$, típico das estações incluídas neste estudo.

$p(\%)$	$g(\%)$
1	20,40
5	16,76
10	15,14
15	14,18
20	13,49
30	12,51
50	11,26

Tabela 4.3 - Valores de g (crítico) correspondentes a diversos níveis de significância

A figura 4.1 evidencia a predominância do ciclo de 13 anos na parte norte do NEB. A figura 4.4 define com maior precisão a qualidade da presença deste ciclo. Observa-se que além da isolinha de $p = 10\%$ existe um elevado gradiente que conduz em

poucos quilômetros a níveis superiores a 30-40%. Esse gradiente pode ser considerado representativo de uma fronteira além da qual as contribuições do ciclo de 13 anos deixam de ser significativas estatisticamente. Em termos gerais, pode-se dizer que este ciclo não é expressivo ao sul da latitude de 8°, ficando restrito a duas regiões com $p < 30\%$. Os resultados parecem evidenciar que não deveria ser associado um ciclo de 13 anos a regiões do NEB fora das duas detectadas.

4.1.3 - Ciclo de 26 anos (região B)

A análise espacial da contribuição à variância do ciclo de 26 anos (figura 4.5) revela dois núcleos de máxima contribuição à variância localizados no litoral dos estados de Alagoas e Sergipe e um outro no centro do estado da Bahia. Esta análise é confirmada com a da figura 4.1 que mostra também 3 células nas quais o ciclo de 26 anos é o mais frequente nas mesmas regiões acima mencionadas, exceto a célula que se estende entre os estados de Pernambuco e Alagoas (ela não é mostrada na figura 4.5, muito embora exista uma célula de 12% de contribuição à variância que não é significativa a um nível de 5%). A figura 4.6 delimita as regiões com 10% de nível de significância e obviamente coincide com as áreas acima mencionadas. Assim como o ciclo de 13, o de 26 anos está presente nas séries de chuva do Nordeste. Em apenas duas localidades (Fortaleza-CE e Catolé do Rocha-PB) os dois ciclos são simultaneamente significantes a um nível de significância 5% (ou de 95% de confiabilidade).

4.1.4- Ciclo de 74 Anos (Região A)

Como mostra a figura 4.1, o ciclo de 74 anos predomina na região litorânea do Nordeste. A carta de contribuição à variância do ciclo médio de 74 anos (figura 4.7) não mostra com clareza

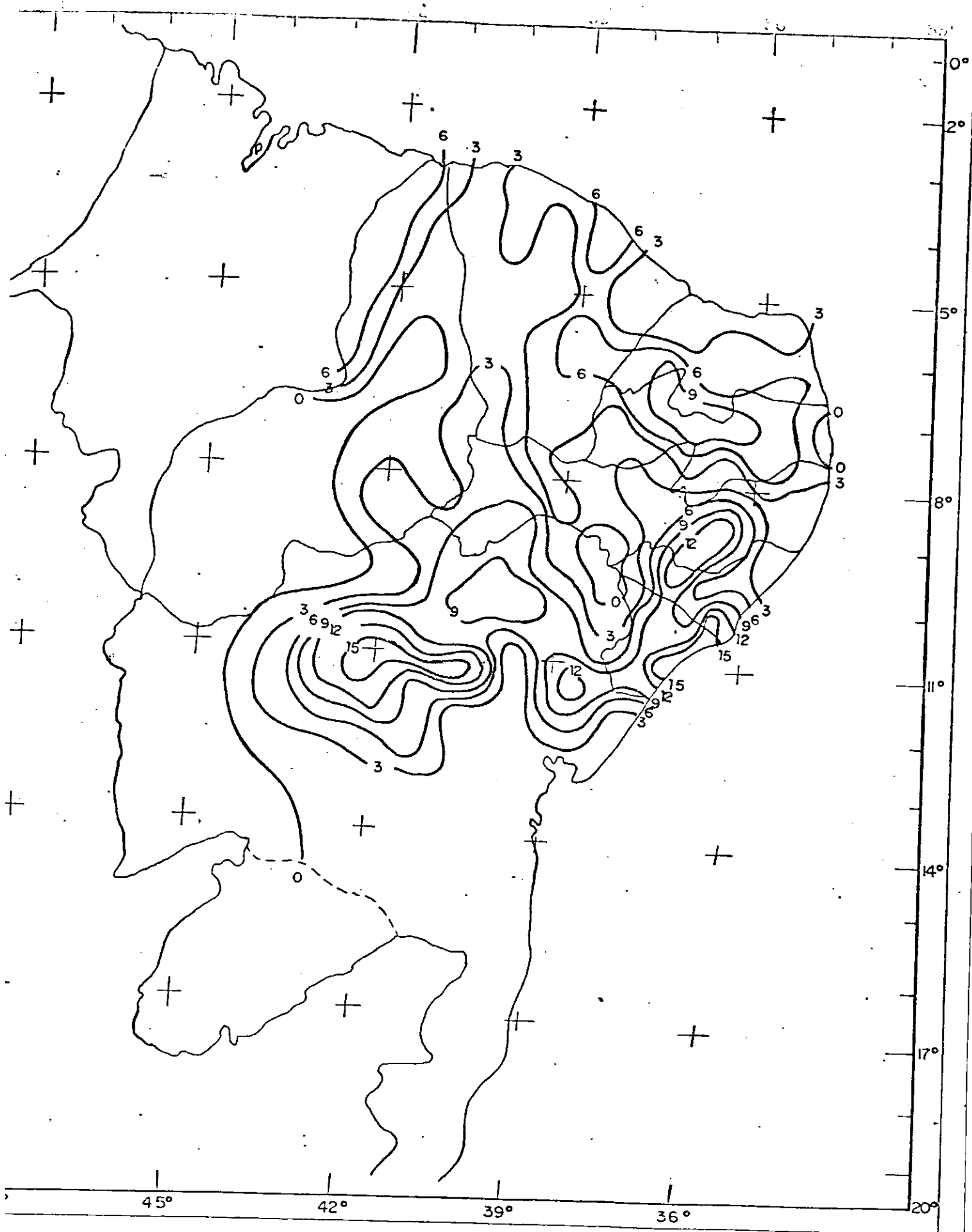


Fig. 4.5 - Distribuição Espacial da Contribuição à Variância (%)
do Ciclo de 26 anos

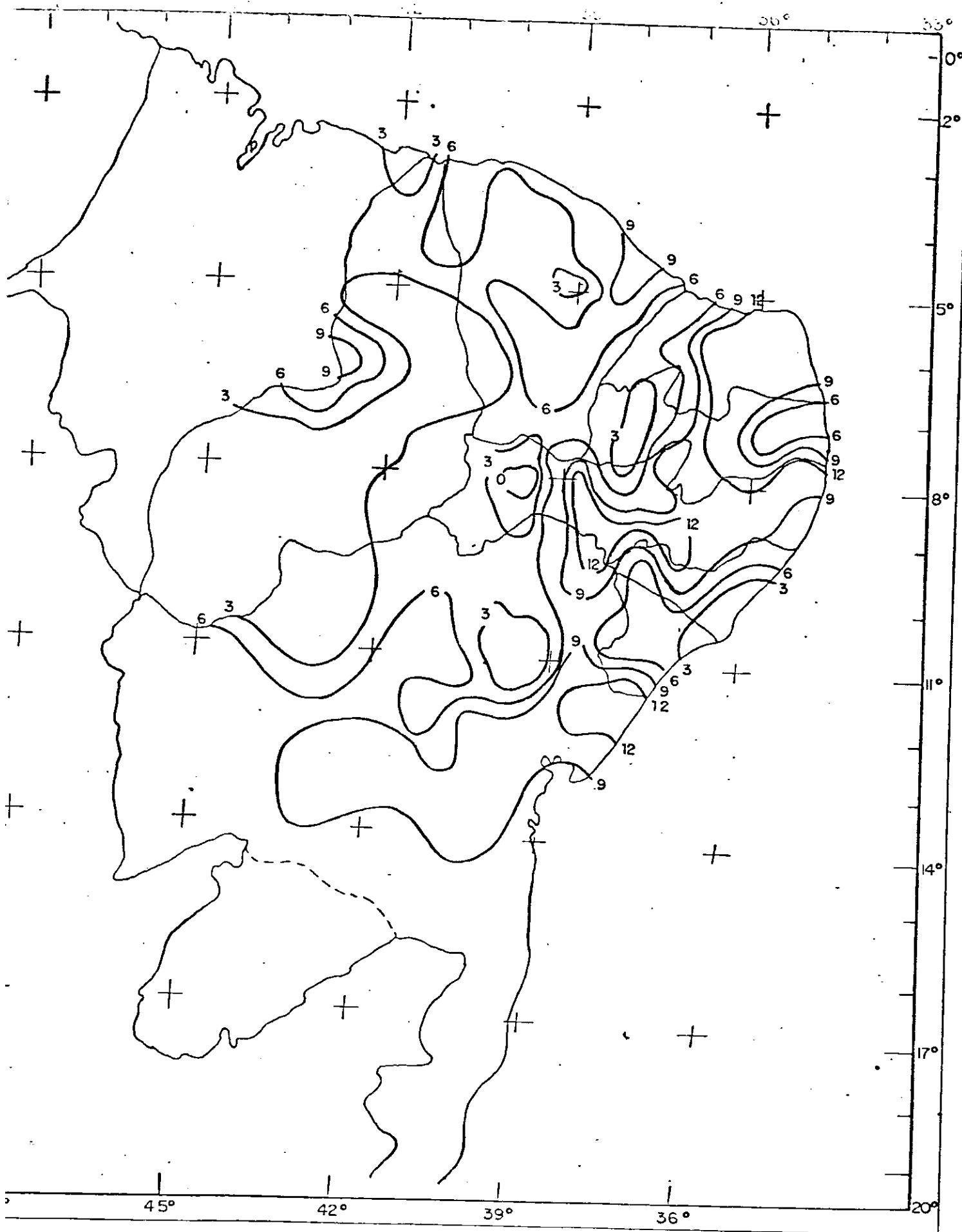


Fig. 4.7 - Distribuição Espacial da Contribuição à Variância (%)
do Ciclo de 74 anos

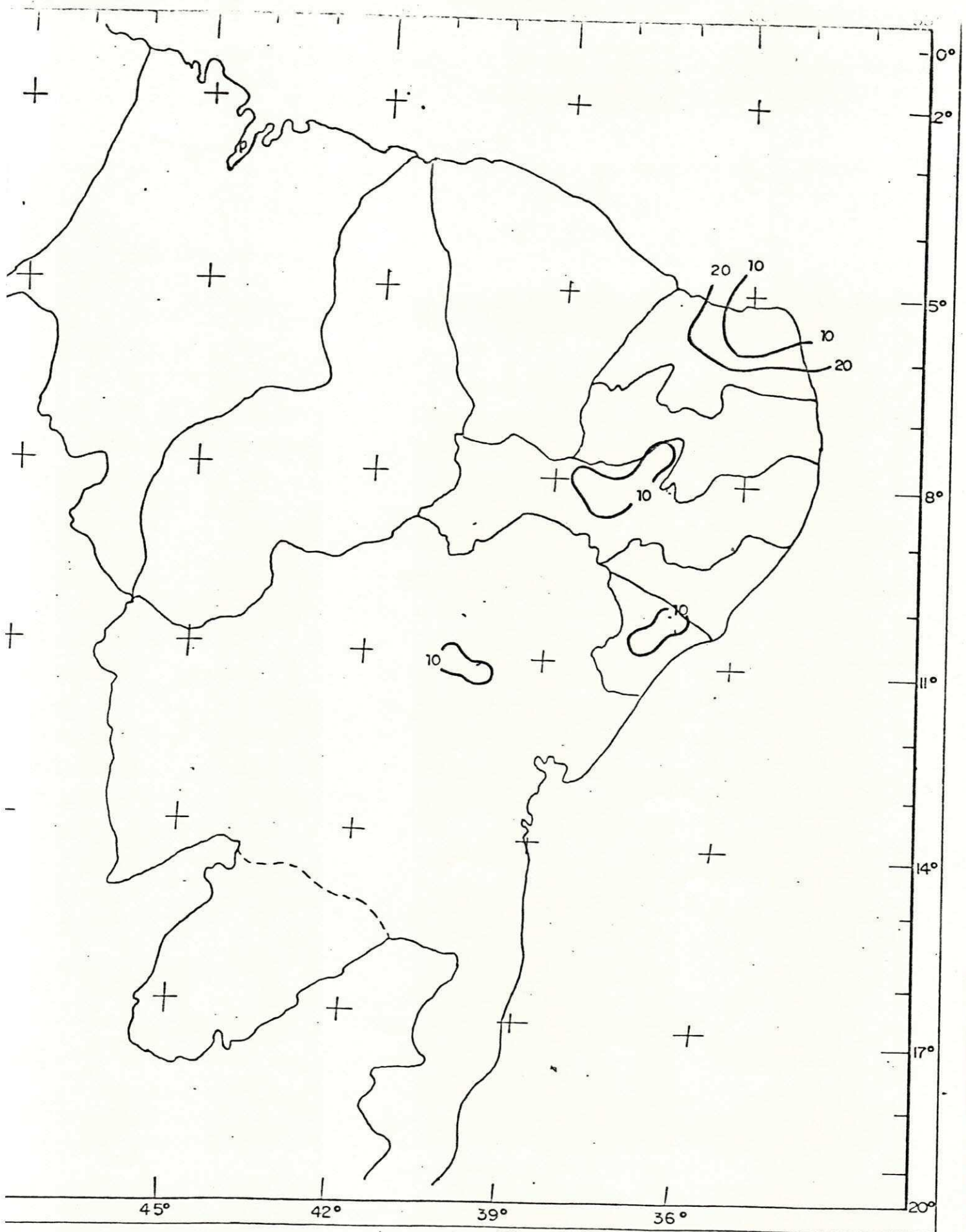


Fig. 4.8 - Níveis de Significância (em %) Associados ao Ciclo de 74 anos

os núcleos significantes, muito embora defina os núcleos de máxima contribuição à variância, na região definida na figura 4.1. A carta 4.8 define quatro células de 10% de nível de significância localizadas no extremo norte do estado do Rio Grande do Norte e nos centros dos estados de Pernambuco, Alagoas e Bahia.

4.2 - Variância do Modelo Senoidal

O modelo senoidal usado em previsões tem sido amplamente criticado dada a sua pequena capacidade explicativa (NOBRE et alii (1982)). A tabela 4.4 sumariza em percentagem quanto o modelo senoidal explica a variância dos dados originais nas 26 estações que possuem ciclos significantes segundo o teste de Fisher.

Nº	Posto	(%)	Nº	Posto	(%)
01	- Luiz Correia	17	40	- S. José do Egito	35
05	- Fortaleza	23	41	- Cabaceiras	41
06	- S. Benedito	27	44	- S. José do Belmonte	34
10	- Caio Prado	30	55	- Aguas Belas	47
13	- Areia Branca	19	57	- Santana do Ipanema	38
15	- Touros	16	61	- Maceió	20
18	- Gov. Dix Sept Rosado	19	64	- Junqueiro	27
19	- Açu	50	66	- N. Senhora da Glória	16
20	- Taipu	30	69	- Mocambo	30
23	- Caraúbas	17	71	- Aracaju	28
28	- Amarante	45	75	- Barra	47
29	- Catolé do Rocha	35	76	- Jacobina	36
37	- Araripe	35	82	- Barreiras	17

Tabela 4.4 - Percentagem da variância dos dados originais explicada pelo modelo senoidal

Observa-se que Açú, Aguas Belas, Barra, Cabaceiras e Amarante são as localidades nas quais melhor se ajusta o modelo senoidal. No entanto, o modelo senoidal não consegue explicar em nenhuma das localidades analisadas, mais de 50% da variância dos dados originais; ficando a maior parte explicada pelos resíduos. Em Açú, a metade da variância dos dados originais é explicado pelo modelo senoidal e a outra metade é explicada pelos resíduos. No entanto, a percentagem ainda é muito pequena para que o modelo tenha um desempenho satisfatório quando usado em previsões.

4.3 - Espectro Contínuo das Séries

A análise de Fourier tradicional determina amplitudes e fases de senóides cujos períodos são submúltiplos inteiros de um período fundamental, determinado pelo número de dados da estação (no caso, o comprimento N da série). Como foi visto na seção 4.1, algumas estações possuem componentes importantes com períodos $T = N$.

Porém, deve observar-se que esta conclusão pode ser mais aparente do que real. Por exemplo, dispõe-se de uma série 130 anos para Fortaleza, e de 60-75 anos para o resto das estações estudadas. Um sinal com $T = 70$ anos detectado para uma estação com $N = 70$ não seria percebido pela Análise Harmônica Tradicional (AHT) para os dados de Fortaleza, desde que o primeiro harmônico tem $T_1 = 130$, e o segundo tem $T_2 = 65$ anos. Da mesma forma KANE & SOUZA (1988) encontraram sinais com $T = 52$ anos, que seriam ignorados pela AHT para estações com $N = 74$ anos. Sendo assim, decidiu-se ajustar senóides para algumas estações das regiões A, B, C, D e E, mencionadas na seção 4.1, de forma que o período T "varresse" valores arbitrários dentro de um espectro contínuo. O método de cálculo está indicado na seção 3.4.6.

As figuras 4.9a a 4.9f apresentam resultados obtidos para S.

José do Belmonte, Aracaju, Areia Branca, Petrolina, S. Bento do Una e Fortaleza, depois de aplicada a Análise de Espectro Contínuo (AEC).

Uma senóide não harmônica com relação a N pode "espalhar-se em frequência", apresentando-se também em torno da frequência real, devido à influência das bordas do intervalo de definição da série (a função analisada devia ter intervalo $N \uparrow \infty$), mas ela é multiplicada por uma função "caixa" - "box function" - que se anula para $t < 0$ e $t > N$. Tal comportamento foi atenuado utilizando-se uma função "tapering" aplicada sobre 25% dos dados (BLOOMFIELD, 1976). Foi varrido o intervalo contínuo (3 - 104 anos) para os períodos possíveis.

As curvas de característica monotonicamente decrescente incluídas nas figuras 4.9a a 4.9f representam o espectro de um ruído branco, de forma que picos acima delas são sinais (não necessariamente significativos) e abaixo delas deveriam ser associados a ruídos. Nessas mesmas figuras estão marcados os períodos de 3-4, 13 e 26 anos por barras verticais salientes, localizadas na parte superior das figuras já mencionadas, enquanto que as outras barras indicam os períodos correspondentes a harmônicos de 104 anos.

Em S. José do Belmonte observa-se que AHT indica a existência de 3 ciclos mais fortes (74, 3,4 e 3,5 anos). Os ciclos de 74 e 3,4 anos são significantes segundo o teste de Fisher. Através da AEC (figura 4.9a) evidencia-se que os ciclos máximos são realmente os de aproximadamente 3,4, 30 e 74 anos.

A AHT aplicada na série de precipitação de Aracaju (área B), revela a existência de 3 ciclos fortes (24,3, 14,6 e 18 anos). Os ciclos de 24,3 e 14,6 são significantes segundo o teste de Fisher. Por outro lado, a AEC (figura 4.9b) revela para a mesma estação ciclos de aproximadamente 24, 14 e 2,8 anos.

Em Areia Branca, a AHT revela a existência de 3 ciclos

fortes (12,3, 3,4 e 5,7 anos). Os ciclos de 12,3 e 3,4 anos são significantes segundo o teste de Fisher. Através da AEC (figura 4.9c), observa-se que os ciclos mais fortes são 13, 9,7 e 3,4 anos.

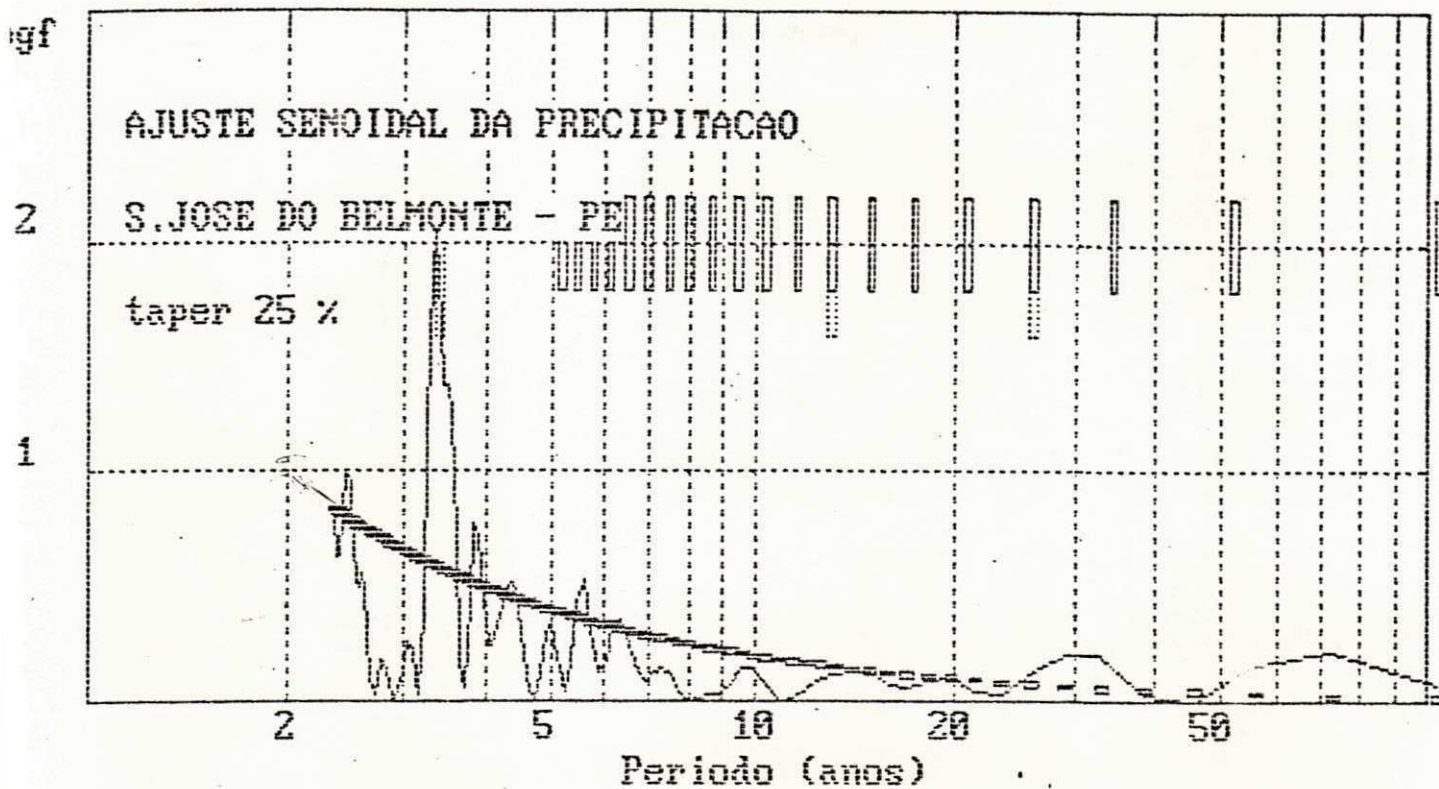
No caso de Petrolina, a tabela 4.1 indica picos em $T_1 = N = 67$, e $T_2 = 3,3$ e $T_3 = 2,3$ anos. Nesta estação nenhum pico se apresenta significativo segundo o teste de Fisher. Através da AEC (figura 4.9d), evidencia-se que T_1 não é propriamente indicativo de um pico, mas de um conjunto contínuo de frequências presentes, cujo pico ficou situado em torno de 41-42 anos. Por outro lado, existem picos evidentes em torno de 2,3, 23 e 34 anos.

Em S. Bento do Una, a AHT evidencia a existência de 3 ciclos que possuem contribuição máxima à variância (21,3, 64, e 2,7 anos). Nesta estação nenhum pico se apresenta significativo de acordo com o teste de Fisher. Por outro lado, a AEC (figura 4.9e), revela que os 3 ciclos mais fortes são aproximadamente os de 24, 2,7 e 2,8 anos.

Considerando a AHT para Fortaleza, observa-se que os 3 ciclos mais fortes são os de 13, 26 e 3,6 anos. Os ciclos de 13 e 26 anos são significantes segundo o teste de Fisher. Através da AEC (figura 4.9f) fica evidenciado que os 3 picos mais fortes são exatamente aqueles descritos pela análise anterior (13, 26 e 3,6 anos).

Utilizando-se da Análise de Espectro Contínuo para um conjunto de 14 estações do NEB, inclusive aquelas descritas anteriormente (tabela 4.5), observa-se picos acima de 100% do nível de ruído; muito deles não revelados pela AHT. A intensidade relativa ao ruído teórico e a presença sistemática em variadas estações sugere que o teste de Fisher possa ser excessivamente exigente com relação a aceitar a significância de picos numa série temporal isolada.

(a)



(b)

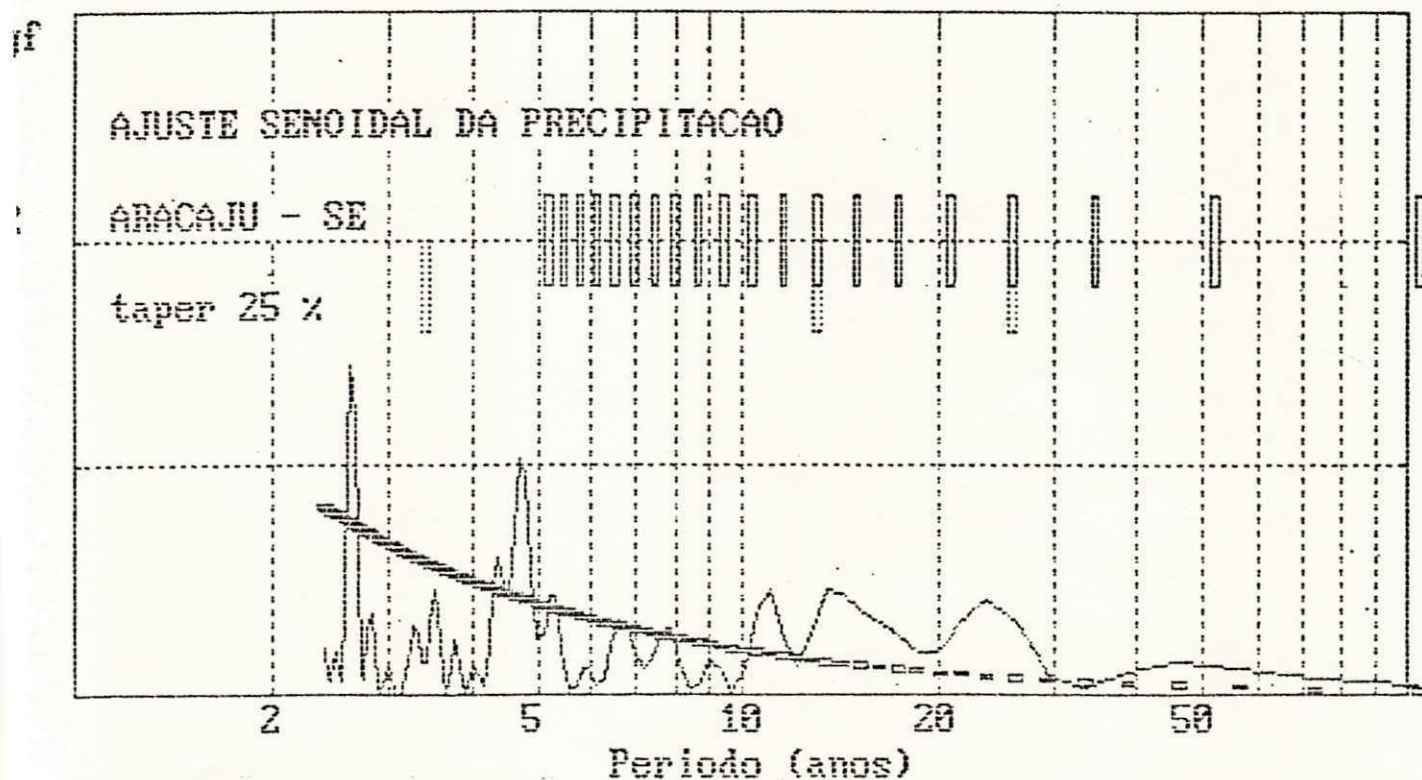
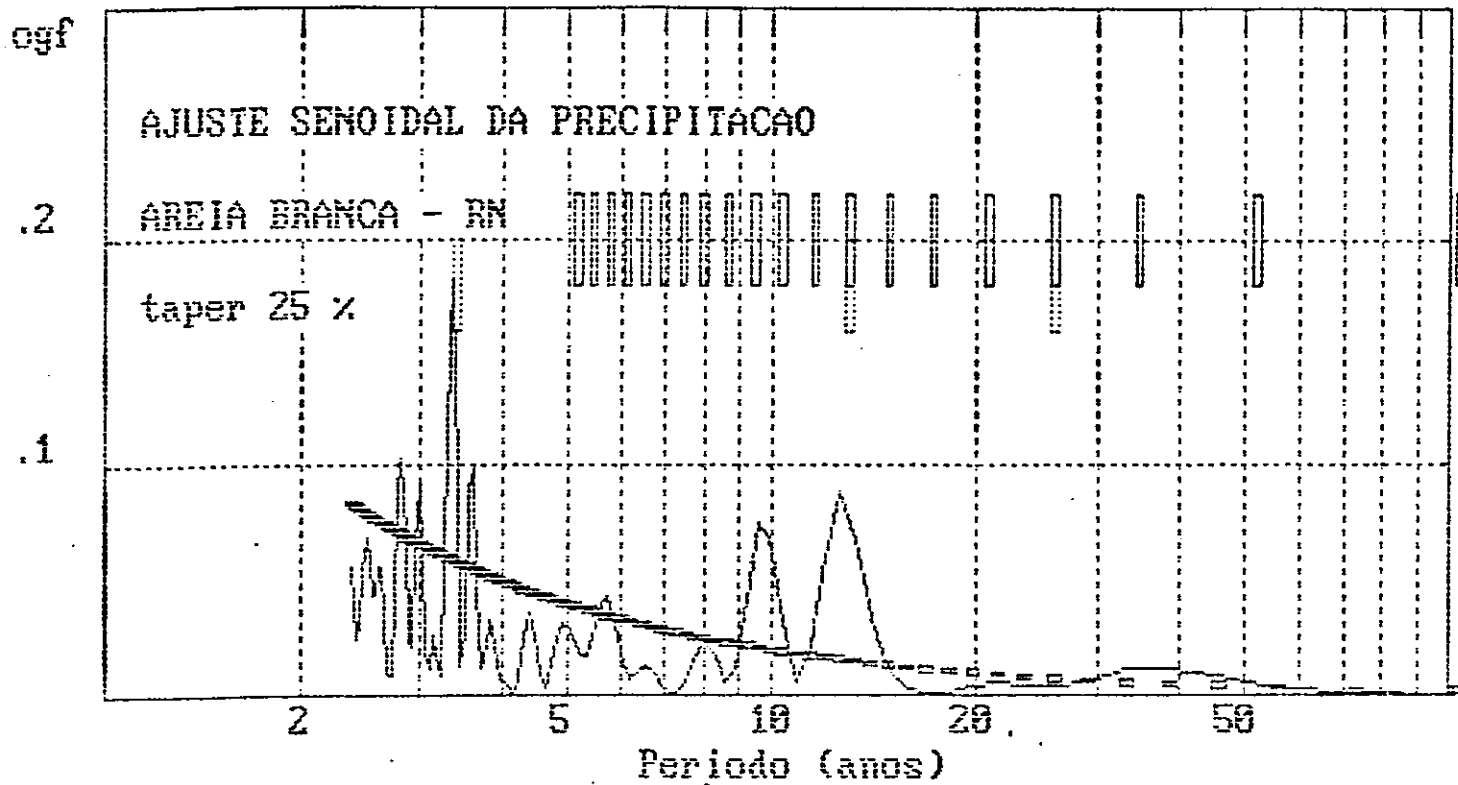


Fig. 4.9 - Função Representativa da Densidade Espectral para Estações do NEB, Incluindo o Espectro Associado ao Ruído Branco. a) São José do Belmonte (Região A, fig. 4.1); b) Aracaju (Região B, fig. 4.1)

(c)



(d)

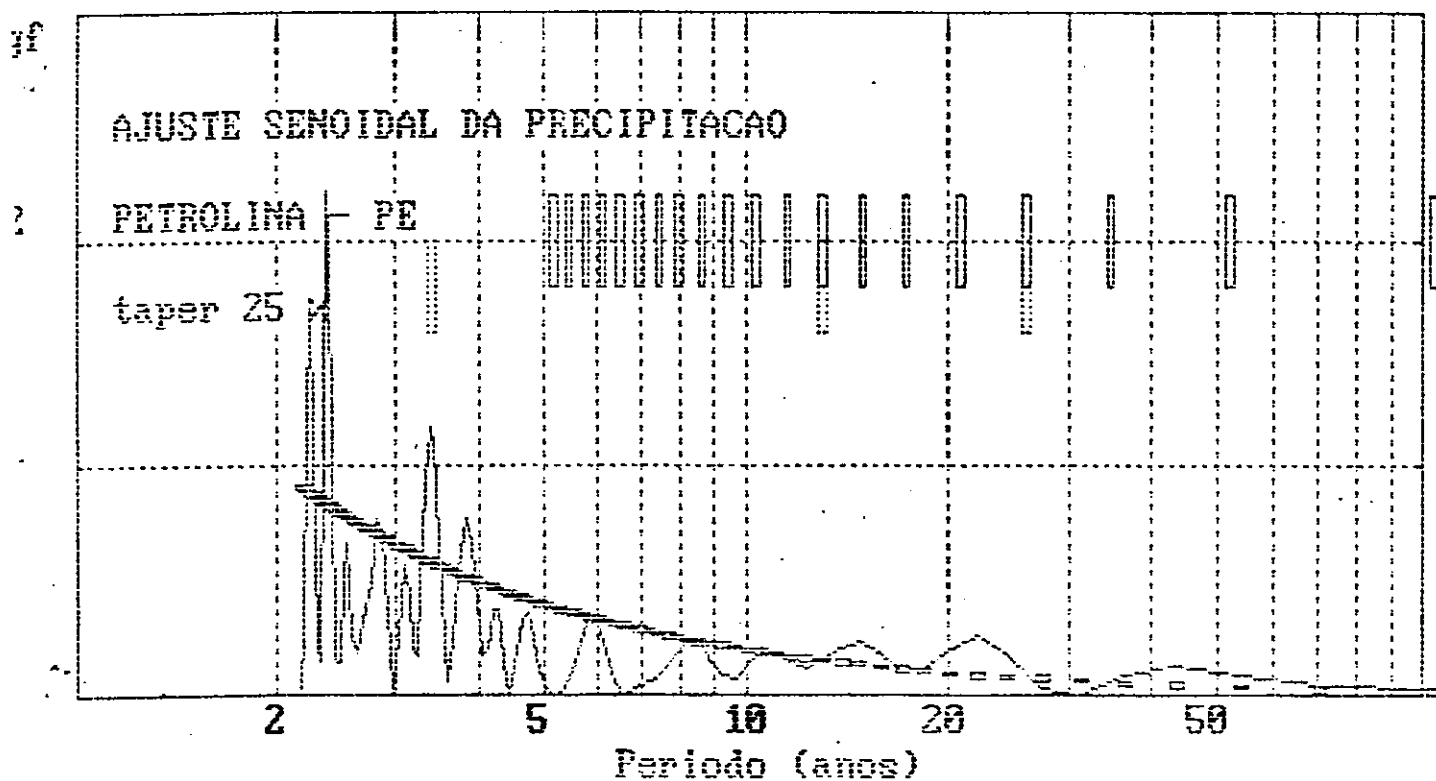
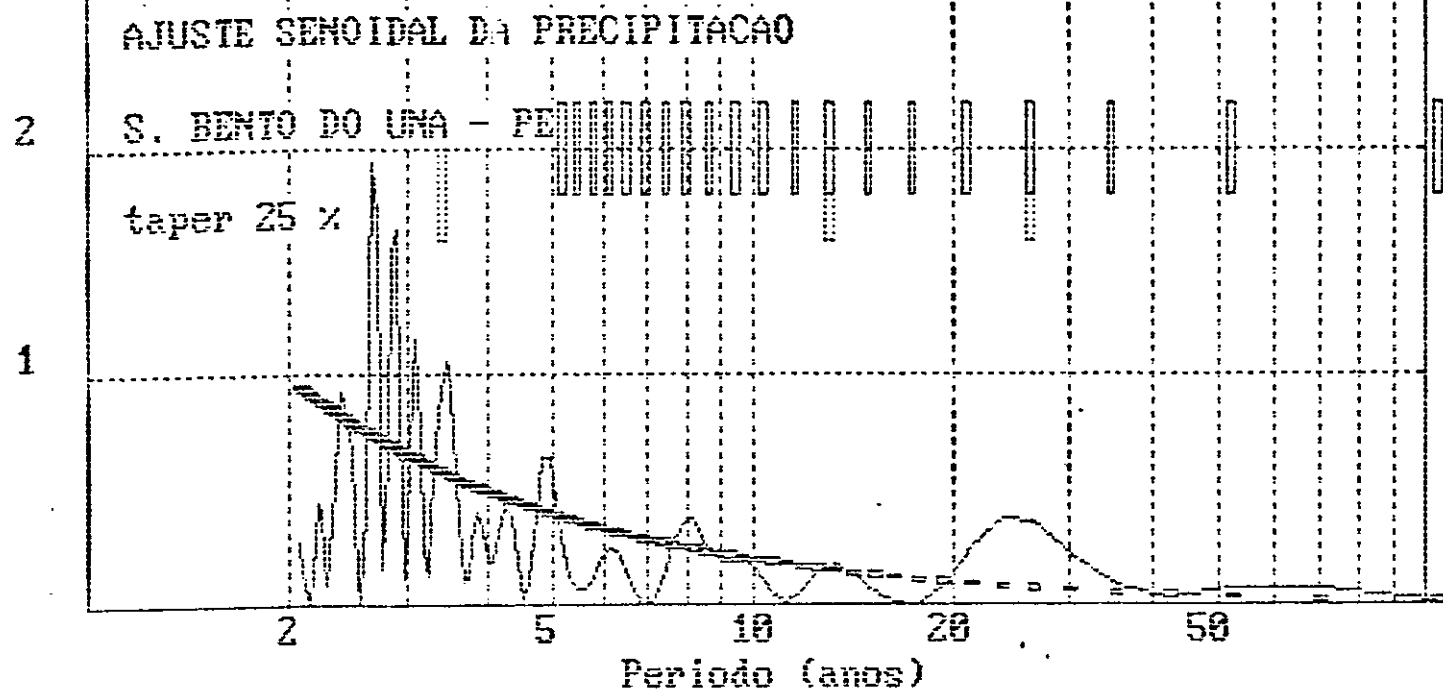


Fig. 4.9 - (Continuação). Idem c) Areia Branca (Região C, fig. 4.1); d) Petrolina (Região D, fig. 4.1)

(e)

9f



(f)

9f

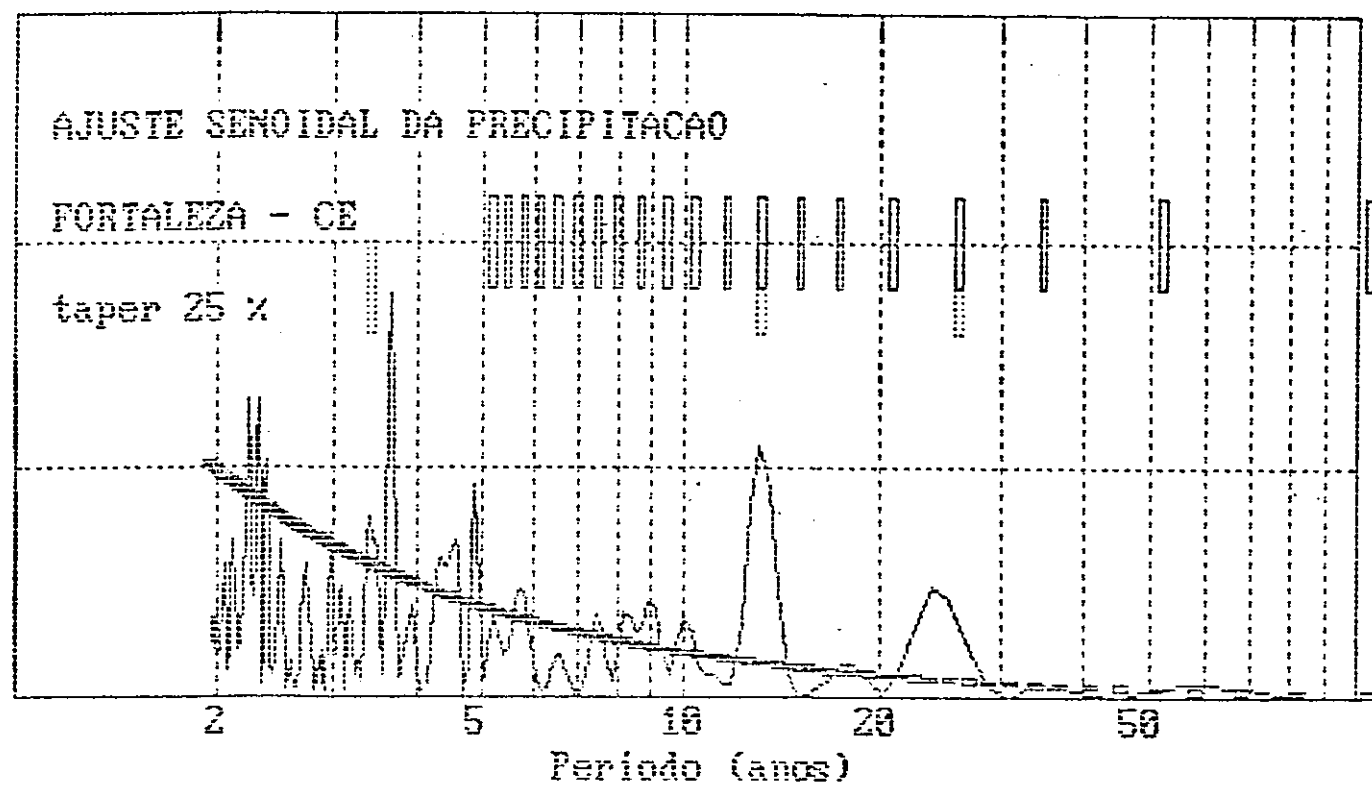


Fig. 4.9 - (Continuação). Idem e) S. Bento do Una (Região E, fig. 4.1); f) Fortaleza (Região C, fig. 4.1)

Nº	Posto	Ciclos				
05 - Fortaleza		3,6	5,0	13,0	26,0	60,0
07 - Acarape		9,6	13,0	26,0	-	-
13 - Areia Branca		3,4	3,7	9,7	13,0	40,0
29 - Catolé do Rocha		10,5	13,0	26,0	-	-
39 - Jaicós		2,3	3,3	10,0	40,0	-
44 - S. José do Belmonte		3,4	30,0	57,0	74,0	-
45 - Recife		3,4	7,0	-	-	-
47 - Sertania		2,8	3,4	13,0	24,0	60,0
51 - S. Bento do Una		2,7	2,8	3,5	24,0	60,0
58 - Petrolina		2,3	3,4	13,0	23,0	34,0
64 - Junqueiro		2,7	4,8	26,0	50,0	-
71 - Aracaju		2,8	4,8	14,0	24,0	50,0
76 - Jacobina		26,0	32,0	50,0	-	-
82 - Barreiras		2,9	4,0	8,3	11,0	50,0

Tabela 4.5 - Períodos (anos) dos ciclos mais significativos de um conjunto de 14 estações do Nordeste do Brasil

Praticamente em todas as estações analisadas os picos da faixa de alta frequência estão presentes (2-3 e 3-4 anos), exceto nas estações de Catolé do Rocha, Acarape e Jacobina. Observa-se ainda, picos em torno de 9, 13, 26, 34, 40, 50 e 60 anos, concordando com KANE & SOUZA (1988).

4.4 - Resíduos

Removendo-se a componente determinística das séries de precipitação do Nordeste, o que resta é a componente aleatória ou residual. Como as séries de chuva do Nordeste não apresentam tendência, logo $Ts(t) = \langle P \rangle$ e decorrente da expressão (3.1) a

componente aleatória será:

$$R(t) = Z(t) - \langle P \rangle - H(t). \quad (4.1)$$

Conforme foi mencionado anteriormente, das 89 séries de precipitação analisadas apenas 26 apresentam ciclos significantes a um nível de significância de 10% segundo o teste de Fisher, e para elas será válida a expressão 4.1. Para as demais estações o modelo se reduz a:

$$R(t) = Z(t) - \langle P \rangle \quad (4.2)$$

Usualmente supõe-se que a componente aleatória ou residual constitua uma série de ruído branco, com média zero e variância constante. Com o objetivo de verificar esta suposição foram analisadas as funções de autocorrelação de todas as séries de precipitação. As figuras 4.10 a 4.10d mostram correlogramas de 4 séries de resíduos em diferentes locais do Nordeste (Caio Prado, Maceió, Campina Grande e Jequié). O teste das autocorrelações para ruído branco sobre as séries de resíduos de precipitação do Nordeste revela que as mesmas se constituem em séries de ruído branco a 95% de confiabilidade na grande maioria dos casos e a 99% de confiabilidade em todas as séries analisadas.

Deve ser observado que apesar dos ciclos de 13 e 26 anos, dentre outros, não tenha sido considerado como significantes a um nível razoável de significância pelo teste de Fisher, eles estão sugeridos nos correlogramas (a) e (c). Dada a aparente coincidência o teste de significância para o correlograma poderia aceitar um nível de significância, por exemplo 10%, nesse caso o

valor crítico passaria para 0,20 e, em geral, 6 dentre 36 autocorrelações poderiam ser consideradas significativas. Esta proporção excede a fração 1/10 proposta pelo nível de significância, e sugere a existência de um sinal não aleatório presente na série temporal.

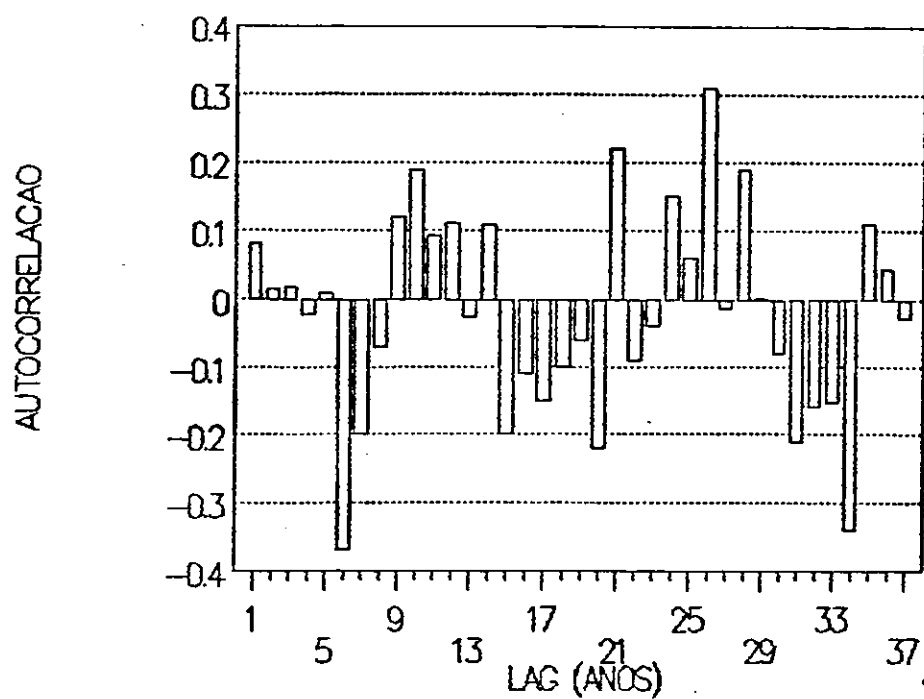
4.5 - Distribuição Apropriada para os Resíduos

Para uma série temporal de precipitação $P(t)$ observada num intervalo de tempo Δt , tem-se o modelo descrito pela equação (3.1).

Onde a componente determinística $\langle P \rangle + H(t)$ representa a precipitação num determinado instante t e a componente aleatória $R(t)$ usualmente é assumida normalmente distribuída, isto é $R(t) \simeq N(0, \sigma^2)$, onde σ^2 é a variância dos dados. A hipótese básica é que os resíduos não estão correlacionados. Todavia, esta propriedade não é atributo exclusivo das distribuições normais. Assim, decidiu-se analisar a adequação de três tipos de distribuição.

Na análise dos resíduos de 8 estações de regiões distintas do Nordeste foram ajustada, para cada estação, as distribuições Normal, Triangular e Gama. A tabela 4.6 evidencia para cada estação, de acordo com o teste qui quadrado, a melhor distribuição ajustada. A 4ª, 7ª, e 10ª coluna indicam o nível de significância correspondente a cada distribuição, de acordo com os graus de liberdade e o qui quadrado calculado. Quanto maior o nível de significância, melhor o ajuste.

(a)



(b)

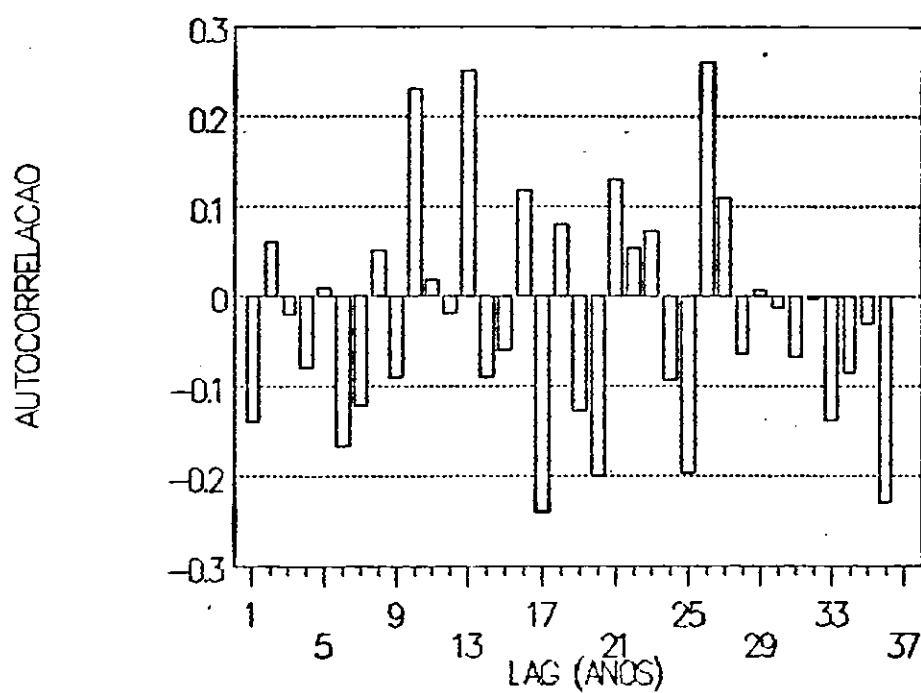
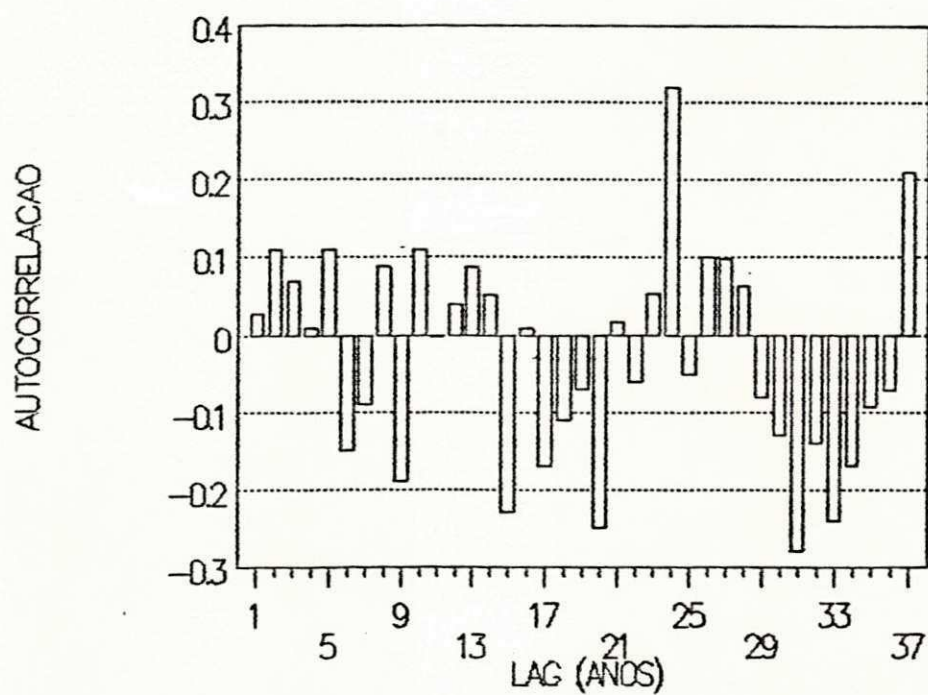


Fig. 4.10 - Funções de Autocorrelações de Resíduos de Precipitação para Estações do NEB. a) Caio Prado; b) Maceió

(c)



(d)

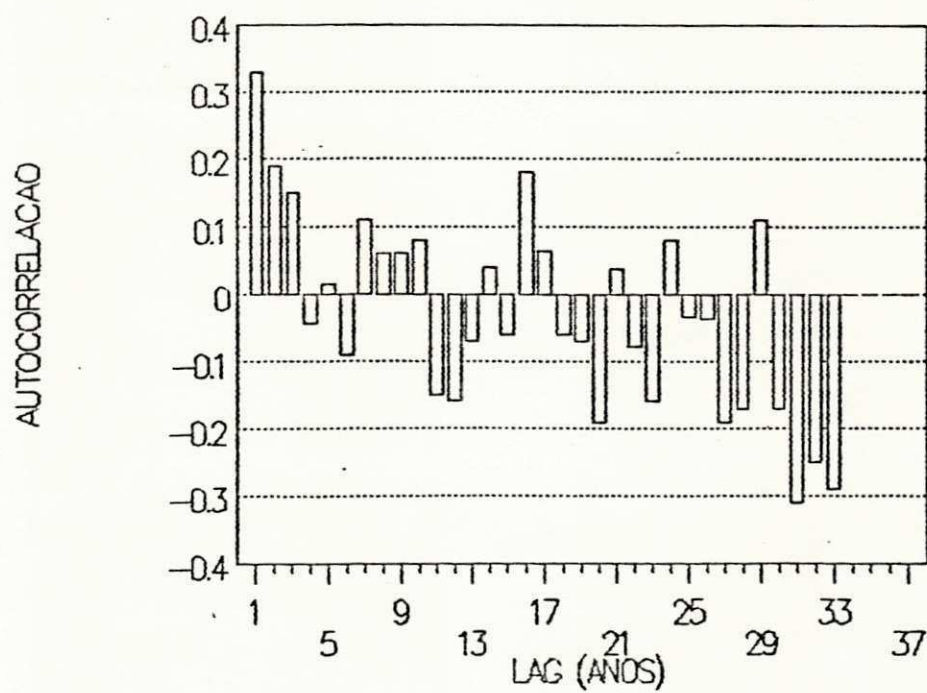


Fig. 4.10 - (Continuação). Idem c) Campina Grande; d) Jequié

Posto	χ^2 Nor.	ν	α (%)	χ^2 Tri.	ν	α (%)	χ^2 Gam.	ν	α (%)
Areia Branca	7,3	5	22	22,5	5	0	12,2	7	4,0
Quixeramobim	3,6	6	70	3,7	6	69	7,7	8	45,0
Maceió	8,2	7	33	9,7	7	20	10,1	8	25,0
Piranhas	20,0	6	0.4	13,5	6	3,7	12,2	5	3,5
Amarante	5,6	5	38	14,4	5	1,7	14,6	11	22,0
Barreiras	7,6	6	28	21,0	6	0,3	11,7	6	7,0
Ituaçu	9,6	7	22	10,4	7	18,0	19,0	7	0,8
Floresta	5,9	6	44	17,1	6	1,0	1,8	7	96,0

Tabela 4.6 - Níveis de significância correspondente as distribuições Normal, Triangular e Gama

Fica evidenciado que das 8 estações analisadas, 6 delas se ajustam melhor à distribuição Normal, 1 à distribuição Triangular e 1 à distribuição Gama.

4.6 - Efeito ENOS Sobre a Precipitação do Nordeste do Brasil

QUINN et al. (1978) apresentaram uma cronologia de eventos El Niño, classificando-os como "fortes", "moderados" e "fracos". O presente estudo examina os índices de Oscilação do Sul correspondentes aos anos de El Niño classificados como moderados e fortes. Os eventos fortes ocorreram nos anos: 1845, 1864, 1877, 1884, 1891, 1899, 1911, 1918, 1925, 1941, 1957. Mais um evento, conhecido como o mais forte do século, ocorreu no ano de 1983. Os eventos moderados ocorreram nos anos: 1868, 1871, 1880, 1887, 1896, 1902, 1905, 1914, 1929, 1939, 1953, 1965, 1972, e 1976.

Como os índices de Oscilação do Sul publicados pelo Climate

Diagnosics Bulletin, datam de 1935 até os dias atuais, e os dados de chuva do Nordeste ora analisados são em média de 1911 a 1984, as correlações de lag zero e de lag dois entre os IOS e os resíduos de precipitação do Nordeste foram efetuada para o período de 1935 a 1984 nos anos em que houve El Niño forte e moderado.

Existem vários índices que expressam a diferença de pressão entre Tahiti e Darwin. Os mais comuns são os de Trenberth, de Troup e do CAC. Embora todos tenham a base comum nas anomalias de pressão entre os dois centros de ação do IOS, a presente análise foi efetuada com o índice de Trenberth, no qual as séries de desvios de pressão de Tahiti e de Darwin são inicialmente padronizados com relação a média e o desvio padrão de cada série, e em seguida o IOS é expresso como a diferença dessas pressões reduzidas.

Os valores médios dos índices de Oscilação do Sul correspondentes aos anos em que houve El Niño forte e moderado são expostos na tabela 4.7. O Índice de Oscilação do Sul médio é calculado tendo por base um período de 6 meses (outubro a março). O IOS médio correspondente ao El Niño moderado de 1939/1940, por exemplo, será considerado como a média aritmética entre outubro de 1939 a março de 1940 dos Índices de Oscilação médio mensal. Os eventos fortes estão marcados com asteriscos, totalizando 3 eventos fortes e 5 eventos moderados. Os eventos fortes ocorreram nos anos de 1941 - 1942, 1957 - 1958 e 1982 - 1983, e os eventos moderados em 1939 - 1940, 1953 - 1954, 1965 - 1966, 1972 - 1973 e 1976 - 1977.

As cartas de desvios de precipitação dos anos hidrológicos correspondentes a ocorrência de El Niño moderado e forte (figuras 4.11 a 4.18) e a tabela 4.7 evidenciam que a chuva no Nordeste não está apenas relacionada com a fase do IOS, mas também com sua intensidade. Por exemplo, os El Niño fortes de 1941-1942, 1957-1958 e 1982-1983 obtiveram IOS médio, no período outubro a março, mais baixo no período estudado. As cartas de desvios de

precipitação nestes anos hidrológicos (figura 4.12, figura 4.14 e figura 4.18) evidenciam desvios negativos de precipitação em toda a região Nordeste. Por outro lado, os El Niño moderados de 1939-1940, 1953-1954, 1965-1966, 1972-1973 e 1976-1977 apresentaram IOS médio, no mesmo período, em geral, mais alto do que o IOS médio dos anos de El Niño forte. As cartas de desvios de precipitação dos anos hidrológicos em que ocorreu El Niño moderado (figura 4.11, figura 4.13, figura 4.15, figura 4.16 e figura 4.17), exibem desvios positivos praticamente em toda a região Nordeste, exceto no ano hidrológico de 1953-1954 (figura 4.13).

El Niño	<IOS >
1939-1940	-1,67
1941-1942 *	-2,13
1953-1954	-0,47
1957-1958 *	-1,52
1965-1966	-1,95
1972-1973	-1,50
1976-1977	-0,18
1982-1983 *	-5,58

Tabela 4.7 - Valores médio de IOS (outubro a março) correspondente aos anos que ocorreram El Niño forte ou moderado

Segundo ARAGÃO (1990), dada a ocorrência do El Niño, existe uma possibilidade maior do mesmo causar secas no ano seguinte ao início do evento, seguidas pela possibilidade de causar secas no mesmo ano do início e dois anos após o início do evento. Os eventos El Niño classificados como moderados, contribuem menos para que os totais pluviométricos sobre o Nordeste estejam abaixo

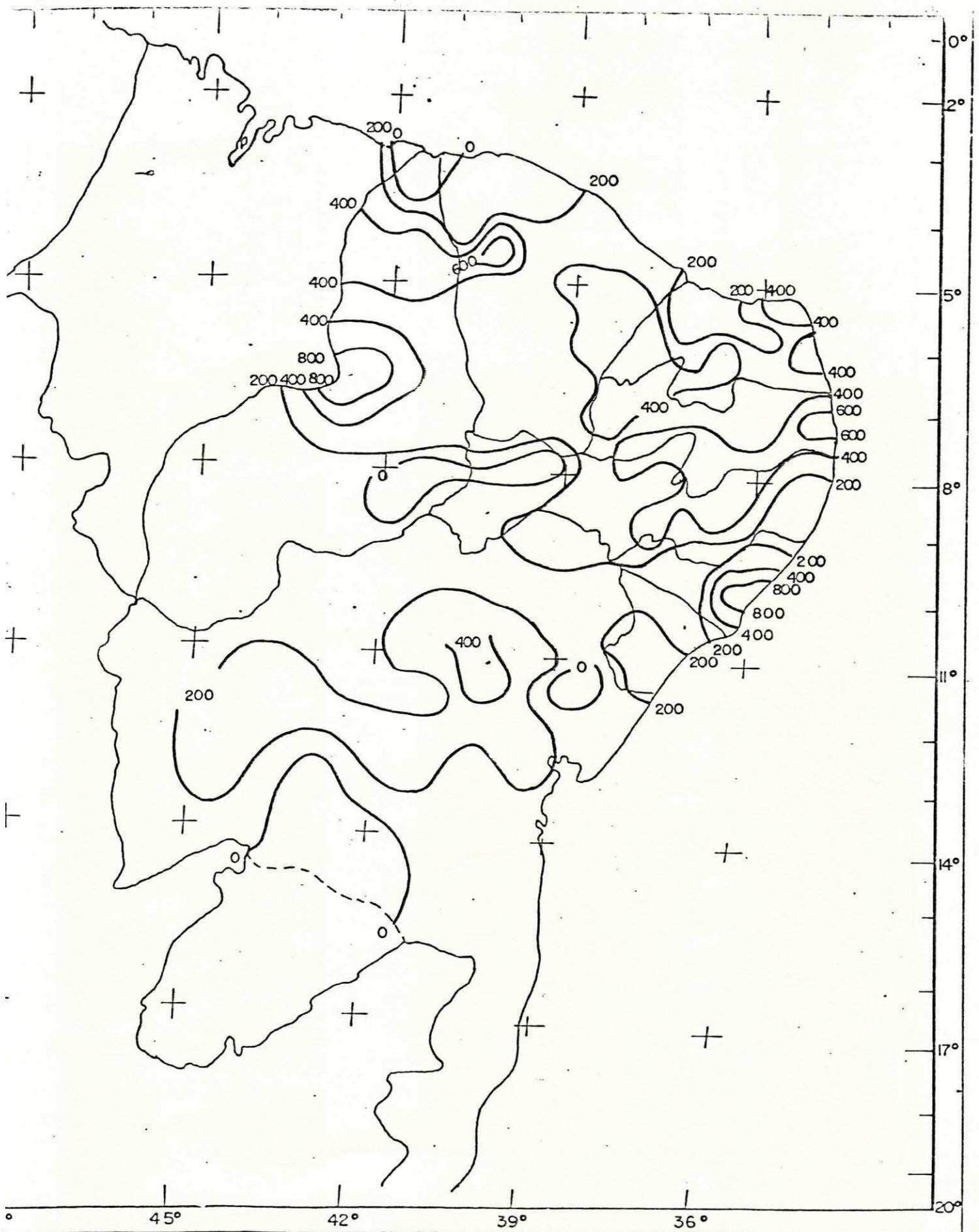


Fig. 4.11 - Isolinhas dos Desvios da Precipitação (mm) no ano hi-

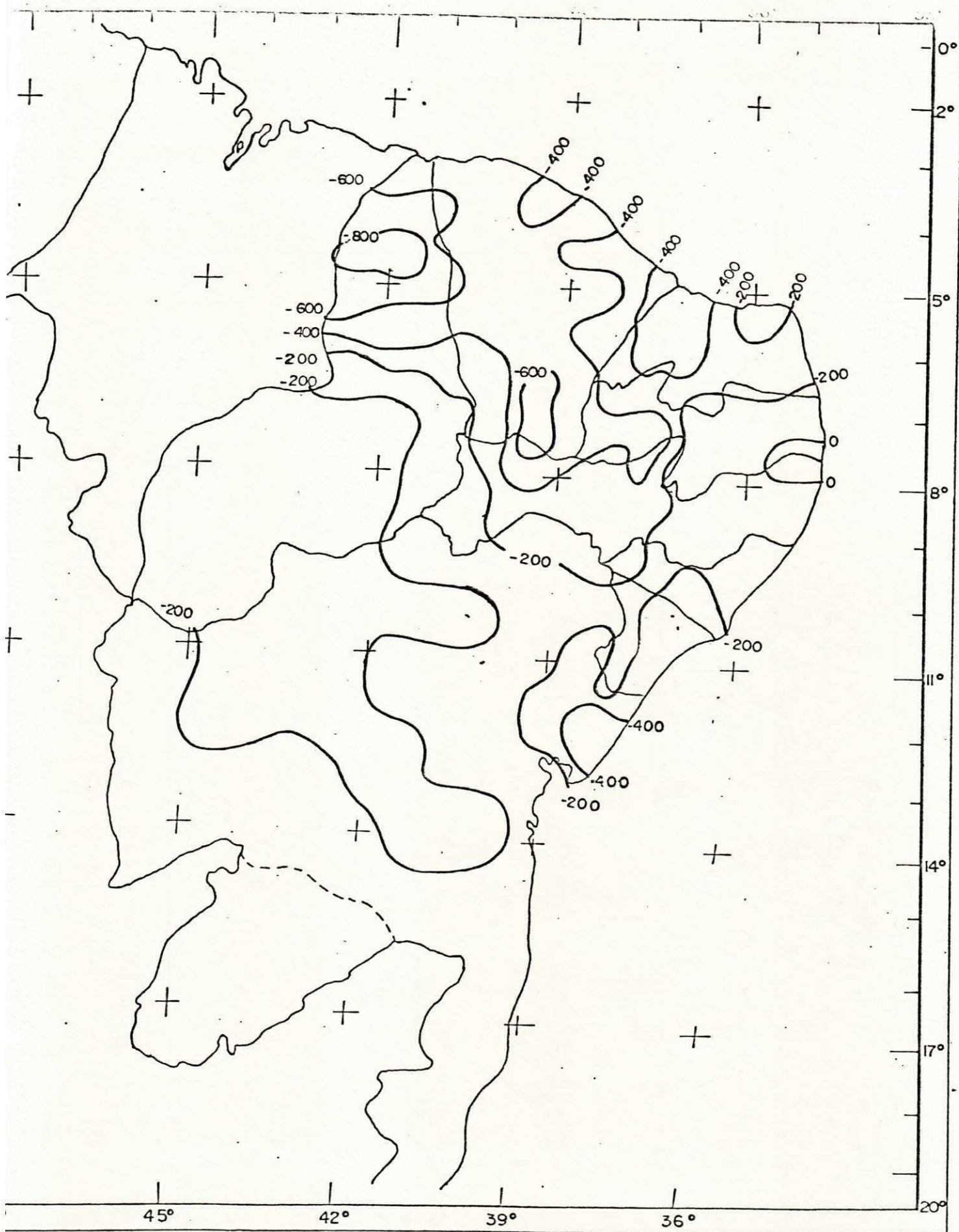


Fig. 4.12 - Isolinhas dos Desvios da Precipitação (mm) no ano hi-
malístico de 1941/1942 - El Niño Forte

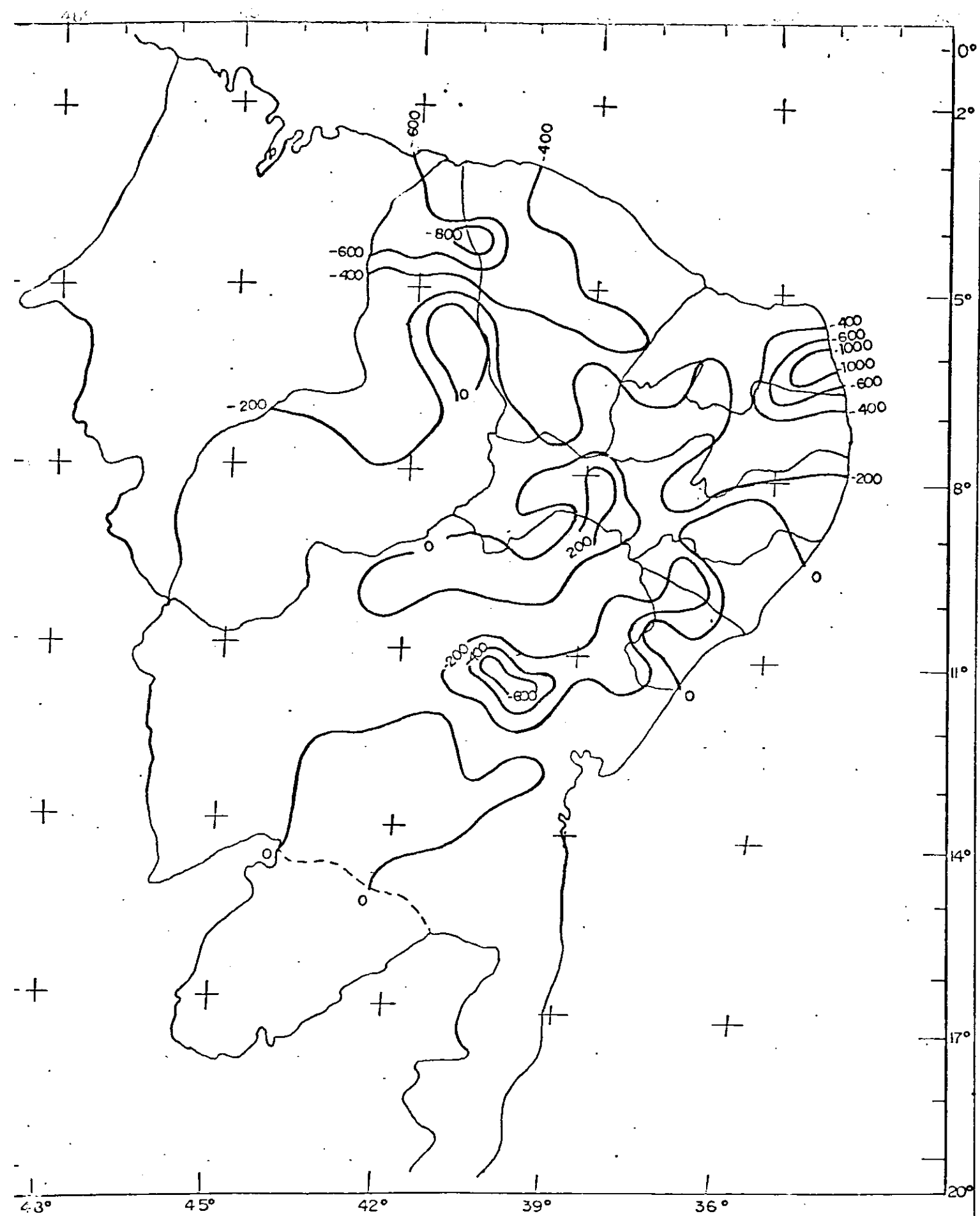


Fig. 4.13 - Isolinhas dos Desvios da Precipitação (mm) no ano hidrológico de 1953/1954 - El Niño Moderado

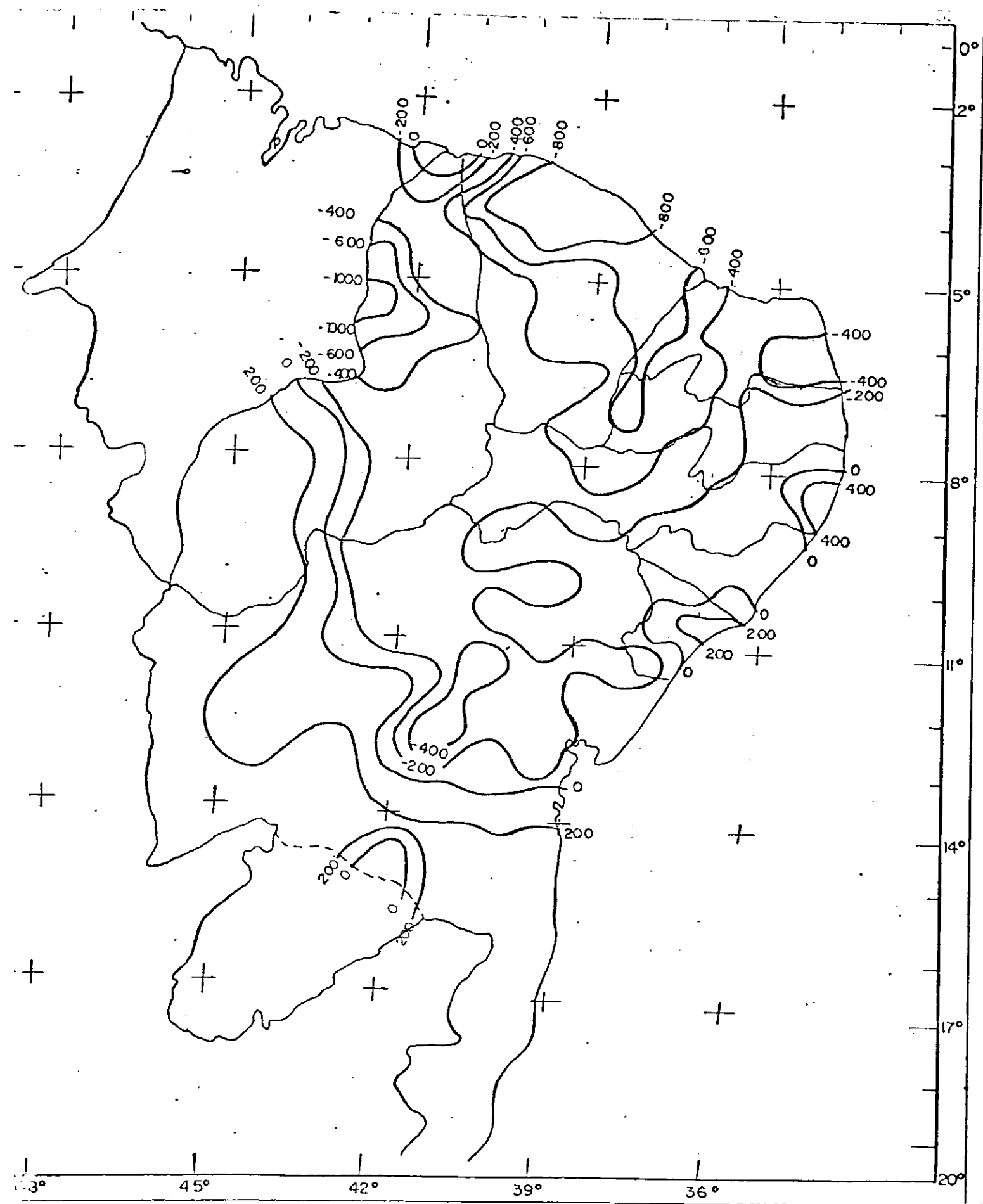


Fig. 4.14 - Isolinhas dos Desvios da Precipitação (mm) no ano hidrológico de 1957/1958 - El Niño Forte

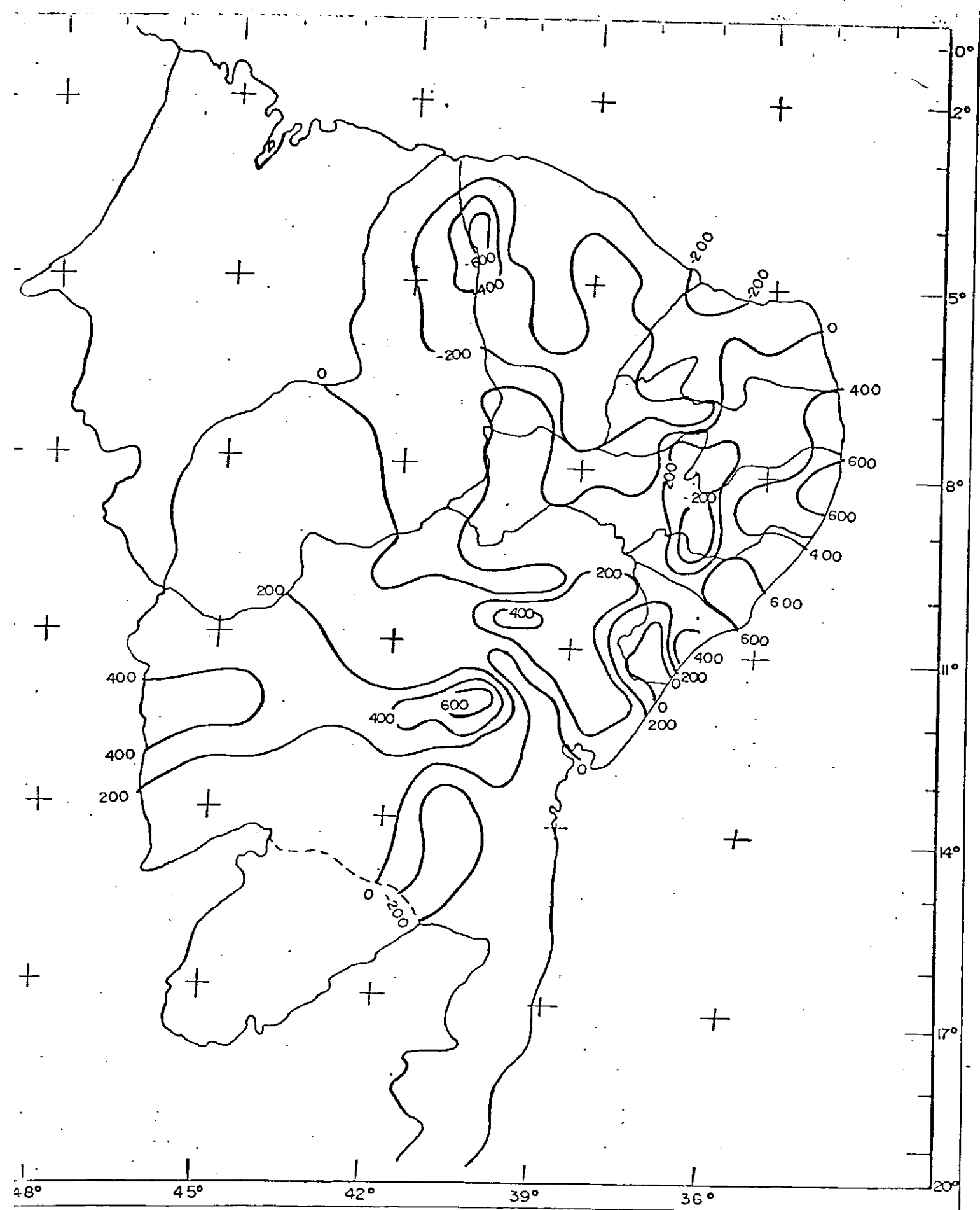


Fig. 4.15 - Isolinhas dos Desvios da Precipitação (mm) no ano hidrológico de 1965/1966 - El Niño Moderado

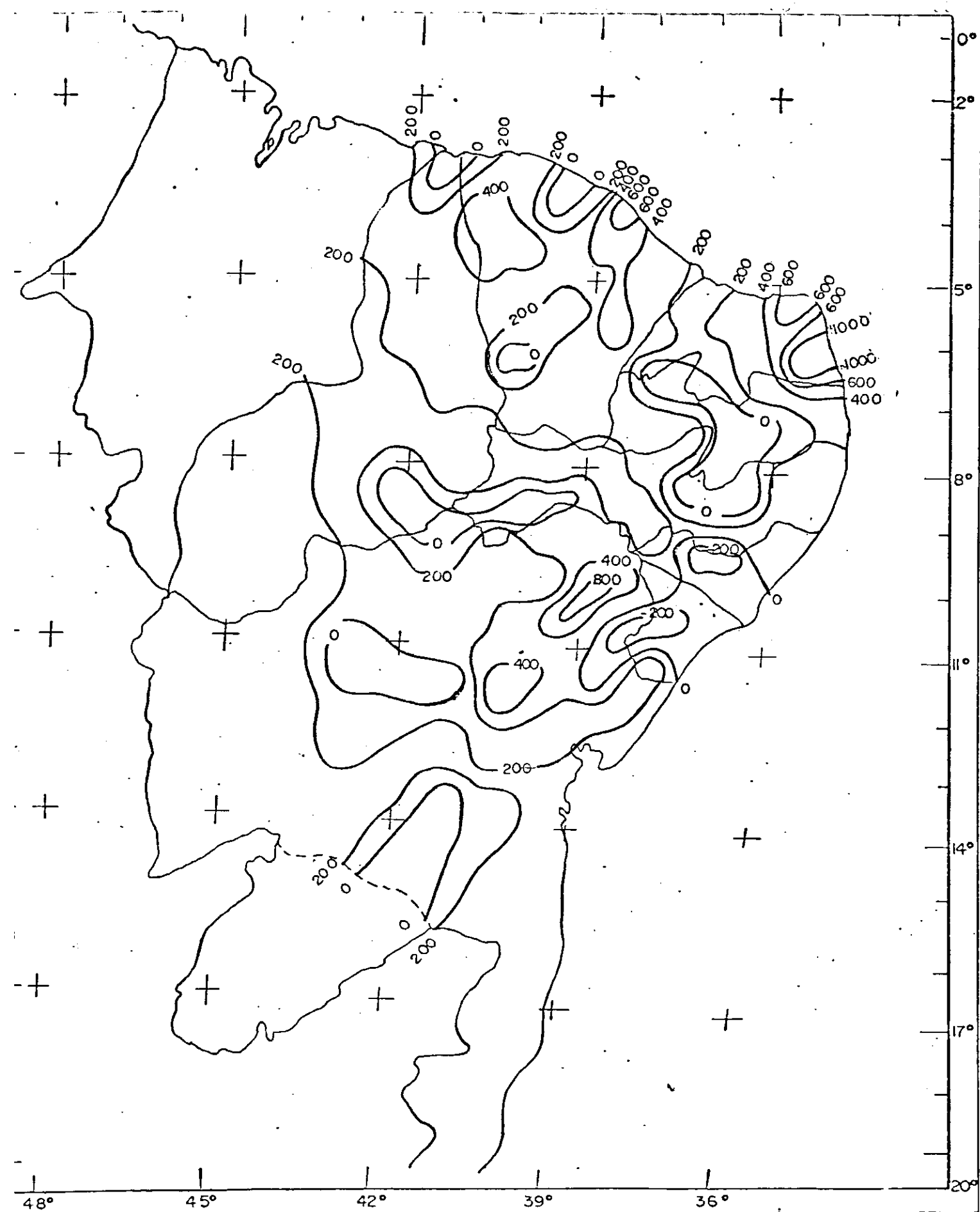


Fig. 4.16 - Isolinhas dos Desvios da Precipitação (mm) no ano hidrológico de 1972/1973 - El Niño Moderado

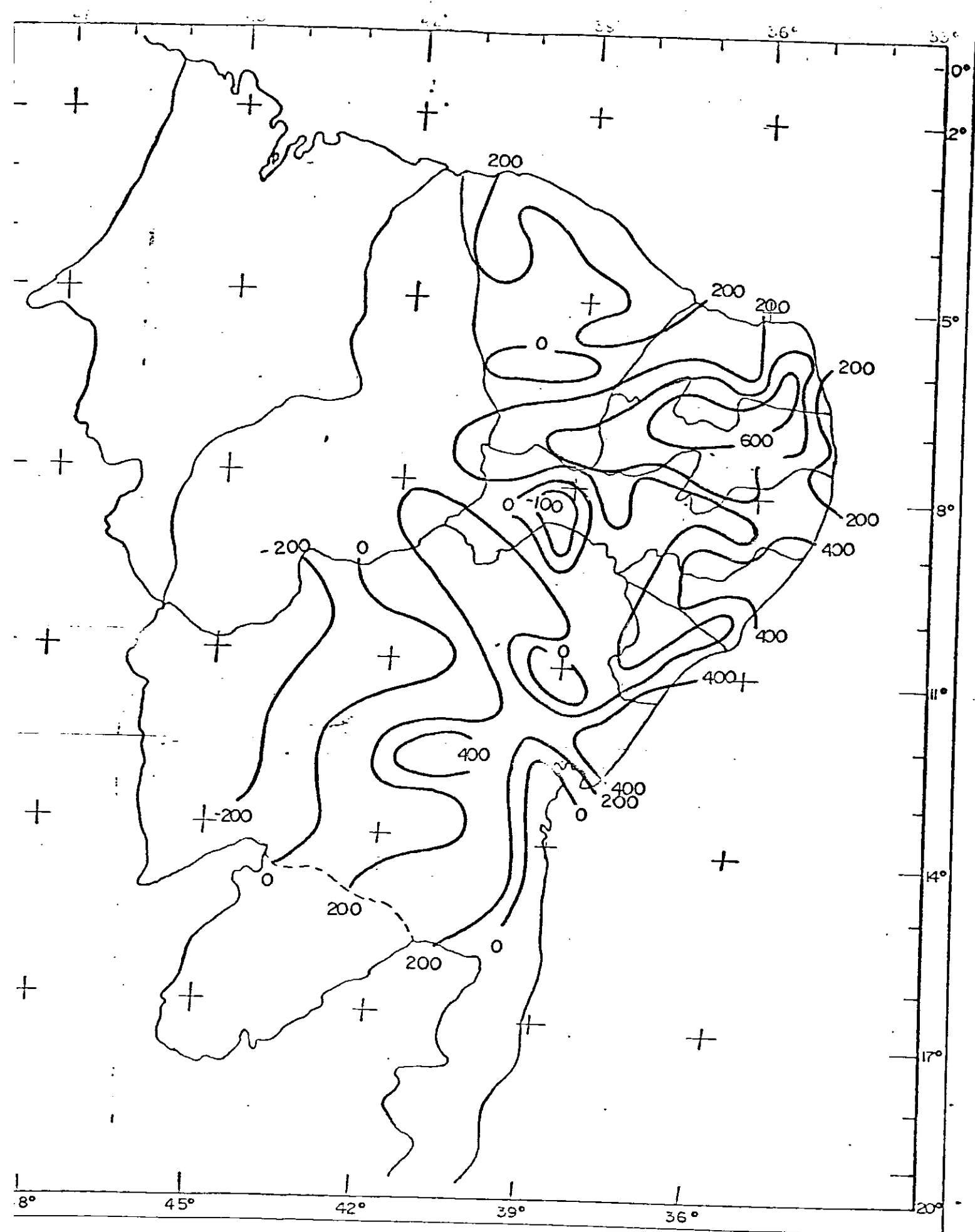


Fig. 4.17 - Isolinhas dos Desvios da Precipitação (mm) no ano hidrológico de 1976/1977 - El Niño Moderado

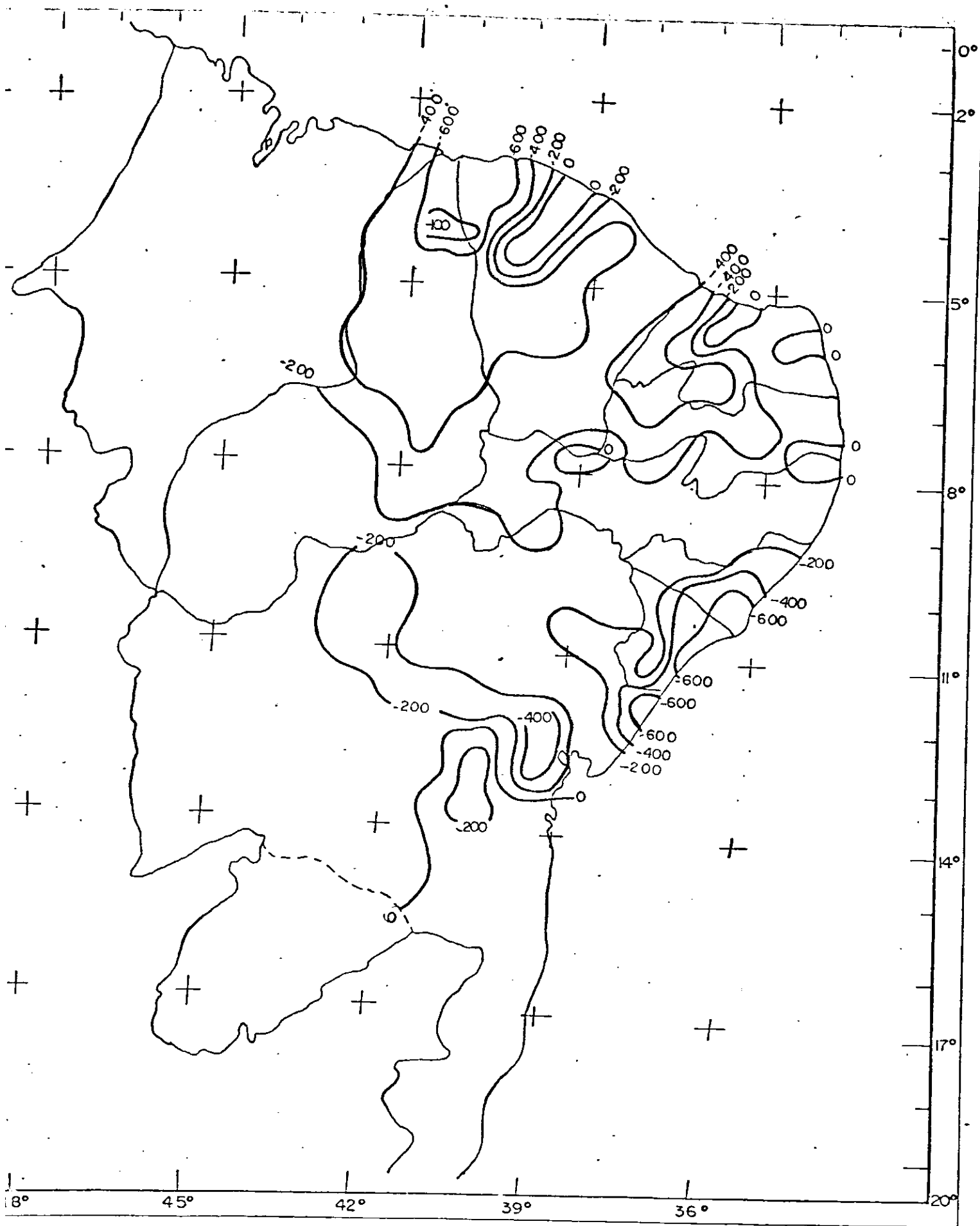


Fig. 4.18 - Isolinhas dos Desvios da Precipitação (mm) no ano hidrológico de 1982/1983 - El Niño Forte

da média. Possivelmente, isto ocorre devido a um retardamento do sistema terra-atmosfera em responder ao fenômeno ou pelo fato de que não é apenas o El Niño que provoca secas no Nordeste, como também fenômenos atmosféricos e oceânicos que ocorrem no Oceano Atlântico e ciclones na alta troposfera, entre outras causas.

Através de um exame detalhado das figuras 4.12 e 4.18 observam-se núcleos ou isolinhas negativas de desvios de precipitação em todos os anos que ocorreu El Niño forte e moderado (até mesmo no ano do evento moderado de 1939/1940 em que não houve seca no Nordeste). Os núcleos abrangem uma faixa do Nordeste localizada aproximadamente ao oeste do estado da Paraíba e ao norte do estado do Ceará e às vezes atingem parte dos estados de Pernambuco, Piauí e Rio Grande do Norte. Observa-se um núcleo de precipitação igual e inferior à média numa faixa que se estende desde o extremo sul do estado do Ceará passando a oeste do estado de Pernambuco até a região centro-sul do estado do Piauí. Por outro lado o exame das mesmas figuras mostra uma outra região do Nordeste, mais precisamente a região que se estende desde o litoral sul do estado da Paraíba, que por vezes atinge o sul do estado de Alagoas e passa pela zona da mata de Pernambuco, apresentando desvios positivos de precipitação em todos os anos de fortes e moderados El Niño. Até mesmo o ano de evento extremamente forte como o de 1982/1983 provocou nesta região um desvio em torno da média (figura 4.18).

4.7 - Correlação IOS X Desvios de Precipitação

(i) Lag zero

A figura 4.19 ilustra a distribuição espacial dos coeficientes de correlação de lag zero entre os índices de Oscilação do Sul médio (outubro a março) e desvios de precipitação do Nordeste referentes aos anos que ocorreu forte e moderado El Niño. A figura revela alguns núcleos de coeficientes

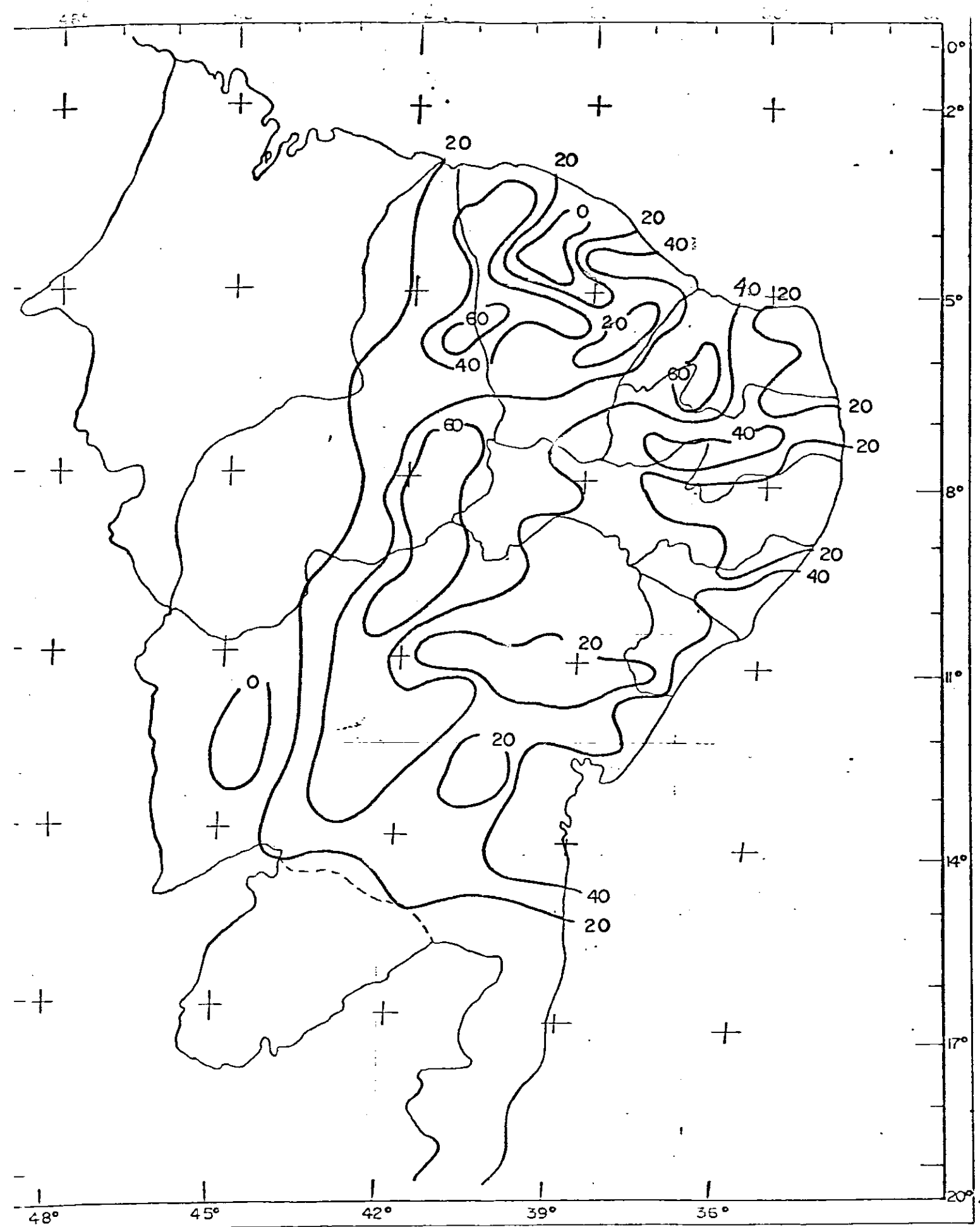


Fig. 4.19 - Distribuição do Coeficiente de Correlação (lag zero), em percentagem, entre Índice de Oscilação do Sul e

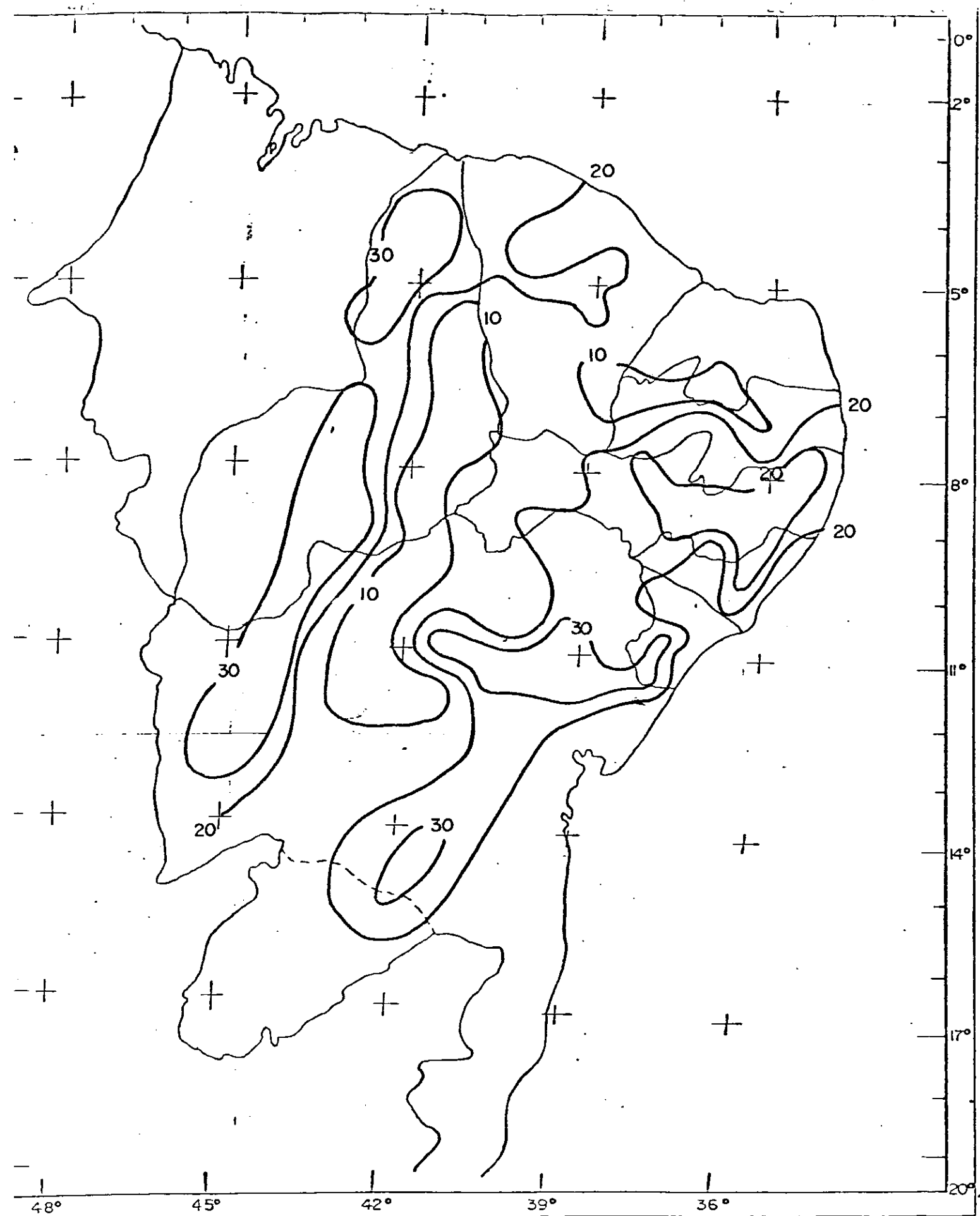


Fig. 4.20 - Nível de Significância (em %) Associado ao Coeficiente de Correlação (lag zero) entre Desvios de Precipitação e IOS

de correlação máximos localizados no norte do Nordeste, precisamente no centro do estado do Rio Grande do Norte, nordeste do estado da Piauí e finalmente um núcleo compreendendo o sudeste do estado do Piauí e noroeste do estado da Bahia. Exceto nestes três núcleos, que apresentam coeficiente de correlação de 0,60, o relacionamento entre IOS e precipitação abaixo da média ($r > 0$), no mesmo ano de ocorrência de El Niño forte ou moderado, é muito fraco.

Estes núcleos são estatisticamente significantes ao nível de 5% segundo o teste unilateral da distribuição de Student.

Na tentativa de melhor evidenciar o relacionamento entre IOS e desvios de precipitação foi calculado o nível de significância (segundo o teste de Student) correspondente a cada coeficiente de correlação, de lag zero, entre desvios de precipitação e IOS.

A análise da figura 4.20, revela núcleos de níveis de significância de 10% em torno da latitude de 6.5°S , abrangendo parte dos estados da Paraíba, Rio Grande do Norte e Ceará. Uma outra faixa de 10% desloca-se zonalmente desde o nordeste do estado do Piauí até noroeste da Bahia. Nas demais regiões do Nordeste, observa-se isolinhas de níveis de significância de 20% e 30% sugerindo que nestas regiões o relacionamento entre IOS e desvios precipitação abaixo da média é muito fraco.

Embora não sejam apresentadas figuras correspondentes a lag um, observou-se que os coeficientes de correlação entre IOS e desvios de precipitação, para este lag, são menores do que para lag zero em todas as estações analisadas.

(ii) Lag dois

Através da distribuição espacial dos coeficientes de correlação de lag dois entre IOS e desvios de precipitação

(figura 4.21), observa-se um bom relacionamento entre os dois fenômenos em algumas localidades do Nordeste. Coeficientes de correlação de $-0,75$ e $-0,50$, observados ao norte do Nordeste, indicam um bom relacionamento do IOS médio com desvios de precipitação acima da média, dois anos após a ocorrência de El Niño moderado ou forte, nesta região. Esta situação é melhor evidenciada através da figura 4.22, que exibe isolinhas de nível de significância (em %) associado ao coeficiente de correlação de lag dois entre desvios de precipitação e IOS.

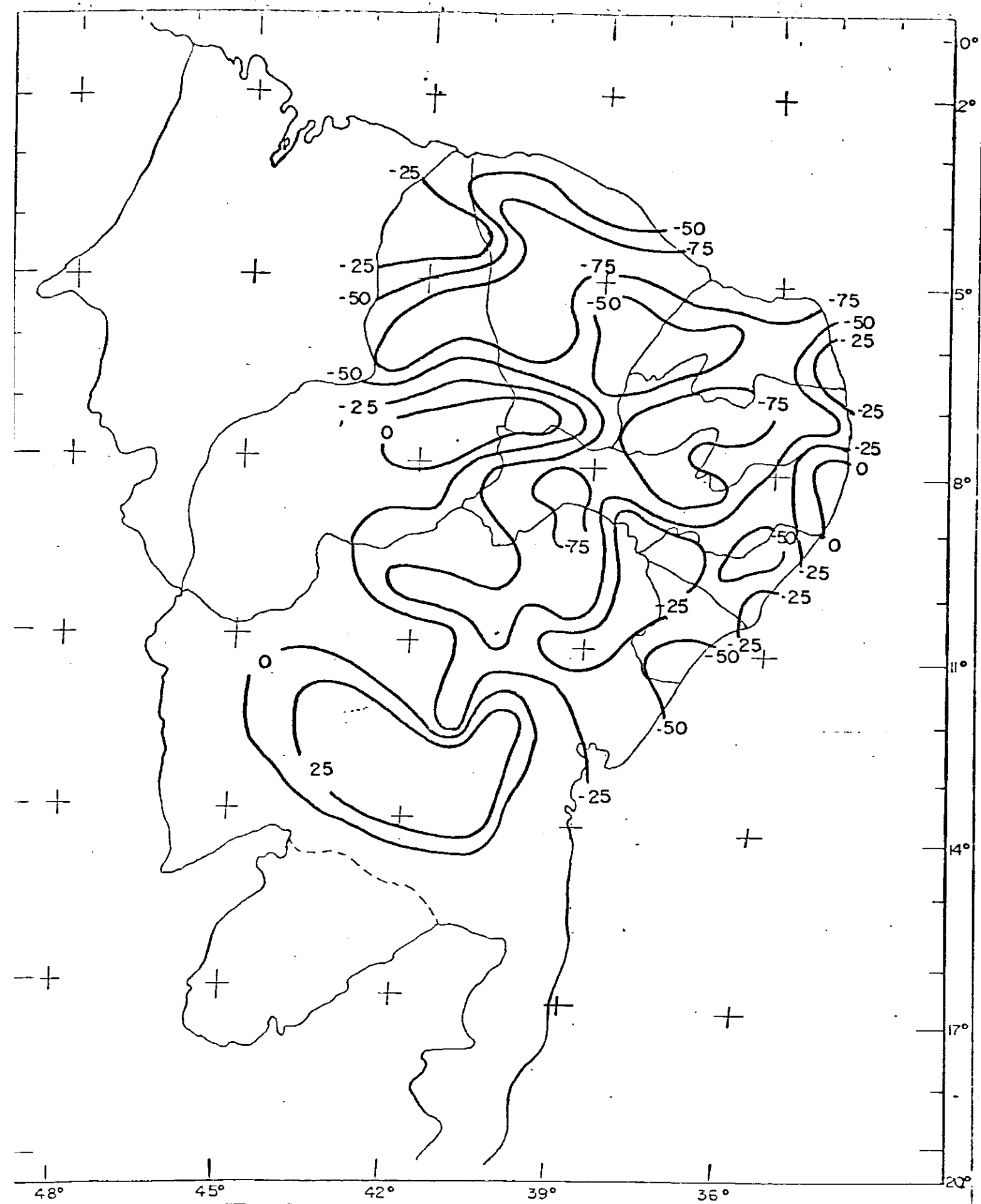


Fig. 4.21 - Distribuição do Coeficiente de Correlação (lag dois), em percentagem, entre Índice de Oscilação do Sul e Desvios de Precipitação

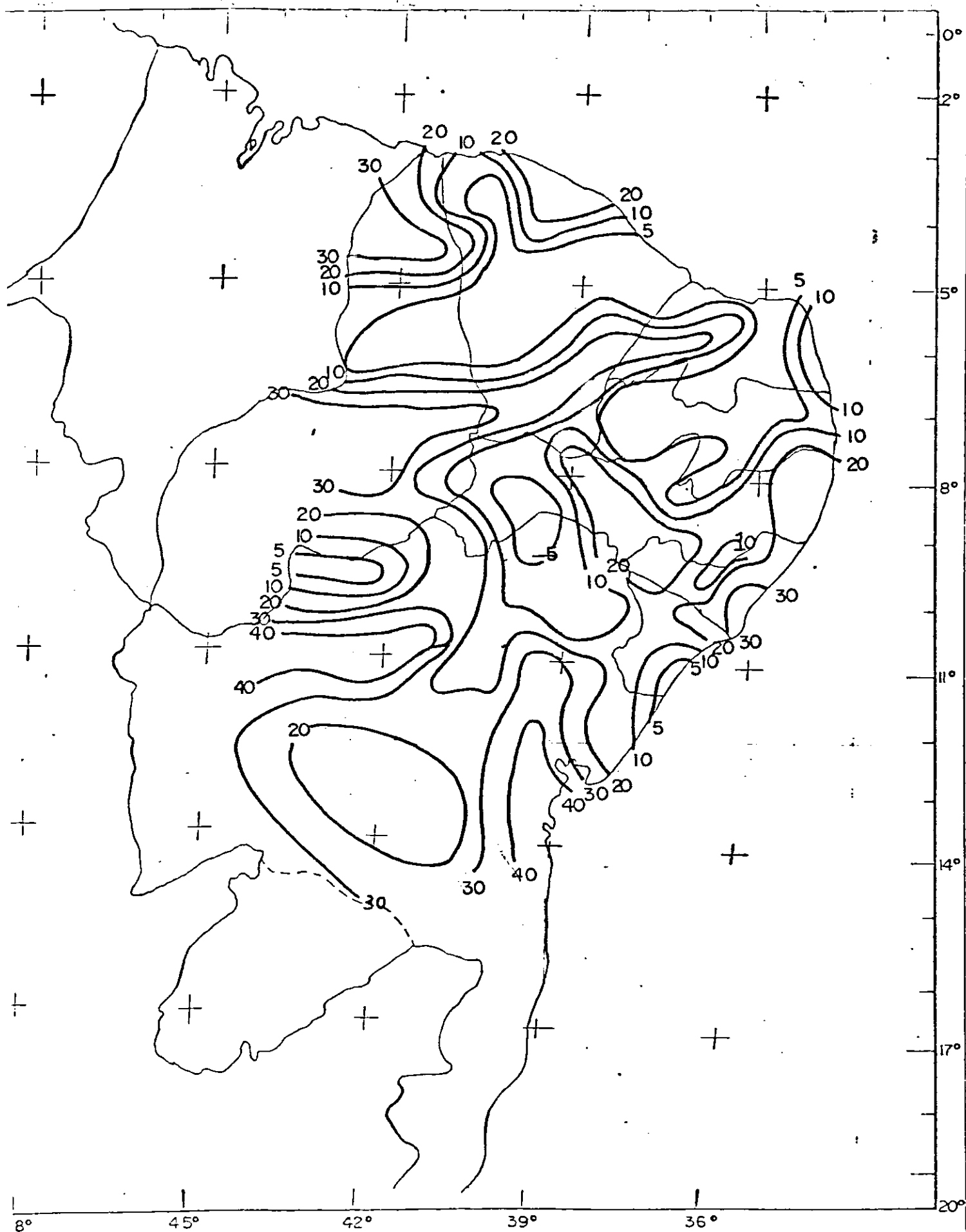


Fig. 4.22 - Nível de Significância (em %) Associado ao Coeficiente de Correlação (lag dois) entre Desvios de Precipitação.

5 - CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Com base nos resultados apresentados no capítulo anterior, pode-se chegar às seguintes conclusões relevantes:

- As séries temporais de precipitação do Nordeste do Brasil apresentam ciclos característicos em torno de 74, 26, 13, 3-4, 2-3 anos. Os ciclos de 13 e 26 anos são detectados praticamente em todas as séries de chuva do Nordeste. Evidenciam-se regiões em que os mesmos atingem contribuições significativas à variância segundo o teste de Fisher. O ciclo de 13 anos apresenta uma contribuição à variância significativa em poucas estações localizadas ao norte do Nordeste. O ciclo de 26 anos mostra-se fortemente significativo nas regiões próximas do litoral este, principalmente ao sul da latitude de 9°S, e em localidades centrais do Estado da Bahia. Os ciclos de 13 e 26 anos são simultaneamente significativos em apenas duas localidades (Fortaleza - CE e Catolé do Rocha - PB).

- Os níveis de significância (teste de Fisher) associados ao ciclo de 13 anos aumentam de 5% a 60% na direção Sul e do litoral para o interior, na parte Norte do NEB. Em seguida, de forma abrupta atingem níveis superiores a 95% de significância. Este comportamento sugere que a precipitação nesta região é influenciada por um fenômeno de larga escala que decresce de intensidade a medida que avança no semi-árido do NEB. Poderia ser o caso, por exemplo, da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT). Com relação a um fenômeno associado a ciclos de 26 anos e com influência predominante no litoral oriental, poder-se-ia cogitar em comportamentos oscilantes do anticiclone do Atlântico Sul.

- Uma vez subtraídos os ciclos aceitos como significantes pelo teste de Fisher, novos testes apropriados para análise de correlogramas sugerem que os resíduos são aleatórios a nível

de 5% de significância na maioria das estações, e a nível de 1% em todas elas. Todavia, procurando-se a presença de picos que se repetem sistematicamente para certos "lags" (notadamente o de 13 e o de 26 anos), esses níveis estariam introduzindo exigências excessivas para aceitar uma flutuação como não aleatória. Elevando o nível de significância a 10%, os valores críticos correspondentes permitem aceitar, em muitos casos, os ciclos de 13 e 26 anos como significativos.

— Considerando os desvios de precipitação com relação a média climatológica, o relacionamento entre IOS médio (outubro a março) e desvios da precipitação do ano hidrológico (outubro a setembro) nos anos de ocorrência de El Niño moderado ou forte mostrou-se fraco na maior parte do Nordeste. Todavia, observam-se núcleos com correlação positiva (desvios negativos) da ordem de 0,60, e nível de significância de 5%. Existe uma preferência do IOS ser associado com desvios positivos de precipitação, dois anos após a ocorrência de El Niño moderado ou forte. Neste caso, núcleos ao norte de 9°S exibem correlações superiores a 0,80, com nível de significância de 1%.

— Os modelos senoidais são pouco úteis nas previsões ano-a-ano de secas no Nordeste, uma vez que não são capazes de explicar mais de 50% da variância dos dados originais. Entretanto, se as componentes de alta frequência são filtradas por processos simples (por exemplo, uma média móvel de ordem 3), a combinação de alguns picos observados sugerem que, ao menos em tendência, alguma informação possa ser obtida sobre o comportamento das séries temporais.

— Considerando-se os ruídos como puramente aleatórios, a distribuição que melhor se ajusta a seus histogramas de frequência é usualmente a Normal, embora a Triangular ou a Gama possam ser mais apropriadas para algumas localidades.

Sugere-se para estudos posteriores, baseados em séries de precipitação anual,

- Atualizar séries temporais de pluviometria do NEB, incluindo os dados a partir de 1984, de forma a dispor de: 1) um maior número de séries com duração e período comum; 2) aumentar a densidade de informação na região. Espera-se que, dessa forma, resultem definidos com maior clareza os ciclos presentes nas séries de precipitação.
- Estender as análises de correlação às associações com a ZCIT, anticiclone do Atlântico Sul, e outros fenômenos relevantes de larga escala.
- Analisar com maior detalhamento a possibilidade de que o conjunto de ciclos detectados possam ser considerados harmônicos de um período maior (sugere-se 104 anos), de forma a construir funções previsoras de tendências na precipitação.
- Pelo ajuste dos resíduos a distribuições de probabilidades, tentar o prognóstico (a nível de probabilidade) para séries de precipitação anual no NEB.

6 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALEXANDERSSON, H. A Homogeneity Test Applied To Precipitation Data, *J. of Climatology*, vol. 6, 661-675. 1986.
- ARAGÃO. J.O.R. A General Circulation Model Investigation of the Atmospheric Response to El Niño Ph.D. dissertation. University of Miami Coral Gables. Florida, 144pp. 1986.
- ARAGÃO. J.O.R. Fatos Sobre o Fenômeno de El Niño e Sua Relação com às secas no Nordeste do Brasil. *Boletim da Sociedade Brasileira de Meteorologia*. vol. 14, 07pp, Nº 1. 1990.
- GIRARDI, C. & TEXEIRA L. Prognóstico do Tempo a longo prazo. Relatório Técnico ECA, IAE/CTA, São José dos Campos, 18pp. 1978.
- HASTENRATH, S. Prediction of Northeast Brazil Rainfall Anomalies. *J. of Climate*. 893-904. 1990.
- JENKINS, G.M. & WATTS, D.G. *Spectral Analysis and its Applications*. São Francisco. Holden Day. 1968.
- KANE, R.P. e SOUZA, E.G. Power Spectrum Analysis of Various Annual Rainfall Series in the Eastern Part of Brazil. *Revista Brasileira de Meteorologia*, vol. 3, 257-267. 1988.
- KANTOR, I.J. Previsibilidade da Série de Precipitação de Chuvas de Fortaleza pelo Método da Máxima Entropia de Burg. In: Congresso Brasileiro de Meteorologia, 2. Pelotas. Anais, 4: 08pp. 1982.
- KIRYLA, K.I. & HAMEED, S. Harmonic Analysis of the Seasonal Cycle in Precipitation over United States: A Comparison Between Observations and a General Circulation Model. *J. of Climate* 1463-1475. 1989.

MARKHAM, C. G. Apparent Periodicities in Rainfall at Fortaleza, Ceará, Brazil. *J. Appl. Meteor.*, 04pp. 1974.

MOLION, L.C.B. Secas o Eterno Retorno. *Ciência Hoje*. Vol. 3. 1985.

MOLION, L.C.B. *The Climatology of Droughts in NE Brazil and Droughts Prediction*. Instituto de Pesquisas Espaciais (INPE/CNPQ). São José dos Campos, 23pp. 1985.

MONTE, E.M. *Estudos de Periodicidades: Séries Temporais de Chuvas no Nordeste do Brasil*. Dissertação Mestrado em Meteorologia, Campina Grande, 107pp. 1986.

MORETTIN, P.A. & TOLOI, C.M. *Séries Temporais*. Coleção Métodos Quantitativos, Atual Editora Ltda., São Paulo, 135pp. 1986.

MOURA, A.D. & SHUKLA, J. On the Dynamics of Droughts in Northeast Brazil: Theory and Numerical Experiments with a General Circulation Model. *J. Atmos. Sciences*. vol. 38. 1981.

NIMER, E. Clima. In: *Geografia do Brasil. Região Nordeste*, vol.2, pp. 47-84 IBGE, Rio de Janeiro. 1977.

NOBRE, C.A., YANASSE, H.H, YANASSE, C.C.F. *Previsão de secas no Nordeste pelo Método das Periodicidades: Usos e Abusos*. São José dos Campos, INPE - 2344-rpe/407. pp67. 1982.

QUINN, W. H., ZOPF, D. O., SHORT, K. S. and KANG, R. T. W. K. Historical Trends and Statistics of the Southern Oscillation, EL Niño and Indonesian Droughts, *Fish. Bull*, 76. 663-678. 1978.

SERRA, A. As Secas do Nordeste. *Boletim Geográfico* Vol. 4, 132pp. 1956.

SHIMSHONE, M. On Fisher's Test of Significance in Harmonic

Analysis. Geophys. I, R. Astro. Soc Vol. 23, 05pp, 1980.

SPIEGEL, M. R. *Estatística*. São Paulo. Ed. Mc Graw-Hill do Brasil. 1976.

STRANG, D.M.G. *Análise Climatológica das Normais Pluviométricas do Nordeste Brasileiro*. IAE-M02/72, CTA. São José dos Campos. pp29. 1972.

SUDENE-DPG-PRN-HME. *Dados Pluviométricos Mensais do Nordeste Recife*. 1990.

TABONY, R.C. The Estimation of Missing Climatological Data, *J. of Climatology*, vol. 3, 297-314. 1983.

XAVIER, T. de M^a B. S., & XAVIER, A.F.S. Periodicidades nas Series Pluviométricas de Fortaleza e Quixeramobim (CE) e de Mossoró(RN). *Anais Simpósio Brasileiro de Hidrologia e Recursos Hídricos*, Fortaleza, vol. 1, 18pp. 1981.

XAVIER, T. de M^a B.S., & XAVIER, A.F.S. *Análise Espacial de Padrões Pluviométricos para a Região Nordeste do Brasil*. *Anais, II Congresso Brasileiro de Meteorologia*, Pelotas, vol. 1, Pelotas, 239-274. 1982.

WONG, K.K. & NICHOLLS, N. Dependence of Rainfall variability on Mean Rainfall, Latitude, and the Southern Oscillation. *J. of Climate*. 163-171. 1990.

WORKSHOP Sobre Previsão de Secas para o Nordeste do Brasil. Relatório, São José dos Campos, 68pp. 1980.

YEVJEVICH, V. *Stochastic Processes in Hydrology*. Fort Collins, Colorado. 1971.