



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO  
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL  
TECNOLOGIA AMBIENTAL E RECURSOS HÍDRICOS**

## **TESE DE DOUTORADO**

### ***EVENTOS EXTREMOS MÁXIMOS DE PRECIPITAÇÃO NA SUB- BACIA 39 E O CASO DO ALERTA NA CIDADE DE RECIFE-PE***

Autor: **JOÃO HIPÓLITO PAIVA DE BRITTO SALGUEIRO**

Orientador: **SUZANA MARIA GICO LIMA MONTENEGRO**

Co-orientador: **EBER JOSÉ DE ANDRADE PINTO**

Recife

2015



**Universidade Federal de Pernambuco  
Centro de Tecnologia e Geociências  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil  
Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos**

João Hipólito Paiva de Britto Salgueiro

**Eventos extremos máximos de precipitação na Sub-bacia 39 e o caso  
do alerta na cidade de Recife-PE**

Tese de Doutorado submetida ao corpo docente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco - UFPE como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Doutor em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos.

Orientadora: Prof<sup>ª</sup>. Dra. Suzana Maria Gico Lima Montenegro

Co-orientador: Prof. Dr. Eber José de Andrade Pinto

Recife  
2015

Catálogo na fonte  
Bibliotecária: Rosineide Mesquita Gonçalves Luz / CRB4-1361 (BCTG)

S164e Salgueiro, João Hipólito Paiva de Britto.  
Eventos extremos máximos de precipitação na Sub-bacia 39 e o caso do  
alerta na cidade de Recife-PE / João Hipólito Paiva de Britto Salgueiro –  
Recife: O Autor, 2015.  
195f., il., figs., gráfs., tabs.

Orientadora: Profa. Dra. Suzana Maria Gico Lima Montenegro.  
Coorientador: Prof. Dr. Eber José de Andrade Pinto.

Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG.  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2015.  
Inclui Referências e Anexos.

1. Engenharia Civil. 2. Chuva intensa. 3. Estacionariedade da  
precipitação. 4. Desastre natural. I. Montenegro, Suzana Maria Gico  
Lima (Orientadora). II. Pinto, Eber José de Andrade (Coorientador).  
III. Título.

624 CDD (22.ed) UFPE/BCTG-2015/ 292



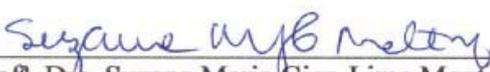
UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

A Comissão Examinadora da Defesa de Tese de Doutorado

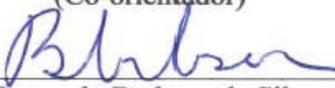
**Eventos extremos máximos de precipitação na Sub-bacia 39 e o caso do alerta na cidade de Recife-PE**

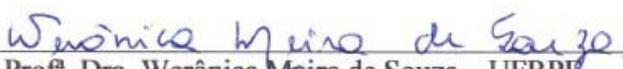
Defendida em 02 de outubro de 2015 por: João Hipólito Paiva de Britto Salgueiro

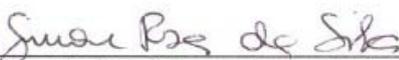
Considera o candidato APROVADO:

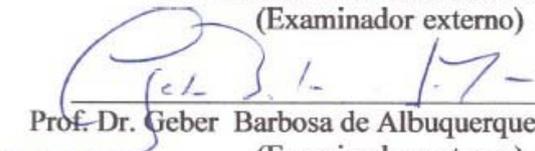
  
Prof.<sup>a</sup>. Dra. Suzana Maria Gico Lima Montenegro – UFPE  
(Orientadora)

  
Prof. Dr. Eber José de Andrade Pinto – UFMG  
(Co-orientador)

  
Prof. Dr. Bernardo Barbosa da Silva – UFPE  
(Examinador interno)

  
Prof.<sup>a</sup>. Dra. Werônica Meira de Souza – UFRPE  
(Examinador externo)

  
Prof.<sup>a</sup>. Dra. Simone Rosa da Silva – UPE  
(Examinador externo)

  
Prof. Dr. Geber Barbosa de Albuquerque Moura – UFRPE  
(Examinador externo)

Recife  
2015

## DEDICATÓRIA

*Dedico com todo meu afeto:  
A minha esposa Leidjane;  
A minha filha Camila;  
A minha prima Christina e demais familiares e amigos.*

## AGRADECIMENTOS

Agradeço, acima de tudo e de todos, à Inteligência Suprema e causa primária de todas as coisas (Deus), por ter me permitido mais esta realização, como também ao Núcleo Espírita Jesus no Lar, pelo acolhimento e vibrações emanadas em meu favor.

Aos meus familiares, em especial à minha esposa e filha, Leidjane e Camila, por terem compartilhado comigo todos os momentos dessa jornada, e à minha prima Christina por todo o apoio dedicado.

A todos que fazem o Serviço Geológico do Brasil, especialmente ao Chefe do Departamento de Hidrologia, Claudio F. Peixinho; ao Chefe da Divisão de Hidrologia Aplicada, Achilles Monteiro (*In memoriam*); aos Superintendentes Regionais do Recife: José Wilson Temóteo e Waldir Duarte Filho; aos demais gestores: Eng. José Carlos da Silva, Eng. Adriano Santos, Eng. Fábio da Costa, Geo. Dunaldson Alcoforado e Eng<sup>a</sup> Keyla Almeida, pelo apoio e confiança no cumprimento desta tarefa. Extensivo também a Geógrafa Ivete Almeida, ao Eng<sup>o</sup> Robson de Carlo e à Estagiária Andréa Fonseca, pela ajuda em assuntos de informática, ao Eng<sup>o</sup> Carlos E. Dantas pelo apoio ao banco de dados, e às Secretárias Joyce Anita e Taynara Gonçalves, pela importante colaboração na preparação dos volumes.

Aos professores Dra. Suzana Montenegro da UFPE e Dr. Eber de Andrade Pinto da UFMG, pelas orientações, apoios, e pela honra de poder compartilhar suas experiências acadêmicas. Ao professor Dr. Bernardo Barbosa da UFPE, por ter contado sempre com sua colaboração. Aos Professores das disciplinas cursadas na UFPE: Jaime Cabral, Roberto Azevedo, Marcos Vieira e Alfredo Ribeiro, pelos conhecimentos adquiridos. Ao Professor Geber Barbosa, da UFRPE. Aos colegas de luta na época: Albert Einstein, Victor Coelho, Roberto Omena e Glauber Moura. Ao Meteorologista Raimundo Jaido do INMET pela contribuição prestada. À Andrea Negromonte, Secretária da Pós-graduação em Engenharia Civil da UFPE e sua assistente Claudiana.

À Professora Dra. Werônica Meira da UAG/UFRPE pelo apoio e treinamento de *software*. Aos Meteorologistas da APAC, Patrice Oliveira e Maria Aparecida Ferreira, por toda a colaboração. Às informações fornecidas pela PCR, através do Eng. Pedro de Oliveira da EMLURB e Coronel Cássio da SEDEC, e aos trabalhos desenvolvidos pelos servidores da CODECIPE.

Às instituições que forneceram os dados hidrológicos, como o INMET, ANA/CPRM-SGB, APAC, AESA, SEMARH – AL e SUDENE. Ao FINEP e ao Projeto REHIDRO 1830. E aos fornecedores dos *Softwares*: *RClimdex*, *Trend*, *Hidroplu*, *Statistica* e *Action*. E, finalmente, aos Professores que aceitaram o convite para participar da banca examinadora e todos os presentes na plateia, meus sinceros agradecimentos.

*“Existe somente uma idade para a gente ser feliz, somente uma época na vida de cada pessoa em que é possível sonhar, fazer planos e ter energia bastante para realizá-los. Essa idade tão fugaz na vida da gente chama-se presente e tem a duração do instante que passa”.*

*Autor desconhecido*

## RESUMO

O aquecimento global vem preocupando a humanidade e os cientistas. Os efeitos por ele desencadeados, como os desastres naturais causados pelos extremos climáticos, desequilibra sistematicamente o ciclo hidrológico. As anomalias da temperatura da superfície do mar – TSM provocam os fenômenos *El Niño* e *La Niña* no oceano Pacífico e o Dipolo do Atlântico no oceano Atlântico. Esses fenômenos têm evidenciado regimes de secas ou enchentes em vários locais do Planeta, entre eles o Nordeste Brasileiro – NEB. O Painel Intergovernamental de Mudanças climáticas – IPCC previu para diversos cenários futuros ocorrências de secas mais intensas nos trópicos e subtropicais, como também o aumento da frequência dos eventos fortes de precipitação sobre a maior parte da Terra. A parte leste do NEB vem frequentemente sofrendo com desastres naturais decorrentes das chuvas intensas precipitadas. Para melhor compreender o comportamento pluviométrico dos regimes extremos máximos nessa parte do NEB, foi escolhida para compor a área deste estudo, a Sub-bacia 39, localizada na Região Hidrográfica Atlântico Nordeste Oriental. Para isso, foram utilizadas as séries pluviométricas de longos períodos medidas em 16 estações no interior dessa área, sendo a série da cidade de Recife submetida a uma investigação sobre o comportamento da precipitação diária de 30 mm, considerada o alerta para a cidade, por sua capacidade de promover alagamentos e deslizamentos de encostas. As etapas metodológicas adotadas foram compostas pela detecção de tendências e mudanças no comportamento da precipitação pluviométrica, pela análise das alterações na frequência e finalmente pela verificação da influência da TSM nos eventos extremos máximos, a partir da precipitação diária máxima anual – PDMA. Os resultados mostraram que houve crescimento dessas variáveis nas regiões úmidas e subúmidas, evidenciando o dipolo do Atlântico como o sistema mais responsável pelos eventos extremos máximos, considerando também a favorabilidade de *La Niña* sobre a pouca influência do episódio *El Niño*.

Palavras-chave: 1 – Chuva intensa, 2 – Estacionariedade da precipitação, 3 – Desastre natural.

## **ABSTRACT**

Global warming is worrying mankind and scientists. The effects triggered by it, such as natural disasters caused by extreme weather, systematically upsets the hydrological cycle. The anomalies of sea surface temperature – SST cause the phenomena El Niño and La Niña in the Pacific Ocean Dipole and the Atlantic in the Atlantic Ocean. These phenomena have shown drought or flooding regimes in various parts of the planet, including the Brazilian Northeast – NEB. The Intergovernmental Panel on Climate Change – IPCC predicted for various future scenarios instances of most intense drought in the tropics and subtropics, as well as the increased frequency of heavy precipitation events over most of the Earth. The eastern part of the NEB is often suffering from natural disasters resulting from heavy rains precipitated. To better understand the behavior of the maximum extreme rainfall regimes in this part of the NEB, has been selected for inclusion in the study area, the Sub-basin 39, located in the Eastern Northeast Atlantic Hydrographic Region. For this, the rainfall series of long periods measures were used in 16 stations within that area, and the number of Recife subjected to an investigation into the behavior of daily rainfall of 30 mm, considered the alert for the city, in ability to promote flooding and landslides. The methodological steps taken were composed by detecting trends and changes in the behavior of rainfall, the analysis of changes in the frequency and finally the verification of the influence of TSM in the maximum extreme events, from the annual maximum daily precipitation - PDMA. The results showed growth of these variables in the humid and sub-humid regions, highlighting the dipole of the Atlantic as the system most responsible for the maximum extreme events, also considering the favorability of La Niña on the little influence of the El Nino episode.

Keywords: 1 – Heavy rain, 2 – Stationarity of precipitation, 3 – Natural disaster.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1	Esquema simplificado da metodologia.....	04
Figura 2.1	Esquema da circulação geral da atmosfera com posição das células de circulação vertical e os ventos típicos próximos à superfície terrestre.....	22
Figura 2.2	Regiões do Pacífico Equatorial usadas para determinação das anomalias da TSM em eventos de <i>El Niño</i> .....	24
Figura 2.3	Regiões do Atlântico Tropical usadas para determinação dos TNAI e TSAI, associados aos dipolos de anomalias das TSM do Atlântico.....	24
Figura 3.1	Localização da Região Hidrográfica Atlântico Nordeste Oriental no Brasil...	43
Figura 3.2	Localização da Sub-bacia 39 na Região Hidrográfica Atlântico Nordeste Oriental.....	44
Figura 3.3	Interseção da Sub-bacia 39 com os estados do Nordeste brasileiro.....	44
Figura 3.4	Climatologia da Sub-bacia 39.....	45
Figura 3.5	Isoietas anuais média da Sub-bacia 39 com hietogramas das precipitações mensais em ano civil.....	47
Figura 3.6	Relevo da Sub-bacia 39.....	47
Figura 3.7	Unidades hídricas da Sub-bacia 39 de acordo com a Tabela 3.2.....	48
Figura 3.8	Localização da Região Metropolitana do Recife em Pernambuco.....	51
Figura 3.9	Localização da cidade de Recife na Região Metropolitana de Recife.....	51
Figura 3.10	Média dos totais mensais da precipitação na cidade de Recife de 1943 a 2012.....	52
Figura 3.11	Distribuição espacial das estações pluviométricas sobre a divisão hidrográfica.....	55
Figura 3.12	Divulgação de alerta emitido pela APAC em jornal de grande circulação em Pernambuco.....	82
Figura 3.13	Divulgação de alerta emitido pela APAC em jornal de grande circulação em Pernambuco.....	83
Figura 3.14	Divulgação de alerta emitido pela APAC em jornal de grande circulação em Pernambuco.....	83
Figura 4.1	Análise espacial das tendências significativas com teste estatístico.....	92
Figura 4.2	Análise espacial das tendências significativas com índices pluviométricos....	93
Figura 4.3	Influência do clima semiárido na Sub-bacia 39.....	94
Figura 4.4	Análise espacial das mudanças significativas com teste estatístico.....	97
Figura 4.5a	Análise das estatísticas e intervalos em confiança.....	105
Figura 4.5b	Análise das estatísticas e intervalos de confiança.....	106
Figura 4.5c	Análise das estatísticas e intervalos de confiança.....	107
Figura 4.6	Análise de frequência de PDMA em Alhandra.....	114
Figura 4.7	Análise de frequência de PDMA em Atalaia.....	115
Figura 4.8	Análise de frequência de PDMA em Bom Jardim.....	116
Figura 4.9	Análise de frequência de PDMA em Caruaru.....	117
Figura 4.10	Análise de frequência de PDMA em Garanhuns.....	118
Figura 4.11	Análise de frequência de PDMA em Itambé.....	119
Figura 4.12	Análise de frequência de PDMA em João Pessoa.....	120
Figura 4.13	Análise de frequência de PDMA em Maceió.....	121
Figura 4.14	Análise de frequência de PDMA em Palmares.....	122
Figura 4.15	Análise de frequência de PDMA em Palmeira dos Índios.....	123
Figura 4.16	Análise de frequência de PDMA em Recife.....	124
Figura 4.17	Análise de frequência de PDMA em São Lourenço da Mata.....	125
Figura 4.18	Análise de frequência de PDMA em Surubim.....	126
Figura 4.19	Análise de frequência de PDMA em Timbaúba.....	127

Figura 4.20	Análise de frequência de PDMA em Umbuzeiro.....	128
Figura 4.21	Análise de frequência de PDMA em Vitória de Santo Antão.....	129
Figura 4.22	Linhas de Tendência da Chuva forte na Altura de chuva anual.....	136
Figura 4.23	Linhas de Tendência da Chuva forte no Número de dias chuvosos anual.....	136
Figura 4.24	Diagramas <i>Box Plot</i> da Altura de chuva anual em Recife nos períodos estudados com precipitações diárias iguais ou acima de 30 mm.....	137
Figura 4.25	Diagramas <i>Box Plot</i> do Número de dias chuvosos em Recife nos períodos estudados com precipitações diárias iguais ou acima de 30 mm.....	137
Figura 4.26	Comportamento da frequência anual considerando a precipitação diária acumulada acima de 30 mm da Altura de chuva anual para os períodos estudados.....	139
Figura 4.27	Comportamento da frequência anual considerando a precipitação diária acumulada acima de 30 mm do Número de dias chuvosos anual para os períodos estudados.....	139
<b>ANEXOS</b>		
Figura A.1	Publicação meteorológica do INMET em agosto de 1970.....	158
Figura A.2	Pluviograma do dia 10 ao dia 13/08/1970 na estação de Recife.....	159
Figura B.1	Ajustamento das séries às curvas de dupla-massa.....	161
Figura B.2	Ajustamento das séries às curvas de dupla-massa.....	162
Figura B.3	Ajustamento das séries às curvas de dupla-massa.....	163
Figura B.4	Ajustamento das séries às curvas de dupla-massa.....	164
Figura C.1	Elementos para análise exploratória dos dados em Alhandra.....	166
Figura C.2	Elementos para análise exploratória dos dados em Atalaia.....	167
Figura C.3	Elementos para análise exploratória dos dados em Bom Jardim.....	168
Figura C.4	Elementos para análise exploratória dos dados em Caruaru.....	169
Figura C.5	Elementos para análise exploratória dos dados em Garanhuns.....	170
Figura C.6	Elementos para análise exploratória dos dados em Itambé.....	171
Figura C.7	Elementos para análise exploratória dos dados em João Pessoa.....	172
Figura C.8	Elementos para análise exploratória dos dados em Maceió.....	173
Figura C.9	Elementos para análise exploratória dos dados em Palmares.....	174
Figura C.10	Elementos para análise exploratória dos dados em Palmeira dos Índios.....	175
Figura C.11	Elementos para análise exploratória dos dados em Recife.....	176
Figura C.12	Elementos para análise exploratória dos dados em São Lourenço da Mata....	177
Figura C.13	Elementos para análise exploratória dos dados em Surubim.....	178
Figura C.14	Elementos para análise exploratória dos dados em Timbaúba.....	179
Figura C.15	Elementos para análise exploratória dos dados em Umbuzeiro.....	180
Figura C.16	Elementos para análise exploratória dos dados em Vitória de Santo Antão....	181
Figura G.1	Ajuste da distribuição empírica ao modelo teórico de <i>Gumbel</i> .....	194
Figura G.2	Ajuste da distribuição empírica ao modelo teórico de <i>Gumbel</i> .....	195

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	Testes estatísticos sugeridos por Chiew e Siriwardena (2005).....	12
Tabela 2.2	Índices pluviométricos segundo ETCCDMI.....	16
Tabela 2.3	Classificação do Índice Oceânico <i>Niño</i> – ION.....	25
Tabela 2.4	Classificação da precipitação diária acumulada em Recife em relação aos quantis.....	39
Tabela 3.1	Indicadores físicos da Sub-bacia 39.....	44
Tabela 3.2	Unidades hídricas da Sub-bacia 39 (BH: Bacia Hidrográfica; UP: Unidades de Planejamento Hídrico; RH: Região Hidrográfica).....	49
Tabela 3.3	Estações selecionadas para elaboração do bancos de dados.....	55
Tabela 3.4	Valores críticos de $Q/\sqrt{n}$ .....	64
Tabela 3.5	Valores críticos de $W$ .....	65
Tabela 3.6	Hipóteses nulas usadas no <i>Trend</i> para os testes de hipóteses.....	66
Tabela 3.7	Variáveis hidrológicas para detecção de tendências e mudanças no período chuvoso.....	68
Tabela 3.8	Testes estatísticos usados na detecção de tendências e mudanças abruptas....	68
Tabela 3.9	Intervalos anuais dos Períodos completos e subperíodos.....	78
Tabela 3.10	Intervalos anuais das partes móveis.....	79
Tabela 3.11	Classificação da chuva diária acumulada em 24 horas no Recife em relação aos quantis.....	81
Tabela 4.1	Estatística descritiva e análise de <i>outlier</i> das séries pluviométricas.....	88
Tabela 4.2	Avaliação dos coeficientes angulares das linhas de tendência nas precipitações anuais.....	89
Tabela 4.3	Avaliação dos testes de aderência aos pressupostos dos testes estatísticos....	89
Tabela 4.4	Teste de aderência à normalidade.....	90
Tabela 4.5	Teste de aderência à Independência, Homogeneidade e Estacionaridade.....	90
Tabela 4.6	Tendências nas variáveis hidrológicas.....	91
Tabela 4.7	Tendências nos índices pluviométricos.....	91
Tabela 4.8	Mudanças nas variáveis hidrológicas.....	96
Tabela 4.9	Salto nas mudanças detectadas na série de Precipitação total anual - PTA	98
Tabela 4.10	Correlação linear de Pearson para índices com tendência positiva da precipitação.....	101
Tabela 4.11	Estatísticas descritivas e análises de <i>outlier</i> das séries PDMA.....	108
Tabela 4.12	Teste de aderência à Independência, homogeneidade e estacionaridade nas séries de PDMA.....	109
Tabela 4.13	Cálculo da variável reduzida para elaboração do papel de <i>Gumbel</i> .....	110
Tabela 4.14	Parâmetros de <i>Gumbel</i> para os Períodos e Subperíodos das séries de PDMA	110
Tabela 4.15	Quantis obtidos pela função inversa da FAP de <i>Gumbel</i> (máximos).....	111
Tabela 4.16	Testes de aderência e níveis de significância aos ajustes de <i>Gumbel</i> (máximos).....	112
Tabela 4.17	Situação dos intervalos com 95% de confiança para as séries dos Primeiros períodos (30 anos).....	113
Tabela 4.18	Situação dos intervalos com 95% de confiança para as séries dos Últimos períodos (30 anos).....	113
Tabela 4.19	Síntese das tendências, mudanças abruptas e frequência nas séries de PDMA.....	134
Tabela 4.20	Aumento percentual da Chuva forte em Recife entre os Primeiros e Últimos períodos.....	138
Tabela 4.21	Testes estatísticos na Altura de chuva anual da série de Chuva forte.....	138
Tabela 4.22	Testes estatísticos no N° de dias chuvosos anual da série de Chuva forte.....	138

## ANEXOS

Tabela D.1	Existência de tendência/mudança na PTA e nível de significância.....	183
Tabela D.2	Existência de tendência/mudança na PDMA e nível de significância.....	183
Tabela D.3	Existência de tendência/mudança no SMU e nível de significância.....	184
Tabela D.4	Existência de tendência/mudança no TMU e nível de significância.....	184
Tabela D.5	Existência de tendência/mudança no BMU e nível de significância.....	185
Tabela D.6	Existência de tendência/mudança no MMU e nível de significância.....	185
Tabela D.7	Existência de tendência/mudança em MAI e nível de significância.....	186
Tabela D.8	Existência de tendência/mudança em JUL e nível de significância.....	186
Tabela D.9	Existência de tendência/mudança em AGO e nível de significância.....	187
Tabela D.10	Existência de tendência nos índices pluviométricos e nível de significância.	187
Tabela E.1	Índices regionais com tendência positiva na Sub-bacia 39 (1950-2012.....	189
Tabela F.1	Resultados dos testes de significância dos coeficientes de correlação.....	191
Tabela F.2	Resultados dos testes de significância dos coeficientes de correlação.....	192

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

<b>AGO</b>	– Agosto
<b>AIQ</b>	– Amplitude Inter-Quartis-AIQ
<b>AESA</b>	– Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba
<b>ANA</b>	– Agência Nacional de Águas
<b>ANEEL</b>	– Agência Nacional de Energia Elétrica
<b>APAC</b>	– Agência Pernambucana de Águas e Clima
<b>BDMEP</b>	– Bando de dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa
<b>BH</b>	– Bacia Hidrográfica
<b>BMU</b>	– Bimestre Mais Úmido
<b>CENAD</b>	– Centro Nacional de Gerenciamento de Riscos e Desastres
<b>CEMADEN</b>	– Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais
<b>CCI</b>	– <i>European Space Agency's Climate Change Initiative</i>
<b>CLIVAR</b>	– <i>International Research Programme on Climate, Variability and Predictability</i>
<b>CNRH</b>	– Conselho Nacional de Recursos Hídricos
<b>CODECIPE</b>	– Coordenadoria de Defesa Civil do Estado de Pernambuco
<b>CONDEPE/FIDEM</b>	– Agência Estadual de Planejamento e Pesquisa do Estado de Pernambuco
<b>CPTEC</b>	– Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos
<b>CPRM</b>	– Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais
<b>CRCCH</b>	– <i>Cooperative Research Centre for Catchment Hydrology</i>
<b>DISME</b>	– Distrito de Meteorologia
<b>DOL</b>	– Distúrbio Ondulatório de Leste
<b>EDA</b>	– <i>Exploratory Data Analysis</i>
<b>EMLURB</b>	– Empresa Municipal de Limpeza Urbana
<b>ENOS</b>	– <i>El Niño Oscilação Sul</i>
<b>ERA40</b>	– <i>European Centre for Medium-Range Weather Forecasts</i>
<b>ETCCDMI</b>	– <i>Expert Team on Climate Change Detection, Monitoring and Indices</i>
<b>FAP</b>	– Função Acumulada de Probabilidade
<b>FDE</b>	– Função de Distribuição Empírica
<b>FDP</b>	– Função Densidade de Probabilidade
<b>FUNCEME</b>	– Fundação Cearense de Meteorologia
<b>GEV</b>	– Generalizada de Valores Extremos
<b>GHCN</b>	– <i>Historical Climatology Network</i>
<b>IBGE</b>	– Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
<b>TNAI</b>	– Índice Atlântico Tropical Norte
<b>TSAI</b>	– Índice Atlântico Tropical Sul
<b>INCC</b>	– Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas
<b>INMET</b>	– Instituto Nacional de Meteorologia
<b>INPE</b>	– Instituto Nacional de Pesquisa Espacial
<b>ITEP</b>	– Instituto de Tecnologia de Pernambuco
<b>JCOMM</b>	– <i>Joint Technical Commission for Oceanography and Marine Meteorology</i>
<b>JUL</b>	– Julho
<b>MAI</b>	– Maio
<b>MCTI</b>	– Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação
<b>MDT</b>	– Modelo Digital do Terreno
<b>MMA</b>	– Ministério do Meio Ambiente
<b>MMC</b>	– Método dos Mínimos Quadrados

<b>MME</b>	– Ministério de Minas e Energia
<b>MMU</b>	– Mês Mais Úmido
<b>NEB</b>	– Nordeste do Brasil
<b>NOAA</b>	– <i>National Oceanic and Atmospheric Administration</i>
<b>OMM</b>	– Organização Mundial de Meteorologia
<b>ONI</b>	– <i>Oceanic Niño Indice</i>
<b>PCR</b>	– Prefeitura da Cidade de Recife
<b>PDMA</b>	– Precipitação Diária Máxima Anual
<b>PNUMA</b>	– Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente
<b>PERH</b>	– Plano Estadual de Recursos Hídricos
<b>PIB</b>	– Produto Interno Bruto
<b>PROHD</b>	– Programa de Homogeneização de dados
<b>PTA</b>	– Precipitação Total Anual
<b>QC</b>	– Controlo da Qualidade
<b>RH</b>	– Região Hidrográfica
<b>RMBH</b>	– Região Metropolitana de Belo Horizonte
<b>RMR</b>	– Região Metropolitana do Recife
<b>RPA</b>	– Regiões Político-administrativas
<b>SOI</b>	– <i>Southern Oscillation Index</i>
<b>SRTM</b>	– Missão Topográfica <i>Radar Shuttle</i>
<b>SGB</b>	– Serviço Geológico do Brasil
<b>SECTMA</b>	– Secretaria de Ciências, Tecnologia e Meio Ambiente
<b>SEDEC</b>	– Secretaria-Executiva de Defesa Civil – SEDEC
<b>SEMARH</b>	– Secretaria do Meio Ambiente e Recursos Hídricos
<b>SMU</b>	– Semestre Mais Úmido
<b>SNIRH</b>	– Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos
<b>SUDENE</b>	– Superintendência de Desenvolvimento do Nordeste
<b>TSM</b>	– Temperatura da Superfície do Mar
<b>UFMT</b>	– Universidade Federal do Mato Grosso
<b>UFV</b>	– Universidade Federal de Viçosa
<b>TMU</b>	– Trimestre Mais Úmido
<b>UP</b>	– Unidade de Planejamento
<b>USGS</b>	– Serviço Geológico dos Estados Unidos
<b>VCAS</b>	– Vórtices Ciclônicos da Atmosfera Superior
<b>WCDMP</b>	– <i>World Climate Data and Monitoring Programme</i>
<b>WCRP</b>	– <i>World Climate Research Programme</i>
<b>WMO</b>	– <i>World Meteorological Organization</i>
<b>ZCIT</b>	– Zona de Convergência Intertropical
<b>ZEPA</b>	– Zonas Especiais de Preservação Ambiental

## SUMÁRIO

<b>1.0</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	01
1.1	JUSTIFICATIVA.....	02
1.2	HIPÓTESE DA PESQUISA.....	04
1.3	OBJETIVOS.....	04
1.3.1	Objetivo geral.....	04
1.3.2	Objetivos específicos.....	04
1.4	Esquema simplificado da metodologia.....	04
<b>2.0</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO DA LITERATURA</b> .....	05
2.1	SÉRIES TEMPORAIS DE PRECIPITAÇÃO PLUVIOMÉTRICA.....	06
2.1.1	Análises preliminares.....	06
2.1.2	Deteção de tendências e mudanças pluviométricas.....	07
2.2	ANÁLISE DA ESTACIONARIEDADE EM SÉRIES DE PRECIPITAÇÃO.....	08
2.2.1	Utilizando testes estatísticos.....	08
2.2.2	Utilizando índices climáticos.....	15
2.3	FENÔMENOS INTERVENIENTES NO CLIMA DO NORDESTE.....	21
2.3.1	Influência oceânica e atmosférica.....	21
2.3.2	Índices de intensidade do <i>El Niño</i> /Oscilação Sul e Dipolo do Atlântico.....	24
2.4	ANÁLISE DE FREQUÊNCIA DE MÁXIMOS PLUVIOMÉTRICOS.....	28
2.4.1	Análise de frequência de variáveis hidrológicas.....	28
2.4.2	Análise de frequência empírica.....	29
2.4.3	Modelos teóricos de distribuição de probabilidade.....	31
2.4.4	Estimação dos parâmetros.....	32
2.4.5	Estimativas dos quantis e intervalos de confiança.....	33
2.4.6	Aderência da distribuição empírica ao modelo teórico.....	34
2.5	CHUVAS INTENSAS E DESASTRES NATURAIS EM RECIFE.....	37
2.5.1	Vulnerabilidade aos desastres naturais.....	37
2.5.2	Classificação das precipitações acumuladas em 24 horas.....	38
2.5.3	Sistemas de alerta atuantes.....	40
<b>3.0</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	42
3.1	CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	43
3.1.1	Localização e indicadores físicos.....	43
3.1.2	Aspecto climatológico.....	45
3.1.3	Aspecto geomorfológico.....	47
3.1.4	Gestão dos recursos hídricos.....	48
3.1.5	Histórico de eventos extremos de precipitação.....	49
3.1.6	Características da cidade de Recife.....	51
3.2	ELABORAÇÃO DO BANCO DE DADOS PLUVIOMÉTRICO.....	53
3.2.1	Seleção das séries de dados e definição da rede pluviométrica.....	53
3.2.2	Análise da consistência dos dados.....	56
3.2.3	Análise exploratória dos dados.....	57
3.3	ANÁLISE DE TENDÊNCIA E MUDANÇA NA PRECIPITAÇÃO.....	61
3.3.1	Deteção de tendência e mudança com testes estatísticos.....	61
3.3.2	Deteção de tendência com índices pluviométricos.....	69
3.4	ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA TSM NO AUMENTO DA PRECIPITAÇÃO.....	72
3.4.1	Influência oceânico-atmosférica sobre a precipitação de tendência positiva.....	72
3.4.2	Especificações dos índices correlacionados.....	73
3.5	ANÁLISE DE FREQUÊNCIA DE EVENTOS EXTREMOS MÁXIMOS.....	75
3.5.1	Estatísticas e atributos das séries amostrais.....	75

3.5.2	Análise de frequência empírica.....	75
3.5.3	Ajuste da distribuição de <i>Gumbel</i> .....	76
3.5.4	Estruturação dos períodos completos e subperíodos.....	78
3.5.5	Análise das frequências acumuladas (Casos I, II e III).....	79
3.5.6	Análise das frequências dos quantis (Casos I, IV e V).....	79
3.5.7	Análise das frequências adimensionalizadas (Casos I, II e III).....	80
3.5.8	Intervalo de confiança dos quantis nos períodos e subperíodos.....	80
3.6	<b>ANÁLISE DO ALERTA PLUVIOMÉTRICO NA CIDADE DE RECIFE</b> .....	81
3.6.1	Definição do limite pluviométrico para o alerta.....	81
3.6.2	Emissão de aviso meteorológico em situação de risco.....	82
3.6.3	Análise exploratória dos dados pluviométricos da Chuva forte.....	84
3.6.4	Análise de tendência da Chuva forte.....	84
3.6.5	Análise de frequência da Chuva forte.....	85
<b>4.0</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	86
4.1	<b>SÉRIES AMOSTRAIS</b> .....	87
4.1.1	Análise da consistência dos dados.....	87
4.1.2	Análise exploratória dos dados.....	87
4.2	<b>ESTACIONARIEDADE DA PRECIPITAÇÃO</b> .....	91
4.2.1	Detecção de tendência nas séries de precipitação.....	91
4.2.2	Detecção de mudança nas séries de precipitação.....	95
4.2.3	Considerações finais sobre as análises de tendência e mudança abrupta.....	99
4.3	<b>INFLUÊNCIA DE TSM EM EVENTOS EXTREMOS MÁXIMOS</b> .....	101
4.3.1	Os coeficientes de correlação linear de Pearson.....	101
4.3.2	Análise da influência de <i>El Niño</i> /Oscilação Sul-ENOS.....	101
4.3.3	Análise da influência do Dipolo do Atlântico tropical.....	102
4.4	<b>FREQUÊNCIA DA PDMA</b> .....	105
4.4.1	Análise exploratória e verificação dos atributos.....	105
4.4.2	Ajustamento ao modelo teórico de <i>Gumbel</i> (máximos).....	110
4.4.3	Análise de frequência de PDMA por estação pluviométrica.....	130
4.4.4	Considerações finais sobre as análises da PDMA.....	134
4.5	<b>ALERTA PLUVIOMÉTRICO NA CIDADE DE RECIFE</b> .....	136
4.5.1	Análise de tendência da Chuva forte.....	138
4.5.2	Análise de frequência da Chuva forte.....	139
<b>5.0</b>	<b>CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES</b> .....	141
5.1	Síntese conclusiva e recomendações.....	142
<b>6.0</b>	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	144
7.1	ANEXO A – Pluviograma da cidade de Recife.....	157
7.2	ANEXO B – Curvas dupla-massa.....	160
7.3	ANEXO C – Análises exploratórias dos dados.....	165
7.4	ANEXO D – Critérios para existência de tendência e mudança.....	182
7.5	ANEXO E – Índices pluviométricos regionais de tendências positivas.....	188
7.6	ANEXO F – Testes de aderência nas correlações de Pearson.....	190
7.7	ANEXO G – Distribuição de <i>Gumbel</i> .....	193

CAPÍTULO 1

Introdução

---

## 1.1 JUSTIFICATIVAS

Atualmente os cientistas vêm alertando à humanidade sobre a intensificação do aquecimento global no Planeta. Essa preocupação deve-se aos efeitos nefastos desencadeados por esse aquecimento, que além de resultar no aumento da magnitude dos desastres naturais decorrentes, faz também com que aumente a frequência de suas ocorrências. A elevação da temperatura, entre outras interveniências, desestabiliza o ciclo hidrológico e desarmoniza o clima terrestre.

As mudanças ou variabilidades climáticas representam imensuráveis prejuízos de todas as ordens, com expectativas que afetam socialmente e economicamente os países. Além do meio ambiente, repassam à sociedade, a sensação de insegurança e queda no padrão da qualidade de vida, com riscos de todas as intensidades, que podem variar do previsível (com alguns graus de incertezas), ao imprevisível absoluto, conforme o tipo de sinistro que venha a ocorrer, originado pelos fenômenos naturais.

Os estudos denotam que a temperatura da superfície do mar – TSM, principalmente nos oceanos Pacífico e Atlântico, influenciam as ocorrências de extremos climáticos, provocando alterações hidrológicas a partir dos fenômenos *El Niño* e *La Niña* no oceano Pacífico equatorial, e do Dipolo do Atlântico tropical no oceano Atlântico. O efeito dessa interação (oceano-atmosfera) provoca ondas de calor ou frio e regimes de secas ou enchentes. Entre vários países dos continentes e algumas regiões brasileiras afetadas, o Nordeste Brasileiro – NEB tem seu comportamento pluviométrico dependente desses fenômenos.

O Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas – IPCC, segundo publicações de seus Relatórios de Atividade, persiste no estudo desses fenômenos e nos modelos globais que definem, com algumas incertezas, as projeções futuras para diversos cenários, propondo aos governos, atitudes que combatam as causas e mitiguem os efeitos indesejáveis desse aquecimento.

Com relação às alterações hidrológicas, o IPCC (2001) apresentou evidências de mudanças nos extremos climáticos em países menos desenvolvidos da região tropical. O IPCC (2007) observou ocorrências de secas mais intensas em áreas mais amplas desde 1970, especialmente nos trópicos e subtropicais, além do aumento da frequência dos eventos fortes de precipitação sobre a maior parte da Terra. O IPCC (2013) previu que as alterações no ciclo hidrológico em resposta ao aquecimento no Século XXI não serão uniformes. O contraste na precipitação entre regiões úmidas e secas aumentará, e eventos de precipitação extrema máxima sobre a maior parte das regiões tropicais úmidas, provavelmente se tornarão mais intensos e mais frequentes.

Na maioria das vezes, os desastres naturais decorrentes dos excessos pluviométricos agravam-se por conta do inadequado uso e ocupação do solo nas bacias hidrográficas. Outros fatores mais comuns estão não somente na questão do crescimento populacional, cuja densidade aumenta

consideravelmente nos centros urbanos, mas também na obsolência ou falta de projetos eficientes das redes de drenagens rurais e urbanas. Nesse sentido, cresce o número de pesquisas científicas desenvolvidas nas universidades de todo o mundo, como também nas organizações nacionais e internacionais afins, a maioria com metodologias fundamentadas no monitoramento hidrometeorológico de dados observacionais.

Ultimamente a parte leste do NEB vem sofrendo com precipitações de chuvas intensas. As intensidades registradas são consideradas suficientes para destruir quase que totalmente algumas cidades, como o caso ocorrido em junho de 2010. Nesse evento, sistema meteorológico de onda de leste adentrou a costa pernambucana atingindo grande quantidade de municípios. As ondas de cheia estenderam-se ao estado de Alagoas através dos canais fluviais nas bacias que ultrapassam a fronteira estadual, com maior número de estragos (CPRM, 2010). Visando melhor compreender o comportamento das chuvas intensas nessa parte do NEB, foi escolhida para esta tese, uma área contida na Região Hidrográfica Atlântico Nordeste Oriental denominada “Sub-bacia 39”.

A Sub-bacia 39 pode ser considerada um espaço privilegiado, uma vez que compartilha condições climáticas e econômicas relativamente favoráveis em relação a algumas outras do NEB. Apesar de parcialmente inserida no Polígono das Secas, fica fora do Sertão, fato que justifica melhor qualidade de vida, principalmente do ponto de vista socioeconômico e cultural, motivo por que reside e atrai significantes percentuais da população dos estados envolvidos. Além disso, abriga três capitais nordestinas e outros importantes municípios adjacentes, os quais reúnem juntos grande parte da população dos estados em seu reduto. Essa região atualmente vivencia auspicioso progresso econômico, fomentado, sobretudo, pelo desenvolvimento industrial, cuja posição tem se demonstrado notável em âmbito nacional.

Dentre os maiores aglomerados urbanos destaca-se a cidade de Recife, com alagamentos urbanos nos períodos chuvosos nas áreas de planície, e desmoronamento de encostas nas áreas de morros, esse último intensificado pelas enxurradas. O estudo das chuvas intensas na Sub-bacia 39 considerou também o comportamento da precipitação diária máxima na cidade de Recife, responsável pela ocorrência desses desastres.

Este estudo fundamentou-se na necessidade de melhor compreender os eventos extremos máximos ocorridos na Sub-bacia 39, cujos impactos socioeconômicos e ambientais tem sido agravados nos últimos anos. Para isso, foi investigada a existência de tendências e mudanças no regime pluvial desses extremos e sua relação com os sistemas oceânico-atmosféricos. Além disso, verificou-se também a ocorrências de alteração nas frequências das precipitações diárias máximas. Em seguida, foram analisadas a tendência e a frequência do limiar da precipitação para emissão do alerta pluviométrico na cidade do Recife.

Espera-se que os resultados possam ajudar à população que reside na Sub-bacia 39, inclusive os recifenses, como também os órgãos das administrações pública e privada dos estados e municípios que compõem essa área, principalmente aqueles que planejam e gerenciam os recursos hídricos, projetam as redes de micro e macrodrenagem e promovem a segurança da sociedade.

## 1.2 HIPÓTESE DA PESQUISA

A Hipótese parte da premissa que a intensificação das chuvas intensas observadas na Sub-bacia 39, possa ser comprovada a partir da investigação da existência de tendência e mudança; alteração da frequência; e influência da TSM, na precipitação diária máxima anual.

## 1.3 OBJETIVOS

### 1.3.1 Objetivo geral

Detectar as tendências e mudanças no comportamento da precipitação pluviométrica e avaliar as alterações na frequência e influência da TSM nos eventos extremos máximo, a partir das análises da precipitação diária máxima anual.

### 1.3.2 Objetivos específicos

- Analisar as tendências e mudanças climáticas dos índices extremos máximos da precipitação, nas séries históricas durante o período chuvoso da Sub-bacia 39;
- Analisar o comportamento das frequências da precipitação diária máxima anual na Sub-bacia 39;
- Verificar a influência da temperatura da superfície do mar nos eventos extremos máximos da precipitação na Sub-bacia 39;
- Analisar a tendência e a frequência do limiar da precipitação para emissão do alerta pluviométrico na cidade do Recife.

## 1.4 Esquema simplificado da metodologia

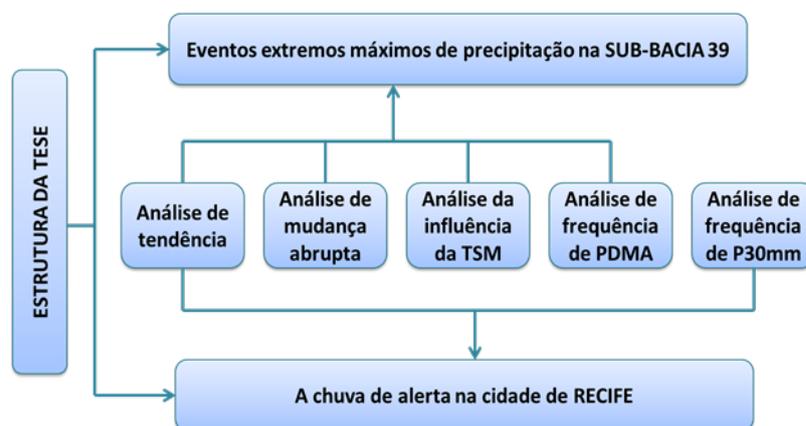


Figura 1.1 – Esquema simplificado da metodologia

CAPÍTULO 2

Fundamentação teórica e revisão  
da literatura

---

## 2.1 SÉRIES TEMPORAIS DE PRECIPITAÇÃO PLUVIOMÉTRICA

### 2.1.1 Análises preliminares

Segundo Bertoni e Tucci (2007), o objetivo de um posto de medição de chuvas é formar uma série ininterrupta de precipitações ao longo dos anos (ou a variação das intensidades de chuva ao longo das tormentas). Normalmente, as séries podem apresentar erros de leitura, de transcrições e digitação, defasagem de horário de leituras, ausência de informações, entre outros, tornando-as impróprias às suas utilizações imediatas. Por esses motivos os dados deverão submeter-se às técnicas de depuração e preenchimento de falhas, de modo a se tornarem mais homogêneos possíveis antes de serem usados.

Santos *et al.* (2009) afirmam que o controle de qualidade dos dados deve incluir a consistência espacial e temporal dos valores diários da precipitação. Para minimizar as influências associadas com a heterogeneidade temporal em sua pesquisa, removeram as estações com sérios eventos de relocação e séries com dados errôneos.

A análise preliminar de uma amostra de dados hidrológicos compreende um conjunto de métodos e técnicas que visam extrair as características empíricas essenciais do padrão de distribuição de uma variável hidrológica. Esse conjunto pode ser dividido em três grupos: (I) Apresentação Gráfica de Dados Hidrológicos; (II) Sumário Numérico e Estatísticas Descritivas e (III) Métodos Exploratórios (Naghetini e Pinto (2007).

Segundo Grubb e Robson (2000), a “*Exploratory Data Analysis – EDA*”, ou “Análise exploratória de dados” na língua portuguesa, é necessária sempre que os dados estão sendo examinados, ou uma análise estatística é realizada. A EDA envolve o uso de gráficos para explorar, entender e apresentar os dados tornando-se um componente essencial de qualquer análise estatística. Os gráficos são traçados e depois analisados de modo que as características importantes dos dados possam ser vistas claramente.

Para Naghetini e Pinto (2007), trata-se de uma coleção de técnicas quantitativas e gráficas de exame e interpretação de um conjunto de observações de uma variável aleatória, sem a preocupação prévia de formular premissas ou modelos matemáticos. A EDA baseia-se na ideia de que os dados revelam por si mesmos a sua estrutura subjacente.

É importante usar a EDA antes dos testes estatísticos serem aplicados. Sem uma compreensão adequada dos dados, os resultados dos testes podem tornar-se sem sentido. EDA também é imprescindível quando se trata de compreender, interpretar e apresentar os resultados de uma análise estatística, por exemplo, para examinar os resíduos, gradientes de tendências e níveis de significância. Muitas vezes, é capaz de mostrar características importantes, estruturas ou anomalias

em uma série de dados que seriam muito difíceis de detectar em qualquer outra forma. A técnica permite identificar entre outros, os padrões temporais (tendência ou mudança abrupta) e regionais, variação sazonal, problemas na séries (*outliers* e lacunas nos registros), correlação entre variáveis, entre outros. (Grubb e Robson, 2000).

Alexandre (2009) afirmou que um problema comum na análise de dados hidrológicos é a detecção de tendências em longas séries temporais. Tendo em vista essa dificuldade, a detecção de tendências abruptas ou graduais em séries hidrológicas pode ser mais bem explorada, inicialmente de modo visual. Preliminarmente, torna-se importante a construção dos gráficos cartesianos das linhas de tendenciasais. Esses gráficos poderão revelar informações relevantes sobre as tendências, além de contribuir com os testes de hipóteses e significâncias estatísticas.

### **2.1.2 Detecção de tendências e mudanças pluviiais em séries pluviométricas**

Obregón e Marengo (2007) afirmaram que as séries temporais longas, contínuas e homogêneas proporcionam grandes vantagens, em razão de fornecerem estatísticas representativas que caracterizam o fenômeno climático. A detecção de mudanças climáticas em séries temporais hidrometeorológicas sobre o Brasil, além de ser um resultado científico importante, é uma necessidade para estabelecer o efeito das mudanças climáticas sobre os sistemas hidrometeorológicos, o qual é fundamental para o planejamento futuro dos recursos hídricos e produção de alimentos.

Souza e Azevedo (2012) ressaltaram que muitos estudos de variabilidade e mudanças do clima consideram as variações de precipitação pluvial como um índice de detecção de mudanças climáticas, como também, uma observação cuidadosa dos registros climáticos de longo prazo é importante para as sociedades modernas, na medida em que fornece uma base para o conhecimento de tendências climáticas e suas causas potenciais, uma vez que os impactos das oscilações climáticas na sociedade estão associados aos eventos extremos.

Back (2001) afirmou que a identificação de alterações nos registros meteorológicos é de grande importância para os estudos de engenharia que utilizam as séries históricas, pois tanto as simulações como as aplicações de teorias de probabilidade são realizadas com a hipótese de que as séries históricas são homogêneas, isto é, que não apresentam tendência.

## 2.2 ANÁLISE DA ESTACIONARIEDADE EM SÉRIES DE PRECIPITAÇÃO

### 2.2.1 Utilizando testes estatísticos

Baseado no Workshop Internacional sobre Mudanças em Séries de Dados Hidrológicos, em 1998 na cidade de *Wallingford*, Inglaterra, Kundzewicz e Robson (2000) organizaram um documento síntese, o qual serviu de manual para os profissionais e cientistas envolvidos com esse tema. O produto, denominado: *Detecting Trend and other Change in Hydrological Data*, passou a integrar o acervo do *World Climate Data and Monitoring Programme – WCDMP-45*, publicado no ano 2000 pela *World Meteorological Organization – WMO*. No evento, os organizadores alertaram para necessidade de melhor compreender o impacto que o homem exerce sobre o mundo natural, especificamente no ciclo hidrológico, como também estudar as mudanças nas características de extremos hidrológicos, exemplificando o excesso e a escassez da água, e suas relações com as ocorrências de cheias e secas no Planeta.

No mesmo documento, Radziejewski *et al.* (2000) ratificaram que a questão da detecção de alterações em dados hidrológicos é de muita importância prática e científica. Sistemas de recursos hídricos são normalmente projetados e operados sob a hipótese de estacionariedade, o que significa que as características essenciais da variabilidade dos processos hidrológicos não mudam com o tempo. Se esta hipótese é abandonada, os códigos existentes de projeto de sistemas de recursos hídricos, barragens, diques e outras obras de engenharia teriam que ser revistos.

Alexandre (2009) e Alexandre *et al.* (2010) reiteraram que os sistemas de recursos hídricos geralmente são projetados a partir da suposição de que a sequência de dados hidrológicos, de vazão ou de precipitação, sejam estatisticamente estacionária, ou que as características estatísticas essenciais dos processos hidrológicos, tais como as suas medidas de posição e variabilidade, permanecem constantes ao longo do tempo. Entretanto, tal suposição pode não ser verificada quando são considerados alguns aspectos, como a modificação da cobertura vegetal e as variabilidades e/ou mudanças do clima.

Naghetinni e Pinto (2007) justificam que quando certas propriedades estatísticas de uma série hidrológica não se alteram ao longo do tempo, a série é dita estacionária. Segundo Pegram (2000), a não estacionariedade pode assumir várias formas. Para as sequências de variáveis aleatórias e independentes, essas formas incluem: tendência linear ou outra forma de tendência; mudança na média de um nível para outro; e mudança na variabilidade. Para Robson *et al.* (2000), a alteração na série de dados hidrológicos pode ocorrer de várias maneiras: como exemplo das tendências, que ocorrem de forma constante; das mudanças abruptas, quando ocorrem de forma radical, podendo

afetar a média, mediana, variância, autocorrelação, ou outros aspectos estatísticos dos dados. Outra ocorrência possível seria de forma mais complexa.

Para Radziejewski *et al.* (2000), os testes mais utilizados para verificação dizem respeito à evolução (tendência) e ao salto na média e mediana (mudança abrupta). Muitos testes para detecção foram utilizados em estudos de séries temporais de dados hídricos. No entanto, a cada teste exige-se uma série de hipóteses a ser satisfeita. Quando as premissas do teste não são cumpridas, a aceitação ou rejeição da estatística de teste pode não ser rigorosamente determinada.

Segundo Chiew e Siriwardena (2005) os testes estatísticos consistem em definir uma hipótese nula  $h_0$  que admite a não existência de tendência em uma série de dados, e uma hipótese alternativa  $h_1$ , para a existência de tendência crescente ou decrescente. A estatística de teste é o meio de comparação entre  $h_0$  e  $h_1$ , e é designada por um valor numérico calculado a partir da série de dados que está sendo testada. Se o valor da estatística de teste é maior do que o valor crítico,  $h_0$  é rejeitada. Nesse processo, poderão ocorrer dois tipos de erros: O erro tipo I, quando  $h_0$  é incorretamente rejeitado, e tipo II, quando  $h_0$  é aceita sendo  $h_1$  verdadeira. O meio de medir se a estatística de testes é muito diferente dos valores que normalmente ocorreriam sob  $h_0$ , é o nível de significância estatística  $\alpha$ . É, portanto, a probabilidade de que o valor crítico ultrapasse a estatística de teste em  $\alpha$  assumindo que não há tendência na série. Logo, o nível de significância é a probabilidade de um teste detectar uma tendência (rejeitar  $h_0$ ) quando na realidade não existe tendência (erro tipo I).

Conforme Robson *et al.* (2000), na maioria dos métodos estatísticos tradicionais, os valores críticos de teste estatísticos para vários níveis de significância podem ser consultados a partir das tabelas estatísticas. Para detecção de tendência/mudança em qualquer direção, o valor crítico do teste estatístico é definido como teste unilateral  $\alpha$ . Quando se trata de uma direção preestabelecida o teste é dito bilateral  $\alpha/2$ . Tais valores podem também ser obtidos utilizando fórmulas apropriadas. Uma possível interpretação do nível de significância pode ser:

- $\alpha > 0,1$  significa pouca evidência contra a hipótese nula  $h_0$ ;
- $0,05 < \alpha < 0,1$  significa possível evidência contra a hipótese nula  $h_0$ ;
- $0,01 < \alpha < 0,05$  significa forte evidência contra a hipótese nula  $h_0$ ;
- $\alpha < 0,01$  significa muito forte evidência contra a hipótese nula  $h_0$ .

Existem testes estatísticos paramétricos e não paramétricos indicados para analisar tendência/mudança. Todavia, deve-se verificar se a série de dados provém de distribuição aleatória e independente. Os testes paramétricos assumem que são mais poderosos do que os testes não paramétricos (Chiew e Siriwardena, 2005). Naghetinni e Pinto (2007) acrescentam que os testes são ditos paramétricos se os dados amostrais, por premissa, tiverem sido extraídos de uma população

normal ou de qualquer outra população, cujo modelo distributivo é conhecido ou previamente especificado, ao contrário dos testes não paramétricos.

Segundo Kundzewicz e Robson (2004) ao realizar um teste estatístico é sempre necessário considerar os seguintes pressupostos:

- Normalidade – pressuposto de que os dados assumem que são normalmente distribuídos. Essa suposição é violada se os dados não seguir a distribuição especificada;
- Homogeneidade – pressuposto de que os dados assumem que são homogêneos. Essa suposição é violada se houver variações sazonais ou quaisquer outros ciclos nos dados;
- Independência – pressuposto de que os dados assumem que são independentes. Essa suposição é violada se houver autocorrelação (correlação temporal) ou correlação espacial (correlação entre as séries das estações pluviométricas).

Kundzewicz e Robson (2004) completam afirmando que se as suposições feitas em um teste estatístico não forem cumpridas, poderá comprometer os resultados dos testes estatísticos com estimativas de significância grosseiramente incorretas. No caso da “normalidade”, observa-se frequentemente que a distribuição específica dos dados hidrológicos não são totalmente normais, entendendo-se com isso que os testes que assumem uma distribuição normal tornam-se inadequados. No entanto, esses dados podem ser utilizados se forem transformados em amostras consideradas normais. No caso da “independência”, os dados costumam também apresentar autocorrelação e/ou correlação espacial, portanto, os valores dos dados não são independentes. Como também podem conter sazonalidade, o que viola os pressupostos da “homogeneidade”.

Se a distribuição dos dados originais não é normal, o uso da distribuição das estatísticas de testes conhecida, terá como consequência, a violação do nível de significância previamente estabelecido. Sendo assim, é requerente que testes para verificação da normalidade sejam realizados (Kundzewicz e Robson, 2004). Testes de aderência como: *Qui-Quadrado*, *Kolmogorov-Smirnov*, *Anderson Darling*, *Filliben* e *Shapiro-Wilk* são os mais usados em hidrologia.

Chiew e Siriwardena (2005) afirmam que quando essas suposições são violadas, uma alternativa consiste em determinar o nível de significância dos testes estatísticos utilizando a “Técnica de amostragem”. Robson (2000) assegura que a reamostragem é muito útil para hidrologia. A Reamostragem é uma técnica alternativa robusta que utiliza os dados para estimar o nível de significância de um teste estatístico. Se destaca por permitir testar séries de dados hidrológicos com pouca existência dos pressupostos a eles exigidos, tornando-se bastante poderosa (Robson *et al.*, 2000). Para Kundzewicz e Robson (2004) a reamostragem é um método flexível e

relativamente potente para grandes amostras. Além de poder ser adaptado a uma vasta gama de tipos de dados, inclui dados autocorrelacionados ou sazonais.

Na reamostragem, a série temporal original é reamostrada para fornecer muitas séries temporais de igual comprimento à dos dados originais. Os dados de cada série temporal reamostrada é obtidos por meio de uma seleção aleatória dos valores da série temporal original até que a série reamostrada tenha comprimento igual ao da série original. Segundo Chiew e Siriwardena (2005), o número de amostras a serem gerado depende do nível de significância e do grau de mudança observada nos dados. Quanto maior o número de reamostragem, mais precisa será a estimativa de significância. Para obterem-se boas estimativas do valor crítico e da estatística de teste com significância, recomendam-se mil reamostragens.

Segundo ainda Kundzewicz e Robson (2004), os testes estatísticos comumente utilizados são descritos em sua forma padrão, ou básica, em uma condição de não reamostragem; entretanto, cada um deles pode ser facilmente adaptado para ser um teste de reamostragem. Para isso, a mesma estatística de teste é calculada como se fosse para o teste básico (original); portanto, o nível de significância é obtido a partir da abordagem com reamostragem.

No método de reamostragem denominado: “*bootstrap ou Bootstrapping*”, os dados são reamostrados com reposição, ou seja, uma série reamostrada pode conter alguns valores repetidos da série original, deixando outros dados de fora. O valor do teste estatístico obtido com os dados da série temporal original pode então ser comparado com os valores dos testes estatísticos obtidos a partir das séries reamostradas para estimar o nível de significância.

Por exemplo, se o valor do teste estatístico calculado com os dados originais é superior ao 950º (Nongentésimo quinquagésimo) maior valor da série ordenada com os testes estatísticos calculados para cada uma das 1000 séries reamostradas, a hipótese nula  $h_0$ , é rejeitada ao nível de significância de 5% (ou seja, uma tendência ou mudança abrupta é detectada com uma probabilidade de 5% que esta tendência ou mudança abrupta ser detectada incorretamente). Portanto, os valores críticos dos testes estatísticos para níveis de significância  $d\alpha = 0,1$ ,  $\alpha = 0,05$  e  $\alpha = 0,01$ , são respectivamente o 90º, o 95º e o 99º percentil dos valores dos testes estatísticos obtidos para as 1000 séries reamostradas no TREND.

Aplicações do método *Bootstrapping* poderão ser encontrados em Davidson e Hinkley (1997), Efron e Tibshirani (1998) e Efron (1979), Burn *et al.* (2010), Burn e Taleghani (2012), Önöz e Bayzit (2012) e Khaliq *et al.* (2009).

Entre os testes estatísticos utilizados para detecção de tendência, mudança e aleatoriedade, doze foram sugeridos por Chiew e Siriwardena (2005), conforme a Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Testes estatísticos sugeridos por Chiew e Siriwardena (2005).

Item		Testes estatísticos	
01	Tendência	<i>Mann-Kendall</i>	Não paramétrico
		<i>Spearman-Rho</i>	Não paramétrico
		Regressão linear	Paramétrico
02	Mudança abrupta	Não paramétrico <i>Cusum*</i>	Não paramétrico
		<i>Cumulative Deviation*</i>	Paramétrico
		<i>Worsley Likelihood*</i>	Paramétrico
		<i>Rank Sum**</i>	Não paramétrico
03	Aleatoriedade	<i>Student t***</i>	Paramétrico
		<i>Median Crossing</i>	Não paramétrico
		<i>Turning Points</i>	Não paramétrico
		<i>Rank Difference</i>	Não paramétrico
		<i>Autocorrelation</i>	Paramétrico

\* Detecção de salto na média;

\*\*Detecção de diferença na mediana em dois períodos de dados;

\*\*\*Detecção de diferença na média em dois períodos de dados.

Alexandre (2009), em seu estudo sobre identificação de tendências do regime pluvial, a partir de métodos estatísticos e modelos climáticos, na Região Metropolitana de Belo Horizonte – RMBH, utilizou os testes estatísticos sugeridos por Chiew e Siriwardena (2005) e o *Software Trend*, para detecção de tendências, mudanças abruptas e aleatoriedades em dados pluviométricos. Para análise estatística foram usadas séries de totais anuais, totais semestrais, totais trimestrais e totais mensais máximos anuais, medidas em 20 estações pluviométricas provenientes do Sistema de Informações Hidrológicas – *Hidroweb* e Banco de dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa – BDMEP. Os resultados obtidos com significância estatística evidenciaram aumento das tendências no período menos chuvoso, tanto para as séries de totais anuais como para as séries de totais mensais máximos anuais, em detrimento a uma redução de chuvas no período mais chuvoso. Tais identificações foram balizadas e atestadas pelas análises gráficas durante a EDA.

Alexandre *et al.* (2010), considerando que os projetos baseados na estacionariedade estatística de eventos hidrológicos deveriam ser revistos, verificaram os possíveis impactos das alterações climáticas nos sistemas hidráulicos urbanos, através da análise de tendência do regime de chuvas na RMBH. Para isso, utilizaram testes estatísticos paramétricos e não paramétricos indicados em WCDMP-45 (Kundzewicz e Robson, 2000) e o *Software Trend*. Foram usado dados de 20 estações pluviométricas com períodos variando de 51 a 149 anos de observação, perfazendo séries anuais, semestrais, mensais e máximos anuais. Os resultados obtidos apontaram para uma possível

tendência de aumento de precipitação no período seco (abril-setembro), em contraposição a uma tendência de diminuição de chuvas no período mais chuvoso (outubro a março).

Anjos *et al.* (2012) investigaram tendências de mudanças climáticas no regime sazonal e anual de precipitação no Litoral do estado de Pernambuco, de modo a inferir se tais tendências apontavam no mesmo sentido do aumento da temperatura global. Para isso, utilizaram a série histórica medida pelo INMET na cidade de Recife, no período de 1961 a 2011, e aplicaram o teste não paramétrico de *Mann-Kendall*. O autor apontou para uma fraca tendência à redução da precipitação total anual, da ordem de 3,6 mm por década, estatisticamente não significativa.

Back (2001), com o objetivo de identificar tendências nas séries de temperatura e precipitação pluviométrica em estação meteorológica de Urussanga-SC, selecionou o período de 1924 a 1998 das séries de totais anuais e semestrais. Entre outros métodos, foram usados as análises de regressão linear e os testes não paramétricos de *Mann-Kendall* e *Rum*. Com relação às alterações pluviométricas, os resultados identificaram aumento da tendência significativa na precipitação total anual e no quarto trimestre.

Joshi *et al.* (2014) estudaram a variabilidade da precipitação e analisaram os índices de eventos extremos de chuva percebida em duas estações meteorológicas instaladas nos centros urbanos de *Nainital* e *Almora*, localizados em uma região vulnerável à desastres naturais, que fica na parte central do Himalaia, na Índia, onde os terrenos são montanhosos e geologicamente frágeis. O estudo testou as tendências de 19 diferentes índices extremos de precipitação no período de 1992 a 2005. Esses índices foram divididos em três grandes categorias, como sendo: Indicadores de frequência, Indicadores de intensidade e Indicadores de percentual de extremos. Testes estatísticos foram usados, entre eles o de *Mann-Kendall* para séries referentes a precipitação anual, chuvas de monções, número de dias chuvosos e um dia de chuva extrema.

Como resultado, as estatísticas de *Mann-Kendall* em ambas as estações, calculadas para as séries de dados de precipitação anual e chuvas de monções foram negativas. A análise indicou a diminuição da tendência do número de dias chuvosos para o caso de Almora, e tendência ao aumento em Nainital. As tendências de chuvas extremas anuais de um dia foram negativas para ambas as estações, embora essas tendências não sejam significativas ao nível de 5%.

Pinheiro *et al.* (2013) avaliaram a presença de tendências nas séries de precipitação na região Sul do Brasil. As séries diárias, mensais e anuais analisadas foram disponibilizadas pela *Hidroweb* e medidas em 18 estações pluviométricas, distribuídas nos estados do Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul. A metodologia utilizou para análise exploratória dos dados, as distribuições de probabilidade Normal e de Extremo tipo I, e em seguida foi aplicado o teste de *Mann-Kendall* para estudo de tendência e variabilidade climática. Os resultados revelaram uma tendência positiva dos

máximos diários anuais, assim como significativa elevação dos totais mensais e anuais na maioria das estações. O teste de tendência de *Mann-Kendal* mostrou mudanças estatisticamente significativas, ao nível de 5%, em 16 das 18 estações pluviométricas analisadas.

Ramalheira *et al.* (2013), percebendo a mudança no padrão de precipitação em Portugal, entenderam que as enchentes e as secas estariam mais frequentes e destrutivas. Decidiram então estudar as alterações utilizando longas amostras medidas em pluviômetros instalados na bacia hidrográfica do rio Torreão do Alentejo, com séries anuais, semestrais, quadrimestrais e mensais. A metodologia adotou 16 testes estatísticos paramétricos e não paramétricos para serem aplicados nas séries pluviométricas, indicados por Kundzewicz e Robson (2004), com foco na detecção de tendência, aleatoriedade e homogeneidade. Considerando a significância estatística dos resultados, julgou-se conclusiva a diminuição da precipitação anual, a queda na precipitação do primeiro semestre e do segundo trimestre, e a crescente precipitação revelada para o primeiro quadrimestre. Os demais resultados foram inconclusivos.

Wanderley *et al.* (2013) estudaram no Sertão do São Francisco alagoano, a homogeneidade e a tendência na distribuição temporal da precipitação medida na estação de Piranhas. Disponível na *hidroweb*, a série pluviométrica, com período de 1931 a 2011, foi dividida em três subperíodos para análises individualizadas. A metodologia utilizou alguns testes estatísticos, inclusive a regressão linear e o teste *Mann-Kendall*, acompanhado do teste t de *Student* para o coeficiente angular da reta. Os autores observaram que os dois primeiros subperíodos (1931 a 1960 e 1961 a 1990), não apresentaram mudanças nem tendências, entretanto, o subperíodo de 1991 a 2011 mostrou aumento significativo da tendência da precipitação.

O teste de *Mann-Kendal* tem sido amplamente indicado para detecção de tendências e mudanças no comportamento das séries hidrológicas. Também podem ser encontrados em: Almeida *et al.* (2014), Silveira *et al.* (2011), Souza *et al.* (2011), Santos e Portela (2007), Romano *et al.* (2011), Orgintude *et al.* (2011), Pal e Al-Tabbaab (2010), Modarres e Silva (2007), Liu *et al.* (2011 e 2012), Chowdhury e Beecham (2010), Ortiz *et al.* (2013), Fu *et al.* (2010), Barua *et al.* (2013), Wang *et al.* (2011 e 2013), Luo *et al.* (2008), Hamed (2008), Khaliq *et al.* (2009), Liang *et al.* (2011), Oguntunde *et al.* (2011), Martinez *et al.* (2012). Lipikasza (2010), Lipikasza *et al.* (2011), Lan *et al.* (2012), Minuzzi e Caramori (2011), Guo *et al.* (2013), Du *et al.* (2011 e 2013), Huang *et al.* (2013), Ahani *et al.* (2012) e Jiang *et al.* (2013).

O teste de *Spearman-Rho* foi aplicado por: Coelho e Junior (2013), Nunes (2008), Xiong e Guo (2004), Júnior *et al.* (2013) e Mc Cabe Jr e Wolock (1997). O teste de Regressão Linear com o nível de significância testado com o teste t *student*, pode ser encontrado em: Beralto *et al.* (2007) e Silva *et al.* (1998). Entretanto, alguns autores utilizam o teste *Mann-Kendall* para avaliar a

significância, como: Khaliq *et al.* (2009), Lupikasza (2010), Lupikasza *et al.* (2011), Minuzzi e Caramori (2011), Wang *et al.* (2013), Jiang *et al.* (2013). Aplicações do teste Não Paramétrico *CUSUM* em série hidrológicas, podem ser encontradas em: Wang *et al.* (2013), Hamed (2008), Chowdhury e Beecham (2010) e Chu *et al.* (2012). Estudos aprofundados sobre esse teste: Kim *et al.* (2007) e Lee *et al.* (2009). Aplicações do teste de *Worsley Likelihood Ratio* foram usados por Buishand (1982) para testar homogeneidades das chuvas. O teste *Rank Sum* pode ser encontrado em Júnior *et al.* (2013), Mauget (2011), Cordery *et al.* (2007), Xu *et al.* (2005), Damé *et al.* (2013) e Santos *et al.* (2013). O teste T de *Student's* em Önöz e Bayazit (2003) e Damé *et al.* (2013).

### 2.2.2 Utilizando índices climáticos

Para Robson e Chiew (2000) um evento é dito extremo quando simplesmente é considerado incomum ou raro. São extremos hidrológicos que podem resultar em secas e inundações. O conhecimento sobre as mudanças nos eventos extremos é necessário por causa das consequências devastadoras que deles provém. É possível que as mudanças estejam acontecendo, porém ainda não existem informações suficientes para que seja detectável. Como os extremos são raros, necessário seria a construção de uma série composta especificamente de dados extremos, e não de séries que permitam a participação predominante de valores normais analisados em meio aos dados de pico.

Tank *et al.* (2009) consideraram que avaliar mudanças em extremos não é tarefa trivial. Por razões estatísticas, uma análise válida de extremos requer séries de muito tempo de observação para obter estimativas razoáveis da intensidade e frequência de eventos raros. Além disso, série contínua de dados diários é necessária para levar em conta a natureza de certos extremos. Este requisito pode ser particularmente problemático, devido à falta de registros de observação diária de alta qualidade, cobrindo várias décadas em várias partes do globo. A WMO orienta que os registros climáticos observados devem ser confiáveis, considerando para isso a necessidade de séries de longo prazo com alta qualidade, além de resoluções diárias suficientes para avaliar as alterações nos extremos.

O Workshop organizado em De Bilt, Holanda, no ano de 2008, pelas organizações: *European Space Agency's Climate Change Initiative – CCI*; *International Research Programme on Climate, Variability and Predictability – CLIVAR*; e *Joint Technical Commission for Oceanography and Marine Meteorology – JCOMM*, fez surgir o projeto “*Expert Team on Climate Change Detection, Monitoring and Indices – ETCCDMI*”. Seguindo as diretrizes do evento a WMO publicou o *Guidelines on Analysis of Extremes in a Change Climate in Support of Informed and Decisions for Adaptations*. Sob a autoria de Tank *et al.* (2009), o documento foi lançado no WCDMP - 72, com a finalidade de melhorar a capacidade de monitoramento do clima, lidando com questões práticas sobre os extremos climáticos.

Segundo Zhang e Yang (2004), para se obter uma perspectiva uniforme sobre as mudanças de extremos climáticos em séries temporais, a ETCCDMI definiu 27 índices climáticos para descreverem as características particulares dos extremos, incluindo a frequência, amplitude e persistência. O conjunto básico contemplou índices extremos de temperatura e precipitação, que se tornaram amplamente utilizados como uma ferramenta para avaliar e monitorar as mudanças e acompanhar a evolução dos extremos. Da mesma forma, forneceram medidas para avaliação da capacidade dos modelos climáticos globais e regionais usados para simulação do clima futuro.

A utilização do *software RCLimdex* para valoração dos índices climáticos ETCCDMI tem sido bastante explorada pela comunidade científica dos países de todos os continentes, tanto em escala global, como regionais e locais. Segundo Wanderley *et al.* (2013), há uma necessidade crescente de entender como as alterações no clima estão modificando os regimes pluviométricos de uma região. Souza e Azevedo (2012) ao detectarem o aumento das chuvas intensas em Recife usando o *RCLimdex*, afirmaram que muitos estudos de variabilidade e mudanças do clima consideram as variações de precipitação pluvial como um índice de detecção de mudanças climáticas.

Dos índices climáticos definidos pela ETCCDMI, 16 se referem à temperatura, e 11 são índices pluviométricos. Todos os índices climáticos poderão ser encontrados em: <http://cccma.seos.uvic.ca/ETCCDMI> ou Tank *et al.* (2009), entretanto, os índices exclusivamente pluviométricos, segundo Zhang e Yang (2004), estão na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 – Índices pluviométricos segundo ETCCDMI

Item	Índice	Definição	Unidade
1	RX1day	Altura máxima de precipitação em um dia úmido	mm
2	RX5day	Altura máxima de precipitação em cinco dias úmidos	mm
3	SDII	Índice simples de intensidade diária	mm
4	R10mm	Número de dias com precipitação igual ou superior a 10 mm	dias
5	R20mm	Número de dias com precipitação igual ou superior a 20 mm	dias
6	Rnnmm	Número de dias com precipitação igual ou superior a um valor desejado	dias
7	CDD	Número máximo de dias secos consecutivos	dias
8	CWD	Número máximo de dias úmidos consecutivos	dias
9	R95p	Precipitação total anual dos dias muito úmidos (Percentil - 95%)	mm
10	R99p	Precipitação total anual dos dias extremamente úmidos (Percentil - 99%)	mm
11	PRCPTOT	Precipitação total anual nos dias úmidos	mm

O *RCLimdex* considera dia úmido com precipitação  $\geq 1$  mm e dia seco com precipitação  $< 1$  mm

Haylock *et al.* (2006) realizaram estudos sobre tendências de precipitações totais anuais e extremas em toda a América do Sul. O trabalho adveio de um *workshop* realizado no Brasil em 2004, com o encontro de cientistas de oito países sul americanos. A relevância do trabalho o tornou uma referência clássica sobre detecção de tendências pluviais, e fonte de consulta imprescindível aos estudos sobre modificações climáticas.

Para esses estudos foram utilizados os índices pluviométricos criados pela ETCCDMI, em 54 estações pluviométricas com período de observação entre 1960 a 2000, onde 16 estações pertenceram ao Brasil. Usando o Método dos Mínimos Quadrados – MMC associado à análise de regressão linear oferecida pelo *software RCLimdex*, as significâncias estatísticas foram verificadas segundo o teste t de *Student*. Após mapearem os resultados, observaram a evidência de grandes alterações estatisticamente significativas. Os cientistas identificaram tendências para condições mais úmidas no Equador, norte do Peru, sul do Brasil, Paraguai, Uruguai e norte/centro da Argentina. Já a diminuição da precipitação foi observada no sul do Peru e sul do Chile, com reduções significativas em muitos dos índices usados.

No mesmo evento Haylock *et al.* (2006) analisaram similarmente o Brasil a partir de 354 estações do banco de dados global “*Historical Climatology Network – GHCN*”. A tendência nas condições mais úmidas foi observada no Sudeste brasileiro e mais secas no Nordeste, as quais puderam ser explicadas pelas mudanças no *El Niño Oscilação Sul – ENOS*.

Alexander *et al.* (2006) utilizaram o *software RCLimdex* para calcular os índices indicados pela ETCCDMI, em 2223 séries de temperatura e 5.948 séries pluviométricas com períodos de 1951 a 2003, medidas em estações de medição espalhadas nos continentes e oceanos. O estudo teve como finalidade analisar simultaneamente os eventos extremos em todos os locais do mundo. Portanto, análises realizadas em diferentes países foram combinadas de forma integrada, utilizando os resultados de uma grande quantidade de oficinas realizadas em diversas regiões, fornecidas por inúmeros cientistas em todo o Planeta. Entre outros resultados, entenderam que os índices de precipitação mostraram uma tendência para condições mais úmidas durante todo o século 20.

Assis *et al.* (2012) investigaram a existência de tendências às mudanças climáticas usando os índices da ETCCDMI e o *software RCLimdex* nas bacias dos rios Brígida e Pajeú, localizadas no Sertão pernambucano, onde predomina o clima semiárido nordestino. Para isso, analisaram 19 séries históricas de postos pluviométricos, especialmente distribuídos na área das bacias hidrográficas. Os dados utilizados foram fornecidos pela Agência Pernambucana de Águas e Climas – APAC, no para o período de 1964 a 2004. Calculados os índices pluviométricos, constatou-se um aumento da estiagem e redução da precipitação total anual nas bacias.

Assis e Sobral (2012) investigaram as séries de precipitação da bacia do rio Capibaribe, situada no Agreste, Zona da Mata e Litoral pernambucano, com o objetivo de avaliar a existência de tendências nos índices de detecção de mudanças climáticas indicados pela ETCCDMI e o *software RCLimdex*. Os dados utilizados foram fornecidos pela APAC e *Hidroweb* para o período de 1963 a 2008. Os resultados mostraram tendências de redução do número de dias com chuvas intensas e aumento da estiagem na bacia.

Assis *et al.* (2013) estudaram as tendências climáticas em 12 municípios pertencentes às mesorregiões do Sertão Pernambucano e do São Francisco, a partir da quadra chuvosa e dos anos mais críticos usando o *RCLimdex*. Para isso, selecionaram dados mensais de precipitação dos municípios, referentes aos meses de janeiro a abril entre os anos de 1962 a 2012. As comparações anuais mostraram que o ano de 2012 se apresentou entre os seis mais secos em todos os municípios, com o total precipitado menor do que os anos de *El Niño*, podendo ser considerado como um ano extremamente seco. Concluiu-se, portanto, que o ano de 2012 já apresenta escassez hídrica, com totais mensais de precipitação abaixo da média, influenciando impactos negativos à agricultura local e ao abastecimento de água, afetando dessa forma a saúde e qualidade de vida da população.

Araujo e Brito (2011) estudaram a variabilidade pluvial nos estados brasileiros da Bahia e Sergipe, a partir dos índices climáticos idealizados pela ETCCDMI e o *software RCLimdex*, utilizando séries pluviométricas com 45 anos de observação, disponibilizadas pela Superintendência de Desenvolvimento do Nordeste – SUDENE e complementadas pela *Hidroweb* e o Instituto Nacional de Meteorologia – INMET, perfazendo um total de 75 estações. Como resultado, observaram uma predominância do aumento da precipitação total anual e outros índices, embora em algumas localidades as ocorrências tenham sido contrárias, como exemplo das áreas do vale do São Francisco.

Farias e Nóbrega (2010), com o intuito de detectar possíveis mudanças no regime pluviométrico em Pernambuco, estudaram todas as mesorregiões do Estado. Para isso, utilizaram o *software RCLimdex* e os índices pluviométricos estabelecidos pela ETCCDMI, referentes aos comportamentos da precipitação total anual e do número de dias chuvoso consecutivos. Foram utilizados 27 anos de dados pluviométricos oriundos da *Climate Prediction Center* – CPC, vinculados à NOAA. Os autores observaram o aumento da tendência da precipitação e diminuição dos dias úmidos consecutivos. O aumento da precipitação foi verificado principalmente na RMR, depois na Zona da Mata e Agreste. Concluíram em seguida que estaria ocorrendo uma concentração da precipitação pluviométrica em curto período de tempo, sendo essas consideradas chuvas intensas.

Santos e Brito (2007), com os índices da ETCCDMI e o *software RCLimdex*, verificaram nos estados do Rio Grande do Norte e Paraíba, as tendências de índices de detecção de mudanças climáticas, dependentes da precipitação pluvial diária. Para isso, foram usados dados de precipitação medidos em 44 estações da SUDENE, no período de 1935 a 2000, distribuídos em todas as microrregiões dos dois Estados. Os resultados mostraram uma tendência de aumento das condições úmidas sobre os dois estados, com destaque para a precipitação total anual. Concluiu-se

que as mudanças climáticas detectadas pelos índices são resultantes tanto dos fatores de grande escala como de escala local.

Santos e Manzi (2011) analisaram as tendências dos eventos extremos de precipitação no estado do Ceará. Contudo, foram utilizados dados de precipitação de 18 estações pluviométricas operadas pela Fundação Cearense de Meteorologia – FUNCEME, de 1971 a 2006, utilizando o MMQ e o *software RClindex*. O Método *Mann-Kendall* foi usado para obtenção das tendências. Os resultados mostraram que existem características de aumento nas intensidades das secas e diminuição dos eventos de precipitação forte.

Santos *et al.* (2011 e 2012) analisaram as tendências pluviais extremas dos índices pluviométricos da ETCCDMI na América do Norte, utilizando as séries pluviométricas precipitadas nos Estados Unidos, respectivamente nos estados de *Utah* e *Idaho*. Em ambos os estados foram usado os índices da ETCCDMI, a regressão linear e o *software RClindex*. Em *Utah* foram selecionadas 35 estações meteorológicas com o período de observação de 35 anos, entre os anos de 1970 a 2006. As significâncias estatísticas foram verificadas segundo o teste t de *Student*. Em *Idaho*, 28 estações meteorológicas foram selecionadas, perfazendo um período de 75 anos, entre os anos de 1930 a 2006. Nesse caso, as séries foram submetidas ao teste de *Mann-Kendall* para verificação das significâncias estatísticas. Analisando os resultados, os autores perceberam nos dois Estados, a existência de alta variabilidade espacial nos extremos pluviométricos e pouca significância estatística. Esses resultados impossibilitaram concluir se houve mudanças significativas da precipitação no último século.

Santos *et al.* (2009) analisaram diferentes índices de detecção de mudanças climáticas da ETCCDMI, baseados em dados de precipitação diária, com a finalidade de prover novas informações sobre tendências na precipitação total e eventos extremos de precipitação no estado do Ceará usando o *RClindex*. Os dados utilizados foram adquiridos na SUDENE e FUNCEME, totalizando 18 postos pluviométricos distribuídos no Estado, perfazendo um período que vai de 1935 a 2006. Com base nos resultados encontrados, observou-se que ocorreram mudanças locais na precipitação, assim como um visível aumento nas condições de umidade sobre o Ceará.

Santos *et al.* (2012a) estudaram as possíveis alterações no regime de precipitação pluvial no município pernambucano de Vitória de Santo Antão, na Zona da Mata Sul do Estado, usando os índices da ETCCDMI e o *software RClindex*. Para o estudo, foram usados os índices climáticos de precipitação, calculados a partir das séries diárias adquiridas na APAC, que vão de 1935 a 2011, perfazendo um período de 76 anos de observação. Os resultados mostraram tendência significativa de crescimento da precipitação total anual, dias com precipitação acima de 50 mm, quantidade máxima de precipitação em 1 e 5 dias, eventos extremos e dias consecutivos secos e úmidos.

Santos *et al.* (2012b) obtiveram as tendências pluviiais no norte do Brasil, a partir dos índices climáticos da ETCCDMI com dados de precipitação do *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* - ERA40 e o *software RClindex*, usando o período de 1961 a 2001. Associada ao teste de *Mann-Kendall*, a metodologia foi aplicada principalmente na bacia Amazônica e NEB. De uma forma geral, foi constatado um aumento dos índices que caracterizam aumento da precipitação na área estudada. Os mapas exibidos pelos autores mostraram, entre os outros índices analisados, a predominância do aumento da precipitação total anual com significância estatística no NEB. A diminuição da precipitação ficou para as áreas de desflorestamento do Mato Grosso e sul do Pará.

Santos *et al.* (2012c) estudaram as tendências dos índices de extremos climáticos no estado do Amazonas, baseados nos dados de precipitação medidos em três estações localizadas em Manaus, perfazendo um período total de observação que vai de 1971 a 2007. Para o estudo, foram utilizados os índices pluviométricos criados pela ETCCDMI e o Método de regressão linear contido no *software RClindex*, os quais indicaram aumento nas precipitações com ocorrência de extremos.

Santos *et al.* (2012d) examinaram tendências lineares nos índices de extremos climáticos de dados de precipitação e temperatura em São Paulo, na estação meteorológica de Rio Claro, no período de 1966 a 2005, perfazendo um total de 40 ano de observação. As inclinações das tendências foram calculadas pelo MMQ, utilizando o *software RClindex* e a equação não paramétrica de *Mann-Kendall*, para identificar se as tendências eram significativas. Os índices climáticos baseados na precipitação não mostraram tendências com significância.

Santos *et al.* (2014) avaliaram na bacia do rio Una, em Pernambuco, a tendência dos índices de detecção de mudanças climáticas da ETCCDMI para a precipitação pluvial usando o *software RClindex*. Utilizaram dados diários de 14 postos pluviométricos da APAC e da antiga rede da SUDENE, com séries históricas de 1963 até 2006 para uns municípios da bacia, e de 1963 até 2012 para outros. Após calcular os índices e suas tendências climáticas, foram diagnosticadas tendências negativas para a precipitação total anual e positiva ao favorecimento das estiagens.

Souza e Azevedo (2012) analisaram o comportamento do clima na cidade de Recife, verificando as tendências nos índices indicados pela ETCCDMI com o *software RClindex*. Para isso, utilizaram dados diários de precipitação e temperatura (máximas e mínimas) procedentes do INMET, cujo período de observação de 1961 a 2008. Os resultados derivados da precipitação apresentaram tendências de redução não significativas. Por outro lado, diagnosticou-se aumento da frequência de eventos extremos de chuvas a partir da década de 80, com chuvas diárias superiores a 100 mm.

## 2.3 FENÔMENOS INTERVENIENTES NO CLIMA DO NORDESTE

### 2.3.1 Influências oceânicas e atmosféricas

Segundo Araújo e Brito (2011), o NEB tem sua variabilidade climática associada a padrões de variação em escala planetária. Tais padrões estão associados às oscilações termais dos oceanos Pacífico e Atlântico. No oceano Pacífico, o fenômeno climático *El Niño* causa variações e flutuações periódicas em escalas sazonais e interanuais, resultantes da interação entre o oceano e a atmosfera. Por sua vez, o oceano Atlântico tropical é caracterizado por um forte ciclo sazonal que se manifesta principalmente pelo deslocamento meridional da Zona de Convergência Intertropical – ZCIT. O período e característica da evolução sazonal da ZCIT e da Temperatura da Superfície do Mar – TSM dependem do acoplamento dinâmico entre eles e dos contrastes entre terra-mar que ainda não são inteiramente compreendidos.

Segundo Mendonça e Danni-Oliveira (2007), o *El Niño* é um fenômeno caracterizado pelo aquecimento incomum das águas superficiais na porção central e leste do oceano Pacífico, nas proximidades da América do Sul, mais particularmente na costa do Peru. Em termos sazonais, o fenômeno inicia-se com mais frequência no período que antecede o Natal, o que explica a origem do nome em espanhol, que em português significa o Menino, sob forma de alusão a Jesus Cristo, cujo nascimento é celebrado em 25 de dezembro. O *El Niño*, também chamado de *La Niña*, é representado pelo resfriamento atípico das águas do Pacífico. Para Cavalcanti *et al.* (2009), durante episódios de *El Niño*, a TSM do oceano Pacífico Equatorial Central e Leste fica mais quente do que o normal, aumentando a convecção atmosférica nessas regiões, enquanto se esfria no Pacífico Oeste, onde a convecção e a precipitação diminuem.

O *El Niño* faz-se notar com maior evidência na costa peruana, pois as águas frias provenientes do fundo oceânico, conhecido como ressurgência, e da corrente marinha de *Humboldt* são interceptadas por águas quentes oriundas do norte e oeste. Essa alteração regional assume dimensões continentais e planetárias à medida que provoca desarranjos de toda ordem em várias regiões da Terra. O fato de o *El Niño* ser mais conhecido popularmente como um fenômeno climático decorre da forte influência das condições oceânicas no clima, donde se fala da interação oceano-atmosfera e, particularmente nesse caso, de ENOS, que corresponde à abreviação de *El Niño/Oscilação Sul* (Mendonça e Danni-Oliveira, 2007).

Para Ferreira e Mello (2005), a circulação atmosférica sobre a região tropical é fortemente modulada e modificada pelos padrões termodinâmicos sobre as bacias dos oceanos Pacífico e Atlântico Tropical. Em anos nos quais se verificam anomalias positivas ou negativas da TSM nas bacias desses oceanos, a célula de *Hadley*, que atua no sentido meridional (ramo ascendente sobre

os trópicos e ramos descendentes nas latitudes subtropicais), e a célula de *Walker*, que atua no sentido zonal (ramo ascendente no Pacífico oeste e ramo descendente no Pacífico leste) são perturbadas, causando fortes anomalias na circulação atmosférica sobre os trópicos, visto que essas células são deslocadas de suas posições climatológicas. Conseqüentemente, a intensidade e duração do período chuvoso dessa região também são afetadas.

Sobre a Célula de *Walker*, Bezerra e Cavalcanti (2008) acrescentam que sem a presença de *El Niño* ou *La Nina*, as condições atmosféricas e oceânicas sobre o Pacífico Equatorial, mantêm as águas superficiais relativamente mais aquecidas a oeste, próximo à costa da Austrália e Indonésia, e relativamente mais frias à costa oeste da América do Sul. Nestas circunstâncias, devido à baixa pressão nas regiões de águas quentes o ar sobe ocorrendo fortes chuvas, enquanto o ar desce nas condições de águas frias e altas pressões, resultando em chuvas escassas. Já a célula de *Hadley* é constituída pelos ventos alísios que sopram de NE no hemisfério norte e SE no hemisfério sul. Um fluxo é formado de leste para oeste sobre o Pacífico Equatorial varrendo as águas superficiais, dando lugar às águas profundas para aflorarem a superfície. Esse mecanismo é chamado de ressurgência e ocorre próximo à costa oeste da América do sul. A Figura 2.1 mostra a circulação meridional na célula de *Hadley* e os ventos alísios convergindo à ZCIT de leste para oeste na região equatorial do Planeta.

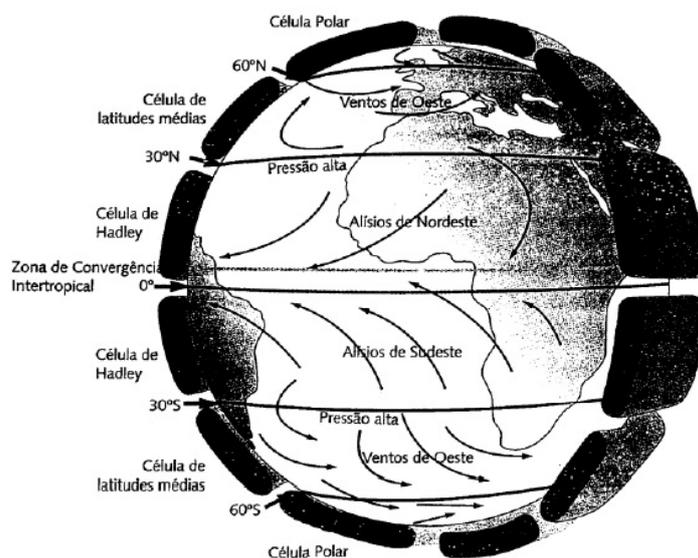


Figura 2.1 – Esquema da circulação geral da atmosfera com posição das células de circulação vertical e os ventos típicos próximos à superfície terrestre. Fonte: (Cavalcanti *et al.*, 2009)

Para Ferreira e Mello (2005), em anos de *El Niño*, quando as águas superficiais da Bacia do Pacífico, em torno do Equador, e sobre o lado centro-leste, estão mais aquecidas, toda a convecção

equatorial também se desloca para o leste alterando assim o posicionamento da Célula de Walker. Devido à continuidade da circulação atmosférica, o ar quente sobre aquela região é empurrado, originando uma célula descendente sobre o oceano Atlântico, próximo à região NEB e à Amazônia oriental. Dependendo da intensidade dessa célula de circulação e de sua fase de ocorrência, pode haver inibição da formação de nuvens e descida da ZCIT e, conseqüentemente, pode haver deficiência das chuvas na região do NEB.

Na presença do *El Niño*, a intensidade dos ventos alísios diminui, chegando a mudar de sentido. Sem a força, o acúmulo de água aquecida no lado oeste do Pacífico espalha-se pelo oceano Pacífico Equatorial central, chegando até o litoral peruano. Na Austrália, as áreas onde havia bastante chuva passam a ser observadas secas, enquanto que as chuvas que deveriam estar precipitando são verificadas sobre o oceano. Ao mesmo tempo, as chuvas próximas ao litoral sul-americano adentram o continente e passam a cair no interior do Peru. O ar que sobe provocando as precipitações no Peru vai descer seco exatamente na região litorânea do NEB, diminuindo as chuvas nessa região (Bezerra e Cavalcanti, 2008).

Cavalcanti *et al.* (2009) afirmam que a ZCIT é o principal sistema gerador de precipitação sobre a região equatorial dos oceanos Atlântico, Pacífico e Índico. No Atlântico Equatorial, a ZCIT migra sazonalmente, em anos considerados normais, de sua posição mais ao norte (em torno de 14°N), durante agosto-setembro, para sua posição mais ao sul (em torno de 2° S), durante março-abril. Essa migração sazonal da ZCIT, associada a fatores que causam o fortalecimento ou o enfraquecimento dos alísios de nordeste e sudeste, tem papel importante na determinação da estação chuvosa do norte do NEB. Em anos chuvosos, a ZCIT pode atingir até 5°S, perto da costa nordestina proporcionando elevados totais de precipitação.

Dependendo da intensidade e período do ano em que ocorre, o *El Niño* se torna responsável por anos considerados secos ou muito secos no NEB, principalmente quando acontece conjuntamente com o dipolo positivo do Atlântico que é desfavorável às chuvas. O fenômeno *La Niña* associado ao dipolo negativo do Atlântico, favorável às chuvas, é normalmente responsável por anos considerados normais, chuvosos ou muito chuvosos na região. Entende-se por Dipolo do Atlântico, a diferença entre a anomalia da TSM na Bacia do Oceano Atlântico Norte e Oceano Atlântico Sul (Ferreira e Mello, 2005).

A Figura 2.2 apresenta os locais do oceano Pacífico Equatorial onde são medidas as anomalias da TSM para ENOS. Circunstantemente, os locais das regiões de *El Niño* são identificados e georreferenciados como sendo: *Niño* 1+2 (0-10°S, 90°W-80°W), *Niño* 3 (5°N-5°S, 150°W-90°W), *Niño* 3.4 (5°N-5°S, 170°W-120°W) e *Niño* 4 (5°N-5°S, 160°E-150°W). A Figura 2.3 apresenta os locais do oceano Atlântico onde são medidos os índices da TSM associados aos

Dipolos de anomalias do Índice Atlântico Tropical Norte – TNAI e do Índice Atlântico Tropical Sul – TSAI. Tais locais são identificados e georreferenciados como sendo: TNAI, na área compreendida entre (5°N-23,5°N e 15°W-57,5°W) e TSAI, entre (0-20°S e 10°E-30°W).

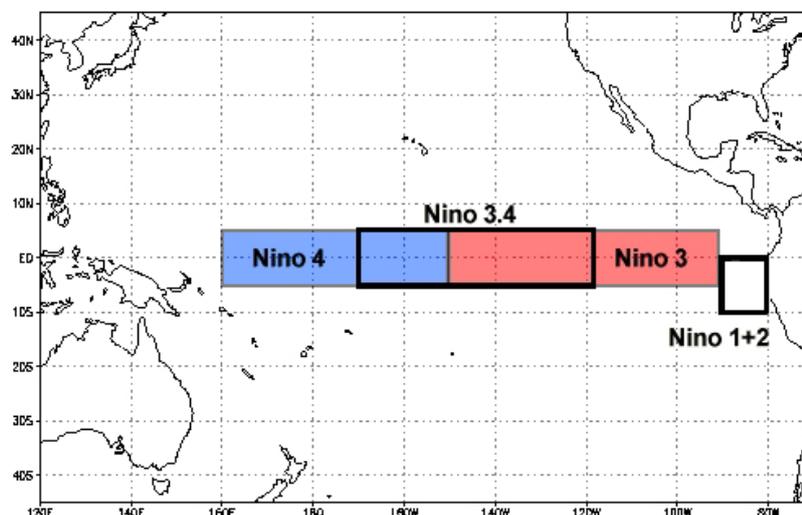


Figura 2.2 – Regiões do Pacífico Equatorial usadas para determinação das anomalias da TSM em eventos de *El Niño* (NOAA, 2014)

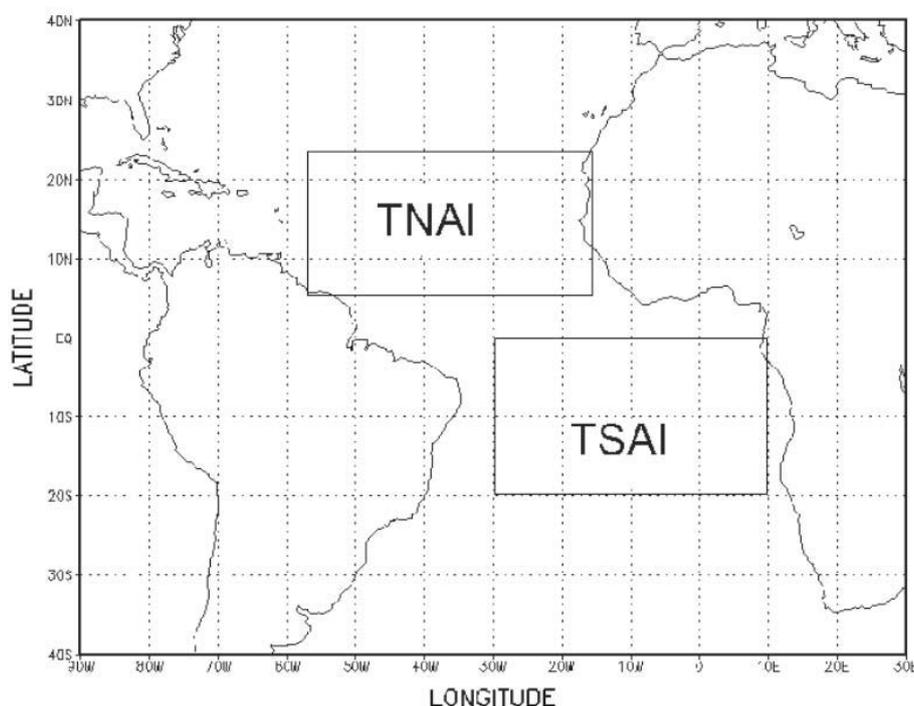


Figura 2.3 – Regiões do Atlântico Tropical usadas para determinação dos TNAI e TSAI, associados aos dipolos de anomalias das TSM do Atlântico. (Fonte: Menezes *et al.*, 2008)

### 2.3.2 Índices de intensidade do *El Niño*/Oscilação Sul e Dipolo do Atlântico

Além das séries de TSM anômalas medidas nas regiões de *Niño* (*Niño* 1+2, *Niño* 3, *Niño* 3.4, *Niño* 4) no Pacífico e regiões (TNAI e TSAI) no Atlântico, existem também índices capazes de explicar ou descrever os fenômenos oceânico-atmosféricos durante os episódios de *El Niño* e *La*

*Niña*, como entre outros: *Southern Oscillation Index* – SOI e *Oceanic Niño Indice* – ONI, comumente denominado respectivamente de Índice de Oscilação Sul – IOS e Índice Oceanico *Niño* – ION na língua portuguesa. As séries das TSM anômalas e dos referidos índices são periodicamente publicados pelo Serviço Climatológico Nacional dos Estados Unidos, através da *National Oceanic and Atmospheric Administration* – NOAA.

Sobre o Índice IOS, a instituição norte americana esclarece que é um índice padronizado, baseado nas diferenças de pressão do nível do mar observadas entre *Tahiti* e *Darwin*, na Austrália. O IOS é uma medida das flutuações de grande escala na pressão do ar que ocorrem entre o Pacífico Tropical Ocidental e Oriental (ou seja, o estado da Oscilação Sul) durante os episódios de *El Niño* e *La Niña*. Em geral, a série temporal suavizada da IOS coincide muito bem com as mudanças na temperatura dos oceanos em todo o Pacífico Tropical Oriental (NOAA, 2014).

O Índice ION é destacado pela instituição norte americana como um padrão de medida bastante conhecido e usado. A intensidade dos fenômenos *El Niño* (*La Niña*) foi classificada com base na persistência de ocorrências de anomalias de TSM em limiares pré-selecionados, sobre uma região específica do Pacífico Equatorial, ou seja, considerou que o *El Niño* (*La Niña*) são caracterizados por um período médio de 3 a 5 meses consecutivos de anomalias da TSM na região *Niño* 3.4, nos limites de temperatura superior a  $+0,5^{\circ}\text{C}$  e inferior a  $-0,5^{\circ}\text{C}$  respectivamente. Para isso, entenderam que a região abrange a metade ocidental da parte fria do Pacífico Equatorial, e fornece uma boa medida de mudanças importantes na TSM e gradientes que resultam em mudanças no padrão de convecção tropical profunda e circulação atmosférica (NOAA, 2014).

A intensidade dos fenômenos extremos de *El Niño* (*La Niña*), segundo os índices ION, é classificada conforme a Tabela 2.3. O histórico das ocorrências dos anos com *El Niño* (*La Niña*) e suas respectivas classificações, é periodicamente divulgado pelo Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos/Instituto Nacional de Pesquisa Espacial – CPCPTEC/INPE, ambos pertencentes ao Ministério da Ciência e Tecnologia do Brasil.

Tabela 2.3 – Classificação do Índice Oceânico *Niño* – ION. Fonte: (Marcuzzo e Romero, 2013)

Item	Evento	Índice Oceânico Niño - ION	Intensidade
01	<i>El Niño</i>	0,5 a 0,9	Fraca
		1,0 a 1,4	Moderada
		$\geq 1,5$	Forte
02	<i>La Niña</i>	-0,5 a -0,9	Fraca
		-1,0 a -1,4	Moderada
		$\leq -1,5$	Forte

Araujo e Brito (2011) estudaram a variabilidade pluvial nos estados brasileiros da Bahia e Sergipe, a partir dos índices climáticos de chuva, determinados com o *software RClindex*. Em seguida, avaliaram a relação entre os índices mais significativos, como: PECPTOT, SDII, Rx5day,

R10mm, CDD e CWD e a TSM dos oceanos Pacífico e Atlântico, cujos dados foram obtidos na NOAA. Como resultado, comprovou-se a influência da TSM sobre as precipitações da região estudada.

Santos e Brito (2007) também usaram o *software RClindex* e verificaram as tendências de índices de detecção de mudanças climáticas, dependentes da precipitação pluvial diária nos estados do Rio Grande do Norte e Paraíba. Os autores analisaram suas relações com as anomalias de TSM nas regiões de *Niño* 1+2, *Niño* 3, TNAI e TSAI. Os dados de anomalias de TSM foram cedidos pela NOAA. Alguns desses índices apresentaram correlações estatisticamente significativas com as anomalias de TSM.

Haylock *et al.* (2006) ao realizarem estudos sobre tendências de precipitações totais anuais e extremas na América do Sul, observaram elevada coerência espacial no sinal dos índices de chuva obtidos e sugeriram poder haver mudanças climáticas em grande escala. Para isso, os autores resolveram investigar a relação entre os índices pluviométricos obtidos e a TSM, esse segundo representado pelo IOS. A metodologia utilizou os coeficientes de correlação linear para compará-los, o que revelou dois padrões em grande escala, que têm contribuído para as tendências observadas nos índices pluviométricos: um acoplado ao padrão ENOS e outro apresentando mudanças geralmente mais negativas. O IOS teve um efeito importante sobre as tendências regionais de precipitação.

Santos e Manzi (2011) analisaram as tendências dos eventos extremos de precipitação no estado do Ceará, associando esses eventos às anomalias de TSM nos oceanos Pacífico e Atlântico. Observaram que o aumento nas anomalias de TSM no Pacífico e ao norte do equador, no Oceano Atlântico, acarreta em aumento das estiagens no norte do Ceará. Os índices extremos de precipitação mostraram correlações negativas com as anomalias de TSM nas regiões do Pacífico e do Atlântico Tropical Norte e positivas com a região do Atlântico Tropical Sul.

Santos *et al.* (2012a) estudaram as ocorrências de possíveis alterações no regime de precipitação pluvial do município pernambucano de Vitória de Santo Antão. Os autores identificaram os anos de 1986 e 1988 como o mais chuvoso e o mais seco, respectivamente, e aproveitaram para relacioná-los com a TSM. Observaram então que o ano de 1986 coincidiu com um período de Dipolo Atlântico Tropical negativo e 1988 com um período de ENOS de forte intensidade.

Santos *et al.* (2012c) estudaram, no estado do Amazonas, as tendências dos índices de extremos climáticos baseados nos dados de precipitação medidos em três estações localizadas na cidade de Manaus. Ao correlacionar os índices às anomalias da TSM no Oceano Pacífico Equatorial

e no Oceano Atlântico Sul, observaram a influência das mesmas sobre o aumento ou diminuição desses índices na região Amazônica, assim como suas relações com o deslocamento da ZCIT.

Santos *et al.* (2012d) examinaram tendências lineares nos índices de extremos climáticos de chuvas precipitadas no município de Rio Claro-SP. Quando correlacionados com os índices da TSM dos oceanos Pacífico e Atlântico, as análises mostraram fraca influência, porém positiva, entre o *El Niño* e TNAI. As correlações entre os índices de precipitação e as anomalias da TSM em *Niño* (1+2, 3, 3.4, 4), TNAI e TSAI, foram obtidas pelo uso do Método dos Coeficientes de Correlação de Pearson.

Alves e Repelli (1992) investigaram a influência do episódio ENOS, fase quente, na distribuição de chuvas no NEB e suas respectivas sub-regiões. Foram analisados 17 episódios, compreendidos entre o período de 1912 a 1990. Embora o número de eventos ENOS estudados tenha sido relativamente pequeno, os resultados mostraram que não há um predomínio para anos de estiagem (secos ou muito secos), sobre o setor norte do NEB, quando comparado à ocorrência de anos normais ou muito chuvosos. Entretanto, a resposta a esse fenômeno é bastante variada quanto à distribuição de chuvas intrarregionais. Tal resposta deve-se às características específicas de cada sub-região, principalmente a sua posição geográfica, seu quadrimestre mais chuvoso e os principais sistemas atmosféricos responsáveis pelas chuvas sobre as mesmas.

Andreoli e Kayano (2007) reexaminaram as anomalias de precipitação no NEB considerando os efeitos do ENOS e do Atlântico Tropical na estação anterior à estação chuvosa. Perceberam que na ausência de anomalias de TSM significativas no Atlântico Tropical, durante a fase inicial e de desenvolvimento do ENOS, em dezembro-janeiro-fevereiro, as anomalias na precipitação possivelmente são ocasionadas por padrões de teleconexões associados ao rearranjo da célula de Walker, e em março-abril-maio, por padrões de teleconexões extratropicais. Entre outros resultados importantes, mostraram o papel do Atlântico Tropical Sul na variabilidade de precipitação do NEB, cujo monitoramento é essencial para prospecções climáticas sazonais.

Lavado-Casimiro e Espinoza (2014) avaliaram os impactos do *El Niño* e *La Niña* sobre as chuvas do Peru utilizando dados de precipitação mensal de 155 estações distribuídas ao longo das três áreas hidrográficas do Peru, no período de 1975 a 2007. Numa primeira fase, classificaram o *El Niño* e *La Niña* com o IOS, com base no ano hidrológico (setembro a agosto). Com esta informação, os anos foram classificados em *El Niño* forte, *El Niño* moderado, *La Niña* forte e *La Niña* moderado. Em uma segunda etapa, analisou os principais modos de variabilidade interanual usando a técnica de funções ortogonais empíricas. Como conclusão, observaram que a variabilidade do oceano Pacífico não pode explicar totalmente a variabilidade da precipitação no Peru, assim descrito como uma perspectiva de considerar outras regiões como o oceano Atlântico Tropical.

## 2.4 ANÁLISE DE FREQUÊNCIA DE MÁXIMOS PLUVIOMÉTRICOS

### 2.4.1 Análise de frequência de variáveis hidrológicas

Para Naghettini e Pinto (2007), a magnitude de um evento extremo é inversamente relacionada à sua frequência de ocorrência, uma vez que os eventos extremos severos ocorrem com menor frequência do que os mais moderados. Para Lanna (2007), os processos hidrológicos são aleatórios. Isto significa que suas realizações não podem ser *a priori* conhecidas. Através da estatística e da teoria das probabilidades, comparam-se as características de um modelo teórico com as do processo natural a partir da seleção de algum “modelo probabilístico” que se ajuste a esse processo, conhecido como “inferência estatística”. Na comparação dos modelos teóricos ajustados ao empírico, obtido a partir da amostra, pode-se selecionar um deles, através de “testes de hipóteses”. Nesse caso, a hipótese descreve se algum dos modelos teóricos selecionados é adequado para representar o processo em análise.

Segundo Bertoni e Tucci (2007), os estudos estatísticos permitem verificar com que frequência as precipitações ocorrem com uma dada magnitude, estimando a probabilidade teórica de ocorrência das mesmas. A literatura estatística dispõe de muitas distribuições teóricas. Essas distribuições são modelos que procuram representar o comportamento de determinado evento em função da frequência de sua ocorrência. Para Leotti *et al.* (2005), as distribuições de frequências são, em verdade, distribuições de probabilidade, onde para um evento tem-se uma probabilidade de ocorrência associada.

Naghettini e Pinto (2007) afirmaram que na “análise de frequência regional” são utilizadas séries de dados hidrológicos, medidas em diversas estações hidrométricas espacialmente distribuídas. No entanto, a definição dos valores de interesse das variáveis hidrológicas correspondentes a certas probabilidades de excedência (quantis), realizadas em uma única série de registros, estabelece uma “análise de frequência local”. Além disso, acrescentou que a análise de frequência também pode ser realizada a partir de “séries anuais”, constituída por uma sequência de valores únicos e representativos dos anos hidrológicos ou civis, ou “séries de duração parcial”, composto pelas observações de valores superiores ou inferiores a um valor limite de referência, estabelecido pelo analista para os anos hidrológicos ou civis.

Segundo Mendes *et al.* (2013) as análises de frequência com séries de duração parcial são mais trabalhosas e difíceis. Para Naghettini e Pinto (2007) as séries de duração anual perdem por escolher apenas o maior evento de cada ano, não reconhecendo que o evento imediatamente inferior do mesmo ano pode ser superior ao máximo de outros anos, proporcionando a omissão dos mesmos. Entretanto, as séries de duração parcial podem ter um número de elementos superior ou

inferior ao das séries de duração anual, provavelmente comprometendo a condição de independência exigida pelos modelos teóricos de distribuição de probabilidades.

Considerando a homogeneidade, a independência e a representatividade das séries de dados como atributos exigidos, Khaliq *et al.* (2006) assinalaram que a utilização da técnica de análise de frequência tem desempenhado um papel importante na prática da engenharia. As premissas de independência e estacionariedade são condições necessárias para prosseguir com tais análises. Porém, tais resultados poderão se tornar duvidosos quando relacionados às alterações climáticas. Desse modo, advertem que nessa circunstância se recorra a métodos que incorporem a não independência e a não estacionariedade em extremos hidrológicos.

Naghetini e Pinto (2007) explicam que testes paramétricos e não paramétricos podem ser usados como ferramentas auxiliares na identificação de independência e heterogeneidade serial. Cabe esclarecer, entretanto, que embora os testes estatísticos sejam válidos para pequenas amostras, eles devem ser vistos apenas como indicadores, uma vez que não constituem argumentos suficientemente fortes para se abandonar uma amostra caso indiquem esses pressupostos sem seus dados. Para os autores, o termo “independência” significa que nenhuma observação presente na amostra pode influenciar a ocorrência (ou não ocorrência) de qualquer outra observação seguinte. A “homogeneidade” implica que os elementos de uma dada amostra provêm de uma única e idêntica população, enquanto a “estacionariedade” refere-se ao fato que, excluídas as flutuações aleatórias, as estatísticas amostrais são invariantes, em relação à cronologia de suas ocorrências. Já a “não estacionariedade” inclui as tendências, saltos e ciclos ao longo do tempo.

Muitos testes de hipóteses são frequentemente usados para verificação desses atributos nas séries amostrais. Entre outros, os testes não paramétricos *Rank-Sum*, também conhecido como *Wilcoxon-Mann-Whitney* ou *Mann-Whitney*, têm sido muito indicados para rejeitar ou aceitar a hipótese de homogeneidade. Já o teste não paramétrico de correlação de *Spearman*, decide sobre a hipótese de estacionariedade, enquanto para o pressuposto da independência serial pode ser indicado o teste não paramétrico proposto por *Wald-Wolfowitz*.

#### **2.4.2 Análise de frequência empírica**

Uma análise de frequência local pode ser realizada de modo analítico ou empírico. No modo analítico, admite-se a hipótese da existência de uma função paramétrica que descreva o comportamento probabilístico da variável hidrológica (população inferida pelos dados amostrados). No modo empírico, em não se admitindo tal hipótese, a análise se restringe a construção gráfica. De um lado, a plotagem das frequências empíricas (probabilidade empírica de excedência ou tempos de retorno), de outro, as observações amostrais devidamente ordenadas. Por se tratar de variáveis

hidrológicas, onde a princípio não se conhece a distribuição de probabilidades da população de onde a amostra foi retirada, vários modelos teóricos são propostos para descrever o comportamento probabilístico da variável de interesse, sendo o analista responsável por optar por aquele que lhe parecer ser o mais adequado.

Restringida a uma análise gráfica, os pares ordenados das variáveis plotadas comumente apresentam incertezas associadas ao tamanho e representatividade da amostra. Tais incertezas são amenizadas com a construção de um diagrama denominado “papel de probabilidades”. Esse gráfico serve, portanto, para relacionar as observações amostrais e suas respectivas probabilidades empíricas, cuja escala aritmética poderá ser previamente transformada para uma escala apropriada com a função de linearizar a relação entre a função acumulada  $F_x(x)$  ou  $[1 - F_x(x)]$  e a variável aleatória  $X$ . A escala apropriada é geralmente construída pela variável reduzida da distribuição, ou simplesmente escala reduzida. Na análise visual da frequência empírica, essa linearidade servirá de indicador para aceitação ou rejeição da hipótese de aderência de um determinado modelo teórico de distribuição porventura testado.

No caso de eventos máximos a estimativa da probabilidade empírica de excedência, associada a um determinado ponto, é geralmente determinada a partir da “posição de plotagem”, a qual pode ser expressa como uma fração entre 0 e 1 ou o intervalo percentual de 0 a 100%, com recomendações para utilização do intervalo  $[0,01 \ 0,99]$ , uma vez que para dados amostrais os extremos são incertos. Nesse caso, as séries hidrológicas de valores máximos são classificadas em ordem decrescente, assim possibilitando que a posição de plotagem represente a probabilidade de excedência  $P$  da variável aleatória  $X$ , ser maior ou igual a um dado quantil  $x$ , ou seja,  $P(X \geq x)$ ;

Para a determinação da posição de plotagem, fórmulas específicas como as expressões (1), (2), (3), (4) e (5) podem ser usadas. Tais fórmulas, apesar de produzirem resultados similares, apresentam variações consideráveis nas caldas (Naghetini e Pinto, 2007).

$$q_i = \frac{i}{n+1} \text{ (Weibull)} \quad (1)$$

$$q_i = \frac{i-0,44}{n+0,12} \text{ (Gringorten)} \quad (2)$$

$$q_i = \frac{i-0,375}{n+0,25} \text{ (Blom)} \quad (3)$$

$$q_i = \frac{i-0,5}{n} \text{ (Hazen)} \quad (4)$$

$$q_i = \frac{i-0,40}{n+0,20} \text{ (Cunnane)} \quad (5)$$

onde:  $i$  é o valor da posição na amostra ordenada e  $n$  é o tamanho da amostra.

Definida a posição de plotagem, o papel de probabilidade deverá ser iniciado com a plotagem dos pares  $[q_i, x]$  para formalização do gráfico da distribuição empírica, onde  $q_i$  correspondente as posições de plotagem e  $x$  aos quantis.

### 2.4.3 Modelos teóricos de distribuição de probabilidade

Para Lanna (2007) o ajuste de uma distribuição teórica a uma distribuição empírica de probabilidades é, na sua essência, a determinação dos valores adequados dos parâmetros, de forma que a primeira se torne mais idêntica possível à segunda. Franco *et al.* (2014) consideraram que as distribuições de probabilidade possibilitam a estimativa de eventos de precipitação diária máxima anual – PDMA associadas às suas frequências de ocorrência, enquanto Sansigolo (2008) acrescentou que as distribuições teóricas de probabilidade são simplesmente funções analíticas usadas para escrever o comportamento de determinadas variáveis.

Para Naghettini e Pinto (2007), vários modelos de distribuição de probabilidades para análises de frequência das variáveis aleatórias contínuas foram propostos, embora não haja ainda uma distribuição específica em consenso, capacitada para descrever o comportamento da variável sob quaisquer condições possíveis. No entanto, existe um grupo de modelagem indicadas para atender séries de extremos de máximos e mínimos. A definição de um modelo que descreva as características probabilísticas de um fenômeno hidrológico é um problema complexo que também depende da estimação dos seus parâmetros.

Segundo Alves *et al.* (2013), as funções teóricas de distribuição comumente usadas em diversas regiões do mundo para modelar eventos hidrológicos extremos, como precipitações e vazões máximas ou mínimas, são: GEV, *Gumbel* e *Pearson* tipo III. Mendes *et al.* (2013) estudaram a relação entre os quantis de PDMA e o tamanho das amostras de dados. Para isso, utilizaram séries de duração anual em anos hidrológicos e as distribuições de probabilidades: Normal; Log-normal; *Gumbel*; GEV; *Pearson* tipo III e *Log-Pearson* tipo III. Anjos *et al.* (2013) utilizaram as distribuições de probabilidade GEV e *Gumbel*, para modelagem estatística em estudos sobre estacionariedade de séries temporais de eventos extremos de vazões no Sudeste do Brasil.

Segundo Naghettini e Pinto (2007), a “teoria de valores extremos” fornece as bases teóricas para a utilização dos modelos que dela derivam, como entre outras a distribuição *Gumbel* para máximos. Porém, consideraram que a distribuição de *Gumbel* é a distribuição extremal mais usada na análise de frequência de variáveis hidrológicas. Hershfield e Kohler (1960) apud Sansigolo (2008) concluíram que a distribuição teórica de *Gumbel* é a mais adequada para estimar as probabilidades de ocorrência de eventos extremos de precipitação para diversas durações, após analisar dados de milhares de estações pluviométricas nos Estados Unidos.

Caso o analista não opte por indicar inicialmente o modelo *Gumbel*, poderá fazer o ajuste da distribuição aos diversos modelos teóricos e selecionar o mais apropriado, ou seja, o que melhor se ajustou, sabendo, sobretudo, que o modelo *Gumbel* será forte candidato e com grandes chances. Nesse momento, deverá ser efetuado a identificação e tratamento de eventuais pontos atípicos. Isso fará com que cada distribuição teórica candidata possa expressar sua total capacidade competitiva. As possíveis detecções deverão submeter-se à análise individual em cada ponto, podendo os mesmos serem excluídos e os testes de ajustamento reprocessados, quando caracterizados por erros que lhe propiciou a anomalia, podendo também serem mantidos em casos de eventos raros justificados pela dispersividade. Uma avaliação regional poderá contribuir para observação da veracidade de suas ocorrências.

Embora frequentemente presentes em amostras de dados hidrológicos, os pontos atípicos (*outlier*), ou pontos plotados fora da área esperada para sua ocorrência, podem ser identificados e analisados por diversas formas. Atualmente, tem sido muito usado o critério dos quartis amostrais, os quais se fundamentam na amplitude interquartis-AIQ. Esse procedimento usado por Alexandre (2009) e Alexandre *et al.* (2010), apesar de não constituir, do ponto de vista estatístico, um teste de hipótese associado a um nível de significância, tem sido bastante utilizado.

Zhang e Yang (2004) e Santos *et al.* (2011) preferiram utilizar as médias ( $\bar{x}$ ) e os desvios padrão ( $\sigma$ ) em cada ponto dispersivo, como sendo:  $(\bar{x} - n \cdot \sigma)$  e  $(\bar{x} + n \cdot \sigma)$ , onde  $n$  é o número de vezes ordenado pelo usuário. Existem outros métodos mais robustos, baseados em testes de hipóteses, como o Método de *Grubbs-Beck*. Nesse teste, são determinados os limites superior ( $X_{sup}$ ) e inferior ( $X_{inf}$ ) para uma dada significância estatística, utilizando estatísticas apropriadas para definição dos pontos atípicos superiores e inferiores e suas respectivas exclusões das séries antes da análise de frequência (Mendes *et al.*, 2013).

#### 2.4.4 Estimação dos parâmetros

Conhecido ou presumido o modelo distributivo de uma variável aleatória e determinado os valores numéricos dos seus parâmetros, pode-se, então, calcular as probabilidades associadas a quaisquer eventos definidos pelos valores dessa variável. No entanto, a verdade é que o modelo distributivo e os valores dos parâmetros seriam realmente conhecidos somente se toda a população fosse amostrada, o que se tornaria impossível na prática quando se trata de variáveis hidrológicas. Existem, porém, procedimentos estatísticos, matematicamente desenvolvidos para estimação desses parâmetros, geralmente aplicados após a escolha do modelo distributivo teórico a ser ajustado aos dados amostrais. As estimativas paramétricas resultantes permitem o cálculo de probabilidades e

quantis. Dentre vários métodos concebidos para estimação desses parâmetros, os mais usuais são: Momentos, Máxima Verossimilhança e Momentos-L.

Segundo Das e Simonovic (2011), atualmente a distribuição de probabilidade Log-Pearson tipo III é de uso obrigatório em análise de frequência nos Estados Unidos, assim como a distribuição de *Gumbel* com seus parâmetros estimados pelo Método dos Momentos (convencional), também é da mesma forma usada no Canadá.

Lanna (2007) acredita, porém, que a teoria das probabilidades oferece, no entanto, alguns caminhos mais diretos como os seguintes métodos: Métodos dos Momentos, Métodos dos Mínimos Quadrados, Método da Máxima verossimilhança e o Método dos Momentos Ponderados pelas Probabilidades. Cada um deles tem vantagens e desvantagens sobre os demais, sendo os dois primeiros mais simples.

Para Naghettini e Pinto (2007), a Máxima Verossimilhança é considerada o método de estimação mais eficiente porque produz os estimadores de menor variância. Entretanto, para alguns casos, sua aplicação em amostra de pequeno tamanho produz estimadores de qualidade comparável ou inferior a outros métodos. O Método dos Momentos é o de estimação mais simples. No entanto, os estimadores são, em geral, de qualidade inferior e menos eficientes do que o Método de Máxima Verossimilhança. Na hidrologia, frequentemente em pequenas amostras, os estimadores desse método podem ser comparáveis ou superiores aos outros métodos. O Método dos Momentos-L produz estimadores com qualidade comparável àqueles produzidos pelo Método de Máxima Verossimilhança, exigindo menor esforço computacional para solução de sistemas de equações menos complexas. Em amostras pequenas, seus estimadores frequentemente são mais precisos do que no Método de Máxima Verossimilhança.

Para Alves *et al.* (2013), muitos autores utilizam apenas o método dos momentos para estimação dos parâmetros das distribuições. Esta escolha pode ser devido à simplicidade dos cálculos, quando comparado com outros métodos de estimação, como exemplo: Momentos L e Máxima Verossimilhança.

#### **2.4.5 Estimativas dos quantis e intervalos de confiança**

Ao se traçar a distribuição empírica em um dado papel de probabilidades, os pares  $[q_i, x]$  podem indicar uma tendência retilínea, cuja reta pode ser extrapolada para tempos de retorno maiores que aquele associado à maior observação, constituindo desse modo uma situação pouco frequente quando se trata de séries hidrológicas. Na verdade, o que se costuma ver são pontos delineando curvaturas e irregularidades devido a vários fatores. Pode-se afirmar que a inadequação do modelo definido segundo a seleção do papel de probabilidades e os problemas decorrentes da

curta extensão das séries, compõem as principais dificuldades que podem limitar ou inutilizar o uso somente da distribuição empírica para a análise de frequência.

As estimativas dos quantis correspondentes às probabilidades de não superação dos eventos extremos, associados aos períodos de retorno, são calculadas após a estimação dos parâmetros. É certo que haverá erros provenientes de incertezas contidas na estimação dos parâmetros a partir das amostras. Portanto, a confiabilidade das estimativas dos quantis de variabilidade hidrológica é dada pelo componente denominado “erro padrão da estimativa”. Partindo desse princípio, podem-se construir matematicamente intervalos de confiança aproximados, a um nível  $100(1-\alpha)\%$ , sendo  $\alpha$  o nível de significância estatística. Geralmente, os limites de confiança estabelecidos dependem do método usado para estimação dos parâmetros, como o Método da Máxima Verossimilhança, dos Momentos e dos Momentos-L.

#### 2.4.6 Aderência da distribuição empírica ao modelo teórico

Para a definição do modelo que descreva o comportamento probabilístico de uma variável hidrológica, é imprescindível o ajuste ou aderência da distribuição teórica à curva da distribuição empírica dos valores amostrais, ao nível de significância estatística desejado. Entre outros testes de aderência destacam-se os teste Qui-Quadrado, *Kolmogorov-Smirnov*, *Anderson Darling* e *Filliben*.

Mendes *et al.* (2013) utilizaram testes de aderência de *Kolmogorov-Smirnov* e Qui-Quadrado para verificação dos ajustes às distribuições de probabilidades em sua pesquisa. Segundo Alves *et al.* (2013), na aprovação ou não da distribuição, a diferença da frequência calculada com a frequência empírica deve ser menor que o valor crítico encontrado em tabelas próprias de cada teste, de acordo com o nível de significância usado, sendo que, quanto mais próximo de zero for esse valor, o modelo representará de forma mais precisa os dados amostrais. Dessa forma, todos os testes de aderência testam a hipótese de determinada distribuição empírica, pertencer ou não à determinada distribuição teórica.

Segundo Das e Simonovic (2011) os testes de aderência podem ser usados de forma confiável em estatísticas climáticas para ajudar a encontrar a melhor distribuição aos dados fornecidos. Esses testes calculam as estatísticas de teste que são utilizados para analisar o quanto os dados se ajustam à dada distribuição. Eles descrevem as diferenças entre os valores dos dados observados e os valores esperados a partir da distribuição que está sendo testada.

Segundo Leotti *et al.* (2005) os testes de *Anderson-Darling* e *Kolmogorov-Smirnov* são baseados na Função de Distribuição Empírica – FDE dos dados, e apresentam vantagens sobre o teste de aderência Qui-Quadrado, incluindo maior poder e invariância em relação aos pontos médios dos intervalos escolhidos. O teste de *Kolmogorov-Smirnov* pertence à classe suprema de estatísticas

baseadas na FDE, pois trabalha com a maior diferença entre a distribuição empírica e a hipotética. O teste Anderson-Darling pertence à classe quadrática de estatísticas baseadas na FDE, pois trabalha com as diferenças quadráticas entre a distribuição empírica e a hipotética.

Sansigolo (2008) estabeleceu uma análise crítica do ajuste de diferentes distribuições teóricas de probabilidades de extremos às longas séries de precipitação diária anual, com período de 1917 a 2004, além de diversas variáveis meteorológicas medidas na Estação Agrometeorológica da Universidade de São Paulo – USP, em Piracicaba – SP. As distribuições Normal, *Gumbel*, *Fréchet*, *Weibull*, *Log-Normal* e *Pearson 3*, foram ajustadas às PDMA, e tiveram seus parâmetros e intervalos de confiança estimados pelo Método da Máxima Verossimilhança. Como resultado, o autor concluiu que a distribuição de *Gumbel* foi a que melhor se ajustou aos extremos de precipitação máxima diária.

Alves *et al.* (2013) analisaram os métodos de estimativa de parâmetros para as distribuições de *Gumbel* e GEV em eventos de precipitações máximas em Cuiabá no Mato Grosso. Utilizaram os dados de precipitação diária medidos na estação pluviométrica da Universidade Federal do Mato Grosso – UFMT. O trabalho objetivou determinar entre as distribuições teóricas analisadas, a melhor adequação à série histórica, comparando os Métodos dos Momentos, da Máxima Verossimilhança e dos Momentos – L. A avaliação foi baseada nos testes de aderência *Anderson Darling* e *Kolmogorov-Smirnov*. Concluíram que a função GEV estimada pela Máxima Verossimilhança foi a que melhor se adequou à série analisada.

Mendes *et al.* (2013) estudaram a relação entre os quantis de chuvas máximas e o tamanho da amostra de dados. Visando verificar a influência do número de anos de dados de chuva na inferência de seus quantis de valores extremos, selecionaram 8 séries pluviométricas dos estados de São Paulo e Minas Gerais na *Hidroweb*, com períodos maiores que 50 anos. Em seguida, ajustaram as distribuições de probabilidades teóricas (Normal, Log-Normal, *Gumbel*, GEV, *Pearson* Tipo III e *Log-Pearson* Tipo III) com parâmetros estimados pelo Método dos Momentos. Para a escolha do melhor ajuste utilizaram os testes de aderência de *Kolmogorov-Smirnov* e Qui-Quadrado. A partir dos anos hidrológicos foram selecionados os valores máximos anuais e calculados os quantis de precipitações extremas. Os erros relativos, obtidos para diferentes tempos de retorno, foram relacionados ao tamanho das amostras. Entre outras conclusões, os autores perceberam que o erro relativo tende para zero à medida que o tamanho da amostra cresce ou tende à população.

Franco *et al.* (2014), com o objetivo de identificar a distribuição teórica com melhor adequação às séries históricas de PDMA na bacia hidrográfica do rio Verde, Sul de Minas Gerais, utilizou *Gumbel*, Gama a 2 parâmetros e GVE. Para tal experiência, utilizaram oito estações pluviométricas, contendo séries históricas com mínimos de 20 anos de dados, disponibilizadas na

*Hidroweb* e distribuídas na área da bacia. Os parâmetros de cada distribuição foram estimados pelos Métodos dos Momentos, Máxima Verossimilhança e Momentos-L. Os ajustes das distribuições teóricas associados aos métodos de estimação dos parâmetros tiveram suas adequações avaliadas segundo os testes de *Kolmogorov-Smirnov*, *Qui-Quadrado*, *Anderson Darling* e *Filliben*. Concluíram que a distribuição GEV, pelo Método dos Momentos-L, foi a que melhor se adequou à análise probabilística de PDMA na Bacia do Rio Verde.

Almeida *et al.* (2014), com o intuito de prover novas informações sobre possíveis tendências na precipitação pluvial de São Paulo-SP, utilizaram séries normais (30 anos) de 45 pluviômetros distribuídos em cidades distintas, com períodos de 1977 a 2006. A partir da identificação das PDMA, as séries foram ajustadas à distribuição de *Gumbel*. Os dados foram testados pelo método de *Anderson-Darling* ao nível de significância  $\alpha=0,05$ , associados aos tempos de retorno de 2, 5, 10 e 100 anos. Para detecção de tendência, cada série foi dividida em 4 subperíodos, os quais foram submetidos às técnica estatística de *Mann-Kendall*. Das 45 cidades, 15 indicaram tendência positiva em pelo menos um dos subperíodos e 5 indicaram tendência positiva na série completa.

## 2.5 CHUVAS INTENSAS E DESASTRES NATURAIS EM RECIFE

### 2.5.1 Vulnerabilidade aos desastres naturais

Os deslizamentos das encostas, os alagamentos e as inundações são os principais desastres naturais causados por excessos pluviométricos que historicamente caracterizaram a cidade do Recife. Eles são assim considerados pela grande frequência com que ocorrem e pelo grau de certeza com que são esperados no calendário hidrológico da cidade. Tais ocorrências advêm de uma geoformologia dividida em áreas com predominância de morros ou planícies, essa segunda coberta por uma malha muito densa de rios e córregos perenes interligados ao oceano Atlântico.

Para Salgueiro *et al.* (2010), as condições de riscos aos desastres naturais peculiares à RMR são causadas, na maioria dos casos, pelos excessos de precipitações. Estes excessos produzem frequentemente ocorrências sazonais de inundações nas planícies e deslizamentos nas encostas dos morros, geralmente em meses do inverno da região.

Segundo Pfaltzgraff (2007), a ocupação dos morros da RMR é um processo que se desenvolveu desde o período colonial, e que se iniciou em Olinda e Recife, principalmente pelas populações de baixa renda. Os municípios de Recife, Olinda, Camaragibe e Abreu e Lima são os que apresentam maior concentração de registros de deslizamentos (com ou sem vítimas).

Santos *et al.* (2010) afirmaram que as características das precipitações que mais interferem no processo de erosão do solo são a intensidade, a duração e a frequência da precipitação, além da sua erosividade, e que a principal meta não é simplesmente quantificar um evento hidrológico que ocorreu mas, essencialmente, ter a capacidade de prever a ocorrência de eventos extremos e suas possíveis consequências.

Sob o ponto de vista meteorológico, Anjos (1998) comentou que na Grande Recife a ocorrência de chuvas entre março e julho é fundamental para amenizar a escassez d'água nas represas que abastecem as populações. Entretanto, é nesse período que ocorrem os maiores transtornos provocado por chuvas intensas. Se por um lado fortes chuvas causam alagamento de ruas e transtornos no trânsito, por outro, a continuidade da chuva alimenta as reservas de água de uma cidade.

Lira *et al.* (2007) afirmaram que os alagamentos em diversos bairros da cidade de Recife estão cada vez mais frequentes devido ao adensamento populacional, incluindo a verticalização das habitações, e impermeabilização, resultando em problemas socioeconômicos para os moradores e transeuntes. Continuando, afirmaram que devido aos alagamentos originados em períodos chuvosos, estão sendo iniciadas medidas de controle estruturais e não estruturais, como as técnicas compensatórias para correção ou prevenção dos danos.

Segundo Melo (2013), Recife sofre constantemente com os importunos consequentes de eventos chuvosos, mesmo em pequenas intensidades. Alagamentos, transbordos de canais urbanos e extensos engarrafamentos de veículos são apenas alguns impactos das chuvas na cidade. A planície do Recife está localizada um pouco acima do nível do mar (2 a 10 m), e em algumas áreas a cidade é rodeada por morros, o que proporciona o acúmulo de água em seu interior.

Para Preuss *et al.* (2011), a cidade do Recife possui peculiaridades geográficas que devem ser consideradas para a sustentabilidade do seu sistema de drenagem. As baixas cotas de seu território em relação ao nível do mar, grandes áreas planas, lençol freático próximo e aflorante à superfície na estação chuvosa e a influência dos níveis das marés, são características naturais que dificultam a drenagem. O sistema de drenagem do Recife também é prejudicado devido a canalização de riachos urbanos e ocupação de suas margens por construções regulares e irregulares, alta taxa de impermeabilização do solo, destino inadequado dos resíduos sólidos e falta de saneamento.

Cabral e Alencar (2005) apontaram outros motivos para os alagamentos e inundações na RMR: chuvas torrenciais na própria área da cidade; chuvas torrenciais nas áreas mais elevadas das cidades vizinhas; inundações fluviais causadas por chuvas nas bacias hidrográficas dos rios que cortam a cidade e; marés altas de maior amplitude que chegam a alagar algumas partes baixas da cidade.

Preuss *et al.* (2011) afirmaram ainda que o crescimento populacional urbano tem se desenvolvido em disparidade com a infraestrutura oferecida pelo poder público. Loteamentos sem planejamento, elevadas taxas de impermeabilização do solo, retificação e estreitamento dos leitos dos cursos d'água, modificaram a drenagem natural nos centros urbanos. O resultado é o incremento do escoamento superficial e os impactos decorrentes de enchentes e alagamentos. Essa situação se agrava nas planícies costeiras, como é o caso do Recife.

Souza (2011) determinou e classificou limiares da precipitação pluviométrica, assim como avaliou os impactos sociais, econômicos e ambientais decorrentes dos desastres associados às chuvas na cidade do Recife. A classificação obtida foi recomendada para constituição de um sistema de alerta, com benefícios à sociedade e à Defesa Civil.

### **2.5.2 Classificação das precipitações acumuladas em 24 horas**

Souza (2011), entre outros objetivos, identificou os limiares pluviométricos e estabeleceu uma nova classificação para as chuvas precipitadas na cidade do Recife, em consonância com os níveis dos impactos socioeconômicos e ambientais dos desastres naturais correspondentes, com o intuito de estabelecer um sistema de alerta para a cidade. A partir da série pluviométrica de 1961-2008, a metodologia utilizou a “Técnica dos quantis”, baseada nas frequências acumuladas dos dados e o *software GRETL*. Primeiramente, identificou e classificou os limiares da intensidade de chuva

diária, mensal, anual e decadal, e, em seguida, avaliou os impactos decorrentes das suas intensidades, considerando os prováveis riscos e vulnerabilidades. A Tabela 2.4 mostra a classificação obtida para precipitação diária acumulada em 24 horas relacionada às ordens quantílicas, com definição das classes e probabilidades.

Tabela 2.4 – Classificação da precipitação diária acumulada em Recife em relação aos quantis.

Classes	Probabilidades
Dia Seco	$P < Q_{0,05x}$
Chuva Muito Fraca	$Q_{0,05} \leq P < Q_{0,25}$
Chuva Fraca	$Q_{0,25} \leq P < Q_{0,50}$
Chuva Moderada	$Q_{0,50} \leq P < Q_{0,75}$
Chuva Forte	$Q_{0,75} \leq P < Q_{0,95}$
Chuva Muito Forte	$P \leq Q_{0,95}$

Fonte: Souza (2011)

Para Souza (2011), dados analisados em escala diária são fundamentais, tanto para a compreensão do comportamento da precipitação como para a avaliação dos impactos das chuvas intensas. Ratificou também a utilização da técnica dos quantis na chuva de Recife, uma vez que a maioria dos trabalhos adotam limiares aleatórios, totalmente desprovidos de critérios estatísticos. Para isso, baseou-se na premissa de que uma chuva intensa em Recife é diferente de outra observada em outro local, devido a vários fatores, como exemplo da urbanização, declive do terreno, vegetação, localização da estação meteorológica etc.

A partir das análises quantílicas, determinou que as chuvas com intensidade maior ou igual ao limiar indicado para Chuva Muito Forte seriam classificadas como eventos extremos de chuvas, podendo ser complementados com Chuva Extrema e Chuva Muito Extrema. Após a análise classificatória da precipitação diária concluiu:

- Chuva Muito Forte e Chuva Forte – Quando há registros de precipitação nessas classes, haverá sempre escorregamentos e muitos pontos de alagamentos;
- Moderada – Nessa intensidade também poderá desencadear escorregamentos, principalmente pontos de alagamentos;
- Chuva Fraca – Nessa intensidade não haverá ocorrência de danos associados, porém, quando ocorrerem registros de precipitação em dias consecutivos anteriores a esse evento, com acumulado superior a 30 mm, poderá haver escorregamentos;
- Chuva Muito Forte, Forte e Moderada – Nessas intensidades, dias consecutivos com chuvas anteriores a esse evento contribuirão ainda mais para ocorrência de desastres;
- Chuva Extrema e Chuva Muito Extrema – São considerados eventos extremos por assumir intensidades acima do limiar da Chuva Muito Forte e sempre haverá registros de alagamentos, escorregamentos, e outros tipos de impactos.

O estudo também revelou que a maioria dos bairros do Recife provia consideráveis riscos e vulnerabilidades aos desastres naturais, e que a tendência obtida indicou aumento da frequência de eventos extremos de chuvas a partir da década de 80, com precipitações diárias superiores a 100 mm. Entre outras revelações, Souza (2011) enfatizou a importância da adoção de um modelo conceitual de sistema de alerta, com vista aos riscos de desastres na cidade de Recife, suficiente para atender aos diversos setores da sociedade, especialmente à Defesa Civil.

### 2.5.3 Sistemas de alerta atuantes

No âmbito nacional, a cidade de Recife está entre os municípios assistidos pelo Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais – CEMADEN, pertencente ao Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação – MCTI, e o Centro Nacional de Gerenciamento de Riscos e Desastres – CENAD, do Ministério da Integração Nacional (MI), desde 2011 quando a “Sala de situação” da instituição tornou-se operacional (CEMADEN, 2015).

Em se tratando de Pernambuco, a “Sala de situação” da APAC acompanha as tendências hidrometeorológicas e toma as decisões necessárias em tempo hábil desde 2010. Essa Agência, além de divulgar diariamente boletins hidrometeorológicos, emite avisos sobre possibilidade de ocorrência de eventos extremos. Entre outros órgãos interessados, a Coordenadoria de Defesa Civil do estado de Pernambuco – CODECIPE representa seu principal cliente (APAC, 2012).

No acompanhamento a nível municipal, a Secretaria-Executiva de Defesa Civil – SEDEC, órgão ligado à Prefeitura da Cidade do Recife, desenvolve ações preventivas com o objetivo de evitar ou minimizar acidentes em situações de calamidades, a partir do monitoramento permanente das áreas de risco que estejam sujeitas a deslizamentos de terra e alagamentos (SEDEC, 2015). Essa Secretaria também opera com os avisos de alerta procedidos pela APAC.

Os avisos sobre a possibilidade de ocorrência de eventos extremos máximos são elaborados na Sala de situação da APAC. As emissões abordam as condições hidrometeorológicas, diretrizes e ações da Defesa Civil, compartilhadas com a CODECIPE, as quais podem ser encontradas no “Manual de Operação da Sala de Situação”, segundo os níveis de alerta praticados (APAC 2012). Para o alerta meteorológico, a Agência buscou identificar um limiar que representasse uma referência operacional para emissão dos boletins de alerta, sendo esse igual a 30 mm. Esses avisos geralmente são prioritariamente destinados à CODECIPE e a outros órgãos de interesse, como a SEDEC e a imprensa falada e escrita de pequena e grande circulação em Pernambuco.

Ramos (2010) estudou as relações intensidade-duração-frequência de chuvas intensas na cidade do Recife, a partir de dados de pluviogramas medidas no aeroporto da cidade, no período de 1968 a 2007. Utilizando análise de frequência dos dados, obteve uma Nova Equação de Chuvas

Intensas para a cidade do Recife. Ao compará-la às Equações de Chuvas atualmente utilizadas, constatou que as intensidades de precipitação obtidas com a nova equação, para as menores durações (5, 10, 15 e 30 minutos) – que apresentaram as maiores intensidades e que podem dar origem a problemas de alagamentos –, chegaram a ser 41% maiores do que as obtidas com as equações utilizadas. Sugeriu, então, que evitassem a utilização dessas equações, uma vez que os sistemas de drenagem existentes na cidade do Recife já estavam, atualmente, trabalhando com sobrecarga.

Pfaltzgraff (2007) estudou a RMR e elaborou com custos reduzidos, um mapa de suscetibilidade aos deslizamentos bastante confiável, utilizando ferramentas de geoprocessamento e sensoriamento remoto, tais como: imagens de radar e de satélite, além de outras informações sobre o meio físico. O autor teve como objetivo, possibilitar aos administradores e gestores governamentais, as informações necessárias ao ordenamento e planejamento territorial.

CAPÍTULO 3

Material e métodos

---

### 3.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

#### 3.1.1 Localização e indicadores físicos

A Sub-bacia 39 encontra-se localizada na Região Hidrográfica Atlântico Nordeste Oriental, que por sua vez representa uma das 12 partes integrantes da Divisão Hidrográfica Nacional, como mostra a Figura 3.1.

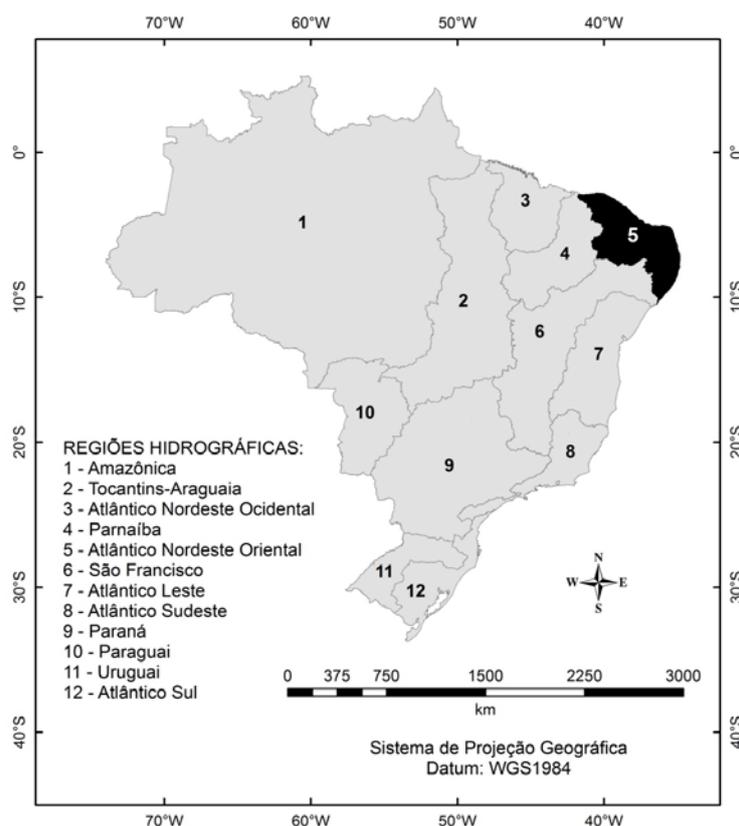


Figura 3.1 – Localização da Região Hidrográfica Atlântico Nordeste Oriental no Brasil

Segundo ANA e PNUMA (2007), a Divisão Hidrográfica Nacional foi estabelecida pela Resolução nº 32 do Conselho Nacional de Recursos Hídricos – CNRH em 15 de outubro de 2003. A Resolução contemplou a bacia hidrográfica como base organizacional para implementação da Política de Recursos Hídricos no Brasil de acordo com a Lei Federal nº 9.433/97. O seu Artigo primeiro instituiu a divisão hidrográfica e atribuiu às regiões hidrográficas – RH, a finalidade de orientar, fundamentar e implementar o Plano Nacional de Recursos Hídricos – PNRH no País. O Parágrafo único conceituou a região hidrográfica, como sendo o espaço territorial brasileiro compreendido por uma bacia, grupo de bacias ou sub-bacias hidrográficas contíguas, com características naturais, sociais e econômicas, homogêneas ou similares, com vistas a orientar o planejamento e gerenciamento dos recursos hídricos.

A RH Atlântico Nordeste Oriental encontra-se inserida na região Nordeste do Brasil – NEB e divide-se em cinco sub-bacias, cujas áreas somam 287.000 km<sup>2</sup>, como mostra a Figura 3.2. A Sub-

bacia 39 intercepta partes de três estados nordestinos, como: Paraíba, Pernambuco e Alagoas, conforme mostrado na Figura 3.3. Tabela 3.1 mostra respectivamente alguns indicadores físicos importantes.

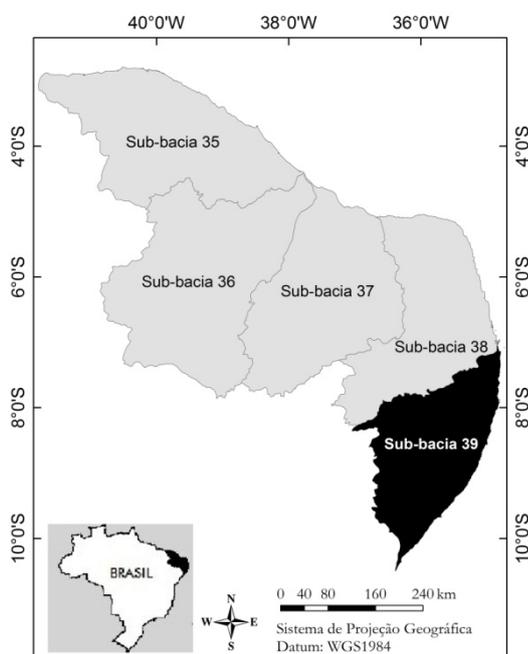


Figura 3.2 – Localização da Sub-bacia 39 na Região Hidrográfica Atlântico Nordeste Oriental

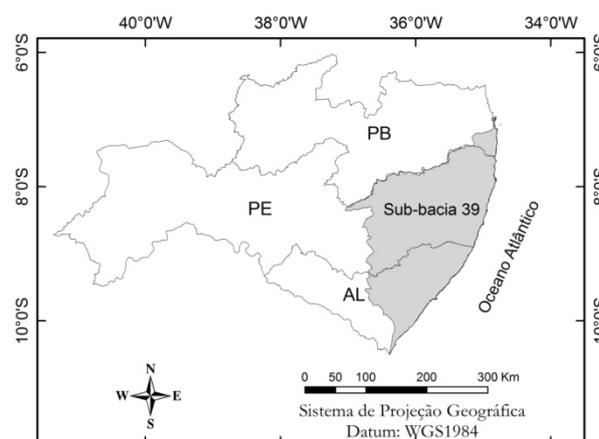


Figura 3.3 – Interseção da Sub-bacia 39 com os estados do Nordeste brasileiro

Tabela 3.1 – Indicadores físicos da Sub-bacia 39

UF	Municípios do Estado (Un)	Ocupação no Estado (%)	Área (km <sup>2</sup> )	População* (Hab.)	Densidade* demográfica (Hab./m <sup>2</sup> )
PB	7	3	1.280	885.284	692
PE	117	66	28.379	6.987.001	246
AL	58	31	13.524	1.385.411	102
Total	182	100	43.183	9.257.696	214

\*Censo 2010 – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2013)

Na direção norte/sul, a faixa litorânea da Sub-bacia 39 descreve uma extensão de 498 km, entre o município paraibano de Cabedelo, na Região Metropolitana de João Pessoa e o município de Piaçabuçu em Alagoas, próximo à foz do rio São Francisco, limítrofe com o estado de Sergipe. Dessa extensão, 68 km pertencem ao litoral paraibano, 181 km a Pernambuco e 249 km estão no estado de Alagoas. Na direção leste/oeste, a maior distância é do Litoral ao município de Arcoverde em Pernambuco, medindo 232 km.

### 3.1.2 Aspecto climatológico

A divisão zonal dos climas no Brasil considera a Sub-bacia 39 integrada ao Clima Tropical Nordeste Oriental, com caracterização de “Clima quente” em quase todo o seu território, e pequenas ocorrências de “Clima subquente” (IBGE, 2014), como mostra a Figura 3.4 e a Tabela 2.1. Segundo Nimer (1989), o IBGE utilizou o critério de Köppen como sistema de classificação climática.

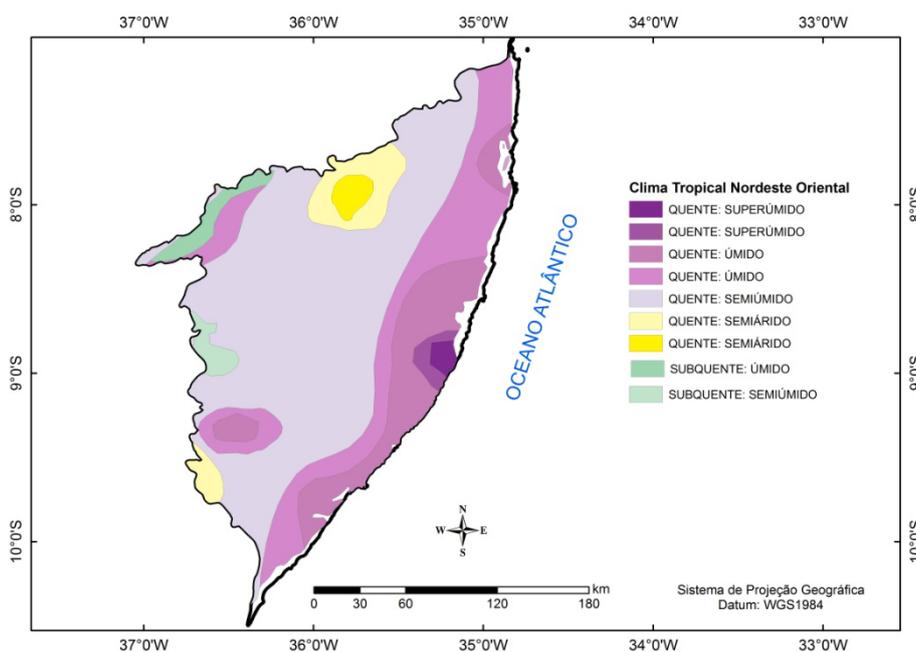


Figura 3.4 – Climatologia da Sub-bacia 39. Fonte: (IBGE, 2014)

Na área mais quente da Sub-bacia 39, a temperatura média encontra-se acima de 18°C em todos os meses do ano, com ocorrência de anos chuvosos e secos, destacando que os anos secos podem chegar a oito meses sem chuvas significativas. Na parte subquente, a temperatura média varia entre 15° e 18°C em pelo menos um mês do ano e podem ocorrer de três a cinco meses secos.

A subdivisão climática da Figura 3.4 identifica a predominância do clima “quente semiúmido” na maior parte da Sub-bacia 39. Na parte leste, o aumento da umidade na Zona da Mata e no Litoral, permite classificá-los em “quente úmido”, chegando a “quente superúmido” nos municípios litorâneos de São José da Coroa Grande-PE e Maragogi-AL. O clima “quente semiárido”, característico do Sertão e Agreste nordestino, eleva-se em dois pontos da Sub-bacia 39: na bacia hidrográfica do rio Capibaribe/Goiana e na bacia do rio Coruripe, fronteira com a bacia do rio São Francisco. Nas pequenas ocorrências de clima “subquente úmido” observa-se a presença de microclimas, como exemplo dos municípios pernambucanos de Taquaritinga do Norte e Garanhuns, ambos sobre as altitudes do Planalto da Borborema.

Na parte pernambucana o Litoral e a Zona da Mata da Sub-bacia 39, apresentam os mais elevados totais pluviométricos. O Agreste, sendo uma região intermediária entre áreas de clima

úmido (Litoral e Zona da Mata) e seco (Sertão) apresenta zonalmente similaridade climática com as duas formas. Em algumas áreas, como os municípios de Garanhuns e Taquaritinga do Norte, regionalmente conhecidas como “brejos de altitude”, a condição dominante é subúmida e, em certos casos, até mesmo úmida (SECTMA – PE, 1998). Na parte alagoana predomina o “clima tropical chuvoso com verão seco”, excetuando o município de Maragogi-AL, classificado como “clima tropical chuvoso de monção” (SEMARH – AL, 2010). Já na porção Litoral e Zona da Mata da pequena parte paraibana, o “clima é tropical úmido” (SECTMA – PB, 2006).

Os sistemas meteorológicos que produzem ou influenciam as precipitações pluviais na Sub-bacia 39 são os mesmos que atuam no NEB, principalmente os que atuam no Litoral, Zona da Mata e Agreste. Com base na abordagem descrita em SECTMA – PE (2006), os principais sistemas meteorológicos responsáveis pelas chuvas nessa região são: a Zona de convergência intertropical – ZCIT; as Frentes frias; os Distúrbios ondulatórios de leste ou Ondas de leste; os Vórtices ciclônicos do Ar Superior – VCAS; os sistemas de brisas terrestre e marítima; e os ventos vale-montanha.

As tempestades que comumente ocorrem na Sub-bacia 39 têm suas origens nos sistemas de ondas de leste, porém quando há deslocamento da ZCIT para o sul, no Atlântico tropical, esse sistema também atua nessa região em anos chuvosos. Para SECTMA – PE (2006), a ZCIT, que é o principal sistema de produção de chuvas no semiárido, atua principalmente nos meses de março e abril e, em alguns anos, está presente nos meses de fevereiro e maio; e as Ondas de leste, que se formam sobre o oceano, atingem principalmente o Litoral e a Zona da Mata, produzindo chuvas intensas.

A Sub-bacia 39 apresenta grande variabilidade pluviométrica devido às diversas características climatológicas encontradas na própria região NEB. Conforme CPRM (2014), os históricos pluviométricos registraram na Sub-bacia 39, precipitações anuais médias que variam de 379,4 mm no semiárido a 2089,6 mm no Litoral e Zona da Mata, no período de 1977 a 2006, como mostra as isoietas médias dos totais anuais da Figura 3.5, processadas segundo os dados fornecidos pela *Hidroweb*.

A Figura 3.5 mostra também as médias dos totais mensais para o ano civil, espacializadas em quatro estações pluviométricas, distribuídas sobre a superfície da Sub-bacia 39. Modeladas sob forma de hietograma, descrevem o período chuvoso que se estende de março a agosto, com o trimestre mais úmido de maio a julho e máximos em junho. No agreste, representado pela estação de Sanharó, a distribuição temporal apresenta-se pouco diferenciada nos meses de fevereiro, março e abril, devido à atuação da ZCIT no clima semiárido.

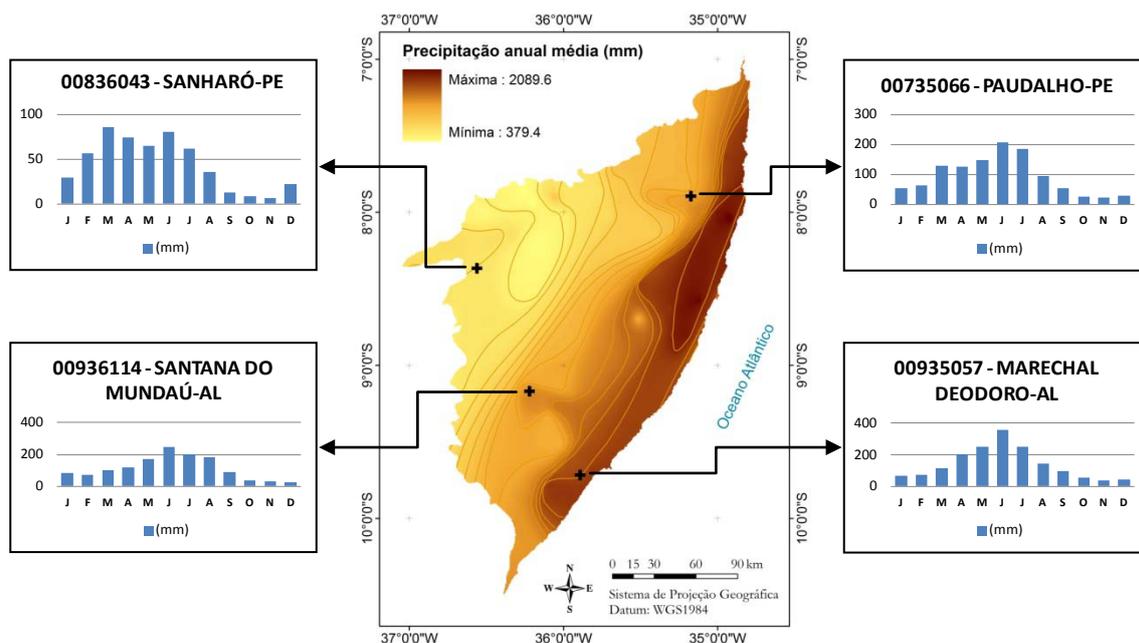


Figura 3.5 – Isoietas anuais média da Sub-bacia 39 com hietogramas das precipitações mensais em ano civil. Fonte: (CPRM, 2014)

### 3.1.3 Aspecto geomorfológico

O relevo da Sub-bacia 39 pode ser visualizado com a utilização do modelo digital do Terreno – MDT, obtido através da Missão Topográfica *Radar Shuttle* – SRTM. Com esse recurso, foi possível observar as altitudes negativas em relação ao nível do mar na planície costeira, especificamente na cidade de Recife, e as elevações que ultrapassam 1.100 m nos cumes das serras do Planalto da Borborema. A Figura 3.6 mostra o relevo da Sub-bacia 39.

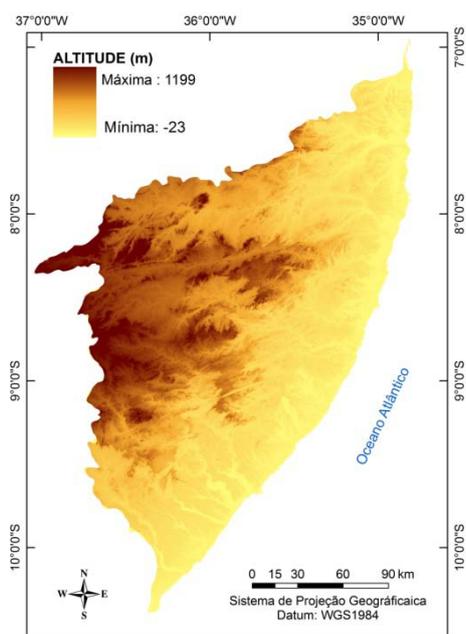


Figura 3.6 – Relevo da Sub-bacia 39

O mapa de “Unidades de relevo do Brasil” (IBGE, 2014) identificou o “Planalto Oriental da Borborema” em todo o oeste da Sub-bacia 39. No sentido leste-oeste da parte pernambucana, a planície costeira antecipa as colinas e os tabuleiros, que por sua vez precedem o Planalto e seus maciços. O planalto exerce grande influência nas precipitações devido ao forte efeito orográfico por ele produzido. A pequena parte paraibana mantém as mesmas características altimétricas da Zona da Mata e Litoral norte de Pernambuco (SECTMA – PE, 2006).

Na parte alagoana, o relevo é diversificado, partindo de plano, suave, ondulado e montanhoso, cuja variação começa em zero, na planície costeira, e vai a 875 m na divisa com o estado de Pernambuco (SEMARH – AL, 2010). As partes costeiras: da Paraíba, do norte de Pernambuco e de quase toda a costa alagoana, são consideradas “Tabuleiro costeiro”. Exceção se faz para a região da foz do rio São Francisco, denominada “Planície marinha” (IBGE, 2014).

### 3.1.4 Gestão dos recursos hídricos

Na Sub-bacia 39, as bacias hidrográficas, ou o seus conjuntos, são consideradas como unidades físico-territorial para o planejamento e gerenciamento dos recursos hídricos superficiais e subterrâneos, de acordo com a Lei Federal nº 9.433/97 e as respectivas Leis estaduais que tratam dos Recursos Hídricos. A Figura 3.7 apresenta as unidades hídricas planejadas pelos estados da Paraíba, Pernambuco e Alagoas, todos drenando no sentido do oceano Atlântico. A Tabela 3.2 correlaciona as subdivisões hidrográficas de acordo com suas posições na Figura 3.7.

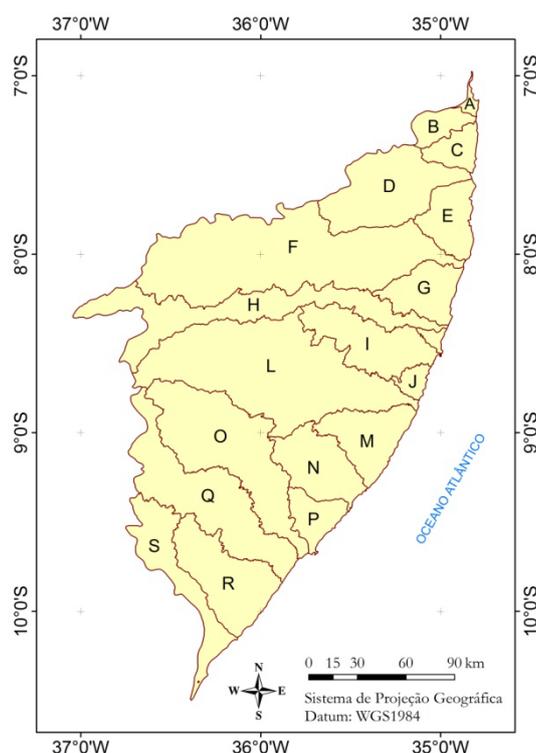


Figura 3.7 – Unidades hídricas da Sub-bacia 39 de acordo com a Tabela 3.2

Tabela 3.2 – Unidades hídricas da Sub-bacia 39  
(BH: Bacia Hidrográfica; UP: Unidades de Planejamento; RH: Região Hidrográfica)

Posição	UF	Unidades hídricas
A	PB	BH - Paraíba
B	PB	BH - Gramame
C	PB	BH - Abiaí
D	PE	UP1- Goiana
E	PE	UP14 - Grupo de pequenos rios litorâneos 1
F	PE	UP2 - Capibaribe
G	PE	UP15 - Grupo de pequenos rios litorâneos 2
H	PE	UP3 - Ipojuca
I	PE	UP4 - Sirinhaém
J	PE	UP16 - Grupo de pequenos rios litorâneos
L	PE	UP5 - Una
M	AL	RH - Litoral Norte
N	AL	RH - Camaragibe
O	PE/AL	UP6 - Mundaú-PE/RH-Mundaú-AL
P	AL	RH - Pratagy
Q	PE/AL	UP20 – Grupo de pequenos rios interiores/RH-Paraíba 1
R	AL	RH - São Miguel
S	AL	RH - Coruripe

A gestão desses recursos é individualmente desenvolvida entre as secretarias e órgãos afins dos Estados envolvidos e suas respectivas prefeituras municipais, embora todos sejam regidos pela Lei Federal nº 9.433/97. Comumente algumas políticas públicas são desenvolvidas em parceria com a Agência Nacional de Águas – ANA, que por sua vez conta com o apoio do Serviço Geológico do Brasil – CPRM.

### 3.1.5 Histórico de eventos extremos de precipitação

Na Paraíba, embora a Sub-bacia 39 envolva somente a BH Abiaí, a BH Gramame e parte da BH Paraíba, as chuvas fortes e prolongadas no estado da Paraíba durante janeiro e fevereiro de 2004, serviram para confirmar que os fenômenos das inundações não ocorrem com frequência, pela única razão de que raramente as precipitações apresentam volumes suficientes para transbordar, e criar transtorno às populações ribeirinhas e urbanas sob suas influências (SECTMA – PB, 2006).

Na parte pernambucana, os problemas de enchente atingem fundamentalmente a bacia do Capibaribe e conseqüentemente a Região Metropolitana do Recife – RMR (SECTMA – PE, 1998). Há registros históricos das enchentes desde 1632 que podem ser encontrados em Diário de Pernambuco (2015). Entre outras ocorridas na Sub-bacia 39, pode se destacar a de julho de 1970, onde as águas atingiram a Zona da Mata Sul e o Agreste de Pernambuco, por conta do transbordamento dos rios: Una, Ipojuca, Formoso, Tapacurá, Pirapama, Gurjaú, Amaraji e outros. A cidade que mais sofreu foi o Cabo de Santo Agostinho. No Recife, as águas do Capibaribe causaram grande destruição. Em agosto do mesmo ano, outra cheia atingiu o Recife e Olinda, desta vez provocada pelo transbordamento do rio Beberibe.

Em 1975, nova enchente, considerada a maior calamidade do século XX na região, ocorreu entre os dias 17 e 18 de julho. Em 01 de maio de 1977, outra enchente no rio Capibaribe inunda 16 bairros do Recife e Olinda, além de outras 15 cidades do interior do Estado que também foram atingidas, sendo São Lourenço da Mata o município mais prejudicado.

Entre julho e agosto de 2000 fortes chuvas castigaram o Estado, inclusive a RMR. Cidades foram parcialmente destruídas com chuvas que ultrapassaram 300 milímetros em apenas três dias. Dos 33 municípios atingidos, 16 decretaram emergência e 17, calamidade pública. Na Sub-bacia 39, os municípios pernambucanos de Rio Formoso, Gameleira, Goiana, Cupira e São José da Coroa Grande foram atingidos. Entre janeiro e fevereiro de 2004 ocorreu o mesmo com todas as regiões de Pernambuco. Chuvas jamais registradas entre os dois primeiros meses do ano foram atípicas e causaram fortes prejuízos. Todos os açudes e barragens do Sertão e Agreste transbordaram.

Entre os dias 30 de maio e 2 de junho de 2005, fortes chuvas provocaram enchentes em 25 cidades do Agreste, Zona da Mata e Litoral pernambucano. As cidades mais atingidas foram: Moreno, Vitória de Santo Antão, Jaboatão, Nazaré da Mata, Pombos, Ribeirão, Cabo de Santo Agostinho e Escada. O município que mais sofreu com o desastre foi Vitória de Santo Antão.

Segundo CPRM (2010), em junho de 2010, diversos municípios de Pernambuco e Alagoas foram sacrificados. Fortes temporais provocados por onda de leste precipitaram em Pernambuco, contabilizando um número significativo de municípios devastados pelas ondas de cheias, constatando-se uma das maiores tragédias já ocorridas nos Estados. Em Pernambuco, as bacias dos rios Ipojuca, Sirinhaém e Una foram as mais atingidas, conseqüentemente os municípios de: Vitória de Santo Antão, Cortez, Primavera, Barra de Guabiraba, Barreiros, Água Preta, Palmares, Catende, Jaqueira, Maraial, São Benedito do Sul e Correntes. Em Alagoas, foram atingidas as bacias dos rios Mundaú e Paraíba, com grandes prejuízos aos municípios de Rio Largo, Atalaia, Cajueiro, Capela, Murici, Branquinha, São Luis do Quitunde, Matriz de Camaragibe, Joaquim Gomes, Jundiá, Jacuípe, Viçosa, Paulo Jacinto, Quebrangulo, São José da Laje, União dos Palmares e Santana do Mundaú, sendo os mais devastados pertencentes às bacias dos rios Mundaú e Paraíba.

Segundo Junior *et al.*(2010) as cheias naturais dos rios Paraíba e Mundaú historicamente causam danos com certa regularidade ao estado de Alagoas. Nos últimos 100 anos sete grandes enchentes assolaram a região das bacias, exatamente nos anos de 1914, 1941, 1969, 1988, 1989, 2000 e 2010. Nos dois primeiros, há notícias de grandes tragédias embora não se tenha muitos registros das ocorrências. Constata-se que a cheia de 1969 foi a mais letal.

### 3.1.6 Características da cidade de Recife

Localizada no Litoral, a Capital pernambucana integra a RMR como sua principal cidade. Para Pfaltgraff (2007), a RMR situa-se numa faixa de 80 km de comprimento ao longo da costa do estado de Pernambuco, no extremo Nordeste do Brasil, e ocupa 2,62% da área do Estado. A Figura 3.8 mostra a localização da RMR no estado de Pernambuco.

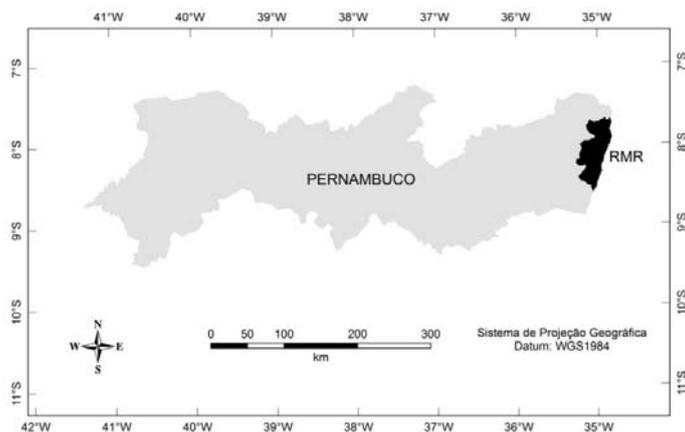


Figura 3.8 – Localização da Região Metropolitana do Recife em Pernambuco

Com o objetivo de estimular o desenvolvimento das cidades localizadas nos arredores da cidade do Recife, a RMR foi criada pelo Governo Federal, através da Lei Complementar Federal 14/73 de 8 de junho de 1973. Os 14 municípios que compõem a RMR são: Recife, Jaboatão dos Guararapes, Olinda, Paulista, Abreu e Lima, Igarassu, Camaragibe, Cabo de Santo Agostinho, Araçoiaba, Ilha de Itamaracá, Ipojuca, Moreno, Itapissuma e São Lourenço da Mata. A Figura 3.9 apresenta a divisão municipal da RMR com destaque para a cidade de Recife.

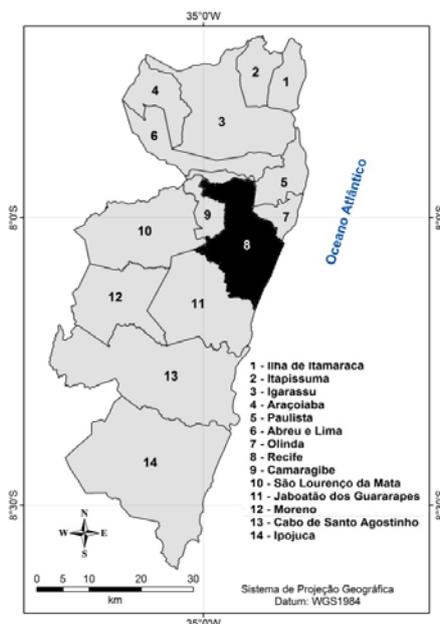


Figura 3.9 – Localização da cidade de Recife na Região Metropolitana de Recife

Também conhecida como “Grande Recife”, é a segunda maior aglomeração urbana do Nordeste e a sexta do Brasil (Salgueiro *et al.*,2010). Segundo a Prefeitura da Cidade de Recife – PCR, a cidade fica localizada na posição central do Litoral nordestino e é georreferenciada pela latitude 8° 04’ 03’’S e longitude 34° 55’ 00’’W. Seus limites incluem os municípios de: Olinda e Paulista ao norte; Jaboatão dos Guararapes ao sul; o oceano Atlântico ao leste; e São Lourenço da Mata e Camaragibe a oeste. Sob o clima quente e úmido, o território se compõe em: 67,43% de morros; 23,26% de planícies; 9,31% de aquáticas; e 5,58% de Zonas Especiais de Preservação Ambiental – ZEPA. Além de abrigar 94 bairros, a cidade é dividida em 6 Regiões Político-administrativas – RPA (PCR, 2015).

Segundo Melo (2013), no período de 1994 a 2010, a precipitação apresentou uma média anual de 2173,8 mm, com mínima de 1255,4 mm e máxima de 3482,0 mm, respectivamente nos anos de 1998 e 2000. Os meses de abril, maio, junho e julho são os que apresentam maiores totais mensais. O período chuvoso ocorre no outono-inverno, que vai de março a agosto, representando 70% do total precipitado. As condições climatológicas nessa região implicam em invernos severos com ocorrência de elevados índices pluviométricos, o que deflagra nas partes altas, o aumento da erosão nas encostas ocupadas e consequentes deslizamentos de barreiras, e alagamentos nas partes baixas (Salgueiro *et al.*,2010).

A elevada taxa de ocupação das encostas e a falta de urbanização, que em alguns casos ultrapassam a 400 habitantes por hectare, tornam essas áreas mais suscetíveis aos deslizamentos. Hoje um terço da população da cidade de Recife vive nos morros (Pfaltgraff, 2007). A Figura 3.10 mostra a média dos totais mensais da precipitação, medida pelo INMET na estação Recife.

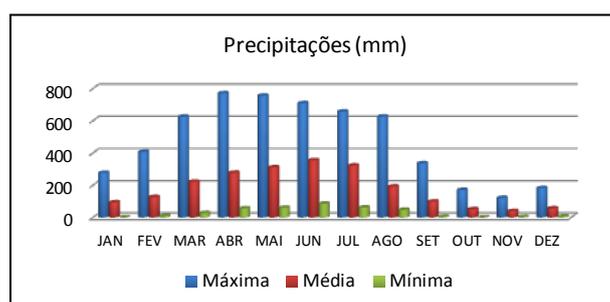


Figura 3.10 – Média dos totais mensais da precipitação na cidade de Recife de 1943 a 2012

Segundo Góes e Cirilo (2011), a ocupação territorial do Recife foi marcada predominantemente pela conquista de espaços ocupados pelas águas, por meio da prática de aterros. O sistema de drenagem é composto, além dos rios Beberibe, Capibaribe e Tejipió, de uma série de cursos d’água secundários ou canais, afluentes ou interligados à drenagem principal. O baixo gradiente hidráulico, característico de toda a planície, impõe a mais séria restrição na busca de soluções para o sistema de drenagem.

## 3.2 ELABORAÇÃO DO BANCO DE DADOS PLUVIOMÉTRICO

### 3.2.1 Seleção das séries de dados e definição da rede pluviométrica

O estudo teve início com a elaboração de um banco de dados pluviométrico formado pelas séries temporais de chuvas diárias, mensais e anuais, medidas no interior da Sub-bacia 39, no período de 1943 a 2012. Constituído para armazenar e fornecer informações em todas as etapas metodológicas, esse banco manteve as séries pluviométricas organizadas e consolidadas, para compor as variáveis hidrológicas e os índices pluviométricos previstos à compreensão dos eventos extremos máximos, objeto da pesquisa. A detecção de tendências e mudanças abruptas; verificação da influência dos processos oceânico-atmosféricos; análise de frequência dos eventos máximos; e o estudo do comportamento da chuva forte classificada como o alerta na cidade de Recife, foram as principais abordagens por elas facilitadas.

Com o intuito de investigar as redes de monitoramento pluviométrico que operam ou operaram na área em estudo, foi necessário efetuar um levantamento na Sub-bacia 39. O resultado indicou os seguintes bancos de dados institucionais:

- O BDMEP. Abastecido pelos dados produzidos na Rede Agrometeorológica do INMET, com envios também destinados à OMM. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br>;
- O *Hidroweb*. Administrado pela ANA e abastecido com os dados produzidos em parceria com a Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais – CPRM/Serviço Geológico do Brasil – SGB, através da Rede Hidrometeorológica Nacional, atendendo ao Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos – SNIRH, Disponível em: <http://hidroweb.ana.gov.br/>;
- O Banco de Dados da Agência Pernambucana de Águas e Clima – APAC. Os dados são produzidos pela Rede Pluviométrica do Estado de Pernambuco, de sua responsabilidade. Disponível em: <http://www.apac.pe.gov.br>;
- O Banco de dados da Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba – AESA. Os dados são produzidos pela Rede Pluviométrica do Estado da Paraíba, de sua responsabilidade. Disponível em: <http://www.aesa.pb.gov.br>;
- O Banco de dados da Secretaria do Meio Ambiente e Recursos Hídricos do Estado de Alagoas – SEMARH – AL. Os dados são produzidos pela Rede Pluviométrica do Estado de Alagoas, de sua responsabilidade. Disponível em: <http://www.semar.al.gov.br>;

- O Banco de dados da Superintendência de Desenvolvimento do Nordeste – SUDENE. Os dados foram produzidos pela Rede Hidroclimática do Nordeste (SUDENE, 1990), de sua responsabilidade, somados aos dados de outras instituições contemporâneas.

Foram priorizadas as estações em operação, com períodos longos, comuns e contínuos, iniciando aí o primeiro e maior descarte. Em seguida, foi avaliada a qualidade das séries com menor quantidade de falhas. Quanto ao tamanho, observou-se que as maiores séries se encontravam no banco da APAC, por esse representar a continuidade operacional de grande parte da extinta Rede da SUDENE, que atuou no passado. Foram então aproveitadas as séries com períodos maiores ou iguais a 70 anos de observação, entre os anos de 1943 a 2012. Já as séries produzidas pela CPRM/ANA, AESA e INMET, foram complementadas pelas séries que lhes corresponderam no passado, também adquiridas no banco da SUDENE.

A decisão de estabelecer períodos comuns com 70 anos de observação foi respaldada em Robson (2000), uma vez que o autor ressaltou que: por conta da variabilidade climática, os registros de 30 anos ou menos são quase certamente muito curtos para a detecção de mudanças no clima, sugeriu que pelo menos 50 anos de registros fossem necessários.

Atendidos aos requisitos de tamanho e qualidade, restou examinar a configuração espacial desenhada pelas estações selecionadas. Após esse procedimento, foi então definida uma rede pluviométrica formada por 16 estações e um banco de dados correspondente. As séries de dados foram posteriormente submetidas a uma análise de consistência, com vista à depuração dos erros e preenchimento das falhas, motivo que resultou na substituição de algumas delas.

No arranjo espacial, as 16 estações selecionadas coincidiram com diferentes municípios da Sub-bacia 39. Para identificá-las, associou-se um número inteiro para representar o município de origem. Esses números foram organizados em ordem crescente, em consonância com as nomeações adotadas, alfabeticamente ordenadas. Para o georreferenciamento foi utilizado o sistema de coordenadas geográficas e o *Datum* geodésico WGS1984, estabelecidos para caracterizar o padrão cartográfico definido para o estudo. A Figura 3.11 apresenta a configuração da rede pluviométrica final operada sobre a Sub-bacia 39, elaborada com auxílio do programa *ArcGis* 10.

Foi elaborada uma planilha contendo algumas características físicas e operacionais da rede, como as posições, os nomes das estações selecionadas, os estados pertencentes, as instituições operadoras, as coordenadas geográficas, os códigos e as regiões hidrográficas. Todas essas informações seguem nas Tabelas 3.3.

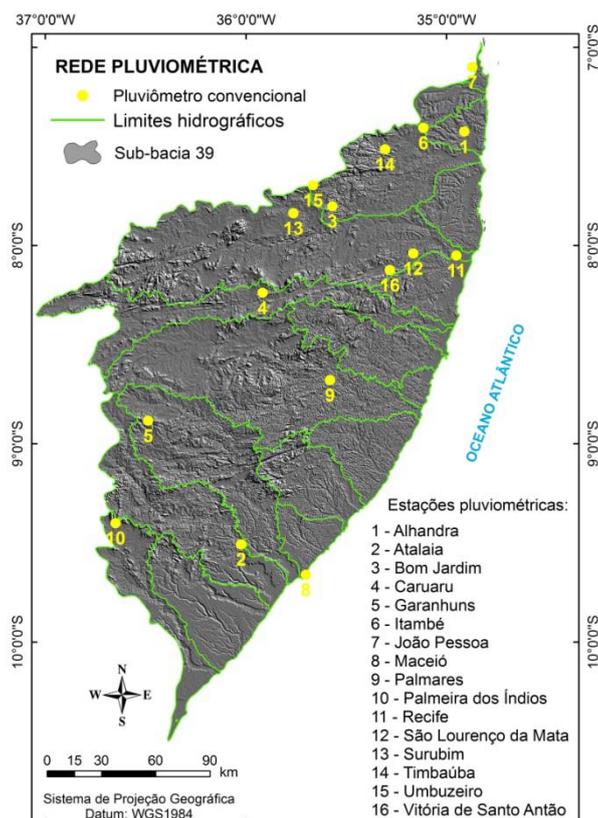


Figura 3.11– Distribuição espacial das estações pluviométricas sobre a divisão hidrográfica

Tabela 3.3 – Estações selecionadas para a elaboração do banco de dados

Posição	Estações selecionadas	Características físicas e operacionais					
		UF	Operadoras	Código	Bacia	Latitude	Longitude
1	Alhandra	PB	AESA	00734008	Abiaí	7° 26' 00"	34° 55' 00"
2	Atalaia	AL	CPRM/ANA	00936110	Paraíba	9° 30' 26"	36° 01' 24"
3	Bom Jardim	PE	APAC	139	Goiana	7° 48' 06"	35° 34' 04"
4	Caruaru	PE	APAC	24	Ipojuca	8° 14' 28"	35° 54' 56"
5	Garanhuns	PE	APAC	19	Mundaú	8° 52' 59"	36° 29' 16"
6	Itambé	PE	APAC	27	Goiana	7° 24' 24"	35° 06' 53"
7	João Pessoa	PB	INMET	82789	Gramame	7° 06' 00"	34° 51' 56"
8	Maceió	AL	INMET	82994	Mundaú	9° 39' 36"	35° 42' 00"
9	Palmares	PE	APAC	25	Una	8° 40' 42"	35° 34' 47"
10	Palmeira dos Índios	AL	INMET	82992	Coruripe	9° 24' 00"	36° 39' 00"
11	Recife	PE	INMET	82798	Capibaribe	8° 03' 00"	34° 57' 00"
12	São Lourenço da Mata	PE	APAC	267	Capibaribe	8° 02' 25"	35° 09' 55"
13	Surubim	PE	APAC	203	Capibaribe	7° 50' 13"	35° 45' 46"
14	Timbaúba	PE	APAC	99	Goiana	7° 30' 52"	35° 30' 58"
15	Umbuzeiro	AL	AESA	00735002	Paraíba	7° 42' 00"	35° 40' 00"
16	Vitória de Santo Antão	PE	APAC	65	Capibaribe	8° 07' 25"	35° 16' 55"

### 3.2.2 Análise da consistência dos dados

Ao passo que se selecionou as 16 estações, iniciou-se a análise preliminar dos dados das séries diárias brutas, visando identificar os possíveis erros grosseiros e/ou sistemáticos. Em seguida, cada série bruta foi comparada às séries das estações vizinhas, incluindo outras instituições operadoras, de modo a confirmar os períodos úmidos e secos registrados, e algumas alturas de chuvas duvidosas porventura observadas. Na ocasião a análise permitiu alguns descartes e substituições de estação, cujas séries revelaram qualidades não aceitáveis.

A chuva diária de 335,8 mm, precipitada na cidade de Recife em 11 de agosto de 1970, demandou uma investigação especial para análise da anomalia. Através de consulta regionalmente comparativa, observou-se que o referido ponto atípico não correspondeu totalmente às estações vizinhas. Sendo assim, foi necessário estender a consulta aos arquivos do INMET, instituição responsável pela produção da série, em seu 3º Distrito de Meteorologia – DISME, sediado na mesma cidade, a qual comprovou a veracidade da precipitação segundo o fornecimento do pluviograma correspondente, apresentado no ANEXO A.

O melhoramento adquirido nas séries diárias foi imediatamente repassado às séries mensais brutas, durante o somatório necessário as suas formações. Visando à formação contínua e consistida das séries anuais, iniciou-se o preenchimento das lacunas e a homogeneização das séries mensais. Para isso utilizou-se o Método de regressão linear múltipla processado no *software Hidroplu*. Segundo Bertoni e Tucci (2007), o método de regressão linear consiste em utilizar regressões lineares simples ou múltiplas para o preenchimento de falhas. Na regressão linear múltipla as informações pluviométricas do posto com falhas são correlacionadas com as correspondentes observações de vários postos vizinhos.

O *Hidroplu* é um modelo matemático utilizado pela CPRM e ANA, para consistir os dados pluviométricos mensais e anuais que compõe o SNIRH. A utilização do *software* foi proposta para possibilitar a crítica e a homogeneização das séries de observações pluviométricas. O modelo foi desenvolvido por Holanda e Oliveira (1979) em uma parceria com a Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL e a Universidade Federal de Viçosa - UFV, através do Programa de Homogeneização de dados – PROHD.

O Manual do *Hidroplu* esclarece que as análises das séries a serem preenchidas e consistidas poderão dispor de no máximo nove estações de apoio em sua vizinhança. Todas as estações deverão estar em um banco de dados conectado ao *software*, contendo as séries da *Hidroweb* e outras instituições. Durante a operação são avaliadas as distâncias entre a estação e seus apoios, os coeficientes de correlação, as influências orográficas, entre outros parâmetros. Dentre outros

elementos de saída, o *Hidroplu* fornece relatórios, tabelas, gráficos de índices pluviométricos, hietogramas, curvas dupla-massa e outros.

As séries mensais brutas foram então inseridas ao inventário do sistema *Hidroweb*, juntamente com 22 estações estrategicamente escolhidas no banco da APAC, certamente para fortalecer as condições de apoio, que por sua vez foram todos conectados ao *software Hidroplu*. O processo utilizou em média quatro estações de apoio para cada estação consistida. Com as séries mensais preenchidas e analisadas regionalmente, procedeu-se o preenchimento das lacunas nas séries anuais.

Com o auxílio do programa *Excel*, foi possível ajustar cada série anual à curva do tipo “Dupla-massa ou Duplo-acumulativa”. Segundo ANA (2012), o Método da Dupla-Massa foi desenvolvido para análise de consistência de dados pelo Serviço Geológico dos Estados Unidos - USGS em 1960. É um método de prática mais comum adotado no Brasil, sendo válido apenas para séries mensais e anuais. Por esse método é possível identificar erros sistemáticos (mudança de declividade ou tendência), erros de transcrição ou postos sujeitos a diferentes regimes pluviométricos.

Para Searcy e Hardison (1960), pertencentes ao USGS, a curva dupla massa é utilizada para verificar a consistência de vários tipos de dados hidrológicos, comparando os dados de uma única estação com os dados de várias outras estações na mesma área. Dessa forma, a curva de dupla massa permite ser utilizada para ajustar os dados inconsistente de precipitação. O gráfico dos dados cumulativos de uma variável em relação aos dados cumulativos de várias variáveis relacionadas é uma linha reta, desde que a relação entre as variáveis seja fixa. As mudanças na curva dessa variável podem ser devido à modificações no método de coleta de dados ou à modificações físicas que afetem a relação.

Nas séries que sinalizaram desvios exagerados, o retorno ao programa *Hidroplu* foi ação obrigatória e imediata para identificação e julgamento de pontos atípicos (*outliers*). Esses pontos, ao serem detectados, tiveram suas permanências avaliadas. A existência de eventos raros ou erros comprovados formaram o misto discernente para as decisões sobre a permanência ou o descarte dos dados extremamente dispersivos. A partir desse estágio todas as séries anuais consideraram-se prontas (consistidas) para utilização nas aplicações da metodologia, conforme os ajustes finais propostos pelos traçados das curvas Dupla-massa.

### 3.2.3 Análise exploratória dos dados

Nessa fase, técnicas quantitativas e gráficas tradicionais foram utilizadas para exames e interpretações de variáveis aleatórias. Nesse ínterim, foi elaborado um sumário das estatísticas

descritivas das séries temporais, constando das medidas de tendências central e dispersiva, incluindo os pontos atípicos ou *outlier*, estes analisados a partir do Método da Amplitude interquartis, ambos com o auxílio do programa *Excel*.

Segundo Naghetinni e Pinto (2007), o critério exploratório da Amplitude Interquartil (AIQ) tem sido bastante usado. O critério considera  $Q_1$  e  $Q_3$ , o primeiro e o terceiro quartil, onde  $Q_3 - Q_1 = AIQ$ . É considerado como *outlier* superior, todo ponto da amostra com valor maior que o limite superior ( $Q_3 + 1,5AIQ$ ) e *outlier* inferior, todo valor menor que o limite inferior ( $Q_1 - 1,5AIQ$ ).

Em seguida, foram realizadas análises gráficas das precipitações anuais, utilizando para isso: os diagramas de “linhas de tendência” e “dispersões de pontos”, ambos utilizando o *software Excel* e “histogramas de frequência”, *Q-Q Plot* e *Box Plot*, com o *software Action*. Este *Software* foi produzido pela *Estatcamp - Consultoria Estatística*. O *Action* é um *Software* de análise estatística de fácil utilização, abrangência e confiabilidade, desenvolvido junto ao programa *Excel* em plataforma R. Além disso, o programa é de fácil instalação e pode ser adquirido gratuitamente em: <http://www.estatcamp.com.br>.

Segundo Naghetinni e Pinto (2007), os diagramas do tipo *Box Plot* são muito úteis por permitirem uma visão geral do valor central, da dispersão, da assimetria, das caudas e de eventuais pontos amostrais discordantes. O valor central é dado pela mediana e a dispersão pela amplitude interquartil. A simetria da distribuição pode ser visualizada pelas posições relativas de  $Q_1$ ,  $Q_2$  e  $Q_3$ . É possível ter uma ideia das caudas superior e inferior por meio dos componentes das linhas.

Apesar dos diagramas expressarem bem o comportamento das séries, foram também realizados testes de normalidade em todas as estações. Para isso, foi usado o *software Action* e suas opções de testes de aderências para esse fim, sendo eles os testes não paramétrico propostos por *Kolgomorov-Smirnov*, *Anderson Darling* e *Shapiro-Wilk*. Ao nível de significância estatística de 5%, as estatísticas de testes e os (P-valor) foram processados. Os testes avaliaram a hipótese nula  $h_0$ : que os dados seguem uma distribuição normal e a hipótese alternativa  $h_1$ : que os dados não seguem uma distribuição normal (Estatcamp, 2015).

De acordo com a experiência de Kundzewicz e Robson (2004), foram também verificado os pressupostos dos atributos das séries amostrais, tais como: Independência, Homogeneidade e Estacionariedade. Para tal, utilizaram-se os testes não paramétricos descritos matematicamente por Naghetinni e Pinto (2007) ao nível de significância de 5%, como segue:

**1) Teste de Wald-Wolfowitz** – Usado para testar a hipótese de independência de uma série hidrológica.

Dada uma amostra  $\{X_1, X_2, \dots, X_N\}$ , de tamanho  $N$  e as diferenças  $\{X'_1, X'_2, \dots, X'_N\}$ , entre as observações  $X_1$  e a média amostral  $\bar{X}$ , a estatística do teste de *Wald & Wolfowitz* é dada pela equação (1):

$$R = \sum_{i=1}^{N-1} X'_i X'_{i+1} + X'_1 X'_N \quad (6)$$

Sob a hipótese de que as observações são independentes, pode-se demonstrar que a estatística  $R$  segue uma distribuição normal de média igual a  $E[R]$  e variância  $Var[R]$ , como sendo:

$$E[R] = \frac{S_2}{N-1} \quad (7)$$

$$Var[R] = \frac{S_2^2 - S_4}{N-1} + \frac{S_2^2 - 2S_4}{(N-1)(N-2)} - \frac{S_2^2}{(N-1)^2} \quad (8)$$

Onde  $r$  denota a ordem do momentos amostrais em relação a origem, com  $S_r = Nm'_r$  e  $m'_r = \sum_{i=1}^N (X'_i)^r / N$ . Portanto, se a hipótese nula é  $h_0$  : (os elementos da amostra são independentes), a estatística do teste não paramétrico de *Wald-Wolfowitz* pode ser formulada como:

$$T = \frac{R - E[R]}{\sqrt{Var[R]}} \quad (9)$$

a qual segue uma distribuição Normal padrão. Por tratar-se de um teste bilateral, a um nível de significância  $\alpha$ , a decisão deve ser a de rejeitar a hipótese nula se:  $|T| > z_{1-\alpha/2}$ .

**2) Teste de *Mann-Whitney*** – Usado para testar a hipótese de homogeneidade de uma série hidrológica.

Dada uma amostra  $\{X_1, X_2, \dots, X_N\}$ , de tamanho  $N$ , separa-se em duas subamostra  $\{X_1, X_2, \dots, X_{N_1}\}$ , de tamanho  $N_1$ , e  $\{X_{N_1+1}, X_{N_1+2}, \dots, X_N\}$ , de tamanho  $N_2$ , de modo que  $N_1 + N_2 = N$  e que  $N_1$  e  $N_2$  sejam aproximadamente iguais, com  $N_1 \leq N_2$ . Em seguida, classifica-se em ordem crescente, a amostra completa de tamanho  $N$ , indicando a ordem de classificação  $m$  de cada observação e se ela provem da primeira ou da segunda subamostra. A ideia intuitiva do teste *Mann-Whitney* é se as duas subamostras não forem homogêneas, o elementos da primeira apresentarão ordens de classificação consistentemente mais baixas (ou mais altas), em relação às ordens de classificação correspondente à segunda subamostra. A estatística do teste  $V$  de *Mann-Whitney* é dada pelo menor valor entre as quantidades  $V_1$  e  $V_2$ :

$$V_1 = N_1 N_2 + \frac{N_1(N_1+1)}{2} - R_1 \quad (10)$$

$$V_2 = N_1 N_2 - V_1 \quad (11)$$

onde  $R_1$  denota a soma das ordens de classificação dos elementos da primeira sobamostra. Se  $N_1, N_2 > 20$ , e sob a hipótese de que se trata de uma amostra homogênea, demonstra-se que  $V$  segue uma distribuição normal de média e variância iguais a:

$$E[V] = \frac{N_1 N_2}{2} \quad (12)$$

$$Var[V] = \frac{N_1 N_2 (N_1 + N_2 + 1)}{12} \quad (13)$$

Portanto, se a hipótese nula é  $h_0$ : (a amostra é homogênea), a estatística do teste não paramétrico de *Mann-Whitney* pode ser formulada como:

$$T = \frac{V - E[V]}{\sqrt{Var[V]}} \quad (14)$$

a qual segue uma distribuição Normal padrão. Por tratar-se de um teste bilateral, a um nível de significância  $\alpha$ , a decisão deve ser a de rejeitar a hipótese nula se:  $|T| > Z_{1-\alpha/2}$

**3) Teste de Spearman** – Usado para testar a hipótese de estacionariedade de uma série hidrológica. Baseia-se no coeficiente de correlação entre as ordens de classificação  $m_t$ , da sequência hidrológica  $X_t$  e os índices de tempo  $T_t$ , esses iguais a 1, 2, ...,  $N$ .

A estatística do teste de *Spearman* tem como base o seguinte coeficiente:

$$r_s = 1 - \frac{6 \sum_{t=1}^N (m_t - T_t)^2}{N^3 - N} \quad (15)$$

Para  $N > 10$  e sob a hipótese nula de que não há correlação entre  $m_t - T_t$ , demonstra-se que a distribuição de  $r_s$  pode ser aproximada por uma normal de média e variância iguais a:

$$E[r_s] = 0 \quad (15)$$

$$Var[r_s] = \frac{1}{N-1} \quad (17)$$

Portanto, se a hipótese nula é  $h_0$ : (a amostra não apresenta tendência temporal), a estatística do teste de *Spearman* pode ser formulada como:

$$T = \frac{r_s}{\sqrt{Var[r_s]}} \quad (18)$$

a qual segue uma distribuição Normal padrão. Por tratar-se de um teste bilateral, a um nível de significância  $\alpha$ , a decisão deve ser de rejeitar a hipótese nula se:  $|T| > Z_{1-\alpha/2}$

### 3.3 ANÁLISE DE TENDÊNCIA E MUDANÇA NA PRECIPITAÇÃO

#### 3.3.1 Detecção de tendência e mudança com testes estatísticos

Para a verificação da existência de tendências e/ou mudanças abruptas na precipitação, utilizaram-se os testes estatísticos publicados em WCDMP-45, associados ao *software Trend* em sua versão 1.0.2. Dos testes estatísticos sugeridos por Chiew e Siriwardena (2005), oito foram utilizados e descritos matematicamente por esses autores da seguinte forma:

1) **Teste de Mann-Kendall** – Teste estatístico não paramétrico usado para verificar se há tendência em séries temporais de dados. A Hipótese nula  $h_0$  é que não existe uma tendência nos dados. Os  $N$  valores da série temporal  $(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$  são reagrupados em ordem crescente  $(R_1, R_2, R_3, \dots, R_n)$ . A estatística do teste é:

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \left[ \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(R_j - R_i) \right] \quad (19)$$

Em que:

$$\text{sgn}(x) = 1 \text{ se } x > 0$$

$$\text{sgn}(x) = 0 \text{ se } x = 0$$

$$\text{sgn}(x) = -1 \text{ se } x < 0$$

Se a hipótese nula  $h_0$  é verdadeira,  $S$  se aproxima de uma distribuição normal, com a média ( $\mu$ ) e a variância ( $\sigma$ ) definida por:

$$\mu = 0 \quad \text{e} \quad \sigma = \frac{n(n-1) \cdot (2n+5)}{18} \quad (20)$$

Os valores críticos das estatísticas de teste para diversos níveis de significância podem ser obtidos a partir de tabelas da distribuição normal. Um valor positivo de  $S$  indica que existe uma tendência crescente e vice-versa. A estatística  $z$  é:

$$z = \frac{|S|}{\rho^{0,5}} \quad (21)$$

2) **Teste de Spearman-Rho** – Teste estatístico não paramétrico usado para verificar se há tendência em séries temporais de dados. A Hipótese nula  $h_0$  é que não existe uma tendência nos dados. A estatística de teste  $\rho_s$  é o coeficiente de correlação, que é obtido da mesma forma que o coeficiente de correlação de uma amostra usual é obtido, porém utilizando a ordem dos dados classificados:

$$\rho_s = \frac{S_x S_y}{(S_x S_y)^{0,5}} \quad (22)$$

onde:

$$S_x = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})^2 \quad (23)$$

$$S_y = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \quad (24)$$

$$S_{xy} = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})(y_i - \bar{y}) \quad (25)$$

Sendo:

$x_i$ , é a classificação original (tempo),

$y_i$ , a classificação da ordem crescente dos dados (variável de interesse),

e  $\bar{X}$  e  $\bar{Y}$  se referem às médias das classificações de  $x_i$  e  $y_i$ , respectivamente.

Para grandes amostras, a quantidade  $\rho_s \sqrt{n-1}$  é aproximadamente normalmente distribuída com média 0 e variância 1. Os valores críticos das estatísticas de teste para vários níveis de significância podem ser obtidos a partir de tabelas da distribuição normal.

**3) Teste de Regressão Linear** – Testes estatístico paramétrico que serve para verificar se há tendência em séries temporais de dados. A Hipótese nula  $h_0$  é que não existe uma tendência nos dados. Ele testa a existência de tendência linear, examinando a relação entre o tempo  $x$  e a variável de interesse  $y$ . O gradiente de regressão é estimado por:

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}) \cdot (y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (26)$$

Com  $x_i$  sendo a classificação original,  $y_i$  a variável de interesse e  $\bar{x}$  e  $\bar{y}$  referem-se às médias da ordem de classificação  $x_i$  e  $y_i$ , respectivamente. A intercepção é estimada como:

$$a = \bar{y} - b \cdot \bar{x} \quad (27)$$

A estatística de teste “S” é:

$$S = b/\sigma \quad (28)$$

onde:

$$\sigma = \sqrt{\frac{12 \cdot \sum_{i=1}^n (y_i - a - b \cdot x_i)^2}{n \cdot (n-2) \cdot (n^2-1)}} \quad (29)$$

A estatística de teste segue uma distribuição normal t de *Student* com  $n-2$  graus de liberdade, sendo  $n$  o tamanho da amostra, sob a hipótese nula  $h_0$ . Os valores críticos da estatística de teste para os diversos níveis de significância podem ser conhecidos em tabelas da distribuição normal. A Regressão linear assume que os dados são normalmente distribuídos e que os erros (desvios da tendência) são independentes e segue a mesma distribuição normal com média zero.

**4) Teste Não paramétrico CUSUM** – Teste estatístico não paramétrico que serve para verificar a existência de mudança nas séries temporais. A Hipótese nula  $h_0$  é que não existe salto na

média. O método testa se as medianas em duas partes de uma série de dados são diferentes, para um tempo desconhecido de mudança. Ele é um teste não paramétrico. Seja uma série temporal de dados  $(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$ , a definição da estatística de teste é:

$$V_k = \sum_{i=1}^k \text{sgn}(x_i - x_{\text{mediana}}), \quad k = 1, 2, 3, \dots, n \quad (30)$$

Onde:

$$\text{sgn}(x) = 1 \text{ se } x > 0$$

$$\text{sgn}(x) = 0 \text{ se } x = 0$$

$$\text{sgn}(x) = -1 \text{ se } x < 0$$

$x_{\text{mediana}}$  = Valor da mediana na série de dados  $x_1$

A distribuição de  $V_k$  segue a estatística de duas amostras de *Kolmogorov-Smirnov* – KS, com estatística de teste igual a:

$$KS = \frac{2}{n} \cdot \max |V_k| \quad (31)$$

Os valores críticos de  $\max |V_k|$  são dados por:

$$\alpha = 0,10 \rightarrow 1,22\sqrt{n}$$

$$\alpha = 0,05 \rightarrow 1,36\sqrt{n}$$

$$\alpha = 0,01 \rightarrow 1,63\sqrt{n}$$

**5) Teste *Cumulative Deviation*** – Testes estatísticos paramétricos que servem para verificar a existência de mudança nas séries temporais. A Hipótese nula  $h_0$  é que não existe salto na média. Esse método testa se as médias em duas partes de uma série de dados são diferentes, para um tempo de mudança desconhecido. É um teste, o qual assume que os dados são normalmente distribuídos. O propósito do teste é detectar uma mudança na média de uma série temporal de dados depois de  $m$  observações.

$$E(x_i) = \mu \quad i = 1, 2, 3, \dots, m$$

$$E(x_i) = \mu + \Delta \quad i = m + 1, m + 2, 3, \dots, m$$

onde:

" $\mu$ " é a média antes da mudança;

" $\Delta$ " é a mudança na média.

Os desvios cumulativos da média são calculados como:

$$S_0^* = 0 \text{ e } S_k^* = \sum_{i=1}^k (x_i - \bar{x}) \quad k = 1, 2, 3, \dots, n \quad (32)$$

Os *Rescaled Adjusted Partial Sums* – RAPS são obtidos dividindo o valor de  $S_k^*$  pelo desvio padrão  $D_x$ :

$$S_k^{**} = S_k^* / D_x \quad (33)$$

onde:

$$D_x = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(x_i - \bar{x})^2}{n}} \quad (34)$$

A estatística de teste “Q” é dada por:

$$Q = \text{máx} . |S_k^{**}| \quad (35)$$

Q é calculado para cada ano com o maior valor indicando o ponto de mudança. Os valores críticos de  $Q/\sqrt{n}$  são dados na Tabela 3.4. O valor negativo de  $S_k^*$  indica que a parte posterior da série de dados tem média maior que a parte anterior e vice-versa.

Tabela 3.4 – Valores críticos de  $Q/\sqrt{n}$

n	Q/ $\sqrt{n}$ ao nível de significância		
	$\alpha = 0,10$	$\alpha = 0,05$	$\alpha = 0,01$
10	1,05	1,14	1,29
20	1,10	1,22	1,42
30	1,12	1,24	1,46
40	1,13	1,26	1,50
50	1,14	1,27	1,52
100	1,17	1,29	1,55
$\infty$	1,22	1,36	1,63

Fonte: Chiew e Siriwardena (2005)

**6) Teste de Worsley Likelihood Ratio** – Teste estatístico paramétrico usado para detecção de mudança nas séries temporais. A Hipótese nula “ $h_0$ ” é que não existe salto na média. Este método testa se as médias em duas parte de uma série de dados são diferentes, para um tempo de mudança desconhecido. É um teste, o qual assume que os dados são normalmente distribuídos. É semelhante ao teste *Cumulative Deviation*, embora os pesos dos valores de  $S_k^*$  dependem de sua posição na série temporal.

$$Z_k^* = [k \cdot (n - k)^{-0,5} \cdot S_k^*] \quad (36)$$

$$Z_k^{**} = S_k^* / D_x \quad (37)$$

A estatística de teste W é:

$$W = \frac{(n-2)^{0,5} \cdot V}{(1-V)^{0,5}} \quad (38)$$

$$V = \text{máx} . |Z_k^{**}| \quad (39)$$

Os valores críticos de W são encontrados na Tabela 3.5. Um valor negativo de W indica que a parte posterior do registro de dados tem média maior que a parte anterior e vice-versa.

Tabela 3.5 – Valores críticos de W

n	W ao nível de significância		
	$\alpha=0,10$	$\alpha=0,05$	$\alpha=0,01$
10	3,14	3,66	4,93
15	2,97	3,36	4,32
20	2,90	3,28	4,13
25	2,89	3,23	3,94
30	2,86	3,19	3,86
35	2,88	3,21	3,87
40	2,88	3,17	3,77
45	2,86	3,18	3,79
50	2,87	3,16	3,79

Fonte: Chiew e Siriwardena (2005)

**7) Teste de Rank Sum** – É um teste estatístico não paramétrico, que pode também ser chamado de *Wilcoxon-Mann-Whitney* ou *Mann-Whitney*, é usado para detecção de mudança em séries temporais. A Hipótese nula  $h_0$  é que não existe diferença na mediana entre dois períodos de dados. Este método testa se as medianas em dois períodos distintos são diferentes. Para computar esse teste estatístico, todos os dados devem ser classificados em ordem crescente de 1 até N, onde N é o tamanho da amostra, dividindo a série em dois grupos de acordo com o tempo de mudança conhecido. A estatística S é calculado a partir da soma dos valores ordenados do menor grupo, sendo o grupo com menor número de observações designado por n, e o grupo com maior número de observações, por m. Logo após, é calculada a média e o desvio padrão de S sob  $h_0$ , usando as seguintes equações:

$$\mu = n \cdot \frac{(N+1)}{2} \quad (40)$$

$$\sigma = \left[ \frac{n \cdot m \cdot (N+1)}{12} \right]^{0,5} \quad (41)$$

A estatística de teste  $Z_{rs}$  é calculada a partir da seguinte forma:

$$Z_{rs} = (S - 0,5 - \mu) \text{ se } S > \mu$$

$$Z_{rs} = 0 \quad \text{se } S = \mu$$

$$Z_{rs} = (S + 0,5 - \mu) \text{ se } S < \mu$$

$Z_{rs}$  é aproximadamente normalmente distribuído, e os valores críticos da estatística de teste para vários níveis de significância podem ser obtidos a partir de tabelas da distribuição normal.

**8) Teste T de Student's** – É um teste estatístico paramétrico utilizado para detecção de mudança em séries temporais. A Hipótese nula  $h_0$  é que não existe diferença na média entre dois períodos de dados. Este método testa se as médias em dois períodos distintos são diferentes. O teste assume que os dados seguem uma distribuição normal e que o tempo de mudança da série é

conhecido. Dessa forma são criados dois períodos a partir desse ponto de mudança. A estatística de teste t é expressa por:

$$t = \frac{(\bar{x} - \bar{y})}{S \cdot \sqrt{\frac{1}{n} + \frac{1}{m}}} \quad (42)$$

onde:

$\bar{x}$  e  $\bar{y}$  são respectivamente as médias do primeiro e do segundo período;

n e m representam respectivamente o número de observações no primeiro e no segundo período,

S é o desvio padrão da amostra.

Os valores críticos para vários níveis de significância podem ser encontrado nas tabelas da distribuição t de *Student*.

Sobre o *Trend Change Detection Software*, pode-se afirmar que se trata de um produto da *Cooperative Research Center for Catchment Hydrology – CRCCH*, desenvolvido na Austrália por Francis Chiew e Lionel Siriwardena em 2005. Qualquer interessado poderá adquiri-lo gratuitamente em: <http://www.toolkit.net.au/Tools/TREND>. Os testes estatísticos sugeridos por Chiew e Siriwardena (2005) para detecção de tendência e mudança nas séries temporais são baseados na WMO, na Organização para a Educação, a Ciência e a Cultura das Nações Unidas – UNESCO, e no *Expert Workshop on Trend/Change Detection* e no *Cooperative Research Centre for Catchment Hydrology – CRCCH* (Grayson *et al.*, 1996).

Todos os testes estatísticos abordados no *Trend* são baseados em testes de hipóteses, onde  $h_0$  é a Hipótese nula e  $h_1$  é a hipótese alternativa, A Tabela 3.6 mostra as considerações pré-admitidas às hipóteses nulas  $h_0$  usadas nos testes estatísticos.

Tabela 3.6 – Hipóteses nulas usadas no *Trend* para os testes de hipóteses

Item	Testes estatísticos	Hipótese nula $H_0$
01	Tendência	Não existe tendência na série dos dados.
02	Mudança abrupta	Não existe salto na média dos dados;
		Não existe diferença na mediana em dois períodos dos dados;
		Não existe diferença na média em dois períodos dos dados.

Para a entrada dos dados, o *Trend* requer séries contínuas de dados anuais em vários formatos sendo o programa *Excel da Microsoft* com a extensão (.csv separado por vírgula) bem indicado. O *Trend* recomenda que antes de sua aplicação, as séries sejam submetidas a uma análise exploratória dos dados – EDA, constando no mínimo de uma linha gráfica de tendência ajustada aos dados, onde os *outlier* e erros óbvios possam ser investigados. Essa etapa deverá resultar em séries contínuas e qualificadas, para em seguida serem processadas. A formatação dos dados de entrada consta de uma

coluna com datas cronológicas (dia/mês/ano) e outra com valores de precipitação anual em milímetros.

Durante a fase processual, os usuários poderão optar na tela pelos testes desejados. Em caso de detecção de mudança, alguns testes calculam o momento em que se ocorre a mudança, separando as séries em dois subperíodos, os quais demonstraram “diferenças nas médias ou medianas. Quando o teste não conhece esse momento, necessário se faz que o usuário indique o ano pelo qual deseja a separação.

Os resultados são fornecidos aos níveis de significâncias estatísticas de  $\alpha = 0,01$ ,  $\alpha = 0,05$  e  $\alpha = 0,10$ . Para os casos em que os pressupostos dos testes são violados, o programa dispõe do método *Bootstrapping* de Reamostragem. Esse método foi proposto por *Efron* (1979), o qual consiste em sortear com reposição, dados pertencentes a uma amostra retirada anteriormente, de modo a formar uma nova amostra.

Para compor um conjunto de variáveis hidrológicas, representativas do período chuvoso, foram requeridas ao banco de dados, as séries diárias, mensais e anuais de todas as estações pluviométricas. Essas séries permitiram a construção de nove variáveis para cada estação, para em seguida serem utilizadas na verificação da existência de tendências e/ou mudanças abruptas.

A definição das variáveis hidrológicas envolveu o prévio conhecimento da distribuição temporal e espacial da precipitação na área em estudo durante o ano civil. Foram então construídas nove séries pluviométricas para cada estação, sendo duas anuais, como os totais anuais e as máximas diárias anuais, e sete concentradas no período chuvoso da Sub-bacia 39, cujos meses vão de março a agosto. A Tabela 3.7 apresenta as variáveis hidrológicas.

Seguindo as orientações de Chiew e Siriwardena (2005), os dados de entrada no *software Trend* foram formatados e os testes estatísticos contidos na Tabela 3.8 foram utilizados para detecção de tendências e mudanças abruptas.

Nos testes *Rank Sum* e *Student t*, foi definido o ano de 1978 como separador de todas as séries sujeitas à detecção de mudanças. Esse ano dividiu as séries em dois subperíodos iguais, anteriores e posteriores, os quais serviram para comparação das medianas e das médias desses subperíodos, calculadas pelo *software* após a divisão.

Considerando que as violações aos pressupostos de normalidade, independência, homogeneidade e estacionariedade nas hipóteses nulas  $h_0$ , ocorrem com frequência quando se tratam de séries pluviométricas, optou-se então pela utilização da Técnica de Reamostragem (*Resampling*), sugerida por Chiew e Siriwardena (2005), com o número de amostragem das séries originais fixado em 1.000 vezes.

Tabela 3.7 – Variáveis hidrológicas para detecção de tendências e mudanças no período chuvoso

Item	Variáveis hidrológicas	Sigla	Composição das séries
01	Precipitação total anual	PTA	Precipitações acumuladas dos totais mensais das séries anuais.
02	Precipitação diária máxima anual	PDMA	Maiores precipitações diárias nas séries anuais.
03	Semestre mais úmido	SMU	Precipitações acumuladas de março, abril, maio, junho, julho e agosto.
04	Trimestre mais úmido	TMU	Precipitações acumuladas de maio, junho e julho.
05	Bimestre mais úmido	BMU	Precipitações acumuladas de junho e julho.
06	Mês mais úmido	MMU	Total precipitado nos meses de junho.
07	Precipitação de maio	MAI	Total precipitado nos meses de maio.
08	Precipitação de julho	JUL	Total precipitado nos meses de julho.
09	Precipitação de agosto	AGO	Total precipitado nos meses de agosto.

Tabela 3.8 – Testes estatísticos usados na detecção de tendências e mudanças abruptas

Testes estatísticos utilizados	
Tendências	Mudanças abruptas
MK - <i>Mann-Kendall</i> (NP)	DC - Não paramétrico <i>CUSUM</i> (NP)
SR - <i>Spearman-Rho</i> (NP)	CD - <i>Cumulative Deviation</i> (P)
RL - Regressão linear (P)	WL - <i>Worsley Likelihood Ratio</i> (P)
	RS - <i>Rank Sum</i> (NP)
	ST - <i>Student t</i> (P)

(P) Paramétrico

(NP) Não paramétrico

Para análise dos resultados obtidos com os testes estatísticos, alguns critérios precisaram ser impostos. O objetivo foi definir para cada variável um resultado único, baseado na relação entre o número de testes aplicados em cada estação e o número mínimo de testes validados pela significância estatística. Os critérios estabelecidos foram:

- I. Que dos três testes aplicados para detecção de tendência em cada estação, ao menos dois fossem estatisticamente significativos ao nível  $\leq 10\%$ ;
- II. Que dos cinco testes aplicados para detecção de mudanças abruptas em cada estação, ao menos três fossem estatisticamente significativos ao nível  $\leq 10\%$ .

Com os resultados obtidos para cada variável hidrológica, foram executadas análises quantitativas em planilhas específicas, compostas de valores estatisticamente significativos e não significativos, utilizando simbologias e convenções especiais para tendências positivas, negativas e sem tendências, em cores azul, vermelha e verde respectivamente. Já as análises espaciais exigiram a elaboração de mapas contendo resultados exclusivamente significativos, os quais ofereceram

melhores discernimentos às análises. Nesse caso, ao padrão de simbologias e convenções acrescentou-se o número inteiro indicador da estação pluviométrica correspondente. Na confecção dos mapas utilizou-se coordenadas geográficas, *datum* geodésico WGS1984 e programa *ArcGis* 10.

### 3.3.2 Detecção de tendência com índices pluviométricos

Outra verificação para existência de tendências nas séries de eventos extremos da Sub-bacia 39, também foi realizada utilizando os índices climáticos propostos por ETCCDMI e publicados em WCDMP-72. Do acervo proposto foram escolhidos dez índices pluviométricos, obtidos a partir das séries diárias de precipitação anual de cada estação, extraídas do banco de dados, e o *software RClindex*, versão 2.14.1. Os índices utilizados foram sugeridos e descritos por Zhang e Yang (2004), como segue:

**1) Precipitação total anual nos dias úmidos (PRCPTOT)** – Esse índice indica a precipitação total anual acumulada nos dias úmidos, expressa em mm, sendo dias úmidos os dias com precipitação acima de 1 mm. Seja  $RR_{ij}$  a quantidade diária de precipitação em dia  $i$  de um período  $j$ . Se  $I$  representa o número de dias em  $j$ , tem-se que:

$$PRCPTOT_j = \sum_{i=1}^I RR_{ij}, \text{ onde } RR_{ij} \geq 1\text{mm} \quad (43)$$

**2) Número de dias com precipitação maior ou igual a mediana da PDMA (Rmedmm)** – Dias em que o limite da precipitação diária é igual ou superior ao valor da mediana da série de maior precipitação diária ocorrida no ano. Esse índice indica o número de dias por ano em que a precipitação igualou ou superou a mediana, expresso em dias. Seja  $ij RR$  o montante de precipitação diária em um dia  $i$  de um período  $j$ , em que:

$$RMedmm = RR_{ij} \geq PDMA \text{ mm} \quad (44)$$

**3) Altura máxima de precipitação em um dia (Rx1day)** – Esse índice indica a maior quantidade de precipitação no período de um dia, expresso em mm. Seja  $RR_{ij}$  a quantidade de precipitação diária no dia  $i$  de um período  $j$ , o valor máximo de um dia para o período  $j$  é:

$$Rx1day_j = \max (RR_{ij}) \quad (45)$$

**4) Altura máxima de precipitação em cinco dias (Rx5day)** – Esse índice indica a maior quantidade de precipitação no período de cinco dias, expresso em mm. Seja  $RR_{kj}$  a quantidade de precipitação para cinco dias no intervalo  $k$  de um período  $j$ , onde  $k$  é definida pelo último dia. Os valores máximos de cinco dias para o período  $j$  são:

$$Rx5day_j = \max (RR_{kj}) \quad (46)$$

**5) Índice simples de intensidade diária (SDII)** – Esse índice indica a precipitação anual total dividida pelo número de dias úmidos, expresso em mm/dia. Seja  $w_j RR$  a quantidade diária de precipitação nos dias úmidos em um período  $j$ . Se  $W$  representa o número de dias úmidos em um período  $j$ , então:

$$Sdij = \frac{\sum_{w=1}^W RR_{wj}}{W} \quad (47)$$

**6) Número de dias com precipitação igual ou superior a 10 mm (R10mm)** – Esse índice indica o número de dias por ano em que a precipitação foi superior a 10 mm, expresso em dias. Seja  $ij RR$  o montante de precipitação diária em um dia  $i$  de um período  $j$ . Então:

$$R10mm = RR_{ij} \geq 10mm \quad (48)$$

**7) Número de dias com precipitação igual ou superior a 50 mm (R50mm)** – Esse índice indica o número de dias por ano em que a precipitação foi superior a 50 mm, expresso em dias. Seja  $ij RR$  o montante de precipitação diária em um dia  $i$  de um período  $j$ , em que:

$$R50mm = RR_{ij} \geq 50mm \quad (49)$$

**8) Precipitação total anual dos dias extremamente úmidos (R99p)** – Esse índice indica os dias em que a precipitação total anual ultrapassou o percentil de 99%, expresso em mm. É a precipitação total anual em que  $RR_{ij} > 99^\circ$  percentil. Então:

$$R99p_j = \sum_{i=1}^I RR_{ij}, \text{ onde } RR_{ij} > 99^\circ \text{ percentil} \quad (50)$$

**9) Número máximo de dias úmidos consecutivos (CWD)** – Esse índice indica o número máximo de dias úmidos consecutivos em um ano, expresso em dias, sendo dia úmido o dia com precipitação superior ou igual a 1 mm. Seja  $ij RR$  a quantidade diária de precipitação em dia  $i$  de um período  $j$ . O índice representa o número máximo de dias/ano consecutivos, em que:

$$CDW = RR_{ij} \geq 1mm \quad (51)$$

Sobre o *RClimdex*, pode-se afirmar que se trata de um *software* criado em 2004 com o objetivo de executar os cálculos dos índices de tendência dos extremos climáticos, recomendados pela ETCCDMI e propostos pela WMO, a partir das séries temporais de temperatura e precipitação. Xuebin Zhang e Feng Yang, pesquisadores do *Climate Research Branch of Meteorological Service of Canada*, desenvolveram o produto para contribuir com o monitoramento das mudanças climáticas. Através do portal: <http://cccma.seos.uvic.ca/ETCCDMI/RClimDex/rclimdex.r>, o programa pode ser gratuitamente adquirido. Segundo Zhang & Yang (2004), o *Climdex* foi desenvolvido por Byron Gleason no *National Oceanic and Atmospheric Administration* – NOAA e tem sido usado desde 2001 em oficinas da ETCCDMI/CCI/CLIVAR.

Para entrada dos dados é exigido uma formatação específica. O *RClindex* através do controle da qualidade – QC requer que todos os dados sejam homogeneizados. Na fase processual, a detecção de tendência utiliza o Método de Regressão linear associado aos Mínimos quadrados. As principais informações estatísticas fornecidas para cada índice calculado são: a tendência definida pela inclinação da reta (coeficiente angular); o nível de significância estatística da tendência obtida segundo o teste t de *student*; o coeficiente de determinação ( $r^2$ ); e o erro padrão da estimativa.

Para confirmar a presença de tendência (positiva ou negativa) na série, verifica-se inicialmente se a tendência obtida é superior ao erro padrão de estimativa. Ao mesmo tempo em que é avaliada a sua significância estatística. De acordo com Zhang e Yang (2004), a tendência será significativa se o P-valor for menor ou igual a 0,10. Se o P-valor é menor ou igual a 0,05, a significância estatística será considerada alta. Na condição de ( $0,05 < \text{P-valor} \leq 0,10$ ) a significância estatística é boa. Quando o P-valor for menor que 0,10 pode-se afirmar que as tendências não são estatisticamente significativas ou que não há tendência nas séries.

Seguindo as orientações de Zhang e Yang (2004), o *RClindex* forneceu, entre outros produtos, as séries temporais dos índices pluviométricos processados e as tendências definidas pelos coeficientes angulares das retas, associadas as significâncias estatísticas correspondentes.

As análises quantitativas foram executadas em planilhas específicas, nelas incluído os resultados significativos e não significativos das tendências positivas, negativas e sem tendências, identificadas por meio de simbologias convencionadas em cores azul, vermelha e verde respectivamente. As análises espaciais exigiram a elaboração de mapas contendo resultados exclusivamente significativos, os quais facilitaram as análises. Para o padrão de simbologias e convenções acrescentou-se o número inteiro indicador da estação pluviométrica correspondente. Na construção dos mapas utilizaram-se coordenadas geográficas, *datum* geodésico WGS1984 e programa *ArcGis* 10.

### 3.4 ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA TSM NO AUMENTO DA PRECIPITAÇÃO

#### 3.4.1 Influência oceânico-atmosférica sobre a precipitação de tendência positiva

Fundamentada na relação entre as variações térmicas dos oceanos Pacífico e Atlântico e a descaracterização climática por ela provocada, principalmente nos regimes pluviais do NEB, este item investigou a influência dessas variações sobre as precipitações que apresentaram tendências positivas na Sub-bacia 39, detectadas no capítulo anterior. Para tal, utilizou-se o “Método da Correlação linear de Pearson”, aplicado às combinações de Índices pluviométricos representativos da Sub-bacia 39 e os índices de TSM fornecidos pela NOAA, sendo esses últimos referentes às séries de temperaturas e anomalias medidas no oceano pacífico (ENOS) e no oceano Atlântico (Dipolo do Atlântico), ambas disponibilizadas em (NOAA, 2014).

A partir das combinações supracitadas foram calculados os coeficientes de correlação linear. Em seguida, os mesmos tiveram suas significâncias estatísticas avaliadas segundo testes de hipótese bicaudal *t* de *Student*, para níveis de significância de 1%, 5% e 10% e graus de liberdade de  $n-2$ . Para isso, foram determinadas as estatísticas de teste e os seus valores críticos. As rejeições das hipóteses nulas  $h_0$ , foram responsáveis pela confirmação da existência de correlação entre alguns índices combinados.

Segundo Naguettini e Pinto (2007), o coeficiente de correlação linear pode ser representada por  $\rho$ . Quando duas variáveis  $X$  e  $Y$  são estatisticamente independentes tem-se que  $\rho = 0$ . Entretanto, a recíproca não é verdadeira, uma vez que essa condição não significa que as variáveis sejam sempre independentes. Em algumas situações  $X$  e  $Y$  podem apresentar dependência funcional não linear.

É possível testar a hipótese de que o coeficiente de correlação linear é igual a zero, ou seja:  $h_0: \rho = 0$  e  $h_1: \rho \neq 0$ . Como decorrência de algumas hipóteses distributivas, a estatística apropriada para esse teste é a seguinte:

$$t_0 = \frac{r\sqrt{n-2}}{\sqrt{1-r^2}} \quad (52)$$

onde  $t_0$  é a estatística do teste;  $n$  é o tamanho da amostra e  $r$  é a estimativa do coeficiente de correlação linear.

A estatística do teste,  $t_0$ , segue uma distribuição *t* de *Student* com  $(n - 2)$  graus de liberdade, sob a plausibilidade da hipótese nula  $h_0: \rho = 0$ . A hipótese nula é rejeitada se:

$$|t_0| > t_{\alpha/2(n-2)} \quad (53)$$

onde,  $t_{\alpha/2(n-2)}$  é o valor crítico para a estatística do teste bilateral para um nível de significância  $\alpha$ , com  $(n - 2)$  graus de liberdade.

### 3.4.2 Especificações dos índices correlacionados

1) **Índices regionais de tendências positivas** – (PRCPTOT, RMedmm, Rx1day, Rx5day, SDII, R10m, R50m, R99p, CWD) – Criados a partir do conjunto de séries de índices pluviométricos obtidos pontualmente em cada estação pluviométrica, com o objetivo de detectar existência de tendência da precipitação na sub-bacia 39, utilizando o programa *RClimdex*. Para a regionalização desses índices, operou-se as médias aritméticas dos índices calculados em cada estação, exclusivamente os que se revelaram positivos, satisfazendo com isso o propósito de analisar os eventos extremos máximos. Para diferenciá-los dos índices pontuais, o “índice regional de tendência positiva” adquiriu uma sublinha em sua simbologia. Os tamanhos das séries variaram de 62 a 63 anos, para adaptação à disponibilidade dos índices de TSM a serem correlacionados. Todos os índices de TSM usados encontram-se disponibilizados em (NOAA, 2014).

2) **Índices Niño** (*Niño 1+2*, *Niño 3*, *Niño 3.4*, *Niño 4*) – Séries de TSM medidas no oceano Pacífico equatorial. A ciência tem demonstrado que a variação térmica nessas regiões oceânicas resulta em alterações climáticas no Planeta. Foi considerado o período de 1950 a 1912.

3) **Índice Oceânico Niño (ION)** – Séries de índices de anomalias de TSM medidas em *Niño 3.4*. As médias aritméticas dos trimestres fornecidos constituíram a série representativa desse índice, historicamente utilizado pelos cientistas a partir de justificativas técnico-científicas experimentais. Marcuzzo e Romero (2013) acrescentaram que o Índice Oceânico *Niño* - ION é um índice que identifica as anomalias da superfície do oceano Pacífico através da média móvel de três meses. Quando o ION for maior que +0,5 °C por no mínimo cinco meses consecutivos, o período é caracterizado *El Niño*, e quando o índice for menor do que -0,5 °C por no mínimo cinco meses consecutivos, o período é caracterizado como de *La Niña*. Foi usado o período de 1950 a 1912.

4) **Índice de Oscilação Sul (IOS)** – Séries de índices de anomalias de TSM medidas no Pacífico, a partir das diferenças de pressão do nível do mar entre as cidades de *Tahiti* e *Darwin*, na Austrália. As médias aritméticas de seus valores mensais formaram as séries anuais utilizadas. Acrescenta (NOAA, 2014) que a fase negativa do IOS representa a pressão do ar abaixo do normal em *Tahiti* e acima do normal em *Darwin*. Períodos prolongados de valores negativos de IOS, coincidem com as águas do oceano mais quentes em todo o leste do Pacífico tropical, típico de episódios *El Niño*. Períodos prolongados de valores positivos de IOS coincidem com as águas do oceano anormalmente frias em todo o leste do Pacífico tropical, típico de episódios de *La Niña*. Foi considerado o período de 1951 a 1912.

5) **Índice Atlântico Tropical Norte (TNAI)** – Índices associados ao Dipolo do Atlântico, o qual representa a diferença entre as anomalias de TSM do Atlântico Norte e do Atlântico Sul. Quando o Dipolo do Atlântico é positivo e ocorre simultaneamente o fenômeno *El Niño* no

Pacífico, esperam-se anos desfavoráveis às chuvas (secos ou muito secos). Para obtenção das séries anuais de correlação foram calculadas as médias aritméticas dos meses em cada ano. Foi considerado o período de 1950 a 2012.

6) **Índice Atlântico Tropical Sul (TSAI)** – Índices associados ao Dipolo do Atlântico Tropical. Quando o Dipolo do Atlântico é negativo e ocorre simultaneamente o fenômeno *La Niña* no Pacífico, esperam-se anos favoráveis às chuvas (chuvosos ou muito chuvosos). Para obtenção das séries anuais de correlação foram calculadas as médias aritméticas dos meses em cada ano. Foi considerado o período de 1950 a 2012.

### 3.5 ANÁLISE DE FREQUÊNCIA DE EVENTOS EXTREMOS MÁXIMOS

#### 3.5.1 Estatísticas e atributos das séries amostrais

Com o objetivo de analisar a frequência dos máximos pluviométricos diários na Sub-bacia 39, optou-se pelas análises locais em anos civis com séries de duração anual. Para isso foram requisitadas ao banco de dados, as séries de Precipitação diária Máxima Anual – PDMA de todas as estações. Em seguida, foram calculadas as estatísticas descritivas consideradas mais relevantes, fazendo parte desse contexto, as medidas centrais e dispersivas. Da mesma forma, os pontos atípicos foram identificados utilizando o critério da Amplitude interquartil.

A exploração dos dados das séries de PDMA complementou-se com a verificação dos atributos de independência, homogeneidade e estacionaridade, testados ao nível significativo de 5%, utilizando os respectivos métodos não paramétricos de *Wald-Wolfowitz*, *Mann-Whitney* e *Spearman*. Tais testes encontram-se matematicamente descritos no item 3.2.3.

#### 3.5.2 Análise de frequência empírica

Uma vez não conhecendo a existência de uma função paramétrica que descreva o comportamento probabilístico da distribuição das séries de PDMA, optou-se pelo modo empírico. Utilizando metodologias clássicas foram construídos papéis de probabilidades referentes ao modelo teórico indicado para todas as dezesseis estações pluviométricas. Para tanto, foram plotadas as observações amostrais e suas respectivas probabilidades empíricas em forma de tempos de retorno. Os alinhamentos às retas representativas do modelo teórico propiciaram os exames fundamentais aos ajustes, cujas submissões aos testes de aderência específicos consolidaram suas avaliações.

A construção gráfica da distribuição empírica no papel de *Gumbel* utilizou a variável reduzida de *Gumbel* para o traçado da escala transformada. A transformação linearizou a escala aritmética resultante do processo cartesiano entre as variáveis aleatórias e a Função Acumulada de Probabilidade – FAP. Para tal, foi usada a expressão (54).

$$y_t = -\ln \left[ -\ln \left( 1 - \frac{1}{T} \right) \right] \quad (54)$$

onde, cada valor de  $T$  é o tempo de retorno em anos correspondente a um  $y_t$  calculado.

A partir daí, os dados amostrais foram classificados em ordem decrescente e as estimativas das posições de plotagem foram obtidas conforme a expressão de *weibull*, como mostra a expressão (50).

$$q_i = \frac{i}{n+1} \quad (55)$$

onde:  $i$  é o valor da posição na amostra ordenada e  $n$  é o tamanho da amostra.

Para uma análise do comportamento dos limites inferiores, superiores e das demais estatísticas dos quantis, como as medianas e os quartis de 25 e 75 %, foram elaborados os diagramas *Box Plot* para os Períodos Completos, Primeiros e Últimos períodos de todas as séries analisadas. Nesse processo foi possível avaliar o comportamento da PDMA, os pontos atípicos (*outlier*) e a pertinência nos intervalos de confiança em todas as séries analisadas. A elaboração dos diagramas para esse fim foi realizada com o *Software Statistica*. Esse programa foi desenvolvido pela *StatSoft Ibérica* e podem ser encontrados em: <http://www.statsoftiberica.com/pt/home>.

### 3.5.3 Ajuste da distribuição de *Gumbel*

A “teoria clássica de valores” concentra modelos de distribuições de probabilidade teóricas extremas (máximos e mínimos) que podem ser aplicadas às variáveis aleatórias contínuas, entre eles o Modelo teórico de distribuição de probabilidades de *Gumbel* (máximos). A utilização desse modelo para esse tipo de aplicação tem mostrado sua eficiência, justificada pelo grande número de trabalhos já realizados, os quais envolvem variáveis hidrológicas contínuas de máximos anuais, como é o caso da PDMA.

Entre outros indicadores, Naghettini e Pinto (2007) consideraram que a distribuição de *Gumbel* é a distribuição extremal mais usada na análise de frequência de variáveis hidrológicas. Hershfield e Kohler (1960) apud Sansigolo (2008) concluíram que a distribuição teórica de *Gumbel* é a mais adequada para estimar as probabilidades de ocorrência de eventos extremos de precipitação para diversas durações, após analisar dados de milhares de estações pluviométricas nos Estados Unidos.

Com base nas abordagens citadas foram experimentados os ajustes do Modelo Teórico de *Gumbel* (máximos) aos modelos empíricos em cada série PDMA, certamente, não ignorando a existência de outros modelos alternativos, como também não eximindo seus imediatos requerimentos, em caso do modelo escolhido não corresponder aos ajustes desejados. Para tal avaliação foi previsto que testes de aderências fossem realizados após suas aplicações.

Conforme Naghettini e Pinto (2007), a FAP é dada por  $F_Y(y)$  e a Função Densidade de Probabilidade – FDP, por  $f_Y(y)$ , como mostra as expressões (56) e (57):

$$F_Y(y) = \exp \left[ -\exp \left( -\frac{y-\beta}{\alpha} \right) \right] \quad (56)$$

$$f_Y(y) = \frac{1}{\alpha} \exp \left[ -\frac{y-\beta}{\alpha} - \exp \left( -\frac{y-\beta}{\alpha} \right) \right] \quad (57)$$

para:  $(-\infty < y < \infty, -\infty < \beta < \infty, \alpha > 0)$ , onde  $\alpha$  o parâmetro de escala e  $\beta$  o parâmetro de posição, iguais a:

$$\hat{\alpha} = 0,7797S_X \quad e \quad \beta = \bar{x} - 0,45S_X \quad (58)$$

O valor esperado  $E[Y]$ , a variância  $Var[Y]$  e o coeficiente de assimetria  $\gamma$  são respectivamente iguais a:

$$E[Y] = \beta + 0,5772\alpha \quad (59)$$

$$Var[Y] = \sigma_\gamma^2 \frac{\pi^2 \alpha^2}{6}, \text{ onde } \gamma = 1,1396 \quad (60)$$

A estimativa dos parâmetros de *Gumbel*,  $\alpha$  e  $\beta$ , foi efetuada empregando o “Método dos momentos”. O Método dos momentos consiste em igualar os momentos amostrais aos populacionais. Segundo Das e Simonovic (2011), a distribuição de *Gumbel* e seus parâmetros estimados pelo Método dos momentos é de utilização obrigatória no Canadá.

Após a estimação dos parâmetros  $\alpha$  e  $\beta$  foram também calculados os quantis correspondentes aos tempos de retorno, distribuídos em escala de 1,01 a 100 anos. Para isso, considerou-se por definição o inverso da FAP de *Gumbel*, ou a função de quantis, expressa por:

$$y(F) = \beta - \alpha \ln[-\ln(F)] \quad \text{ou} \quad y(T) = \beta - \alpha \ln\left[-\ln\left(1 - \frac{1}{T}\right)\right] \quad (61)$$

onde,  $\alpha$  e  $\beta$  representam os parâmetros de escala e posição, T é tempo de retorno em anos e F representa a probabilidade anual de não superação.

Para verificação dos ajustes da função *Gumbel* às distribuições empíricas, em cada série de observação amostral, foram aplicados os testes de aderência de *Kolmogorov-Smirnov* (KS), *Anderson-Darling* (AD) e Qui-Quadrado ( $Qui^2$ ). Tendo como hipóteses nulas  $h_0$  a condição ajustável ao modelo teórico de *Gumbel*, os testes foram aplicados aos níveis de significância de 1% e 5%, sendo os ajustes validados a partir da aceitação da hipótese nula  $h_0$  em pelo menos um dos testes. Alves *et al.* (2013) concordam que os testes existentes na literatura para este tipo de trabalho são os de *Kolmogorov-Smirnov*, Qui-Quadrado e de *Anderson-Darling*.

O teste estatístico de *Anderson-Darling* compara as funções de densidade acumulada esperadas e observadas. Este método dá mais peso à cauda da distribuição do que o teste *Kolmogorov-Smirnov*. O teste rejeita a hipótese se a estatística obtida for maior que um valor crítico, considerando um dado nível de significância ( $\alpha$ ). O nível de significância mais usado é  $\alpha = 0,05$ , o qual produz um valor crítico de 2,5018. Esse valor crítico é depois comparado com a estatística de teste para determinar se pode ser rejeitado ou não. Considerando n o tamanho da amostra, a estatística de teste ( $A^2$ ), segundo Das e Simonovic (2011), é dada por:

$$A^2 = -n - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (2i - 1) [\ln F(x_i) + \ln(1 - F(x_{n-i+1}))] \quad (62)$$

O teste estatístico de *Kolmogorov-Smirnov* baseia-se na maior distância vertical das funções de densidades acumuladas empíricas e teóricas. Igual ao teste estatístico de *Anderson-Darling*, uma hipótese é rejeitada se a estatística de teste é maior que o valor crítico ao nível de significância escolhido. Para o nível de significância  $\alpha = 0,05$ , o valor crítico calculado é 0,12555. As amostras são consideradas a partir de uma função de densidade acumulada  $F(x)$ . Considerando  $n$  o tamanho da amostra, a estatística de testes ( $D$ ), segundo Das e Simonovic (2011), é:

$$D = \max \left( F(x_i) - \frac{i-1}{n}, \frac{i}{n} - F(x_i) \right) \quad (63)$$

O teste do qui-quadrado, é usado para determinar se uma amostra é proveniente de uma determinada distribuição. Deve notar-se que este não é considerado como um teste estatístico muito potente e não é muito utilizado. O teste é baseado em dados ordenados, e o número de ordem ( $k$ ) é determinado por  $k = 1 + \log_2 N$ , em que  $N$  é o tamanho da amostra. A estatística de teste ( $\chi^2$ ), segundo Das e Simonovic (2011), é dada por:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^K \frac{(O_i - E_i)^2}{E_i} \quad (64)$$

onde:  $O_i$  é a frequência observada e  $E_i$  é a frequência esperada, sendo  $E_i$  igual a:

$$E_i = F(x_2) - F(x_1) \quad (65)$$

### 3.5.4 Estruturação dos períodos completos e subperíodos

Visando avançar nas análises de frequência da PDMA na Sub-bacia 39, além dos “Períodos completos” foram também definidos dois subperíodos, de forma a proporcionar análises comparativas mais detalhadas sobre as distribuições empíricas ajustadas ao modelo de *Gumbel*. Nesse sentido, foram vinculados os primeiros 30 anos ao “Primeiro período”, e os últimos 30 anos ao “Último período”. Os tamanhos dos períodos fixados em 30 anos tiveram seus dimensionamentos com base no conceito de séries normais climatológicas. Os tamanhos anuais dos períodos completos e dos subperíodos estão detalhados na Tabela 3.9.

Tabela 3.9 – Intervalos anuais dos Períodos completos e subperíodos

Casos	Característica	Descriminação	Intervalo
I	Total de 70 anos	Período completo	1943 - 2012
II	Primeiros 30 anos	Primeiro período	1943 - 1972
III	Últimos 30 anos	Último período	1983 - 2012

Para avançar mais foram também definidos outros subperíodos: a “Parte móvel do Primeiro período” e a “Parte móvel do Último período”, ambos compartilhando as extremidades do “Período completo”. Na Parte móvel do Primeiro período, trata-se de um conjunto de 5 subperíodos de 30 anos consecutivos começando pelo Primeiro período. Na Parte móvel do Último período, um conjunto de 5 subperíodos consecutivos terminando pelo Último período. Os intervalos anuais das partes móveis estão discriminados na Tabela 3.10.

Tabela 3.10 – Intervalos anuais das partes móveis

Casos	Característica	Descriminação	Intervalo
IV	Primeiros 5 anos	Parte móvel do Primeiro período	1943 - 1972
			1944 - 1973
			1945 - 1974
			1946 - 1975
			1947 - 1976
V	Últimos 5 anos	Parte móvel do Último período	1979 - 2008
			1980 - 2009
			1981 - 2010
			1982 - 2011
			1983 - 2012

### 3.5.5 Análise das frequências acumuladas (Casos I, II e III)

Essa análise permitiu a comparação gráfica das frequências relativas acumuladas dos Períodos completos com os Primeiros e Últimos períodos das séries de PDMA, definidos nos Casos I, II e III. Todos foram delineados no campo cartesiano formado pelas frequências de não superação nas ordenadas e os quantis medidos em milímetros nas abscissas. Elaborados em planilhas *Excel*, os dados de PDMA foram classificados em ordem crescente, onde cada dado teve seu número de ordem de classificação associado a um valor  $m$  pertencente ao intervalo  $1 \leq m \leq N$ , onde  $N$  é o tamanho da amostra: iguais a 30 nos “Primeiros e “Últimos períodos”, e 70 no “Período completo”. Em seguida, associou-se aos dados classificados as correspondentes frequências ou probabilidades empíricas de não superação, calculadas pelo quociente  $m/N$ . Para plotagem das frequências empíricas foram utilizadas a fórmula de *Weibull*, usada nos procedimentos anteriores.

### 3.5.6 Análise das frequências dos quantis (Casos I, IV e V)

Essa análise comparou em papéis de probabilidade os ajustes à distribuição de *Gumbel*, associando simultaneamente os Períodos completos com as Partes móveis dos Primeiros e Últimos períodos, caracterizados e discriminados respectivamente nos Casos I, IV e V. Com os valores amostrais das séries de PDMA, colocados nas ordenadas e tempos de retorno nas abscissas, as retas

representativas dos ajustes ao Modelo Teórico de *Gumbel* descreveram comportamentos comparativos importantes às investigações.

### 3.5.7 Análise das frequências adimensionalizadas (Casos I, II e III)

Essa análise também foi realizada em papéis de probabilidade, dessa vez para comparar os “Períodos completos” com os “Primeiros e Últimos períodos” definidos nos Casos I, II e III. Para tanto, foram adimensionalizados os quantis calculados para todos os períodos e subperíodos, dividindo cada um pelo próprio Período completo, e criando com isso uma nova escala adimensional para o eixo das ordenadas, totalmente correspondente aos respectivos tempos de retorno, situados no eixo das abscissas do papel de *Gumbel*. A partir daí foi possível delinear distintamente os diferentes comportamentos e proceder as comparações desejadas.

### 3.5.8 Intervalo de confiança dos quantis nos períodos e subperíodos

Os intervalos foram determinados com o intuito de avaliar a confiabilidade dos ajustes ao modelo teórico de *Gumbel* nos Períodos completos, Primeiros e Últimos períodos de todas as séries de PDMA. Para tanto, os parâmetros, os momentos e os quantis foram obtidos através da mesma metodologia utilizada no Período completo, com escala de tempo de retorno até 100 anos, relacionados aos quantis em papel de probabilidade no programa *Excel*. Os intervalos de confiança foram determinados a partir da definição dos limites superiores e inferiores, para um nível de significância fixado em  $\alpha=0,05$ . Para o cálculo desses intervalos, utilizou-se a sugestão de Naghettini & Pinto (2007), representado pela equação (66).

$$\hat{X}_T \pm |z_{\alpha/2}| S_T \quad (66)$$

onde,

$$X_T = \beta - \alpha \ln \left[ -\ln \left( 1 - \frac{1}{T} \right) \right] \quad (67)$$

$$S_T^2 = \frac{\mu_2}{N} \left[ 1 + K_T \gamma_1 + \frac{K_T^2}{4} (\gamma_2 - 1) \right] \quad (68)$$

$$\text{onde } \mu_2 = \frac{\pi^2 \alpha^2}{6} \text{ e } N \text{ é o tamanho da amostra} \quad (69)$$

$$K_T = -0,45 - 0,7797 \ln \left[ -\ln \left( 1 - \frac{1}{T} \right) \right] \quad (70)$$

$$\gamma_1 = 1,1396 \text{ e } \gamma_{12} = 5,4 \quad (71)$$

### 3.6 ANÁLISE DO ALERTA PLUVIOMÉTRICO NA CIDADE DE RECIFE

#### 3.6.1 Definição do limite pluviométrico para o alerta

Os estudos desenvolvidos por Souza (2011) ofereceram uma nova classificação às chuvas precipitadas na cidade de Recife. Os limiares foram determinados em função da magnitude dos desastres naturais peculiares à região, como alagamentos e deslizamento de massas. Para o dimensionamento dos limiares pluviométricos foram utilizadas técnicas quantílicas. A Tabela 3.11 apresenta a classificação obtida para as chuvas diárias acumuladas em 24 horas, segundo a ordem crescente de potencialidade dos limiares pluviométricos.

Tabela 3.11 – Classificação da chuva diária acumulada em 24 horas no Recife em relação aos quantis. Fonte: (Souza, 2011)

Classes	Altura diária (mm)
Dia Seco	$P < 2,2$
Chuva Muito Fraca	$2,2 \leq P < 4,2$
Chuva Fraca	$4,2 \leq P < 8,4$
Chuva Moderada	$8,4 \leq P < 18,6$
Chuva Forte	$18,6 \leq P < 55,3$
Chuva Muito Forte *	$55,3 \leq P \leq 100$
Chuva extrema *	$100 \leq P \leq 150$
Chuva muito extrema *	$P \geq 150$

\*Considerado pelo autor como eventos extremos

A APAC, visando identificar a chuva que definisse a necessidade de emissão de alerta, analisou os limites pluviais classificados por Souza (2011), e percebeu que a chuva de alerta estaria enquadrada entre os patamares representativo da Chuva Forte, Chuva Moderada e Chuva Fraca, desde que esse último fosse precedido de um acúmulo precipitado de 30 mm, certamente por conta da saturação do solo e da correspondente favorabilidade ao escoamento superficial. Observou então que, se 30 mm acumulado anteriormente a um episódio de chuva fraca ( $4,2 \text{ mm} \leq P < 8,4 \text{ mm}$ ) é suficiente para produzir danos, certamente esse seria o limiar mais eficiente para o disparo dos alertas.

A partir daí, a APAC julgou que independente da bacia, a chuva acumulada em 24 horas maior ou igual a 30 mm, seria o nível seguro para o alerta e chamar-se-ia “Chuva Forte”, por se enquadrar no intervalo ( $18,6 \text{ mm} \leq P < 55,3 \text{ mm}$ ), designado por Souza (2011) para identificar uma chuva considerada forte, precipitada na capital pernambucana. Para Obregón e Marengo (2007), valores diários acima do limiar de 25,0 mm no Brasil já podem ser considerados como extremos.

### 3.6.2 Emissão de aviso meteorológico em situação de risco

O item 5.1.1 do Manual de Operação da Sala de Situação da APAC refere-se aos “Avisos hidrometeorológicos”, e têm como prioridade o endereço da CODECIPE. Esse item prossegue com o seguinte texto:

*Os avisos elaborados pela sala de situação possuem diversos níveis que abordam as condições hidrometeorológicas, diretrizes e ações da defesa civil, estes definidos pela CODECIPE. Para melhor compreensão dos níveis de alerta faz-se necessário saber que:*

- ✓ **Nível do rio baixo:** o nível do curso de água permanece a maior parte do período de estiagem;
- ✓ **Cota de alerta:** definido como sendo 1 m abaixo do nível de inundação;
- ✓ **Cota de inundação:** cota do curso de água onde as primeiras moradias, da parte mais baixa da cidade, serão inundadas;
- ✓ **Chuva Forte:** chuva acumulada em 24 h maior que 30 mm independente da bacia;

As informações são também repassadas aos jornais de grande e pequena circulação no estado de Pernambuco, como também veiculadas na imprensa radiofônica e televisiva. As Figuras 3.12, 3.13 e 3.14 mostram exemplos de noticiários nos jornais de maiores circulação no estado de Pernambuco.

A Defesa civil municipal, ao receber os alertas emitidos pela APAC, avalia os boletins e confronta com o mapeamento das áreas de risco. Nesse momento, a chuva de 30 mm é referencial importante para alguns pontos de alagamento e deslizamento de massa na cidade de Recife, desde que analisada a sua distribuição espaço-temporal. Quando se faz necessário, a Secretaria repassa para 12.000 celulares pertencentes à população cadastrada em área de risco, os avisos de alerta para o tempo de permanência no local (SEDEC, 2015).



Figura 3.12 – Divulgação de alerta emitido pela APAC em jornal de grande circulação em Pernambuco. Adaptado: (Diário de Pernambuco, 2015a)

**jornal do commercio**

[cidades](#) | [esportes](#) | [cultura](#) | [ec](#)  
[E-books](#) | [JC na Folia](#) | [Imagens](#) | [Charges](#) | [Capa do dia](#) | [TV JC](#) | [Colunas](#) | [Assine](#)

## cidades

home > cidades > geral Tamanho do texto: A- A+

**CHUVA**  
**Apac prevê chuva com intensidade acima dos 30mm pelas próximas horas no Recife e RMR**

O alerta maior é para a madrugada e início da manhã desta segunda (28)

Publicado em 27/07/2014, às 18h50

A Agência Pernambucana de Águas e Climas (Apac) divulgou alerta para as próximas horas no Recife e na Região Metropolitana (RMR). De acordo com o órgão deve chover com intensidade acima dos 30mm, especialmente na madrugada e na manhã desta segunda-feira (28).

Figura 3.13 – Divulgação de alerta emitido pela APAC em jornal de grande circulação em Pernambuco. Adaptado: (Jornal do Comércio, 2015)

[política](#) | [brasil](#) | [mundo](#) | [economia](#) | [superesportes](#) | [local](#) | [viver](#) | [blogs](#) | [especiais](#) | [fale conosco](#) | [leia o diário](#)

+ [últimas](#) | [ciência e saúde](#) | [diarinho](#) | [domingos](#) | [vídeos](#) | [fotos](#)

# DIÁRIO de PERNAMBUCO

**local**

TAMANHO DA LETRA |  |  |

| Votação: ☆☆☆☆ |  | Compartilhar: [f](#) [t](#) [+](#)

**Aviso meteorológico »**

## Apac emite alerta de chuvas fortes para o Grande Recife e zona da Mata

Publicação: 04/03/2015 08:18 Atualização: 04/03/2015 11:47

A Agência Pernambucana de Águas e Climas (Apac) emitiu na manhã desta quarta-feira um aviso meteorológico sobre a possibilidade de chuvas com acumulados acima de 30 mm. De acordo com o documento, o alerta é válido para a Região Metropolitana do Recife (RMR) e Zona da Mata e as precipitações devem ocorrer nas próximas 24h. O comunicado foi emitido às 7h.

Segundo a Apac, as chuvas fortes têm como causa a o distúrbio ondulatório de Leste (DOL) que vem se aproximando da costa de Pernambuco. As equipes da Defesa Civil do Recife estão de prontidão e podem ser acionadas pelo telefone 0800 081 3400. A ligação é gratuita e a Central de Atendimento e funciona 24h.

Figura 3.14 – Divulgação de alerta emitido pela APAC em jornal de grande circulação em Pernambuco. Adaptado: (Diário de Pernambuco, 2015b)

### 3.6.3 Análise exploratória dos dados pluviométricos da Chuva forte

Foi extraída do banco de dados desta pesquisa, a série pluviométrica diária referente à estação de Recife. Utilizando o processo de “filtragem” disponível no *Office Excel 2007*, foi montada uma série pluviométrica com os valores exclusivamente maiores ou iguais 30 milímetros, correspondente a condição de risco aos desastres, classificada por Souza (2011) e utilizada pela APAC como limiar de emissão de alerta.

A série de chuvas fortes ou série de precipitação diária acumulada ( $Pd \geq 30$  mm) reúne os dias chuvosos que se igualaram ou ultrapassaram o limiar de Chuva forte (30 mm). Esses dias passam a ser aqui entendidos como os menores indicativos de eventos com probabilidade de provocar danos, como os alagamentos e/ou deslizamentos de massas, com prejuízo pessoal e material à sociedade. Nessa ocasião, os boletins são emitidos pela APAC, para que as populações e os órgãos competentes, como as Defesas Civas, se mantenham informados e atentos às tomadas de decisões em tempos hábeis.

A série de chuva forte, ou série de eventos capazes de produzir danos, foi subdividida em duas variáveis: (a) as “Alturas de chuvas anuais com precipitações maiores ou iguais a 30 mm”, e (b) os “Números de dias chuvosos de cada ano com precipitações maiores ou iguais a 30 mm”. Em ambas, as séries foram desmembradas em três períodos: Período completo, Primeiro período e Último período, perfazendo um total de seis séries pluviométricas. Da mesma forma que se analisou a frequência de PDMA, utilizou-se o Período completo de 70 anos (1943-2012), o Primeiro período de 30 anos (1943 a 1972) e o Último período de 30 anos (1983-2012).

Primeiramente foram testadas as linhas de tendência das duas variáveis para o Período completo, segundo a construção de gráficos cartesianos no *Office Excel 2007*. Em seguida, foram calculadas as estatísticas centrais e dispersivas dos Períodos completos, Primeiros períodos e Últimos períodos de cada variável. Os pontos atípicos (*outlier*) foram analisados utilizando a técnica da Amplitude Interquartil (AIQ). A partir das estatísticas obtidas foram elaborados diagramas tipo *Box Plot* para análise gráfica do comportamento das variáveis e períodos definidos para as chuvas fortes em Recife.

### 3.6.4 Análise de tendência da Chuva forte

Para verificação da existência de tendência na capacidade de risco aos desastres naturais, a série de chuva forte foi submetida à aplicação dos testes estatísticos de tendência, associados aos Métodos de *Mann-Kendall*, *Spearman-Rho* e Regressão linear. O *Software Trend* serviu à aplicação desses métodos, como também foi utilizada a técnica de reamostragem (*Bootstrapping*) sugerida por Chiew e Siriwardena (2005).

### 3.6.5 Análise de frequência da Chuva forte

Na análise de frequência realizada para avaliação do comportamento da capacidade de risco aos desastres naturais, os Períodos completos, Primeiros períodos e Últimos períodos referentes à Altura de chuva anual e aos Número de dias chuvosos anual, foram submetidas à análise de frequência relativa acumulada. Para que as análises fossem realizadas, foram elaborados dois gráficos cartesianos contendo os quantis na abscissa e as probabilidades de não superação dos valores correspondente na ordenada. A comparação das probabilidades delineadas em função dos quantis dos períodos estudados representou o principal instrumento da avaliação.

CAPÍTULO 4

Resultados e discussão

---

## 4.1 SÉRIES AMOSTRAIS

### 4.1.1 Análise da consistência dos dados

Os recursos utilizados para consistir as séries de dados pluviométricos, como metodologias e *softwares*, resultaram em um nível satisfatório de homogeneização e preenchimento das falhas. As curvas do tipo Dupla-massa estão exibidas no ANEXO B. Quanto à chuva anômala precipitada em Recife no dia 11/08/1970, observou-se que a mesma concentrou toda sua potencialidade no mesmo dia, influenciando apenas os resultados de métodos que envolveram diretamente a precipitação diária, como é o caso da PDMA. Entretanto, seu envolvimento nas séries de totais mensais e totais anuais não apresentou influência, mantendo-as coerentes com as séries das estações vizinhas. O registro pluviográfico encontra-se no ANEXO A.

### 4.1.2 Análise exploratória dos dados

A Tabela 4.1 facilitou as análises das estatísticas descritivas e dos pontos atípicos (*outlier*) calculados para todas as séries. Na maior parte das estações os resultados se apresentaram dentro dos padrões esperados para análises de variáveis aleatórias contínuas de precipitação. Alguns valores chamaram atenção, como os extremos máximos registrados nas séries de totais anuais, com precipitações acima dos limites superiores, para tanto considerados *outlier* pelo critério da Amplitude Interquartil. Quanto aos pontos abaixo dos limites inferiores, esses não foram analisados por estarem fora do interesse temático.

Tais considerações estatísticas e exploratórias foram também analisadas graficamente conforme os diagramas apresentados no ANEXO C. Nesse contexto, nas análises dos pontos atípicos superiores foram observados nas estações de Bom Jardim, João Pessoa e Umbuzeiro, registros de um único ponto acima dos limites superiores; em Recife, dois pontos; em São Lourenço da Mata, três; e Timbaúba, com destaque para seis máximos anuais atípicos. A princípio, é possível que esses *outliers* possam ter sinalizado ocorrências de chuvas muito intensas nesses municípios. Outros elementos que se mostraram altos foram os coeficientes de curtose das estações de João Pessoa e Timbaúba.

Os gráficos de variabilidade pluviométrica e dispersão de pontos mostraram inclinações, sendo algumas consideradas como tendência, segundo a significância estatística dos testes de hipótese aplicados. Observou-se, no entanto, que das 16 estações pluviométricas, 11 indicaram inclinações ascendentes, denotando uma região propícia à existência de tendências positivas ou aumento das precipitações. A Tabela 4.2 relaciona os coeficientes angulares das linhas de tendência de cada série amostral.

Tabela 4.1– Estatística descritiva e análise de *outlier* das séries pluviométricas

Estatísticas amostrais	Estações pluviométricas (Posição)															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Média (mm)	1817,8	1265,9	961,8	601,0	830,2	1272,5	1866,6	1665,7	1453,6	987,0	2143,8	1465,2	588,3	1056,7	834,3	1103,7
Mediana (mm)	1708,8	1331,5	934,9	622,5	850,5	1256,2	1801,1	1568,0	1461,5	977,7	2173,8	1406,0	559,5	1012,5	838,2	1048,1
Desvio Padrão (mm)	626,2	313,7	249,4	227,8	234,9	320,2	530,9	441,5	334,8	300,5	542,5	425,8	180,0	368,6	293,4	331,1
Variância (mm <sup>2</sup> )	392092,8	98403,6	62208,5	51887,4	55194,9	102533,8	281844,6	194932,1	112123,7	90277,5	294276,9	181330,2	32382,6	135888,9	86108,6	109640,1
Coefficiente de curtose	-0,49	-0,52	1,10	-0,49	-0,79	-0,43	2,53	-0,40	0,06	-0,71	0,17	1,12	-0,51	2,85	-0,30	-0,65
Coefficiente de assimetria	0,52	-0,63	0,32	-0,28	-0,26	0,15	0,37	0,66	-0,07	0,09	-0,17	0,42	0,48	0,36	-0,04	0,50
Coefficiente de variação	0,34	0,25	0,26	0,38	0,28	0,25	0,28	0,27	0,23	0,30	0,25	0,29	0,31	0,35	0,35	0,30
Máximo (mm)	3360,9	1952,8	1758,0	1082,0	1304,5	1974,8	3966,3	2676,8	2326,0	1588,0	3527,1	2744,4	955,7	2257,0	1608,6	1830,6
Mínimo (mm)	874,4	650,1	425,6	140,0	266,0	600,9	635,1	890,2	624,6	439,1	1053,9	660,6	224,5	385,3	324,8	463,9
Amplitude – A (mm)	2486,5	1302,7	1332,4	942,0	1038,5	1373,9	3331,2	1786,6	1701,4	1148,9	2473,2	2083,8	731,2	1871,7	1283,8	1366,7
Primeiro Quartil – Q <sub>1</sub> (mm)	1295,0	1030,2	777,1	456,3	649,8	1085,1	1579,3	1368,3	1257,2	776,1	1855,0	1204,4	474,2	845,6	602,7	862,7
Terceiro Quartil – Q <sub>3</sub> (mm)	2224,1	1461,2	1073,8	739,3	1025,1	1459,5	2227,6	1915,6	1705,0	1189,7	2459,2	1701,0	710,9	1151,3	992,1	1350,2
Amplitude – AIQ (mm)	929,2	431,0	296,6	283,0	375,4	374,3	648,3	547,3	447,8	413,7	604,3	496,6	236,8	305,7	389,3	487,5
Limite Superior (mm)	3617,9	2107,6	1518,7	1163,8	1588,2	2021,0	3199,9	2736,5	2376,7	1810,2	3365,6	2445,9	1066,1	1609,7	1576,0	2081,4
Limite Inferior (mm)	-98,8	383,7	332,2	31,8	86,7	523,6	606,9	547,5	585,5	155,6	948,5	459,4	119,0	387,1	18,7	131,5
<i>Outlier</i> – Superior (mm)	-	-	1758,0	-	-	-	3966,3	-	-	-	3527,1	2744,4	-	2257,0	1608,6	-
<i>Outlier</i> – Superior (mm)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3441,1	2609,2	-	2163,0	-	-
<i>Outlier</i> – Superior (mm)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3439,0	-	-	2041,0	-	-
<i>Outlier</i> – Superior (mm)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1838,0	-	-
<i>Outlier</i> – Superior (mm)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1647,0	-	-
<i>Outlier</i> – Inferior (mm)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	385,3	-	-

Tabela 4.2 – Avaliação dos coeficientes angulares das linhas de tendência nas precipitações anuais

Posição	Estação/Município	Coeficiente angular	
		Crescente	Decrescente
1	Alhandra	+11,89	-
2	Atalaia	-	-6,76
3	Bom Jardim	-	-3,10
4	Caruaru	+5,26	-
5	Garanhuns	+0,52	-
6	Itambé	+0,06	-
7	João Pessoa	+2,55	-
8	Maceió	+7,67	-
9	Palmares	+0,53	-
10	Palmeira dos Índios	-	-5,38
11	Recife	+9,72	-
12	São Lourenço da Mata	-	-0,10
13	Surubim	-	-0,37
14	Timbaúba	+6,12	-
15	Umbuzeiro	+2,47	-
16	Vitória de Santo Antão	+4,41	-

Os diagramas de linhas de tendência, dispersão de pontos, *Q-Q Plots*, histogramas e *Box Plot* estão expostos no ANEXO C. Os gráficos *Box Plot* comprovaram, sobretudo, as relações entre médias e medianas, além do comportamento das caldas e a comprovação dos pontos atípicos identificados. As análises dos diagramas *Q-Q Plots* e os histogramas mostraram que a maior parte das séries temporais se aproxima da distribuição normal.

A Tabela 4.3 mostra um resumo das avaliações em percentuais dos testes de *Kolmogorov-Smirnov*, *Anderson Darling*, *Shapiro-Wilk* utilizados para verificação da normalidade, assim como os testes *Wald-Wolfowitz*, *Mann-Whitney* e *Spearman* usados respectivamente para verificação da Independência, Homogeneidade e Estacionariedade.

Tabela 4.3 – Avaliação dos testes de aderência aos pressupostos dos testes estatísticos

Testes de hipótese	Normalidade			Independência	Homogeneidade	Estacionariedade
	KS	AD	SW	WW	MW	S
Aceitar $h_0$	81%	69%	69%	44%	56%	56%
Rejeitar $h_0$	19%	31%	31%	56%	44%	44%

KS - *Kolmogorov-Smirnov*, AD - *Anderson Darling*, SW - *Shapiro-Wilk*, WW - *Wald-Wolfowitz*, MW - *Mann-Whitney*, S - *Spearman*

Observou-se que os testes de normalidade apresentaram uma média de 27% de rejeição à hipótese nula  $h_0$  (que os dados seguem uma distribuição normal). Do mesmo modo, os testes para verificação da Independência, Homogeneização e estacionariedade, responderam respectivamente por 56%, 44%, 44% de rejeição às hipóteses nula  $h_0$  (que os dados são independentes, homogêneos e estacionários). Esses resultados poderão tornar possível a violação dos pressupostos exigidos pelos testes estatísticos na detecção de tendência e mudanças. As Tabelas 4.4 e 4.5 apresentam os resultados dos testes.

Tabela 4.4 – Teste de aderência à normalidade

Posição	Estação	Kolmogorov-Smirnov			Anderson Darling			Shapiro-Wilk		
		Estatística	P-valor	$\alpha=0,05$	Estatística	P-valor	$\alpha=0,05$	Estatística	P-valor	$\alpha=0,05$
1	Alhandra	0,097	0,106	Aceitar $h_0$	1,029	0,010	Rejeitar $h_0$	0,950	0,007	Rejeitar $h_0$
2	Atalaia	0,096	0,114	Aceitar $h_0$	0,320	0,525	Aceitar $h_0$	0,980	0,491	Aceitar $h_0$
3	Bom Jardim	0,104	0,058	Aceitar $h_0$	0,887	0,022	Rejeitar $h_0$	0,960	0,033	Rejeitar $h_0$
4	Caruaru	0,061	0,738	Aceitar $h_0$	0,268	0,673	Aceitar $h_0$	0,980	0,513	Aceitar $h_0$
5	Garanhuns	0,105	0,052	Aceitar $h_0$	0,727	0,055	Aceitar $h_0$	0,970	0,098	Aceitar $h_0$
6	Itambé	0,050	0,935	Aceitar $h_0$	0,170	0,930	Aceitar $h_0$	0,990	0,722	Aceitar $h_0$
7	João Pessoa	0,069	0,552	Aceitar $h_0$	0,469	0,242	Aceitar $h_0$	0,960	0,016	Rejeitar $h_0$
8	Maceió	0,105	0,054	Aceitar $h_0$	0,651	0,086	Aceitar $h_0$	0,970	0,066	Aceitar $h_0$
9	Palmares	0,066	0,623	Aceitar $h_0$	0,263	0,692	Aceitar $h_0$	0,990	0,871	Aceitar $h_0$
10	Palmeira dos Índios	0,053	0,902	Aceitar $h_0$	0,262	0,696	Aceitar $h_0$	0,980	0,265	Aceitar $h_0$
11	Recife	0,065	0,650	Aceitar $h_0$	0,389	0,375	Aceitar $h_0$	0,980	0,206	Aceitar $h_0$
12	São Lourenço da Mata	0,134	0,003	Rejeitar $h_0$	1,263	0,003	Rejeitar $h_0$	0,940	0,003	Rejeitar $h_0$
13	Surubim	0,129	0,005	Rejeitar $h_0$	0,611	0,108	Aceitar $h_0$	0,970	0,135	Aceitar $h_0$
14	Timbaúba	0,181	0,000	Rejeitar $h_0$	2,743	0,000	Rejeitar $h_0$	0,870	0,000	Rejeitar $h_0$
15	Umbuzeiro	0,072	0,489	Aceitar $h_0$	0,411	0,333	Aceitar $h_0$	0,980	0,208	Aceitar $h_0$
16	Vitória de Santo Anão	0,097	0,099	Aceitar $h_0$	0,761	0,046	Rejeitar $h_0$	0,970	0,079	Aceitar $h_0$

Hipótese nula  $h_0$  (os dados seguem a distribuição normal)

Tabela 4.5 – Teste de aderência à Independência, homogeneidade e estacionariedade

Posição	Estação	Wald-Wolfowitz (Independência)			Mann-Whitney (Homogeneização)			Spearman (estacionariedade)		
		Estatística	Z	$\alpha=0,05$	Estatística	Z	$\alpha=0,05$	Estatística	Z	$\alpha=0,05$
1	Alhandra	3,922	1,960	Rejeitar $h_0$	-3,518	1,960	Rejeitar $h_0$	3,410	1,960	Rejeitar $h_0$
2	Atalaia	3,119	1,960	Rejeitar $h_0$	-3,506	1,960	Rejeitar $h_0$	-3,446	1,960	Rejeitar $h_0$
3	Bom Jardim	0,052	1,960	Aceitar $h_0$	-1,310	1,960	Aceitar $h_0$	-1,036	1,960	Aceitar $h_0$
4	Caruaru	3,089	1,960	Rejeitar $h_0$	-2,320	1,960	Rejeitar $h_0$	3,631	1,960	Rejeitar $h_0$
5	Garanhuns	0,240	1,960	Aceitar $h_0$	-0,006	1,960	Aceitar $h_0$	0,553	1,960	Aceitar $h_0$
6	Itambé	1,461	1,960	Aceitar $h_0$	-0,722	1,960	Aceitar $h_0$	-0,022	1,960	Aceitar $h_0$
7	João Pessoa	0,138	1,960	Aceitar $h_0$	-0,863	1,960	Aceitar $h_0$	1,249	1,960	Aceitar $h_0$
8	Maceió	2,497	1,960	Rejeitar $h_0$	-2,167	1,960	Rejeitar $h_0$	2,667	1,960	Rejeitar $h_0$
9	Palmares	0,656	1,960	Aceitar $h_0$	-0,194	1,960	Aceitar $h_0$	0,534	1,960	Aceitar $h_0$
10	Palmeira dos Índios	2,859	1,960	Rejeitar $h_0$	-3,565	1,960	Rejeitar $h_0$	-2,794	1,960	Rejeitar $h_0$
11	Recife	2,035	1,960	Rejeitar $h_0$	-2,226	1,960	Rejeitar $h_0$	3,192	1,960	Rejeitar $h_0$
12	São Lourenço da Mata	2,049	1,960	Rejeitar $h_0$	-1,462	1,960	Aceitar $h_0$	0,284	1,960	Aceitar $h_0$
13	Surubim	0,570	1,960	Aceitar $h_0$	-0,722	1,960	Aceitar $h_0$	-0,602	1,960	Aceitar $h_0$
14	Timbaúba	2,841	1,960	Rejeitar $h_0$	-0,288	1,960	Aceitar $h_0$	0,604	1,960	Aceitar $h_0$
15	Umbuzeiro	1,866	1,960	Aceitar $h_0$	-1,944	1,960	Aceitar $h_0$	1,561	1,960	Aceitar $h_0$
16	Vitória de Santo Anão	3,130	1,960	Rejeitar $h_0$	-2,696	1,960	Rejeitar $h_0$	2,378	1,960	Rejeitar $h_0$

Hipótese nula  $h_0$  (os dados são independentes; homogêneos; estacionários)

## 4.2 ESTACIONARIEDADE DA PRECIPITAÇÃO

### 4.2.1 Detecção de tendência nas séries de precipitação

Os critérios e os níveis de significância estatística, que justificaram a existência de tendências nas variáveis hidrológicas e nos índices pluviométricos, estão expostos no ANEXO D. A Tabela 4.6 apresenta um resumo das tendências reveladas com os testes estatísticos e o *software Trend*. A Tabela 4.7 reúne os resultados das tendências detectadas com os índices pluviométricos e o *software RCLindex*. A Figura 4.1 apresenta a análise espacial das tendências mostradas na Tabela 4.6. A Figura 4.2 mostra a análise espacial das tendências mostradas na Tabela 4.7. Para facilitar as análises, os mapas se restringiram às tendências estatisticamente significativas.

Tabela 4.6 – Tendências nas variáveis hidrológicas

Estações pluviométricas	Tendências – <i>Software Trend</i>								
	PTA	PDMA	SMU	TMU	BMU	MMU	MAI	JUL	AGO
1-Alhandra	S+	S+	S+	S+	S+	S+	NS	S+	S+
2-Atalaia	S-	NS	S-	S-	NS	NS	S-	NS	NS
3-Bom Jardim	S-	NS	S-	NS	NS	NS	S-	NS	NS
4-Caruaru	S+	NS	S+						
5-Garanhuns	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
6-Itambé	NS	S+	NS						
7-João Pessoa	NS	NS	NS	NS	S+	NS	NS	NS	NS
8-Maceió	S+	NS	S+	S+	S+	NS	NS	S+	S+
9-Palmares	NS	NS	NS	NS	S+	NS	NS	NS	NS
10-Palmeira dos Índios	S-	NS	S-	S-	S-	NS	S-	S-	S-
11-Recife	S+	S+	S+	S+	S+	S+	NS	S+	S+
12-S. Lourenço da Mata	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	S+	NS
13-Surubim	NS	NS	NS	NS	S+	NS	S-	NS	NS
14-Timbaúba	NS	S+	NS	NS	S+	NS	NS	S+	NS
15-Umbuzeiro	NS	S+	NS	NS	S+	NS	S-	NS	S+
16-Vitória de Santo Antão	S+	S+	S+	S+	S+	S+	NS	S+	S+

S+ (Tendência positiva com significância estatística)

S- (Tendência negativa com significância estatística)

NS (Tendência não significativa ou sem tendência)

Tabela 4.7 – Tendências nos índices pluviométricos

Estações pluviométricas	Tendências – <i>Software RCLindex</i>								
	PRCPTOT	RMedmm	Rx1day	Rx5day	SDII	R10mm	R50mm	R99p	CWD
1-Alhandra	S+	S+	S+	S+	NS	S+	S+	S+	NS
2-Atalaia	S-	NS	NS	NS	S-	S-	S-	S-	S+
3-Bom Jardim	S-	S-	NS	NS	NS	S-	S-	S-	S-
4-Caruaru	S+	NS	NS	S+	S-	S+	NS	NS	NS
5-Garanhuns	NS	NS	NS	NS	S+	NS	NS	NS	S-
6-Itambé	NS	S+	S+	NS	NS	NS	NS	NS	NS
7-João Pessoa	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
8-Maceió	S+	NS	NS	NS	NS	S+	S+	NS	S+
9-Palmares	NS	NS	NS	NS	NS	S-	NS	NS	NS
10-Palmeira dos Índios	S-	NS	S+	NS	S-	S-	NS	NS	S-
11-Recife	S+	S+	S+	NS	S+	NS	S+	S+	NS
12-S. Lourenço da Mata	NS	NS	NS	S+	S+	NS	S+	S+	S-
13-Surubim	NS	NS	NS	NS	S+	NS	NS	NS	S-
14-Timbaúba	NS	NS	NS	NS	S+	NS	NS	NS	NS
15-Umbuzeiro	S+	NS	NS	NS	S+	S+	NS	S+	S-
16-Vitória de S. Antão	S+	S+	S+	S+	S+	NS	S+	S+	NS

S+ (Tendência positiva com significância estatística)

S- (Tendência negativa com significância estatística)

NS (Tendência não significativa ou sem tendência)

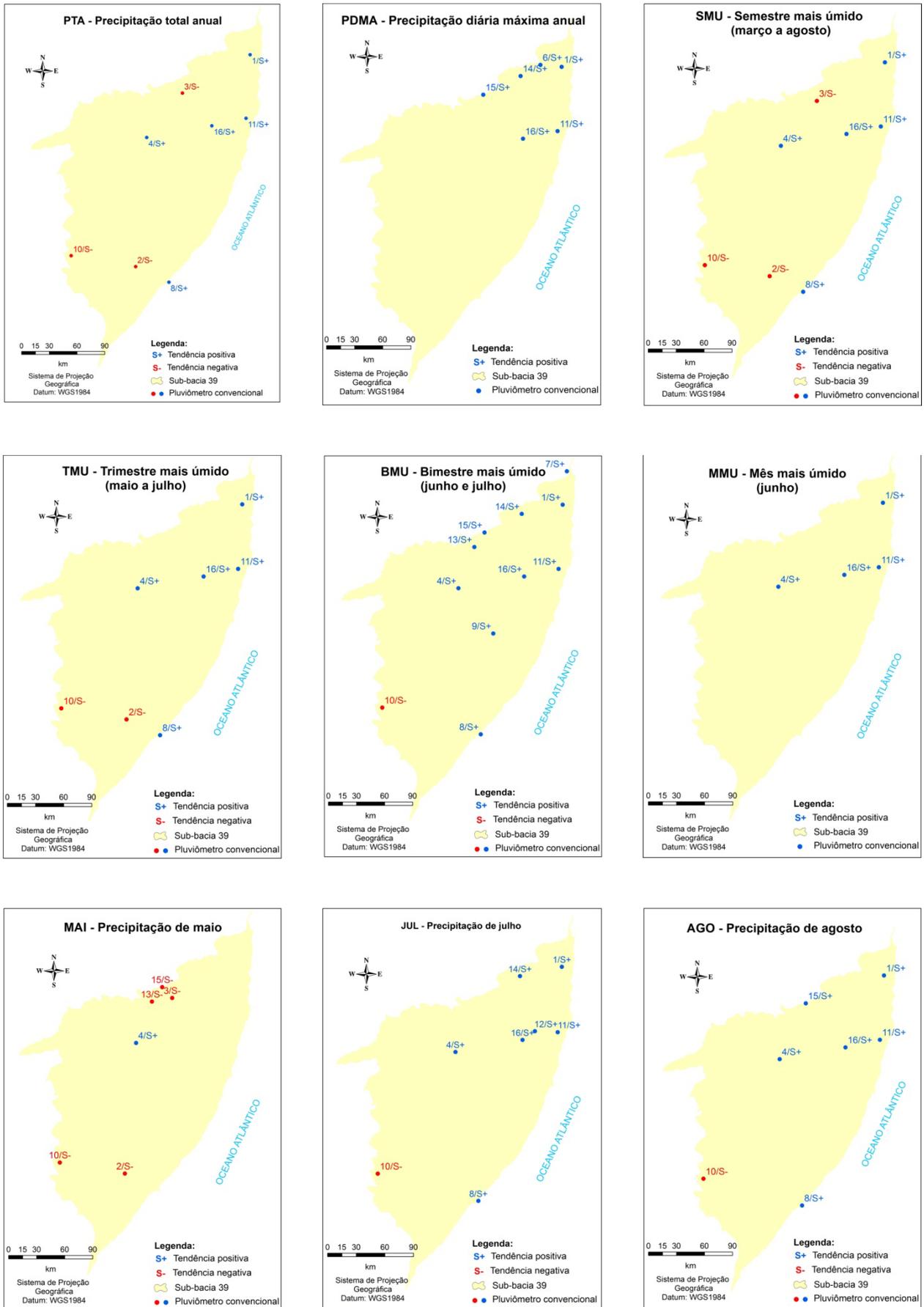


Figura 4.1 – Análise espacial das tendências significativas com teste estatístico

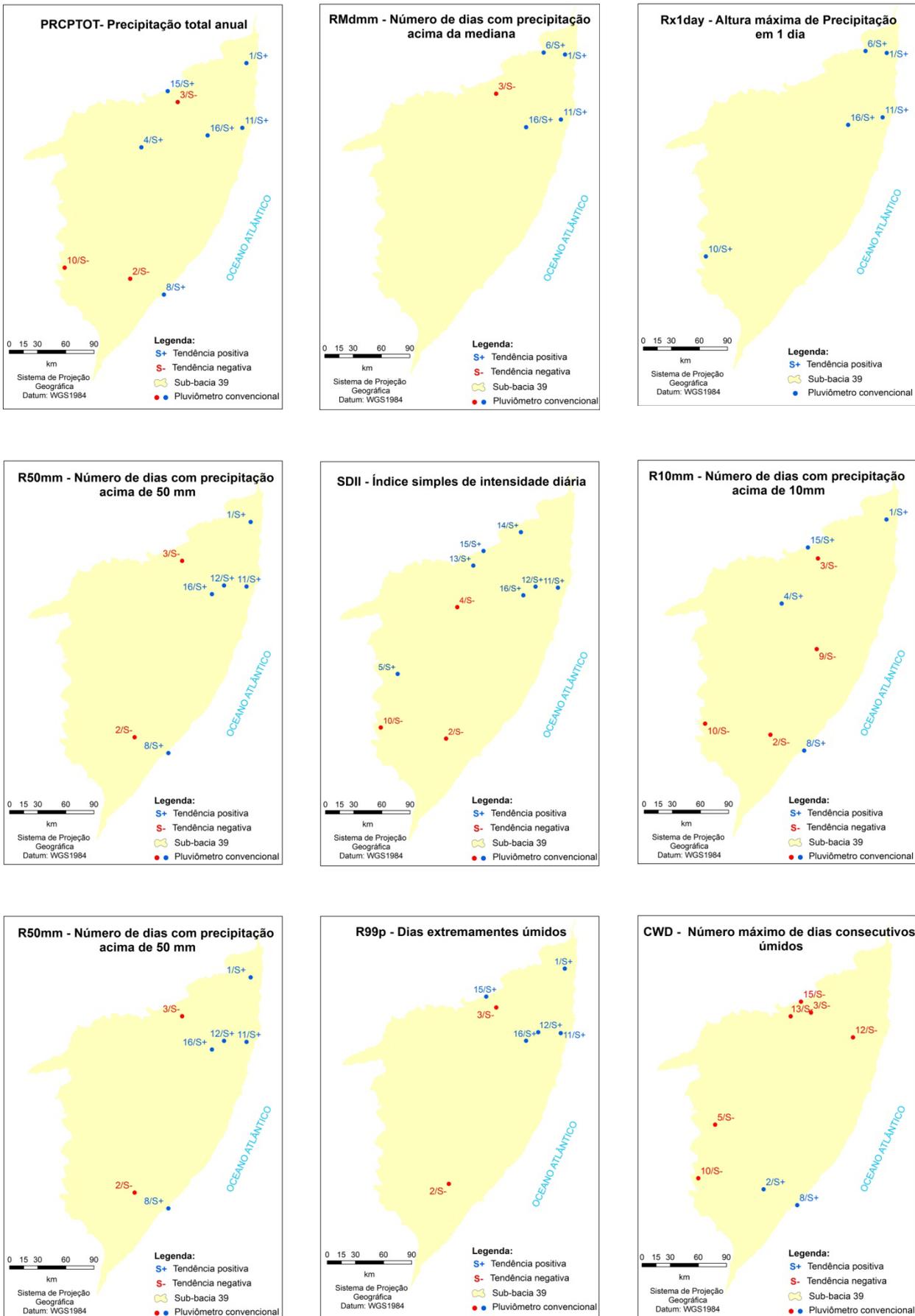


Figura 4.2 – Análise espacial das tendências significativas com índices pluviométricos

Analisando quantitativamente a Tabela 4.6, fornecida pelo *software Trend*, observou-se que as ocorrências significativas corresponderam a 45% dos resultados. Dessa parcela, 76% representaram tendências positivas e 24% negativas. A mesma análise foi repetida para a Tabela 4.7, fornecida pelo *software RClimdex*, onde as ocorrências significativas também corresponderam a 45% dos resultados, do qual 67% indicaram tendências positivas e 33% tendências negativas. Os resultados mostraram então que as análises quantitativas apontaram para uma predominância do aumento da precipitação na Sub-bacia 39.

Nas análises das configurações espaciais realizadas nas Figuras 4.1 e 4.2, observou-se que a maioria dos mapas das variáveis hidrológicas e dos índices pluviométricos descreveram configurações comuns, mesmo considerando os diferentes números de estações abordadas em cada mapa. A predominância de tendência positiva correspondeu às análises quantitativas efetuadas nas Tabelas 4.6 e 4.7. O exame espacial indicou que o aumento das tendências ocorre mais na parte norte da Sub-bacia 39, em todo Litoral, na Mata Norte, e no Agreste, principalmente na direção do município de Caruaru.

No entanto, observou-se também que as tendências negativas apontaram para as áreas mais influenciadas pelo clima semiárido, como a região do médio Capibaribe (Surubim) e leste da bacia do rio Goiana na parte norte, e a bacia do rio Coruripe, que fica nas proximidades da bacia do rio São Francisco na parte sul. Para demonstração dessa influência, um esboço climático da Sub-bacia 39 está sendo apresentado na Figura 4.3.

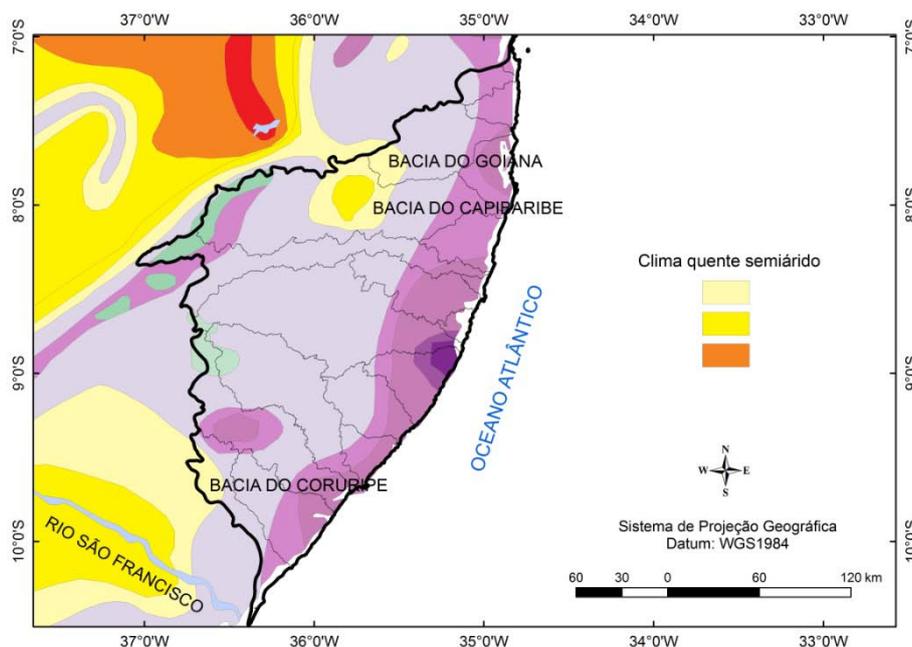


Figura 4.3 – Influência do clima semiárido na Sub-bacia 39. Fonte: (IBGE, 2014)

As configurações espaciais, contidas no conjunto de mapas, mostraram também que alguns municípios se destacaram no aumento da precipitação devido à simultaneidade de suas ocorrências, como é o caso de Alhandra, Recife, Vitória de Santo Antão, Caruaru e Maceió. Sob o mesmo contexto, os municípios de Bom Jardim, Atalaia, Surubim e Palmeira dos índios se inseriram no reduto marcado pela redução da precipitação.

Do ponto de vista meteorológico, a concentração de tendências negativas no Médio Capibaribe, principalmente do mapa da configuração MAI, pode ser influência provavelmente pelos anos com *El Niño* e/ou pelo posicionamento da ZCIT desfavorável às precipitações no NEB. Entretanto, nas demais áreas da Sub-bacia 39, como o Litoral, a Zona da Mata e parte mais úmida do Agreste, a influência dos sistemas de leste (oceano Atlântico) está mais relacionada com as tendências positivas, uma vez que se deslocam para o interior, com parte precipitando orograficamente, devido às altitudes do Planalto da Borborema.

Constatou-se, sobretudo, que os resultados descritos pelos índices pluviométricos estavam compatíveis com as configurações descritas pelas variáveis hidrológicas constituídas para o período úmido. Nesse contexto, duas grandes coerências foram imediatamente identificadas. Na primeira, o aumento da PRCPTOT foi compatível com a PTA, e na segunda, o aumento das chuvas intensas indicado pelos índices pluviométricos: RMedmm, Rx1day e R99p, também foram compatíveis com a PDMA. Importante se faz salientar que o aumento dessas tendências ocorre com maior concentração na parte norte.

Os índices, SDII, Rx5day, R10mm e R50mm reforçaram a hipótese de aumento na tendência da parte norte da Sub-bacia 39. Entretanto, no Médio Capibaribe pernambucano e nas proximidades do Baixo São Francisco alagoano, a hipótese foi de diminuição. Essa situação é confirmada com a redução da tendência dos dias úmidos consecutivos nas regiões semiáridas, conforme descrito na configuração do índice CWD.

#### **4.2.2 Detecção de mudanças nas séries de precipitação**

Os critérios que justificaram a existência de mudanças nas variáveis hidrológicas utilizando os testes estatísticos estão expostos no ANEXO D. A Tabela 4.8 resume os resultados obtidos durante a verificação de mudanças abruptas nas variáveis hidrológicas, utilizando o *software Trend*, independente das significâncias estatísticas que lhes corresponderam a partir dos testes estatísticos. A Figura 4.4 apresenta os mapas que serviram para analisar a distribuição espacial dos pontos de detecção de saltos pluviométricos mostrados na Tabela 4.8. Com o intuito de facilitar as análises, os mapas foram elaborados exclusivamente com os resultados que apresentaram significância estatística.

Tabela 4.8 – Mudanças nas variáveis hidrológicas

Estações pluviométricas	Mudanças – <i>Software Trend</i>								
	PTA	PDMA	SMU	TMU	BMU	MMU	MAI	JUL	AGO
1-Alhandra	S+	S+	S+	S+	S+	S+	NS	S+	S+
2-Atalaia	S-	S-	S-	S-	S-	NS	S-	NS	NS
3-Bom Jardim	S-	NS	S-	NS	NS	NS	NS	NS	NS
4-Caruaru	S+	NS	S+	S+	S+	NS	NS	S+	S+
5-Garanhuns	NS	NS	NS	NS	NS	NS	S-	NS	NS
6-Itambé	NS	S+	NS	NS	NS	NS	S-	NS	NS
7-João Pessoa	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
8-Maceió	S+	NS	S+	NS	S+	NS	NS	S+	S+
9-Palmares	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
10-Palmeira dos Índios	S-	NS	S-	S-	S-	NS	S-	S-	S-
11-Recife	S+	S+	S+	S+	S+	S+	NS	S+	NS
12-S. Lourenço da Mata	NS	NS	NS	NS	NS	NS	S-	NS	NS
13-Surubim	NS	S-	NS	NS	NS	S-	NS	NS	NS
14-Timbaúba	NS	S+	NS						
15-Umbuzeiro	S+	S+	S+	NS	S+	NS	NS	S+	NS
16-Vitória de Santo Antão	S+	S+	S+	S+	S+	S+	NS	S+	S+

S+ (Tendência positiva com significância estatística)

S- (Tendência negativa com significância estatística)

NS (Tendência não significativa ou sem tendência)

Analisando quantitativamente a Tabela 4.8, fornecida pelo *software Trend*, observou-se que as ocorrências significativas corresponderam a 42% dos resultados. Dessa parcela, 67% representaram mudanças positivas e 33% negativas. Os resultados mostraram então que as análises quantitativas apontaram para uma predominância de aumento das mudanças abruptas.

Na análise da distribuição espacial desses resultados, os mapas contidos na Figura 4.4, permitiram outra vez, uma análise detalhada das configurações descritas pelas séries, cujos saltos pluviométricos foram detectados. Do mesmo modo que ocorreu na análise espacial das tendências, o conjunto de mapas analisados determinaram configurações persistentes nos mesmos setores. Essas ocorrências permitiram mais uma vez importantes revelações sobre o padrão de precipitação da Sub-bacia 39. Observou-se então que as variáveis analisadas foram compatíveis com as tendências detectadas, tanto no espaço como na orientação positiva ou negativa, mostrando que as duas ocorrências podem existir, tanto numa mesma série como em uma mesma região.

Nesse contexto, a detecção de saltos positivos ao norte deu destaque para os municípios de Alhandra, Recife, Vitória de Santo Antão, Caruaru e Umbuzeiro, e a cidade de Maceió ao sul. Concordando com o comportamento verificado nas tendências, os municípios de Atalaia e Palmeira dos Índios, localizados nas bacias que limitam o semiárido alagoano, e Bom Jardim, no Médio Capibaribe, pertencente ao semiárido pernambucano, delimitaram setores com mudanças negativas.

Os municípios situados ao norte, com exceção de Surubim, descreveram um reduto marcado por mudanças positivas detectadas na PDMA, mostrando que o aumento das chuvas intensas não está somente comprovado com o crescimento das tendências, mais também com os saltos registrados em suas séries temporais.

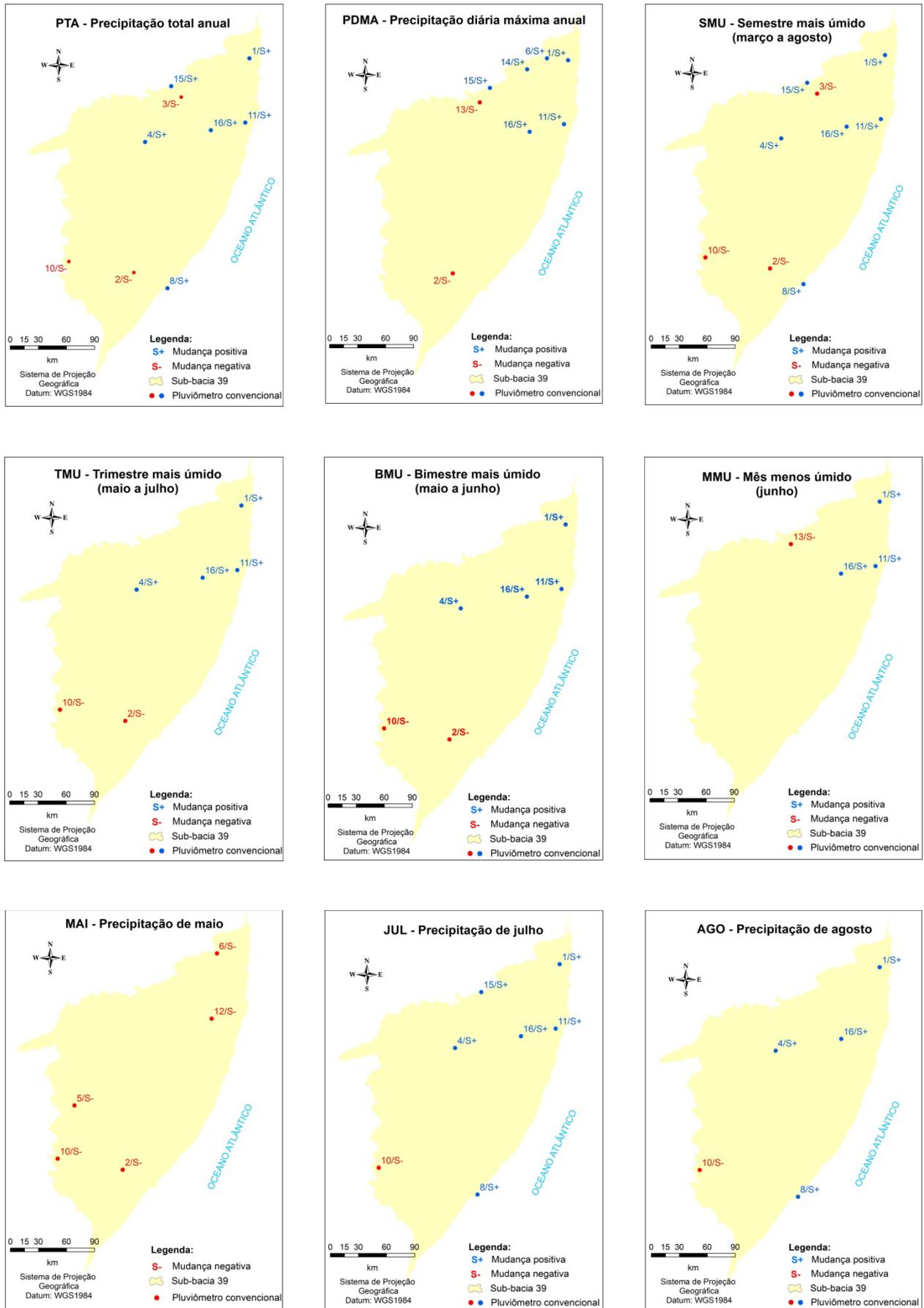


Figura 4.4 – Análise espacial das mudanças significativas com teste estatístico

Na configuração espacial de MAI, somente a Zona da Mata e o Agreste mostraram mudanças estatisticamente significativas, sendo essas negativas. Nesse mês, inicia-se o trimestre mais úmido no Litoral e Zona da Mata, e finaliza-se a temporada da ZCIT no Agreste em anos normais.

A respeito da não estacionariedade nas séries temporais foi visto que as tendências ocorrem de forma constante, enquanto as mudanças abruptas de forma radical, podendo afetar a média, a mediana, e outros aspectos estatísticos dos dados (Robson *et al.*, 2000). Para Radziejewski *et al.* (2000) existem testes que são mais utilizados para verificação da evolução (tendência) e do salto na média e mediana (mudança abrupta). As análises de mudanças abruptas mostraram que nas séries temporais, além das tendências, as mudanças também podem existir simultaneamente, e que alguns testes podem determinar os momentos (anos) em que os saltos ocorreram.

No caso dos testes *Rank Sum* e *t de Student* foram atribuídos o ano de 1978 como os pontos médios, separadores dos limites entre conjuntos de diferentes estatísticas. No teste Não Paramétrico *Cusum*, esse não considera limites para divisão. Todavia, os testes *Cumulative Deviation* e *Worsley Likelihood* estimaram os momentos dos saltos detectados nas séries analisadas. A Tabela 4.9 indica os anos aproximados em que houve uma mudança no comportamento das séries de PTA segundo esses testes, associados aos níveis de significância correspondentes, sendo os saltos crescentes entre os anos de 1959 a 1973, e decrescentes, de 1969 a 1994.

Tabela 4.9 – Saltos nas mudanças detectadas na série de Precipitação total anual - PTA

Estação	Salto	Testes Estatísticos ( $\alpha$ )	
		<i>Cumulative Deviation</i>	<i>Worsley Likelihood</i>
1 - Alhandra	Crescente	1973 ( $\alpha=0,05$ )	1973 ( $\alpha=0,01$ )
2 - Atalaia	Decrescente	1973 ( $\alpha=0,01$ )	1989 ( $\alpha=0,01$ )
3 - Bom Jardim	Decrescente	1986 ( $\alpha=0,05$ )	1994 ( $\alpha=0,10$ )
4 - Caruaru	Crescente	1959 ( $\alpha=0,01$ )	1959 ( $\alpha=0,01$ )
8 - Maceió	Crescente	1971 ( $\alpha=0,01$ )	1971 ( $\alpha=0,01$ )
10 - Palmeira dos Índios	Decrescente	1969 ( $\alpha=0,05$ )	1969 ( $\alpha=0,01$ )
11 - Recife	Crescente	1963 ( $\alpha=0,01$ )	1960 ( $\alpha=0,01$ )
15 - Umbuzeiro	Crescente	1972 ( $\alpha=0,05$ )	1971 ( $\alpha=0,10$ )
16 - Vitória de Santo Antão	Crescente	1960 ( $\alpha=0,01$ )	1960 ( $\alpha=0,01$ )

Os saltos crescentes foram detectados nas regiões climaticamente mais úmidas, como o Litoral, Zona da Mata e partes do Agreste. Os saltos decrescentes, nas regiões mais secas, como as partes do Agreste influenciadas pelo Sertão. Por ser o Agreste uma região climatologicamente intermediária, entre a Mata e o Sertão, dependendo dos sistemas meteorológicos que estejam atuando, ou a ausência deles, a influência pode advir de ambos. Nesse ínterim, destacaram-se os municípios de Bom Jardim e Surubim influenciados pelo Sertão pernambucano, e Atalaia e Palmeira dos Índios sob a influência do Sertão alagoano.

### 4.2.3 Considerações finais sobre as análises de tendência e mudança abrupta

De um modo geral, a pesquisa mostrou que na maior parte da Sub-bacia 39, houve crescimento da tendência da precipitação acompanhada de mudança abrupta positiva. Essa constatação foi revelada para as regiões climaticamente úmidas e subúmida. Entretanto, apontou também para uma redução da precipitação, associada à mudança abrupta negativa, as regiões climaticamente semiáridas, onde já existem registros de estiagens prolongadas, como mostrado na Figura 4.3. As análises dirigidas às chuvas intensas mostraram que na parte norte e Litoral da Sub-bacia 39, existem aumento dessa tendência e mudança positiva nas séries de precipitação diária, exceto as áreas pertencentes ao clima semiárido.

O IPCC, em seu 4º Relatório de avaliação de mudanças no clima de 2007, percebeu aumento na frequência de eventos fortes de precipitação sobre a maior parte das áreas terrestres, com maior significância para a parte leste da América do Norte e do Sul, norte da Europa e norte e centro da Ásia. Entretanto, secas mais intensas e longas foram observadas sobre áreas mais amplas desde 1970, especialmente nos trópicos e subtropicais do Planeta (IPCC, 2007).

O IPCC, em seu 5º Relatório de avaliação de mudanças no clima de 2013 previu que as alterações no ciclo global da água em resposta ao aquecimento no Século XXI não serão uniformes. O contraste na precipitação entre regiões úmidas e secas e entre estações úmidas e secas aumentará, embora possa haver exceções regionais. Em muitas regiões secas de média latitude e subtropicais, a precipitação média provavelmente irá diminuir, enquanto em muitas regiões úmidas de média latitude a precipitação provavelmente aumentará no final deste século. Eventos de precipitação extrema sobre a maior parte das massas de terra das médias latitudes e sobre regiões tropicais úmidas muito provavelmente se tornarão mais intensos e mais frequentes no final deste século, à medida que a temperatura média global de superfície aumentar (Juras, 2013).

As experiências em escala global realizadas por Alexander *et al.* (2006) apontaram condições mais úmidas para o Planeta. Hayloc *et al.* (2006) identificaram para América do Sul condições mais úmidas no Equador e norte do Peru e na região do sul do Brasil, Paraguai, Uruguai e norte e centro da Argentina. A redução foi observada no sul do Peru e sul do Chile. No Brasil os autores observaram condições úmidas para o Sudeste e secas para o NEB.

Em escala regional, Pinheiro *et al.* (2013) detectaram aumento da precipitação no sul do Brasil. Santos *et al.* (2012b) revelaram aumento de precipitações no NEB e parte da Bacia Amazônica, como também redução nas áreas de desflorestamento do Mato Grosso e sul do Pará. Em Manaus, Santos *et al.* (2012c) identificaram aumento dos eventos de precipitação. Santos e Brito (2007) perceberam aumento de umidade sobre os estados da Paraíba e Rio Grande do Norte. No estado do Ceará, Santos *et al.* (2009) observaram um visível aumento nas condições de umidade

no estado e Santos e Manzi (2011) mostraram aumento nas intensidades das secas com diminuição de eventos fortes de precipitação.

Nos estados da Bahia e Sergipe os índices tenderam para aumento da precipitação (Araújo e Brito, 2011). Em São Paulo, Santos *et al.* (2012d) identificaram pequeno aumento dos eventos de precipitação sem significância estatística na cidade de Rio Claro. No estado de Pernambuco, Farias e Nóbrega (2010) apontaram aumento da precipitação em quase todo o Estado. Nas bacias do rio Brígida e Pajeú, estudadas por Assis *et al.* (2012) no Sertão, e do Capibaribe, por Assis e Sobral (2012), foram detectadas diminuição da precipitação. Em Vitória de Santo Antão, Santos *et al.* (2012a) detectaram crescimento da precipitação, inclusive de eventos extremamente chuvosos. Em Recife, Souza e Azevedo (2012) detectaram aumento das chuvas intensas.

Alexandre *et al.* (2010) estudaram as tendências, mudanças abruptas e independências nas séries de algumas variáveis pluviométrica da RMBH, utilizando os testes estatísticos disponíveis no *software Trend*. Os autores obtiveram um número bem maior de detecções de saltos nas séries temporais em relação às detecções de tendências, como entre outros resultados positivos e negativos, destacaram-se os totais do trimestre de julho a setembro e do semestre de abril a setembro.

### 4.3 INFLUÊNCIAS DA TSM EM EVENTOS EXTREMOS MÁXIMOS

#### 4.3.1 Os coeficientes de correlação linear de Pearson

A Tabela 4.10 mostra os coeficientes de correlação linear resultantes dos ajustes entre os Índices regionais de tendências positivas, medidos na Sub-bacia 39 (média aritmética das séries dos índices com tendências pluviométricas positivas), e as séries de TSM e anomalias medidas nos oceanos Pacífico e Atlântico. Após efetuarem-se os testes de hipóteses, algumas correlações foram validadas e deram origem a importantes informações.

Tabela 4.10 – Correlação linear de Pearson para índices com tendência positiva da precipitação

Índices calculados na Sub-bacia 39	El Niño/Oscilação Sul – Oceano Pacífico Equatorial						Dipolo do oceano Atlântico	
	Niño 1+2	Niño 3	Niño 3.4	Niño 4	ION	IOS	TNAI	TSAI
<u>PRCPTOT</u>	-0,167	-0,111	-0,087	-0,026	-0,169	+0,119	<b>-0,227</b> ***	<b>+0,213</b> ***
<u>RMedmm</u>	-0,182	-0,139	-0,093	+0,012	-0,166	<b>+0,211</b> ***	+0,027	<b>+0,280</b> **
<u>Rx1day</u>	-0,125	-0,024	+0,040	+0,161	-0,054	+0,081	+0,113	<b>+0,219</b> ***
<u>Rx5day</u>	-0,128	-0,052	+0,001	+0,076	-0,060	+0,124	+0,174	+0,134
<u>SDII</u>	-0,021	+0,026	+0,045	+0,093	-0,034	-0,049	<b>-0,219</b> ***	<b>+0,262</b> **
<u>R10mm</u>	-0,169	-0,136	-0,143	-0,090	-0,184	+0,203	-0,188	<b>+0,334</b> *
<u>R50mm</u>	-0,168	-0,156	-0,130	-0,066	<b>-0,212</b> ***	<b>+0,214</b> ***	<b>-0,267</b> ***	<b>+0,265</b> **
<u>R99P</u>	<b>-0,225</b> ***	-0,191	-0,133	-0,031	-0,208	+0,192	-0,012	<b>+0,285</b> **
<u>CWD</u>	+0,090	+0,156	+0,138	+0,244	+0,003	+0,025	+0,200	<b>+0,442</b> *

\*Nível de significância 1%

\*\*Nível de significância 5%

\*\*\*Nível de significância 10%

Na Tabela 4.10, os coeficientes de correlação linear significativos evidenciaram que as precipitações com tendências positivas, detectadas na Sub-bacia 39, são mais influenciadas pelas variações da TSM no oceano Atlântico do que as mesmas variações ocorridas no oceano Pacífico. Essas correlações significativas somaram 21% do total das séries correlacionadas. Durante a avaliação, foram analisadas todas as regiões de *Niño* e do dipolo do Atlântico. Os testes de aderência às correlações obtidas encontram-se detalhados no ANEXO F.

#### 4.3.2 Análise da influência de *El Niño/Oscilação Sul* - ENOS

Com pouca correlação significativa no oceano Pacífico, a influência da TSM somente foi detectada nas seguintes regiões: a) Na parte leste, próximo à costa do Peru, com observância de correlação negativa em *Niño* 1+2, para as precipitações anuais com percentis acima de 99%; b) Na região central *Niño* 3.4, com correlação negativa em ION, para precipitações anuais acima de 50

mm e; c) Na parte oeste, nas proximidades do continente australiano, onde as correlações em IOS foram positivas, nas precipitações acima do número de dias com medianas de PDMA e nas precipitações anuais acima de 50 mm por ano. É oportuno observar que essas revelações caracterizam as chuvas intensas precipitadas nas áreas úmidas da Sub-bacia 39, cujas tendências mostraram-se crescentes. Nesse caso, os coeficientes de correlação apontaram para uma condição mais favorável ao fenômeno *La Niña*, sobre as áreas da Zona da Mata e Litoral, contidas na região em estudo.

Considerando a posição geográfica da Sub-bacia 39 em relação ao NEB, situada na parte leste, era de se esperar a ausência da influência de *El Niño* nessa área estudada, considerando que esse fenômeno é responsável pela inibição de chuvas e estímulos às estiagens na parte norte do NEB (Santos e Manzi, 2011). Da mesma forma, Mendonça e Danni-Oliveira (2007) afirmaram que são esperadas durante o *El Niño*, secas de diversas intensidades durante a estação chuvosa (fevereiro a maio) na faixa centro-norte do NEB. Essa pouca influência de *El Niño*, evidenciada nas precipitações extremas máximas da parte leste (Sub-bacia 39) e comprovada pelos coeficientes de correlação calculados, não exime que o fenômeno atue nas áreas semiáridas, onde as tendências apresentaram reduções pluviométricas, como é o caso das bacias do Capibaribe e São Francisco.

Entende-se com isso, que os eventos extremos máximos na Sub-bacia 39 podem ter relação direta com o esfriamento das águas do Pacífico central/leste equatorial. Na mesma condição, essa relação também pode ser extensiva às águas aquecidas no oeste do Pacífico, em mares da Austrália. Conforme Ferreira e Mello (2005), tais considerações coincidem com o ramo ascendente (favorecimento à formação de nuvens) no Pacífico oeste, próximo ao continente australiano, e o ramo descendente (inibidor de formação de nuvens), próximo ao continente Sul americano, mantendo dessa forma a célula de Walker inalterada, caracterizando uma condição anti-*El Niño*.

#### 4.3.3 Análise da influência do Dipolo do Atlântico tropical

As correlações significativas constatadas no Atlântico tropical polarizaram-se acima e abaixo da linha do Equador, de modo favorável às ocorrências de anos chuvosos ou muito chuvosos na Sub-bacia 39. O dipolo negativo do Atlântico, formado pelo resfriamento das águas do Atlântico norte (TNAI) e o aquecimento das águas do Atlântico sul (TSAI), mostrou ser o principal fenômeno oceânico-atmosférico responsável pelo comportamento dos eventos de precipitação extrema máxima na Sub-bacia 39. Para isso, o índice (TNAI) mostrou-se negativo e significativo quando correlacionado com os índices regionais de tendências positiva da precipitação (PRCPTOT), SDII e (R50mm), enquanto (TSAI), somente não mostrou significância estatística com (Rx5day), sendo todas as correlações positivas.

Segundo Moura *et al.* (2009), a maior correlação entre a precipitação do leste do NEB e a TSM do Atlântico é superior à encontrada entre a precipitação e TSM do Pacífico. Anomalias positivas no Atlântico Tropical sul produzem precipitação sobre o leste do NEB, enquanto anomalias positivas no Pacífico inibem a chuva no Leste do NEB. Para Cavalcanti *et al.* (2009), o gradiente anômalo da TSM entre o Atlântico Tropical Norte e Atlântico Tropical Sul é apontado como a principal influência sobre a anomalia de chuva no NEB, pois atua sobre a posição da ZCIT, que condiciona a estação chuvosa na região. Santos e Brito (2007) e Santos e Manzi (2011) afirmaram que anomalias negativas no oceano Atlântico norte e positivas no oceano Atlântico sul, acarretam o deslocamento da ZCIT para o sul, favorecendo os eventos chuvosos sobre o NEB.

As correlações de todos os índices regionais de tendências positivas com a região do TSAI apresentaram significância estatística positiva, evidenciando águas mais aquecidas no oceano Atlântico Sul e ventos alísios de nordeste intensificados, influenciando no posicionamento da ZCIT mais ao sul, contribuindo com a ocorrência de chuvas na região, aumento de dias consecutivos úmidos e chuvas extremas na Sub-bacia 39.

É importante salientar que o comportamento dos eventos extremos máximos precipitados sobre a Sub-bacia 39, além de ser dependente do deslocamento meridional da ZCIT, também depende do sistema de perturbação ondulatória (ondas de leste), responsável pelas tormentas e desastres naturais na região. De acordo com os registros meteorológicos, grande parte das tempestades precipitadas nessa parte do NEB provém do sistema de Onda de leste, como entre outros exemplos a enchente de junho de 2010 em Pernambuco e Alagoas, que devastou um número significativo de municípios desses estados. A ZCIT, por exemplo, pode atuar de fevereiro a maio em anos chuvosos, quando submetido ao esfriamento do Pacífico e dipolo favorável às chuvas no NEB, enquanto as ondas de leste, com origem no oeste da África, atuam no período de maio a agosto, e podem penetrar até 300 km no continente nordestino (SECTMA – PE, 1998).

Cavalcanti *et al.* (2009) afirmam que as ondas de leste propagam-se desde o oeste da África até o Atlântico tropical no período chuvoso, e algumas dessas ondas atravessam o Atlântico evoluindo em tempestades tropicais e furacões. Ferreira e Mello (2005) acrescentam ainda que provocam chuvas principalmente na Zona da Mata, com evidências de instabilidade meteorológicas formadas por nuvens do tipo cúmulos, que podem evoluir para cúmulo-nimbos e produzir tempos severos e fortes pancadas de chuva, incrementadas pela proximidade da ZCIT, atuando desde o Recôncavo Baiano até o Litoral do Rio Grande do Norte, reduto onde se encontra inserida a Sub-bacia 39.

Além do aumento das tendências pluviométricas, esse comportamento compatibilizou-se também com os aumentos das mudanças da precipitação e frequência de PDMA, detectadas na

maior parte da Sub-bacia 39, provavelmente relacionadas às ocorrências de chuvas intensas, enchentes e inundações, registradas entre 1943 e 2012. Os resultados aqui obtidos estão de acordo com trabalhos de diversos pesquisadores, inclusive com os estudos desenvolvidos no IPCC.

Em regiões localizadas ao norte da Sub-bacia 39, Santos e Brito (2007) encontraram correlações desses índices com significâncias estatísticas nos estados da Paraíba e Rio Grande do Norte, considerando simultaneamente tendências positivas e negativas da precipitação. Entre outros resultados, observaram que os extremos de chuva no NEB podem ser explicados pelas anomalias de TSM, reconhecendo a influência do ENOS sobre o clima e vegetação do semiárido. Além disso, ao analisar o dipolo do Atlântico, evidenciou que a anomalia positiva de TSM ao norte do equador, acarreta um deslocamento da ZCIT para o norte, inibindo os eventos chuvosos e aumentando a estiagem nos dois estados.

Ainda ao norte da Sub-bacia 39, Santos e Manzi (2011) utilizaram a mesma metodologia usada na Paraíba e Rio Grande do Norte por Santos e Brito (2007), e apontaram alguns resultados semelhantes, dessa vez no estado do Ceará. Ao analisar alguns índices os autores observaram que contradições também existiam com as correlações obtidas na Sub-bacia 39, como o aumento das anomalias de TSM no oceano Pacífico e no norte do oceano Atlântico, com estímulo à inibição de eventos chuvosos e aumento das estiagens no norte do Ceará, por conta do deslocamento meridional da ZCIT para o norte.

Em regiões situadas ao sul da Sub-bacia 39, Araújo e Brito (2011), usando metodologia idêntica a utilizada por Santos e Manzi (2011), obtiveram correlações significativas nos estados da Bahia e Sergipe. Dentre outras conclusões, os autores observaram que a TSM dos oceanos Pacíficos e Atlântico influencia a precipitação da região estudada, e que a atuação do ENOS e do Dipolo do Atlântico exercem relativas influências sobre o clima do NEB. De um modo geral, apesar dos autores verificarem a predominância de redução nos dias úmidos consecutivos, houve aumento da precipitação anual. Entende-se com isso, que a região por eles estudada aponta para um crescimento da magnitude das chuvas intensas, como também confirma que a atuação do *El Niño* se intensifica no sentido norte do NEB, conforme Santos e Manzi (2011) e Mendonça e Danni-Oliveira (2007), podendo em alguns anos ser caracterizado por secas severas.

## 4.4 FREQUÊNCIA DA PDMA

### 4.4.1 Análise exploratória e verificação dos atributos

Por se tratar de uma variável aleatória contínua de extremos máximos, era de se esperar que os elementos estatísticos revelassem a existência de anomalias como pontos registrados acima dos limites superiores (*outlier* superiores). Entre as anomalias constatadas, salientou-se a chuva diária de 335,8 mm na série de Recife, comprovada pelo órgão responsável no ANEXO A. Utilizando-se dos diagramas *Box Plot*, as Figuras 4.5a, 4.5b e 4.5c apresentam as variações das estatísticas centrais/dispersivas e dos limites dos intervalos de confiança, calculadas para os Primeiros e Últimos períodos das séries de PDMA. A Tabela 4.11 apresenta um sumário das estatísticas obtidas e análises de *outlier* mostrando destaque para os valores de variância, coeficientes de curtose e assimetria.

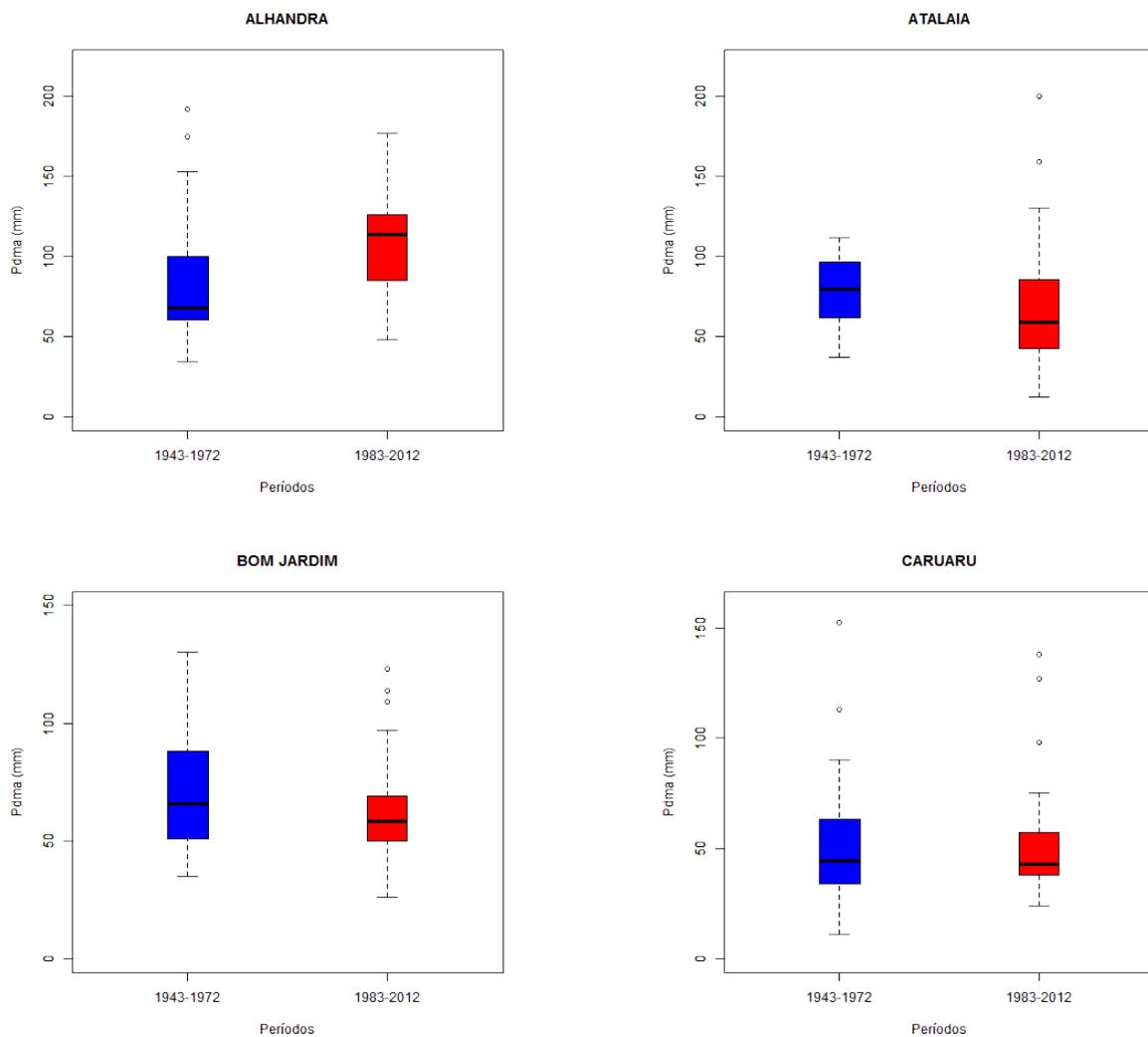


Figura 4.5a – Análise das estatísticas e intervalos de confiança

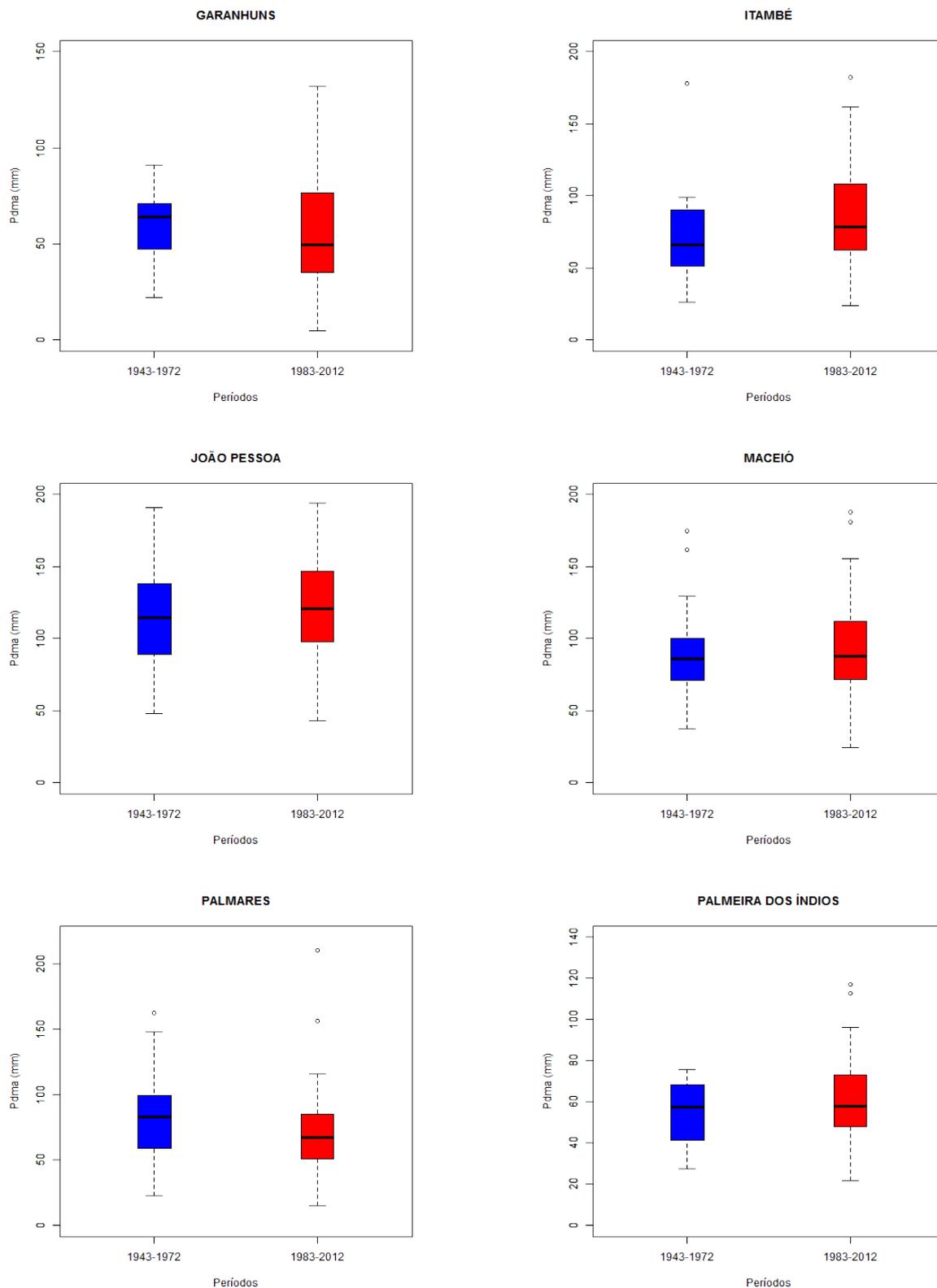


Figura 4.5b – Análise das estatísticas e intervalos de confiança

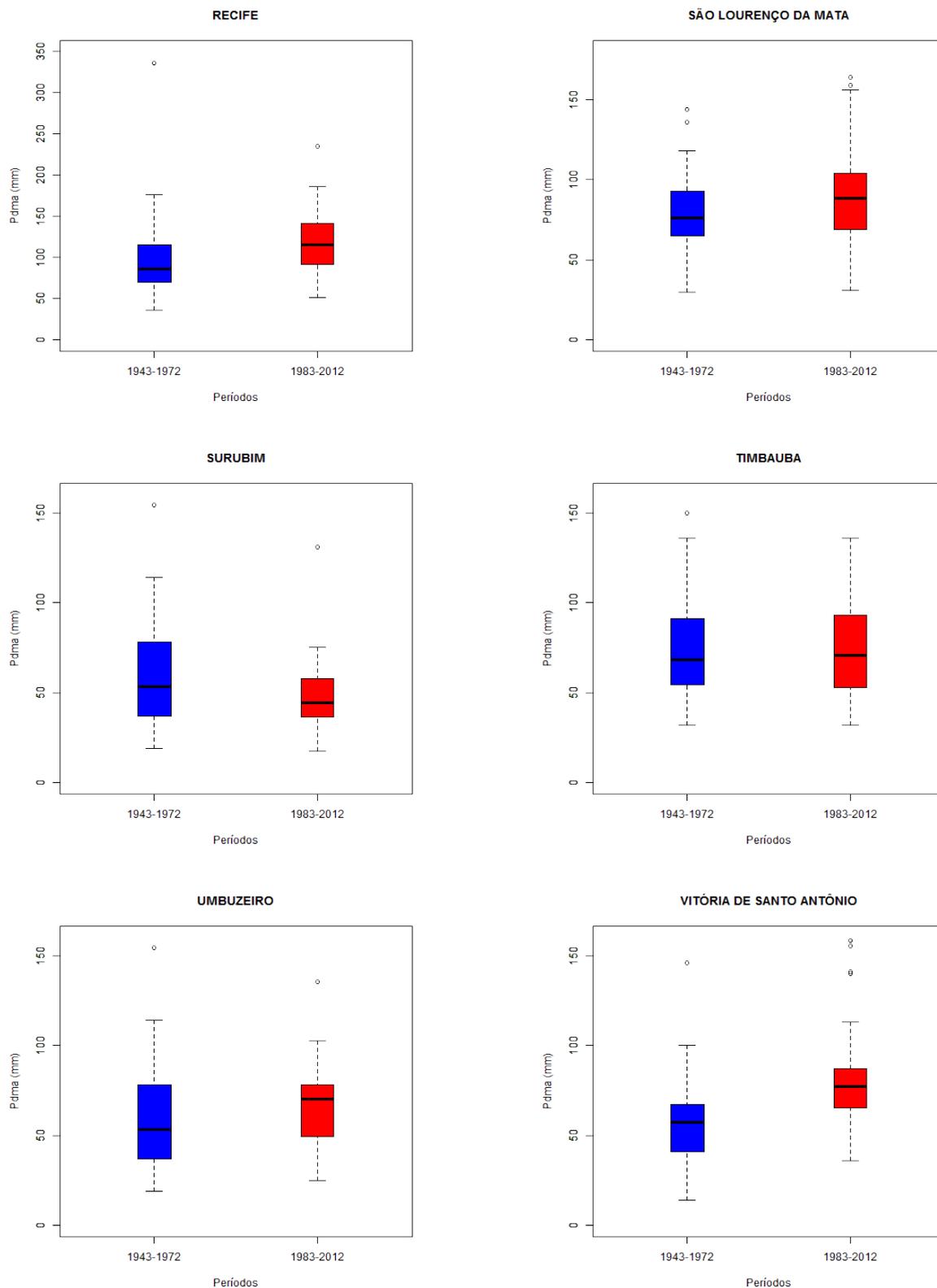


Figura 4.5c – Análise das estatísticas e intervalos de confiança

Tabela 4.11– Estatística descritiva e análise de *outlier* das séries de PDMA

Estatísticas amostrais	Estações pluviométricas (Posição)															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Média (mm)	96,1	71,0	69,1	52,3	56,8	80,8	116,6	94,5	78,3	59,7	109,2	85,6	58,1	73,9	62,0	72,9
Mediana (mm)	89,3	67,0	63,1	43,1	56,6	69,7	116,1	91,5	76,6	58,5	99,0	81,2	48,4	68,1	62,4	66,1
Desvio Padrão (mm)	38,7	31,8	27,8	28,0	23,0	34,6	34,8	34,6	34,4	19,6	45,1	34,3	28,9	26,4	22,9	32,4
Variância (mm <sup>2</sup> )	1497,7	1113,7	773,1	787,6	528,5	1197,2	1211,0	1196,1	1182,1	384,2	2059,0	1176,5	833,5	696,9	523,5	1047,2
Coefficiente de curtose	-0,48	2,68	2,10	2,36	0,34	0,97	-0,39	0,04	2,15	0,83	7,52	-0,49	1,05	0,16	2,71	0,58
Coefficiente de assimetria	0,55	1,12	1,23	1,51	0,41	1,14	0,08	0,62	1,04	0,74	2,10	0,41	1,19	0,79	1,13	0,99
Coefficiente de variação	0,40	0,45	0,40	0,54	0,40	0,43	0,30	0,37	0,44	0,33	0,42	0,40	0,50	0,36	0,37	0,44
Máximo (mm)	191,7	200,0	179,0	152,0	132,0	182,0	194,0	187,8	210,0	117,3	335,8	164,0	154,0	150,0	150,5	158,0
Mínimo (mm)	34,2	12,3	26,0	11,0	4,6	24,0	43,0	24,2	15,0	21,7	36,0	30,0	17,7	32,0	24,0	14,0
Amplitude – A (mm)	157,5	187,7	153,0	141,0	127,4	158,0	151,0	163,6	195,0	95,6	299,8	134,0	136,3	118,0	126,5	144,0
Primeiro Quartil – Q <sub>1</sub> (mm)	65,3	50,4	51,3	35,2	41,0	58,3	94,3	71,9	55,3	47,9	82,0	65,2	37,6	54,8	47,0	52,4
Terceiro Quartil – Q <sub>3</sub> (mm)	122,7	88,97	85,5	61,8	70,7	93,7	139,0	112,4	93,7	70,1	124,9	103,7	72,5	90,8	72,9	85,1
Amplitude – AIQ (mm)	57,4	38,5	34,2	26,5	29,7	35,4	44,7	40,5	38,4	22,2	42,9	38,5	34,9	35,9	25,9	32,7
Limite Superior (mm)	208,9	146,6	136,8	101,6	115,3	146,9	206,0	173,1	151,4	103,4	189,3	161,4	124,9	144,6	118,8	134,2
Limite Inferior (mm)	-20,8	-7,4	0,03	-4,6	-3,6	5,2	27,3	11,2	-2,3	14,6	17,6	7,5	-14,8	0,9	8,1	3,2
<i>Outlier</i> – Superior (mm)	-	200,0	179,0	152,0	132,0	182,0	-	187,8	210,0	117,3	335,8	164,0	154,0	150,0	150,5	158,0
<i>Outlier</i> – Superior (mm)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	155,0
<i>Outlier</i> – Superior (mm)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	146,0
<i>Outlier</i> – Superior (mm)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	141,0
<i>Outlier</i> – Superior (mm)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	140,0
<i>Outlier</i> – Inferior (mm)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

A Tabela 4.12 mostra os resultados dos testes para avaliação dos atributos de independência, homogeneidade e estacionariedade, exigidos pela metodologia para séries de PDMA. Observou-se que a hipótese nula  $h_0$  do teste de independência foi rejeitada nas séries das estações de Alhandra, Atalaia, Surubim e Vitória de Santo Antão. No caso do teste de homogeneidade, a hipótese nula  $h_0$  foi rejeitada nas estações de Alhandra, Atalaia, Recife, Surubim, Umbuzeiro e Vitória de Santo Antão. E para o teste da estacionariedade, a hipótese nula  $h_0$  foi rejeitada nas estações de Alhandra, Itambé, Recife, Timbaúba, Umbuzeiro e Vitória de Santo Antão.

Tabela 4.12 – Teste de aderência à Independência, homogeneidade e estacionariedade nas séries de PDMA ( $Z=1,960$  e  $\alpha=0,05$ )

Posição	Estação/testes	Estatísticas de teste					
		Independência Wald-Wolfowitz		Homogeneidade Mann-Whitney		Estacionariedade Spearman	
1	Alhandra	2,366	Rejeitar $h_0$	-2,813	Rejeitar $h_0$	2,482	Rejeitar $h_0$
2	Atalaia	3,485	Rejeitar $h_0$	-2,120	Rejeitar $h_0$	-1,198	Aceitar $h_0$
3	Bom Jardim	0,052	Aceitar $h_0$	-1,310	Aceitar $h_0$	-1,036	Aceitar $h_0$
4	Caruaru	1,612	Aceitar $h_0$	-0,123	Aceitar $h_0$	1,320	Aceitar $h_0$
5	Garanhuns	0,053	Aceitar $h_0$	-1,650	Aceitar $h_0$	-0,348	Aceitar $h_0$
6	Itambé	0,700	Aceitar $h_0$	-1,862	Aceitar $h_0$	2,781	Rejeitar $h_0$
7	João Pessoa	0,197	Aceitar $h_0$	-0,922	Aceitar $h_0$	0,603	Aceitar $h_0$
8	Maceió	0,056	Aceitar $h_0$	-0,276	Aceitar $h_0$	1,305	Aceitar $h_0$
9	Palmares	1,136	Aceitar $h_0$	-1,063	Aceitar $h_0$	-0,863	Aceitar $h_0$
10	Palmeira dos Índios	0,580	Aceitar $h_0$	-0,182	Aceitar $h_0$	0,976	Aceitar $h_0$
11	Recife	0,868	Aceitar $h_0$	-2,625	Rejeitar $h_0$	3,502	Rejeitar $h_0$
12	São Lourenço da Mata	0,753	Aceitar $h_0$	-0,476	Aceitar $h_0$	1,647	Aceitar $h_0$
13	Surubim	3,146	Rejeitar $h_0$	-2,097	Rejeitar $h_0$	-0,564	Aceitar $h_0$
14	Timbaúba	0,122	Aceitar $h_0$	-0,981	Aceitar $h_0$	2,211	Rejeitar $h_0$
15	Umbuzeiro	1,859	Aceitar $h_0$	-2,202	Rejeitar $h_0$	2,064	Rejeitar $h_0$
16	Vitória de Santo Antão	2,395	Rejeitar $h_0$	-3,236	Rejeitar $h_0$	3,206	Rejeitar $h_0$

Hipótese nula  $h_0$  (os dados são independentes; homogêneos; estacionários)

Após os resultados dos testes para verificação desses atributos foi realizada uma avaliação quantitativa, a qual se constatou que 75% das séries têm dados independentes, 62,5% das séries são homogêneas e 62,5% são séries estacionárias. Esses resultados indicaram que somente oito séries tiveram as hipóteses nulas dos testes de independência, homogeneidade e estacionariedade aceitas. Essas estações são: Bom Jardim, Caruaru, Garanhuns, João Pessoa, Maceió, Palmares, Palmeira dos Índios e São Lourenço da Mata. As séries do período completo dessas estações são amostras aleatórias simples e indicadas para a análise de frequência. Entretanto, como apresentado por Vaz (2008) e Portela *et al.* (2010), mesmo com a rejeição de 1 ou 2 ou 3 testes nas outras estações, o ajuste da distribuição de *Gumbel* a diferentes períodos das séries é um método que possibilita avaliar a influência na frequência da PDMA. Assim sendo, o ajuste da distribuição de *Gumbel* será realizado com todas as 16 séries.

#### 4.4.2 Ajustamento ao modelo teórico de *Gumbel* (máximos)

A Tabela 4.13 mostra o resultado do cálculo da variável reduzida para os tempos de retorno utilizados durante a construção do papel de *Gumbel*. A Tabela 4.14 apresenta os parâmetros  $\alpha$  e  $\beta$  calculados para os Períodos completos, Primeiros períodos e Últimos períodos das dezesseis estações. A Tabela 4.15 apresenta os quantis obtidos pela função inversa da FAP de *Gumbel* em todas as séries analisadas.

Tabela 4.13 – Cálculo da variável reduzida para elaboração do papel de *Gumbel*

Variável reduzida de <i>Gumbel</i>									
Tr	1,01	2	5	10	20	30	50	75	100
$y_T$	-1,5	0,4	1,5	2,3	3,0	3,4	3,9	4,3	4,6

Tabela 4.14 – Parâmetros de *Gumbel* para os períodos e subperíodos das séries de PDMA

Posição	Estação	Período completo (1943-2012)		Primeiro período (1943-1972)		Último período (1983-2012)	
		Posição ( $\alpha$ )	Escala ( $\beta$ )	Posição ( $\alpha$ )	Escala ( $\beta$ )	Posição ( $\alpha$ )	Escala ( $\beta$ )
1	Alhandra	78,7	30,2	32,3	166,0	28,1	94,0
2	Atalaia	56,7	24,8	16,2	70,5	32,1	50,5
3	Bom Jardim	56,6	21,7	18,8	60,3	18,7	51,6
4	Caruaru	39,7	21,8	23,0	37,0	20,9	40,9
5	Garanhuns	46,5	17,9	14,0	51,8	22,0	42,6
6	Itambé	65,2	27,0	21,9	58,8	28,7	71,4
7	João Pessoa	100,9	27,1	28,0	98,7	30,2	101,0
8	Maceió	78,9	27,0	24,5	75,6	29,6	79,8
9	Palmares	62,8	26,8	26,5	67,3	30,0	55,8
10	Palmeira dos Índios	50,9	15,3	11,3	48,9	17,4	50,4
11	Recife	88,9	35,2	42,4	75,0	29,2	102,3
12	São Lourenço da Mata	70,2	26,7	21,3	66,6	28,4	76,6
13	Surubim	45,1	22,5	22,9	46,3	16,8	39,6
14	Timbaúba	62,0	20,6	16,8	58,4	22,5	63,6
15	Umbuzeiro	51,7	17,9	19,1	47,3	18,1	55,3
16	Vitória de Santo Antão	58,3	25,3	20,4	46,5	24,2	69,1

A Tabela 4.16 exibe os resultados dos testes de aderência usados para verificação dos ajustes das distribuições empíricas ao modelo teórico de *Gumbel* (máximos) e seus respectivos níveis de significância, enquanto os gráficos desses ajustes estão apresentados no ANEXO G, para os períodos completos de todas as estações.

Para validação dos ajustes ao modelo de *Gumbel* (máximos) foi assegurada a aceitação da hipótese nula  $h_0$  em pelo menos um dos testes de aderência (*Kolmogorov-Smirnov*, *Anderson-Darving* e *Qui-Quadrado*), sendo a estação de João Pessoa a única que obteve duas rejeições.

Tabela 4.15 – Quantis obtidos pela função inversa da FAP de *Gumbel* (máximos)

Tr.(Anos)	Quantis calculados para as séries PDMA (mm) em cada estação pluviométrica															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1,01	32,5	18,8	23,4	6,3	19,0	24,0	59,4	37,7	21,8	27,5	35,1	29,3	10,6	30,5	24,4	19,7
2	89,7	65,8	64,5	47,7	53,0	75,1	110,9	88,8	72,7	56,5	101,8	80,0	53,4	69,6	58,2	67,6
5	123,9	93,9	89,1	72,4	73,3	105,7	141,6	119,4	103,1	73,8	141,6	110,3	78,9	92,9	78,5	96,2
10	146,6	112,5	105,4	88,8	86,8	125,9	162,0	139,6	123,2	85,3	168,0	130,3	95,8	108,3	91,9	115,2
15	159,4	123,0	114,5	98,1	94,4	137,4	173,5	151,1	134,5	91,7	182,9	141,7	105,3	117,1	99,4	125,9
20	168,3	130,3	121,0	104,5	99,7	145,4	181,5	159,1	142,5	96,3	193,4	149,6	112,0	123,2	104,7	133,4
25	175,2	136,0	125,9	109,5	103,8	151,5	187,7	165,2	148,6	99,8	201,4	155,7	117,2	127,9	108,8	139,1
30	180,8	140,6	129,9	113,6	107,1	156,5	192,8	170,2	153,6	102,6	207,9	160,7	121,4	131,7	112,1	143,8
35	185,5	144,5	133,3	117,0	109,9	160,8	197,0	174,5	157,8	105,0	213,4	164,9	124,9	134,9	114,9	147,8
40	189,6	147,8	136,3	120,0	112,4	164,4	200,7	178,1	161,4	107,1	218,2	168,5	127,9	137,7	117,3	151,2
45	193,2	150,8	138,9	122,6	114,5	167,6	203,9	181,3	164,6	108,9	222,4	171,7	130,6	140,1	119,5	154,2
50	196,4	153,4	141,2	124,9	116,4	170,5	206,8	184,2	167,5	110,5	226,1	174,5	133,0	142,3	121,4	156,9
55	199,3	155,8	143,3	127,0	118,1	173,1	209,4	186,8	170,1	112,0	229,5	177,1	135,2	144,3	123,1	159,3
60	202,0	158,0	145,2	128,9	119,7	175,5	211,8	189,2	172,4	113,3	232,6	179,4	137,2	146,1	124,7	161,5
65	204,4	160,0	146,9	130,7	121,2	177,6	214,0	191,3	174,6	114,6	235,4	181,6	139,0	147,8	126,1	163,6
70	206,7	161,9	148,5	132,3	122,5	179,7	216,0	193,4	176,6	115,7	238,0	183,6	140,7	149,3	127,4	165,5
75	208,8	163,6	150,0	133,8	123,8	181,5	217,9	195,2	178,4	116,8	240,5	185,5	142,2	150,8	128,7	167,2
80	210,7	165,2	151,4	135,2	124,9	183,3	219,7	197,0	180,2	117,8	242,8	187,2	143,7	152,1	129,8	168,9
85	212,6	166,7	152,8	136,6	126,0	184,9	221,3	198,6	181,8	118,7	244,9	188,8	145,1	153,3	130,9	170,4
90	214,3	168,1	154,0	137,8	127,0	186,5	222,9	200,2	183,4	119,6	246,9	190,4	146,4	154,5	131,9	171,9
95	215,9	169,5	155,2	139,0	128,0	187,9	224,4	201,6	184,8	120,4	248,9	191,8	147,6	155,6	132,9	173,2
100	217,5	170,7	156,3	140,1	128,9	189,3	225,8	203,0	186,2	121,2	250,7	193,2	148,8	156,7	133,8	174,5

Tabela 4.16 – Testes de aderência e níveis de significância aos ajustes de *Gumbel* (máximos)

Posição	Estação	Kolmogorov-Smirnov	Anderson-Darving	Qui-Quadrado
1	Alhandra	Aceitar $h_0 - 5\%$	Aceitar $h_0 - 1\%$	Rejeitar $h_0 - 1\%$
2	Atalaia	Aceitar $h_0 - 5\%$	Aceitar $h_0 - 5\%$	Aceitar $h_0 - 5\%$
3	Bom Jardim	Aceitar $h_0 - 5\%$	Aceitar $h_0 - 5\%$	Aceitar $h_0 - 5\%$
4	Caruaru	Aceitar $h_0 - 5\%$	Rejeitar $h_0 - 1\%$	Aceitar $h_0 - 1\%$
5	Garanhuns	Aceitar $h_0 - 5\%$	Aceitar $h_0 - 1\%$	Aceitar $h_0 - 5\%$
6	Itambé	Aceitar $h_0 - 5\%$	Aceitar $h_0 - 5\%$	Aceitar $h_0 - 1\%$
7	João Pessoa	Aceitar $h_0 - 5\%$	Rejeitar $h_0 - 1\%$	Rejeitar $h_0 - 1\%$
8	Maceió	Aceitar $h_0 - 5\%$	Aceitar $h_0 - 5\%$	Aceitar $h_0 - 5\%$
9	Palmares	Aceitar $h_0 - 5\%$	Aceitar $h_0 - 5\%$	Aceitar $h_0 - 5\%$
10	Palmeira dos Índios	Aceitar $h_0 - 5\%$	Aceitar $h_0 - 5\%$	Aceitar $h_0 - 5\%$
11	Recife	Aceitar $h_0 - 5\%$	Aceitar $h_0 - 5\%$	Aceitar $h_0 - 1\%$
12	São Lourenço da Mata	Aceitar $h_0 - 5\%$	Aceitar $h_0 - 1\%$	Aceitar $h_0 - 1\%$
13	Surubim	Aceitar $h_0 - 5\%$	Aceitar $h_0 - 5\%$	Rejeitar $h_0 - 1\%$
14	Timbaúba	Aceitar $h_0 - 5\%$	Aceitar $h_0 - 5\%$	Aceitar $h_0 - 5\%$
15	Umbuzeiro	Aceitar $h_0 - 5\%$	Aceitar $h_0 - 1\%$	Aceitar $h_0 - 5\%$
16	Vitória de Santo Antão	Aceitar $h_0 - 5\%$	Aceitar $h_0 - 5\%$	Rejeitar $h_0 - 1\%$

A Tabela 4.16 mostrou que o teste *Kolmogorov-Smirnov* aceitou a hipótese nula  $h_0$  em todas as séries, enquanto a mesma hipótese foi rejeitada nas estações de Caruaru e João Pessoa pelo teste de *Anderson-Darving*. O teste *Qui-Quadrado* também rejeitou a hipótese nula  $h_0$  nas estações de Alhandra, João Pessoa, Surubim e Vitória de Santo Antão. As Tabelas 4.17 e 4.18 apresentam um resumo da situação dos intervalos de confiança para os Primeiros e os Últimos períodos das séries analisadas.

Os diagramas das Figuras 4.6 a 4.21 serviram às análises de frequência nas séries de PDMA em todas as séries pluviométricas, da seguinte forma: os gráficos (1) proporcionaram uma análise comparativa entre os Períodos completos, Primeiros e Últimos períodos, segundo as frequências acumuladas de não superação nas ordenadas e os quantis calculados nas abscissas; os gráficos (2) forneceram em papel de *Gumbel* outra análise comparativa, desta vez envolvendo os Períodos completos e os Períodos móveis, a partir da relação dos quantis calculados nas ordenadas e os tempos de recorrência nas abscissas; os gráficos (3) analisaram comparativamente, em papéis de *Gumbel*, os Períodos completos em relação aos Primeiros e Últimos períodos, utilizando os quantis adimensionais no eixo das ordenadas e os tempos de recorrência nas abscissas e; os gráficos (4) permitiram uma análise do intervalo de confiança com 95% de probabilidade, delimitados pelos limites superiores e inferiores, os quais foram dimensionados para os Períodos completos, Primeiros e Últimos períodos. Nesse caso, o comportamento das retas obtidas nas relações entre os quantis nas ordenadas e os tempos de recorrência nas abscissas foram investigados.

Tabela 4.17 – Situação dos intervalos com 95% de confiança para as séries dos Primeiros períodos (30 anos)

Item	Estação	Tempo de retorno (Anos)																				
		2	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100
1	Alhandra	↓																				
2	Atalaia	↑																				
3	Bom Jardim																					
4	Caruaru																					
5	Garanhuns																					
6	Itambé	↓	↓	↓	↓	↓																
7	João Pessoa																					
8	Maceió																					
9	Palmares																					
10	Palmeira dos Índios	↓																				
11	Recife	↓																				
12	São Lourenço da Mata																					
13	Surubim																					
14	Timbaúba																					
15	Umbuzeiro																					
16	Vitória de Santo Antão	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓

Tabela 4.18 – Situação dos intervalos com 95% de confiança para as séries dos Últimos períodos (30 anos)

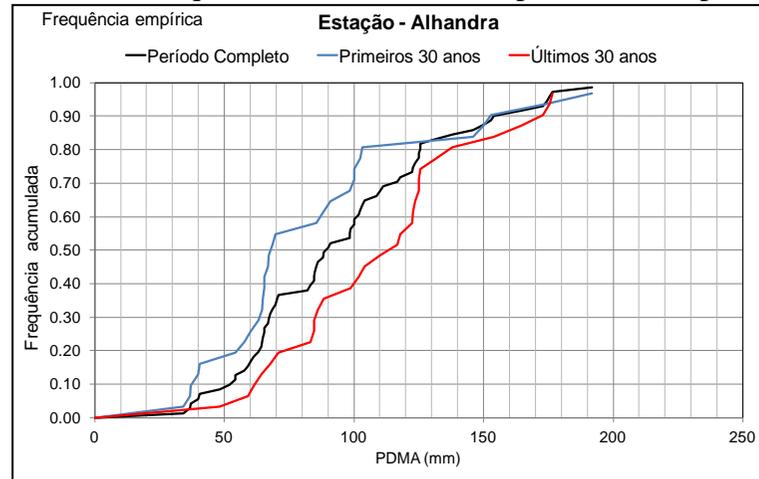
Item	Estação	Tempo de retorno (Anos)																				
		2	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100
1	Alhandra	↑																				
2	Atalaia																					
3	Bom Jardim	↓																				
4	Caruaru																					
5	Garanhuns																					
6	Itambé																					
7	João Pessoa																					
8	Maceió																					
9	Palmares																					
10	Palmeira dos Índios																					
11	Recife	↓																				
12	São Lourenço da Mata																					
13	Surubim	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓
14	Timbaúba																					
15	Umbuzeiro																					
16	Vitória de Santo Antão	↑																				

↑ Acima do limite superior

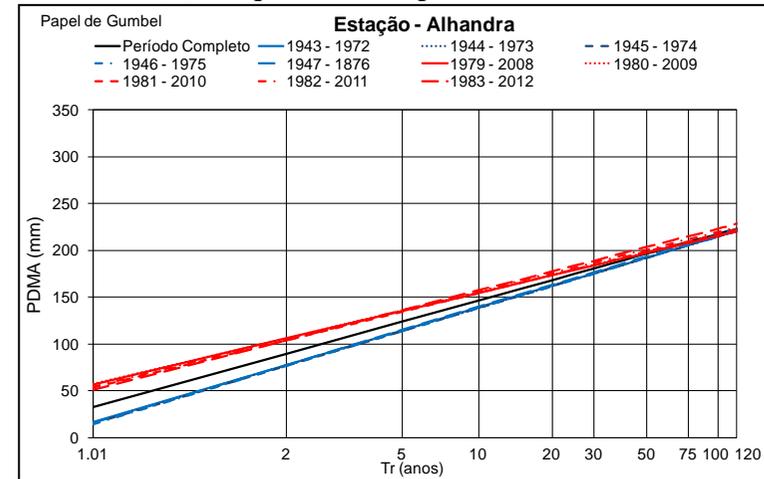
↓ Abaixo do limite inferior

■ Dentro do intervalo de confiança

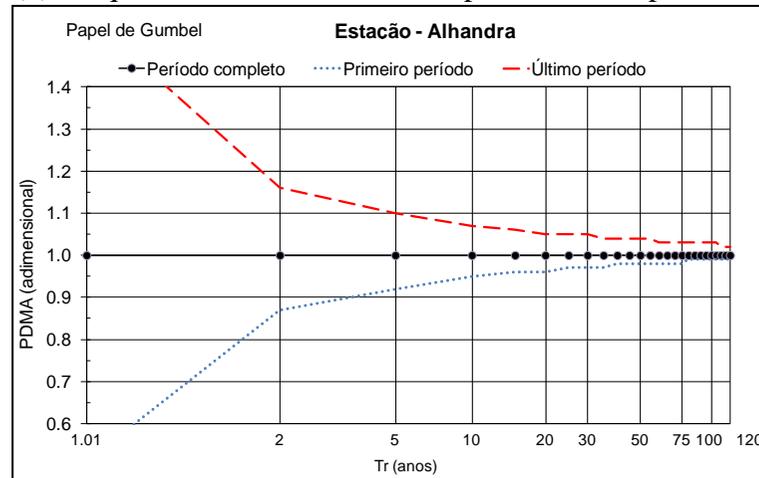
(1) Análise de frequências acumuladas nos períodos e subperíodos.



(2) Frequências dos períodos móveis.



(3) Frequências adimensionais dos períodos e subperíodos.



(4) Limites de confiança com 95% de probabilidade.

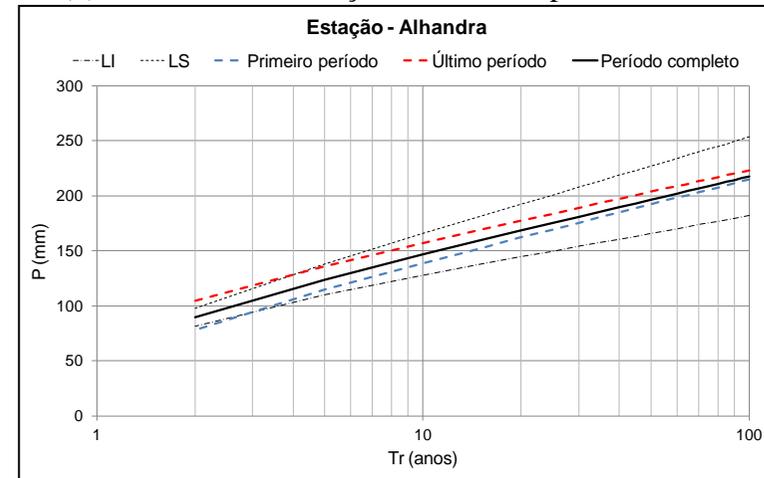
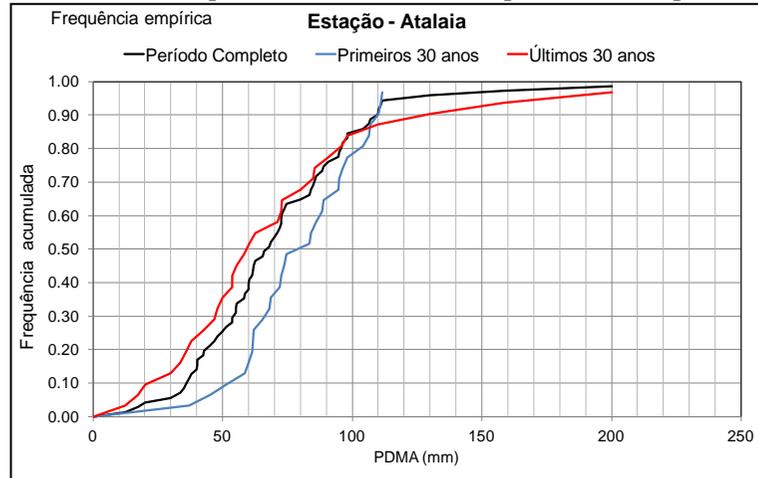
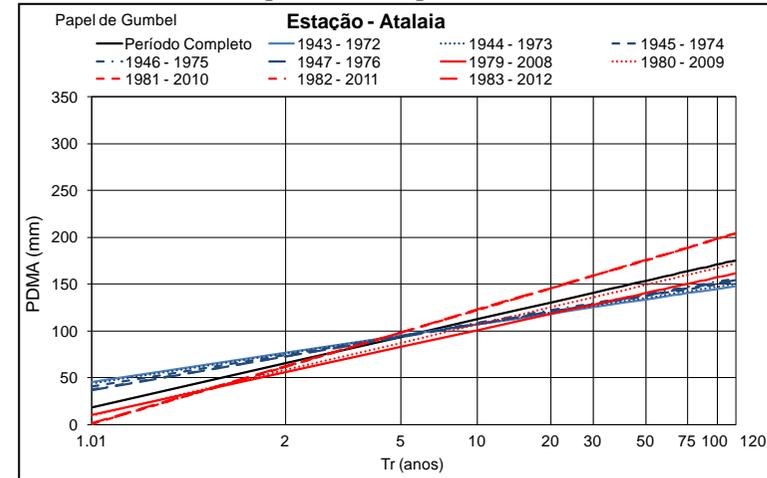


Figura 4.6 – Análise de frequência de PDMA em Alhandra

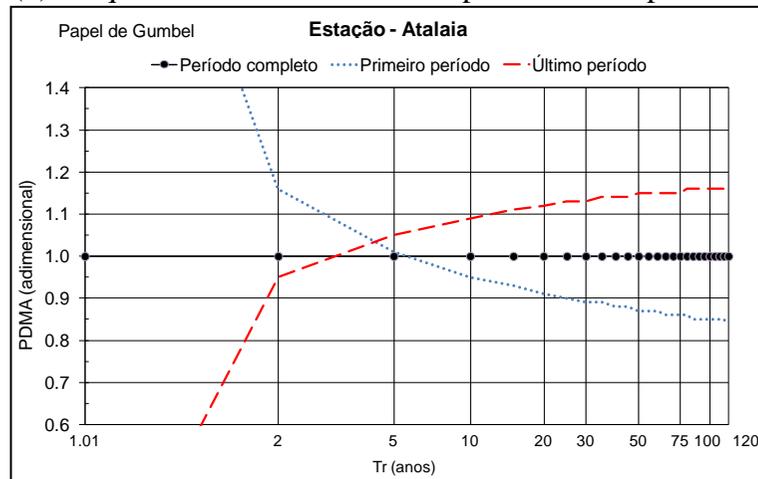
(1) Análise de frequências acumuladas nos períodos e subperíodos.



(2) Frequências dos períodos móveis.



(3) Frequências adimensionais dos períodos e subperíodos.



(4) Limites de confiança com 95% de probabilidade.

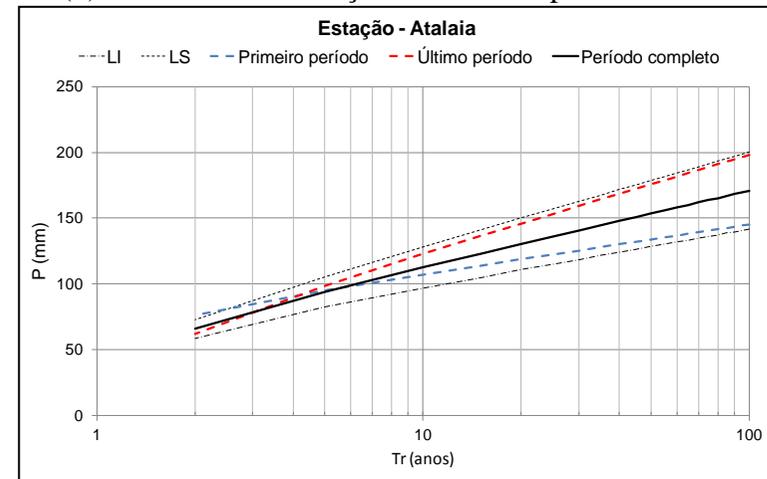
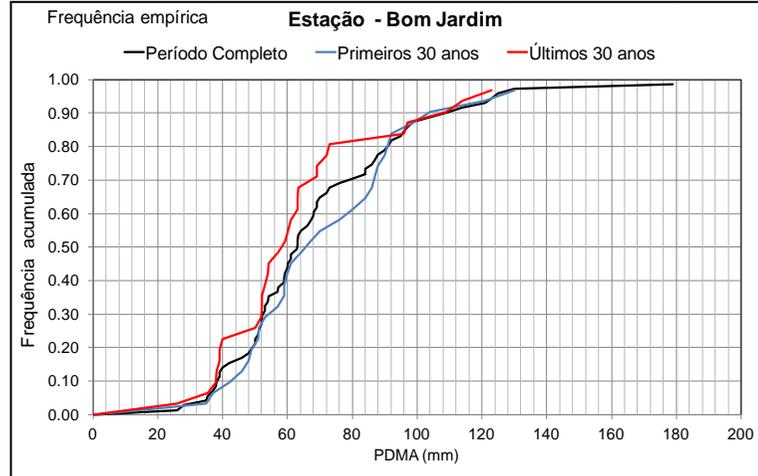
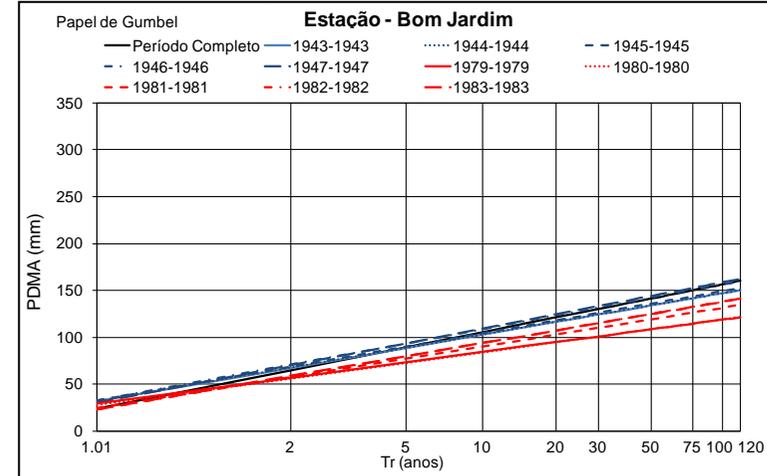


Figura 4.7 – Análise de frequência de PDMA em Atalaia

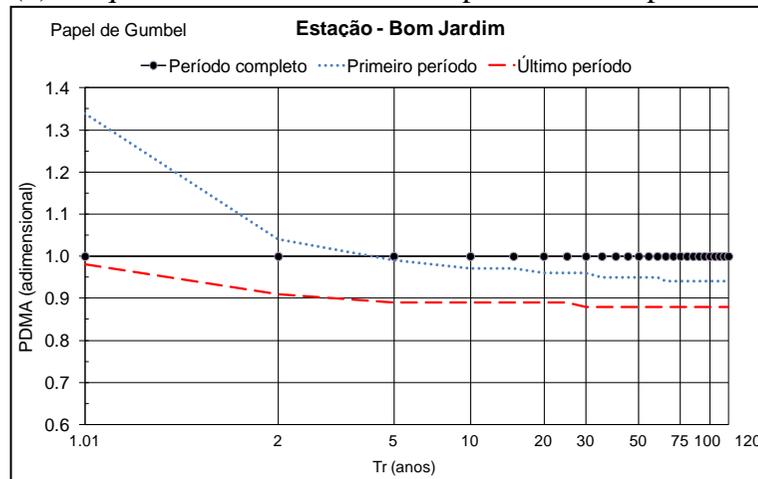
(1) Análise de frequências acumuladas nos períodos e subperíodos.



(2) Frequências dos períodos móveis.



(3) Frequências adimensionais dos períodos e subperíodos.



(4) Limites de confiança com 95% de probabilidade.

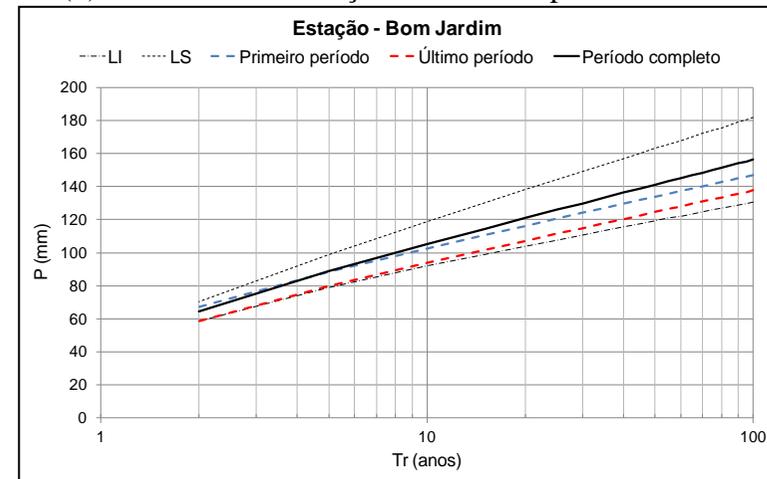
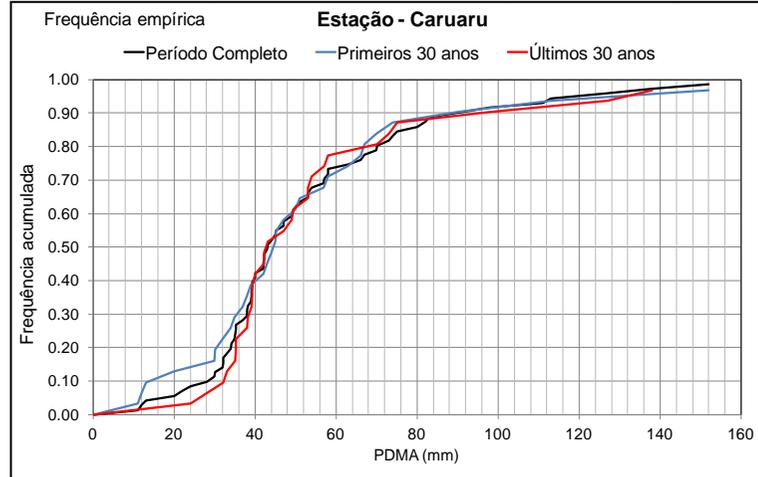
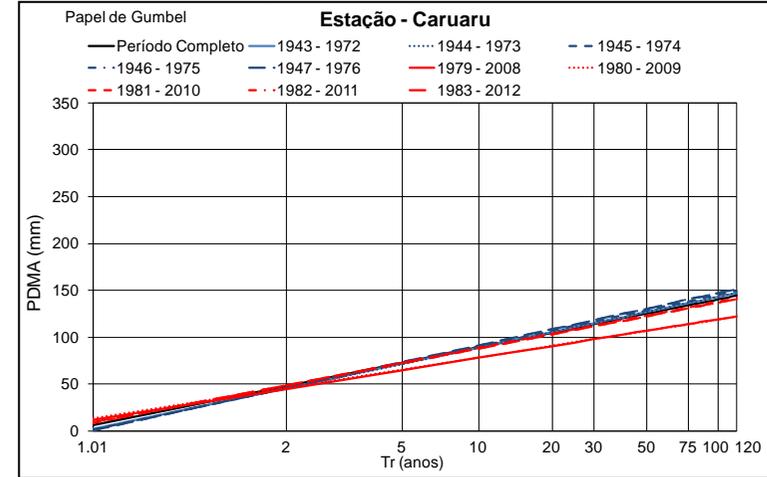


Figura 4.8 – Análise de frequência de PDMA em Bom Jardim

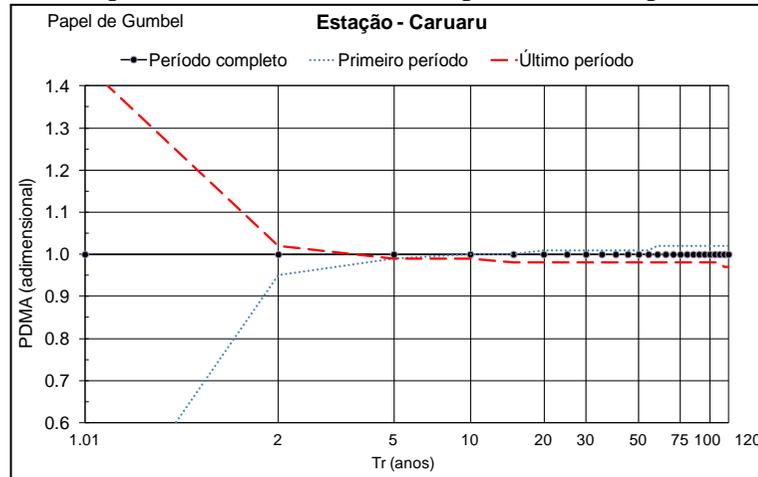
(1) Análise de frequências acumuladas nos períodos e subperíodos.



(2) Frequências dos períodos móveis..



(3) Frequências adimensionais dos períodos e subperíodos.



(4) Limites de confiança com 95% de probabilidade.

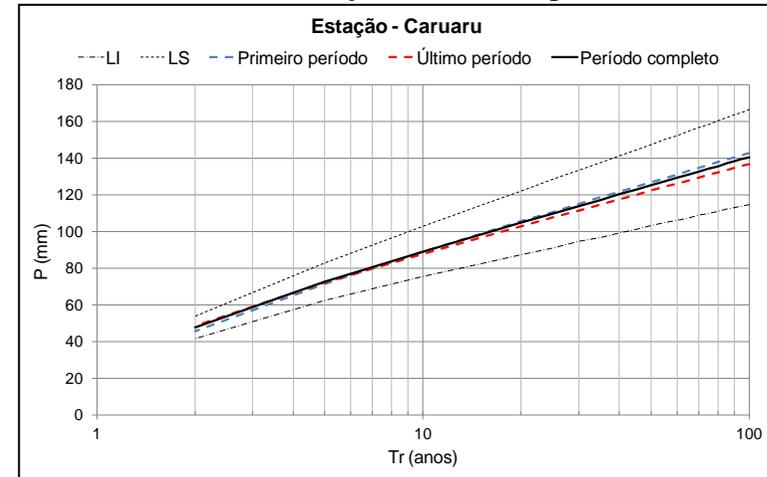
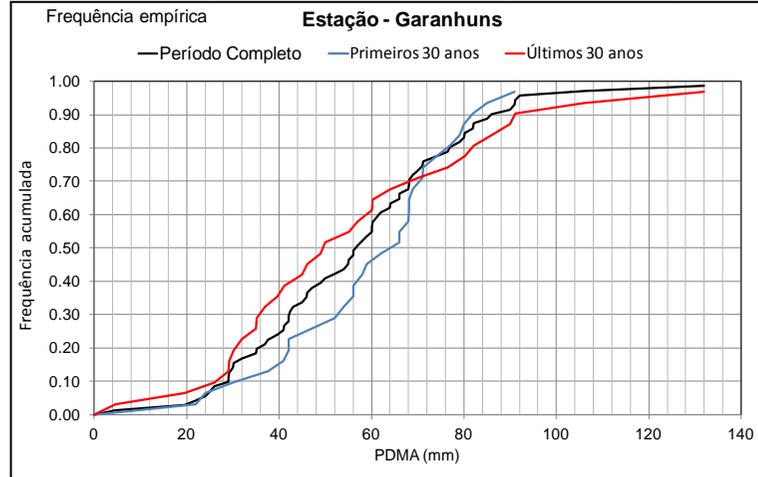
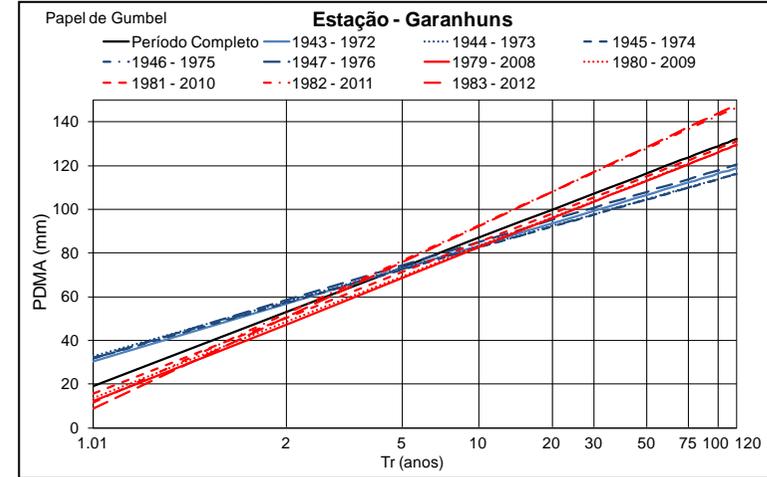


Figura 4.9 – Análise de frequência de PDMA em Caruaru

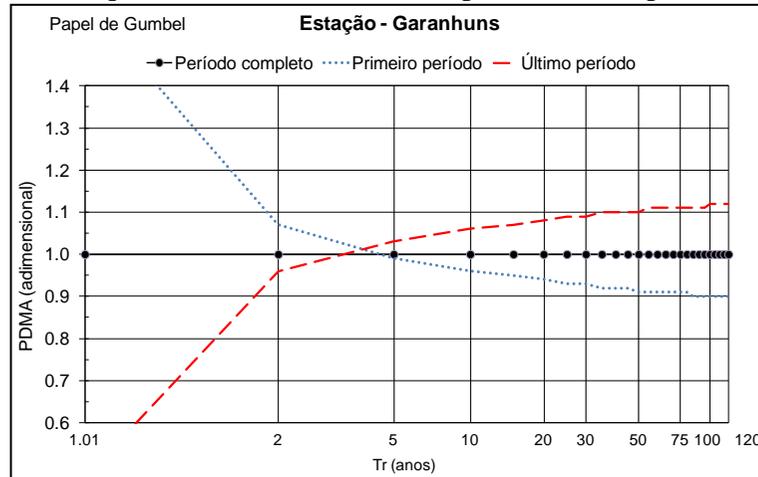
(1) Análise de frequências acumuladas nos períodos e subperíodos.



(2) Frequências dos períodos móveis.



(3) Frequências adimensionais dos períodos e subperíodos.



(4) Limites de confiança com 95% de probabilidade.

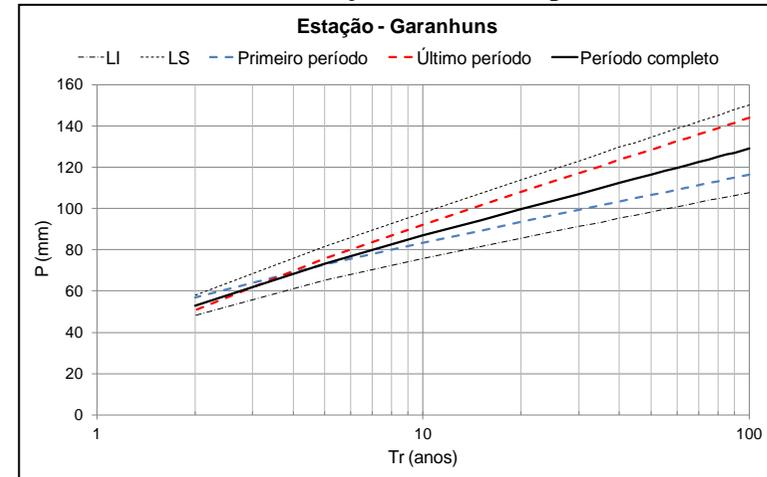
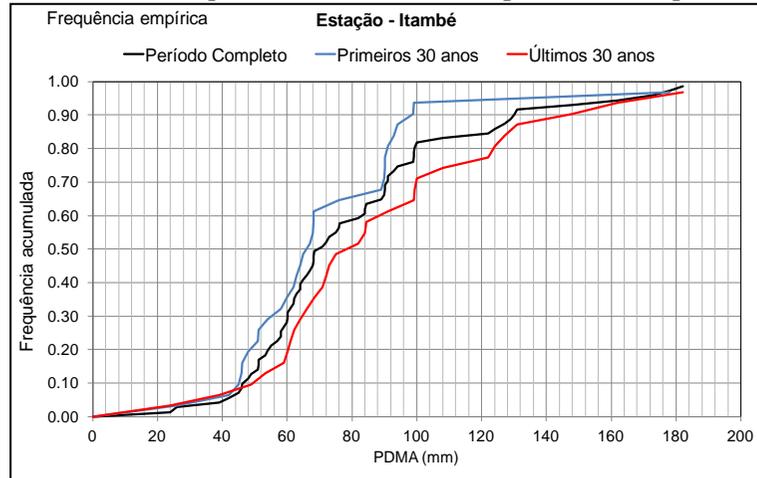
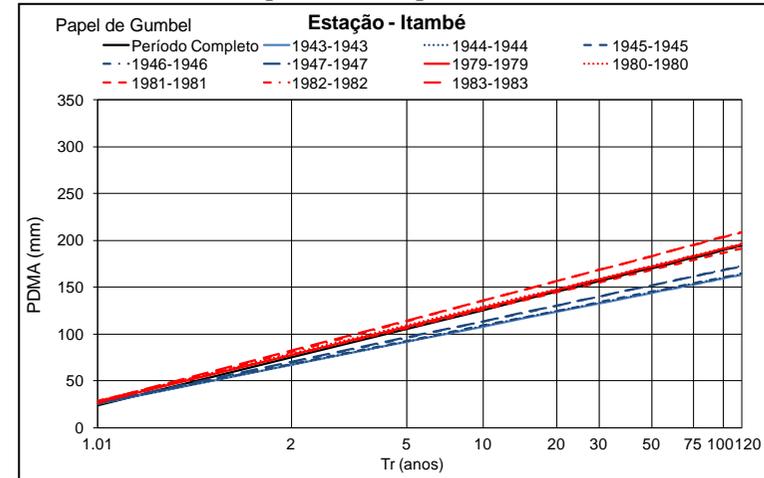


Figura 4.10 – Análise de frequência de PDMA em Garanhuns

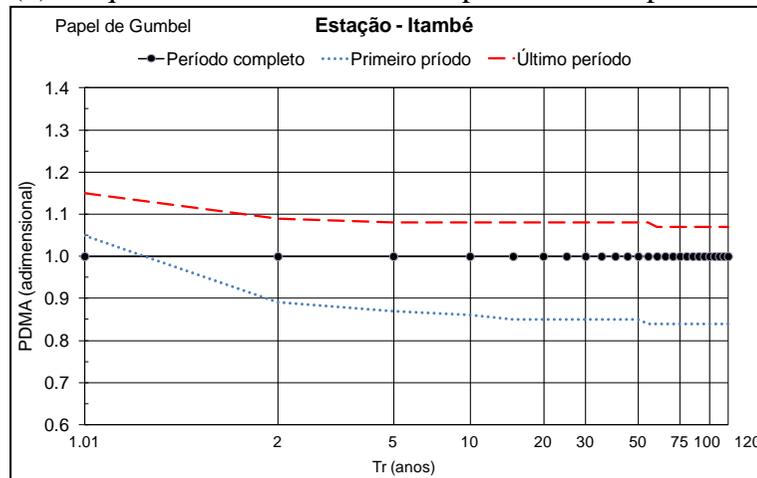
(1) Análise de frequências acumuladas nos períodos e subperíodos.



(2) Frequências dos períodos móveis.



(3) Frequências adimensionais dos períodos e subperíodos.



(4) Limites de confiança com 95% de probabilidade.

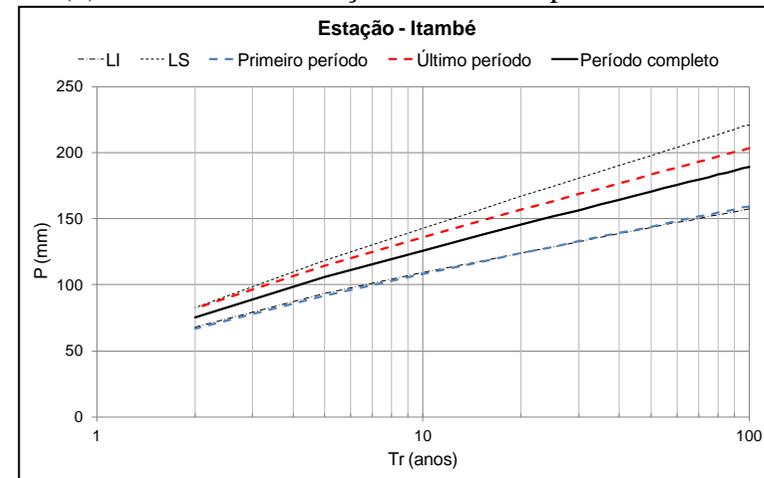
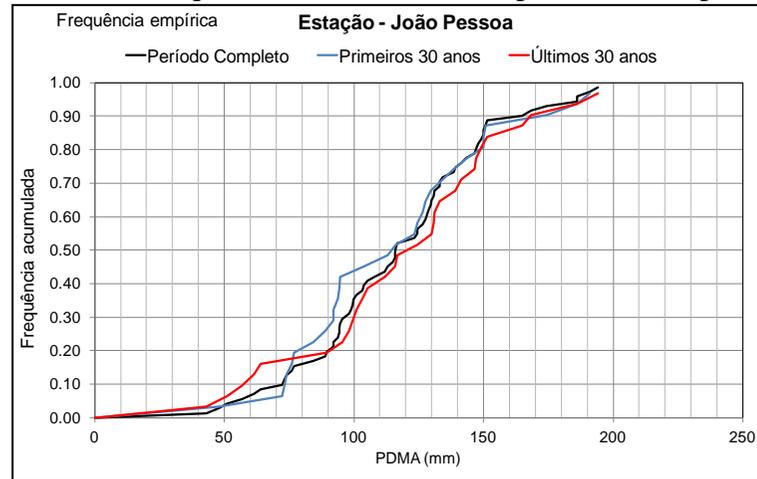
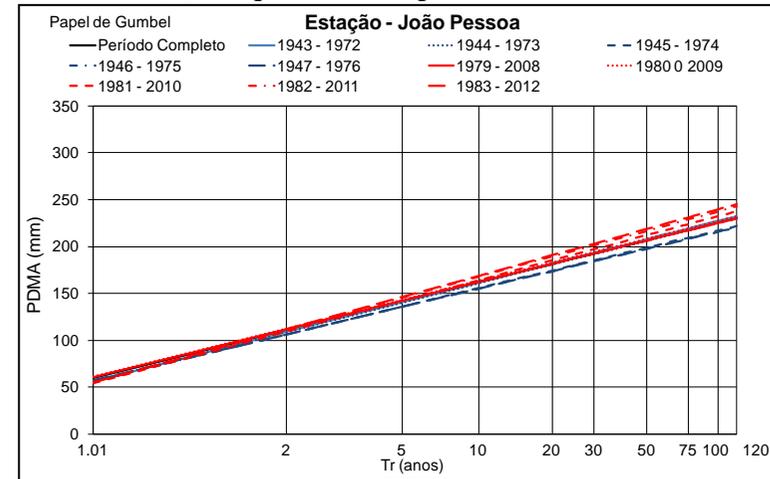


Figura 4.11 – Análise de frequência de PDMA em Itambé

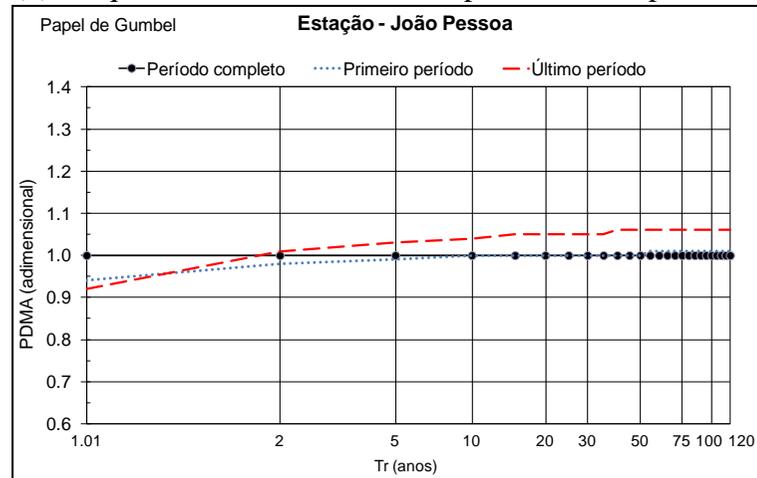
(1) Análise de frequências acumuladas nos períodos e subperíodos.



(2) Frequências dos períodos móveis.



(3) Frequências adimensionais dos períodos e subperíodos.

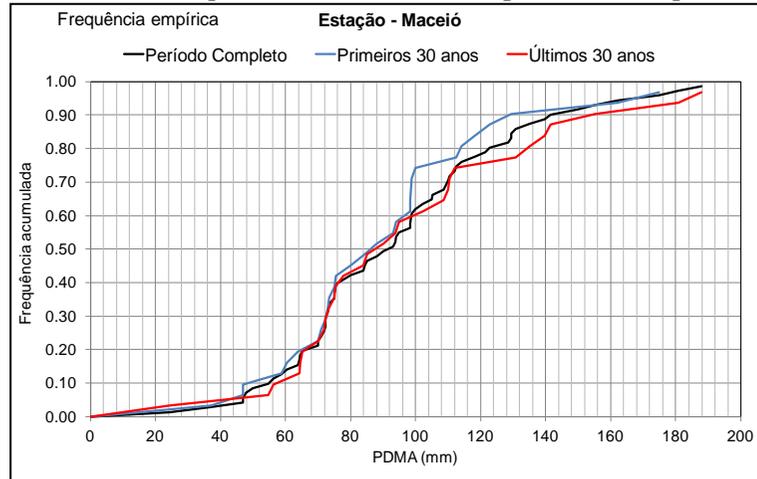


(4) Limites de confiança com 95% de probabilidade.

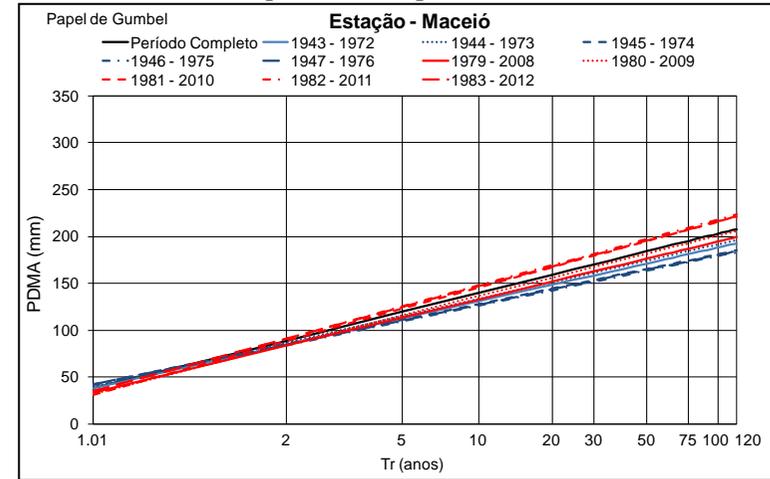


Figura 4.12 – Análise de frequência de PDMA em João Pessoa

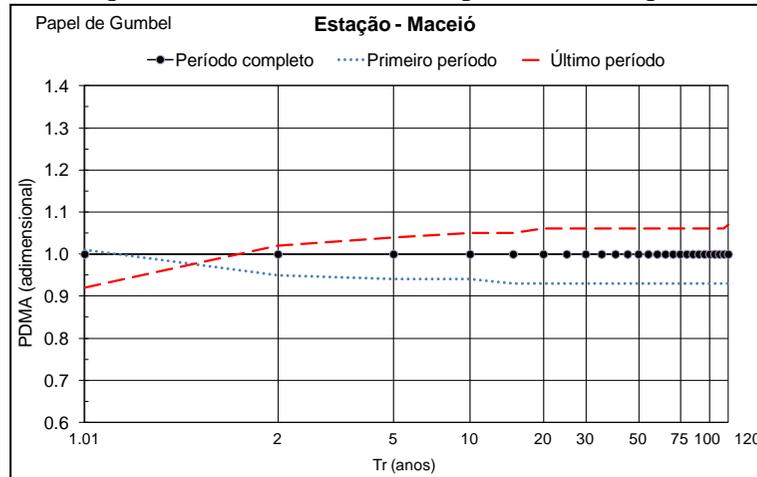
(1) Análise de frequências acumuladas nos períodos e subperíodos.



(2) Frequências dos períodos móveis.



(3) Frequências adimensionais dos períodos e subperíodos.



(4) Limites de confiança com 95% de probabilidade.

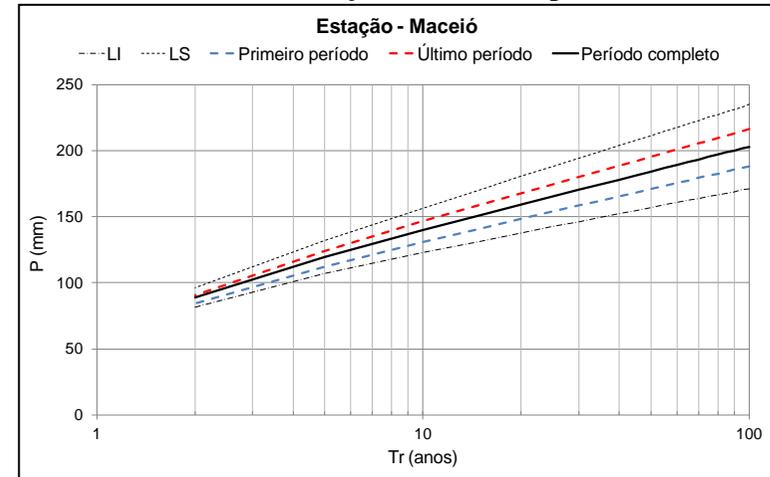
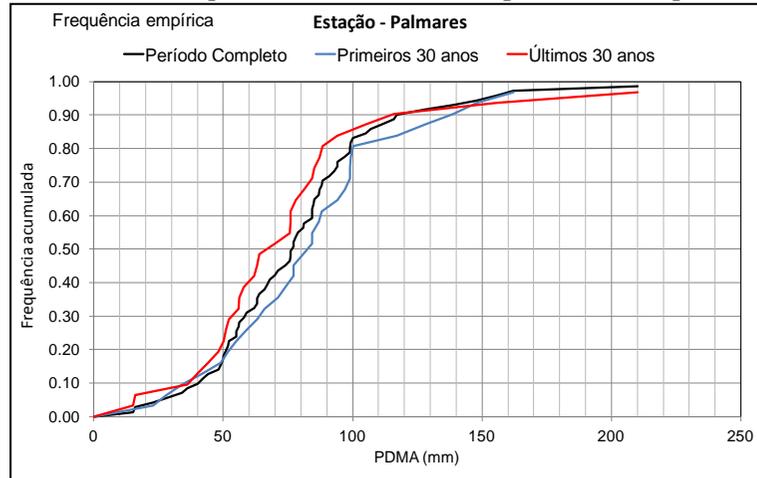
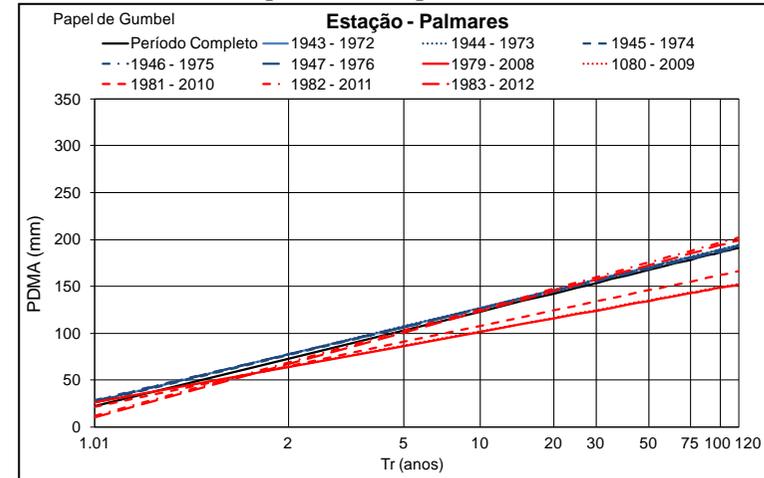


Figura 4.13 – Análise de frequência de PDMA em Maceió

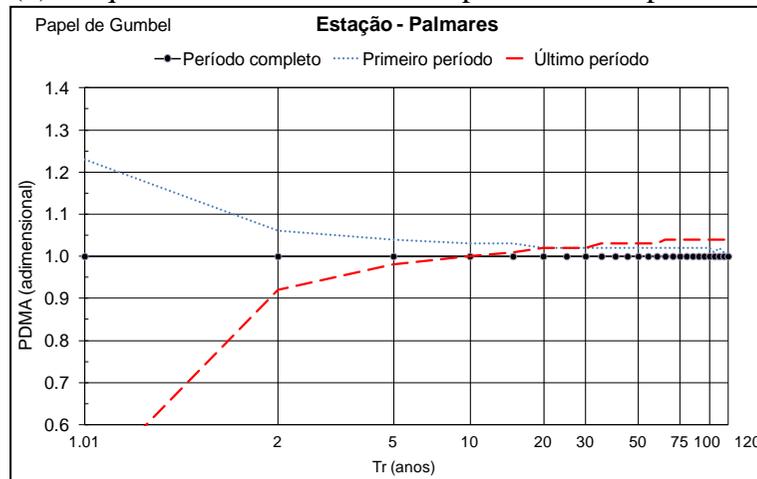
(1) Análise de frequências acumuladas nos períodos e subperíodos.



(2) Frequências dos períodos móveis.



(3) Frequências adimensionais dos períodos e subperíodos.



(4) Limites de confiança com 95% de probabilidade.

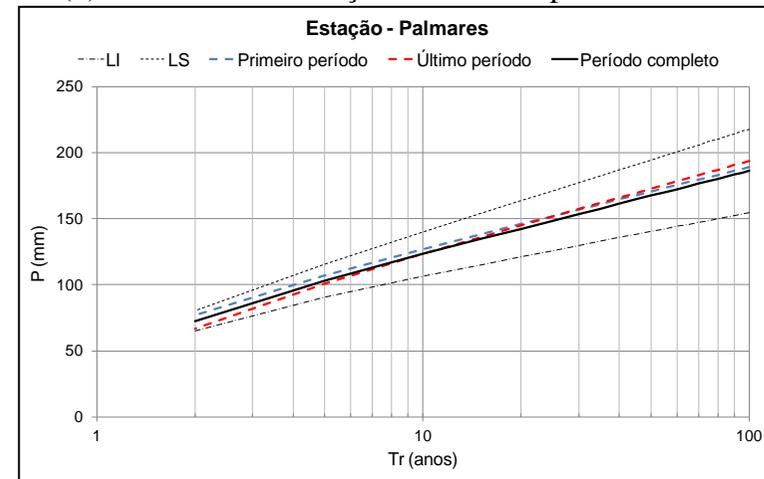
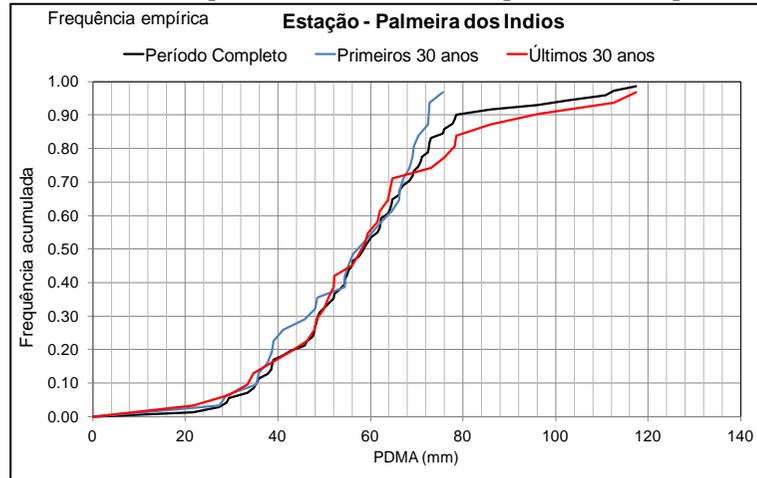
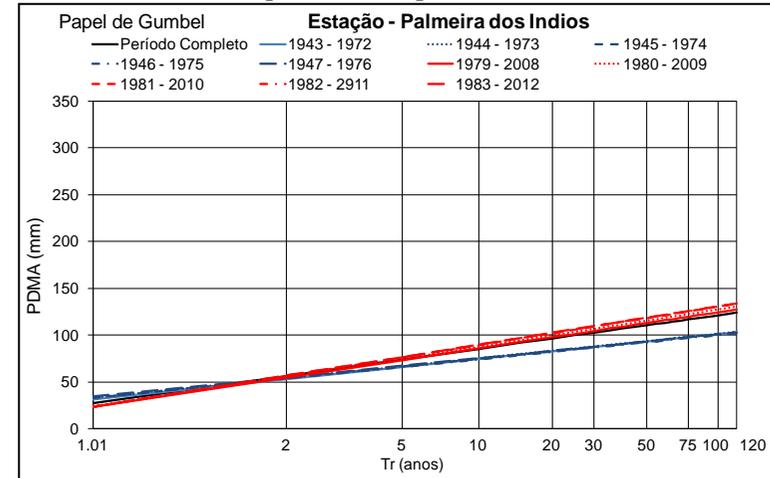


Figura 4.14 – Análise de frequência de PDMA em Palmares

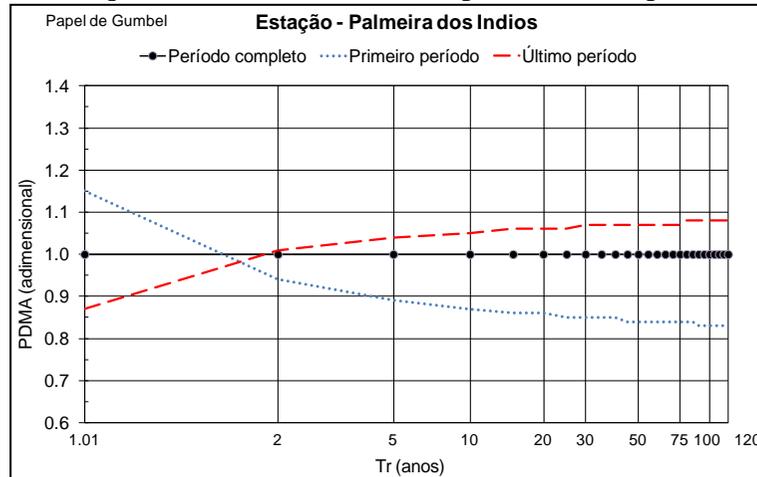
(1) Análise de frequências acumuladas nos períodos e subperíodos.



(2) Frequências dos períodos móveis.



(3) Frequências adimensionais dos períodos e subperíodos.



(4) Limites de confiança com 95% de probabilidade.

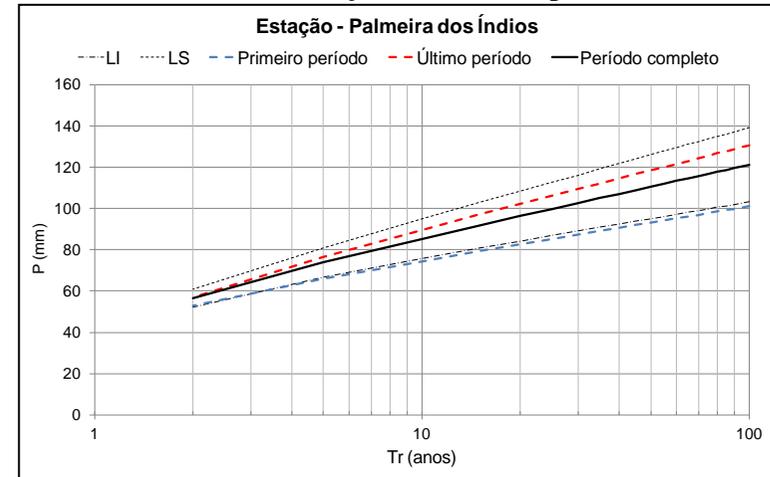
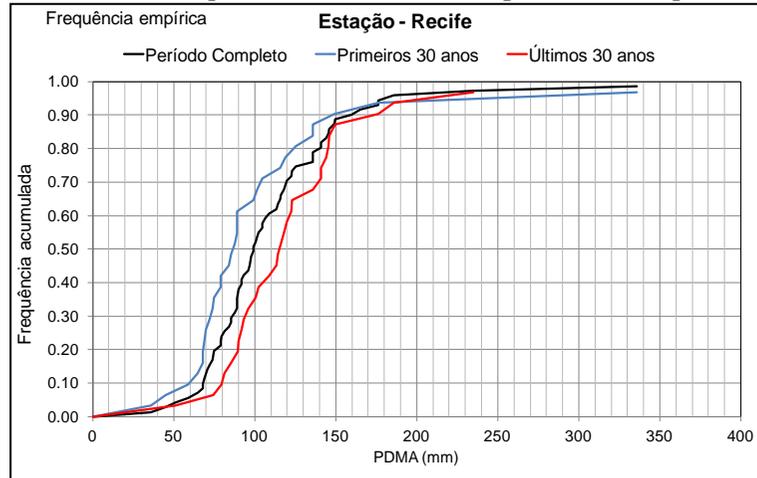
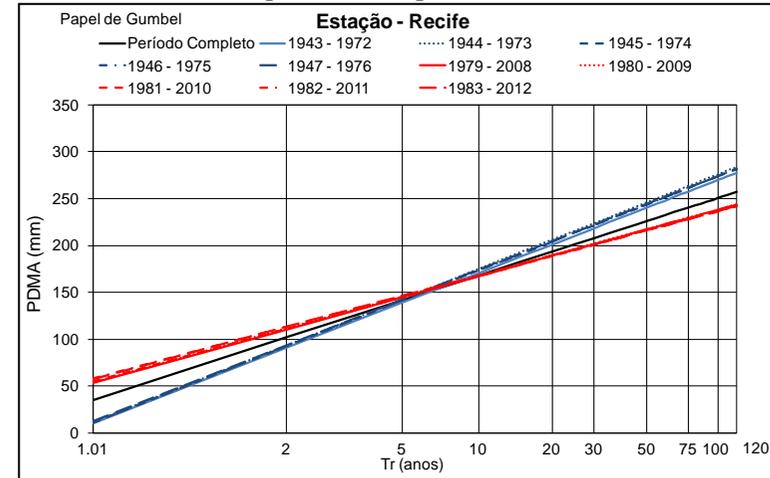


Figura 4.15 – Análise de frequência de PDMA em Palmeira dos Índios

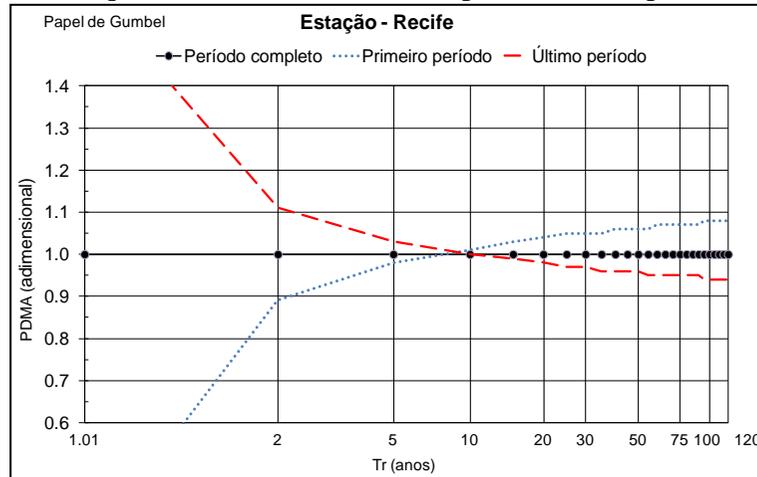
(1) Análise de frequências acumuladas nos períodos e subperíodos.



(2) Frequências dos períodos móveis.



(3) Frequências adimensionais dos períodos e subperíodos.



(4) Limites de confiança com 95% de probabilidade.

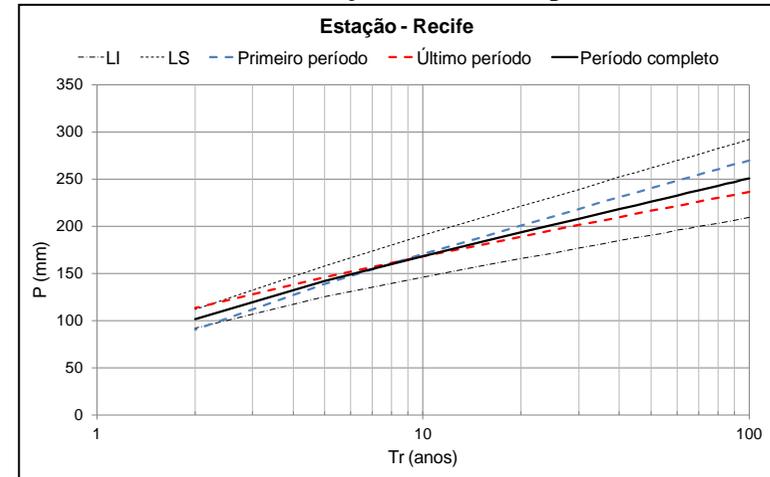
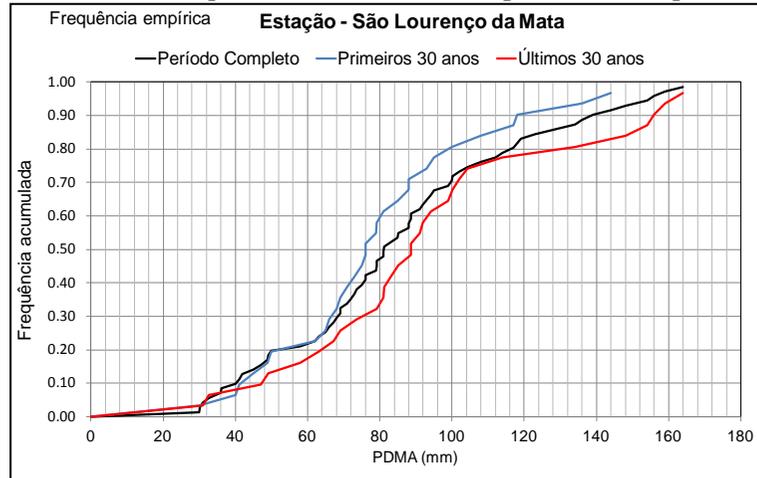
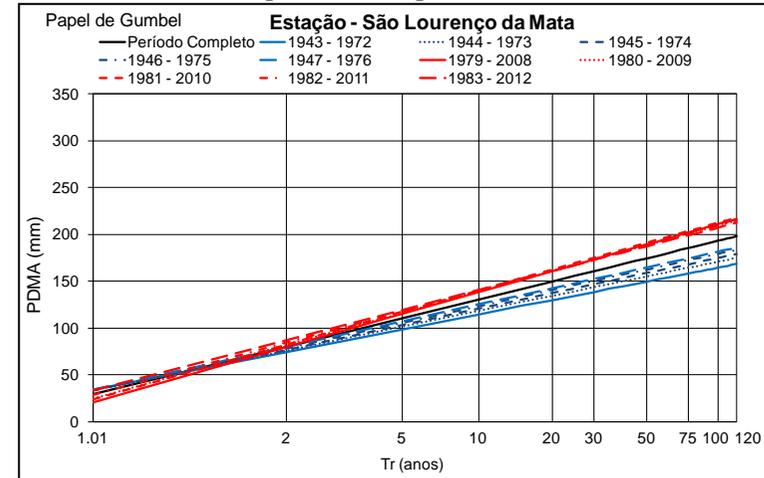


Figura 4.16 – Análise de frequência de PDMA em Recife

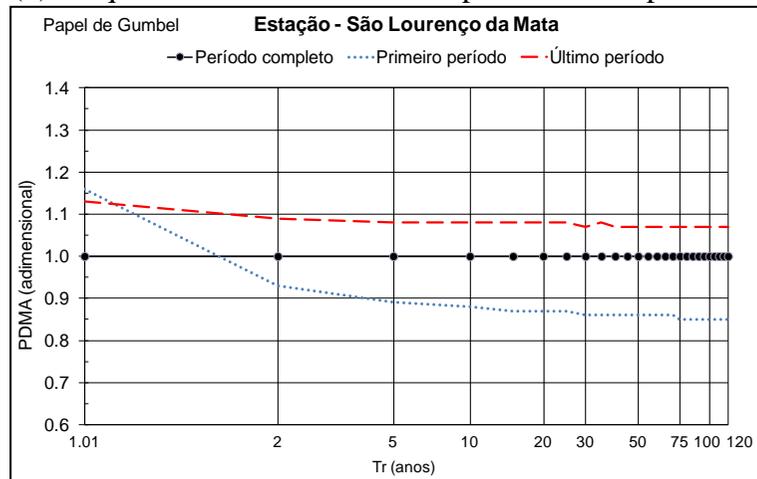
(1) Análise de frequências acumuladas nos períodos e subperíodos.



(2) Frequências dos períodos móveis.



(3) Frequências adimensionais dos períodos e subperíodos.



(4) Limites de confiança com 95% de probabilidade.

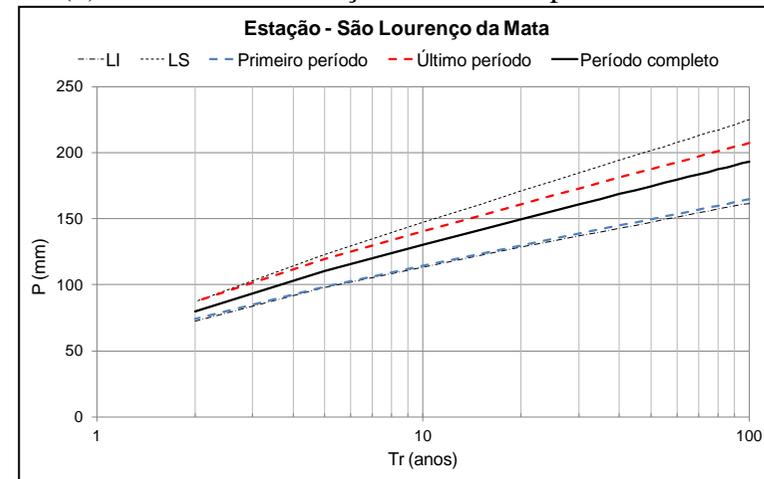
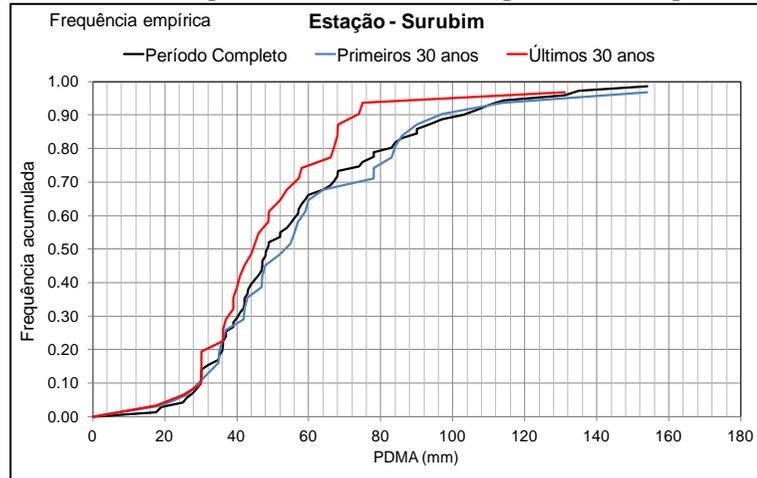
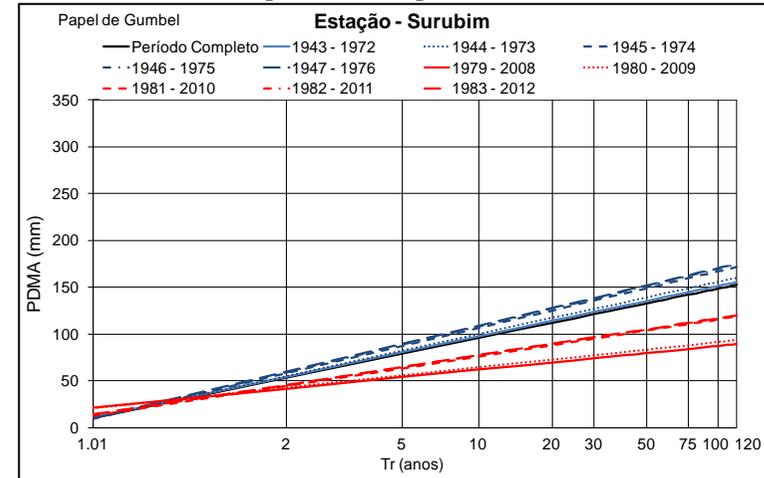


Figura 4.17 – Análise de frequência de PDMA em São Lourenço da Mata

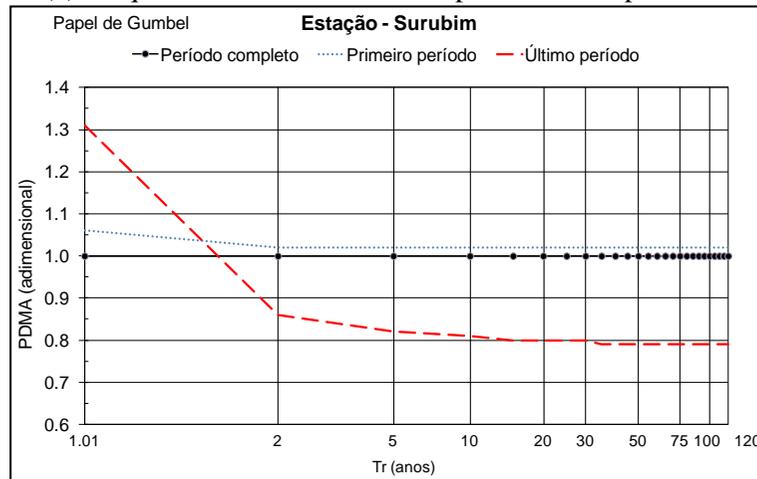
(1) Análise de frequências acumuladas nos períodos e subperíodos.



(2) Frequências dos períodos móveis.



(3) Frequências adimensionais dos períodos e subperíodos.



(4) Limites de confiança com 95% de probabilidade.

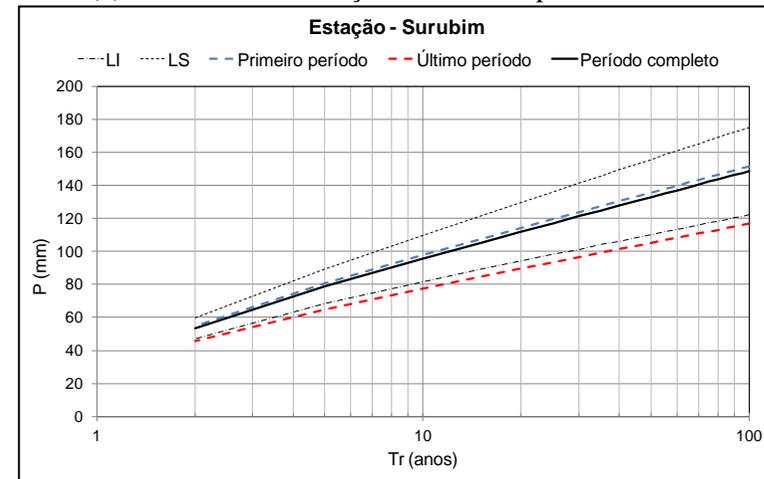
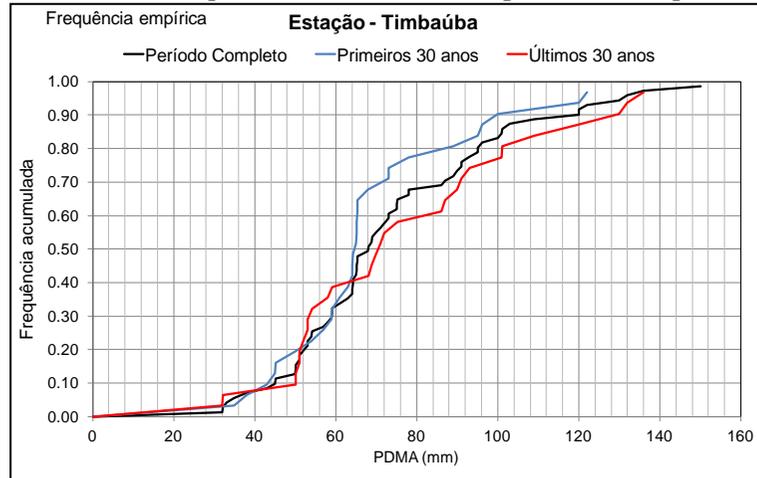
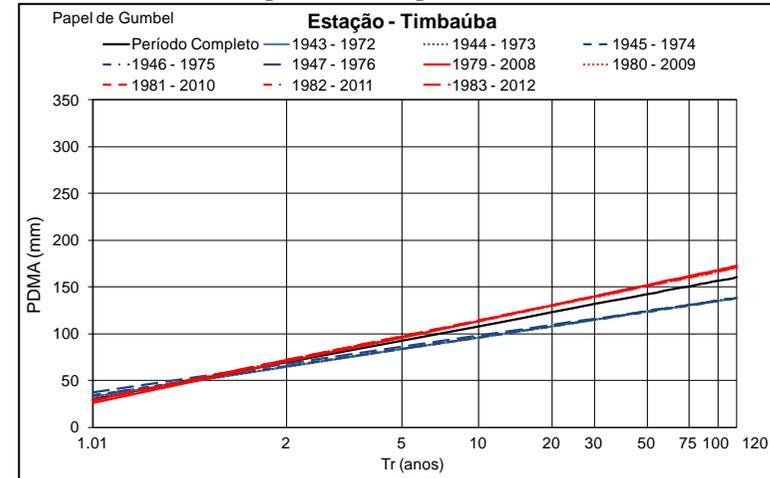


Figura 4.18 – Análise de frequência de PDMA em Surubim

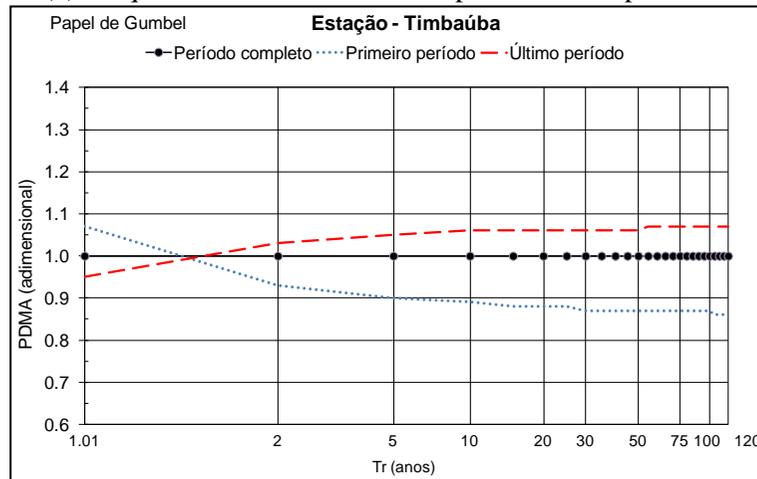
(1) Análise de frequências acumuladas nos períodos e subperíodos.



(2) Frequências dos períodos móveis.



(3) Frequências adimensionais dos períodos e subperíodos.



(4) Limites de confiança com 95% de probabilidade.

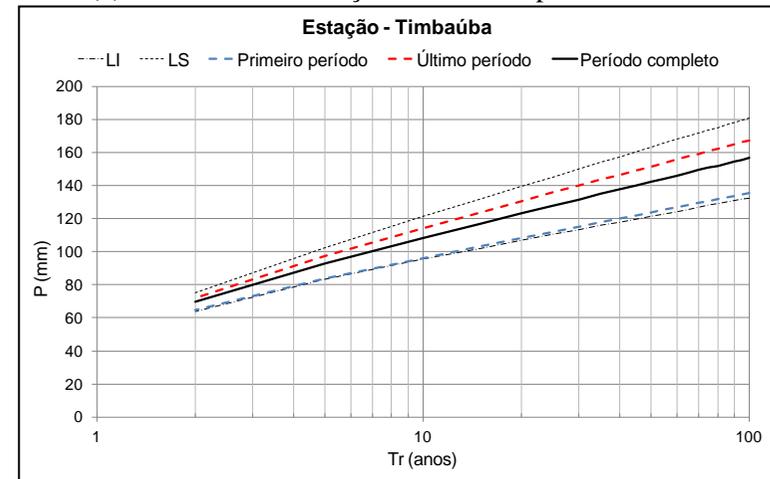
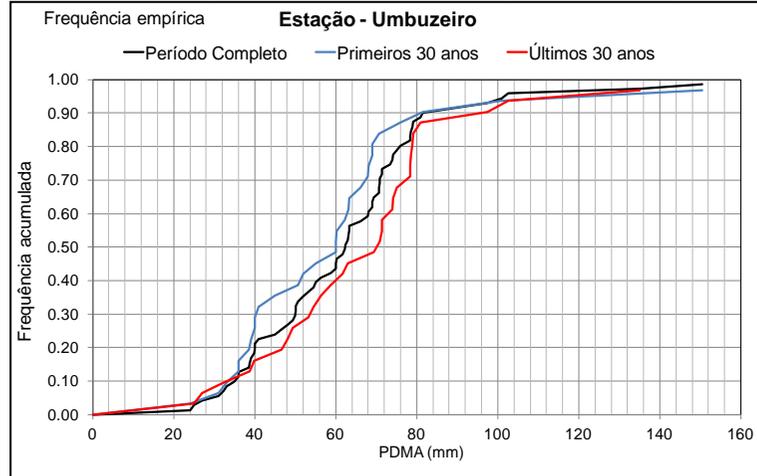
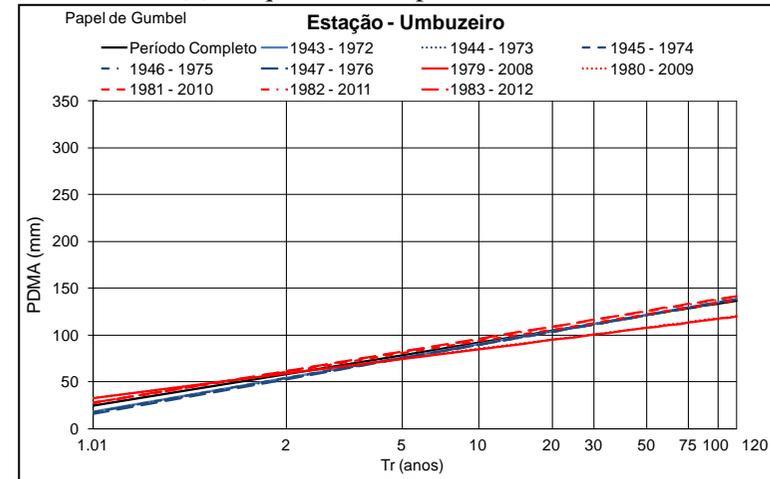


Figura 4.19 – Análise de frequência de PDMA em Timbaúba

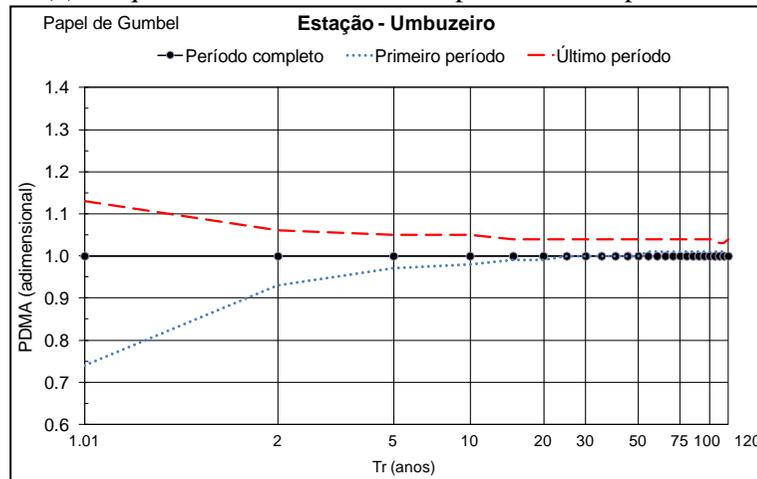
(1) Análise de frequências acumuladas nos períodos e subperíodos.



(2) Frequências dos períodos móveis.



(3) Frequências adimensionais dos períodos e subperíodos.



(4) Limites de confiança com 95% de probabilidade.

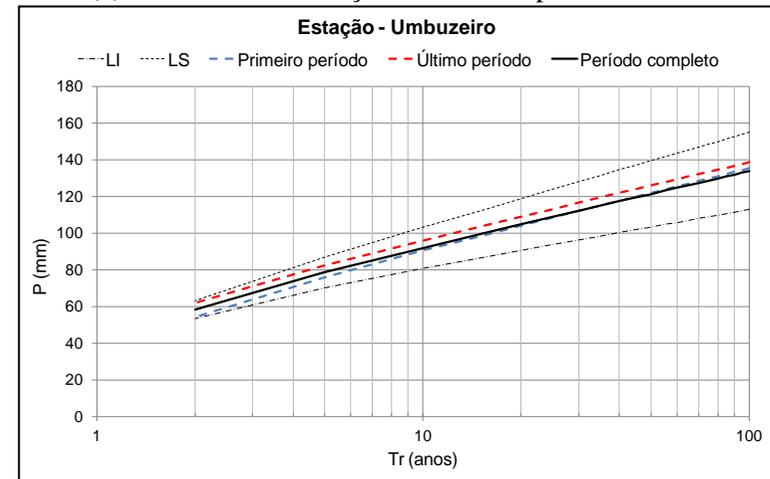
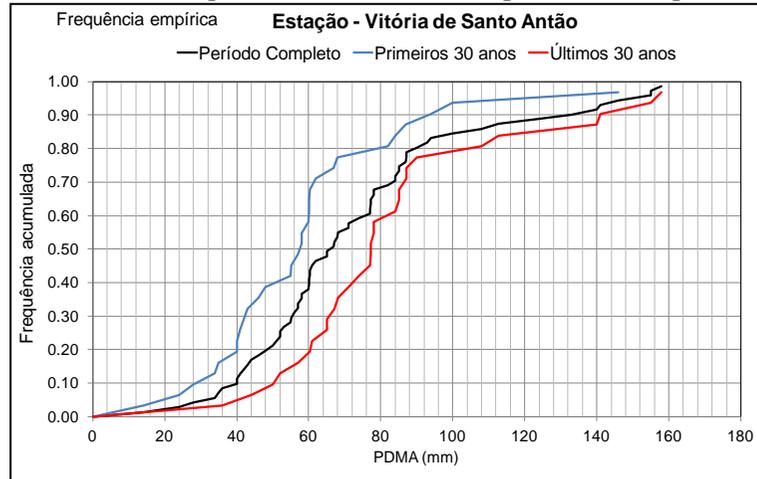
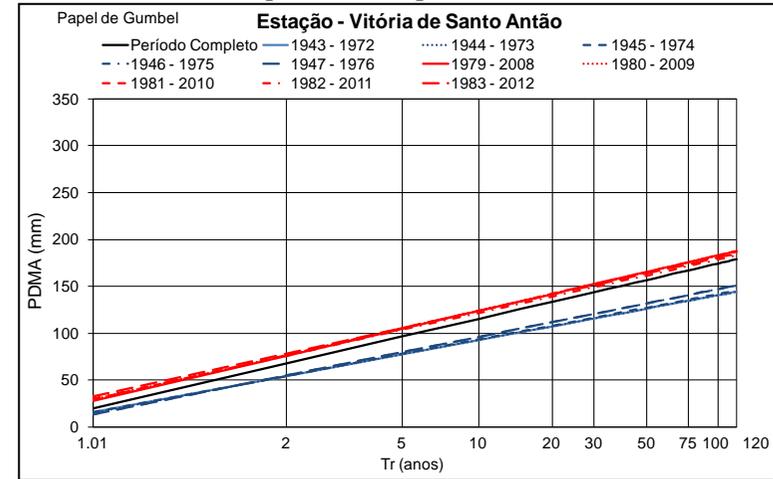


Figura 4.20 – Análise de frequência de PDMA em Umbuzeiro

(1) Análise de frequências acumuladas nos períodos e subperíodos.



(2) Frequências dos períodos móveis.



(3) Frequências adimensionais dos períodos e subperíodos.

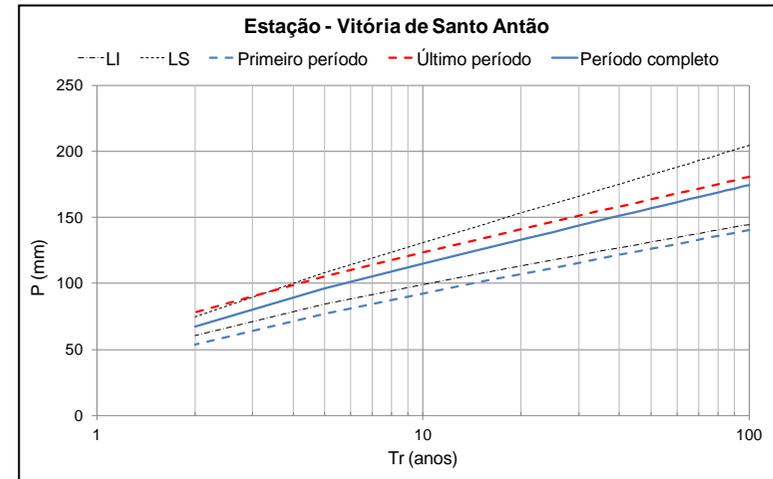
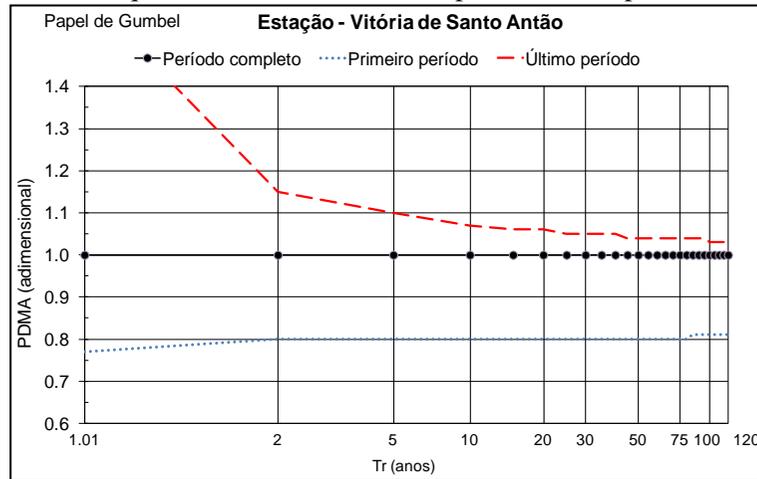


Figura 4.21 – Análise de frequência de PDMA em Vitória de Santo Antão

#### 4.4.3 Análise de frequência de PDMA por estação pluviométrica

Na **estação de Alhandra**, foi possível visualizar o aumento das estatísticas centrais e dispersivas nos diagramas *Box Plot* da Figura 4.5a, inclusive os valores dos limites de confiança da série do Último período em relação ao Primeiro. Os gráficos (1), (2) e (3) da Figura 4.6 apontaram para um aumento da frequência de PDMA no Último período em relação ao Primeiro, em todos os tempos de retorno previstos no estudo. No gráfico (4) da mesma figura e nas Tabelas 4.17 e 4.18 observou-se que somente os quantis referentes ao tempo de retorno inferior ou igual a 2 anos não estão contidos nos limites de confiança de 95%.

Na **estação de Atalaia**, os diagramas *Box Plot* da Figura 4.5a mostraram que houve diminuição nas estatísticas centrais e dispersivas, com exceção do valor do limite superior de confiança da série do Último período. O estudo mostrou através dos gráficos (1), (2) e (3) da Figura 4.7, que houve redução da frequência do Último período em relação ao Primeiro para quantis de PDMA inferiores a 110 mm e tempos de recorrência menores de 5 anos. Entretanto, a partir de 1981 houve aumento da frequência do Último período em relação ao Primeiro, para tempos de recorrência maiores que 5 anos e quantis superiores a 110 mm. No gráfico (4) da mesma figura e nas Tabelas 4.17 e 4.18 foi possível observar que no Primeiro período, os quantis referentes ao tempo de retorno inferior ou igual a 2 anos estiveram fora dos limites de confiança de 95%. No Último período, os quantis atenderam aos limites do intervalo de confiança calculado.

Na **estação de Bom Jardim**, percebeu-se uma redução das estatísticas centrais e dispersivas nos diagramas *Box Plot* da Figura 4.5a, como também dos limites do intervalo de confiança, principalmente do terceiro quartil. A exceção se fez para o primeiro quartil, por ter esse se apresentado graficamente alinhado ao Primeiro período. Os gráficos (1), (2) e (3) da Figura 4.8 demonstraram que houve redução da frequência de PDMA do Último período em relação ao Primeiro, em todos os tempos de retorno previstos na análise. No gráfico (4) da mesma figura e nas Tabelas 4.17 e 4.18 observou-se que no Primeiro período, todos os quantis se comportaram dentro do intervalo de confiança de 95%, enquanto no Último, somente os quantis referentes aos tempos de retorno de 2 anos permaneceram fora do limite inferior do intervalo.

Na **estação de Caruaru**, observou-se uma redução do limite superior e do terceiro quartil, e aumento do limite inferior e do primeiro quartil, nos diagramas *Box Plot* da Figura 4.5a, sem alteração percebida para mediana. Os gráficos (1), (2) e (3) da Figura 4.9 não demonstraram na série de PDMA, alterações expressivas na frequência dos quantis entre os períodos analisados. Notou-se apenas que quantis menores de 40 mm apresentaram pequena superioridade para tempos de retorno abaixo de 5 anos no Último período, enquanto quantis do Primeiro período mostraram a partir de 1981 ligeira superioridade para tempos de recorrências acima de 5 anos. No gráfico (4) da

mesma figura e nas Tabelas 4.17 e 4.18, tanto o Primeiro como o Último período estiveram contidos no intervalo de confiança de 95%, com suficiente folga para corresponder aos tempos de retorno analisados.

Na **estação de Garanhuns**, os diagramas *Box Plot* da Figura 4.5b destacaram uma elevação do limite superior, um aumento da calda para a direita e um deslocamento da mediana para a esquerda. Por outro lado, houve também a diminuição do primeiro quartil e do limite inferior do intervalo de confiança, caracterizando uma assimetria contida na distribuição amostral. A série de PDMA identificou através dos gráficos (1), (2) e (3) pertencente à Figura 4.10, um aumento da frequência do Último período em relação ao Primeiro a partir de 1982, para quantis de PDMA superiores a 70 mm e tempos de recorrência maiores de 5 anos. Enquanto nos quantis inferiores a 70 mm observou-se a ocorrência de maiores frequências até o ano de 1982 no Primeiro período, para tempos de recorrência menores que 5 anos. No gráfico (4) da mesma figura e nas Tabelas 4.17 e 4.18 foi possível identificar a continência total dos períodos analisados no intervalo de confiança de 95%, em todos os anos previstos para tempos de retorno.

Na **estação de Itambé**, os diagramas *Box Plot* da Figura 4.5b detectaram o aumento dos valores estatísticos centrais e dispersivos e do limite superior, como também o deslocamento da calda à direita, sem que o limite inferior fosse aparentemente alterado. Os gráficos (1), (2) e (3) da Figura 4.11 confirmaram aumento da frequência de PDMA, uma vez que os quantis apresentaram maiores frequência no Último período em relação ao Primeiro, em todos os tempos de retorno utilizados na análise. No gráfico (4) da mesma figura e nas Tabelas 4.17 e 4.18, o Último período se manteve contido dentro do intervalo de confiança de 95%, pelo menos para os tempos de retorno utilizados, enquanto o Primeiro período se posicionou abaixo do limite inferior do intervalo de confiança até 20 anos de recorrência.

Na **estação de João Pessoa**, os diagramas *Box Plot* da Figura 4.5b demonstraram que nesse caso não houve expressivas alterações nas estatísticas centrais e dispersivas, inclusive nos limites do intervalo de confiança. Os gráficos (1), (2) e (3) da Figura 4.12 indicaram na série de PDMA, um aumento da frequência no Último período em relação ao Primeiro, para os quantis acima de 75 mm, sendo as maiores ocorrências a partir de 1982 em todos os tempos de retorno considerados. No gráfico (4) da mesma figura e nas Tabelas 4.17 e 4.18, os períodos analisados estiveram dentro do intervalo de confiança de 95%, em todos os tempos de retorno testados, apresentando folga notável para o limite inferior.

Na **estação de Maceió** foi notório o aumento do limite superior e do terceiro quartil nos gráficos *Box Plot* da Figura 4.5b, como também a diminuição do limite inferior, aumentando com isso a amplitude interquartil. O deslocamento da calda para direita caracterizou uma condição de

assimetria da série. Os gráficos (1), (2), (3) da Figura 4.13 demonstraram na série de PDMA, um aumento da frequência no Último período em relação ao Primeiro, a partir do ano de 1981, com períodos de retorno acima de 2 anos e quantis superiores a 100 mm. O gráfico (4) da mesma figura juntamente com as Tabelas 4.17 e 4.18 mostrou que os períodos analisados estão totalmente contidos no intervalo de confiança de 95%, com folgas para todos os tempos de retorno estudados.

Na **estação de Palmares**, os gráficos *Box Plot* da Figura 4.5B indicaram a redução dos valores das estatísticas centrais e dispersivas, com ênfase para o limite superior. Os gráficos (1), (2) e (3) da Figura 4.14 identificaram na série de PDMA, um aumento da frequência no Último período em relação ao Primeiro a partir de 1982, para quantis superiores a 145 mm e tempos de recorrência maiores de 20 anos. Entretanto, para quantis inferiores a 145 mm, observou-se até o ano de 1982 a ocorrência de maiores frequências no Primeiro período, para tempos de recorrência menores que 20 anos. O gráfico (4) da mesma figura associado às Tabelas 4.18 e 4.19 mostrou que os períodos analisados estiveram inseridos no intervalo calculado para 95% de probabilidade, com certa folga para todos os tempos de retorno avaliados.

Na **estação de Palmeira dos Índios**, os gráficos *Box Plot* da Figura 4.5b mostraram aumento na amplitude interquartil, principalmente pelo crescimento do limite superior e a redução do limite inferior. Apesar do aumento dos valores do primeiro e terceiro quartil, observou-se um alinhamento da mediana. Os gráficos (1), (2) e (3) da Figura 4.15 identificaram na série de PDMA, maiores frequências na série de PDMA no Último período em relação ao Primeiro a partir de 1982, para quantis com valores maiores de 70 mm e tempos de recorrência acima de 2 anos. O Primeiro período apresentou maiores frequência até 1982, com quantis menores que 40 mm e tempos de recorrência inferiores a 2 anos. No gráfico (4) da mesma figura, como também nas Tabelas 4.17 e 4.18, o Último período manteve-se contido dentro do limite superior para os tempos de retorno calculados, enquanto o Primeiro período apresentou-se fora do limite inferior em tempos menores de 2 anos de recorrência.

Na **estação de Recife**, os diagramas *Box Plot* da Figura 4.5c mostraram que houve uma pequena e proporcional evolução das características estatísticas centrais e dispersivas, entre o Primeiro e o Último período, contudo é notório que o arranjo geral não seria o mesmo se não fosse a ocorrência do *outlier* extremamente atípico precipitado em agosto de 1970, no valor de 335,8 mm. Os gráficos (1), (2), (3) da Figura 4.16 demonstraram que na série de PDMA, houve um aumento da frequência do Último período em relação ao Primeiro, para os quantis de PDMA menores que 150 mm e tempos de recorrência abaixo de 10 anos. Entretanto, para quantis superiores a 150 mm, observou-se a ocorrência de maiores frequências no Primeiro período, para tempos de recorrência menores que 10 anos. No gráfico (4) da mesma figura e nas Tabelas 4.17 e 4.18, os períodos

analisados mostraram-se inseridos no intervalo de confiança de 95% a partir dos tempos de retorno superiores a 2 anos. Para valores abaixo desse tempo, o Primeiro período permaneceu abaixo do limite inferior e o Último período acima do limite superior.

Na **estação de São Lourenço da Mata**, os diagramas *Box Plot* da Figura 4.5c apresentaram um aumento pouco acentuado das características estatísticas centrais e dispersivas, porém com destaque para o limite superior do intervalo de confiança e o terceiro quartil, com notável deslocamento da calda para direita. Os gráficos (1), (2), (3) da Figura 4.17 demonstraram na série de PDMA, um aumento da frequência do Último período em relação ao Primeiro, para todos os tempos de retorno analisados. O gráfico (4) e as Tabelas 4.17 e 4.18 indicaram para os períodos analisados, total continência no intervalo de confiança de 95%, com notável aproximação do Primeiro período ao limite inferior.

Na **estação de Surubim**, os diagramas *Box Plot* da Figura 4.5c apresentaram redução das estatísticas centrais e dispersivas, com maiores ênfases para o limite superior e o terceiro quartil. Os gráficos (1), (2), (3) da Figura 4.18 detectaram na série de PDMA, uma redução da frequência do Último período em relação ao Primeiro, para os quantis superiores a 30 mm e tempos de retorno maiores ou iguais a 2 anos. No gráfico (4) e nas Tabelas 4.17 e 4.18 observou-se que o primeiro período mostrou-se enquadrado no intervalo de confiança de 95% para os tempos de retorno estudados, enquanto o Último período mostrou-se permanentemente abaixo do limite inferior nos mesmos tempos.

Na **estação de Timbaúba**, os diagramas *Box Plot* da Figura 4.5c mostraram pouca diferença entre o Primeiro e o Último período, embora se perceba ligeiro aumento nos valores da mediana e do terceiro quartil no Último período. Os gráficos (1), (2), (3) da Figura 4.19 constataram na série de PDMA, um aumento da frequência no Último período em relação ao Primeiro, a partir dos quantis maiores que 65 mm. O gráfico (4) e as Tabelas 4.17 e 4.18 indicaram a pertinência completa dos períodos analisados no intervalo de confiança de 95%, contudo foi observado suficiente aproximação do Primeiro período ao limite inferior.

Na **estação de Umbuzeiro**, observou-se um aumento de quase todas as estatísticas centrais e dispersivas nos diagramas *Box Plot* da Figura 4.5c. A exceção ficou para a redução do limite superior e o alinhamento do terceiro quartil. O processo também mostrou aumento da calda para a esquerda e diminuição para a direita. Os gráficos (1), (2), (3) da Figura 4.20 apresentaram na série de PDMA, um aumento da frequência no Último período em relação ao Primeiro, para todos os tempos de retorno utilizados na análise. No mesmo contexto, o gráfico (4) e as Tabelas 4.17 e 4.18 mostraram que os períodos analisados se comportaram dentro do intervalo de confiança determinado para 95%, com folga observada entre o limite inferior e superior.

Na **estação de Vitória de Santo Antão**, os diagramas *Box Plot* da Figura 4.5C atestaram que houve crescimento dos valores das estatísticas centrais e dispersivas, inclusive dos limites do intervalo de confiança. Os gráficos (1), (2), (3) e a Figura 4.21 mostraram que houve aumento da frequência de PDMA no Último período em relação ao Primeiro, constatado para todos os tempos de retorno estudados. No gráfico (4) e nas Tabelas 4.17 e 4.18, observou-se que o limite inferior do intervalo de confiança a 95% não conteve o Primeiro período em todos os tempos de retorno analisados até 100 anos. Entretanto, o limite superior somente não permitiu a inclusão do Último período em tempos de recorrência abaixo de 2 anos.

#### 4.4.4 Considerações finais sobre as análises da PDMA

A Tabela 4.19 serviu para confrontar os resultados das análises de tendências, mudanças abruptas e frequências, realizadas nas séries de PDMA da Sub-bacia 39. A coluna de tendência adveio dos resultados dos testes estatísticos relativos às séries de PDMA da Tabela 4.1, como também dos resultados dos índices pluviométricos das séries de RMedmm da Tabela 4.2. A coluna de mudança teve origem nas séries de PDMA da Tabela 4.4, obtidas com os testes estatísticos. A coluna de frequência fundamentou-se nos resultados de todas as análises gráficas efetuadas.

Tabela 4.19 – Síntese das tendências, mudanças abruptas e frequência nas séries de PDMA

Item	Estação	Análises realizadas		
		Tendência	Mudança	Frequência
01	Alhandra	Crescente	Crescente	Totalmente crescente
02	Atalaia	*	*	Crescente para quantis maiores de 110 mm
03	Bom Jardim	Decrescente	*	Totalmente decrescente
04	Caruaru	*	*	Sem visíveis alterações
05	Garanhuns	*	*	Crescente para quantis maiores de 70 mm
06	Itambé	Crescente	Crescente	Totalmente crescente
07	João Pessoa	*	*	Crescente para quantis maiores de 75 mm
08	Maceió	*	*	Crescente para quantis maiores de 100 mm
09	Palmares	*	*	Crescente para quantis maiores de 145 mm
10	Palmeira dos Índios	*	*	Crescente para quantis maiores de 70 mm
11	Recife	Crescente	Crescente	Crescente para quantis menores de 150 mm
12	São Lourenço da Mata	*	*	Totalmente crescente
13	Surubim	*	Decrescente	Crescente para quantis menores de 30 mm
14	Timbaúba	Crescente	Crescente	Crescente para quantis maiores de 65 mm
15	Umbuzeiro	Crescente	Crescente	Totalmente crescente
16	Vitória de Santo Antão	Crescente	Crescente	Totalmente crescente

\* (inexistência de tendência/mudança ou resultados sem significância estatística)

Representando 32% das estações analisadas, constatou-se que nos municípios de Alhandra, Itambé, Recife, Timbaúba, Umbuzeiro e Vitória de Santo Antão, onde as tendências e mudanças abruptas são crescentes, houve também aumento da frequência, com a única restrição observada para Recife, com aumento de frequência até 150 mm diário. Nessa cidade, a chuva forte, ou chuva capaz de produzir desastres naturais, é classificada a partir do limiar de 30 mm.

Já os municípios de Atalaia, Garanhuns, João Pessoa, Maceió, Palmares, Palmeira dos Índios e Timbaúba mostraram crescimento da frequência de PDMA a partir dos quantis que variam de 65,0 a 145,0 mm, representando 44% das estações avaliadas. Esses dois grupos, que perfazem 76 % das estações analisadas, determinam uma condição de aumento da frequência de PDMA na Sub-bacia 39, com intensidades suficientes para que se caracterize o aumento da frequência de chuvas bastante intensas na área estudada.

Os municípios de Bom Jardim, com tendência negativa, e Surubim, com mudança abrupta também negativa, foram os municípios menos favoráveis ao aumento da frequência de PDMA, ou seja, o primeiro mostrou uma frequência totalmente decrescente e sem restrições aos quantis, e o segundo apresentou aumento da frequência somente até 30 mm. Em se tratando do planejamento hídrico, a condição apresentada por esses municípios aponta para um cenário preocupante, uma vez que essa região abriga importantes reservatórios, inclusive Jucazinho e Carpina, que dependem das chuvas intensas para o enchimento e manutenção da utilidade. O único município que não caracterizou evidências importantes na frequência de máximos diários durante as análises foi Caruaru.

Não obstante, as análises indicaram uma predominância de aumento da frequência de PDMA na Sub-bacia 39, com maior evidência de eventos diários de precipitação máxima. Essas revelações mostram-se compatíveis com as declarações divulgadas pelo IPCC em 2007, como ocorrências de secas mais intensas e mais longas sobre áreas mais amplas desde 1970, especialmente nos trópicos e subtropicais e o aumento da frequência dos eventos de forte precipitação sobre a maior parte das áreas terrestres, de forma condizente com o aquecimento e os aumentos observados do vapor d'água atmosférico.

#### 4.5 ALERTA PLUVIOMÉTRICO NA CIDADE DE RECIFE

Com base no limiar de chuva diária de 30 mm, adotado pela APAC, a sociedade, a imprensa e a Defesa Civil, passaram a utilizá-lo como referência, tanto para os pequenos desconfortos como para a iminência de grandes desastres, uma vez que ambos são decorrentes dos eventos hidrológicos superiores a esse limiar. Desses convívios, a população, que também é orientada a colaborar com o monitoramento nos locais de riscos, ganhou com a melhoria da segurança e da qualidade de vida.

Com relação ao gerenciamento do risco através da emissão de alerta meteorológico de chuvas com 30 mm em Recife, Souza (2011) chama a atenção para a possível ocorrência de desastres considerando a intensidade da Chuva Fraca. Este fato ocorre quando há registros de dias consecutivos com chuvas anterior a um evento de Chuva fraca, contribuindo para o saturação do solo, tornando-o vulnerável a algum tipo de desastre, como o exemplo do dia 05/05/2007, com índice pluviométrico de 7,4 mm observou-se a ocorrência de 20 escorregamentos, com índices registrados nos 5 dias anteriores de 63,9 mm.

Quanto à análise exploratória dos dados de Chuva forte em Recife, as Figuras 4.22 e 4.23 apresentaram as linhas de tendência das duas variáveis. As Figuras 4.24 e 4.25 se referem aos diagramas *Box Plot* das estatísticas centrais e dispersivas.

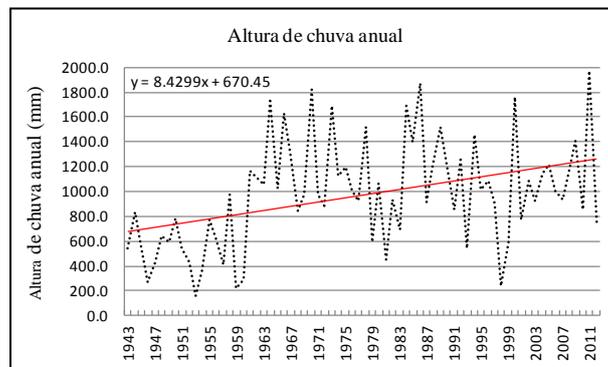


Figura 4.22 – Linhas de Tendência da Chuva forte na Altura de chuva anual

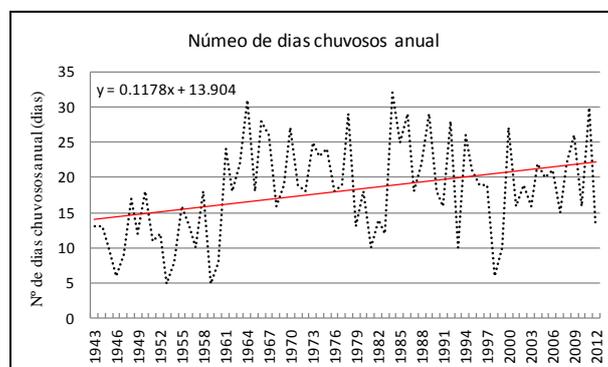


Figura 4.23 – Linhas de Tendência da Chuva forte no Número de dias chuvosos anual

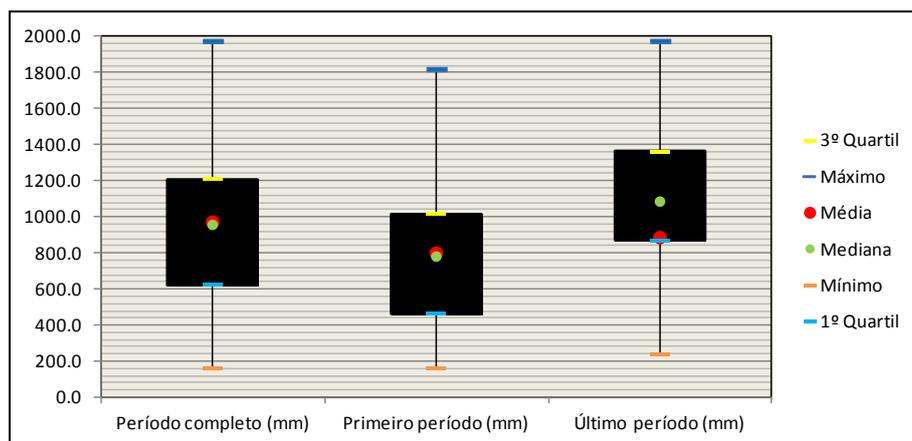


Figura 4.24 – Diagramas *Box Plot* da Altura de chuva anual em Recife nos períodos estudados com precipitações diárias iguais ou acima de 30 mm

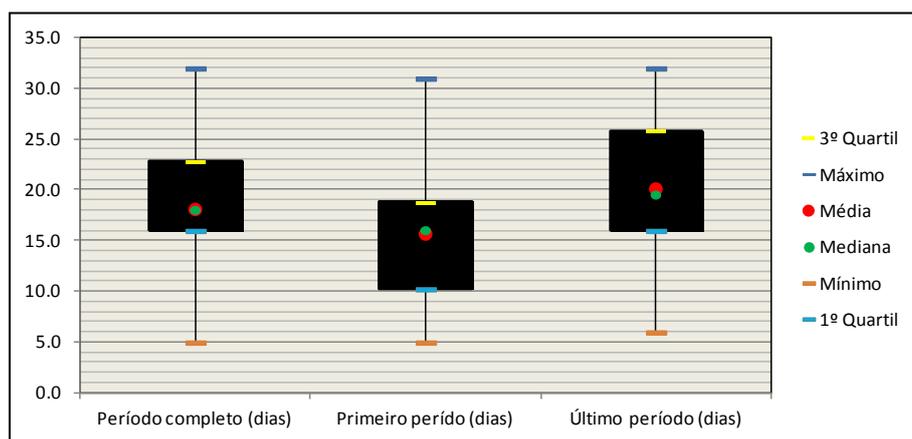


Figura 4.25 – Diagramas *Box Plot* do Número de dias chuvosos em Recife nos períodos estudados com precipitações diárias iguais ou acima de 30 mm

A Figura 4.22 apresentou a linha de tendência traçada para a Altura de chuva anual com as precipitações diárias  $\geq 30$  mm representadas pelos totais anuais. A Figura 4.23, também mostrou a linha de tendência, porém para o Número de dias com chuvas  $\geq 30$  mm. Ambas apontaram para a possibilidade de existência de tendências positivas.

Analisando as Figuras 4.24 e 4.25, observou-se que os diagramas *Box Plot* mostraram uma evolução na frequência dos quantis das estatísticas descritivas, entre os Primeiros e os Últimos períodos das duas variáveis. Com os valores dos quantis calculados, foi possível avaliar numericamente a evolução constatada entre os dois períodos. A Tabela 4.20 mostra os percentuais de crescimento da Chuva forte na cidade de Recife.

Tabela 4.20 – Aumento percentual da Chuva forte em Recife entre os Primeiros e Últimos períodos

Estatísticas	Crescimento da frequência da precipitação acima de 30 mm	
	Altura de chuva anual (%)	Nº de dias chuvosos anual (%)
Máximo	7.9	3.1
3º Quartil	25.3	27.2
Média	9.7	22.1
Mediana	28.1	17.9
1º Quartil	46.8	35.9
Mínimo	31.6	16.7

#### 4.5.1 Análise de tendência da Chuva forte

As Tabelas 4.21 e 4.22 apresentam respectivamente os resultados dos testes estatísticos das tendências analisadas, tanto para a Altura de chuva anual como para o Número de dias chuvosos anual da série de Chuva forte. Nelas podem-se observar as estatísticas de testes em relação aos valores críticos tabelados e reamostrados, em função dos níveis de significância considerados para os três métodos utilizados.

Tabela 4.21 – Testes estatísticos na Altura de chuva anual da série de Chuva forte

Testes	Estatísticas de teste	Valores críticos						Resultados
		Tabelados			Reamostrados			
		$\alpha=0,10$	$\alpha=0,05$	$\alpha=0,01$	$\alpha=0,10$	$\alpha=0,05$	$\alpha=0,01$	
<b>MK</b>	3,255	1,645	1,960	2,576	1,637	1,906	2,580	<b>S+ (0,001)</b>
<b>SR</b>	3,478	1,645	1,960	2,576	1,715	2,001	2,523	<b>S+ (0,001)</b>
<b>RL</b>	3,548	1,669	1,997	2,654	1,677	2,052	3,002	<b>S+ (0,001)</b>

**MK** (Mann-Kendall), **SR** (Spearman-Rho), **RL** (Regressão Linear)

Tabela 4.22 – Testes estatísticos no Número de dias chuvosos anual da série de Chuva forte

Testes	Estatísticas de teste	Valores críticos						Resultados
		Tabelados			Reamostrados			
		$\alpha=0,10$	$\alpha=0,05$	$\alpha=0,01$	$\alpha=0,10$	$\alpha=0,05$	$\alpha=0,01$	
<b>MK</b>	2,874	1,645	1,960	2,576	1,592	1,972	2,727	<b>S+ (0,001)</b>
<b>SR</b>	3,350	1,645	1,960	2,576	1,753	2,110	2,792	<b>S+ (0,001)</b>
<b>RL</b>	3,062	1,669	1,997	2,654	1,608	1,961	2,503	<b>S+ (0,001)</b>

**MK** (Mann-Kendall), **SR** (Spearman-Rho), **RL** (Regressão Linear)

Em ambas as análises, os três testes estatísticos forneceram resultados positivos de tendência com significância estatística ao nível de 1%, indicando que na cidade de Recife as Chuvas fortes, ou chuvas capazes de produzirem danos decorrentes de alagamentos nas áreas planas e deslizamentos nos morros, estão aumentando seus valores diários e o número de dias de suas ocorrências.

#### 4.5.2 Análise de frequência da Chuva forte

As Figuras 4.26 e 4.27 apresentam os gráficos cartesianos das frequências relativas acumuladas entre os quantis de Altura de chuva anual e do Número de dias chuvosos anual, em relação às probabilidades de não excedência contidas nas escalas das frequências acumuladas (ordenadas). Conforme previsto nos esboços dos diagramas *Box Plot*, as análises de frequência comprovaram que houve aumento da frequência dessas duas variáveis.

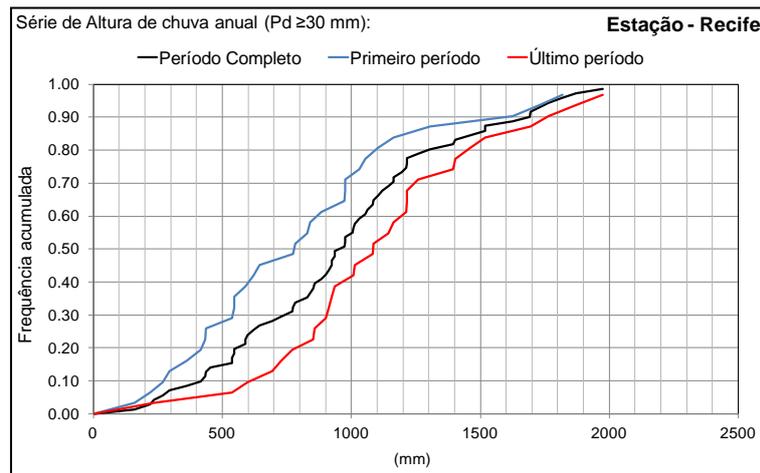


Figura 4.26 – Comportamento da frequência anual considerando a precipitação diária acumulada acima de 30 mm da Altura de chuva anual para os períodos estudados

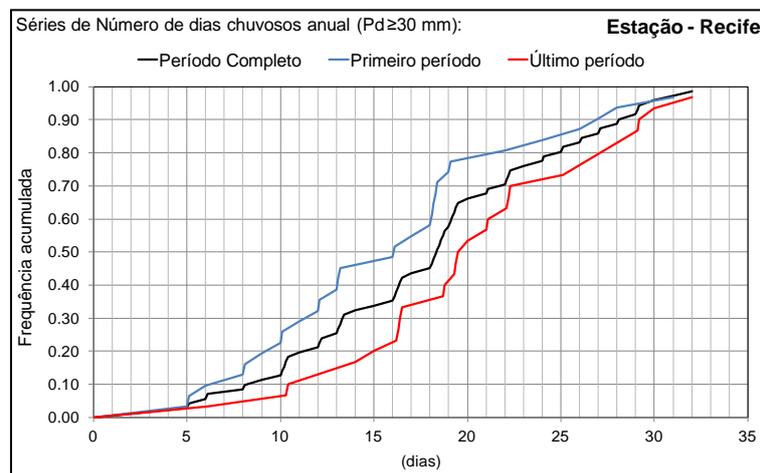


Figura 4.27 – Comportamento da frequência anual considerando a precipitação diária acumulada acima de 30 mm do Número de dias chuvosos anual para os períodos estudados

A comparação entre os Primeiros e Últimos períodos, visivelmente demonstrados nos gráficos, determina que para todos os quantis, seja de Altura de chuva anual ou do Número de dias chuvoso anual, as probabilidades de excedência em cada ponto dos seus traçados revelaram que as

chuvas maiores ou iguais a 30 mm (Chuva forte precipitadas em Recife), aumentaram suas frequências.

Apesar de a Chuva forte ser utilizada como alerta para a RMR e outras mesorregiões do estado, o aumento da magnitude e da frequência foi aqui revelado para cidade do Recife, onde a série pluviométrica utilizada foi medida e a pesquisa foi realizada, não devendo ser interpretada para os demais municípios da RMR. Como também, os alagamentos a que se refere à pesquisa, nem sempre podem ser confundidos com as inundações constatadas periodicamente nos rios e canais de Recife, uma vez que essas podem decorrer de chuvas precipitadas fora da cidade, como em outros municípios da RMR e/ou nas partes das bacias hidrográficas que não pertencem à Recife.

Em relação à gestão dos recursos hídricos que abastecem a cidade de Recife, o aumento da Chuva forte não influencia significativamente os reservatórios de armazenamento mais importantes, por esses também se encontrarem fora da cidade, e não dependerem das chuvas precipitadas em Recife para manterem-se úteis. De modo geral, parte considerável da precipitação efetiva de Recife tem o oceano Atlântico como o principal endereço.

Os alagamentos e os escorregamentos de encostas causados pela Chuva fortes em Recife têm como agravantes a insuficiência da capacidade de drenagem, afetada pela obsolescência e por diversos fatores, entre eles: o crescimento da população e das áreas impermeabilizadas, a ausência ou precariedade das estruturas urbanas, dificuldade natural de escoamento devido à topografia local, e a dependência do comportamento da maré no momento desse escoamento, entre outras.

Os resultados foram compatíveis com o trabalho de Ramos (2010) desenvolvido na cidade de Recife. O autor, além de observar que as intensidades de precipitação calculadas para as menores durações (5, 10, 15 e 30 minutos), corresponderam às maiores intensidades, consideradas como capazes de originar problemas de alagamentos. Essas intensidades foram 41% maiores do que os valores atualmente conhecidos. Da mesma forma, Souza e Azevedo (2012) diagnosticaram para cidade de Recife, um aumento da frequência de eventos extremos a partir da década de 80, com chuvas diárias superiores a 100 mm. No caso de Farias e Nóbrega (2010), os autores apontaram um aumento na tendência da precipitação em quase todo o estado de Pernambuco.

Espera-se que o aumento constatado na magnitude e na frequência das Chuvas fortes na cidade do Recife, possa representar um novo cenário para os órgãos competentes, capaz de contribuir com o planejamento de suas funções, principalmente no aproveitamento dos excessos hídricos, como também nos projetos de sistemas de micro e macrodrenagem urbana, tanto nas planícies como nos morros, além da renovação das diretrizes e aparelhamentos que serão requeridos às defesas civis.

CAPÍTULO 5

Conclusões e Recomendações

---

### 5.1 Síntese conclusiva e recomendações

As análises de tendência mostraram que entre janeiro de 1943 e dezembro de 2012, a Sub-bacia 39 apresentou tendência crescente da precipitação extrema máxima nas áreas climaticamente úmidas, subúmidas, e parte semiárida adjacente a elas, cuja concentração se fez mais ocorrente na parte norte, com ênfase para o Litoral e Zona da Mata.

Nas análises de mudanças observou-se também que houve mudança abrupta, praticamente nas mesmas áreas onde a tendência foi detectada, cujos saltos crescentes ocorreram entre os anos de 1959 a 1973. Nas áreas climatologicamente influenciadas pelo Sertão, como o Médio Capibaribe e as proximidades do Baixo São Francisco, não foi detectado aumento de tendência nem mudança abrupta.

As análises da PDMA apontaram para o aumento da frequência na Sub-bacia 39, tanto nos locais onde as tendências e mudanças foram crescentes, como em outros lugares, cujas especificações abrangeram exclusivamente precipitações extremas máximas com altas intensidades.

Os resultados da avaliação com o ajuste da distribuição de *Gumbel* indicaram a não estacionariedade das séries, ou seja, a grosso modo, as estatísticas do futuro não serão iguais à do passado. Sendo assim, torna-se necessário, na análise de frequência de eventos de máximos de precipitação diária anual, que se apliquem métodos que incorporem a não estacionariedade das séries e a revisão de alguns critérios de projeto na região em estudo.

Apesar da pouca influência de ENOS nos eventos de precipitação extrema máxima na Sub-bacia 39, as análises mostraram que existe uma favorabilidade da influência de *La Niña* sobre o fenômeno *El Niño*. Não obstante, foi revelado que o fenômeno oceânico-atmosférico de que mais dependem esses eventos é o dipolo do Atlântico.

A análise do alerta pluviométrico na cidade do Recife detectou aumento da tendência e da frequência das precipitações maiores ou iguais a Chuva forte (30 mm), classificada como a menor altura de chuva diária capaz de provocar alagamentos e desmoronamento de encostas, respectivamente nas planícies e morros.

Espera-se que o aumento constatado na magnitude e na frequência das Chuvas fortes na cidade do Recife, possa representar um novo cenário para os órgãos competentes, capaz de contribuir com o planejamento de suas funções, principalmente no aproveitamento dos excessos hídricos, como também nos projetos de sistemas de micro e macrodrenagem urbana, tanto nas planícies como nos morros, além da renovação das diretrizes e aparelhamentos que serão requeridos às defesas civis.

Embora as alterações constatadas nos regimes hidrológicas das precipitações extremas máximas sinalizem mudanças no clima na Sub-bacia 39, não foi discutida nenhuma evidência que

possa fundamentar-se em causas antropogênicas ou naturais. Tais revelações devem justificar as chuvas intensas que são responsáveis pelas enchentes e inundações na sub-bacia, ocorridas para todos os níveis de impactos sociais, econômicos e ambientais, tanto nas áreas urbanas como rurais. Vale salientar que essas conclusões aqui abordadas fazem-se compatíveis com as previsões declaradas no IPCC para o futuro.

Recomenda-se que a metodologia utilizada seja reaplicada na Sub-bacia 39, pelo menos nas próximas décadas, momento em que haverá mais disponibilidade de estações pluviométricas com séries de longos períodos, as quais permitirão uma densidade mais eficaz para a cobertura da área em estudo.

Considerando que a série temporal de chuva utilizada na pesquisa se estendeu até o ano de 2012, ano em que se iniciou uma sequência anual de seca na região estudada, por enquanto sendo confirmada até 2015, recomenda-se que no futuro essa pesquisa seja refeita, para que os resultados hoje obtidos possam ser atualizados e novas análises locais e regionais sejam efetuadas.

CAPÍTULO 6

Referências

---

ALEXANDER, L. V.; ZHANG, X.; PETERSON, T. C.; CAESAR, J.; GLEASON, B.; TANK, A. M. G.; HAYLOCK, M.; COLLINS, D.; TREWIN, B.; RAHIMZADEH, F.; TAGIPOUR, A.; KUMAR, K. R.; REVADEKAR, J.; GRIFFITHS, G.; VINCENT, L.; STEPHENSON, D. B.; BURN, J.; AGUILAR, E.; BRUNET, M.; TAYLOR, M.; NEW, M.; ZHAI, P.; RUSTICUCCI, M.; J. L.; VAZQUEZ-AGUIRRE, J. L. Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation. **Journal of Geophysical Research**, v.111, p.1-22, 2006.

ALEXANDRE, G. R. **Estudo para identificação de tendências do regime pluvial na região metropolitana de Belo Horizonte a partir de métodos estatísticos e modelos climáticos**. 2009, 193p. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Programa de Pós-graduação, Meio Ambiente e Recursos Hídricos da Universidade Federal de Pernambuco – UFMG, Belo Horizonte, 2009.

ALEXANDRE, G. R.; BAPTISTA, M. B.; NAGHETTINI, M. Estudo para identificação de tendência do regime pluvial na Região Metropolitana de Belo Horizonte a partir de métodos estatísticos. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto alegre-RS, v.15, p.115-126, 2010.

ALMEIDA, B. M.; JOSÉ, J. V.; DUARTE, S. N.; FRIZZONIE, J. A.; ARRAES, F. D.; PERBONE, A. Análise de tendência temporal da precipitação diária máxima no estado de São Paulo. **Water Resources and Irrigation Management**. Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Cruz das Almas. Instituto Nacional do Semiárido, Campina Grande, v.3, n.1, p.1-12, 2014.

ALVES, A. V. P.; SANTOS, G. B. S.; FILHO, F. C. M. M.; SANCHES, L. Análise dos métodos de estimativa para os parâmetros das distribuições de Gumbel e GEV em eventos de precipitações máximas na cidade de Cuiabá-MT. **Revista Eletrônica de Engenharia Civil - REEC**, v.6, n.1, p.32-43, 2013.

ALVES, J. M. B.; REPELLI, C. A. A variabilidade pluviométrica no setor Norte do Nordeste e os eventos El Niño-Oscilação Sul – ENOS. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.7, n2, p.83-592, 1992.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS – ANA. **Orientações para consistência de dados pluviométricos**. 19p. Brasília, 2012.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS – ANA; PROGRAMA DAS NAÇÕES UNIDAS PARA O MEIO AMBIENTE – PNUMA. **GEOBrasil – Recursos Hídricos**. Componente da Série de Relatórios sobre o Estado e Perspectivas do Meio Ambiente no Brasil, 60p. MMA, Brasília, 2007.

AGÊNCIA PERNAMBUCANA DE ÁGUAS E CLIMA – APAC. **Manual de operação da sala de situação**, Recife-PE, 2012.

ANDREOLI, R. V.; KAYANO, M. T. A importância relativa do Atlântico tropical sul e Pacífico leste na variabilidade de precipitação do Nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.22, n.1, p.63-74, 2007.

ANJOS, R. J. **Aguaceiro em Recife: uma climatologia de 36 anos**. In: Anais do X Congresso Brasileiro de Meteorologia e VIII Congresso da FLISMET, Brasília, 1998.

ANJOS, R. J.; DALLANTONIA, A. M.; SILVA, B. B.; SILVA, F. F. A. **Tendência climática no regime de precipitação da cidade do Recife-PE**. In: Anais do IV Workshop de Mudanças Climáticas e Recursos Hídricos do Estado de Pernambuco e I Workshop Internacional sobre Mudanças Climáticas e Biodiversidade. ITEP/UFPE, Recife, 2012.

- ANJOS, S. L.; SILVA, C. S. B.; LIMA, C. H. L. **Modelagem estatística não estacionária de cheias sazonais no sudeste brasileiro**. In: Anais do XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Bento Gonçalves, 2013.
- ARAUJO, W. S.; BRITO, J. I. B. Índices de tendências de mudanças climáticas para os estados da Bahia e Sergipe por meio de índices pluviométricos diários e sua relação com TSM do Pacífico e Atlântico. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.26, n.4, p.541-554. 2011.
- AHANI, H.; KHERAD, M.; KOUSARI, M. R.; ZADEH, M. R.; KARAMPOUR, M. A.; EJRAEE, F.; KAMALI, S. An investigation of trends in precipitation volume for the last three decades in different regions of fars province, Iran. **Theoretical and Applied Climatology**, v.109, p.361–382. 2012.
- ASSIS, J. M. O.; SOBRAL, M. G. M. Análise de detecção de tendências no padrão pluviométrico na bacia hidrográfica do Rio Capibaribe. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v.2, p.320-331, 2012.
- ASSIS, J. M. O.; SOBRAL, M. C. M.; SOUZA, W. M. Análise de detecção de variabilidades climáticas com base na precipitação nas bacias hidrográficas do Sertão de Pernambuco. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v.3, p.630-645, 2012.
- ASSIS, J. M. O.; SILVA, R. F.; SOUZA, W. S. IRMÃO, R. A.; CORREIA, A. M. Tendências climáticas observadas no período chuvoso no Sertão de Pernambuco. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v.6, p.211-222, 2013.
- BACK, A. J. Aplicação de análise estatística para identificação de tendências climáticas. **Revista Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.36, n5, p.717-726, Brasília, 2001.
- BARUA, S.; MUTTIL, N.; NG, A. W. M.; PERERA, B. J. C. Rainfall trend and its implications for water resource management within the Yarra River catchment, Australia. **Hydrological Processes**, v.27, p.1727–1738, 2013.
- BERALTO, M. A.; MARTINS, E. J.; CORDEIRO, A. P. A.; ODERICH, E. H. **Tendência observada da precipitação pluvial anual e estacional do estado do Rio Grande do Sul e relação com a temperatura da superfície do mar do oceano Pacífico**. In: Anais do XV Congresso Brasileiro de Agrometeorologia, Aracaju, 2007.
- BERTONI, J. C.; TUCCI, C. E. M. **Precipitação**. Hidrologia – Ciência e Aplicação. Cap. 5. Org. TUCCI, C. E. M. Ed. UFRGS/ABRH, Porto Alegre, 2007.
- BEZERRA, A. C. N.; CAVALCANTI, E. P. Energia estática sobre o norte e nordeste do Brasil relacionada com a temperatura da superfície do mar. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.23, n.2, p.239-263, 2008.
- BUIHAND, T. A. Some methods for testing the homogeneity of rainfall. **Journal of Hydrology**. v.58. p.11-27, 1982.
- BURN, D. H.; TALEGHANI, A. Estimates of changes in design rainfall values for Canada. **Hydrological Processes**, v.27, p.1590-1599, 2012.

- BURN, D. H.; SHARIF, M.; ZHANG, K. Detection of trends in hydrological extremes for Canadian watersheds. **Hydrological Processes**. v.24, p1781–1790, 2010.
- CAVALCANTI, I. F. A.; FERREIRA, N. J.; SILVA, M. G. A. J.; DIAS, M. A. F. S. **Tempo e Clima no Brasil**. Ed. Oficina de Texto. p.463, São Paulo-SP, 2009.
- CENTRO NACIONAL DE MONITORAMENTO E ALERTAS DE DESASTRES NATURAIS – CEMADEN. **Municípios monitorados – Nordeste**. Disponível em: <[www.cemaden.gov.br/municipiosprio.php#](http://www.cemaden.gov.br/municipiosprio.php#)>. Acesso em 22/02/2015.
- CHIEW, F.; SIRIWARDENA, L. **Trend/change detection software – User Guide**. CRC for Catchment Hydrology. Australia, 2005.
- CHOWDHURY, R. K.; BEECHAM, S. Australian rainfall trends and their relation to the southern oscillation index. **Hydrological Processes**, v.24, p.504–514, 2010.
- CHU, H. J.; PAN, T. Y.; LIOU, J. J. Change-point detection of long-duration extreme precipitation and the effect on hydrologic design: a case study of south Taiwan. **Stochastic Environmental Research and Risk Assessment**, v.26, p.1123–1130, 2012.
- CABRAL, J. J. S. P.; ALENCAR, A. V. **Recife e a convivência com as águas**. In: Gestão do Território e Manejo Integrado das águas urbanas. Ministério das Cidades. Brasília, 2005.
- COELHO, G. A.; JUNIOR, A. V. M. **Análise da não estacionariedade da precipitação na cidade de São Paulo, SP**. In: Anais do XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, ABRH, Bento Gonçalves, 2013.
- CORDERY, I.; R. MEHROTRA, R.; NAZEMOSADAT, M. J. How reliable are standard indicators of stationarity? **Stochastic Environmental Research and Risk Assessment**, v.21, p.765–771, 2007.
- COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERIAIS – CPRM. **Enchentes de Alagoas em junho de 2010. Tomo I: Levantamento de campo**. Projeto de Monitoramento de Eventos Extremos. CPRM – Serviço Geológico do Brasil, Rio de Janeiro, 2010.
- COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERIAIS – CPRM. **Mapas de isoietas de precipitações médias anuais. Atlas Pluviométrico do Brasil e Chuvas intensas**. Serviço Geológico do Brasil. Disponível em: <[www.cprm.gov.br](http://www.cprm.gov.br)>. Acesso em 26/10/2014.
- DAS, N. M, S.; SIMONOVIC, S. P. **The comparison of GEV, Log-Pearson Type 3 and Gumbel Distributions in the upper thames river watershed under global climate models**. University of Western Ontario London, 52p, Canada, 2011.
- DIÁRIO DE PERNAMBUCO. **História das enchentes em Pernambuco**. Disponível em: <[www.old.pernambuco.com/diario/2004/02/08/urbana9\\_2.html](http://www.old.pernambuco.com/diario/2004/02/08/urbana9_2.html)>. Acesso em 05/03/2015.
- DIÁRIO DE PERNAMBUCO. **APAC prevê chuvas acima de 30 mm nas próximas 24 horas**. Disponível em: <[www.diariodepernambuco.com.br/app/noticia/vida-interna\\_vidaurbana,528205/apac-preve-chuvas-acima-de-30-mm-nas-proximas-24-horas.shtml](http://www.diariodepernambuco.com.br/app/noticia/vida-interna_vidaurbana,528205/apac-preve-chuvas-acima-de-30-mm-nas-proximas-24-horas.shtml)>. Acesso em 05/03/2015a.

DIÁRIO DE PERNAMBUCO. **APAC emite alerta de chuvas fortes para o Grande Recife e Zona da Mata.** Disponível em: [www.diariodepernambuco.com.br/app/noticia/vida-urbana/2015/03/04/interna\\_vidaurbana,564055/apac-emite-alerta-de-chuvas-fortes-para-o-grande-recife-e-zona-da-mara.shtml](http://www.diariodepernambuco.com.br/app/noticia/vida-urbana/2015/03/04/interna_vidaurbana,564055/apac-emite-alerta-de-chuvas-fortes-para-o-grande-recife-e-zona-da-mara.shtml). Acesso em 05/03/2015b.

DAMÉ, R. C. F.; TEIXEIRA, C. F. A.; BACELAR, L. C. S.; WINKLER, A. S.; SANTOS, J. P. Monotonic trend and change points in southern Brazil precipitation. **Revista Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.33, n.2, p.258-268, 2013.

DAVIDSON, A.C.; HINKLEY, D.V. **Bootstrap methods and their application.** Cambridge University Press, 582p, England, 1997.

DU, J.; HE, F.; ZHANG, Z.; SHI, P. Precipitation change and human impacts on hydrologic variables in Zhengshui river basin, China. **Stochastic Environmental Research and Risk Assessment**. v.25, p.1013–1025, 2011.

DU, J.; FANG, J.; XU, W.; SHI, P. Analysis of dry/wet conditions using the standardized precipitation index and its potential usefulness for drought/flood monitoring in hunan province, China. **Stochastic Environmental Research and Risk Assessment**, v.27, p.377–387, 2013.

EFRON, B.; TIBSHIRANI, R. J. **An introduction to the bootstrap.** First CRC Press reprint. 436p. 1998.

EFRON, B. *Bootstrap Methods: Another Look at the Jackknife.* The Annals of Statistics. v.7, n.1 (Jan., 1979), p.1-26. 1979.

ESTATCAMP CONSULTORIA ESTATÍSTICA. **Portal Action** Disponível em: [www.portalaction.com.br/manual-action/15-testes-de-normalidade](http://www.portalaction.com.br/manual-action/15-testes-de-normalidade). Acesso em: 26/03/2015.

FARIAS, R. F. L.; NÓBREGA, R. S. **Tendência espacial e temporal da precipitação pluviométrica em Pernambuco.** In: Mudanças climáticas e Impactos ambientais. Org. Galvínio, J. D. Ed. Universitária, UFPE, Cap. 15, p.251-264, Recife, 2010.

FERREIRA, A. G.; MELLO, N. G. S. Principais sistemas atmosféricos atuantes sobre a região nordeste do Brasil e a influência dos oceanos pacífico e atlântico no clima da região. **Revista Brasileira de Climatologia**, v1, n.1. p.15-28, 2005.

FRANCO, C. S.; MARQUES, R. F. P. V.; OLIVEIRA, M. A. S.; OLIVEIRA, L. F. C. Distribuição de probabilidades para precipitação máxima diária na bacia hidrográfica do rio Verde, Minas Gerais. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. v.18, n.7, p.735–741, Campina Grande, 2014.

FU, G.; BARBER, M. E.; CHEN, S. Hydro-climatic variability and trends in Washington State for the last 50 years. **Hydrological Processes**. v.24, p.866–878, 2010.

GÓIS, V. C.; CIRILO, J. A. Geração de base de dados espaciais para estudos de drenagem urbana na região metropolitana de Recife, Pernambuco. **Revista Brasileira de Cartografia**, Sociedade Brasileira de Cartografia, Geodésia, Fotogrametria e Sensoriamento Remoto, n.63/4, p.555-565, 2011.

GRAYSON, R.B.; ARGENT, R.M.; NATHAN, R.J.; MCMAHON, T.A.; MEIN, R. **Hydrological recipes: estimation techniques in Australian hydrology**. Cooperative Research Centre for Catchment Hydrology, 125 p., Australia, 1996.

GRUBB, H.; ROBSON, A. **Exploratory/visual analysis**. Cap. 4. World Climate Programme – Water, Detecting trend and other change hydrological data. WMO/UNESCO, WCDMP-45, WMO, p17-45. Genebra, 2000.

GUO, J.; GUO, S.; LI, Y.; CHEN, H.; LI, T. Spatial and temporal variation of extreme precipitation indices in the Yangtze river basin, China. **Stochastic Environmental Research and Risk Assessment**, v. 27, p.459–475, 2013.

HAYLOCK, M. R.; PETERSON, T. C.; ALVES, L. M.; AMBRIZZI, T.; ANUNCIACÃO Y. M. T.; BAEZ, J.; BARROS, V. R.; BERLATO, M. A.; CORONEL, G.; GRACIA, VJ.; GRIMM, A. M.; KAROLY, D.; MARENGO, J. A.; MARINO, M. B.; MONCUNILL, D. F.; NECHET, D.; QUINTANA, J.; REBELLO, E.; RUSTICUCCI, M.; SANTOS, J. L.; TREBEJO, I.; VINCENT, L. A. **Trends in total and extreme South American rainfall 1960-2000 and links with sea surface temperature**. **International Journal of Climate**. v.19, p.1490-1512, 2006.

HAMED, K. H. Trend detection in hydrologic data: The Mann–Kendall trend test under the scaling hypothesis. **Journal of Hydrology**. v.350, p.350 – 363, 2008.

HOLANDA, C. V. M; OLIVEIRA, E. **Programa para homogeneização de dados – PROHD**. In: Anais do Simpósio de Hidrologia, p.810-845, ABRH. Brasília, 1979.

HUANG, j.; ZHANG, J.; ZHANG, Z.; XU, C. Y. Spatial and temporal variations in rainfall erosivity during 1960–2005 in the Yangtze river basin. **Stochastic Environmental Research and Risk Assessment**, v.27, p.337–351, 2013.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Censo demográfico de 2010**. Disponível em: <[www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/censo2010/](http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/censo2010/)>. Acesso em 03/10/2013.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Mapas temáticos e murais**. Disponível em: <[www.geofp.ibge.gov.br/mapas\\_tematicos/mapas\\_murais/](http://www.geofp.ibge.gov.br/mapas_tematicos/mapas_murais/)>. Acesso em 22/09/2014.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE – IPCC. Cambridge Univ. Press. Cambridge – England, 2001, 2007, 2013.

JIANG, F. Q.; HU, R, J.; WANG, S. P.; ZHANG, Y. W.; TONG, L. Trends of precipitation extremes during 1960–2008 in Xinjiang, the Northwest China. **Theoretical and Applied Climatology**, v.111, p.133–148, 2013.

JOSHI, S.; KUMAR, K.; JOSHI, V.; PANDE, B. Rainfall variability and indices of extreme rainfall analysis and perception study for two stations over Central Himalaya, India. **Nat Hazard**, v.72, p.361-374, 2014.

JORNAL DO COMÉRCIO. **APAC prevê chuva com intensidade acima dos 30 mm pelas próximas horas no Recife e na RMR**. Disponível em: <[www.jconline.ne10.uol.com.br/canal/cidades/geral/noticia/2014/07/27/apac-preve-chuva-com-](http://www.jconline.ne10.uol.com.br/canal/cidades/geral/noticia/2014/07/27/apac-preve-chuva-com-)

intensidade-acima-dos-30mm-pelas-proximas-horas-no-recife-e-rmr-137484.php>. Acesso em: 05/03/2015.

JÚNIOR, C. R. F.; PEDROSA, V. A.; SOUZA, V. C. B. **Reflexões sobre a cheia de junho de 2010 nas bacias do rio Mundaú e Paraíba**. In: Anais do X Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos do Nordeste. Fortaleza, 2010.

JÚNIOR, J. E. F. F.; VIDAL, D. H. F.; JOHNSON, R. M. F.; PIMENTEL, I. M. C. **Análise da variabilidade pluviométrica na porção fluminense da bacia do rio Paraíba do Sul**. In: Anais do XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, ABRH, Bento Gonçalves, 2013.

JURAS. **Mudança do Clima: principais conclusões do 5º Relatório do IPCC**, Consultoria Legislativa da Câmara dos Deputados, Nota Técnica, Brasília, 2013.

KHALIQ, M, N.; OARDA, T. B. M. J.; ONDO, J. C.; GACHON, P.; BOBÉE, B. Frequency analysis of a sequence of dependent and/or non-stationary hydro-meteorological observations: A review. **Journal of Hydrology**, v.329, p.434-552, 2006.

KHALIQ, M, N.; OUARDA, T. B. M. J.; GACHON, P.; SUSHAMA, L.; ST-HILAIRE, A. Identification of hydrological trends in the presence of serial and Cross correlations: a review of selected methods and their application to annual flow regimes of Canadian rivers. **Journal of Hydrology**, v.30, p.117-130, 2009.

KIM, S. H.; ALEXOPOULOS, C.; KWOK-LEUNG TSUI, K. L.; WILSON, J. R. A Distribution-free Tabular CUSUM chart for Autocorrelated Data. **IIE Transactions** v.39, p317-330, 2007.

KUNDZEWICZ, Z. W.; ROBSON, A. Change detection in hydrological records - a review of the methodology / revue méthodologique de la détection de changements dans les chroniques hydrologiques. **Hydrological Sciences Journal**, v.49:1, p.7-19, 2004.

KUNDZEWICZ, Z. W.; ROBSON, A. **Setting the scene**. Cap.1. World Climate Programme – Water. Detecting trend and other change hydrological data, WMO/UNESCO, WCDMP-45, WMO, p.1-8, Genebra, 2000.

LAN, F.; LU CHANGHE, L.; BIAO, Y.; ZHAO, C. Long-term trends of precipitation in the north China plain. **Journal of Geographical Sciences**, v.22, p.989-1001, 2012.

LANNA. **Elementos de estatística e probabilidades**. In: Hidrologia – Ciência e Aplicação. Cap. 4. Org. TUCCI, C. E. M. Ed. UFRGS/ABRH, p.70-164. Porto Alegre-RS, 2007.

LAVADO-CASIMIRO, W.; J. C. ESPINOZA. Impactos de el niño y la niña en las lluvias del Perú (1965-2007). **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.29, n.2, p.171 – 182, 2014.

LEE, J.; ALEXOPOULOS, C.; GOLDSMAN, D.; KIM, S. H.; TSUI, K. L.; WILSON, J. R. Monitoring, autocorrelated processes using a distribution-free tabular CUSUM chart with automated variance estimation. **IIE Transactions**, v.41, p.979–994, 2009.

LEOTTI, V. B.; BIRCK, A. R.; RIBOLD, J. **Comparação dos testes de aderência à normalidade Kolmogorov-Smirnov, Anderson-Darling, Cramer–Von Mises e Shapiro-Wilk por simulação**. In: Anais do 11º Simpósio de Estatística Aplicada à Experimentação Agrônômica e a 50ª Reunião Anual da Região Brasileira da Sociedade Internacional de Biometria – RBRAS. Londrina, 2005.

- LIANG, L.; LI, L.; LIU, Q. Precipitation variability in northeast China from 1961 to 2008. **Journal of Hydrology**, v.404, p.67–76, 2011.
- LIRA, A. M.; CABRAL, J. J. S.; JUNIOR, B. F. L. B.; ALENCAR, A. V. **Problemas de alagamentos na cidade de Recife: o caso do bairro Espinheiro**. In: Anais do XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, ABRH, São Paulo, 2007.
- LIU, X.; XU, Z.; YU, R. Trend of climate variability in China during the past decades. **Climatic Change** v.109, p.503–516, 2011.
- LIU, L.; XU, Z. X.; HUANG, J. X. Spatio-temporal variation and abrupt changes for major climate variables in the Taihu basin, China. **Stochastic Environmental Research and Risk Assessment**, v.26, p.777–791, 2012.
- LUO, Y.; LIU, S.; FU, S.; LIU, J.; WANG, G.; ZHOU, G. Trends of precipitation in Beijiang river basin, Guangdong province, China. **Hydrological Processes**, v.22, p.2377–2386, 2008.
- LUPIKASZA, E. B. Spatial and temporal variability of extreme precipitation in Poland in the period 1951–2006. **International Journal of Climatology**, v.30, p.991–1007, 2010.
- LUPIKASZA, E. B.; HÄNSEL, S.; MATSCHULLAT, J. Regional and seasonal variability of extreme precipitation trends in southern Poland and central-eastern Germany 1951–2006. **International Journal of Climatology**, v.31, p.2249–2271, 2011.
- MARCUZZO, F. F. N.; ROMERO, V. Influência do el niño e la niña na precipitação máxima diária do estado de Goiás. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.28, n.4, p.429 – 440, 2013.
- MARTINEZ, C. J.; MALESKI, J. J.; MILLER, M. F. Trends in precipitation and temperature in Florida, USA. **Journal of Hydrology**, v.452–453, p.259–281, 2012.
- MAUGET, S. Time series analysis based on running Mann-Whitney Z Statistics. **Journal of Time Series Analysis**, v.32, p.47–53, 2011.
- Mc CABE Jr, G. J.; WOLOCK, D. M. Climate change and the detection of trends in annual runoff. **Climate Research**, v.8, p.129–134, 1997.
- MELO, T. A. T.; COUTINHO, A. P.; CABRAL, J. S. P.; CIRILO, J. A.; ANTONINO, J. C. D. **Desafios para o manejo das águas pluviais na cidade do Recife – a contribuição da UFPE**. In: Anais do XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, ABRH, Bento Gonçalves, 2013.
- MENDES, M. F. A.; FRANCO, C. P. M.; SILVA, C. E. V.; GUIMARÃES, I. L.; BUONICONTRO, L. M. S.; SHIMODA, L. R.; VIEIRA, L. A. T. **Relação entre os quantis de chuvas máximas e o tamanho da amostra de dado**. In: Anais do XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, ABRH, Bento Gonçalves, 2013.
- MENDONÇA, F.; DANNI-OLIVEIRA, I. M. **Climatologia – noções básicas e climas do Brasil**. 206p. Ed. Oficina de Textos, São Paulo, 2007.
- MENEZES, H. E. A.; BRITO, J. I. B.; SANTOS, C. A. C.; SILVA, L. L. A relação entre a temperatura da superfície dos oceanos tropicais e a duração dos veranicos no estado da Paraíba. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.23, n.2, p.152–161, 2008.

- MINUZZI, R. B.; CARAMORI, P. H. Variabilidade climática sazonal e anual da chuva e veranicos no estado do Paraná. **Revista Ceres**, UFV, Viçosa-MG, v. 58, n.5, p. 593-602, 2011.
- MODARRES, R.; SILVA. Rainfall trend in arid regions de Iran, **Juornal Arid Environments**, v.70, n.2, p.344-355, 2007.
- MOURA, G. B. A.; ARAGÃO, J. O. R.; MELO, J. S. P.; SILVA, A. P. N.; GIONGO, P. R.; LACERDA, F. F. Relação entre a precipitação do leste do Nordeste do Brasil e a temperatura dos oceanos. **Revista brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.13, n.4, p.462-469, Campina Grande, 2009.
- NAGUETTINI, M.; PINTO, E. J. A. **Hidrologia Estatística**. CPRM-Serviço geológico do Brasil, 561p. Belo Horizonte-BH, 2007.
- NIMER, E. **Climatologia da Região Nordeste**. Climatologia do Brasil. IBGE, p.315-362, Rio de Janeiro, 1989.
- NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION – NOAA. Disponível em: [www.ncdc.noaa.gov/teleconnections/enso/indicators/sst.php#oni](http://www.ncdc.noaa.gov/teleconnections/enso/indicators/sst.php#oni). Acesso em 16/09/2014.
- NUNES, A. O. **Recursos hídricos na bacia do rio Sabor: evolução recente e relações com mudanças socioambientais**. In: Anais do 6º Congresso Ibérico Sobre Gestão e Planificação da Água. Vitória-Gasteiz, Espanha, 2008.
- OBREGÓN G.; MARENGO J. A. **Tendências de chuvas e temperaturas médias e extremas**. Caracterização do clima no século XX no Brasil. Relatório 2, Cap. 2. São Paulo, 2007.
- OGUNTUNDE, P. G.; ABIODUN, B.; LISCHIED, G. Rainfall trends in Nigeria, 1901–2000, **Journal of Hydrology**, n.411, p.207-218, 2011.
- ÖNÖZ, B.; BAYAZIT, M. Block bootstrap for Mann–Kendall trend test of serially dependent data. **Hydrological Processes**, v.26, p.3552–3560, 2012.
- ORTIZ, M. M. I.; OBEYSEKERA, J.; PARK, J.; RIMBLE, P.; BARNES, J.; PARK-SAID, W. P.; GADZINSKI, E. Historical trends in Florida temperature and precipitation. **Hydrological Processes**, v.27, p.2225-2246, 2013.
- PAL, I; AL-TABBAAB, A. *Regional changes in extreme monsoon rainfall deficit and excess in India*. **Dynamics of Atmospheres and Oceans**, n.49, p.206–214, 2010.
- PEGRAM, G. G. S. **Testing for change in variability and persistence in time series**. World Climate Program – Water, Cap. 9, WCDMP-45, WMO, Genebra, 2000.
- PFALTGRAFF, P. A. S. **Mapa de Suscetibilidade a deslizamento na Região Metropolitana do Recife**. Tese de Doutorado, Programa de Pós-graduação em Geociências da Universidade Federal de Pernambuco – UFPE, Recife. 2007.
- PINHEIRO, A.; GRACIANO, R. L. G.; SEVERO, D, L. Tendência das séries temporais de precipitação da região sul do Brasil, **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.28, n.3, p.281 – 290, 2013.

PREFEITURA DA CIDADE DO RECIFE – PCR. **Aspectos gerais**. Disponível em: <[www2.recife.pe.gov.br/a-cidade/aspectos-gerais/](http://www2.recife.pe.gov.br/a-cidade/aspectos-gerais/)>. Acesso em 19/02/2015.

PREUSS, S. L. C.; SILVA, A. A.; BRAGA, R. A. U.; CABRAL, J. S. P. **Adequação estrutural e ambiental para a drenagem urbana sustentável: o caso do Recife, Pernambuco**. In: Anais do XIX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, ABRH, Maceió, 2011.

PORTELA, M. M.; J. SANTOS; A. C. QUINTELA; C. M. VAZ; C. MARTINS. **About the trend detection in Portuguese long hydrologic time series and the climate change**. In: Regional Rainfall 2010, Regional Expert Meeting on Rainfall-Runoff Analysis and Climate Change at the Balkans. University of Belgrade. Sérvia, 2010.

RADZIEJEWSKI, M.; BÁRDOSSY, A.; KUNDZEWICZ, Z. W. **Phase randomisation for change detection in hydrological Data**. Cap.12. World Climate Programme – Water, Detecting trend and other change hydrological data. WCDMP-45, WMO, p.130-137, Genebra, 2000.

RAMALHEIRA, A.; PORTELA, M. M. FAEL, A, C. **Trend detection in the temporal pattern of the precipitation at different time scales - Application to a case study: the watershed of the stream gauging station of Torrão do Alentejo**. In: Anais do 2º Conferência Internacional de Engenharia Civil e 5º Conferência Internacional de Futuro Concreto. Covilha, Portugal, 2013.

RAMOS, M. R. **Influência das mudanças climáticas devido ao efeito estufa na drenagem urbana de uma grande cidade**, 2010, 179p. Tese de Doutorado. Programa de Pós-graduação da Universidade Federal de Pernambuco – UFPE, Recife, 2010.

ROBSON, A. **Analysis guidelines**. Cap.2. World Climate Programme – Water, Detecting trend and other change hydrological data. WCDMP-45, WMO, p.9-12, Genebra, 2000.

ROBSON, A.; CHIEW, F. **Detecting changes in extremes**. Cap. 6. World Climate Program – Water, Detecting trend and other change hydrological Data. WCDMP-45, WMO, p.86-89, Genebra, 2000.

ROBSON, A.; BÁRDOSSY, A.; JONES, D.; KUNDZEWICZ, Z. W. **Statistical Methods for Testing for Change**. Cap. 5. World Climate Program – Water, Detecting Trend and other Change Hydrological Data. WCDMP-45, WMO, p.46-82, Genebra, 2000.

ROMANO, E.; PETRANGELI, A. B.; PREZIOSI, E. **Spatial and time analysis of rainfall in the tiber river basin (Central Italy) in relation to discharge measurements (1920-2010)**. *Procedia Environmental Sciences*, n.7, p.258-263, 2011.

SALGUEIRO, J. H. P. B.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; MOURA, G. B. A.; COSTA, F. A. **Análise espacial das precipitações extremas máximas ocorridas no mês de maior pluviosidade na Região Metropolitana do Recife: uma abordagem sobre as chuvas intensas e os desastres naturais**. In: Anais do IX Simpósio de recursos Hídricos do Nordeste, ABRH, Fortaleza, 2010.

SANSIGOLO, C. A. Distribuições de extremos de precipitação diária, temperature máxima e mínima e velocidade do vento em Piracicaba-SP (1917-2006). **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.23, n.3, p.341-346, 2008.

SANTOS, C. A. C.; BRITO J. I. Análise dos índices de extremos para o semiárido do Brasil e suas relações com TSM e IVDN. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.22, n.3, p.303-312, 2007.

- SANTOS, J. F.; PORTELA, M. M. **Tendências em séries de precipitação mensal em Portugal continental: aplicação do teste de Mann-Kendall**. In: Anais do VIII Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos dos Países de Língua Oficial Portuguesa, São Paulo, 2007.
- SANTOS, C. A. C.; BRITO, J. I. B.; RAO, T. V. R.; MENEZES, H. E. A. Tendências dos índices de precipitação no estado do Ceará. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.24, n.1, p.39-47, 2009.
- SANTOS, G. G.; GRIEBELER, N. P.; OLIVEIRA, L. F. C. Chuvas intensas relacionadas à erosão hídrica. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. v.14, n.2, p.115–123. Campina Grande, 2010.
- SANTOS, C. A. C.; MANZI, A. O. Eventos extremos de precipitação no estado do Ceará e suas relações com a temperatura dos oceanos tropicais. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.26, n.1, p.157-165, 2011.
- SANTOS, C. A. C.; NEALE, C. M. U; RAO, T. V. R.; SILVA, B. B. Trends in indices for extremes in daily temperature and precipitation over Utah, USA. **International Journal of climatology**, v.31, p.1813-1822, 2011.
- SANTOS, C. A. C.; DANTAS, L. G.; MELO, M. M. M. S.; SANTOS, E. G. Trends in Indices for Extremes in Daily Precipitation over Idaho, USA. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v.4, p.852-862, 2012.
- SANTOS, P. F. C.; FARIAS, R. F. L.; NÓBREGA, R. S. **Análise das tendências de precipitação para o município de Vitória de Santo Antão**. In: Anais do IV Workshop de Mudanças climáticas e Recursos Hídricos do estado de Pernambuco e I Workshop Internacional sobre Mudanças Climáticas e Bio diversidade. ITEP/UFPE, Recife, 2012a.
- SANTOS, C. A. C.; BRITO, J. I. B.; JUNIOR, C. H. F. S.; DANTAS, L. G. Trends in precipitation extremes over the northern part of Brazil from ERA40 dataset. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v.4, p.836-851, 2012b.
- SANTOS, C. A. C.; SATYAMURTY, P.; SANTOS, E. M. Tendências de índices de extremos climáticos para a região de Manaus-AM. **Revista Acta Amazônica**, v.42, n.3, p.329-336. 2012c.
- SANTOS, C. A. C.; SATYAMURTY, P.; GOMES, O. M.; SILVA, L. E. M. G. Variability of extreme Climate indices at Rio Claro, São Paulo, Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia** v.27, n.4, p.395-400, 2012d.
- SANTOS, B. B.; VITTI, D. M. C.; FLÁVIA, F. M, T.; MAUAD, F. F. **Estudo da estacionariedade das vazões do Ribeirão do Feijão, São Carlos – SP**. In: Anais do XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, ABRH, Bento Gonçalves, 2013.
- SANTOS, S. M. S.; ASSIS, J. M. O.; SOUZA, W. M. Tendências de mudanças climáticas na bacia do Rio Una, Pernambuco – Brasil. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v.7, n.2, p.243-257, 2014.
- SEARCY, J. K.; HARDISON, C. H. **Double-mass curve**, Manual de Hydrology: Part 1, General Surface – Water techniques, USGS, USA, 1960.

SECRETARIA DE ESTADO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS HÍDRICOS – SEMARH – AL. **Plano Estadual de Recursos Hídricos do Estado de Alagoas – PERH-AL**, Maceió, 2010.

SECRETARIA DE ESTADO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA E DO MEIO AMBIENTE – SECTMA – PB. **Plano Estadual de Recursos Hídricos da Paraíba – PERH-PB**. Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba – AESA. João Pessoa, 2006.

SECRETARIA DE CIÊNCIAS, TECNOLOGIA E MEIO AMBIENTE DE PERNAMBUCO – SECTMA – PE. **Atlas de bacias hidrográficas de Pernambuco**. Recife, 2006.

SECRETARIA DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA E DO MEIO AMBIENTE DO ESTADO DE PERNAMBUCO – SECTMA – PE. **Plano Estadual de Recursos Hídricos de Pernambuco – PERH-PE**. Recife, 1998.

SECRETARIA EXECUTIVA DE DEFESA CIVIL DO RECIFE – SEDEC . Disponível em: [www2.recife.pe.gov.br/secretarias-e-orgaos/secretarias/secretaria-executiva-defesa-civil/](http://www2.recife.pe.gov.br/secretarias-e-orgaos/secretarias/secretaria-executiva-defesa-civil/). Acesso em: 22/02/2015.

SILVA, V. P. R.; MACIEL, G. F.; GUEDES, M. J. F. **Estudo de tendência da precipitação do estado do Ceará**. In: Anais do Congresso Brasileiro de Meteorologia. Brasília, 1998.

SILVEIRA, C. S.; FILHO, F. A. Z.; ALVES, B. C. C.; LÁZARO, Y. M. A. **Análise da precipitação dos modelos do (IPCC-AR4) no nordeste setentrional brasileiro para o cenário A1B no século XXI**. In: Anais do XIX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Maceió, 2011.

SOUSA, F. A. S.; MORAIS, H. F.; SILVA, V. P. R. Influência da urbanização no clima da cidade de Campina Grande-PB. **Revista Brasileira de Geografia Física** n.1, p.134-145, 2011.

SOUZA, W. M. **Impactos socioeconômicos e ambientais dos desastres associados às chuvas na cidade do Recife-PE**, 2011, 121p. Tese de doutorado, Programa de Pós-graduação da Universidade Federal de Pernambuco – UFPE, Recife, 2011.

SOUZA, W. M.; AZEVEDO, P. V. Índice de detecção de mudanças climáticas derivados da precipitação pluviométrica e das temperaturas em Recife-PE. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v.2, p.320-331, 2012.

SUPERINTENDÊNCIA DE DESENVOLVIMENTO DO NORDESTE – SUDENE. **Dados pluviométricos mensais do Nordeste - Estado de Pernambuco – Séries Pluviométricas**. Nº 6. 363p. Recife, 1990.

TANK, A. M. G.; ZWIRS, F. W.; ZHANG, X. **Guidelines on analysis of extremes in a changing climate in support of informed decisions for adaptation**. Climate Data and Monitoring, WCDMP-72, WMO, Genebra. 2009.

VAZ, C. M. **Análise de tendências em séries de precipitação diária máxima anual**. Dissertação de Mestrado. Universidade Técnica de Lisboa, IST, Portugal, 2008.

WANDERLEY, H. S.; SEDIYAMA, G. C.; ALENCAR, F. B. J. L.; DELGADO, R. C. Variabilidade da precipitação no Sertão do São Francisco, estado de Alagoas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola**, v.17, n.7, p.790-795, 2013.

WANG, W.; SHAO, Q.; PENG, S.; ZHANG, Z.; XING, W.; AN, G.; YONG, B. Spatial and temporal characteristics of changes in precipitation during 1957–2007 in the Haihe river basin, China. **Stochastic Environmental Research and Risk Assessment**, v.25, p.881–895. 2011.

WANG, W.; SHAO, Q.; YANG, T.; PENG, S.; YU, Z.; TAYLOR, J.; XING, W.; ZHAO, C.; SUN, F. Changes in daily temperature and precipitation extremes in the Yellow river basin, China. **Stochastic Environmental Research and Risk Assessment**, v.27, p.401–421, 2013.

XIONG, L.; GUO, S. Trend test and change-point detection for the annual discharge series of the Yangtze River at the Yichang hydrological station. **Hydrological Sciences Journal**, v.49, p.99-112, 2004.

XU, Z. X.; TAKEUCHI, K.; ISHIDAIRA, H.; LI, J. Y. Long-term trend analysis for precipitation in Asian Pacific FRIEND river basins. **Hydrological Processes**, v.19, p.3517–3532, 2005.

ZHANG, X.; YANG, F. *RClimdex (1.0). User Guide*. Climate Research Branch Environment Canada. Downsview, 22p – Ontario, 2004.

ANEXO A

Pluviograma da cidade de Recife

---

## ANEXO A - CHUVA PRECIPITADA NA CIDADE DE RECIFE EM 11/08/1970

### 1) DADOS PLUVIOMÉTRICOS

Publicação dos dados meteorológicos do INMET através do BDMET conforme parte da divulgação pluviométrica mostrada na Figura A.1. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br>.

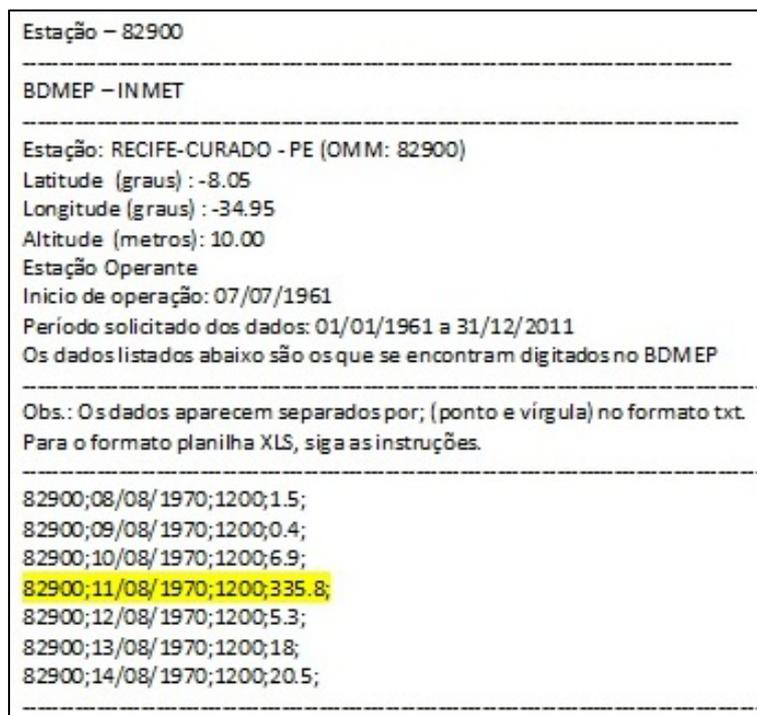


Figura A.1 – Publicação meteorológica do INMET em agosto de 1970

### 2) DADOS PLUVIOGRÁFICOS

A Figura A.2 apresenta dois pluviogramas com registros antes e depois do evento crítico. O pluviograma do lado direito foi utilizado pelo observador para atender dois dias, ou seja: das 09h00min do dia 10 às 09h00min do dia 11/08/1970 e 09h00min do dia 11 às 09h00min do dia 12/08/1970. As anotações gráficas que corresponderam ao dia 11/07/1970 destacaram-se pelo grande número de sifonamento registrado, os quais adicionaram valores acumulativos suficientes para definir 335,8 mm precipitados em 24 horas. Considerando uma duração aproximada de 13 horas, é possível estimar uma densidade pluviométrica de 25,8 mm/h. O pluviograma do lado esquerdo está sendo apresentado para complementação dos esclarecimentos.

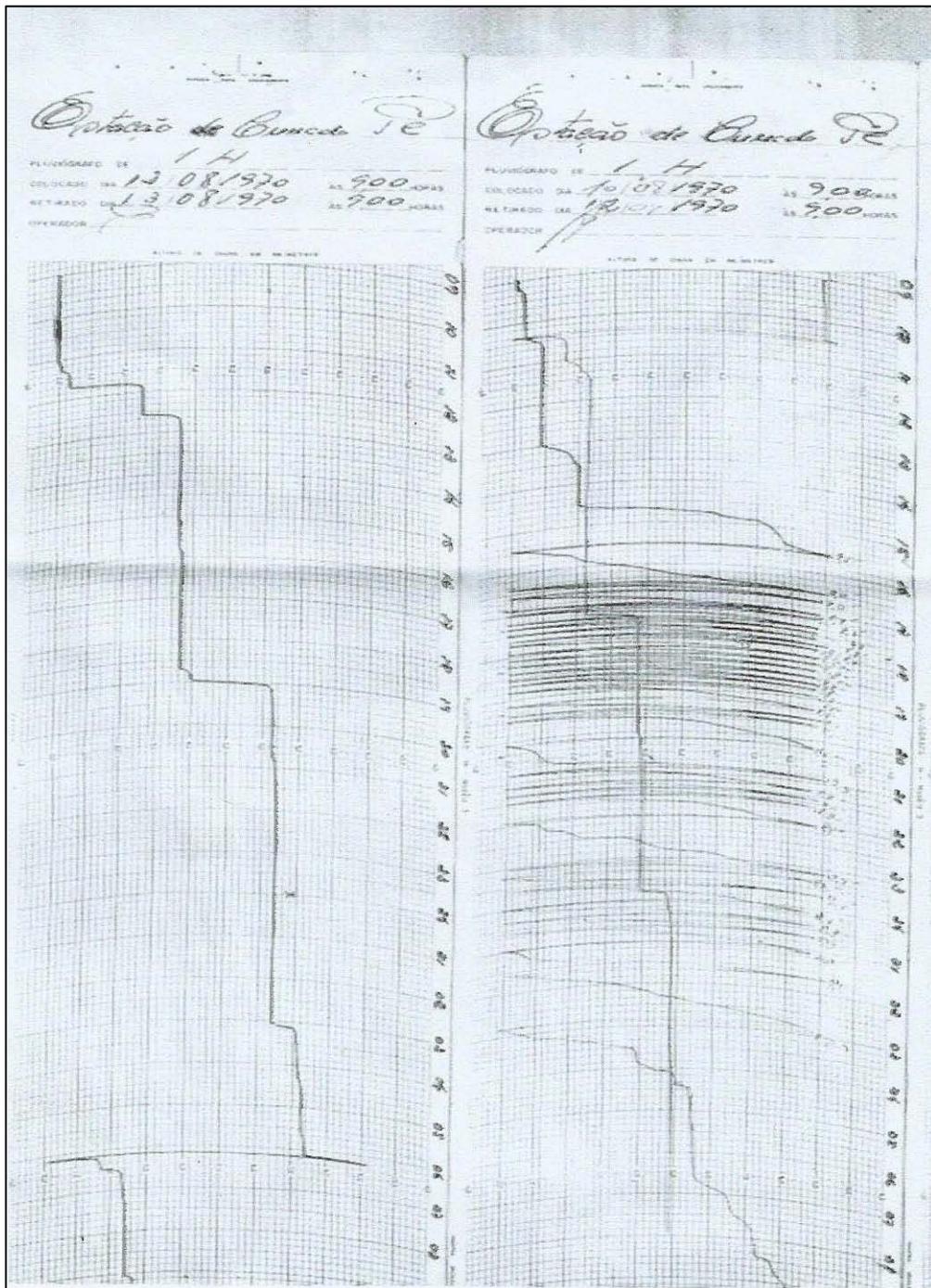


Figura A.2 – Pluviograma do dia 10 ao dia 13/08/1970 na estação de Recife

ANEXO B

Curvas dupla-massa

---

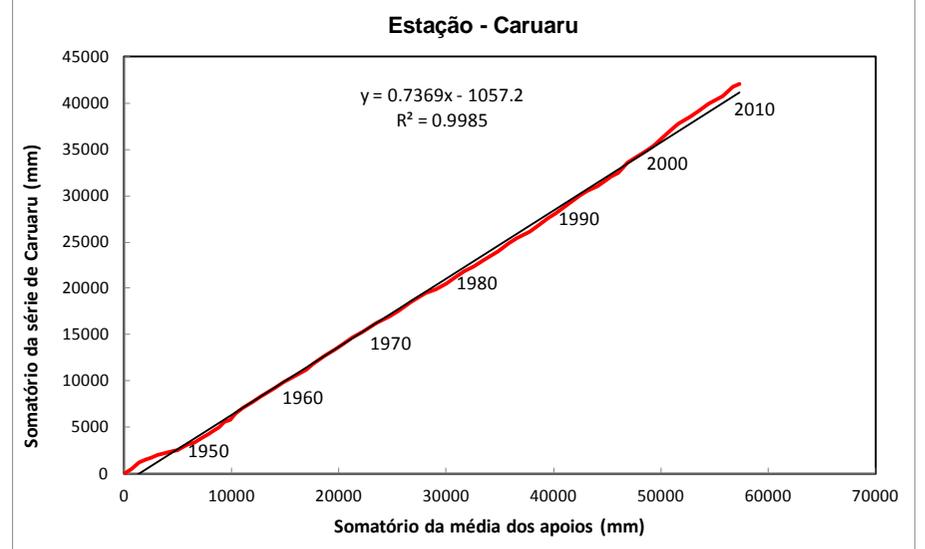
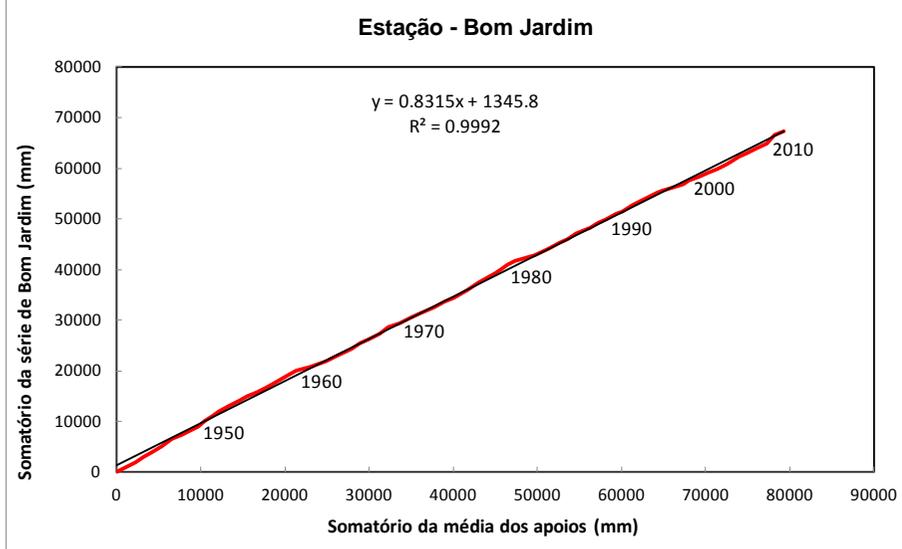
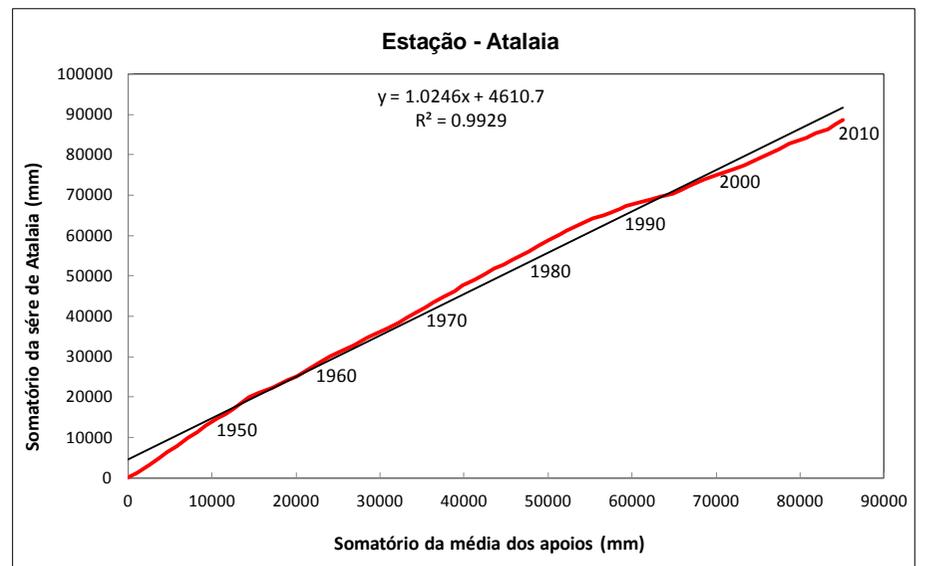
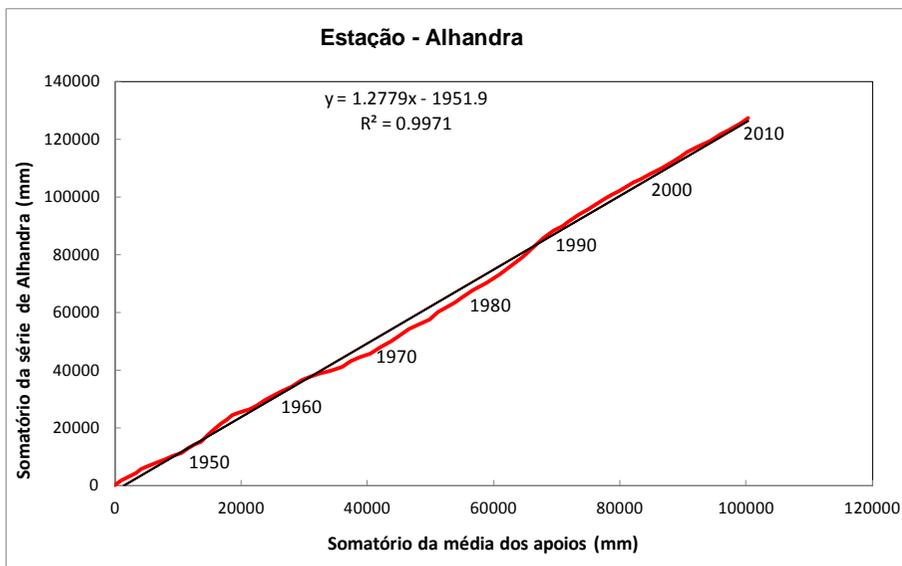


Figura B.1 – Ajustamento das séries às curvas de dupla-massa

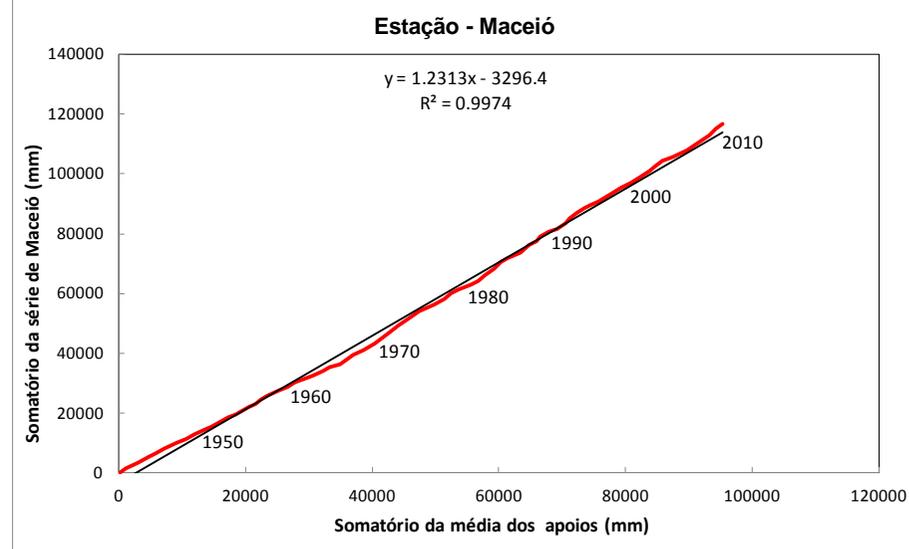
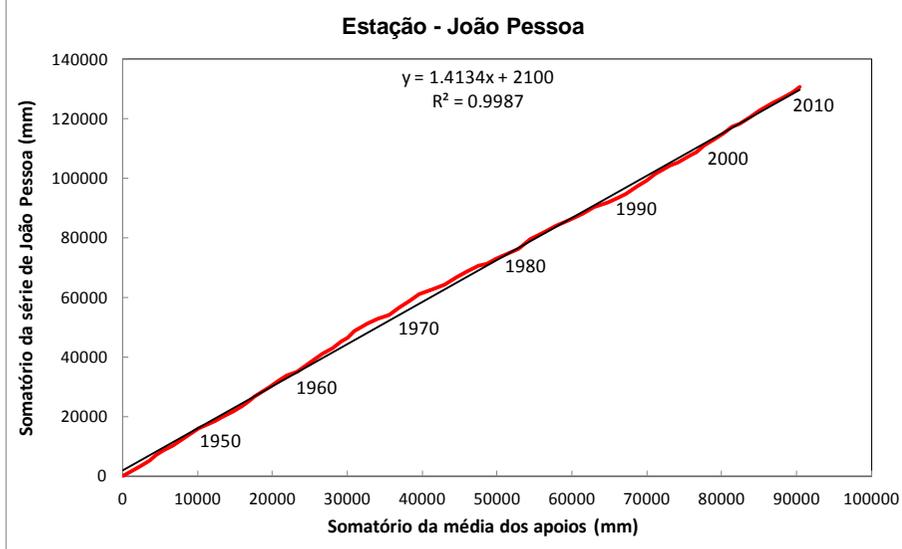
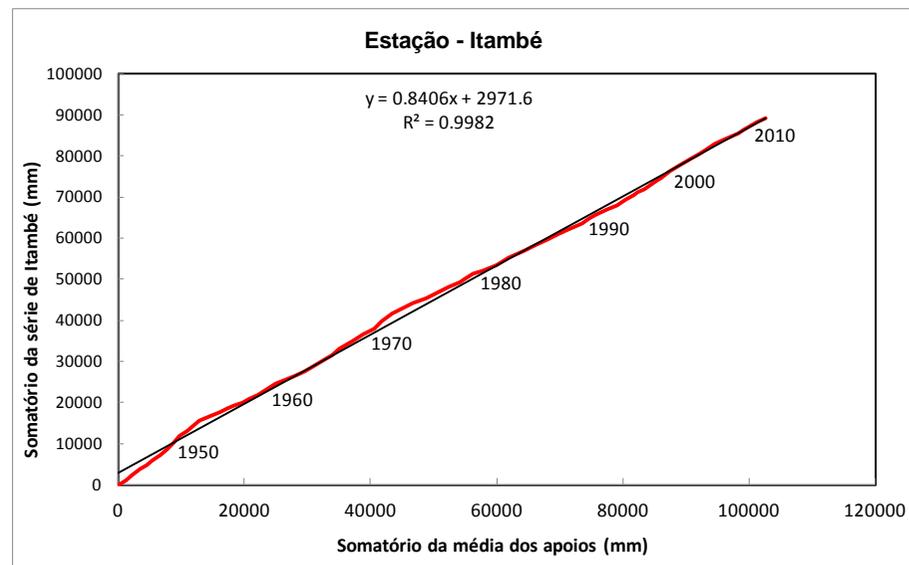
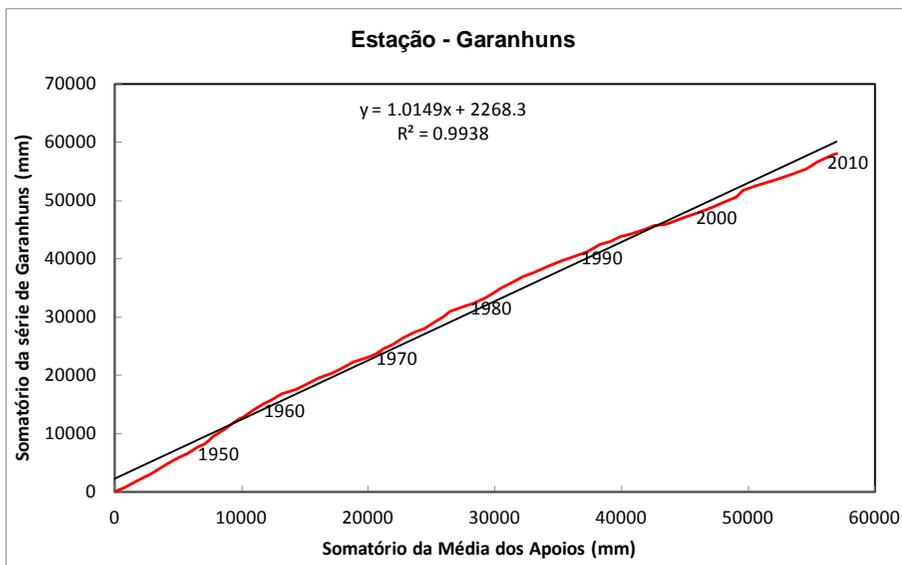


Figura B.2 – Ajustamento das séries às curvas de dupla-massa

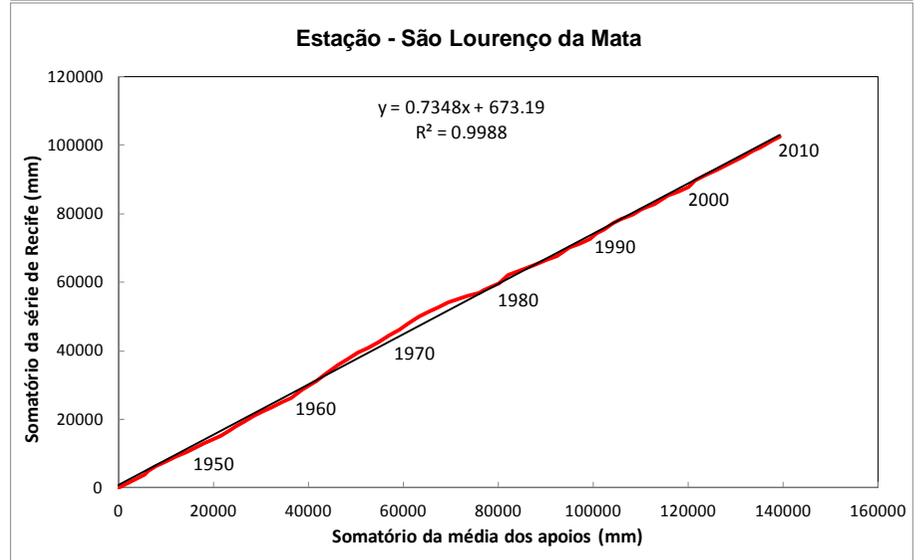
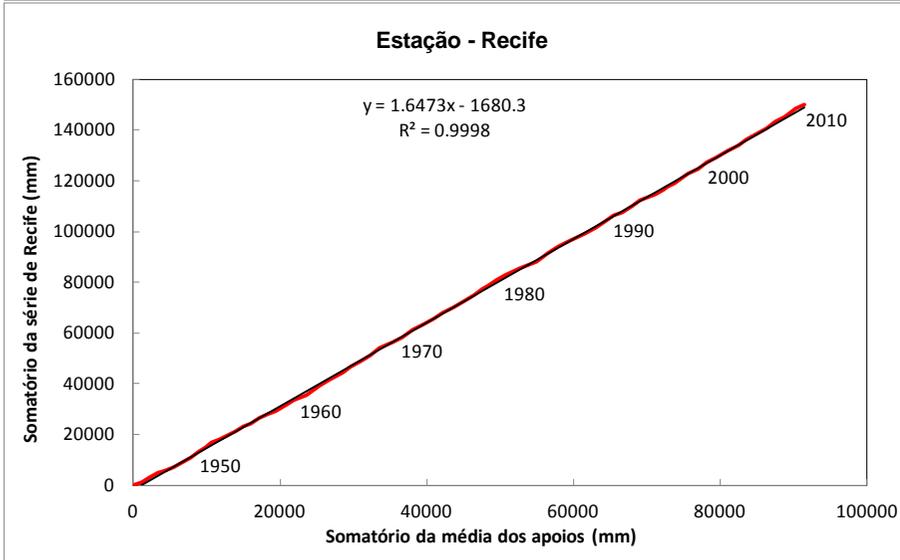
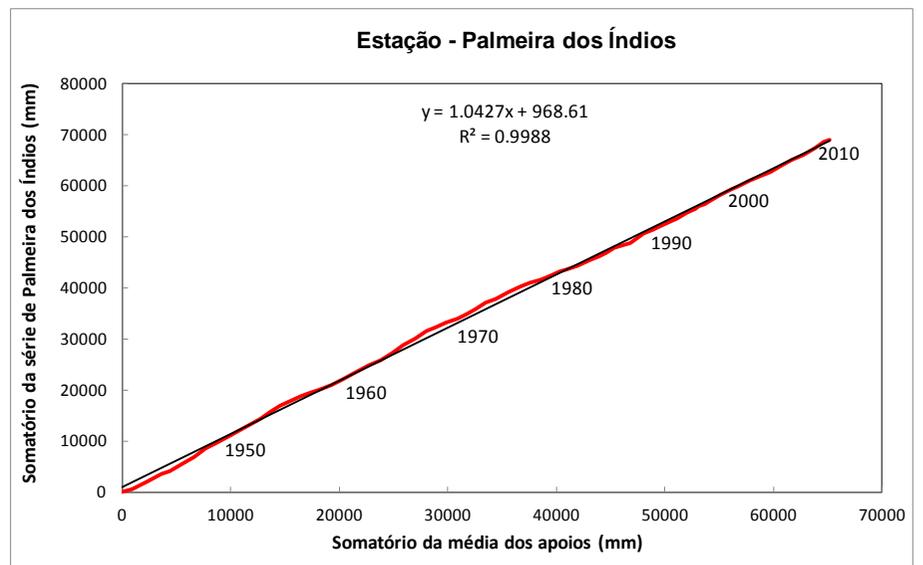
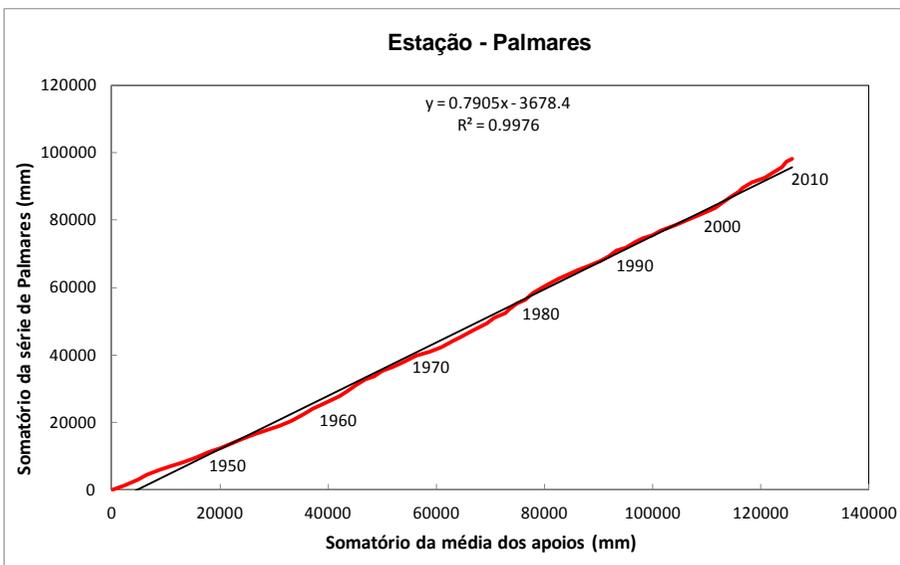


Figura B.3 – Ajustamento das séries às curvas de dupla-massa

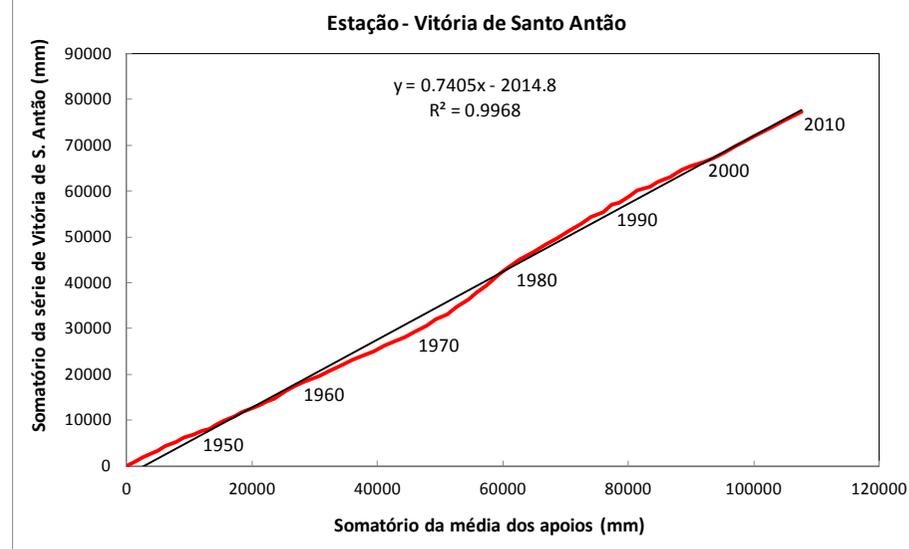
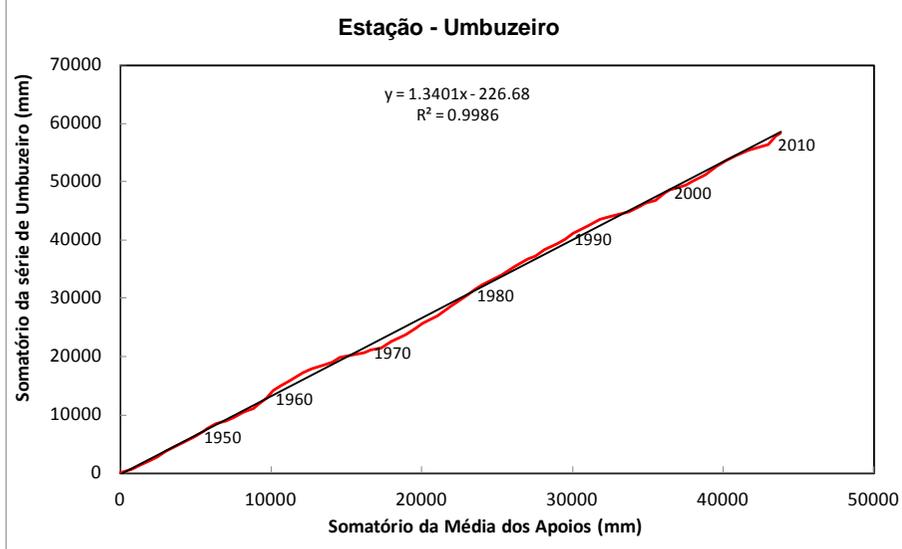
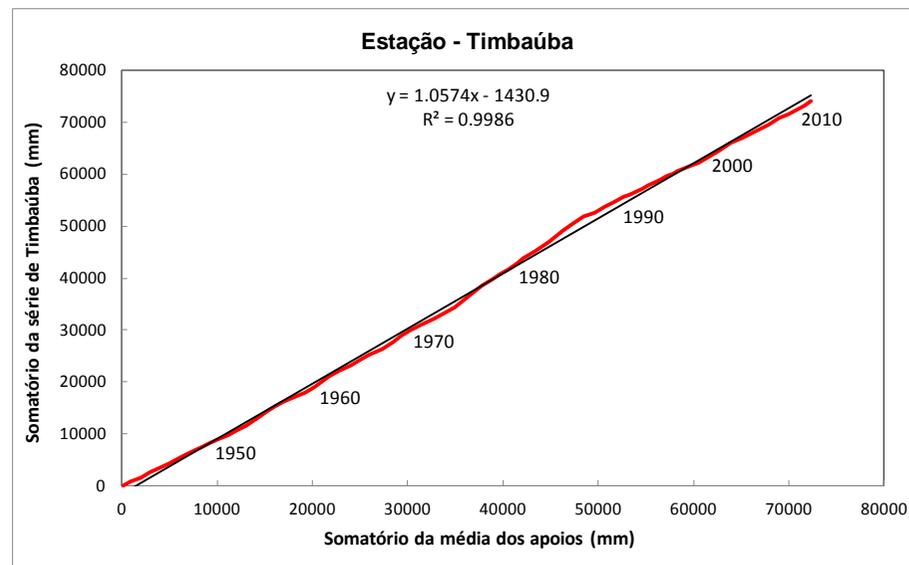
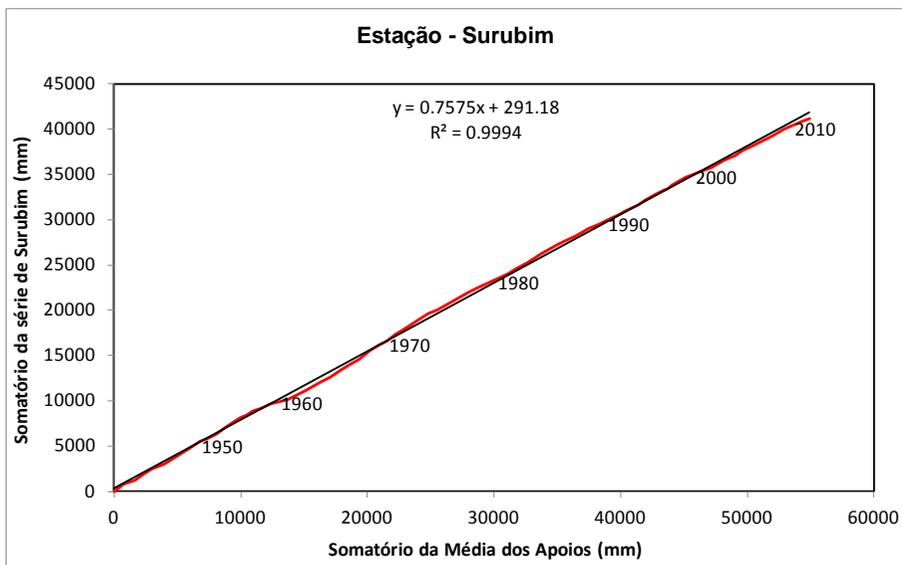


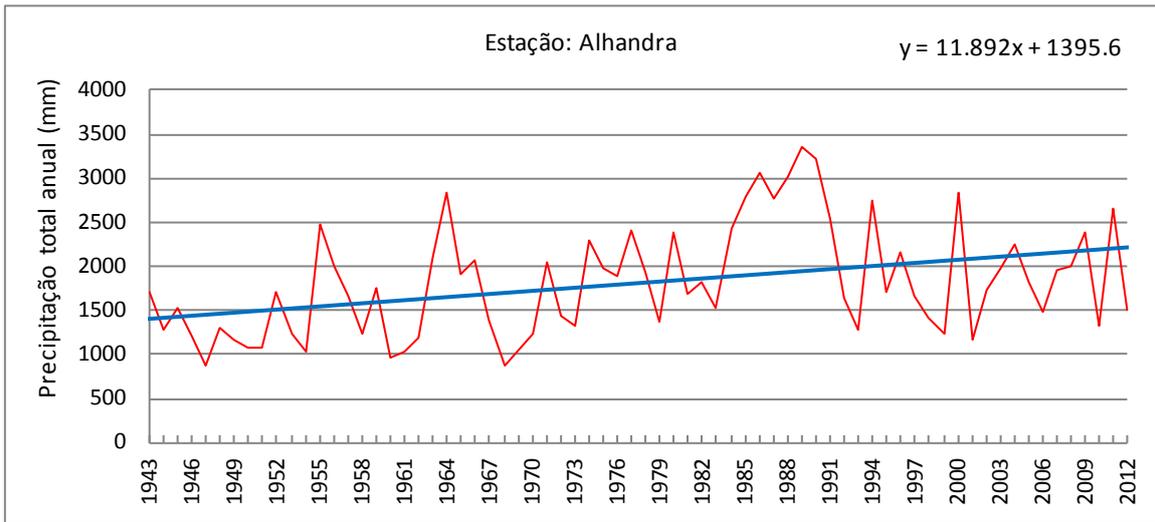
Figura B.4 – Ajustamento das séries às curvas de dupla-massa

ANEXO C

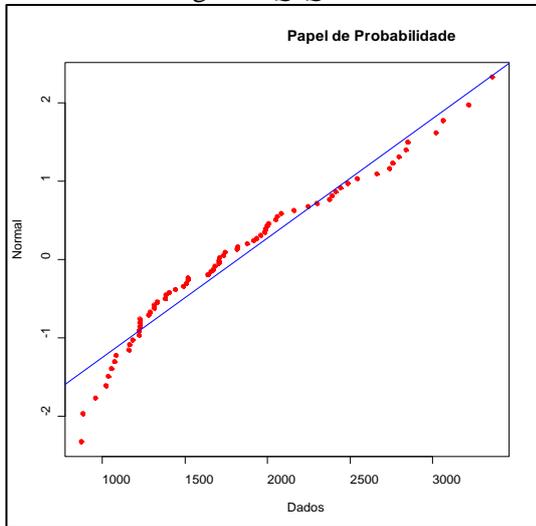
Análise exploratória dos dados

---

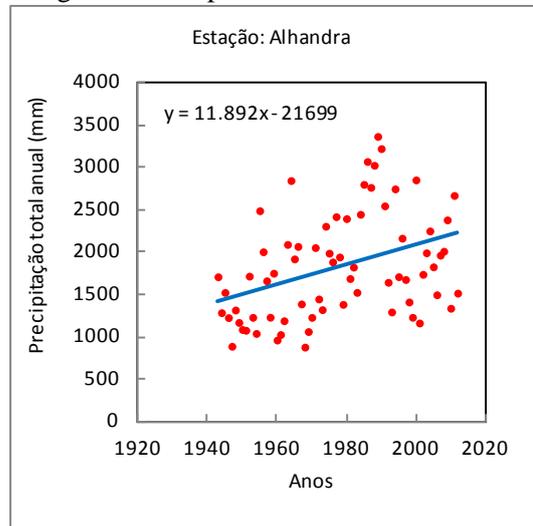
### Gráfico de variabilidade e linha de tendência



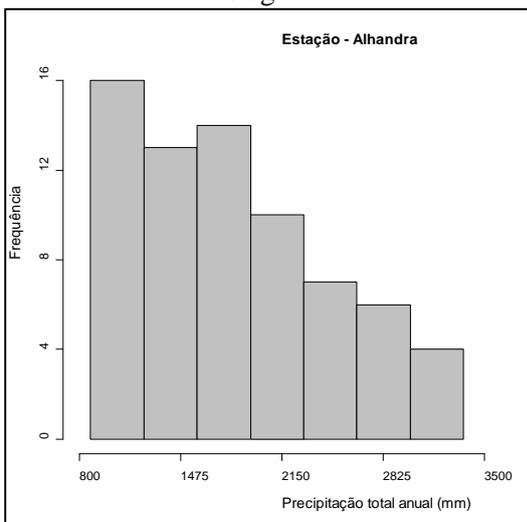
### Diagrama Q-Q Plots



### Diagrama de dispersão e linha de tendência



### Histograma



### Diagrama Box Plot

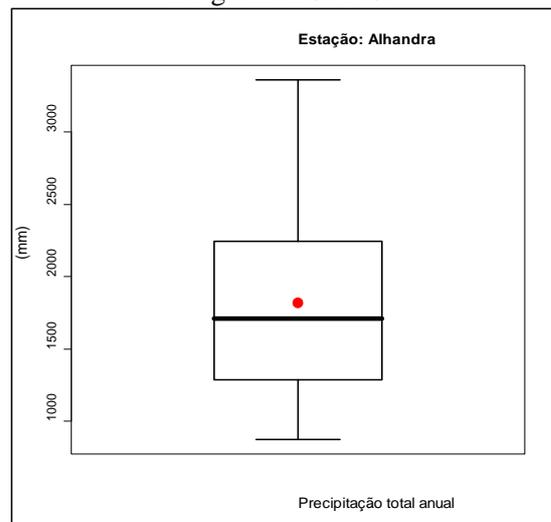


Figura C.1 – Elementos para análise exploratória dos dados em Alhandra.

Gráfico de variabilidade e linha de tendência

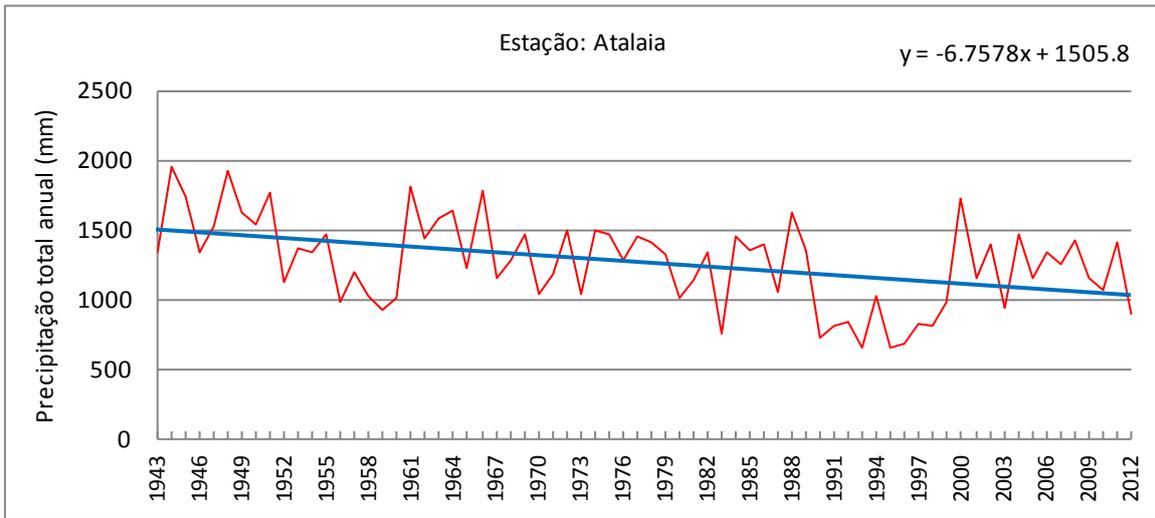


Diagrama *Q-Q Plots*

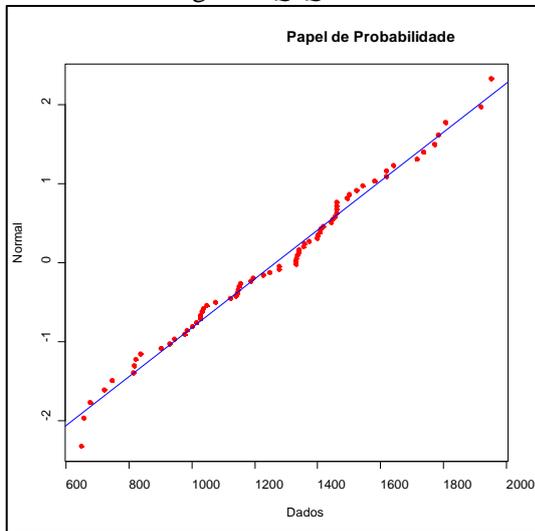
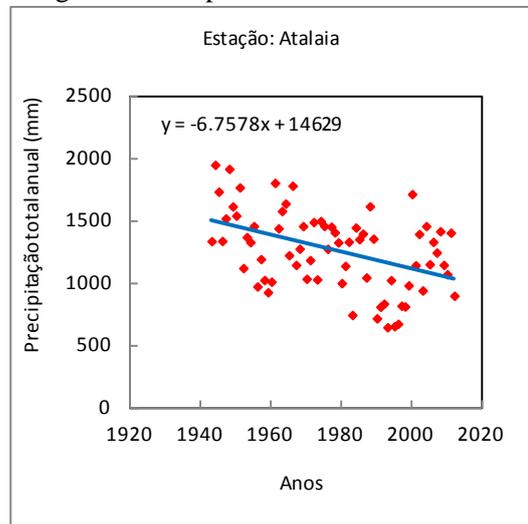


Diagrama de dispersão e linha de tendência



Histograma

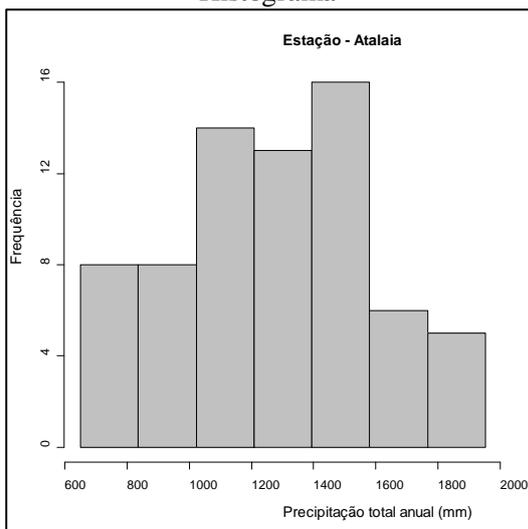


Diagrama *Box Plot*

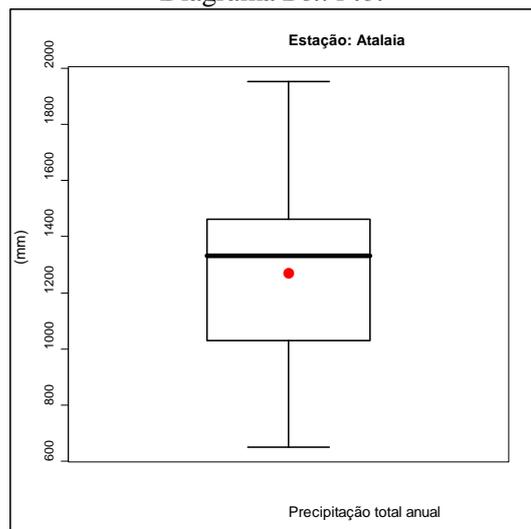


Figura C.2 – Elementos para análise exploratória dos dados em Atalaia.

Gráfico de variabilidade e linha de tendência

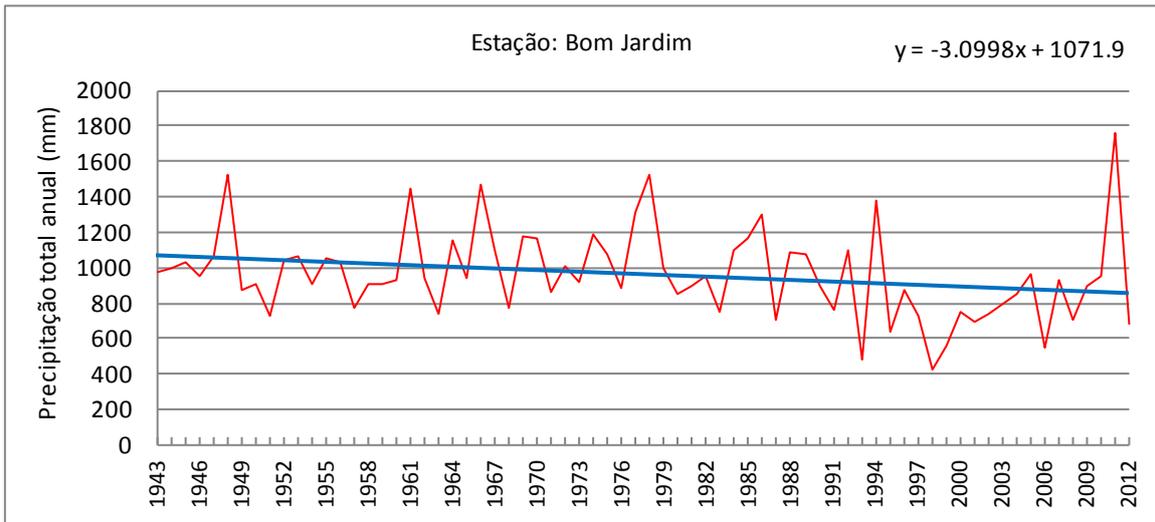


Diagrama *Q-Q Plots*

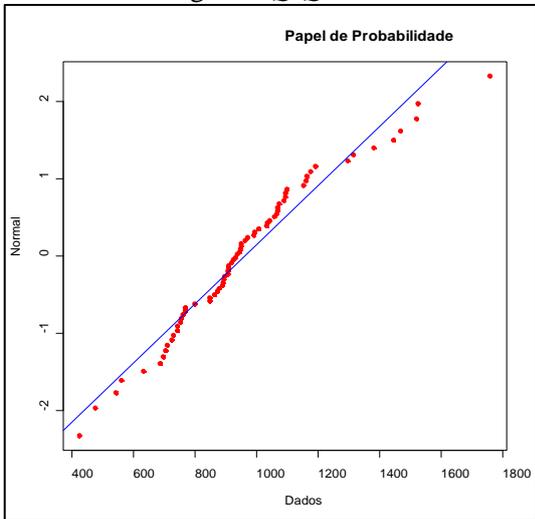
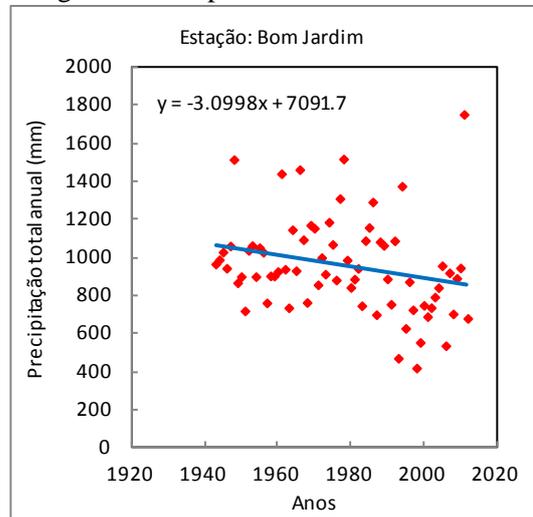


Diagrama de dispersão e linha de tendência



Histograma

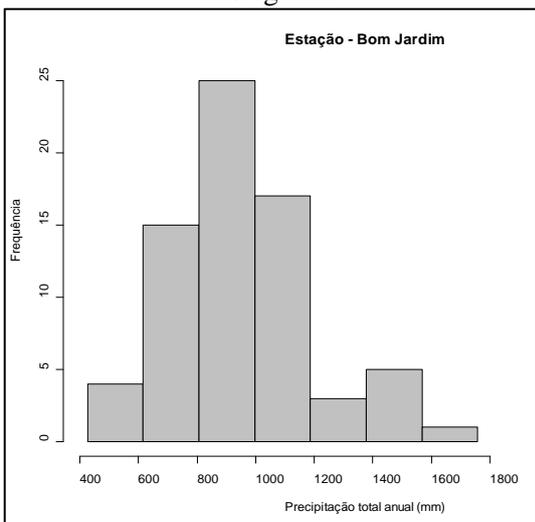


Diagrama *Box Plot*

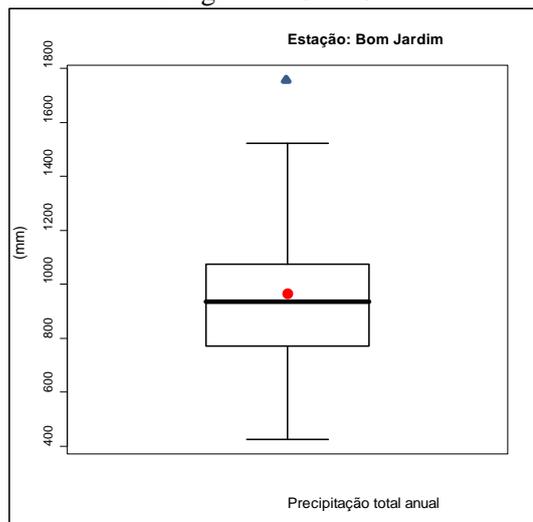


Figura C.3 – Elementos para análise exploratória dos dados em Bom Jardim.

Gráfico de variabilidade e linha de tendência

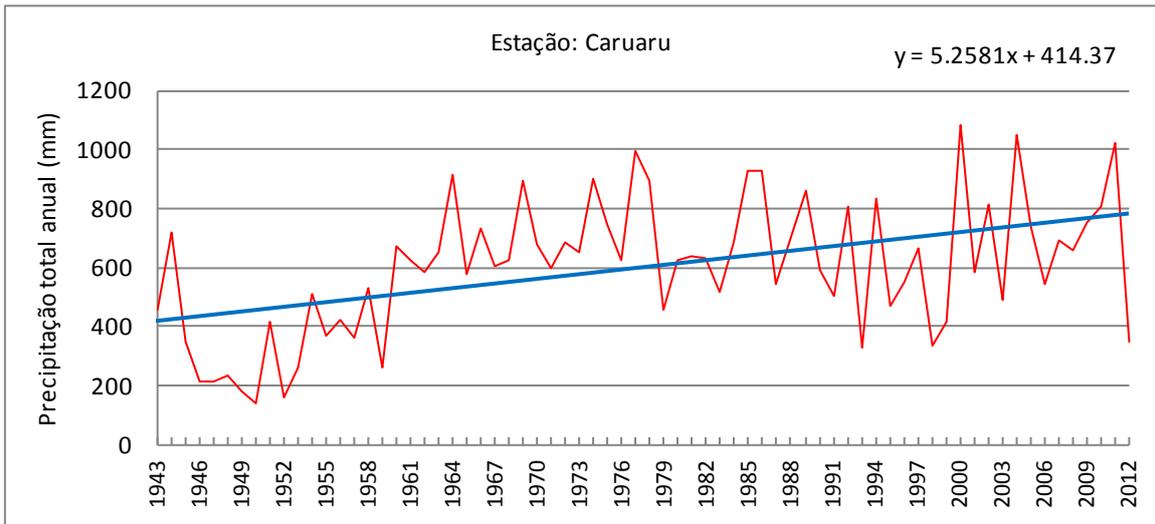


Diagrama Q-Q Plots

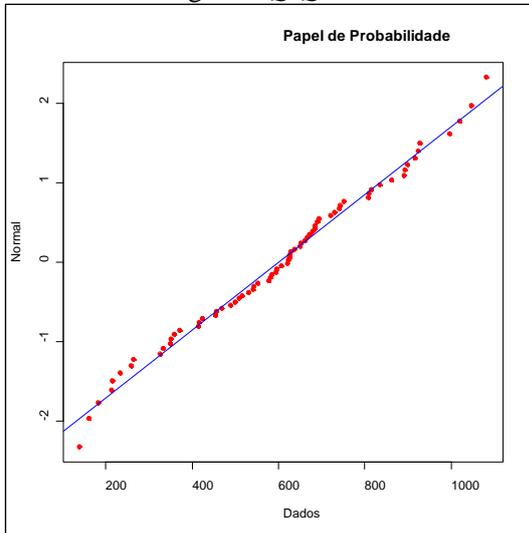
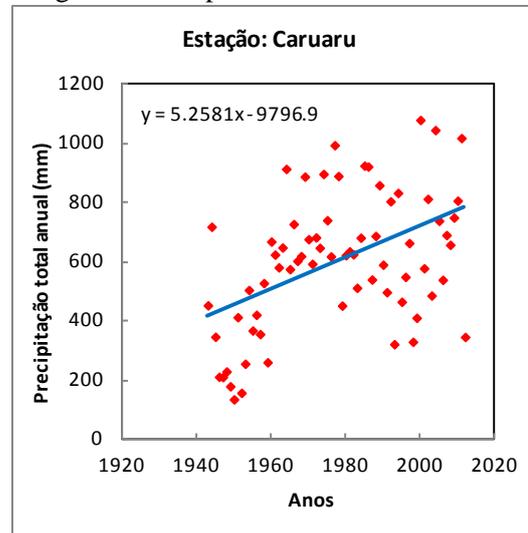


Diagrama de dispersão e linha de tendência



Histograma

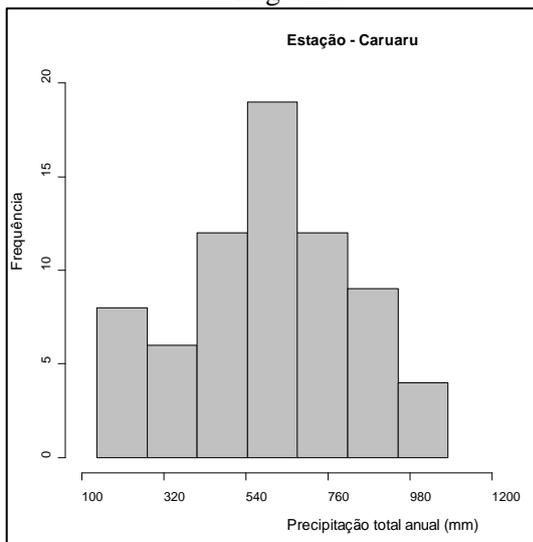


Diagrama Box Plot

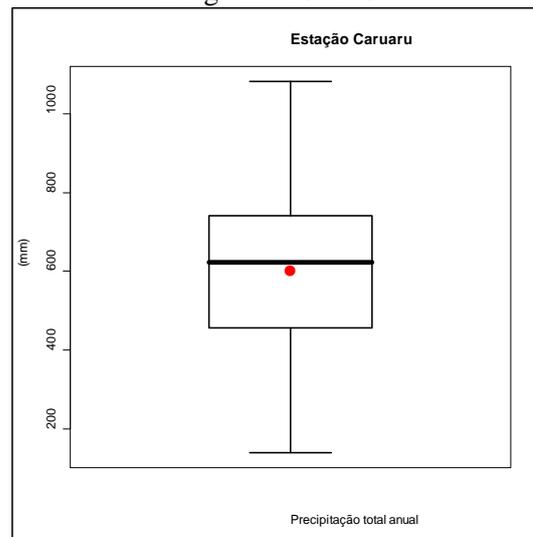


Figura C.4 – Elementos para análise exploratória dos dados em Caruaru.

Gráfico de variabilidade e linha de tendência

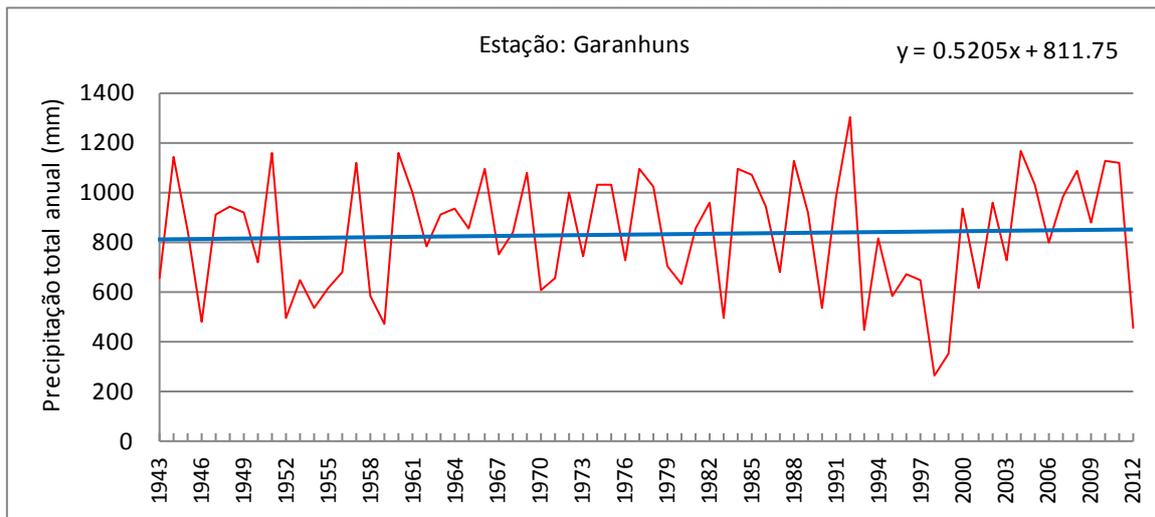


Diagrama *Q-Q Plots*

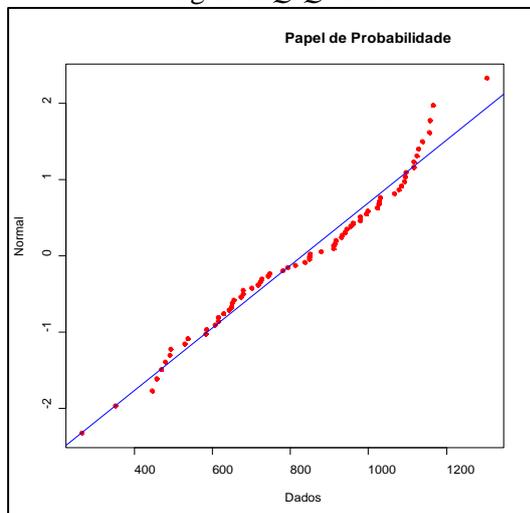
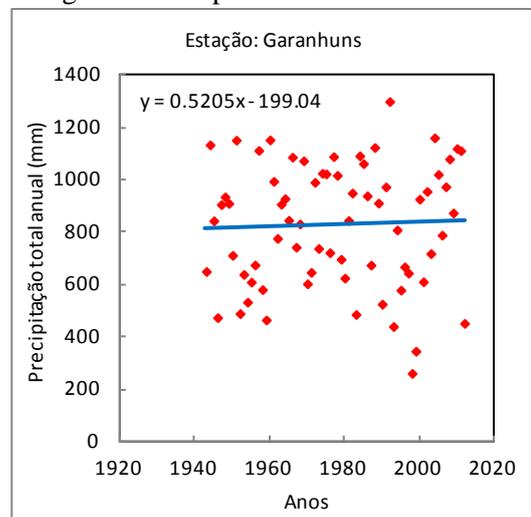


Diagrama de dispersão e linha de tendência



Histograma

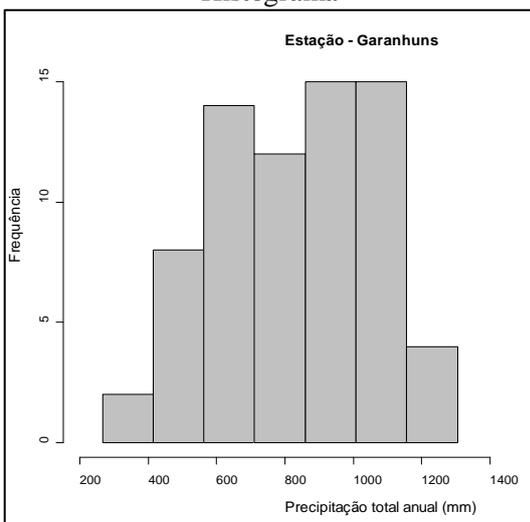


Diagrama *Box Plot*

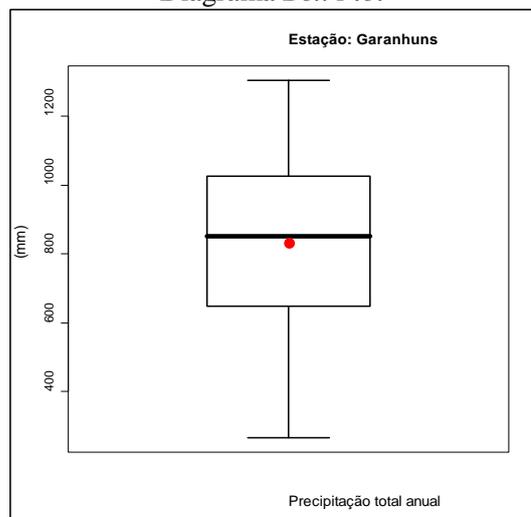


Figura C.5 – Elementos para análise exploratória dos dados em Garanhuns.

Gráfico de variabilidade e linha de tendência

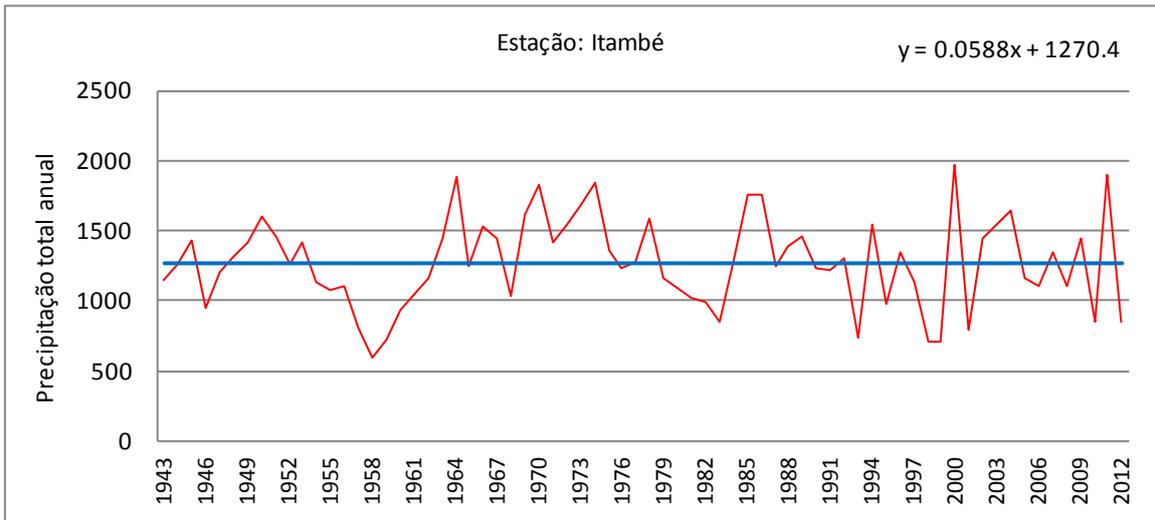


Diagrama *Q-Q Plots*

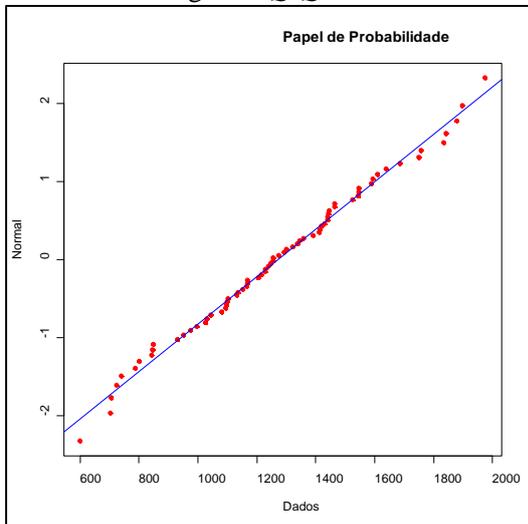
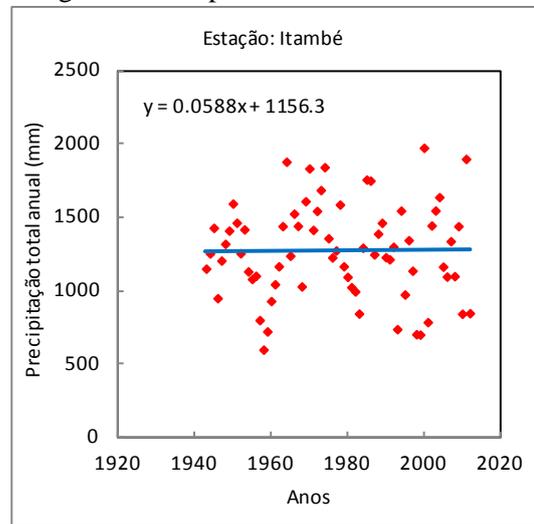


Diagrama de dispersão e linha de tendência



Histograma

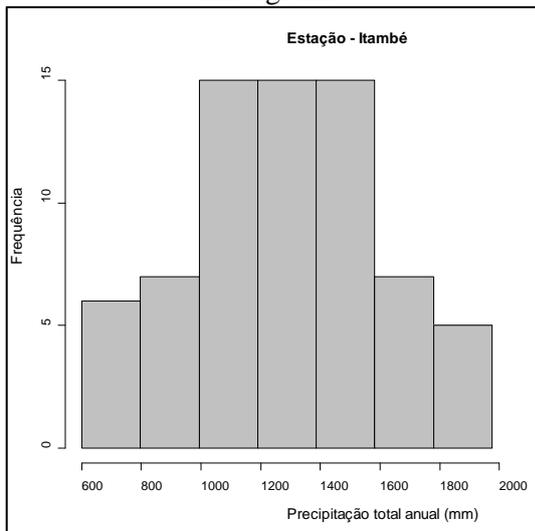


Diagrama *Box Plot*

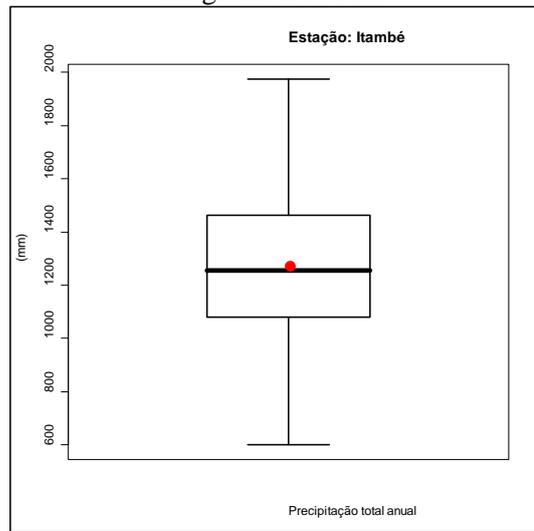


Figura C.6 – Elementos para análise exploratória dos dados em Itambé.

Gráfico de variabilidade e linha de tendência

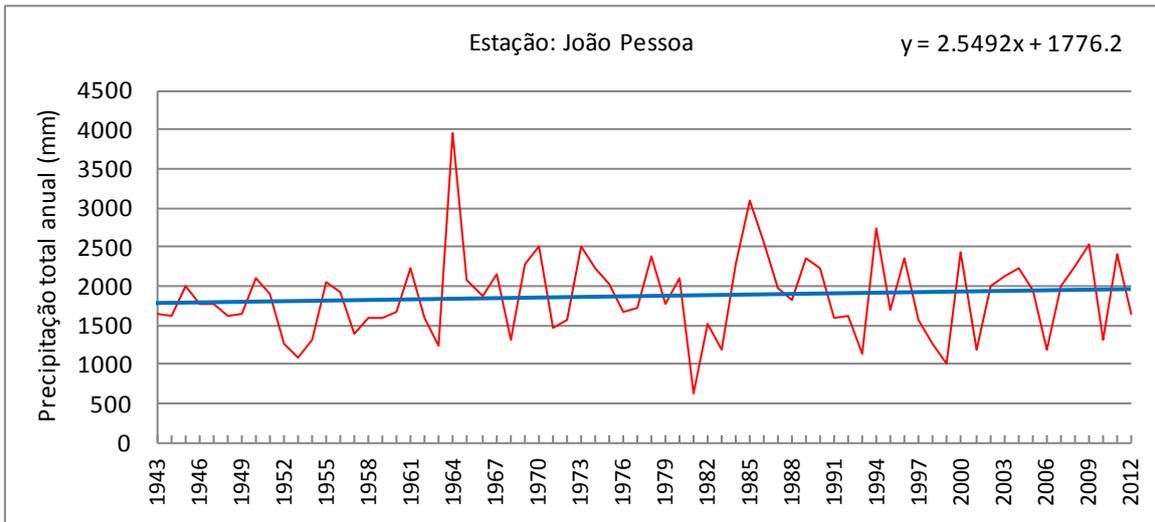


Diagrama *Q-Q Plots*

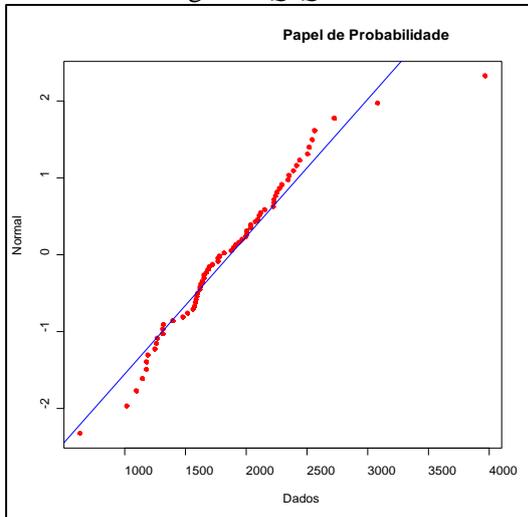
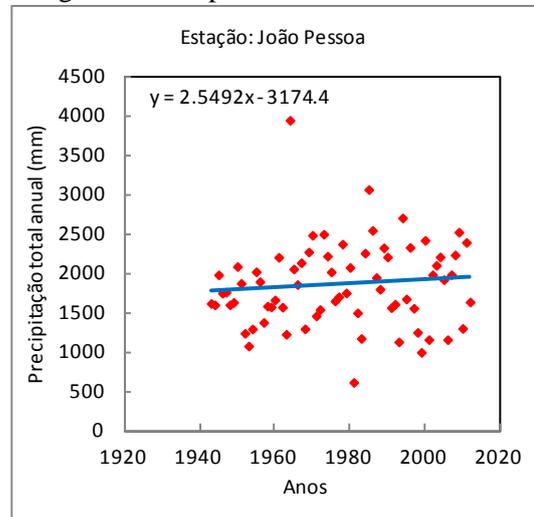


Diagrama de dispersão e linha de tendência



Histograma

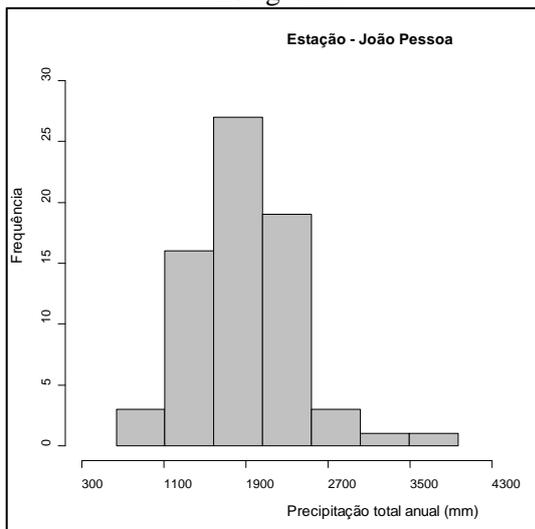


Diagrama *Box Plot*

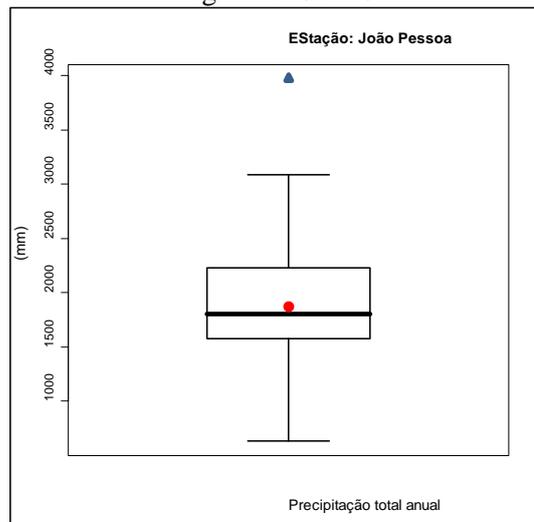


Figura C.7 – Elementos para análise exploratória dos dados em João Pessoa.

Gráfico de variabilidade e linha de tendência

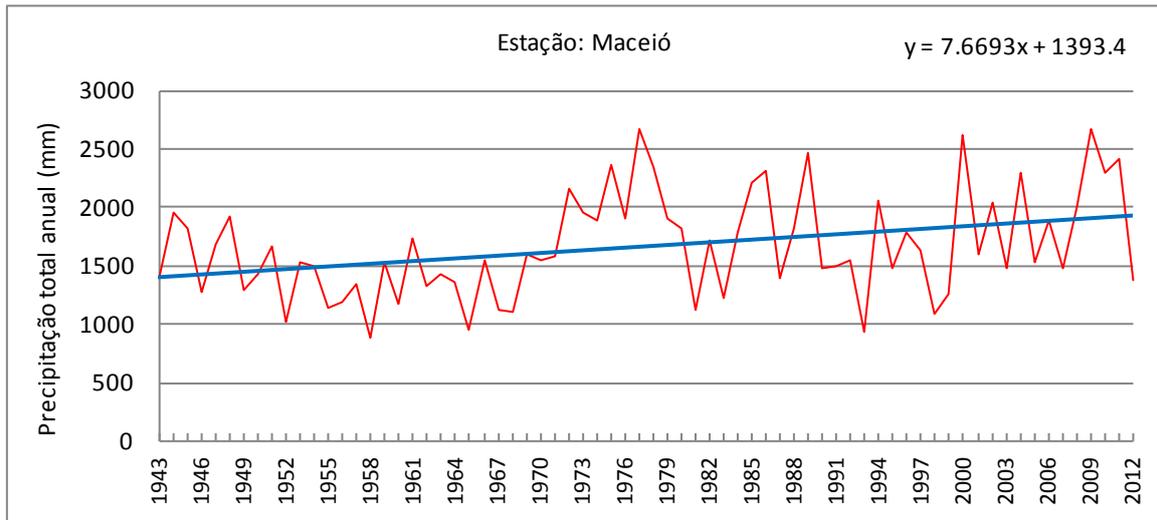


Diagrama Q-Q Plots

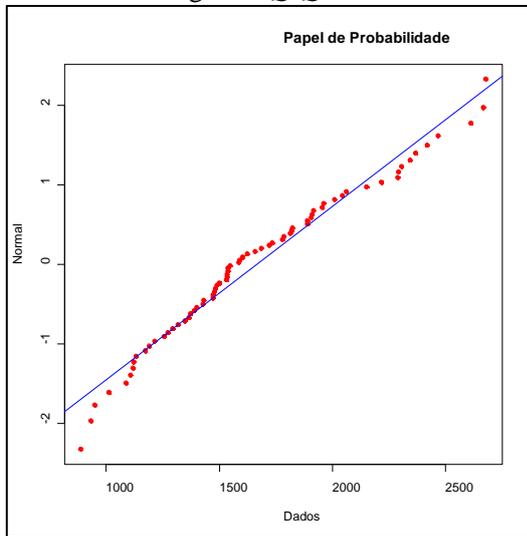
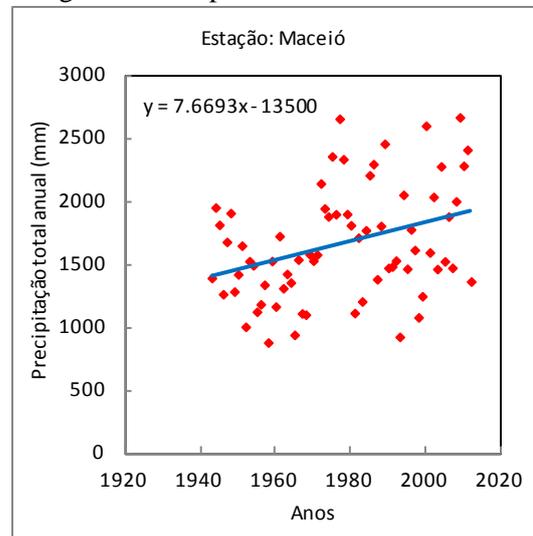


Diagrama de dispersão e linha de tendência



Histograma

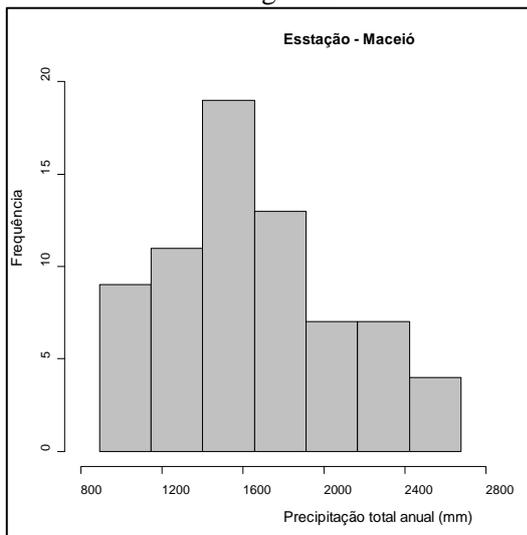


Diagrama Box Plot

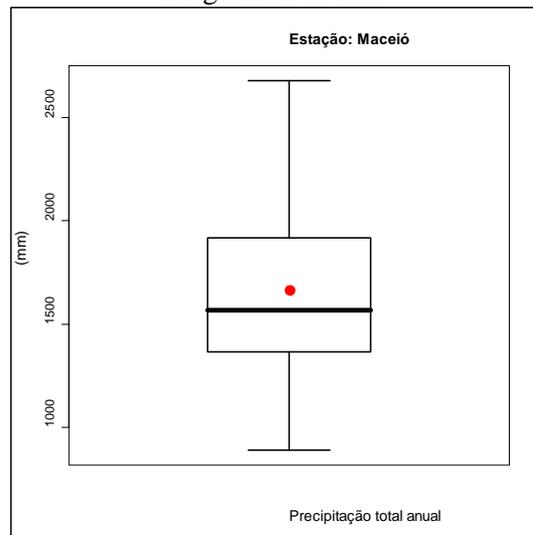


Figura C.8 – Elementos para análise exploratória dos dados em Maceió.

Gráfico de variabilidade e linha de tendência

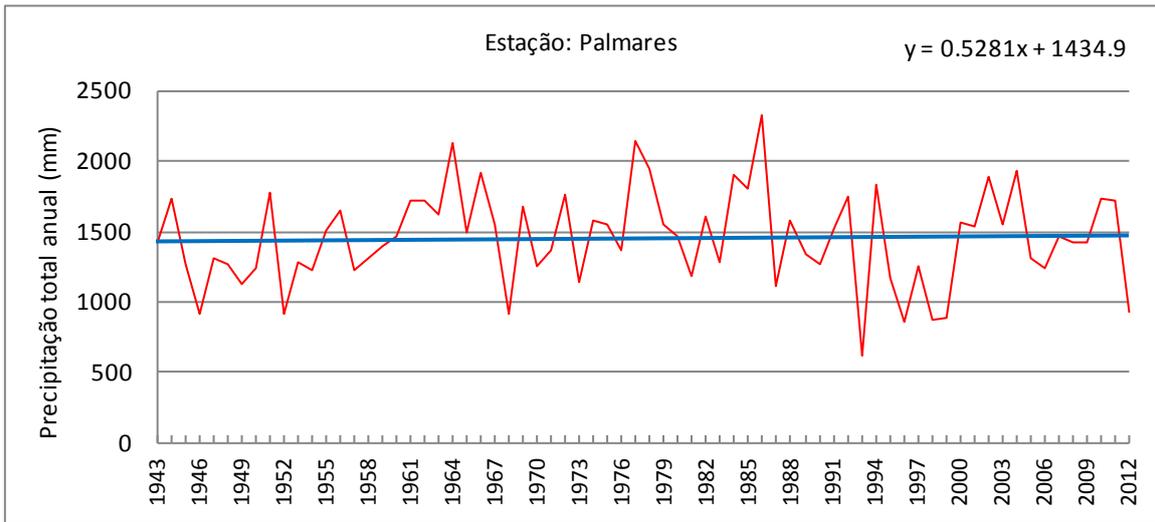


Diagrama Q-Q Plots

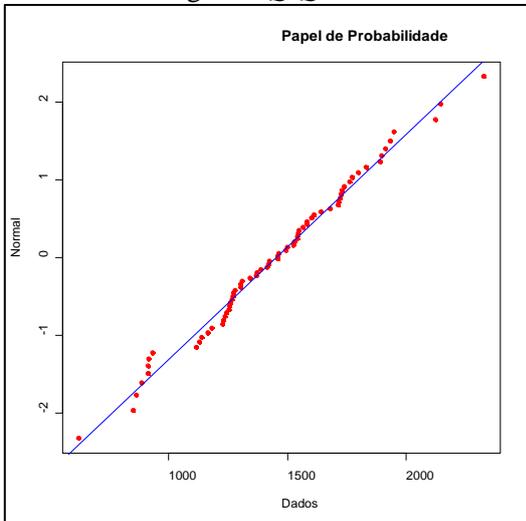
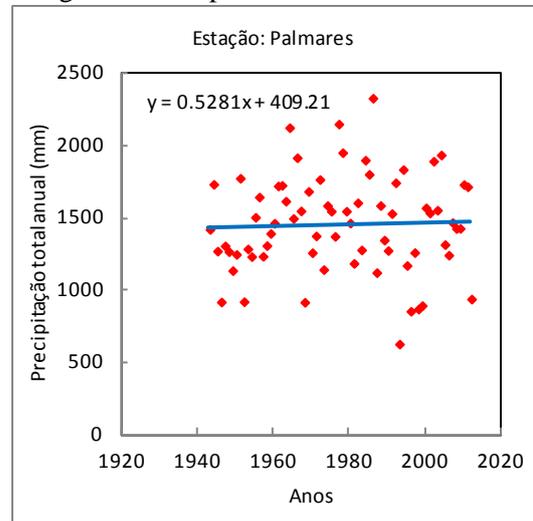


Diagrama de dispersão e linha de tendência



Histograma

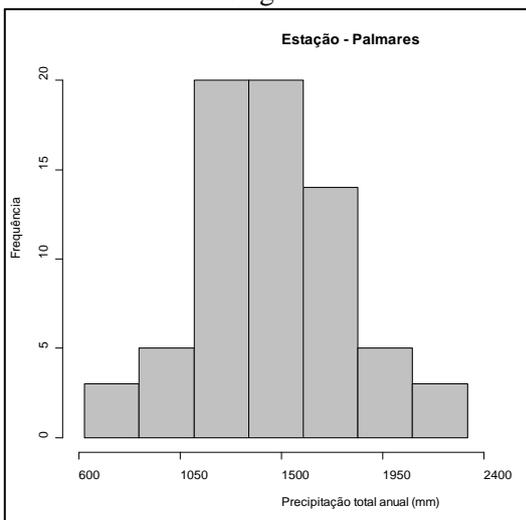


Diagrama Box Plot

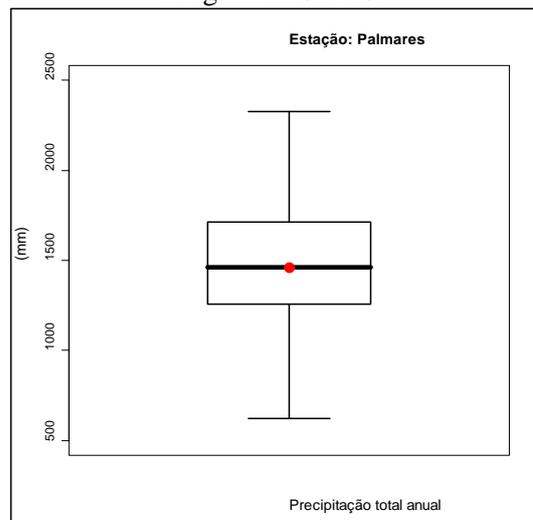


Figura C.9 – Elementos para análise exploratória dos dados em Palmares.

Gráfico de variabilidade e linha de tendência

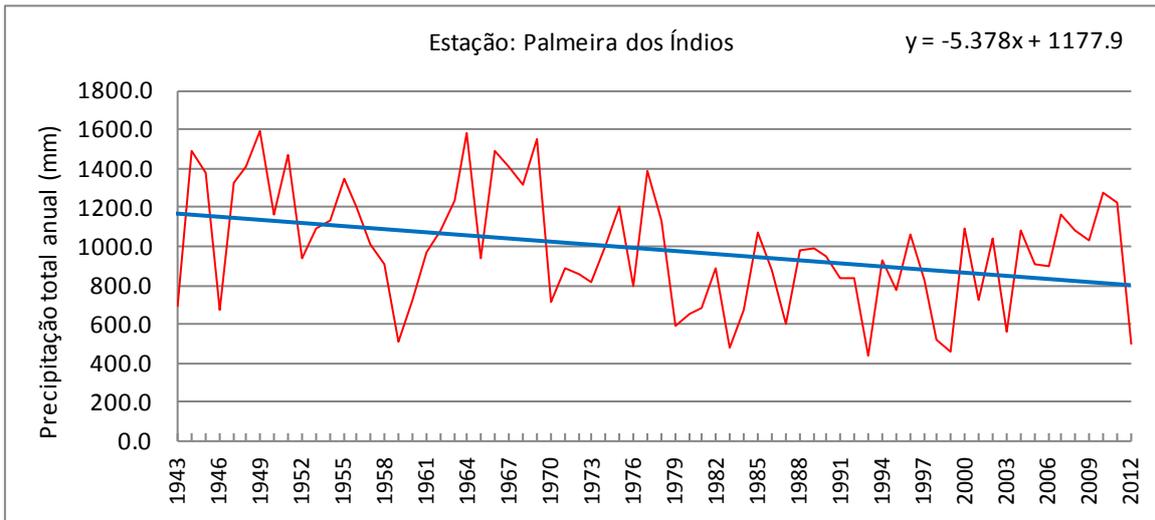


Diagrama Q-Q Plots

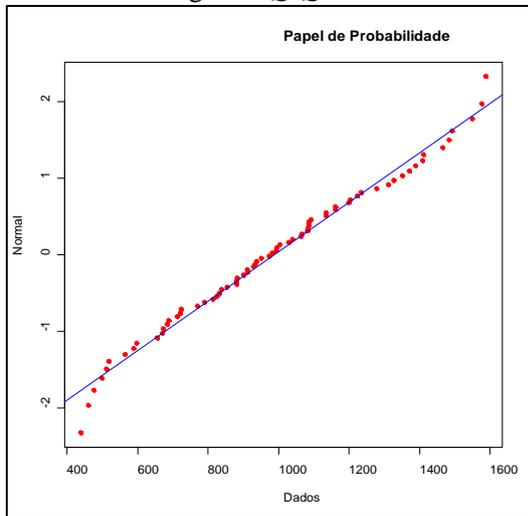
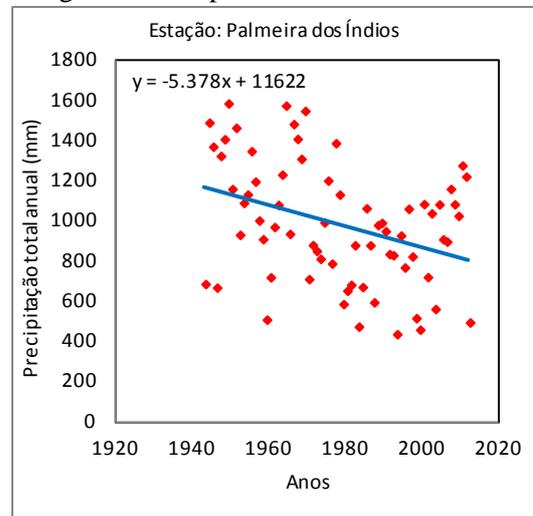


Diagrama de dispersão e linha de tendência



Histograma

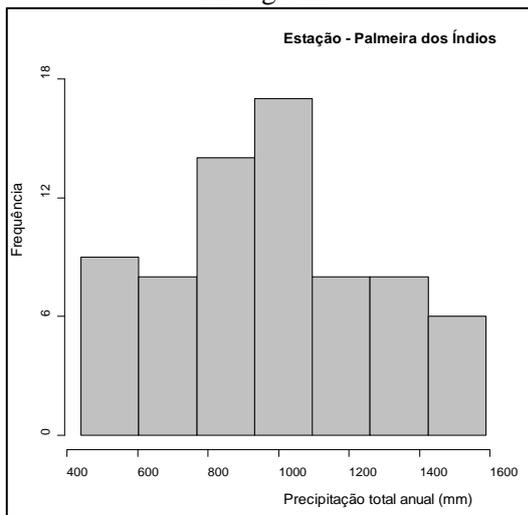


Diagrama Box Plot

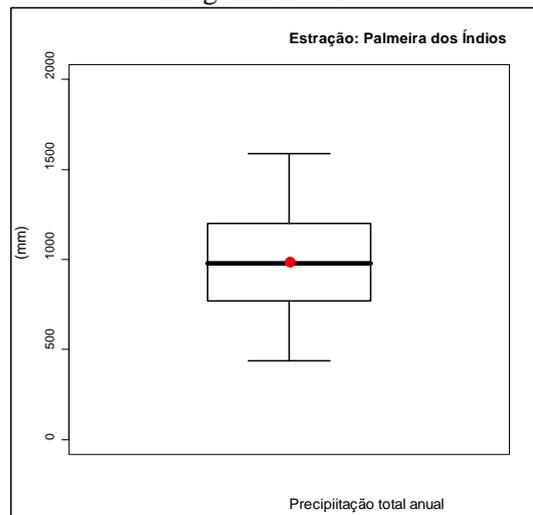


Figura C.10 – Elementos para análise exploratória dos dados em Palmeira dos Índios.

Gráfico de variabilidade e linha de tendência

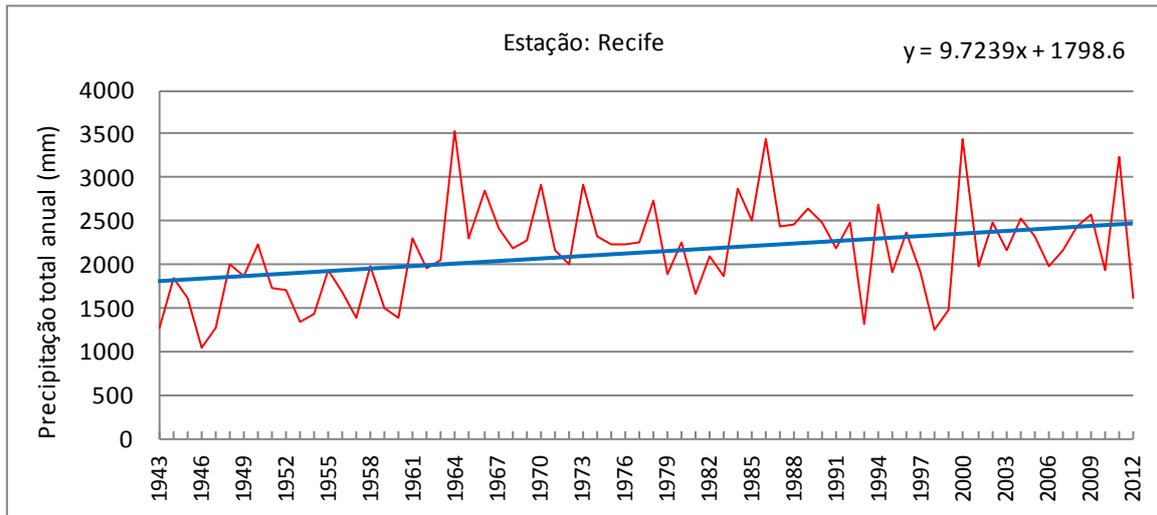


Diagrama *Q-Q Plots*

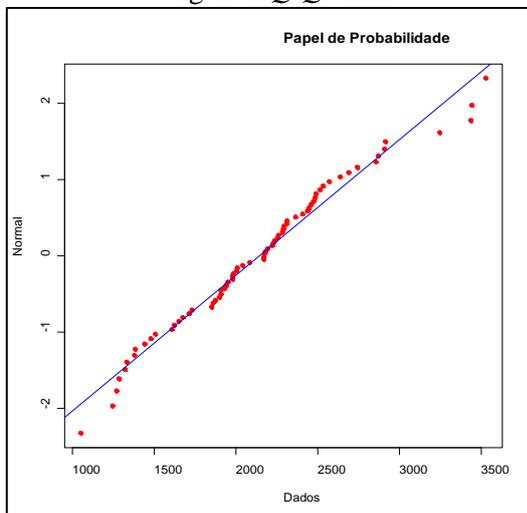
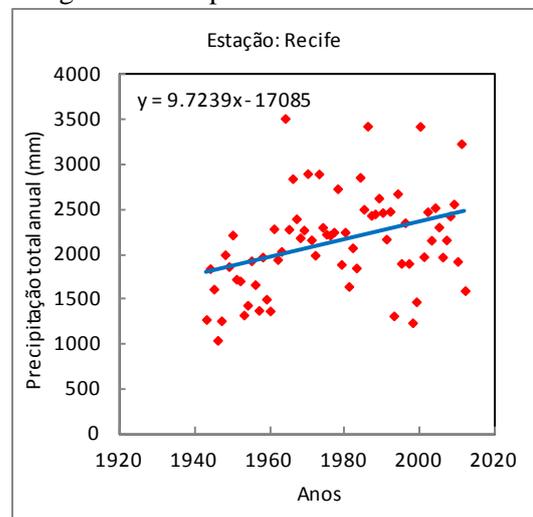


Diagrama de dispersão e linha de tendência



Histograma

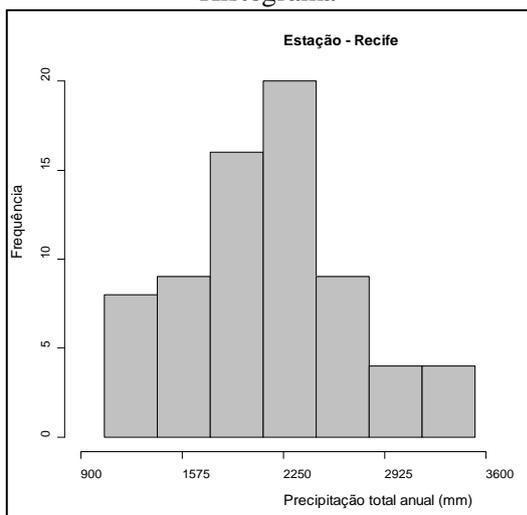


Diagrama *Box Plot*

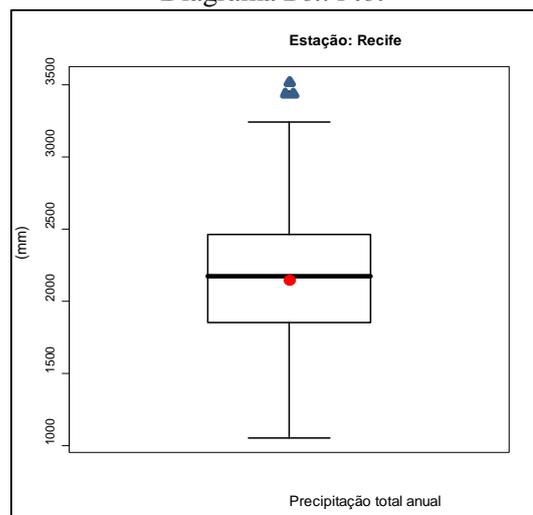


Figura C.11 – Elementos para análise exploratória dos dados em Recife.

Gráfico de variabilidade e linha de tendência

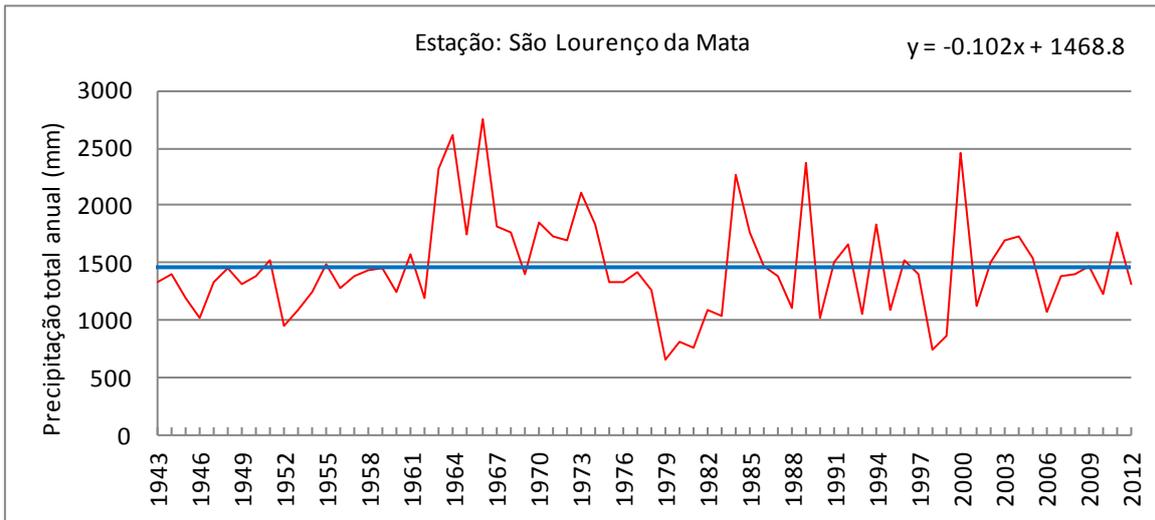


Diagrama Q-Q Plots

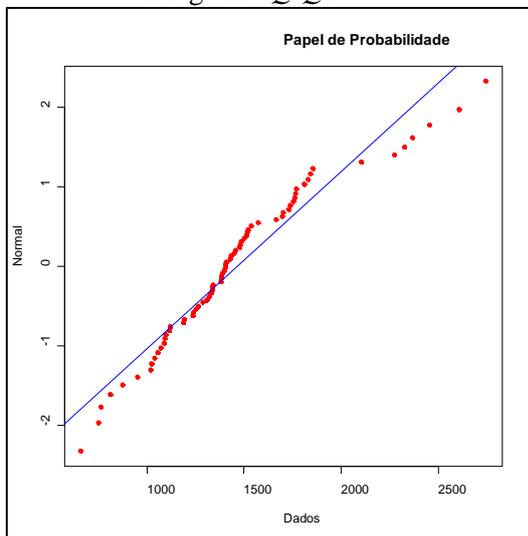
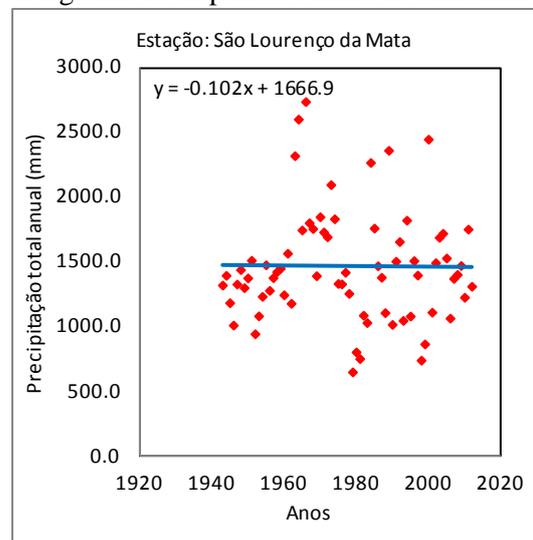


Diagrama de dispersão e linha de tendência



Histograma

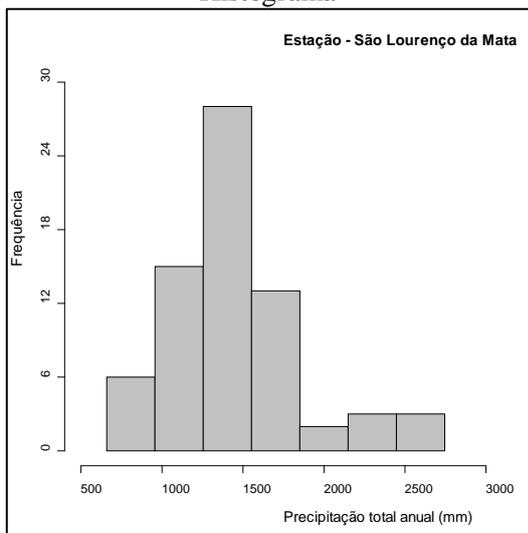


Diagrama Box Plot

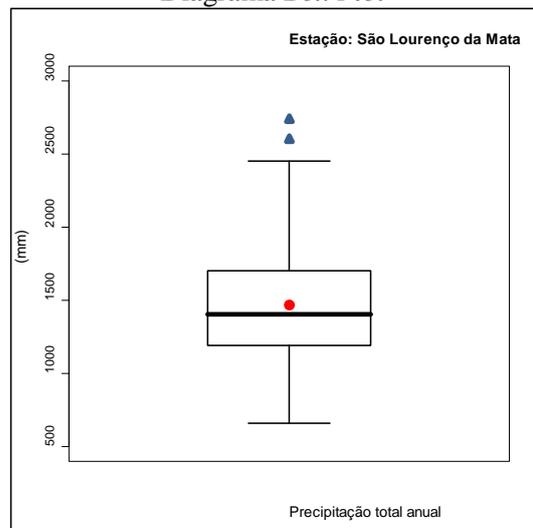


Figura C.12 – Elementos para análise exploratória dos dados em São Lourenço da Mata.

Gráfico de variabilidade e linha de tendência

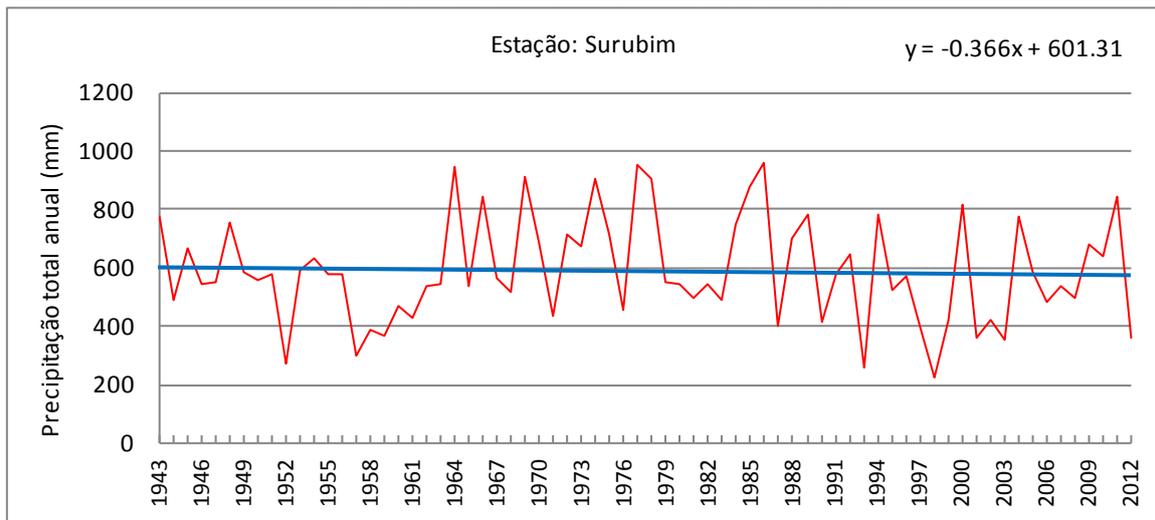


Diagrama *Q-Q Plots*

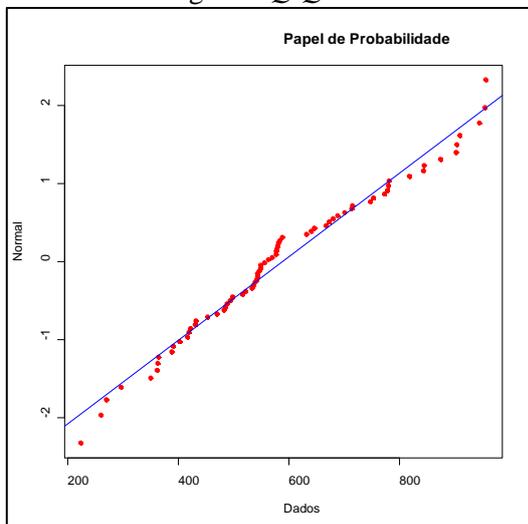
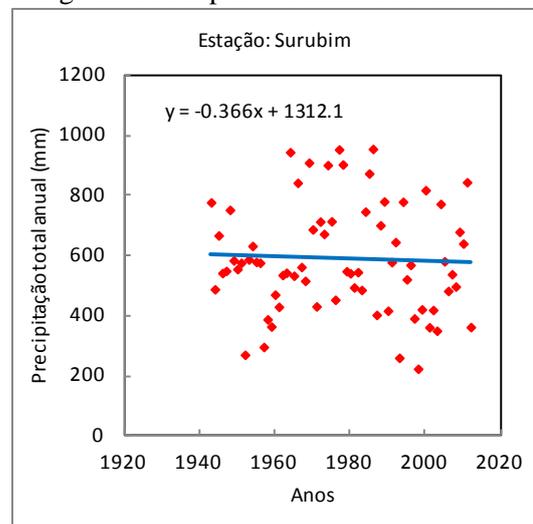


Diagrama de dispersão e linha de tendência



Histograma

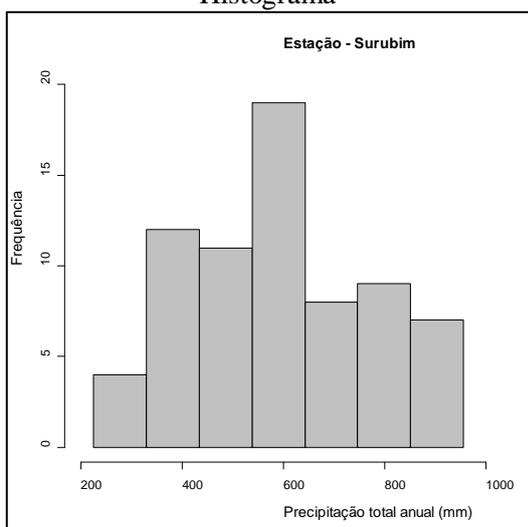


Diagrama *Box Plot*

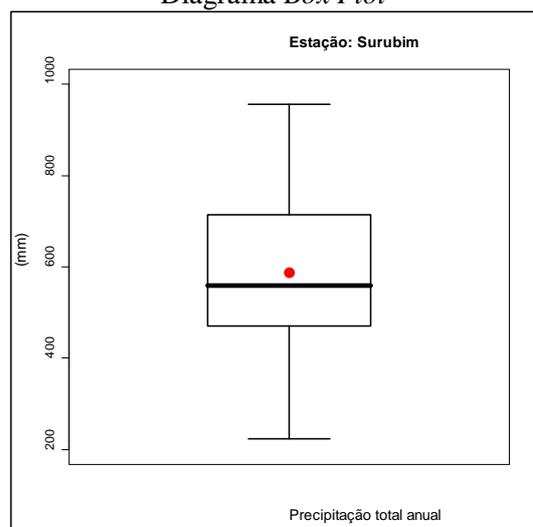


Figura C.13 – Elementos para análise exploratória dos dados em Surubim.

Gráfico de variabilidade e linha de tendência

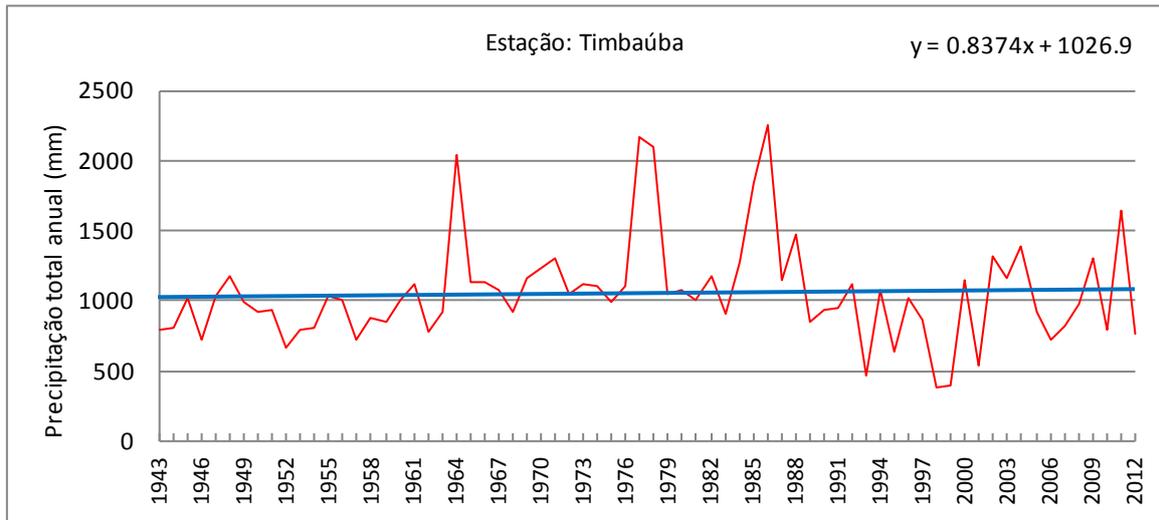


Diagrama Q-Q Plots

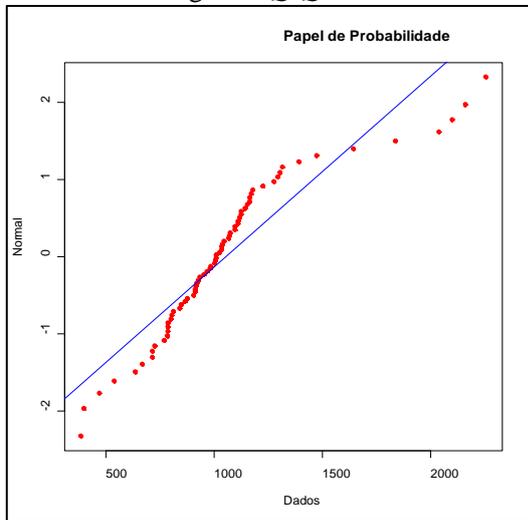
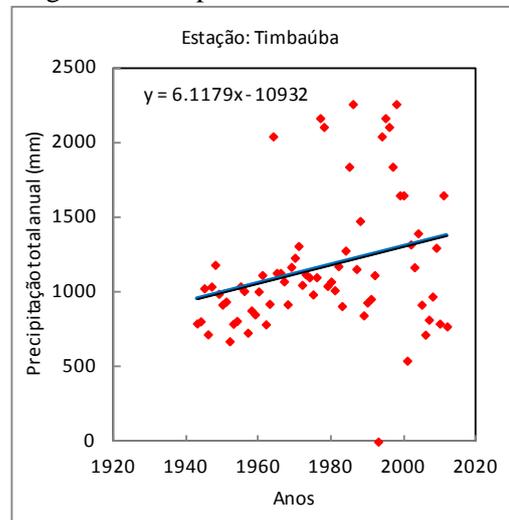


Diagrama de dispersão e linha de tendência



Histograma

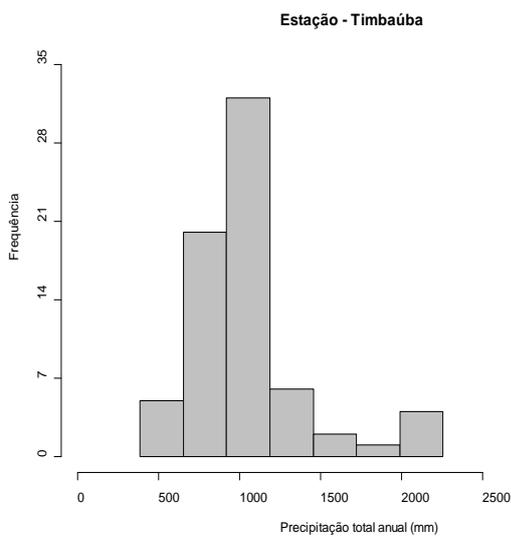


Diagrama Box Plot

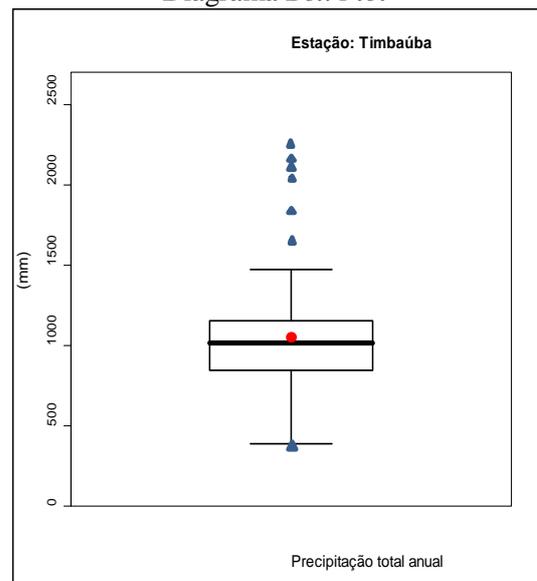


Figura C.14 – Elementos para análise exploratória dos dados em Timbaúba.

Gráfico de variabilidade e linha de tendência

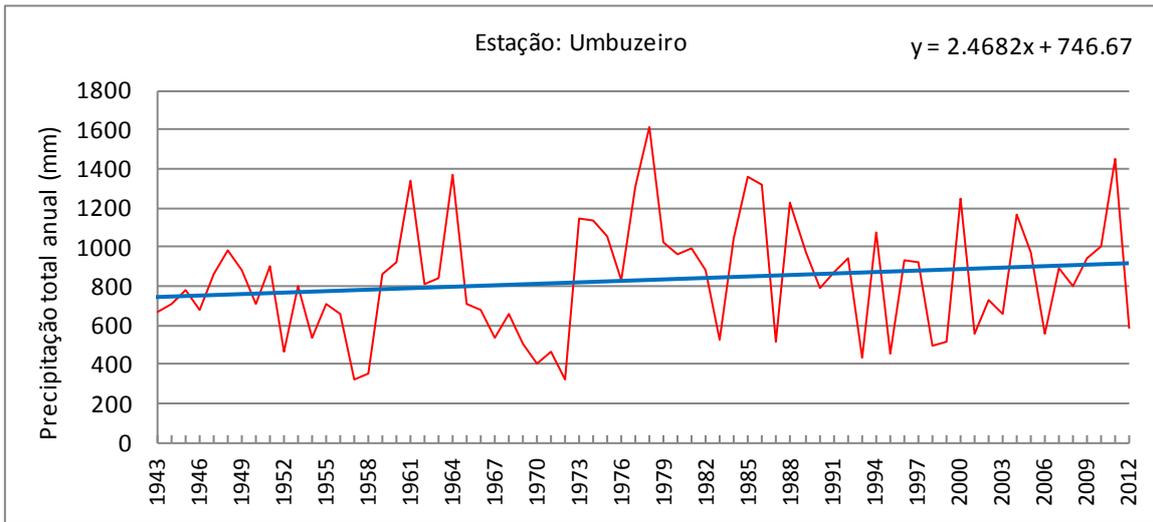


Diagrama Q-Q Plots

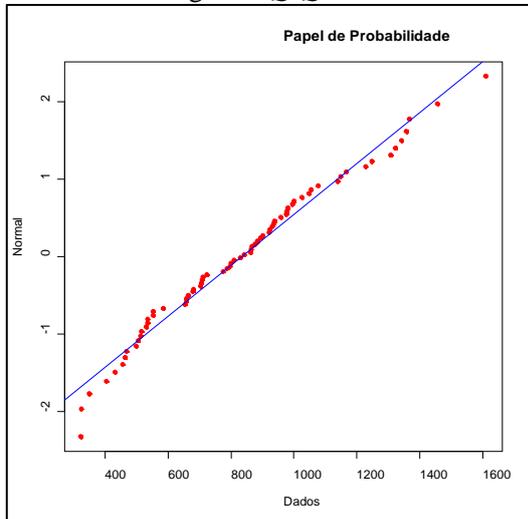
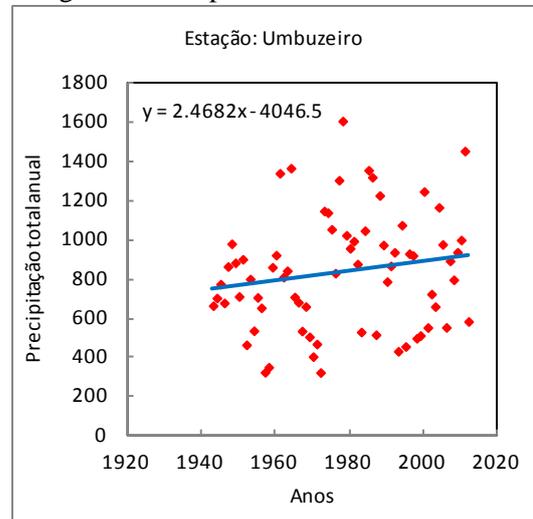


Diagrama de dispersão e linha de tendência



Histograma

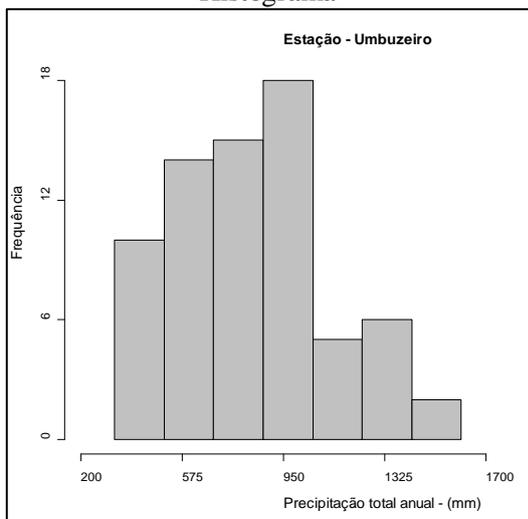


Diagrama Box Plot

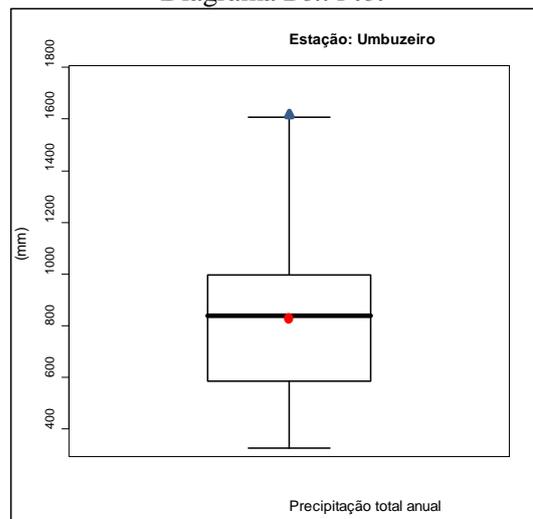


Figura C.15 – Elementos para análise exploratória dos dados em Umbuzeiro.

Gráfico de variabilidade e linha de tendência

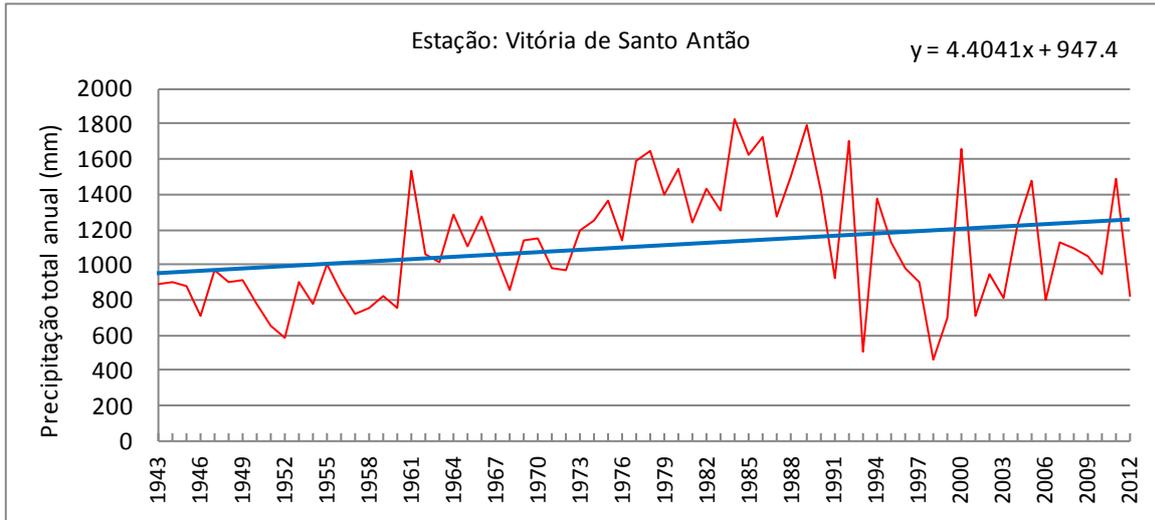


Diagrama *Q-Q Plots*

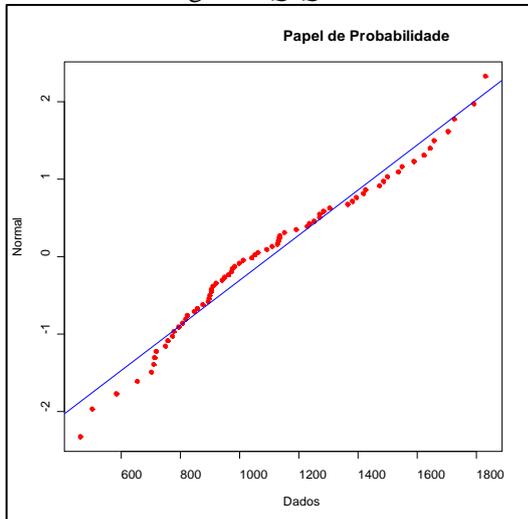
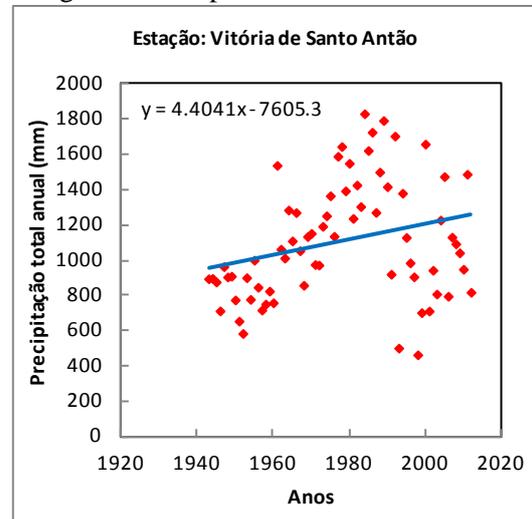


Diagrama de dispersão e linha de tendência



Histograma

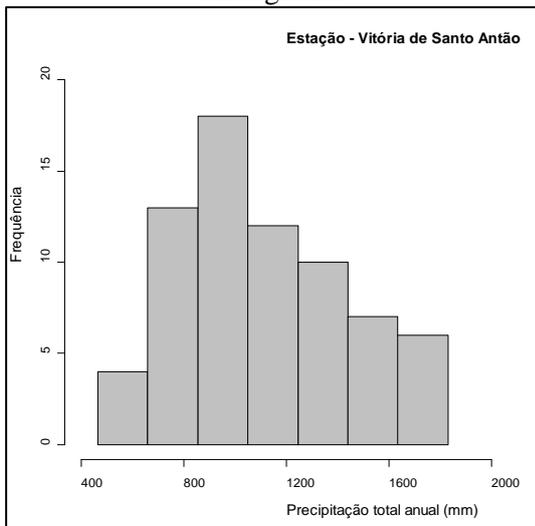


Diagrama *Box Plot*

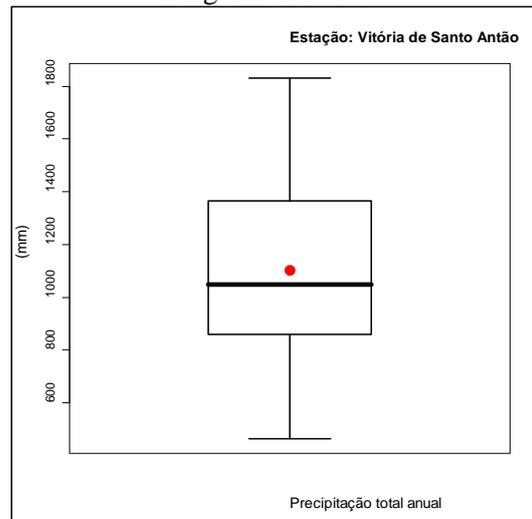


Figura C.16 – Elementos para análise exploratória dos dados em Vitória de Santo Antão.

ANEXO D

Critérios para existência de  
tendência e mudança

---

Tabela D.1 – Existência de tendência/mudança na PTA e nível de significância

Estações pluviométricas	PTA - Testes estatísticos - <i>Software Trend</i>										
	MK	SR	RL	Tendência	CS	CD	WL	RS	ST	Mudança	
1-Alhandra	S+ (0,01)	S+ (0,01)	S+ (0,01)	S+	S+ (0,05)	S+ (0,01)	S+				
2-Atalaia	S- (0,01)	S- (0,01)	S- (0,01)	S-	S- (0,05)	S- (0,01)	S-				
3-Bom Jardim	S- (0,01)	S- (0,01)	S- (0,05)	S-	S- (0,05)	S- (0,05)	S- (0,10)	S- (0,01)	S- (0,05)	S- (0,05)	S-
4-Caruaru	S+ (0,01)	S+(0,01)	S+(0,01)	S+	S+ (0,01)	S+ (0,01)	S+ (0,01)	S+ (0,05)	S+ (0,05)	S+ (0,05)	S+
5-Garanhuns	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
6-Itambé	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
7-João Pessoa	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
8-Maceió	S+ (0,05)	S+ (0,01)	S+ (0,01)	S+	S+ (0,01)	S+ (0,01)	S+ (0,01)	S+ (0,05)	S+ (0,05)	S+ (0,05)	S+
9-Palmares	NS	NS	NS	NS	S+ (0,10)	NS	NS	NS	NS	NS	NS
10-Palmeira dos Índios	S- (0,01)	S- (0,01)	S- (0,01)	S-	S- (0,05)	S- (0,01)	S-				
11-Recife	S+ (0,01)	S+ (0,01)	S+ (0,01)	S+	S+ (0,01)	S+ (0,01)	S+ (0,01)	S+ (0,05)	S+ (0,05)	S+ (0,05)	S+
12-S. Lourenço da Mata	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
13-Surubim	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
14-Timbaúba	NS	NS	NS	NS	S+ (0,05)	NS	NS	NS	NS	NS	NS
15-Umbuzeiro	NS	NS	NS	NS	S+ (0,05)	S+ (0,05)	S+ (0,10)	S+ (0,05)	S+ (0,10)	S+ (0,10)	S+
16-Vitória de S. Antão	S+ (0,01)	S+ (0,05)	S+ (0,05)	S+	S+ (0,01)	S+					

Tabela D.2 – Existência de tendência/mudança na PDMA e nível de significância

Estações pluviométricas	PDMA - Testes estatísticos - <i>Software Trend</i>									
	MK	SR	RL	Tendência	CS	CD	WL	RS	ST	Mudança
1-Alhandra	S+ (0,05)	S+ (0,05)	S+ (0,05)	S+	S+ (0,05)	S+ (0,05)	S+ (0,05)	S+ (0,01)	S+ (0,01)	S+
2-Atalaia	NS	NS	NS	NS	S- (0,05)	NS	S- (0,10)	S- (0,05)	NS	S-
3-Bom Jardim	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
4-Caruaru	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
5-Garanhuns	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
6-Itambé	S+ (0,01)	S+ (0,01)	S+ (0,01)	S+	S+ (0,05)	S+ (0,05)	S+ (0,05)	S+ (0,10)	S+ (0,10)	S+
7-João Pessoa	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
8-Maceió	NS	NS	NS	NS	NS	NS	S+ (0,05)	NS	NS	NS
9-Palmares	NS	NS	NS	NS	NS	NS	S+ (0,10)	NS	NS	NS
10-Palmeira dos Índios	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
11-Recife	S+ (0,01)	S+ (0,01)	S+ (0,05)	S+	S+	S+ (0,05)	S+ (0,01)	S+ (0,10)	NS	S+
12-S. Lourenço da Mata	NS	NS	NS	NS	S+	S+ (0,10)	NS	NS	NS	NS
13-Surubim	NS	NS	NS	NS	NS	S- (0,05)	NS	S- (0,05)	S- (0,05)	S-
14-Timbaúba	S+ (0,05)	S+ (0,05)	S+ (0,05)	S+	S+ (0,05)	S+ (0,05)	S+ (0,10)	NS	NS	S+
15-Umbuzeiro	S+ (0,05)	S+ (0,05)	NS	S+	S+ (0,10)	NS	S+ (0,10)	S+ (0,05)	NS	S+
16-Vitória de S. Antão	S+ (0,01)	S+ (0,01)	S+ (0,01)	S+	S+ (0,05)	S+ (0,01)	S+ (0,05)	S+ (0,01)	S+ (0,01)	S+

**MK** (*Mann-Kendall*), **SR** (*Spearman-Rho*), **RL** (*Regressão Linear*), **DC** (*Não Paramétrico Cusum*), **CD** (*Cumulative Deviation*), **WL** (*Worsley Likelihood*), **RS** (*Rank Sum*) e **ST** (*Student t*).  
**S+** (Tendência positiva com significância)    **S-** (Tendência negativa com significância)    **NS** (Tendência não significativa ou sem tendência)

Tabela D.3 – Existência de tendência/mudança no SMU e nível de significância

Estações pluviométricas	SMU - Testes estatísticos - <i>Software Trend</i>										
	MK	SR	RL	Tendência	CS	CD	WL	RS	ST	Mudança	
1-Alhandra	S+ (0,01)	S+ (0,01)	S+ (0,01)	S+	S+ (0,05)	S+ (0,01)	S+				
2-Atalaia	S- (0,01)	S- (0,01)	S- (0,01)	S-	S- (0,10)	S- (0,01)	S-				
3-Bom Jardim	S- (0,05)	S- (0,05)	NS	S-	S- (0,05)	S- (0,10)	NS	S- (0,05)	NS	NS	S-
4-Caruaru	S+ (0,01)	S+ (0,01)	S+ (0,01)	S+	S+ (0,01)	S+ (0,01)	S+ (0,01)	S+ (0,05)	S+ (0,05)	S+ (0,05)	S+
5-Garanhuns	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
6-Itambé	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
7-João Pessoa	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
8-Maceió	S+ (0,05)	S+ (0,05)	S+ (0,05)	S+	S+ (0,05)	S+ (0,05)	S+ (0,05)	NS	NS	NS	S+
9-Palmares	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
10-Palmeira dos Índios	S- (0,01)	S- (0,01)	S- (0,01)	S-	S- (0,05)	S- (0,01)	S-				
11-Recife	S+ (0,01)	S+ (0,01)	S+ (0,01)	S+	S+ (0,01)	S+ (0,01)	S+ (0,01)	S+ (0,10)	NS	NS	S+
12-S. Lourenço da Mata	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	S	NS	NS	NS
13-Surubim	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
14-Timbaúba	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
15-Umbuzeiro	NS	NS	NS	NS	S+ (0,05)	S+ (0,05)	NS	S+ (0,01)	S+ (0,05)	S+ (0,05)	S+
16-Vitória de S. Antão	S+ (0,01)	S+ (0,05)	S+ (0,05)	S+	S+ (0,01)	S+ (0,01)	S+ (0,01)	S+ (0,05)	S+ (0,05)	S+ (0,05)	S+

Tabela D.4 – Existência de tendência/mudança no TMU e nível de significância

Estações pluviométricas	TMU - Testes estatísticos - <i>Software Trend</i>										
	MK	SR	RL	Tendência	CS	CD	WL	RS	ST	Mudança	
1-Alhandra	S+ (0,01)	S+ (0,01)	S+ (0,01)	S+	S+ (0,05)	S+ (0,01)	S+				
2-Atalaia	S- (0,01)	S- (0,01)	S- (0,01)	S-	S- (0,05)	S- (0,01)	S-				
3-Bom Jardim	NS	NS	NS	NS	S- (0,10)	NS	NS	S- (0,10)	NS	NS	NS
4-Caruaru	S+ (0,01)	S+ (0,01)	S+ (0,01)	S+	S+ (0,05)	S+ (0,01)	S+ (0,01)	S+ (0,05)	S+ (0,05)	S+ (0,05)	S+
5-Garanhuns	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
6-Itambé	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
7-João Pessoa	NS	NS	NS	NS	S+ (0,05)	NS	NS	NS	NS	NS	NS
8-Maceió	S+ (0,05)	S+ (0,10)	S+ (0,10)	S+	NS	S+ (0,10)	NS	NS	NS	NS	NS
9-Palmares	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
10-Palmeira dos Índios	S- (0,05)	S- (0,05)	S- (0,01)	S-	S- (0,05)	S- (0,01)	S-				
11-Recife	S+ (0,01)	S+ (0,01)	S+ (0,01)	S+	S+ (0,01)	S+ (0,01)	S+ (0,01)	S+ (0,10)	S+ (0,05)	S+ (0,05)	S+
12-S. Lourenço da Mata	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
13-Surubim	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
14-Timbaúba	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
15-Umbuzeiro	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
16-Vitória de S. Antão	S+ (0,05)	S+ (0,05)	S+ (0,01)	S+	S+ (0,05)	S+ (0,01)	S+ (0,01)	S+ (0,05)	S+ (0,05)	S+ (0,05)	S+

MK (*Mann-Kendall*), SR (*Spearman-Rho*), RL (*Regressão Linear*), DC (*Não Paramétrico Cusum*), CD (*Cumulative Deviation*), WL (*Worsley Likelihood*), RS (*Rank Sum*) e ST (*Student t*).  
 S+ (Tendência positiva com significância) S- (Tendência negativa com significância) NS (Tendência não significativa ou sem tendência)

Tabela D.5 – Existência de tendência/mudança no BMU e nível de significância

Estações pluviométricas	BMU - Testes estatísticos - <i>Software Trend</i>										
	MK	SR	RL	Tendência	CS	CD	WL	RS	ST	Mudança	
1-Alhandra	S+ (0,01)	S+ (0,01)	S+ (0,01)	S+	S+ (0,05)	S+ (0,01)	S+				
2-Atalaia	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	S-	S-	S-	S-
3-Bom Jardim	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
4-Caruaru	S+ (0,01)	S+ (0,01)	S+ (0,01)	S+	S+ (0,05)	S+ (0,01)	S+ (0,01)	S+ (0,01)	S+ (0,10)	S+	S+
5-Garanhuns	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
6-Itambé	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
7-João Pessoa	S+ (0,10)	S+ (0,10)	NS	S+	S+ (0,10)	NS	NS	NS	NS	NS	NS
8-Maceió	S+ (0,01)	S+ (0,01)	S+ (0,01)	S+	S+ (0,05)	S+ (0,01)	S+ (0,05)	S+ (0,05)	S+ (0,05)	S+	S+
9-Palmares	S+ (0,05)	S+ (0,05)	S+ (0,05)	S+	S+ (0,05)	NS	NS	NS	NS	NS	NS
10-Palmeira dos Índios	S- (0,05)	S- (0,10)	S- (0,05)	S-	S- (0,05)	S- (0,05)	S- (0,05)	S- (0,01)	S- (0,01)	S-	S-
11-Recife	S+ (0,01)	S+ (0,01)	S+ (0,01)	S+	S+ (0,01)	S+ (0,01)	S+ (0,01)	S+ (0,05)	S+ (0,05)	S+	S+
12-S. Lourenço da Mata	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
13-Surubim	S+ (0,10)	S+ (0,10)	NS	S+	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
14-Timbaúba	S+ (0,05)	S+ (0,10)	NS	S+	S+ (0,10)	S+ (0,10)	NS	NS	NS	NS	NS
15-Umbuzeiro	S+ (0,05)	S+ (0,05)	S+ (0,05)	S+	S+ (0,10)	S+ (0,05)	NS	S+ (0,05)	S+ (0,05)	S+	S+
16-Vitória de S. Antão	S+ (0,05)	S+ (0,05)	S+ (0,05)	S+	S+ (0,05)	S+ (0,01)	S+ (0,01)	S+ (0,05)	S+ (0,01)	S+	S+

Tabela D.6 – Existência de tendência/mudança no MMU e nível de significância

Estações pluviométricas	MMU - Testes estatísticos - <i>Software Trend</i>										
	MK	SR	RL	Tendência	CS	CD	WL	RS	ST	Mudança	
1-Alhandra	S+ (0,01)	S+ (0,01)	S+ (0,01)	S+	S+ (0,05)	S+ (0,01)	S+ (0,01)	S+ (0,01)	S+ (0,01)	S+	S+
2-Atalaia	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
3-Bom Jardim	NS	NS	NS	NS	NS	NS	S- (0,10)	NS	NS	NS	NS
4-Caruaru	S+ (0,05)	S+ (0,05)	S+ (0,05)	S+	NS	S+ (0,10)	S+ (0,10)	NS	NS	NS	NS
5-Garanhuns	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
6-Itambé	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
7-João Pessoa	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
8-Maceió	NS	NS	S+ (0,10)	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
9-Palmares	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
10-Palmeira dos Índios	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	S- (0,05)	S- (0,10)	NS	NS
11-Recife	S+ (0,01)	S+ (0,01)	S+ (0,01)	S+	S+ (0,05)	S+ (0,05)	S+ (0,05)	S+ (0,05)	S+ (0,10)	S+	S+
12-S. Lourenço da Mata	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	S+
13-Surubim	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
14-Timbaúba	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
15-Umbuzeiro	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
16-Vitória de S. Antão	S+ (0,05)	S+ (0,10)	S+ (0,05)	S+	S+ (0,05)	S+ (0,10)	NS	S+ (0,10)	S+ (0,10)	S+	S+

MK (*Mann-Kendall*), SR (*Spearman-Rho*), RL (*Regressão Linear*), DC (*Não Paramétrico Cusum*), CD (*Cumulative Deviation*), WL (*Worsley Likelihood*), RS (*Rank Sum*) e ST (*Student t*).  
 S+ (Tendência positiva com significância) S- (Tendência negativa com significância) NS (Tendência não significativa ou sem tendência)

Tabela D.7 – Existência de tendência/mudança em MAI e nível de significância

Estações pluviométricas	MAI - Testes estatísticos - <i>Software Trend</i>									
	MK	SR	RL	Tendência	CS	CD	WL	RS	ST	Mudança
1-Alhandra	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
2-Atalaia	S- (0.01)	S- (0.01)	S- (0.01)	S-	S- (0.01)	S-				
3-Bom Jardim	S- (0.05)	S- (0.05)	NS	S-	S- (0.05)	NS	NS	S- (0.05)	NS	NS
4-Caruaru	S+ (0.10)	S+ (0.10)	S+(0.10)	S+	NS	NS	NS	NS	NS	NS
5-Garanhuns	NS	NS	S- (0.10)	NS	S- (0.05)	S- (0.1)	NS	S- (0.10)	S- (0.05)	S-
6-Itambé	NS	NS	NS	NS	S- (0.05)	NS	NS	S- (0.10)	S- (0.10)	S-
7-João Pessoa	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
8-Maceió	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
9-Palmares	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
10-Palmeira dos Índios	S- (0,05)	S- (0,05)	S- (0,01)	S-	NS	S- (0,05)	S- (0,10)	S- (0,01)	S- (0,01)	S-
11-Recife	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
12-S. Lourenço da Mata	NS	NS	NS	NS	NS	S- (0.10)	NS	S- (0.05)	S- (0.05)	S-
13-Surubim	S- (0,10)	S- (0,10)	NS	S-	NS	NS	NS	S- (0,10)	NS	NS
14-Timbaúba	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
15-Umbuzeiro	S- (0.10)	S- (0.10)	NS	S-	NS	NS	NS	NS	NS	NS
16-Vitória de S. Antão	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS

Tabela D.8 – Existência de tendência/mudança em JUL e nível de significância

Estações pluviométricas	Testes estatísticos - ABR - <i>Software Trend</i>									
	MK	SR	RL	Tendência	CS	CD	WL	RS	ST	Mudança
1-Alhandra	S+ (0.01)	S+ (0.01)	S+ (0.01)	S+	S+ (0.05)	S+ (0.01)	S+ (0.05)	S+ (0.05)	S+ (0.05)	S+
2-Atalaia	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
3-Bom Jardim	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
4-Caruaru	S+ (0.01)	S+ (0.01)	S+ (0.05)	S+	S+ (0.01)	S+ (0.01)	S+ (0.01)	S+ (0.01)	NS	S+
5-Garanhuns	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
6-Itambé	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
7-João Pessoa	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
8-Maceió	S+ (0.01)	S+ (0.01)	S+ (0.01)	S+	S+ (0.01)	S+ (0.01)	S+ (0.05)	S+ (0.01)	S+ (0.01)	S+
9-Palmares	NS	S+ (0,10)	NS	NS	NS	S+ (0.05)	S+ (0,10)	NS	NS	NS
10-Palmeira dos Índios	S- (0,05)	S- (0,05)	S- (0,01)	S-	S- (0,05)	S- (0,01)	S- (0,05)	S- (0,01)	S- (0,01)	S-
11-Recife	S+ (0.01)	S+ (0.01)	S+ (0.05)	S+	S+ (0.05)	S+ (0.01)	S+ (0.01)	S+ (0.10)	NS	S+
12-S. Lourenço da Mata	S+ (0.10)	S+ (0.10)	NS	S+	S+ (0.05)	S+ (0.05)	NS	NS	NS	NS
13-Surubim	NS	NS	NS	NS	S+ (0.05)	S+ (0.10)	NS	NS	NS	NS
14-Timbaúba	S+ (0,10)	S+ (0,10)	NS	S+	S+ (0,05)	S+ (0,10)	NS	NS	NS	NS
15-Umbuzeiro	NS	NS	S+ (0,10)	NS	S+ (0,10)	S+ (0,05)	NS	NS	S+	S+
16-Vitória de S. Antão	S+ (0.01)	S+ (0.05)	S+ (0.05)	S+	S+ (0.05)	S+ (0.01)	S+ (0.01)	S+ (0.05)	S+ (0.05)	S+

**MK** (*Mann-Kendall*), **SR** (*Spearman-Rho*), **RL** (*Regressão Linear*), **DC** (*Não Paramétrico Cusum*), **CD** (*Cumulative Deviation*), **WL** (*Worsley Likelihood*), **RS** (*Rank Sum*) e **ST** (*Student t*).

**S+** (Tendência positiva com significância)    **S-** (Tendência negativa com significância)    **NS** (Tendência não significativa ou sem tendência)

Tabela D.9 – Existência de tendência/mudança em AGO e nível de significância

Estações pluviométricas	AGO - Testes estatísticos - <i>Software Trend</i>									
	MK	SR	RL	Tendência	CS	CD	WL	RS	ST	Mudança
1-Alhandra	S+ (0,01)	S+ (0,01)	S+ (0,01)	S+	S+ (0,01)	S+				
2-Atalaia	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	S- (0,01)	NS
3-Bom Jardim	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
4-Caruaru	S+ (0,01)	S+ (0,01)	S+ (0,01)	S+	S+ (0,01)	S+				
5-Garanhuns	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
6-Itambé	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
7-João Pessoa	NS	NS	NS	NS	S+ (0,01)	S+ (0,01)	NS	NS	NS	NS
8-Maceió	S+ (0,01)	S+ (0,01)	S+ (0,01)	S+	NS	NS	S+ (0,01)	S+ (0,01)	S+ (0,01)	S+
9-Palmares	NS	NS	NS	NS	S+ (0,01)	S+ (0,01)	NS	NS	NS	NS
10-Palmeira dos Índios	S- (0,05)	S- (0,10)	S- (0,01)	S-	S- (0,01)	NS	S- (0,01)	S- (0,01)	S- (0,01)	S-
11-Recife	S+ (0,01)	S+ (0,01)	S+ (0,01)	S+	NS	NS	NS	NS	NS	NS
12-S. Lourenço da Mata	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
13-Surubim	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
14-Timbaúba	NS	NS	NS	NS	S+ (0,01)	S+ (0,01)	NS	NS	NS	NS
15-Umbuzeiro	NS	S+ (0,10)	S+ (0,10)	S+	NS	NS	NS	S+ (0,10)	S+ (0,10)	NS
16-Vitória de S. Antão	S+ (0,05)	S+ (0,05)	S+ (0,05)	S+	S+ (0,01)	S+ (0,01)	NS	S+ (0,10)	NS	S+

Tabela D.10 – Existência de tendência nos índices pluviométricos e nível de significância

Estações pluviométricas	Tendências – <i>Software RCLindex</i>								
	PRCPTOT	RMedmm	Rx1day	Rx5day	SDII	R10mm	R50mm	R99p	CWD
1-Alhandra	S+ (0,00)	S+ (0,10)	S+ (0,01)	S+ (0,09)	NS	S+ (0,00)	S+ (0,05)	S+ (0,03)	NS
2-Atalaia	S- (0,00)	NS	NS	NS	S- (0,00)	S- (0,00)	S- (0,00)	S- (0,04)	S+ (0,00)
3-Bom Jardim	S- (0,00)	S- (0,05)	NS	NS	NS	S+ (0,00)	S- (0,02)	S- (0,02)	S- (0,03)
4-Caruaru	S+ (0,00)	NS	NS	S+ (0,03)	S- (0,09)	S+ (0,01)	NS	NS	NS
5-Garanhuns	NS	NS	NS	NS	S+ (0,07)	NS	NS	NS	S- (0,01)
6-Itambé	NS	S+ (0,02)	S+ (0,01)	NS	NS	NS	NS	NS	NS
7-João Pessoa	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
8-Maceió	S+ (0,02)	NS	NS	NS	NS	S+ (0,03)	S+ (0,10)	NS	S+ (0,00)
9-Palmares	NS	NS	NS	NS	NS	S- (0,10)	NS	NS	NS
10-Palmeira dos Índios	S- (0,02)	NS	S+ (0,09)	NS	S- (0,00)	S- (0,00)	NS	NS	S- (0,05)
11-Recife	S+ (0,01)	S+ (0,01)	S+ (0,02)	NS	S+ (0,01)	NS	S+ (0,01)	S+ (0,01)	NS
12-S. Lourenço da Mata	NS	NS	NS	S+ (0,06)	S+ (0,02)	NS	S+ (0,08)	S+ (0,09)	S- (0,04)
13-Surubim	NS	NS	NS	NS	S+ (0,00)	NS	NS	NS	S- (0,01)
14-Timbaúba	NS	NS	NS	NS	S+ (0,00)	NS	NS	NS	NS
15-Umbuzeiro	S+ (0,07)	NS	NS	NS	S+ (0,00)	S+ (0,05)	NS	S+ (0,08)	S- (0,10)
16-Vitória de Santo Antão	S+ (0,00)	S+ (0,00)	S+ (0,00)	S+ (0,00)	S+ (0,02)	NS	S+ (0,00)	S+ (0,00)	NS

MK (*Mann-Kendall*), SR (*Spearman-Rho*), RL (*Regressão Linear*), DC (*Não Paramétrico Cusum*), CD (*Cumulative Deviation*), WL (*Worsley Likelihood*), RS (*Rank Sum*) e ST (*Student t*).  
 S+ (Tendência positiva com significância) S- (Tendência negativa com significância) NS (Tendência não significativa ou sem tendência)

ANEXO E

Índices pluviométricos regionais  
de tendências positivas

---

Tabela E.1 – Índices regionais com tendência positiva na Sub-bacia 39 (1950-2012)

<b>ANO</b>	<b>PRCIPTOT</b>	<b>RMedmm</b>	<b>Rx1day</b>	<b>Rx5day</b>	<b>SDII</b>	<b>R10mm</b>	<b>R50mm</b>	<b>R99p</b>	<b>CWD</b>
1950	1037,2	0,0	54,8	93,7	7,6	27,0	1,8	17,0	9,0
1951	1041,1	0,0	64,1	123,1	8,4	34,3	3,6	17,6	9,0
1952	920,6	0,0	42,3	86,7	6,3	23,8	1,4	0,0	8,0
1953	1150,3	0,0	49,9	120,7	8,0	35,8	2,0	0,0	10,0
1954	999,0	0,0	57,3	134,5	8,0	29,0	2,6	0,0	6,5
1955	1287,2	0,0	56,2	106,7	7,8	41,5	3,0	0,0	6,0
1956	1109,1	0,8	68,4	150,0	8,3	28,5	4,2	85,8	7,5
1957	927,9	0,5	80,5	135,2	6,5	24,5	3,2	56,5	10,5
1958	703,0	0,0	55,9	127,7	7,4	23,8	1,8	38,3	8,5
1959	1018,9	0,7	59,1	114,9	8,0	27,3	5,8	89,6	9,5
1960	957,5	0,5	67,3	110,9	8,6	27,3	1,2	86,2	9,0
1961	1465,3	1,3	93,6	207,8	12,0	35,3	5,2	205,5	13,0
1962	1140,9	1,5	90,0	107,1	10,7	27,8	4,0	111,7	8,5
1963	1274,6	1,0	90,7	152,0	9,7	33,8	5,2	83,0	9,0
1964	1821,2	1,5	91,2	126,3	10,2	50,3	6,3	184,3	8,5
1965	1160,5	0,8	97,1	144,3	8,6	33,0	3,3	91,5	11,0
1966	1414,2	2,5	89,6	116,7	10,0	38,0	6,5	218,0	11,0
1967	1140,0	0,3	75,8	86,2	8,5	26,5	5,0	22,1	8,0
1968	1005,2	0,5	58,4	116,8	8,6	26,0	2,4	85,9	6,5
1969	1231,4	0,8	74,7	119,2	10,8	35,5	2,2	27,2	12,0
1970	1236,1	3,3	162,6	166,5	12,0	18,5	9,0	252,7	9,0
1971	1218,8	1,0	76,8	139,4	9,1	34,0	4,8	86,9	7,0
1972	1229,1	0,8	74,4	116,4	9,9	35,3	5,6	38,0	11,5
1973	1415,6	1,5	89,3	126,8	11,4	40,5	6,2	240,8	9,0
1974	1597,8	1,0	73,0	148,8	11,2	53,0	5,8	72,4	8,0
1975	1588,9	1,3	100,8	185,0	10,8	49,8	7,3	80,1	15,5
1976	1312,3	0,7	72,2	98,0	10,6	32,7	5,3	69,8	9,5
1977	1764,1	1,0	87,7	174,3	12,7	49,3	5,8	167,9	16,0
1978	1800,3	0,8	99,5	117,1	11,5	51,5	6,2	80,0	10,0
1979	1283,8	0,3	73,0	92,0	8,8	34,5	2,4	56,4	12,0
1980	1517,5	2,0	129,4	199,5	8,1	42,7	2,4	226,8	10,5
1981	1181,7	0,8	80,0	151,3	7,3	28,3	2,0	104,3	6,5
1982	1335,2	0,3	69,3	106,3	11,3	33,8	4,0	43,9	9,0
1983	1018,9	0,5	62,0	105,3	12,1	27,3	2,0	60,7	7,0
1984	1690,1	1,8	83,9	160,4	12,2	40,0	6,5	255,6	14,0
1985	1901,3	1,3	90,6	163,9	14,4	60,0	8,0	229,0	11,0
1986	2198,0	2,8	127,6	139,6	16,0	63,5	9,2	259,5	6,5
1987	1497,0	0,5	90,3	157,8	11,1	42,8	6,4	50,9	5,5
1988	1701,4	1,8	100,9	165,4	14,3	48,5	7,6	227,8	9,0
1989	1972,4	1,8	95,6	187,0	12,9	56,0	11,0	218,2	9,0
1990	1335,3	2,3	138,8	162,3	16,2	31,7	5,5	263,4	12,5
1991	1427,1	0,5	80,0	137,3	13,4	49,3	5,4	92,8	25,0
1992	2057,2	1,3	101,0	185,2	10,9	0,0	5,3	149,6	0,0
1993	711,3	0,7	99,5	97,9	7,6	9,0	2,7	23,7	13,0
1994	1802,7	1,5	100,1	148,5	11,8	50,0	8,8	212,6	25,5
1995	1185,4	1,0	87,0	133,9	9,8	32,8	5,6	98,2	14,5
1996	1437,9	1,8	123,9	146,2	10,2	42,0	5,4	167,9	19,0
1997	1275,5	1,0	78,6	158,3	10,4	42,3	5,4	115,2	10,0
1998	807,6	0,0	60,0	86,4	7,9	23,5	1,2	0,0	14,0
1999	921,2	0,0	55,7	70,9	8,2	27,8	2,6	0,0	12,0
2000	2103,9	3,5	128,2	210,2	12,8	57,0	10,4	388,4	19,5
2001	1092,0	0,5	81,1	101,2	8,7	28,5	3,2	32,7	27,5
2002	1441,6	0,8	98,1	146,0	10,1	41,5	5,4	64,0	26,0
2003	1241,8	1,3	80,8	137,3	9,3	36,0	4,4	86,3	15,5
2004	1724,2	2,0	112,4	199,0	11,7	50,8	5,8	166,7	19,5
2005	1466,7	2,0	112,9	243,8	11,5	38,3	6,0	262,1	18,5
2006	1332,8	0,5	71,2	102,6	9,0	37,3	3,8	38,8	14,0
2007	1378,3	0,3	81,9	134,1	8,7	38,8	4,4	91,1	18,0
2008	1494,3	1,0	86,8	109,5	8,9	36,8	6,0	90,5	27,5
2009	1716,5	2,3	103,1	143,8	10,2	47,8	7,0	174,7	43,5
2010	1378,4	1,0	107,4	218,2	9,9	36,0	3,4	157,6	14,5
2011	2051,8	3,3	125,6	234,6	12,2	50,5	10,4	330,2	20,5
2012	1023,8	1,0	95,2	128,7	10,3	22,5	4,5	145,0	12,0

ANEXO F

Testes de aderência nas  
correlações de Pearson

---

Tabela F.1 – Resultados dos testes de significância dos coeficientes de correlação

Item	Índice Pluviométrico	Índice de TSM	Coeficiente de correlação	Estatística de teste	Valor crítico	Hipótese Nula $h_0$			Correlação
						$\alpha = 0.01$	$\alpha = 0.05$	$\alpha = 0.10$	
1	<u>PRCPTOT</u>	Niño 1+2	-0,167	-1,324670	1,670219		-	-	-
		Niño 3	-0,111	-1,873410	1,670219		-	-	-
		Niño 3.4	-0,087	-0,681900	1,670219		-	-	-
		Niño 4	-0,026	-0,200280	1,670219		-	-	-
		IOS	+0,119	+0,931445	1,670219		-	-	-
		ONI	-0,169	-1,336530	1,670219		-	-	-
		TNAI	-0,227	-1,817030	1,670219		-	Rejeitar	Existente
		TSAI	+0,213	+1,704494	1,670219		-	Rejeitar	Existente
2	<u>RMedmm</u>	Niño 1+2	-0,182	-1,446560	1,670219		-	-	-
		Niño 3	-0,139	-1,094320	1,670219		-	-	-
		Niño 3.4	-0,093	-0,728940	1,670219		-	-	-
		Niño 4	+0,012	+0,096151	1,670219		-	-	-
		IOS	+0,211	+1,673896	1,670219		-	Rejeitar	Existente
		ION	-0,166	-1,313160	1,670219		-	-	-
		TNAI	-0,027	+0,208625	1,670219		-	-	-
		TSAI	+0,280	+2,278614	1,999624		Rejeitar	-	Existente
3	<u>Rx1day</u>	Niño 1+2	-0,125	-0,982730	1,670219		-	-	-
		Niño 3	-0,024	-0,185830	1,670219		-	-	-
		Niño 3.4	+0,040	-0,315308	1,670219		-	-	-
		Niño 4	+0,161	+1,275071	1,670219		-	-	-
		IOS	+0,081	+0,633125	1,670219		-	-	-
		ION	-0,054	-0,422380	1,670219		-	-	-
		TNAI	+0,113	+0,886011	1,670219		-	-	-
		TSAI	+0,219	+1,752934	1,670219		-	Rejeitar	Existente
4	<u>Rx5day</u>	Niño 1+2	-0,128	-1,005330	1,670219		-	-	-
		Niño 3	-0,052	-0,407880	1,670219		-	-	-
		Niño 3.4	+0,001	-0,009638	1,670219		-	-	-
		Niño 4	+0,076	+0,597562	1,670219		-	-	-
		IOS	+0,124	+0,965595	1,670219		-	-	-
		ION	-0,060	-0,471750	1,670219		-	-	-
		TNAI	+0,174	+1,379539	1,670219		-	-	-
		TSAI	+0,134	+1,058327	1,670219		-	-	-
5	<u>SDII</u>	Niño 1+2	-0,0211	-0,161350	1,670219		-	-	-
		Niño 3	+0,026	+0,208770	1,670219		-	-	-
		Niño 3.4	+0,045	+0,353609	1,670219		-	-	-
		Niño 4	+0,093	+0,727092	1,670219		-	-	-
		IOS	-0,049	-0,383160	1,670219		-	-	-
		ION	-0,034	-0,264560	1,670649		-	-	-
		TNAI	-0,219	-1,756200	1,670649		-	Rejeitar	Existente
		TSAI	+0,262	+2,119172	1,670219		Rejeitar	-	Existente

Hipótese nula  $h_0$  (os dados das variáveis não são correlacionados)

Tabela F.2 – Resultados dos testes de significância dos coeficientes de correlação

Item	Índice Pluviométrico	Índice de TSM	Coeficiente de correlação	Estatística de teste	Valor crítico	Hipótese Nula $h_0$			Correlação
						$\alpha = 0.01$	$\alpha = 0.05$	$\alpha = 0.10$	
6	<u>R10mm</u>	Niño 1+2	-0,169	-1,340090	1,670219	-	-	-	-
		Niño 3	-0,136	-1,074320	1,670219	-	-	-	-
		Niño 3.4	-0,143	-1,124510	1,670219	-	-	-	-
		Niño 4	-0,090	-0,707110	1,670219	-	-	-	-
		IOS	+0,203	+1,617039	1,670219	-	-	-	-
		ION	-0,184	-1,465160	1,670649	-	-	-	-
		TNAI	-0,188	-1,491350	1,670649	-	-	-	-
		TSAI	+0,334	+2,767953	2,658857	Rejeitar	-	-	Existente
7	<u>R50mm</u>	Niño 1+2	-0,168	-1,333640	1,670219	-	-	-	-
		Niño 3	-0,156	-1,231910	1,670219	-	-	-	-
		Niño 3.4	-0,130	-1,021630	1,670219	-	-	-	-
		Niño 4	-0,066	-0,520000	1,670219	-	-	-	-
		IOS	+0,214	+1,694902	1,670219	-	-	Rejeitar	Existente
		ION	-0,212	-1,693820	1,670649	-	-	Rejeitar	Existente
		TNAI	-0,267	-2,166460	1,999624	-	Rejeitar	-	Existente
		TSAI	+0,265	+2,148474	1,999624	-	Rejeitar	-	Existente
8	<u>R99p</u>	Niño 1+2	-0,225	-1,806350	1,670219	-	-	Rejeitar	Existente
		Niño 3	-0,191	-1,519400	1,670219	-	-	-	-
		Niño 3.4	-0,133	-1,044510	1,670219	-	-	-	-
		Niño 4	-0,031	-0,245660	1,670219	-	-	-	-
		IOS	+0,192	+1,513107	1,670219	-	-	-	-
		ION	-0,208	-1,659680	1,670649	-	-	-	-
		TNAI	-0,012	-0,096460	1,670219	-	-	-	-
		TSAI	+0,285	+2,324669	1,999624	-	Rejeitar	-	Existente
9	<u>CWD</u>	Niño 1+2	+0,090	+0,703699	1,670219	-	-	-	-
		Niño 3	+0,156	+1,230196	1,670219	-	-	-	-
		Niño 3.4	+0,138	+1,691334	1,670219	-	-	-	-
		Niño 4	+0,244	+1,964627	1,670219	-	-	-	-
		IOS	+0,025	+0,197448	1,670219	-	-	-	-
		ION	+0,003	+0,019797	1,670219	-	-	-	-
		TNAI	+0,200	+1,597392	1,670219	-	-	-	-
		TSAI	+0,442	+3,848969	2,658857	Rejeitar	-	-	Existente

Hipótese nula  $h_0$  (os dados das variáveis não são correlacionados)

ANEXO G

Distribuição de Gumbel

---

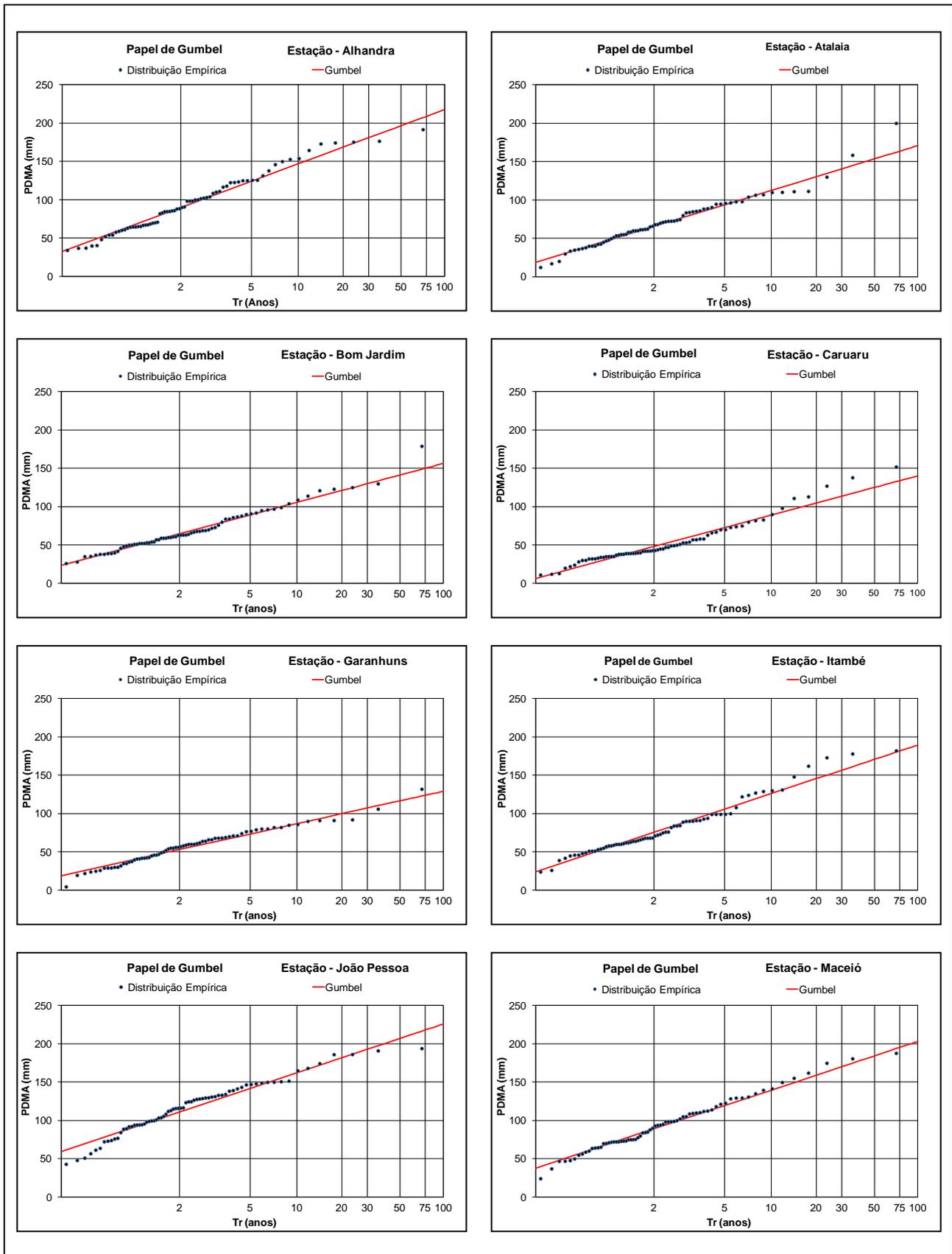


Figura G.1 – Ajuste da distribuição empírica ao modelo teórico de *Gumbel*

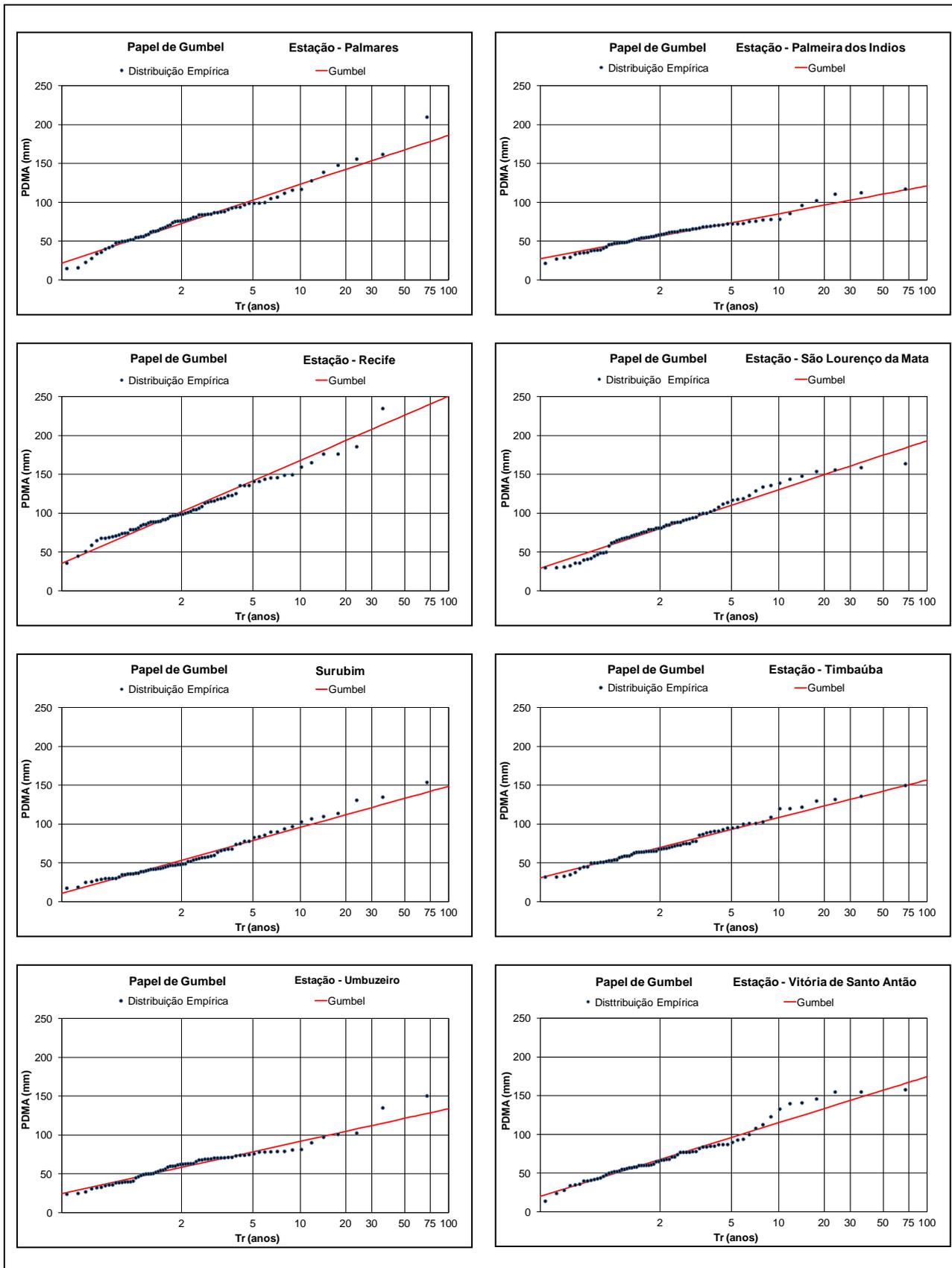


Figura G.2 – Ajuste da distribuição empírica ao modelo teórico de *Gumbel*