GUSTAVO DE ALMEIDA COELHO

**Análise da não estacionariedade da precipitação em São Paulo / SP e
implicações sobre os sistemas de drenagem urbana**

São Paulo

2014

GUSTAVO DE ALMEIDA COELHO

**Análise da não estacionariedade da precipitação em São Paulo / SP e
implicações sobre os sistemas de drenagem urbana**

**Dissertação apresentada à Escola
Politécnica para obtenção do título de
Mestre em Engenharia**

**São Paulo
2014**

GUSTAVO DE ALMEIDA COELHO

**Análise da não estacionariedade da precipitação em São Paulo / SP e
implicações sobre os sistemas de drenagem urbana**

**Dissertação apresentada à Escola
Politécnica para obtenção do título de
Mestre em Engenharia**

**Área de Concentração:
Engenharia Hidráulica**

**Orientador:
Prof. Dr. Arisvaldo Vieira Mello Jr.**

**São Paulo
2014**

Este exemplar foi revisado e corrigido em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, 29 de setembro de 2014.

Assinatura do autor _____

Assinatura do orientador _____

Catálogo-na-publicação

Coelho, Gustavo de Almeida

**Análise da não estacionaridade da precipitação em São Paulo / SP e implicações sobre os sistemas de drenagem urbana / G.A. Coelho. – versão corr. -- São Paulo, 2014.
197 p.**

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental.

1.Hidrologia 2.Precipitação 3.Não estacionaridade 4.Drenagem urbana (Sistemas) I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental II.t.

DEDICATÓRIAS

Dedico este trabalho aos meus pais, Rita e Milton,
reconhecendo, com orgulho e carinho, a sua
perseverança em me educar e me incentivar.

Estendo às minhas irmãs,
Maria Augusta e Maria Eduarda,
e à minha grande amiga Giselle
esta lembrança.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu orientador, o professor Arisvaldo Vieira Mello Jr., pelos conselhos precisos, pelo apoio e pela confiança ao longo do desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço ao professor Benedito Braga Jr. que me orientou e acompanhou no início desta pesquisa, e aos membros das bancas de qualificação e defesa, os professores Mario Thadeu Lemes de Barros, Rubem La Laina Porto e Eduardo Mário Mediondo, pelas contribuições e observações para aperfeiçoamento deste trabalho.

Agradeço à equipe técnica do Departamento de Águas e Energia Elétrica do Estado de São Paulo (DAEE/SP) e da Empresa Metropolitana de Águas e Energia (EMAE) pelo fornecimento dos dados de precipitação complementares utilizados na elaboração dessa pesquisa.

Agradeço aos diretores e colegas da Hidrostudio Engenharia, pelo estímulo e apoio.

Agradeço à minha família pelo amor, apoio e incentivo durante todos os momentos desta importante etapa da minha formação.

RESUMO

COELHO, G. de A. **Análise da não estacionariedade da precipitação em São Paulo / SP e implicações sobre os sistemas de drenagem urbana.** 2014. 185 p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.

Os sistemas relacionados à gestão e manejo dos recursos hídricos são concebidos e operados em todo o mundo considerando, dentre outras, a hipótese da estacionariedade da precipitação. Sob a hipótese da não estacionariedade, o possível aumento na magnitude e frequência de eventos extremos pode reduzir o nível de proteção das obras hidráulicas e acarretar em prejuízos econômicos, sociais e ambientais significativos. Em metrópoles como São Paulo, onde as bacias hidrográficas sofreram grandes transformações, o aumento da vulnerabilidade da infraestrutura hídrica, como os sistemas de drenagem, pode representar um risco ainda maior. Inserido neste contexto, esta pesquisa possui o objetivo de verificar se a precipitação na cidade de São Paulo apresenta um comportamento não estacionário e quais seriam as suas implicações sobre estudos hidrológicos, projetos de engenharia e custo de obras. Os testes não paramétricos de Mann-Kendall e Mann-Whitney foram aplicados para a detecção de mudanças graduais e abruptas respectivamente. A distribuição generalizada de valores extremos foi ajustada para identificação e quantificação das mudanças na magnitude e frequência da precipitação. A partir dos registros de precipitação em seis postos pluviométricos localizados na cidade de São Paulo, o comportamento não estacionário foi identificado em três séries de precipitação total anual e em duas séries de precipitação máxima diária anual. Para um aumento na precipitação de 9,5% entre 1997 e 2012, o aumento do escoamento superficial é superior a 28% para os tempos de retorno entre 10 e 100 anos. Esta mudança na precipitação pode acarretar em um aumento dos custos das obras de sistemas de micro e macrodrenagem entre 6% e 11%.

Palavras-chave: Hidrologia. Precipitação. Não estacionariedade. Sistemas de Drenagem Urbana.

ABSTRACT

COELHO, G. de A. **Análise da não estacionariedade da precipitação em São Paulo / SP e implicações sobre os sistemas de drenagem urbana.** 2014. 185 p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.

Water resources systems are planned and managed under rainfall stationarity hypothesis. Under non-stationarity, possible extreme precipitation magnitude and frequency increase may reduce water structures risk protection and cause several significant economic, social and environmental damage. In metropolises such as São Paulo, water infrastructure vulnerability increase may represent an even important risk, especially of flooding. In this context, this paper aims to verify in the city of São Paulo, if rainfall time series follow a non-stationary behavior and what would be its implications of hydrologic studies, engineering projects and work costs. Mann-Kendall and Mann-Whitney non-parametric tests were performed to detect changes gradually and in moments respectively. GEV distribution was fitted to identify and quantify changes in rainfall magnitude and frequency. From six rainfall series recorded in rain gauges in São Paulo city, non-stationarity was identified in three series of annual total and two of annual maximum daily precipitation. For an observed increase of total precipitation of 9.5% between 1997 and 2012, runoff increases in more than 28% for return periods between 10 and 100 years. This change of rainfall may increase work cost of minor and major drainage systems between 6% to 11%.

Keywords: Hydrology. Rainfall. Non-stationarity. Urban Drainage Systems.

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 - Ciclo hidrológico com os valores do balanço hídrico anual expressos em unidades relativas de 100 para a taxa de precipitação sobre a terra	34
Figura 3.2 - Formação da precipitação.....	35
Figura 3.3 - Quantidade média mensal de vapor d'água na atmosfera (NASA, 2012).	36
Figura 3.4 - Zonas de Convergência Intertropical (ZCIT)	38
Figura 3.5 - Precipitação mensal total nas regiões tropicais para os meses de janeiro de julho de 2012.....	38
Figura 3.6 - Esquema das escalas e camadas verticais encontradas em áreas urbanas	47
Figura 3.7 - Esquema representativo da variação da temperatura superficial e atmosférica.....	49
Figura 3.8 - Processo de modificação das propriedades das nuvens pelos aerossóis	52
Figura 3.9 - Processo de desenvolvimento de nuvens convectivas numa atmosfera primitiva (acima) e poluída (abaixo)	53
Figura 3.10 - Definição das sub-regiões utilizadas para a análise de mudanças climáticas regionais sobre os continentes proposta pelo IPCC	55
Figura 3.11 - a) Localização das sub-regiões (azul) e dos postos pluviométricos utilizados (círculos); b) Tendências observadas na precipitação total anual para o período entre 1950 e 2010	58
Figura 4.1 - Localização do município de São Paulo	63
Figura 4.2 - Municípios integrantes da Região Metropolitana de São Paulo (RMSP)	64
Figura 4.3 - Expansão Urbana da Região Metropolitana de São Paulo	65
Figura 4.4 - Unidades Climáticas Naturais - Município de São Paulo	69
Figura 4.5 - Mapa de localização dos postos pluviométricos analisados	73
Figura 4.6 - Localização do Posto A – Observatório do IAG	74
Figura 4.7 - Localização do Posto B - Luz (Estação)	74
Figura 4.8 - Localização do Posto C - Congonhas (Aeroporto)	75
Figura 4.9 - Localização do Posto D–Instituto Biológico	75
Figura 4.10 - Localização do Posto E – Pedreira	76

Figura 4.11 - Localização do Posto F – Represa Guarapiranga	76
Figura 4.12 - Inconsistências que podem ser constatadas ao aplicar o Método da Dupla Massa.....	80
Figura 4.13 - Esquema da área do projeto de microdrenagem.....	90
Figura 4.14 - Cálculo de vazões para seções compostas.....	91
Figura 4.15 - Planta de bacia hidrográfica e localização do trecho de canalização..	93
Figura 5.1 - Planta de topologia da bacia hidrográfica para simulação hidrológica	151
Figura 5.2 - Seção típica do projeto do canal	155

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 4.1 - Evolução populacional do município de São Paulo e RMSPP	65
Gráfico 4.2 - Intervalos das séries de dados de precipitação total anual levantados	72
Gráfico 4.3 - Intervalos das séries de dados de precipitação máxima diária anual levantados e utilizados	72
Gráfico 4.4 - Intervalo das séries de dados de precipitação total anual após o preenchimento das falhas	79
Gráfico 5.1 - Dupla Massa - Posto "A"	97
Gráfico 5.2 - Dupla Massa - Posto "B"	97
Gráfico 5.3 - Dupla Massa - Posto "C"	98
Gráfico 5.4 - Dupla Massa - Posto "D"	98
Gráfico 5.5 - Dupla Massa - Posto "E"	98
Gráfico 5.6 - Dupla Massa - Posto "F"	98
Gráfico 5.7 - Diagrama <i>Box Plot</i> para as séries de precipitação total anual.....	99
Gráfico 5.8 - Diagrama <i>Box Plot</i> para as séries de precipitação máxima diária anual	101
Gráfico 5.9 - Resultados do teste de Mann-Kendall para a precipitação total anual	103
Gráfico 5.10 - Variação da estatística de Kendall em função da duração das séries de dados de precipitação total anual.....	105
Gráfico 5.11 - Precipitação total anual no posto A, detecção de mudanças abruptas	106
Gráfico 5.12 - Precipitação total anual no posto B, detecção de mudanças abruptas e médias.....	107
Gráfico 5.13 - Precipitação total anual no posto C, detecção de mudanças abruptas e médias.....	107
Gráfico 5.14 - Precipitação total anual no posto D, detecção de mudanças abruptas e médias.....	108
Gráfico 5.15 - Precipitação total anual no posto E, detecção de mudanças abruptas e médias.....	109
Gráfico 5.16 - Precipitação total anual no posto F, detecção de mudanças abruptas e médias.....	109
Gráfico 5.17 - Precipitação total anual em função do tempo de retorno - Posto A..	110

Gráfico 5.18 - Variação da precipitação total anual para diferentes tempos de retorno - Posto A	111
Gráfico 5.19 - Precipitação total anual em função do tempo de retorno - Posto B .	112
Gráfico 5.20 - Precipitação total anual em função do tempo de retorno, série reduzida - Posto B	113
Gráfico 5.21 - Precipitação total anual em função do tempo de retorno - Posto C .	114
Gráfico 5.22 - Variação da precipitação total anual para diferentes tempos de retorno - Posto C.....	115
Gráfico 5.23 - Precipitação total anual em função do tempo de retorno - Posto D .	116
Gráfico 5.24 - Variação da precipitação total anual para diferentes tempos de retorno - Posto D.....	117
Gráfico 5.25 - Precipitação total anual em função do tempo de retorno - Posto E .	118
Gráfico 5.26 - Precipitação total anual em função do tempo de retorno, série reduzida - Posto E	119
Gráfico 5.27 - Precipitação total anual em função do tempo de retorno - Posto F..	121
Gráfico 5.28 - Variação da precipitação total anual para diferentes tempos de retorno - Posto F	122
Gráfico 5.29 - Resultados do teste de Mann-Kendall para a precipitação máxima diária anual	124
Gráfico 5.30 - Variação da estatística de Kendall em função da duração das séries de dados para a precipitação máxima diária anual.....	126
Gráfico 5.31 - Precipitação máxima diária anual no posto A e detecção de mudanças abruptas.....	127
Gráfico 5.32 - Precipitação máxima diária anual no posto B e detecção de mudanças abruptas.....	128
Gráfico 5.33 - Precipitação máxima diária anual no posto C e detecção de mudanças abruptas.....	128
Gráfico 5.34 - Precipitação máxima diária anual no posto D e detecção de mudanças abruptas.....	129
Gráfico 5.35 - Precipitação máxima diária anual no posto E e detecção de mudanças abruptas.....	129
Gráfico 5.36 - Precipitação máxima diária anual no posto F e detecção de mudanças abruptas.....	129

Gráfico 5.37 - Precipitação máxima diária em função do tempo de retorno - Posto A.	132
Gráfico 5.38 - Variação da precipitação máxima para diferentes tempos de retorno - Posto A.....	133
Gráfico 5.39 - Precipitação máxima diária em função do Tempo de Retorno - Posto B	134
Gráfico 5.40 - Variação da precipitação máxima para diferentes tempos de retorno - Posto B.....	135
Gráfico 5.41 - Precipitação máxima diária em função do Tempo de Retorno - Posto C	136
Gráfico 5.42 - Variação da precipitação máxima para diferentes tempos de retorno - Posto C	137
Gráfico 5.43 - Precipitação máxima diária em função do Tempo de Retorno - Posto D	138
Gráfico 5.44 - Variação da precipitação máxima para diferentes tempos de retorno - Posto D.	139
Gráfico 5.45 - Precipitação máxima diária em função do Tempo de Retorno - Posto C	140
Gráfico 5.46 - Variação da precipitação máxima para diferentes tempos de retorno - Posto E.....	141
Gráfico 5.47 - Precipitação máxima diária em função do Tempo de Retorno - Posto F	142
Gráfico 5.48 - Variação da precipitação máxima para diferentes tempos de retorno - Posto F	143
Gráfico 5.49 - Ietogramas de projeto	149

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Resumo das tendências observadas predominantes nas sub-regiões.	56
Tabela 3.2 - Porcentagem de estações mostrando tendências significativas e não significativas ao nível de 5% entre 1950 e 1999	61
Tabela 3.3 - Porcentagem de estações mostrando tendências significativas e não significativas ao nível de 5% entre 1990 e 1999	61
Tabela 4.1 - Equações Intensidade-Duração-Frequência elaboradas para São Paulo	70
Tabela 4.2 - Previsão de máximas alturas de chuvas em São Paulo por Martinez e Magni (1999)	70
Tabela 4.3 - Características dos postos pluviométricos selecionados	71
Tabela 4.4 - Distância entre os postos pluviométricos selecionados em quilômetros	78
Tabela 5.1 - Valores obtidos para o coeficiente de determinação (R^2)	97
Tabela 5.2 - Resultados do <i>Box Plot</i> para a precipitação total anual	99
Tabela 5.3 - Resultados do <i>Box Plot</i> para a precipitação máxima diária anual.....	101
Tabela 5.4 - Estatísticas descritivas para as séries de precipitação total anual	102
Tabela 5.5 - Resultados do teste de <i>Mann-Kendall</i> para a precipitação total anual	103
Tabela 5.6 - Resultados do teste de <i>Mann-Kendall</i> para as séries com e sem <i>outliers</i> para a precipitação total anual	103
Tabela 5.7 - Resultados do teste de <i>Mann-Kendall</i> para as séries parciais de precipitação total anual - Posto A.....	105
Tabela 5.8 - Estatística dos períodos entre a mudança abrupta identificados no Posto A.....	106
Tabela 5.9 - Estatística dos períodos entre a mudança abrupta identificados no Posto B.....	107
Tabela 5.10 - Estatística dos períodos entre a mudança abrupta identificados no Posto D	108
Tabela 5.11 - Estatística dos períodos entre a mudança abrupta identificados no Posto E.....	109
Tabela 5.12 - Estatística dos períodos entre a mudança abrupta identificados no Posto F	109
Tabela 5.13 - Distribuição GEV da Precipitação Total Anual – Posto A.....	110

Tabela 5.14 - Variação da precipitação total anual entre 1997 e 2012 - Posto A ...	111
Tabela 5.15 - Distribuição GEV da Precipitação Total Anual - Posto B	112
Tabela 5.16 - Distribuição GEV da Precipitação Total Anual, série reduzida - Posto B	113
Tabela 5.17 - Variação da precipitação total anual entre 1997 e 2004 - Posto B ...	113
Tabela 5.18 - Distribuição GEV da Precipitação Total Anual - Posto C	115
Tabela 5.19 - Variação da precipitação total anual entre 1997 e 2003 - Posto C ...	116
Tabela 5.20 - Distribuição GEV da Precipitação Total Anual - Posto D	117
Tabela 5.21 - Variação da precipitação total anual entre 1997 e 2003 - Posto D ...	118
Tabela 5.22 - Distribuição GEV da Precipitação Total Anual - Posto E	119
Tabela 5.23 - Distribuição GEV da precipitação total anual, série reduzida - Posto E	120
Tabela 5.24 - Variação da precipitação total anual entre 1997 e 2012 - Posto E ...	120
Tabela 5.25 - Distribuição GEV da Precipitação Total Anual - Posto F	121
Tabela 5.26 - Variação da precipitação total anual entre 1997 e 2012 - Posto F ...	122
Tabela 5.27 - Estatísticas descritivas para as séries de precipitação máxima diária anual	123
Tabela 5.28 - Resultados do teste de <i>Mann-Kendall</i> para a precipitação máxima diária anual	124
Tabela 5.29 - Resultados do teste de <i>Mann-Kendall</i> para as séries com e sem outliers	125
Tabela 5.30 - Resultados do teste de <i>Mann-Kendall</i> para as séries parciais de precipitação máxima diária anual - Posto A	126
Tabela 5.31 - Estatística dos períodos entre a mudança abrupta identificados no Posto A	127
Tabela 5.32 - Estatística dos períodos entre a mudança abrupta identificados no Posto B	128
Tabela 5.33 - Precipitação máxima diária até 1997	130
Tabela 5.34 - Precipitação máxima diária para as séries completas	131
Tabela 5.35 - Distribuição GEV - Posto A	132
Tabela 5.36 - Variação da precipitação máxima diária entre 1997 e 2012 - Posto A	133
Tabela 5.37 - Distribuição GEV - Posto B	135

Tabela 5.38 - Variação da precipitação máxima diária entre 1997 e 2004 - Posto B	136
Tabela 5.39 - Distribuição GEV - Posto C	137
Tabela 5.40 - Variação da precipitação máxima diária entre 1997 e 2003 - Posto C	138
Tabela 5.41 - Distribuição GEV - Posto D	139
Tabela 5.42 - Variação da precipitação máxima diária entre 1997 e 2003 - Posto D	140
Tabela 5.43 - Distribuição GEV - Posto E	141
Tabela 5.44 - Variação da precipitação máxima diária entre 1997 e 2012 - Posto E	142
Tabela 5.45 - Distribuição GEV - Posto F	143
Tabela 5.46 - Variação da precipitação máxima diária entre 1997 e 2012 - Posto F	144
Tabela 5.47 - Estimativa do aumento da precipitação com duração de 1.440 min	145
Tabela 5.48 - Capacidade máxima de escoamento nas tubulações	146
Tabela 5.49 - Dimensionamento hidráulico das tubulações para TR 5 anos	147
Tabela 5.50 - Dimensionamento hidráulico das tubulações para TR 10 anos	147
Tabela 5.51 - Resumo dos custos da obra de microdrenagem para TR 5 anos	148
Tabela 5.52 - Resumo dos custos da obra de microdrenagem para TR 10 anos	148
Tabela 5.53 - Ietograma de projeto	149
Tabela 5.54 - Parâmetros para simulação hidrológica	150
Tabela 5.55 - Vazões de pico no nó 22 para os cenários simulados e diferenças percentuais.....	152
Tabela 5.56 - Vazões de pico (m^3/s) para os cenários simulados e diferenças percentuais.....	152
Tabela 5.57 - Dimensionamento do canal para o cenário 1	153
Tabela 5.58 - Verificação hidráulica do canal para o cenário 1	154
Tabela 5.59 - Dimensionamento do canal para o cenário 2	154
Tabela 5.60 - Verificação hidráulica do canal para o cenário 2	154
Tabela 5.61 - Resumo dos custos da canalização	155

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AIQ	Amplitude Interquartil
AR4	Quarto Relatório de Avaliação do IPCC
CETESB	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
CLP	Camada Limite Planetária
CLU	Camada Limite Urbana
CPM	<i>Change Point Model</i>
DAEE/SP	Departamento de Águas e Energia Elétrica do Estado de São Paulo
DU	Dossel Urbano
EMAE	Empresa Metropolitana de Águas e Energia
ENOS	<i>El Niño</i> Oscilação Sul
FCTH	Fundação Centro Tecnológico de Hidráulica
GEV	<i>Generalized Extreme Value</i>
HEC	<i>Hydrologic Engineering Center</i>
HMS	<i>Hydrologic Modeling System</i>
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ICU	Ilha de Calor Urbana
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>
MDC	Modelo Digital da Cidade
METROMEX	<i>Metropolitan Meteorological Experiment</i>
MML	Método do Momento-L
MVS	Método da Máxima Verossimilhança
PDMAT	Plano Diretor de Macrodrenagem da Bacia do Alto Tietê
PMSP	Prefeitura Municipal de São Paulo
RMSP	Região Metropolitana de São Paulo
SCS	<i>Soil Conservation Service</i>
SigRH	Sistema de Informações para o Gerenciamento de Recursos Hídricos do Estado de São Paulo
SIURB	Secretaria Municipal de Infraestrutura Urbana e Obras
SMDU	Secretaria Municipal de Desenvolvimento Urbano
TR	Tempo de Retorno
TRMM	<i>Tropical Rainfall Measuring Mission</i>

UCL	<i>Urban Canopy Layer</i>
UNEP	<i>United Nation Environmental Program</i>
UNFCCC	<i>United Nations Framework Convention on Climate Change</i>
USACE	<i>U.S. Army Corps of Engineers</i>
USGS	<i>U.S. Geological Survey</i>
WMO	<i>World Meteorology Organization</i>
ZCIT	<i>Zona de Convergência Intertropical</i>

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	29
2. OBJETIVOS	31
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	33
3.1. Precipitação: características e importância	33
3.1.1. Formação da precipitação	35
3.1.2. Variabilidade da precipitação	37
3.1.2.1. Variabilidade sazonal	37
3.1.2.2. Variabilidade interanual	38
3.1.3. Instrumentos de medição e aquisição de dados pluviométricos	41
3.1.4. Importância do estudo da precipitação	41
3.2. A influência da urbanização e das mudanças climáticas	42
3.2.1. Mudanças climáticas	43
3.2.2. Gases efeito estufa	45
3.2.3. A influência da urbanização, industrialização e atividades antrópicas	45
3.2.3.1. Ilhas de Calor Urbana (ICU)	48
3.2.3.2. Aumento da rugosidade da superfície	50
3.2.3.3. Desvio de sistemas de precipitação	51
3.2.3.4. Aerossóis e poluição atmosférica	51
3.3. Tendências observadas na precipitação	55
3.3.1. Tendências regionais	55
3.3.1.1. América do Norte e América Central	56
3.3.1.2. América do Sul	57
3.3.1.3. Europa e região do Mediterrâneo	59
3.3.1.4. África	59
3.3.1.5. Ásia	59
3.3.1.6. Oceania	60

3.3.2. Tendências no estado de São Paulo	60
4. METODOLOGIA.....	63
4.1. Caracterização da área de estudo.....	63
4.1.1. Características gerais	63
4.1.2. Hidrografia.....	66
4.1.3. Relevo e Clima.....	66
4.1.4. Pluviometria e equações de chuvas.....	70
4.2. Levantamento de dados	71
4.2.1. Seleção dos postos pluviométricos	71
4.2.2. Localização dos postos pluviométricos	73
4.3. Análise preliminar dos dados levantados	76
4.3.1. Preenchimento de falhas nas séries	77
4.3.2. Análise de consistência dos dados observados.....	79
4.3.3. Verificação da existência de valores atípicos (“outliers”)	80
4.4. Estatísticas descritivas	81
4.4.1. Medidas de tendência central	81
4.4.2. Medidas de dispersão	81
4.5. Análise da não estacionariedade da precipitação.....	82
4.5.1. Detecção de tendências temporais	83
4.5.2. Detecção de mudanças em momentos.....	85
4.5.3. Detecção de mudanças na distribuição	86
4.5.3.1. Distribuição Generalizada de Valores Extremos (GEV).....	87
4.5.3.2. Estimação de parâmetros.....	88
4.6. <i>Software</i> para análise estatística – <i>R Program</i>	88
4.7. Análise dos impactos da mudança da precipitação sobre projetos de drenagem urbana.....	89
4.7.1. Análise de um projeto de microdrenagem.....	89

4.7.1.1.	Método e parâmetros de cálculo hidrológico.....	90
4.7.1.2.	Dimensionamento do sistema de microdrenagem	91
4.7.2.	Análise de um projeto de macrodrenagem	92
4.7.2.1.	Chuva de Projeto	93
4.7.2.2.	Parâmetros para simulação hidrológica	94
4.7.2.3.	Software para modelagem hidrológica – HEC-HMS®	95
4.7.2.4.	Dimensionamento da canalização	95
4.7.3.	Análise orçamentária	96
5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	97
5.1.	Análise preliminar.....	97
5.1.1.	Análise de consistência dos dados observados	97
5.1.2.	Verificação da existência de valores atípicos (“outliers”)	98
5.1.2.1.	Precipitação total anual	98
5.1.2.2.	Precipitação máxima diária anual	100
5.2.	Análise da não estacionariedade da precipitação total anual.....	102
5.2.1.	Estatísticas descritivas	102
5.2.2.	Deteccção de tendências temporais.....	102
5.2.3.	Deteccção de mudanças em momentos	106
5.2.4.	Deteccção de mudanças na distribuição	110
5.2.4.1.	Posto A.....	110
5.2.4.2.	Posto B.....	112
5.2.4.3.	Posto C	114
5.2.4.4.	Posto D	116
5.2.4.5.	Posto E.....	118
5.2.4.6.	Posto F.....	120
5.3.	Análise da não estacionariedade da precipitação máxima diária anual	123
5.3.1.	Estatísticas descritivas	123

5.3.2. Detecção de tendências temporais	123
5.3.3. Detecção de mudanças em momentos	127
5.3.4. Detecção de mudanças na distribuição	130
5.3.4.1. Posto A	132
5.3.4.2. Posto B	134
5.3.4.3. Posto C	136
5.3.4.4. Posto D	138
5.3.4.5. Posto E	140
5.3.4.6. Posto F	142
5.4. Impacto da não estacionariedade sobre os sistemas de drenagem	145
5.4.1. Análise do projeto de um sistema de microdrenagem	146
5.4.1.1. Precipitação de Projeto	146
5.4.1.2. Parâmetros de projeto	146
5.4.1.3. Cálculo de vazões e dimensionamento hidráulico	147
5.4.1.4. Orçamento das obras	148
5.4.2. Análise do projeto de um sistema de macrodrenagem	149
5.4.2.1. Precipitação de Projeto	149
5.4.2.2. Parâmetros para simulação hidrológica	150
5.4.2.3. Resultados da simulação hidrológica	152
5.4.2.4. Dimensionamento hidráulico	153
5.4.2.5. Estimativa de custos	154
6. CONCLUSÕES	157
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	159
APÊNDICE A – Falhas encontradas e preenchidas nas séries de precipitação	171
APÊNDICE B – Resultados do teste de <i>Mann-Kendall</i> para as séries parciais de precipitação total anual	173
APÊNDICE C – Resultados do teste de <i>Mann-Kendall</i> para as séries parciais de precipitação máxima diária anual	177

APÊNDICE D – Orçamento das obras dos sistemas de microdrenagem	181
APÊNDICE E – Orçamento das obras de sistemas de macrodrenagem	185
ANEXO A – Dados de Precipitação Total Anual	187
ANEXO B – Dados de Precipitação Máxima Diária Anual	191
ANEXO C – Distribuições adimensionais de precipitação de Huff (1967)	197

1. INTRODUÇÃO

Os sistemas relacionados à gestão e manejo dos recursos hídricos são concebidos e operados em todo o mundo considerando, dentre outras, a hipótese da estacionariedade da precipitação (Milly *et al.*, 2008). Uma série temporal possui um comportamento estacionário quando, apesar da sua variabilidade natural, as observações amostrais são invariantes com relação à cronologia de suas ocorrências (Naghetini e Pinto, 2007). Assim, o conhecimento da dinâmica de ocorrência da precipitação é essencial para o planejamento e a gestão dos recursos hídricos tendo em vista que, sob a hipótese da não estacionariedade, o possível aumento na magnitude e frequência de eventos extremos pode reduzir o nível de proteção das obras hidráulicas e acarretar em prejuízos econômicos, sociais e ambientais significativos.

Tendo esta questão em vista, há uma necessidade em aprofundar a análise dos registros de precipitação para a verificação da existência de mudanças de padrão ou confirmação da estacionariedade. Entretanto, os processos físicos envolvidos na formação das precipitações são complexos e estão diretamente relacionados às condições climáticas locais como, por exemplo: a temperatura, a umidade do ar e a velocidade e direção dos ventos (Tucci *et al.*, 2007), tornando difícil a interpretação espacial das informações obtidas em estações pluviométricas e identificação das causas das possíveis mudanças.

Neste sentido, diversos estudos têm sido realizados ao redor do mundo onde tendências negativas e positivas foram identificadas (IPCC 2007, 2012, 2013b), porém, com certa variabilidade espacial. A não estacionariedade da precipitação pode estar relacionada a fatores como: emissão de gases de efeito estufa (IPCC, 2007), mudanças climáticas (IPCC, 2013b), urbanização e industrialização (ilhas de calor (Oke, 1982), aumento da rugosidade da superfície (Bornstein e Leroy, 1990), desvio de sistemas de precipitação (Changnon, 1981), poluição atmosférica (Tonn, 2000)) e ocorrência de fenômenos naturais de grande escala e baixa frequência como o *El Niño* (Jain, 2001; Grimm, 2011).

Nos ambientes urbanos, principalmente em metrópoles como São Paulo, onde as bacias hidrográficas sofreram grandes transformações, o aumento da vulnerabilidade da infraestrutura hídrica, como os sistemas de drenagem, pode representar um risco ainda maior. O possível aumento da precipitação ao longo do tempo acarretaria no aumento do escoamento superficial, na necessidade de

estruturas maiores para atender aos parâmetros de dimensionamento atuais e no aumento dos custos com obras. Então, torna-se importante desenvolver métodos e critérios para analisar a não estacionariedade da precipitação e para mensurar as suas consequências sobre a concepção e custos das obras de infraestrutura.

Neste contexto, esta pesquisa possui o objetivo de verificar se a precipitação na cidade de São Paulo apresenta um comportamento não estacionário e quais seriam as suas implicações sobre os estudos hidrológicos, os projetos de engenharia e o custo das obras. A partir deste trabalho espera-se contribuir para a complementação dos estudos de chuvas existentes e apresentar recomendações de projeto e operação de sistemas de drenagem urbana.

2. OBJETIVOS

Esta pesquisa possui como principal objetivo verificar se as precipitações totais anuais e máximas diárias anuais na cidade de São Paulo apresentam comportamento não estacionário, ou seja, se têm sofrido mudanças ao longo do tempo.

Devido à importância da precipitação para a realização de estudos hidrológicos e a sua estreita relação com os projetos de sistemas de drenagem urbana, foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos para a complementação da análise da não estacionariedade, quando confirmada:

- avaliar e quantificar a sua influência sobre os parâmetros de projeto e resultados de estudos hidrológicos;
- quantificar a mudança da precipitação em magnitude e frequência de ocorrência;
- apresentar recomendações sobre a precipitação para a elaboração de projetos de engenharia.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O presente trabalho mostra uma análise da variabilidade das séries históricas de chuvas no município de São Paulo – SP. Assim, o fenômeno natural da precipitação é o tema central desta revisão bibliográfica. Com o intuito de auxiliar a compreensão da sua dinâmica de ocorrência, formação, variabilidade, fatores que a influenciam bem como do seu estudo e obtenção de dados, foram abordados os seguintes tópicos ao longo deste capítulo:

- descrição, características, formação e variabilidade das precipitações;
- o estudo da precipitação e a obtenção de dados;
- a influência da urbanização e das mudanças climáticas;
- tendências observadas nas séries históricas.

3.1. Precipitação: características e importância

O U. S. National Research Council (1991) adotou a seguinte definição de hidrologia, proposta originalmente por Meinzer (1942) e modificada pelo Ad Hoc Panel on Hydrology (1962):

“A Hidrologia é a ciência que trata da água na Terra, a sua ocorrência, circulação e distribuição, as suas propriedades físicas e químicas, e a sua interação com o meio ambiente, incluindo a relação com os seres vivos. O domínio da hidrologia abrange toda a história de vida da água na Terra”.

Este movimento da água, estudado pela hidrologia, ocorre dentro do ciclo hidrológico, definido por Silveira (2007) como o fenômeno de circulação da água entre a superfície terrestre e a atmosfera, impulsionado fundamentalmente pela energia solar associada à gravidade e à rotação da Terra. A Figura 3.1 mostra os componentes do ciclo hidrológico com os valores do balanço hídrico anual.

O sistema hidrológico atmosférico, ambiente onde ocorre o fenômeno estudado neste trabalho, é definido por Chow, Maidment e Mays (1988) como um volume no espaço cercado por uma fronteira, que aceita água e outras entradas, as opera internamente, e as produz como saídas. Processos físicos, químicos e biológicos atuam neste sistema onde a água, o ar e a energia solar são os fatores mais comuns para a análise hidrológica (Mays, 2005).

Figura 3.1 - Ciclo hidrológico com os valores do balanço hídrico anual expressos em unidades relativas de 100 para a taxa de precipitação sobre a terra

Fonte: Adaptado de Chow *et al.* (1988)

No estudo do sistema hidrológico atmosférico, o maior interesse encontra-se nas duas camadas inferiores da atmosfera: a troposfera e a estratosfera. Na troposfera, camada mais próxima da Terra, que varia de 8 a 16 km de espessura, é onde ocorre a maior parte dos fenômenos meteorológicos por possuir cerca de 90% da umidade atmosférica. Na estratosfera, camada superior com 40 a 70 km de espessura, é onde está situada a camada de ozônio que atua como reguladora da radiação solar que atinge a superfície terrestre, principal fonte de energia do ciclo hidrológico.

O intercâmbio entre as circulações da superfície terrestre e da atmosfera, fechando o ciclo hidrológico, ocorre em dois sentidos (Silveira, 2007):

- 1) No sentido superfície-atmosfera, onde o fluxo de água ocorre fundamentalmente na forma de vapor, em decorrência dos fenômenos de evaporação e transpiração;
- 2) No sentido atmosfera-superfície, onde a transferência de água ocorre em qualquer estado físico, sendo mais significativas, em termos mundiais, as precipitações de chuva e neve.

3.1.1. Formação da precipitação

O vapor de água contido na atmosfera constitui um reservatório potencial de água que, ao condensar-se, possibilita a ocorrência de precipitações. A nuvem é um aerossol constituído por uma mistura de ar, vapor de água e de gotículas em estado líquido ou sólido. O ar que envolve as gotículas das nuvens se encontra num estado próximo ao da saturação e, por vezes, supersaturado. Este aerossol se mantém em suspensão pelo efeito da turbulência no meio atmosférico e/ou devido à existência de correntes de ar ascendentes que contrabalançam a força da gravidade (Bertoni e Tucci, 2007).

Os principais aerossóis naturais presentes na atmosfera são poeiras (minerais), *spray* das águas dos mares (sal), cinzas vulcânicas, resíduos biológicos, enquanto as fontes antropogênicas contribuem com poeiras industriais, resíduos de carvão e de queima de biomassa, sulfatos e nitratos. Além destes há ainda a presença de partículas líquidas ou sólidas com origem na conversão de gases provenientes de ambas as fontes (Andreae, 1995).

A origem da precipitação está intimamente ligada ao crescimento das gotículas das nuvens. A condensação do vapor atmosférico ocorre sobre estas partículas que possuem o potencial de formar núcleos de condensação. Então, para que as gotas de água precipitem, é necessário que estas atinjam tamanho suficiente ($\sim 0,1$ mm) para vencer as componentes verticais ascendentes dos movimentos atmosféricos (Squires, 1958; Mays, 2005). A Figura 3.2 ilustra o processo de formação da precipitação.

Figura 3.2 - Formação da precipitação

Fonte: Adaptado de Marsh (1987)

A Figura 3.3 mostra quatro mapas representando a quantidade média mensal de vapor d'água durante quatro meses de diferentes estações do ano de 2012, possibilitando observar a variação da quantidade de vapor d'água nas diferentes regiões do globo ao longo do tempo. As unidades estão em centímetros e equivalem à quantidade de água que poderia ser produzida caso todo o vapor d'água presente na coluna passasse pelo processo de condensação. Os valores mais altos estão representados em azul escuro enquanto os valores mais baixos em amarelo.

Figura 3.3 - Quantidade média mensal de vapor d'água na atmosfera (NASA, 2012).

Fonte: NASA, 2012.

Basicamente, a formação da precipitação requer a ascensão de massas de ar que resfriam a atmosfera e condensam o vapor d'água. Há três mecanismos principais de subida de ar: frontal ou ciclônica, orográfica e convectiva (Mays, 2005).

As precipitações frontais ocorrem quando há o encontro de massas de ar quentes e frias, são de grande duração e atingem grandes áreas com intensidade média (Bertoni e Tucci, 2007).

As precipitações orográficas ocorrem quando ventos quentes e úmidos encontram uma barreira montanhosa, elevam-se e se resfriam adiabaticamente, possuem pequena intensidade, grande duração, cobrem pequenas áreas (Bertoni e Tucci, 2007).

As precipitações convectivas se desenvolvem quando o ar úmido é aquecido na vizinhança do solo, atinge uma temperatura maior do que o ar a sua volta e dá início a uma brusca ascensão local de ar. Ao atingir o nível de condensação, há uma forte inversão de temperatura que gera uma chuva de grande intensidade e pequena duração (Pielke, 2001).

3.1.2. Variabilidade da precipitação

A precipitação varia no tempo e no espaço em torno de sua média de acordo com a influência do padrão geral da circulação atmosférica e de fatores locais (Mays, 2005). Desta forma, a sua variabilidade ao redor do globo terrestre está intimamente relacionada ao clima que interfere na dinâmica da superfície terrestre devido à sua irregularidade e à sua intrínseca e relativamente baixa previsibilidade atual (Silva e Silva, 2012), sofrendo influência direta da temperatura e dos ventos por exemplo. Dentre os diversos fatores que influenciam a formação e ocorrência das precipitações, Silveira (2007) lista os seguintes:

- a desuniformidade com que a energia solar atinge os diversos locais;
- o diferente comportamento térmico dos continentes e relação aos oceanos;
- a quantidade de vapor de água, CO₂ e ozônio presentes na atmosfera;
- a variabilidade espacial de solos e coberturas vegetais;
- a influência da rotação e inclinação do eixo terrestre na circulação atmosférica, sendo esta a razão da existência das estações do ano.

A variabilidade sazonal devido às estações do ano e a variabilidade intersazonal proporcionada pela ocorrência dos fenômenos *El Niño* e *La Niña* tem especial importância na influência da ocorrência das precipitações e, por este motivo são apresentadas com mais detalhes nos itens subsequentes.

3.1.2.1. Variabilidade sazonal

A variabilidade sazonal é influenciada principalmente pelas estações do ano e na maioria das regiões tropicais o ciclo sazonal do regime de chuvas é geralmente bem definido. No Hemisfério Sul, o verão é marcado pela presença da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) (Figura 3.4) nos oceanos equatoriais e das zonas de convergência que formam faixas de precipitação orientadas na direção NE/SE, conectam a região equatorial às latitudes subtropicais, e é onde ocorre a maior contribuição na precipitação total global (Dias, 2001).

Figura 3.4 - Zonas de Convergência Intertropical (ZCIT)

Fonte: Wikipedia (2012)

A Figura 3.5 mostra dois mapas contendo a precipitação total mensal na região tropical para dois meses de diferentes estações do ano de 2012, onde é possível observar a variação sazonal da precipitação pelo globo terrestre. Os valores mais altos de precipitação, apresentada em milímetros, estão representados em azul escuro enquanto os valores mais baixos em branco. As altas latitudes onde não foram realizadas medições estão em cinza.

Figura 3.5 - Precipitação mensal total nas regiões tropicais para os meses de janeiro de julho de 2012

Fonte: NASA (2012)

3.1.2.2. Variabilidade interanual

O *El Niño* Oscilação Sul (ENOS) é um fenômeno de grande escala que ocorre no oceano Pacífico Equatorial e é o principal responsável pela variabilidade climática na região tropical na escala de tempo interanual (Dias, 2001), porém considerado como parte de um evento climático em escala global (Silva e Silva, 2012).

Conforme descrito por Oliveira (2001), o ENOS representa o aquecimento anormal das águas superficiais e subsuperficiais do Oceano Pacífico Equatorial, entre a Costa Peruana e o Pacífico Oeste próximo à Austrália, em conjunto com o enfraquecimento dos ventos alísios (que sopram de leste para oeste) na região equatorial. A associação desses eventos causa mudanças na disponibilidade de vapor d'água, na dinâmica principal de movimentos verticais e na estabilidade vertical do ar (Grimm, Barros e Doyle, 2000) determinando mudanças nos padrões de transporte de umidade e, portanto, na variação da distribuição das chuvas em regiões tropicais e de latitudes médias e altas.

Os principais impactos da ocorrência do *El Niño* resumidos por McPhaden (2002) são a intensificação das chuvas ao longo do Equador sobre as superfícies do mar mais aquecidas, o desenvolvimento de secas na Austrália, Indonésia e países vizinhos, e a ocorrência de chuvas mais fortes sobre as ilhas no Pacífico Central e sobre a costa oeste da América do Sul. Os eventos de *El Niño* ocorrem de uma forma cíclica em períodos irregulares, normalmente com duração entre 12 e 18 meses (McPhaden, 2002), e se apresentam em média num período na ordem de 2 a 7 anos, podendo mostrar variações na sua intensidade (Hanley *et al.*, 2003).

Como exposto por Grimm, Barros e Doyle (2000), a variação irregular que ocorre em torno das condições normais na componente oceânica (*El Niño*) e atmosférica (Oscilação Sul) da região, revela duas fases opostas do fenômeno, sendo um desses extremos representado pelas condições de *La Niña*, quando ocorre um resfriamento das águas superficiais do Oceano Pacífico Tropical e aumento na pressão atmosférica (também denominada fase fria (Philander, 1990) ou fase positiva).

Neste caso há uma intensificação dos ventos alísios fazendo com que as águas mais quentes tendam a ficar mais a oeste do que o normal, gerando evaporação e movimentos ascendentes que contribuem para a formação de nuvens, principalmente, na região do nordeste do Oceano Índico a oeste do Oceano Pacífico. Os movimentos descendentes se localizam na região do Pacífico Equatorial Central e Oriental onde a formação de nuvens de chuva tende a ser inibida (Oliveira, 2001).

A duração e a frequência do *La Niña* também variam entre 12 e 18 meses, e de 2 a 7 anos respectivamente (McPhaden, 2002), porém nas últimas décadas, este evento tem sido observado com menor frequência do que o *El Niño* (Oliveira, 2001). Em relação às precipitações, McPhaden (2002) aponta como principal impacto do *La*

Niña o aumento da probabilidade de ocorrência de chuvas em regiões mais secas do Sudeste da África e no Nordeste do Brasil.

De acordo com Grimm, Barros e Doyle (2000), o Sul da América do Sul, incluindo Brasil, Argentina, Chile, Uruguai e Paraguai, é uma das regiões extratropicais mais afetadas pelos fenômenos *El Niño* e *La Niña*. Por esta razão, o seu conhecimento possui grande importância no estudo das precipitações nesta região e motiva a realização de pesquisas contínuas como resumido na sequência.

Rao e Hada (1990) analisaram as variações anuais e interanuais das precipitações em todo o Brasil e buscaram relacionar possíveis mudanças ao fenômeno de Oscilação Sul. Ao analisar o período entre 1958 e 1978, mostrou-se que o movimento progressivo da ZCIT parece estar associado com a variação progressiva das estações chuvosas na região leste do Brasil equatorial.

Minuzzi *et al.* (2007) analisaram o comportamento da precipitação durante a estação chuvosa da região Sudeste do Brasil em anos de ocorrência da fase fria do ENOS. Os resultados mostraram que numa área específica localizada na Serra da Mantiqueira, a estação chuvosa tende a durar mais do que a média, tendo início precoce e final tardio, porém, o fenômeno climático não influencia o início da estação chuvosa na região Sudeste de modo geral. Em grande parte do estado de São Paulo, observa-se tendência chuvosa entre novembro e março. Entretanto, mesmo havendo anomalias expressivas na precipitação, estas pouco estiveram correlacionadas com o comportamento da temperatura da superfície do mar do Pacífico Equatorial ou com o Índice de Oscilação Sul.

A pesquisa de Grimm e Tedeshi (2009) buscou encontrar indícios significativos da influência do ENOS sobre a frequência e a intensidade de eventos extremos de precipitação durante diferentes períodos do seu ciclo. Embora as mudanças relacionadas ao ENOS sobre a intensidade sejam menos significativas e espacialmente coerentes, há mudanças robustas em diversas regiões, principalmente no Sudeste da América do Sul. As mudanças na frequência de eventos de precipitação extremos são coerentes com as mudanças nas precipitações totais mensais. Entretanto, as mudanças significativas constatadas na frequência dos eventos extremos são muito mais extensivas do que as mudanças na precipitação mensal devido à sensibilidade do ENOS sobre as precipitações diárias extremas.

Grimm (2011) afirma que a associação entre as mudanças climáticas com o aumento da emissão de gases efeito estufa possuem potencial para mudar as quantidades de precipitação na América do Sul, e também a variabilidade natural das precipitações sazonais associadas com o ENOS, como mostrado por simulações e projeções realizadas por diversos modelos. Entretanto, há ainda grande incerteza sobre estas projeções.

3.1.3. Instrumentos de medição e aquisição de dados pluviométricos

A aquisição de dados pluviométricos no solo pode ser realizada por meio de pluviômetros e pluviógrafos. Estes equipamentos atuam de forma pontual por medirem apenas a precipitação interceptada por uma pequena área horizontal na parte superior do aparelho, fornecendo assim, dados limitados na representação temporal e espacial dos eventos pluviométricos registrados. A grande diferença entre os dois equipamentos se encontra no fato de que o pluviógrafo registra os dados automaticamente e o pluviômetro necessita que um operador faça as leituras em intervalos de tempo fixos, geralmente entre 12 ou 24 horas (Chevallier, 2007).

Na atmosfera, a precipitação pode ser medida por meio de satélites e radares meteorológicos. Através de satélites é possível observar o deslocamento de grandes massas de ar e estimar, em sistemas convectivos a quantidade de água líquida resultante da transformação hipotética de todo o vapor de água de uma coluna da atmosfera em um determinado ponto ou área. Utilizando radares meteorológicos, é possível obter amostragens volumétricas da precipitação de forma contínua em um raio de aproximadamente 180 km (Pessoa, 2007).

3.1.4. Importância do estudo da precipitação

O estudo da precipitação tem papel fundamental na hidrologia por ser um dos fenômenos de maior influência no ciclo hidrológico. Partindo da medição da chuva através de postos pluviométricos e, em seguida, procedendo à análise das séries de dados obtidos ao longo do tempo através de métodos estatísticos e outros empíricos, a hidrologia busca resposta, principalmente, para as seguintes questões:

- precipitações média e máxima numa área;
- tempo de retorno de um evento de determinada magnitude;
- curva intensidade – duração – frequência;
- distribuição temporal da precipitação;
- distribuição espacial da precipitação sobre uma região.

Estas informações sobre as precipitações são essenciais para a realização de outros estudos relacionados a projetos de engenharia como, por exemplo:

- estudos hidrológicos e de áreas de inundação;
- cálculos de balanço hídrico;
- planejamento e operação de reservatórios para diferentes fins como aproveitamento energético, abastecimento público, controle de cheia, etc.;
- dimensionamento de sistemas de aproveitamento de água da chuva;
- dimensionamento de estruturas hidráulicas de micro e macrodrenagem.

O conhecimento sobre a ocorrência do fenômeno da precipitação importante não só para algumas questões inerentes à engenharia hidráulica, mas também para situações diárias do governo e da população.

Centros meteorológicos distribuídos pelos estados e países monitoram e analisam o comportamento da atmosfera continuamente através de estações meteorológicas, radares e satélites. Além de registrar o que está acontecendo, estas informações alimentam modelos numéricos que auxiliam os especialistas tanto na previsão do tempo e de eventos meteorológicos mais extremos que possam exigir ações mais urgentes.

Assim, o monitoramento e previsão meteorológica em tempo real, mais especificamente dos eventos pluviométricos, possui papel fundamental no acionamento de sistemas de alerta, gerenciamento de alagamentos e inundações, evacuação de áreas de risco geohidrometeorológicos e operação de obras hidráulicas para controle de cheias por exemplo.

3.2. A influência da urbanização e das mudanças climáticas

O sistema climático é um complexo que consiste na interação da atmosfera, superfície terrestre, neve e gelo, oceano e outros corpos d'água e seres vivos. O clima é usualmente descrito em termos de média e variabilidade da temperatura, precipitação e vento ao longo de um período de tempo que varia entre meses e milhões de anos. O sistema climático evolui ao longo do tempo sob influência da sua dinâmica interna e devido a mudanças de fatores externos que afetam o clima, incluindo fenômenos naturais e alterações na composição atmosférica induzidas pelo homem. A radiação solar é a fonte de energia deste sistema e modificações no seu balanço podem ocorrer de três maneiras (Le Treut *et al.*, 2007):

- 1) Mudando a entrada de radiação solar (por mudanças na órbita da Terra ou do Sol, por exemplo),
- 2) Mudando a fração da radiação solar que é refletida (mudanças da cobertura das nuvens, das partículas atmosféricas ou da vegetação, por exemplo);
- 3) Mudando a radiação de ondas longas a partir da Terra em direção ao espaço (mudando a concentração dos gases efeito estufa, por exemplo).

As pesquisas que vem sendo realizadas sobre a análise de tendências e/ou alterações no comportamento de séries históricas de precipitação a médio e longo prazo normalmente atribuem ou indicam que tais alterações podem estar relacionadas a duas causas principais: urbanização e mudanças climáticas (IPCC, 2007; 2013b). Como introduzido, ambos os fatores podem vir a influenciar o balanço energético, e conseqüentemente, o ciclo hidrológico mesmo que em escalas diferentes. Assim, este item apresenta tais causas e o seu conhecido papel de influência na ocorrência do fenômeno da precipitação.

3.2.1. Mudanças climáticas

As principais referências mundiais de estudos sobre as mudanças climáticas estão reunidas nas publicações do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (*Intergovernmental Panel on Climate Change* - IPCC). O IPCC é um corpo científico e intergovernamental, estabelecido pelo Programa Ambiental das Nações Unidas (*United Nation Environmental Program* - UNEP) juntamente com a Organização Mundial de Meteorologia (*World Meteorology Organization* - WMO) em 1988. O IPCC tem a função de revisar e avaliar estudos científicos, técnicos e socioeconômicos produzidos no mundo para compreensão das mudanças climáticas e assim, providenciar informações científicas rigorosas e balanceadas para tomadores de decisão (IPCC, 2013a).

O termo mudança climática é utilizado pelo IPCC para se referir a uma mudança no estado do clima que pode ser identificada, utilizando testes estatísticos, por exemplo, por alterações na média e/ou variabilidade das suas propriedades, e que persiste por um período extenso, tipicamente décadas ou maior. Refere-se a qualquer mudança no clima ao longo do tempo, seja pela sua variabilidade natural ou como resultado da atividade humana. Entretanto, esta utilização se difere da maneira como o “*United Nations Framework Convention on Climate Change*” (UNFCCC) o define, onde este termo se refere às mudanças no clima que são

atribuídas direta ou indiretamente às atividades humanas que alteram a composição da atmosfera global e que são adicionais à variabilidade climática natural observada ao longo de períodos de tempo comparáveis (Pachauri e Reisinger, 2007).

O UNFCCC é um tratado internacional ao qual diversos países se uniram em 1992 com o objetivo de avaliar cooperativamente o que eles poderiam fazer para limitar o aumento da temperatura média global resultante das mudanças climáticas, e para lidar com os impactos até então considerados inevitáveis (UNFCCC, 2013).

Mudanças substanciais no ciclo hidrológico global são consequências esperadas para o aquecimento global, baseando-se no entendimento que rege os processos físicos e as projeções realizadas por modelos sofisticados que representam o modelo climático terrestre (Allen e Ingram, 2002).

Os estudos apresentados no Quarto Relatório de Avaliação (AR4) do IPCC (IPCC, 2007) indicam que alguns agentes podem influenciar o ciclo hidrológico de maneira diferente de outras interações com as nuvens. Em particular, mudanças nos aerossóis podem ter afetado a precipitação e outros aspectos do ciclo hidrológico com maior intensidade do que outros agentes antropogênicos. A energia depositada na superfície afeta diretamente a evaporação e a transferência de calor sensivelmente. A mudança do fluxo radiativo instantâneo da superfície é uma útil ferramenta de diagnóstico para a compreensão de mudanças no balanço do calor e da umidade e para acompanhar as mudanças climáticas. Entretanto, ao contrário das forças radiativas, isto não pode ser usado para comparar os efeitos de diferentes agentes no equilíbrio médio da temperatura global quantitativamente.

Neste sentido, o monitoramento das mudanças na precipitação nas regiões tropicais é um passo vital em direção ao aumento da confiança das previsões climáticas regionais e em grande escala e dos impactos associados para a sociedade (Meehl, Arblaster e Tebaldi, 2005).

Mesmo dentre tantas incertezas remanescentes, há um consenso geral que com o aumento da temperatura, a intensidade dos eventos de precipitações intensas também aumentou em muitas regiões globalmente, incluindo algumas onde a precipitação média apresenta tendência de redução.

Dentre os vários fatores que influenciam o clima, grande parte dos cientistas afirmam que as atividades humanas, como a mudança das quantidades dos gases efeito estufa e dos aerossóis, assim como mudanças no uso do solo, se tornaram a força dominante e responsável pela maior parte do aquecimento observado ao longo

dos últimos 50 anos (IPCC, 2001). Sendo assim, os itens a seguir procuram elucidar a maneira como tais fatores podem atuar na alteração da ocorrência da precipitação.

3.2.2. Gases efeito estufa

De acordo com o IPCC (2007), a poluição do ar industrial é uma das grandes responsáveis pelo aumento da concentração de vários gases de efeito estufa na atmosfera. A maior parte destes gases ocorre naturalmente, porém sofreram um grande aumento na atmosfera nos últimos 250 anos. Outros gases são inteiramente resultantes das atividades humanas. A contribuição de cada tipo de gás para a radiação durante um período de tempo particular é determinado pela mudança da concentração na atmosfera sobre um período de tempo e a efetividade do gás em perturbar o balanço da radiação.

Os gases de longa vida como o CO_2 , CH_4 e o N_2O são quimicamente estáveis e persistentes na atmosfera ao longo do tempo em escalas entre décadas e séculos ou mais, então, estas emissões podem influenciar o clima em longo prazo. Como estes gases tem vida longa, eles se misturam bem na atmosfera muito mais rapidamente do que o processo de remoção. O CO_2 não possui um tempo de vida específico porque está ciclicamente envolvido com a atmosfera, oceanos e biosfera onde os processos envolvidos ocorrem em escalas de tempo diferentes.

Os gases de vida curta como o dióxido de enxofre (SO_2) e o monóxido de carbono (CO), por exemplo, são quimicamente reativos e geralmente são removidos da atmosfera por processos de oxidação natural ou pela lavagem durante as chuvas, portanto, apresentando concentrações bastante variáveis (IPCC, 2007).

Observações e modelos indicam que mudanças no fluxo de radiação na superfície da Terra afetam o aquecimento da superfície e o balanço da umidade atmosférica e, conseqüentemente, influenciando o ciclo hidrológico e a precipitação.

3.2.3. A influência da urbanização, industrialização e atividades antrópicas

O processo de urbanização e industrialização é responsável por significativas modificações no tipo de uso e ocupação do solo e pela geração de poluentes atmosféricos que afetam o balanço energético superficial, o escoamento superficial, a disponibilidade de umidade no ar (Denman *et al.*, 2007) e, conseqüentemente, o processo natural de ocorrência de precipitações.

Muitas pesquisas têm sido realizadas com o intuito de verificar a existência de mudanças climáticas e de tendências na ocorrência de precipitações (IPCC, 2013b).

Entretanto, a maior parte dos pesquisadores é cuidadosa ao apontar as possíveis causas de mudanças tendo em vista a enorme dificuldade em quantificá-las e defini-las.

Como exemplo, como definir se a causa do aumento das precipitações em determinada região é causada pela urbanização ou pelo aumento dos gases efeito estufa quando ambos os fatores tendem a influenciar o clima de forma similar, ou seja, tendem a aumentar a temperatura média.

Inserido neste contexto, o impacto da urbanização sobre o clima tem sido estudado, principalmente, através de duas maneiras. Uma delas se baseia na análise de dados obtidos durante o período de urbanização e expansão de uma região, enquanto a outra pode ser realizada através da comparação entre dados obtidos em áreas rurais e áreas urbanas próximas situadas em uma mesma região climática.

Ao estudar as influências da urbanização sobre os fenômenos meteorológicos, inclusive a precipitação, é importante conhecer as escalas espaciais (horizontal e vertical) que podem ser representadas pelos dados registrados em estações meteorológicas, conforme descrito por Oke (2006) na sequência.

Há três tipos de escala horizontal de interesse:

- a) **Mesoescala:** a cidade influencia a meteorologia e o clima de toda ela, normalmente em dezenas de quilômetros. Esta escala não pode ser representada apenas por uma estação meteorológica;
- b) **Escala Local:** é a escala cujo uma estação meteorológica é projetada para monitorar, que representa uma média do clima de vizinhanças com tipologias de desenvolvimento urbano similar (cobertura superficial, tamanho e ocupação dos edifícios e atividade). Tipicamente esta escala varia entre um e alguns quilômetros;
- c) **Microescala:** toda superfície e objeto (edificação, árvore, rua, jardim, etc.) possui o seu próprio microclima sobre si e sobre sua vizinhança imediata. A temperatura do ar e da superfície podem variar vários graus em pequenas distâncias e o fluxo de ar pode ser perturbado por pequenos objetos onde a escala varia entre menos de um metro e centenas de metros.

Uma diferença essencial entre o clima em áreas urbanas e em áreas rurais ou aeroportos é que nas cidades as trocas verticais de momento, calor e umidade não ocorrem em uma superfície quase plana, mas em uma camada com uma espessura

significativa chamada de Dossel Urbano (DU ou *Urban Canopy Layer* – UCL). A altura do DU é equivalente a aproximadamente a altura média dos elementos rugosos (edifícios e árvores) onde o efeito do microclima para superfícies individuais e obstáculos persiste por uma curta distância de suas fontes até se misturarem e mudarem de direção. Como mostrado, os efeitos na horizontal podem persistir por dezenas de quilômetros enquanto na vertical podem variar entre o nível do terreno e a altura de mistura. A Figura 3.6 mostra um esquema das escalas e camadas.

Figura 3.6 - Esquema das escalas e camadas verticais encontradas em áreas urbanas

CLP - Camada Limite Planetária, CLU - Camada Limite Urbana. Fonte: adaptado de Oke (1997)

A Camada Limite pode ser definida como a parte da troposfera que é diretamente influenciada pela presença da superfície da terra e responde às forças superficiais em um intervalo de tempo próximo ou inferior à uma hora. Estas forças incluem forças de arrasto, evaporação e transpiração, transferência de calor, emissão de poluentes e desvios de fluxo devido a mudanças no terreno (Stull, 1988).

Trenberth *et al.* (2007) sugere quatro mecanismos que afetam a ocorrência das precipitações em áreas urbanas:

- 1) Desestabilização da CLU devido a perturbações térmicas geradas pelas Ilhas de Calor Urbanas (ICU);
- 2) Desenvolvimento de áreas de convergência devido ao aumento da rugosidade da superfície no ambiente urbano;

- 3) Divisão e/ou desvios dos sistemas de precipitação pela cobertura urbana ou processos similares e;
- 4) Aumento dos aerossóis provenientes das emissões atmosféricas e, consequentemente, da disponibilidade de fontes de núcleos de condensação.

Buscando conhecer melhor os estudos existentes sobre estes mecanismos e compreender melhor as possíveis causas de mudanças na precipitação pela urbanização e atividades antrópicas associadas ao crescimento das cidades, os quatro mecanismos citados serão apresentados e discutidos na sequência.

3.2.3.1. *Ilhas de Calor Urbana (ICU)*

O microclima das cidades se caracteriza pela ocorrência do efeito da Ilha de Calor Urbana (ICU), que é o fenômeno em que a sua temperatura é mais elevada do que nas áreas rurais vizinhas (Oke, 1982). A propriedade e a geometria das construções urbanas contribuem para o armazenamento da energia solar em suas superfícies causando o aumento da temperatura do ar dentro da camada limite urbana.

A forte expansão da área urbana também é marcada pela redução da vegetação e da área dos corpos d'água (várzeas e lagos) onde o microclima tende a ser mais frágil em relação às mudanças de temperatura, reduzindo o efeito de resfriamento e evapotranspiração, e apresentando maior variabilidade térmica (He *et al.*, 2007).

Na Figura 3.7 é mostrado um esquema representativo da variação de temperatura superficial e atmosférica durante o dia e a noite. Nesta figura é possível notar que as maiores temperaturas do ar durante o dia ocorrem na área industrial devido, principalmente, às emissões atmosféricas. Durante a noite, as maiores construções, principalmente edifícios, que possuem mais calor armazenado, tendem liberá-lo gradativamente à medida que a temperatura cai mantendo uma menor oscilação térmica nas suas proximidades.

Uma das principais influências da ICU sobre a precipitação é a criação de uma perturbação térmica dentro da camada limite urbana (Shepherd *et al.*, 2002 e Shepherd e Burian, 2003). Como mostrado na Figura 3.6 “a”, o ar mais frio proveniente de áreas vizinhas rurais é aquecido ao encontrar com a ICU e adquire um movimento ascendente onde a influência da cidade cresce à medida que o fluxo de ar avança, aumentando a sua altura e formando uma camada limite sobre a

região urbana (Marciotto, 2008). Durante os dias mais quentes, principalmente no verão, a ICU pode intensificar a formação e o movimento de tempestades frontais e convectivas (Bornstein e LeRoy, 1990).

Figura 3.7 - Esquema representativo da variação da temperatura superficial e atmosférica

Fonte: U.S. EPA (2008) adaptado de Voogt (2004)

O *Metropolitan Meteorological Experiment* (METROMEX) (Changnon, 1981) foi uma pesquisa extensiva realizada durante seis anos que teve o objetivo de analisar como a grande área metropolitana de Saint Louis, situada em uma zona climática continental úmida na região central dos EUA, afeta a atmosfera no verão, e quais alterações causam mudanças na meteorologia e na influência antrópica. Dentre os principais resultados, mostrou-se que os efeitos da ICU aumentam a precipitação durante os meses de verão, onde este comportamento foi observado entre 50 e 75 km a partir da área urbana na direção do vento, refletindo valores entre 5% e 25% superiores do que os valores anteriores.

Jauregui e Romales (1996) observaram que a intensificação ICU parece estar correlacionada com o aumento na frequência de chuvas durante o período úmido (Maio a Outubro) na cidade do México. Os resultados mostraram uma intensificação dos eventos severos (acima 20 mm/h) durante o período da tarde e de todos os eventos de chuva (acima de 1 mm/h) no final da tarde e início da noite.

Shepherd, Pierce e Negri (2002) analisaram os dados de precipitação obtidos para as regiões de Atlanta (Georgia), Montgomery (Alabama), Nashville (Tennessee) e San Antonio, Waco e Dallas (Texas) pelo satélite da Missão de Medição da

Precipitação Tropical¹ (*Tropical Rainfall Measuring Mission* – TRMM). Para a precipitação média mensal constatou-se um aumento médio de 28% (intervalo entre 14,6% e 51%) na área de influência da direção do vento proveniente da área urbana, a uma distância entre 30 km e 60 km da metrópole. No estudo das precipitações máximas, os resultados foram ainda mais expressivos onde o aumento variou entre 48% e 116%.

Dixon e Mote (2003) identificaram 37 eventos de precipitação associados à influência da ICU em dias com ventos sinóticos fracos durante a estação quente (Maio a Setembro) num período de cinco anos na região de Atlanta (Georgia, EUA). Dos 37 eventos identificados, 21 (56,8%) ocorreram a uma distância inferior a 5 km da área urbana principal e 10 (27%) a 10 km.

Chen, Wang e Yen (2007) constataram o aumento das tempestades no período da tarde e das precipitações relacionadas à brisa oceânica em 70% na região de Taipei, Taiwan ao longo dos últimos 40 anos quando também ocorreu um aumento de 1,5°C na temperatura média superficial na área urbana.

Diem e Brown (2003) avaliou a possibilidade de contribuição das atividades antrópicas no leste do Arizona (EUA) para o aumento da precipitação total durante o verão. Os resultados mostraram o aumento significativo dos valores totais de precipitação em pontos sob influência da urbanização e da irrigação extensiva quando comparado com áreas próximas sem este tipo de influência que não apresentaram mudanças.

3.2.3.2. *Aumento da rugosidade da superfície*

O aumento da rugosidade na ICU pode induzir a criação de uma zona de convergência sobre a cidade devido ao aumento da turbulência mecânica e à produção de fluxos de ar ascendentes dando início a processos convectivos e tempestades. Este processo normalmente pode ocorrer durante dias quentes quando as condições são mais instáveis (Changnon, 1981, Bornstein e Leroy, 1990; Bornstein e Lin, 2000).

Bornstein e LeRoy (1990) constataram a ocorrência deste efeito sobre a cidade de Nova Iorque, que durante condições com fluxos de ar regionais calmos,

¹ O satélite da Missão de Medição da Precipitação Tropical (TRMM) foi lançado no dia 28 de novembro de 1997 e é um projeto da NASA em cooperação com a JAXA que tem o objetivo de monitorar e estudar as precipitações tropicais buscando validar e estender as observações, quantificar o seu impacto e constatar anomalias em áreas urbanas.

observou-se o início de uma atividade convectiva apresentando a sua máxima frequência sobre a cidade.

Bornstein e Lin (2000) analisaram os dados de seis eventos de precipitação convectiva de verão registrados em 40 estações meteorológicas situadas na região de Atlanta durante um período de nove dias. Os resultados mostraram uma concordância em tempo e espaço entre a localização dos valores máximos de confluência, convergência e precipitação sobre a ICU para três eventos.

As condições da superfície não devem ser negligenciadas e podem ter uma influência considerável sobre as chuvas convectivas. Thielen *et al.* (2000) mostrou por meio de um modelo numérico, que para uma escala de tempo curta, inferior a quatro horas, as variações dos fluxos de calor na mesoescala são os principais fatores que influenciam o desenvolvimento do evento chuvoso, e que, com o aumento da ICU, também há um aumento da precipitação.

3.2.3.3. *Desvio de sistemas de precipitação*

O processo de divergência e desvio dos sistemas de precipitação pode ocorrer quando uma tempestade passa sobre um grande centro urbano. Durante a sua movimentação, dependendo da altura em que se encontram as nuvens, elas podem se bifurcar e se mover em volta da cidade devido à barreira formada pelas construções. Quando este processo ocorre, a tempestade tende a perder força sobre a cidade passando a se intensificar em volta dela e em regiões vizinhas localizadas na direção do vento (Changnon, 1981; Bornstein e LeRoy, 1990).

A literatura carece de estudos acerca deste tipo de ocorrência, porém é possível citar o estudo de Selover (1997) que mostrou o movimento de uma tempestade convectiva de verão sobre Phoenix (Arizona) que produziu uma precipitação mínima sobre a cidade enquanto obteve valores máximos à sua volta e na região na direção do vento. A associação da ocorrência da frequência máxima da tempestade na direção do vento é consistente com o clássico estudo do METROMEX que mostrou a ocorrência deste cenário em Saint Louis (Changnon, 1981).

3.2.3.4. *Aerossóis e poluição atmosférica*

A presença de aerossóis na atmosfera, principalmente aqueles introduzidos pelas atividades antrópicas, afetam a dispersão e absorção da radiação podendo

acarretar em profundos impactos no balanço energético da Terra (Penner *et al.*, 2001 e Forster *et al.*, 2007).

Os aerossóis podem ter efeito no resfriamento da Terra, uma vez que são capazes de aumentar o índice de refletividade nas nuvens e, consequentemente, reduzir a quantidade de energia que chega à superfície. Apesar de existirem diversos estudos sobre esta questão, não há confirmação se o efeito dos aerossóis apenas ameniza o aquecimento ou se é capaz de neutralizar completamente o efeito estufa, devido às dificuldades em quantificar o seu impacto. Além disso, ao contrário dos gases efeito estufa, que permanecem por um longo período e de forma distribuída na atmosfera, os aerossóis tendem a se concentrar próximo à suas fontes e são muito variáveis no tempo e espaço.

A interpretação sobre a influência dos aerossóis na modificação das propriedades das nuvens foi descrita por Twomey (1976, 1991) e Toon (2000). A poluição acarreta no aumento da quantidade de partículas dispersas na atmosfera e na redução das gotículas que formam as nuvens. Quanto maior for o tamanho das gotículas que formam uma nuvem, maior será a sua área superficial e, consequentemente, maior será a sua refletividade.

A Figura 3.8 ilustra o processo de modificação das nuvens devido aos aerossóis onde é possível ver a diferença entre o tamanho dos núcleos de condensação formados. Como os núcleos de condensação são menores, as gotículas demorarão mais tempo no ambiente poluído para ganhar peso retardando o início do processo de precipitação.

Figura 3.8 - Processo de modificação das propriedades das nuvens pelos aerossóis

Fonte: Tonn (2000)

A Figura 3.9 mostra uma representação do desenvolvimento de nuvens convectivas em duas condições atmosféricas distintas: primitiva e poluída.

Figura 3.9 - Processo de desenvolvimento de nuvens convectivas numa atmosfera primitiva (acima) e poluída (abaixo)

Fonte: Rosenfeld *et al.* (2008)

Como mencionado anteriormente, no ar poluído, as gotículas são menores e não precipitam antes de atingirem níveis mais altos com temperaturas muito baixas. Ao atingir estas alturas, há uma ativação das gotículas não precipitadas que congelam e podem liberar um calor latente adicional revigorando as correntes ascendentes (Rosenfeld, 2006). Ao atingir níveis mais baixos, o gelo se derrete e há uma reabsorção do calor latente que antes havia sido liberado durante o congelamento. Esta dinâmica exige um maior consumo de calor para a mesma quantidade de precipitação, aumentando a instabilidade e resultando no fortalecimento das nuvens convectivas e no aumento da precipitação (Tao *et al.*, 2007).

Os fenômenos meteorológicos e climáticos são extremamente complexos tornando difícil estabelecer padrões a respeito da forma da influência dos aerossóis sobre a precipitação. Mesmo com as explicações apresentadas, não é possível afirmar com certeza quais serão as consequências do aumento dos níveis de aerossóis na atmosfera sobre os índices pluviométricos. Como mostrado na sequência, a atmosfera pode apresentar comportamentos diferentes, e dependendo da região e de fatores locais, é possível observar tanto a intensificação, quanto a inibição das precipitações atribuídas a presença de aerossóis.

Ao analisar os eventos chuvosos em uma área continental no sudeste dos Estados Unidos, Bell *et al.* (2008) constataram uma intensificação das precipitações de verão durante os dias úteis da semana, sugerindo que estas mudanças tenham ocorrido devido ao aumento dos níveis de poluição do ar.

Givati e Rosenfeld (2004) quantificaram os efeitos da poluição do ar sobre a precipitação numa escala regional, entre dezenas e centenas de quilômetros, na Califórnia (EUA) e em Israel. Os resultados apontaram reduções entre 15% e 25% da precipitação anual áreas de ocorrência de chuvas orográficas que recebem correntes de ar provenientes de áreas urbanizadas e industrializadas, enquanto tendências não foram detectadas em áreas próximas sem este tipo de influência.

Em um estudo similar, Jirak e Cotton (2005) constataram uma redução da precipitação de 30% durante a metade do último século no Colorado (EUA) e Rosenfeld *et al.* (2007) também observaram reduções acima de 30% na China.

Durante muitos anos, estudos indicaram que a poluição do ar causada pelas atividades urbanas e industriais, assim como a fumaça emitida pelas queimadas pudesse influenciar a formação das precipitações diminuindo a sua ocorrência (Warner, 1968; Kaufman e Fraser, 1997 por exemplo). Este tipo de poluição inibe a aderência entre as gotículas de água e é responsável pela emissão de grandes concentrações de número de núcleos de concentração, que modificam a distribuição do tamanho das gotículas nas nuvens, e fazem com que a mesma quantidade de água seja distribuída em um maior número de núcleos. Desta maneira, os núcleos de condensação não ganham peso suficiente para se transformar em gotas de chuva e a ocorrência de precipitações tende a diminuir. Assim, o estudo de Rosenfeld (1999, 2000) obteve evidências conclusivas por meio das observações

feitas pelo satélite da Missão de Medição da Precipitação Tropical² (*Tropical Rainfall Measuring Mission – TRMM*), confirmando a redução da precipitação em nuvens com temperaturas por volta de -10°C sobre grandes áreas em consequência deste tipo de poluição.

3.3. Tendências observadas na precipitação

Inserido neste contexto, este item apresenta os principais resultados obtidos sobre o estudo de mudanças nas precipitações ao redor do mundo e em São Paulo, local de interesse deste trabalho.

3.3.1. Tendências regionais

Buscando compreender melhor o comportamento da precipitação em escalas regionais, o IPCC (2012) apresentou uma divisão dos continentes em sub-regiões conforme mostrado na Figura 3.10.

Figura 3.10 - Definição das sub-regiões utilizadas para a análise de mudanças climáticas regionais sobre os continentes proposta pelo IPCC

Fonte: IPCC (2012)

Mesmo estudando as escalas regionais e até mesmo locais, a precipitação é caracterizada pela grande variabilidade espacial e temporal dificultando a obtenção de amostras significativas por meio de pluviômetros. Por esta razão, as tendências observadas em cada uma destas regiões representam apenas uma pequena fração desta variabilidade (Groisman *et al.*, 2004).

² O satélite da Missão de Medição da Precipitação Tropical (TRMM) foi lançado no dia 28 de novembro de 1997 e é um projeto da NASA em cooperação com a JAXA que tem o objetivo de monitorar e estudar as precipitações tropicais.

A Tabela 3.1 resume as informações predominantes sobre cada sub-região de forma bastante simplificada com base nos estudos do IPCC (2007, 2012) e dos demais autores citados nos itens subsequentes. Para cada sub-região, é indicado qual tipo de tendência representa melhor as mudanças observadas na precipitação total anual (P_T) e precipitações extremas diárias (P_E) juntamente com um nível de confiança atribuído aos resultados pelos autores.

Tabela 3.1 - Resumo das tendências observadas predominantes nas sub-regiões.

Região	P_T	P_E	Região	P_T	P_E
1	0	0	15	0	0
2	0	+ > 50%	16	0	0
3	0	+ > 50%	17	0	0
4	0	+ > 90%	18		
5	0	+ > 90%	19		
6		+ > 90%	20		
7	+	+	21	+ > 90%	+ > 90%
8	+/-	+/-	22	+ / - > 90%	+ / - > 90%
9	-	-	23		+ > 90%
10	+/-	+/-	24		
11		+ > 66%	25	0	0
12		+ > 66%	26	0	0
13	0	0	27		
14	0	0	28		

Obs.: Tendência significativa positiva (+), negativa (-) e não significativa (0).

Nos itens a seguir é apresentado um breve resumo dos principais estudos sobre a existência de mudanças nos padrões de precipitação nos continentes e sub-regiões.

3.3.1.1. América do Norte e América Central

Na América do Norte e América Central há uma confiança alta (> 90%) em relação às tendências de aumento da precipitação, porém com alguma variação espacial, ou seja, também há em menor proporção, locais onde são observadas reduções e tendências não significativas.

De forma geral, há um nível de confiança médio (> 50%) nos aumentos observados nas sub-regiões 2, 3 e 6 e alto (> 90%) nas sub-regiões 4 e 5 (Aguilar *et al.*, 2005; Alexander *et al.*, 2006; IPCC, 2007 e 2012). Na região do Alasca (sub-região 1) não foram constatadas mudanças significativas.

Nos EUA (sub-regiões 3, 4 e 5), a precipitação total anual e os índices de precipitação extrema não apresentou tendências na maior parte dos postos

estudados (74%) por Pryor *et al.* (2009). Entretanto, a maior parte dos locais que apresentaram tendências positivas significativas estão situados na região central (sub-região 4), concordando com os resultados de Groisman, Knight e Karl (2012) que também observaram tendências similares nesta região.

Na região central dos Estados Unidos (sub-região 4), Groisman, Knight e Karl (2012) observaram o aumento dos dias com precipitação intensa e do número de eventos extremos (acima de 25,4 mm) nas últimas três décadas. A frequência de ocorrência de eventos mais comuns (entre 12,7 e 25,4 mm) não mudou, porém, a frequência de eventos muito extremos (acima 154,9 mm) cresceu 40%.

3.3.1.2. América do Sul

Na América do Sul (AS), os estudos que têm sido realizados indicam que há um aumento da precipitação total anual e da frequência de ocorrência de eventos extremos (> 20 mm) de forma geral. Entretanto, ao analisar os dados de forma regional, os pesquisadores mostram que há uma grande variabilidade espacial das tendências, tanto positivas quanto negativas.

Buscando uma melhor compreensão das tendências neste continente, é possível utilizar a divisão regional proposta pelo IPCC (2012), mostrado na Figura 3.10 na escala global. As sub-regiões 7, 8, 9 e 10 correspondem a Amazônia (AMZ), Nordeste do Brasil (NEB), Oeste da AS (WSA) e Sudeste da AS (SSA) respectivamente, como mostradas na Figura 3.11 a) delimitadas em azul.

Na Figura 3.11 a) é mostrada a localização da extensa rede de postos pluviométricos (círculos) na América do Sul, utilizados no estudo de Skansi *et al.* (2013) que verificou a existência de mudanças em diferentes índices de precipitação durante o período entre 1950 e 2010.

Na Figura 3.11 b) são mostrados os resultados obtidos por Skansi *et al.* (2013) para a análise de tendências na precipitação total anual. Nesta figura é possível observar a grande variabilidade das tendências positivas (verde) e negativas (marrom) nas diferentes regiões, tornando difícil estabelecer um padrão regional.

Na região da Amazônia, a tendência positiva observada por Skansi *et al.* (2013) na maioria dos postos coincide com os resultados obtidos por Aguilar *et al.* (2005) para a precipitação total anual e frequência de eventos extremos.

Na região Nordeste do Brasil, Skansi *et al.* (2013) apontaram a existência de tendências negativas com menor nível de confiança. Entretanto, Santos e Brito

(2007), que analisaram as séries de precipitações no Rio Grande do Norte e Paraíba entre 1935 e 2000, e Santos *et al.* (2009) no Ceará entre 1935 e 2006, diagnosticaram o aumento da precipitação total e máxima diária anual na maior parte dos postos.

Na região Oeste da América do Sul, Haylock *et al.* (2006) e Skansi *et al.* (2013) identificaram tendências positivas nas precipitações totais anuais no Equador e norte do Chile e negativas no Peru e no sul do Chile. Nestas regiões, foram identificadas as mesmas tendências para a ocorrência de eventos extremos por Alexander *et al.*, 2006, Haylock *et al.* (2006); Marengo *et al.* (2010) e Skansi *et al.* (2013).

Figura 3.11 - a) Localização das sub-regiões (azul) e dos postos pluviométricos utilizados (círculos); b) Tendências observadas na precipitação total anual para o período entre 1950 e 2010

Fonte: Skansi *et al.* (2013)

Na região Sudeste da América do Sul, há uma predominância de tendências positivas significativas da precipitação total anual (Haylock *et al.*, 2006; Skansi *et al.*, 2013) e da frequência de eventos extremos (Haylock *et al.*, 2006; Alexander *et al.*, 2006; Re e Barros, 2009; Marengo *et al.*, 2010; Penalba e Robledo, 2010; Teixeira e Satyamurty, 2011; Skansi *et al.*, 2013) na segunda metade do século XX. Pscheidt e Grimm (2009) destacam ainda o aumento na frequência de precipitações intensas durante a ocorrência do fenômeno do El Niño no oeste do Paraná e estados de Santa Catarina e do Rio Grande do Sul. Durante o La Niña, uma redução mais

significativa ocorre nesta região com exceção do litoral de Santa Catarina e do Rio Grande do Sul que não são afetados.

3.3.1.3. *Europa e região do Mediterrâneo*

Nas regiões Norte (sub-região 11) e Oeste (sub-região 12) da Europa foram observadas tendências de aumento das precipitações intensas no inverno com confiança média ($< 66\%$). Entretanto, durante o verão, apenas mudanças inconsistentes e insignificantes foram constatadas (Alexander *et al.*, 2006; Fowler e Kilsby, 2003; Haylock e Goodness, 2004; Klein, Tank e Können, 2003; Maraun *et al.*, 2008; Zolina *et al.*, 2009).

No Sul da Europa e região Mediterrânea (sub-região 13), tendências inconsistentes e com confiança baixa ($< 20\%$) foram observadas (Alexander *et al.*, 2006; García *et al.*, 2007; Klein, Tank e Können, 2003; Rodrigo, 2010; Zolina *et al.*, 2009).

3.3.1.4. *África*

Os estudos realizados no continente africano são bastante localizados e as tendências possuem grande variabilidade espacial e baixa confiança ($< 20\%$) (Trenberth *et al.*, 2007; IPCC, 2012).

Na região Norte da África (sub-região 14) ou região Arábica, o estudo de Donat *et al.* (2013) mostrou que durante a segunda metade do século XX, as tendências observadas na precipitação foram pouco significativas e espacialmente inconsistentes.

Nas regiões Oeste (sub-região 16) e Sul (sub-região 17), constatou a inexistência ou existência de tendências com baixa significância para a precipitação total anual e máxima diária na maioria dos postos analisados (Kruger, 2006; New *et al.*, 2006). Alexander *et al.* (2006) identificou mais áreas com diminuição do que aumento no número de dias com precipitações intensas nesta região.

3.3.1.5. *Ásia*

Os estudos realizados na Ásia apresentam evidências insuficientes devido as grandes dimensões do continente onde os resultados obtidos possuem uma significância estatística apenas localmente.

Wang *et al.* (2012) constataram um aumento da precipitação total anual sobre as regiões Oeste (sub-região 21) e Sul (sub-região 22) da China, assim como uma redução no Nordeste (sub-região 22). Inclusive, nos últimas décadas tem sido

observado uma intensificação na ocorrência de secas no nordeste e enchentes no sul da China em concordância com os resultados de Wang *et al.* (2012) e Alexander *et al.* (2006) que também identificou estes padrões locais nas precipitações intensas diárias.

Na Índia (sub-região 23), a ocorrência de precipitações extremas ($> 124,4$ mm/dia) apresenta tendências positivas significativas apenas para algumas regiões (costa oeste, parte do centro e partes do nordeste) onde estão associadas ao aumento da instabilidade da umidade convectiva diária (Pattanaik e Rajeevan, 2010).

3.3.1.6. *Oceania*

Os estudos realizados na Oceania apontam a existência de algumas tendências, porém há baixa confiança estatística ($< 20\%$) devido à pequena quantidade de estudos e grande variabilidade espacial.

Na região Central da Austrália, Gallant, Hennessy e Risbey (2007) identificaram um aumento significativo no número de dias de chuva e intensidade de eventos extremos juntamente com uma redução na quantidade de precipitação diária. Na região Oeste não foram encontradas mudanças e nas regiões Sudoeste, Sudeste e Costa Leste houve uma redução da precipitação total anual e de eventos extremos. Estes resultados são coerentes com as tendências apresentadas por Alexander *et al.* (2006) para dias com precipitações intensas.

King, Alexander e Donat (2013) identificaram algumas tendências, positivas e negativas, para a frequência e intensidade de eventos extremos de precipitação no Sudoeste e Centro-Leste da Austrália. Entretanto a cobertura de dados é muito restrita dificultando a identificação de padrões regionais.

3.3.2. ***Tendências no estado de São Paulo***

Dufek e Ambrizzi (2008) realizaram a análise das séries de precipitação registradas em 59 postos pluviométricos localizados no estado de São Paulo com o objetivo de verificar a existência de mudanças na precipitação total anual e intensa (> 20 mm). Nos resultados foi constatada a existência de tendência positiva significativa da precipitação total anual em 59,3% dos postos e do número de dias com precipitações intensas em 47,4% para o período entre 1950-1999. Ao analisar o período de 1990-1999 isoladamente, obteve-se um número menor de postos apresentando tendências positivas significativas, 8,5% para a precipitação total

anual e 11,9% para o número de dias com precipitações intensas. No posto localizado na cidade de São Paulo, este estudo identificou o aumento da precipitação total anual e no número de dias com precipitação acima de 20 mm nos dois períodos analisados. A Tabela 3.2 e a Tabela 3.3 resumem os principais resultados obtidos por Dufek e Ambrizzi (2008).

Tabela 3.2 - Porcentagem de estações mostrando tendências significativas e não significativas ao nível de 5% entre 1950 e 1999

Indicador	Tendência positiva significativa (%)	Tendência positiva não significativa (%)	Tendência negativa significativa (%)	Tendência negativa não significativa (%)
Precipitação Total Anual	59,3	32,2	0	8,5
Dias de precipitação intensa (> 20 mm)	47,4	42,4	1,7	8,5

Tabela 3.3 - Porcentagem de estações mostrando tendências significativas e não significativas ao nível de 5% entre 1990 e 1999

Indicador	Tendência positiva significativa (%)	Tendência positiva não significativa (%)	Tendência negativa significativa (%)	Tendência negativa não significativa (%)
Precipitação Total Anual	8,5	49,1	0	42,4
Dias de precipitação intensa (> 20 mm)	11,9	55,9	1,7	30,5

Sugahara, Rocha e Silveira (2009) realizaram a análise de frequência dos valores extremos da série histórica de precipitação entre 1933 e 2005 da estação meteorológica do Instituto de Astronomia, Geociências e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo localizada no município de São Paulo. Os resultados mostraram fortes evidências de que a frequência e magnitude da precipitação diária têm aumentado ao longo do tempo.

4. METODOLOGIA

4.1. Caracterização da área de estudo

4.1.1. Características gerais

O presente estudo foi realizado a partir dos dados observados em postos pluviométricos localizados no município de São Paulo, situado na região sudeste do Brasil. A escolha dessa região para a realização desse estudo pode ser justificada por duas razões principais:

- 1) Importância do conhecimento sobre a ocorrência das precipitações intensas devido aos grandes prejuízos econômicos e sociais causados pelas inundações urbanas anualmente;
- 2) Disponibilidade de informações e dados de precipitação em diferentes pontos da cidade que possibilitam a realização de uma análise regional.

A Figura 4.1 mostra a localização de São Paulo e da região estudada.

Figura 4.1 - Localização do município de São Paulo

Base cartográfica: IBGE (2007). Elaboração do mapa: Coelho (2014)

A colonização da cidade de São Paulo teve início no ano de 1532 e, mais tarde, em 1554 ocorreu a sua fundação. No início do século XX, o setor energético regional passou a se desenvolver significativamente tornando-se responsável pelo grande desenvolvimento industrial após 1930 e, conseqüentemente, pelo acelerado crescimento da cidade e dos municípios no seu entorno que hoje compõem a Região Metropolitana de São Paulo (RMSP), mostrada na Figura 4.2.

Figura 4.2 - Municípios integrantes da Região Metropolitana de São Paulo (RMSP)

Fonte: SMDU (2012)

Atualmente, além de ocupar uma área de 1.051 km², São Paulo é o município mais populoso do país com mais de 11 milhões de habitantes e, juntamente com outros 38 municípios, compõe a RMSP que conta com aproximadamente 19,7 milhões de pessoas de acordo com o Censo do IBGE de 2010 (IBGE, 2012), equivalente a 10,3% da população brasileira. A RMSP é o terceiro maior conglomerado urbano do mundo, possui uma área total de 8.051 km², dentre os quais, 1.747 km² correspondem à sua área urbanizada.

O Gráfico 4.1 mostra a evolução demográfica do município de São Paulo e da RMSP.

Gráfico 4.1 - Evolução populacional do município de São Paulo e RMSP

Dados demográficos: IBGE (2012)³

A Figura 4.3 mostra a expansão da área urbanizada da RMSP desde 1881.

Figura 4.3 - Expansão Urbana da Região Metropolitana de São Paulo

Fonte: SMDU (2012)

³Fonte: Recenseamento do Brasil, 1872-1920. Rio de Janeiro: Diretoria Geral de Estatística, 1872-1930; e IBGE, Censo Demográfico 1940/2010. Até 1991, tabela extraída de IBGE, Estatísticas do Século XX. Rio de Janeiro: IBGE, 2007 no Anuário Estatístico do Brasil 1994. Vol. 54, 1994.

4.1.2. Hidrografia

O município de São Paulo, assim como a maior parte da RMSP, está inserido na bacia hidrográfica do Alto Tietê, que possui 5.720 km² (área de drenagem a montante da barragem de Pirapora).

O rio Tietê, principal curso d'água da bacia, percorre a distância de 230 km entre a sua nascente no município de Salesópolis e a barragem de Pirapora. Os principais afluentes do rio Tietê que estão totalmente ou parcialmente inseridos no município de São Paulo são, de montante para jusante: ribeirão Itaquera ($A_d = 46,7 \text{ km}^2$), córrego Jacú ($A_d = 35,6 \text{ km}^2$), rio Aricanduva ($A_d = 100,3 \text{ km}^2$), rio Cabuçu de Cima ($A_d = 23,8 \text{ km}^2$), rio Tamanduateí ($A_d = 330 \text{ km}^2$), córrego Cabuçu de Baixo ($A_d = 42,6 \text{ km}^2$) e rio Pinheiros ($A_d \sim 280 \text{ km}^2$).

Além destes importantes cursos d'água, deve-se ressaltar que o município possui duas represas importantes e significativas para o balanço hidrológico da região, ambas situadas na região sul da cidade: Represa Guarapiranga ($A_{\text{inundação}} = 26,6 \text{ km}^2$) e Represa Billings ($A_{\text{inundação}} = 106,6 \text{ km}^2$).

4.1.3. Relevo e Clima

O município de São Paulo está inserido no Planalto Atlântico da região Sudeste do Brasil, junto ao trópico de Capricórnio entre as latitudes aproximadas de 23°20'S a 24°00'S e longitudes de 46°20'W a 46°50'W, em uma região de transição climática entre os Climas Tropicais Úmidos de Altitude, com período seco definido, e os Subtropicais, permanentemente úmidos do Brasil meridional.

O seu território se situa predominantemente entre as altitudes 720 e 850 metros e se encontra a uma distância média de 45 km do Oceano Atlântico. A sua topografia é variada e composta por planícies aluviais (várzeas), colinas, morros, serras e maciços abrangendo os compartimentos geomorfológicos da Serra da Cantareira, da Bacia Sedimentar de São Paulo e do Reverso do Planalto Atlântico (Mares de Morros).

Situada no limite norte do município, a Serra da Cantareira se encontra formada no sentido Leste-Oeste e possui altitudes superiores a 1.200 metros.

A Bacia Sedimentar de São Paulo possui o Rio Tietê como principal curso d'água que tem seu vale orientado no sentido Leste-Oeste, altitude aproximada de 720 metros e ampla planície de inundação. Ele recebe as águas dos rios que nascem na vertente Sul da Serra da Cantareira (Cabucu de Baixo e Cabucu de

Cima) e daqueles que nascem no reverso do Planalto Atlântico (Pinheiros, Tamanduateí, Aricanduva).

O Reverso do Planalto Atlântico está localizado no sul de São Paulo, formado por um mar de morros chegando a ultrapassar a cota de 800 metros e possuindo os divisores de águas das bacias que contribuem para as represas da Guarapiranga e Billings.

O estudo realizado apresentado por Tarifa e Armani (2000) definiu cinco Unidades Climáticas Naturais no território da cidade de São Paulo de acordo com a proximidade do Oceano Atlântico, a altitude, o relevo e as suas diferentes formas e orientações. A partir da descrição destas unidades climáticas é possível compreender melhor o clima local e as variações térmicas e pluviométricas nas diferentes áreas da cidade.

Nos topos mais elevados dos maciços, serras e altas colinas, altitude acima de 800 metros, há uma tendência de aumento da instabilidade dos sistemas atmosféricos produtores de chuva que entram no município e, conseqüentemente, são áreas que possuem totais pluviais mais elevados do que as áreas mais baixas e planas. Além disso, esta altitude elevada propicia maior ventilação criando um bom potencial para a dispersão de poluentes.

Nas regiões intermediárias do município, entre 740 e 800 metros, composta por colinas intermediárias, morros baixos, patamares e terraços, as temperaturas sofrem um ligeiro aquecimento. Nas superfícies mais planas, em dias de céu claro, há ocorrência de um forte aquecimento diurno, por serem áreas mais baixas e planas que permitem maior recepção e absorção da radiação solar. Pluviometricamente, o seu comportamento é semelhante ao das áreas mais altas, pois estão ligadas pelas mesmas vertentes, que provocam a ascensão das parcelas de ar e a instabilidade local da baixa atmosfera.

Nas áreas formadas pelas várzeas e baixos terraços dos principais rios, com altitude entre 720 e 740 metros, a topografia condiciona à ocorrência de temperaturas relativamente elevadas. Estas áreas baixas e planas recebem e absorvem maior quantidade de radiação solar ao longo do dia e sofrem também um aquecimento por compressão adiabática. Assim, são áreas com maior estabilidade atmosférica, menores totais de chuva e menor dispersão de poluentes.

A seguir são descritas tais unidades climáticas resumidamente e na Figura 4.4 é mostrado o mapa elaborado por Tarifa e Armani (2000) contendo as Unidades Climáticas Naturais da cidade de São Paulo em uma versão adaptada e simplificada, onde também foram acrescentadas as localizações dos postos pluviométricos estudados.

- **Unidade I – Clima Tropical Úmido de Altitude do Planalto Atlântico:** esta unidade ocupa a área da Bacia Sedimentar de São Paulo onde a urbanização se instalou primeiramente e situa-se entre as altitudes de 720 e 850 metros;
- **Unidade II – Clima Tropical Úmido Serrano da Cantareira:** abrange a região da Serra da Cantareira na região norte da cidade, com altitudes entre 800 e 1200 metros;
- **Unidade III – Clima Tropical Úmido do Alto do Juqueri:** também localizada na região norte, esta unidade abrange a bacia do Rio Juqueri no seu trecho mais a montante, com altitudes entre 720 e 800 metros;
- **Unidade IV – Clima Tropical Suboceânico Superúmido do Reverso Atlântico:** abrange a região ao sul da represa de Guarapiranga e tem como principal característica a proximidade com o Oceano Atlântico. As altitudes variam entre 740 metros no nível da represa e 850 metros na região dos morros;
- **Unidade V – Clima Tropical Oceânico Superúmido da fachada Oriental do Planalto Atlântico:** unidade mais ao sul do município onde as altitudes variam entre 50 e 850 metros e que possui a máxima influência oceânica e total de chuva elevado.

Figura 4.4 - Unidades Climáticas Naturais - Município de São Paulo

Fonte: adaptado de Tarifa e Armani (2000)

4.1.4. Pluviometria e equações de chuvas

Diversas equações de chuvas intensas foram elaboradas para o município de São Paulo conforme resumido na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Equações Intensidade-Duração-Frequência elaboradas para São Paulo

Nome do Posto (Entidade)	Coordenadas	Altitude [m]	Autor (Ano do Estudo)	Dados Utilizados	
				Período	Nº anos
Observatório do IAG (IAG – DAEE)	23° 39' S 46° 38' W	780	Mero e Magni (1979)	1931-79	49
			Wilken (1972)	1934-59	26
			Occhipinti (1965)	1928-1964	37
			Martinez e Magni (1999)	1933-1997	65
Congonhas (DEPV)	23° 37' S 46° 39' W	802	Pfafstetter (1957)		5,476
Mirante de Santana (INMET)	23° 30' S 46° 37' W	792	Pfafstetter (1957)		7,172

Atualmente, a **eq.(1)** elaborada por Martinez e Magni (1999) é bastante adotada para a realização de estudos hidrológicos e concepção de projetos de sistemas de drenagem e obras hidráulicas na cidade de São Paulo.

$$i_{t,T} = 39,3015(t + 20)^{-0,9228} + 10,1767(t + 20)^{-0,8764} \cdot \left[-0,4653 - 0,8407 \ln \ln \left(\frac{T}{T-1} \right) \right] \quad (1)$$

para $10 \leq t \leq 1440$

onde: $i_{t,T}$ é a intensidade da chuva em mm/min, correspondente à duração t e tempo de retorno T ; t é a duração da chuva em minutos e T é o período de retorno em anos.

O presente trabalho não tem o objetivo de atualizar esta equação, porém, visando direcioná-lo para conclusões práticas sobre a influência da não estacionariedade das precipitações máximas diárias, os resultados da análise de mudanças na sua distribuição serão comparados com os valores de referência obtidos por esta equação conforme mostrado na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 - Previsão de máximas alturas de chuvas em São Paulo por Martinez e Magni (1999)

Duração (t) [min]	Precipitação [mm] / Tempo de Retorno [anos]								
	2	5	10	15	20	25	50	100	200
1440	64,1	87,7	103,3	112,1	118,2	122,9	137,6	152,1	166,5

4.2. Levantamento de dados

Para a realização desse trabalho foram levantadas as séries históricas de precipitação registradas nos postos pluviométricos localizados no município de São Paulo conforme a metodologia descrita na sequência.

4.2.1. Seleção dos postos pluviométricos

A partir da relação de dados disponíveis foram selecionados os postos com séries mais longas, preferencialmente com mais de 60 anos e com nenhuma ou poucas falhas, com o intuito de realizar a análise da estacionariedade da precipitação de forma representativa. Tendo em vista a dificuldade de encontrar séries longas e com poucas falhas na região estudada, foram selecionados seis postos que possuem séries com duração entre 58 e 114 anos e que poderão contribuir para este estudo. A Tabela 4.3 mostra as características dos postos pluviométricos selecionados.

Tabela 4.3 - Características dos postos pluviométricos selecionados

	Nome	Responsável Operadora	Código ANA	Prefixo DAEE	Latitude	Longitude	Altitude [m]	Duração [anos]
A	Observatório IAG	FCTH/ DAEE/SP	2346059	E3-035	-23,65°	-46,63°	780	80
B	Luz (Estação)	FCTH/ DAEE/SP	2346045	E3-036	-23,53°	-46,63°	730	117
C	Congonhas (Aeroporto)	FCTH/ DAEE/SP	2346059	E3-052	-23,63°	-46,65°	800	58
D	Instituto Biológico	FCTH/ DAEE/SP	2346050	E3-090	-23,58°	-46,65°	760	61
E	Pedreira	EMAEE	2346181	P12-042	-23,70°	-46,67°	752	88
F	Represa Guarapiranga	EMAEE	2346152	P12-059	-23,67°	-46,72°	739	91

No estado de São Paulo há o Sistema de Informações para o Gerenciamento de Recursos Hídricos do Estado de São Paulo (SigRH) que, assim como o HidroWeb, disponibiliza um banco de dados pluviométricos armazenados até 2004 dos postos sob responsabilidade da Fundação Centro Tecnológico de Hidráulica (FCTH) / Departamento de Águas e Energia Elétrica do Estado de São Paulo (DAEE/SP). A complementação das séries destes postos até 2012 foi obtida junto a equipe responsável do DAEE.

No caso dos postos sob responsabilidade da Empresa Metropolitana de Águas e Energia (EMAEE), os dados disponíveis se encerravam no ano de 1985. A

complementação dos dados até o mês de setembro de 2012 foi obtida após entrar em contato com a equipe responsável da EMAE.

Os gráficos a seguir mostram os intervalos de dados das séries de precipitação obtidos após a etapa de levantamento. Destaca-se que o Gráfico 4.2 mostra os intervalos de dados de precipitação total anual levantados, excluídos os anos com falhas que foram preenchidas conforme apresentado no item 4.3.1. O Gráfico 4.3 mostra os intervalos de dados de precipitação máxima diária anual levantados e que foram considerados no estudo. No Anexo A e no Anexo B são apresentados respectivamente, os dados de precipitação total anual e máxima diária anual utilizados neste trabalho.

Gráfico 4.2 - Intervalos das séries de dados de precipitação total anual levantados

Gráfico 4.3 - Intervalos das séries de dados de precipitação máxima diária anual levantados e utilizados

4.2.2. Localização dos postos pluviométricos

A localização dos postos pluviométricos utilizados neste estudo é mostrada no mapa da Figura 4.5.

Figura 4.5 - Mapa de localização dos postos pluviométricos analisados

Base cartográfica: IBGE (2007). Elaboração do mapa: Coelho (2014)

O posto do Observatório do IAG está localizado dentro da área do Parque do Estado na zona sul de São Paulo, onde sofre a influência do Clima Tropical Úmido de Altitude do Planalto, assim como todos os outros cinco postos analisados. Nesta região, a urbanização no entorno da área do Parque é caracterizada pela ocupação residencial pouco densa, com baixa verticalização, pequena porcentagem de áreas verdes e com alguma ocupação industrial ao sudoeste do Parque. A Figura 4.6 mostra a localização aproximada do posto em imagens de satélite de 1958 (esquerda) e 2008 (direita).

Figura 4.6 - Localização do Posto A – Observatório do IAG

Fonte: GEOPORTAL, 2013

O posto B está localizado na região central da cidade, próximo à estação da Luz. Nesta região situada em um baixo terraço próximo ao Rio Tamanduateí, a ocupação urbana é marcada pela verticalização e pela existência de poucas áreas verdes resumidas às áreas de parques e praças. A Figura 4.7 mostra a localização aproximada do posto em imagens de satélite de 1958 (esquerda) e 2008 (direita).

Figura 4.7 - Localização do Posto B - Luz (Estação)

Fonte: GEOPORTAL, 2013

O posto C está situado no Aeroporto de Congonhas em um patamar elevado, a uma altitude aproximada de 800 m. A ocupação no entorno do aeroporto é heterogênea, composta tanto por construções baixas quanto por edifícios altos. A Figura 4.8 mostra a localização aproximada do posto em imagens de satélite de 1958 (esquerda) e 2008 (direita).

Figura 4.8 - Localização do Posto C - Congonhas (Aeroporto)

Fonte: GEOPORTAL, 2013

O posto D está localizado no Instituto Biológico, em uma área bastante arborizada junto ao Parque do Ibirapuera. Nesta região há uma predominância maior de áreas verdes devido ao parque e à existência de muitas ruas arborizadas, porém entre bairros residenciais baixos e bairros mais verticalizados. A Figura 4.9 mostra a localização aproximada do posto em imagens de satélite de 1958 (esquerda) e 2008 (direita).

Figura 4.9 - Localização do Posto D—Instituto Biológico

Fonte: GEOPORTAL, 2013

O Posto E está localizado nas proximidades da barragem da Represa Billings, que é caracterizada pela ocupação industrial e por favelas nas suas imediações e com algumas áreas verdes remanescentes. A Figura 4.10 mostra a localização aproximada do posto em imagens de satélite de 1958 (esquerda) e 2008 (direita).

Figura 4.10 - Localização do Posto E – Pedreira

Fonte: GEOPORTAL, 2013

Por fim, o Posto F está localizado junto à barragem da Represa Guarapiranga onde a ocupação industrial está situada ao norte e a residencial baixa composta principalmente por favelas está ao leste e a oeste. A Figura 4.11 mostra a localização aproximada do posto em imagens de satélite de 1958 (esquerda) e 2008 (direita).

Figura 4.11 - Localização do Posto F – Represa Guarapiranga

Fonte: GEOPORTAL, 2013

4.3. Análise preliminar dos dados levantados

Os dados primários utilizados neste estudo foram as precipitações diárias medidas e registradas nos postos pluviométricos selecionados durante o seu período de operação. A partir destes dados foram calculados os valores da precipitação total anual e extraída a precipitação máxima diária observada em cada ano das séries disponíveis.

No caso dos postos mais antigos, a leitura dos pluviômetros é realizada diariamente no mesmo horário por um operador, normalmente no início da manhã. Nos postos mais modernos, a medição é realizada de forma automatizada em um

intervalo de tempo menor, geralmente 10 minutos, e os dados enviados por meio de uma rede telemétrica para o órgão responsável pelo mesmo.

Independentemente do tipo de posto pluviométrico, é possível que ocorra a existência de períodos sem informações ou com falhas nas observações causadas por problemas com os aparelhos de medição e/ou com o operador do posto. Tucci *et al.* (2007) lista os erros grosseiros mais comuns encontrados nas observações, sendo eles:

- a) Preenchimento errado do valor da caderneta de campo;
- b) Soma errada do número de provetas quando a precipitação é alta;
- c) Valor estimado pelo observador, por não se encontrar no local no dia da amostragem;
- d) Crescimento de vegetação ou outra obstrução próxima ao posto de observação;
- e) Danificação do aparelho;
- f) Problemas mecânicos no registrador gráfico.

Antes de serem utilizados, os dados precisam ser analisados para identificação e correção de possíveis erros. Nos itens seguintes, são mostradas as falhas encontradas nas séries, o método empregado para efetuar os preenchimentos e a análise de consistência dos dados.

4.3.1. Preenchimento de falhas nas séries

Os preenchimentos de totais mensais e anuais faltantes nas séries obtidas foram realizados através do Método de Ponderação Regional apresentado por Bertoni e Tucci (2007). Neste método simplificado, o preenchimento dos períodos com falhas é realizado a partir dos dados de outras estações vizinhas, pelo menos três, que possuam no mínimo dez anos de dados. O método é aplicado através da **eq.(2)** onde Y é o posto que possui a falha que se deseja preencher.

$$y_c = \left[\left(\frac{x_1}{x_{m1}} \right) + \left(\frac{x_2}{x_{m2}} \right) + \left(\frac{x_3}{x_{m3}} \right) \right] \cdot y_m \quad (2)$$

onde: y_c é a precipitação do posto Y a ser estimada; x_1, x_2, x_3 são as precipitações correspondentes ao mês (ou ano) que se deseja preencher, observadas em três estações vizinhas; y_m é a precipitação média do posto e x_{m1}, x_{m2}, x_{m3} são as precipitações médias nas três estações circunvizinhas.

A aplicação deste método deve observar que os postos devem estar localizados numa região climatológica semelhante ao posto a ser preenchido e que o

preenchimento efetuado é simples e apresenta limitações não devendo ser empregado para o preenchimento de valores diários de precipitação. Estes valores são de difícil preenchimento devido à grande variação espacial e temporal da precipitação para os eventos de frequências médias e pequenas (Bertoni e Tucci, 2007).

Nos seis postos estudados foram encontrados anos em que não há registros e outros em que há falhas, onde dias ou até meses inteiros não foram registrados. Para um determinado ano em que não havia nenhum valor registrado num período superior a seis meses, o preenchimento do mesmo foi efetuado com base nos totais anuais dos postos vizinhos. Nos outros casos, em que um determinado mês não possuía nenhum ou apresentava muitos dias sem registros, aproximadamente mais do que oito dias, o preenchimento do seu valor total foi realizado a partir dos totais mensais dos postos vizinhos.

Ressalta-se que nenhuma falha no registro diário foi preenchida, tendo em vista que esta metodologia não se aplica nestes casos e também, que não há postos com dados suficientes para realizar este trabalho. Sendo assim, os anos sem dados foram descartados da análise dos dados de precipitação máxima diária. Nos anos em que há dados parciais que abrangem pelo menos um dos períodos chuvosos do ano (janeiro a março e outubro a dezembro), foi considerado o maior valor para a precipitação diária registrado naquele ano.

A Tabela 4.4 mostra as distâncias entre os postos selecionados.

Tabela 4.4 - Distância entre os postos pluviométricos selecionados em quilômetros

Posto	B	C	D	E	F
A	12,9	2,5	7,6	6,7	8,7
B	---	11,3	5,8	18,8	17,0
C	---	---	5,5	7,7	7,7
D	---	---	---	13,1	11,4
E	---	---	---	---	6,0

No Apêndice A são apresentadas as tabelas referentes ao preenchimento das falhas onde constam o número de dias no mês e anos em que não há dados registrados ou que apresentam falhas juntamente com a indicação dos períodos em que foi realizado o preenchimento.

Durante a aplicação deste método de preenchimento, foram encontradas duas situações que dificultaram a realização deste trabalho. Primeiramente, na busca de postos próximos entre si, que pudessem minimizar o risco de utilizar dados muito

heterogêneos em relação ao posto a ser preenchido. A segunda principal dificuldade se concentrou em encontrar registros durante o mesmo período em que se buscava preencher.

O preenchimento das falhas de cada posto foi realizado com os outros postos selecionados que possuíam dados observados nos períodos de interesse. O Gráfico 4.4 mostra os intervalos de dados das séries de precipitação total anual após o preenchimento das falhas e que foram utilizados no estudo.

Gráfico 4.4 - Intervalo das séries de dados de precipitação total anual após o preenchimento das falhas

4.3.2. Análise de consistência dos dados observados

Após o preenchimento das séries dos postos selecionados foi realizada uma análise da consistência dos dados com o intuito de verificar o grau de homogeneidade dos dados de cada posto selecionado em relação aos valores observados nas estações vizinhas.

Nesta etapa foi aplicado o Método da Dupla Massa, desenvolvido pelo U.S. Geological Survey (USGS) (Searcy e Hardison, 1960), para ser utilizado na verificação da consistência de diferentes tipos de dados hidrológicos por meio da comparação entre diferentes estações situadas numa região climatológica semelhante.

A sua aplicação consiste em acumular os valores mensais ou anuais da série e plotar num gráfico cartesiano os valores do posto a consistir nas ordenadas e de outro posto confiável (ou de um conjunto de postos vizinhos) adotado como base de comparação nas abscissas. Se os valores do posto a consistir forem proporcionais aos do posto de comparação (ou da média dos postos), os pontos deverão se alinhar segundo uma única reta.

O alinhamento dos dados no gráfico pode apresentar outras situações que podem estar relacionadas a diferentes problemas conforme listado por Bertoni e Tucci (2007) e mostrado na Figura 4.12.

- I. **Mudança de declividade:** a formação de duas ou mais retas com diferentes declividades (tendências) indica a presença de erros sistemáticos como a alteração das condições de observação ou a existência de uma causa física real;
- II. **Alinhamento dos pontos em retas paralelas:** ocorre quando existem erros de transcrição de um ou mais dados ou pela presença de anos extremos em uma das séries plotadas;
- III. **Distribuição errática dos pontos:** geralmente é resultado da comparação de postos com diferentes regimes pluviométricos, sendo incorreta toda associação que se deseje fazer entre os dados dos postos plotados.

Figura 4.12 - Inconsistências que podem ser constatadas ao aplicar o Método da Dupla Massa.

Este método deve ser aplicado a nível mensal ou anual, como há falhas em anos inteiros nas séries, onde foi realizado o preenchimento de alguns anos, a análise de consistência foi realizada para os valores totais anuais de precipitação.

4.3.3. Verificação da existência de valores atípicos (“outliers”)

Outra etapa preliminar na análise de dados hidrológicos é a verificação da existência dos chamados valores atípicos ou *outliers*. O diagrama *Box Plot* é um método de análise bastante empregado para este fim onde são estabelecidos limites mínimos e máximos para a amostra. O diagrama *Box Plot* consiste na definição do primeiro e terceiro quartis, contendo a mediana em seu interior. A partir do lado superior do retângulo, traça-se uma linha até o ponto que não exceda $(Q_3 + 1,5AIQ)$, considerado limite superior. Da mesma maneira, traça-se outra linha a partir do lado inferior do retângulo até o limite dado por $(Q_1 - 1,5AIQ)$. Então, as observações que

estiverem acima ou abaixo desses limites são identificadas no diagrama e consideradas como valores atípicos (Naghettini e Pinto, 2007).

A existência de valores atípicos na série de dados pode criar problemas na análise influenciando a relação entre as variáveis ou modificar a média e o desvio padrão populacional por exemplo (McCuen, 2003). Após determinar quais são os valores atípicos, questiona-se se estes dados devem ser mantidos ou suprimidos da série. Se o valor foi medido, ele pode realmente ter ocorrido assim como ter sido gerado em consequência de uma falha. Portanto, tendo em vista a dificuldade em identificar a origem destes valores atípicos nas séries de precipitação, os testes estatísticos foram aplicados tanto às séries disponíveis completas, quanto às séries sem os *outliers* para verificar a sua influência nos resultados.

4.4. Estatísticas descritivas

Após a análise preliminar dos dados os mesmo foram sumarizados através das seguintes estatísticas descritivas.

4.4.1. Medidas de tendência central

A Média é a medição de posição mais frequentemente utilizada como mostrado na eq.(3).

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_N}{N} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^k N_i x_i \quad (3)$$

A outra estatística aplicada foi a Mediana que é definida como o valor da variável X que separa a frequência total em duas metades iguais, sendo, portanto, equivalente ao segundo quartil Q₂. Se as observações são ordenadas de modo que $\{x_{(1)} \leq x_{(2)} \leq \dots \leq x_{(N)}\}$, a mediana pode ser calculada pela eq.(4) (Naghettini e Pinto, 2007).

$$x_{md} = x_{\left(\frac{N+1}{2}\right)} \text{ se } N \text{ for ímpar ou } x_{md} = \frac{x_{\left(\frac{N}{2}\right)} + x_{\left(\frac{N}{2}+1\right)}}{2} \text{ se } N \text{ for par} \quad (4)$$

4.4.2. Medidas de dispersão

O grau de variabilidade dos pontos, em torno do valor central de uma amostra, é dado pelas medidas de dispersão. Entre essas, a mais simples e mais intuitiva é a amplitude, dada por $A = x(N) - x(1)$, onde são, respectivamente, o N-ésimo e o primeiro dos elementos classificados em ordem crescente. A diferença entre o máximo e o mínimo da amostra, tal como expressa pela amplitude, depende exclusivamente de tais pontos. Esses, por sua vez, podem ser muito discordantes

dos outros elementos da amostra e tornar a amplitude uma medida não representativa da dispersão ali contida. Outra medida mais imune à eventual presença de tais pontos e, portanto, mais resistente, é a Amplitude Interquartis (AIQ), dada pela diferença entre o terceiro e o primeiro quartis, respectivamente Q_3 e Q_1 (Naghetini e Pinto, 2007).

A variância amostral é expressa em termos do quadrado das dimensões da variável original como apresentada na **eq.(5)**.

$$s^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2 \quad (5)$$

O desvio padrão é definido como a raiz quadrada do desvio quadrático médio como mostrado na **eq.(5)**, ou seja, a raiz quadrada da variância tal como calculada pela **eq.(6)**.

$$s = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \quad (6)$$

4.5. Análise da não estacionariedade da precipitação

O termo “estacionariedade” em séries de dados hidrológicos refere-se ao fato que, excluídas as flutuações aleatórias provenientes da sua variabilidade natural, as observações amostrais são invariantes com relação à cronologia de suas ocorrências (Naghetini e Pinto, 2007). A não estacionariedade pode estar relacionada a diferentes tipos de mudanças:

- Tendências temporais: geralmente associadas a alterações graduais que influenciam a ocorrência do fenômeno hidrológico;
- Saltos: alterações bruscas que podem ocorrer devido a erros ou mudança dos aparelhos ou do local de medição, por exemplo; e
- Ciclos: podem estar relacionados a flutuações climáticas de longo período sendo de difícil detecção.

Cada método estatístico possui a sua aplicação sendo que alguns testes são mais sensíveis para a detecção de tendências enquanto outros para a detecção de mudanças em momentos. Buscando verificar possíveis mudanças que podem ocorrer nas séries de precipitação, tendo em vista que a natureza das possíveis mudanças é incerta, os dados foram submetidos a testes aplicáveis aos diferentes tipos de mudanças para verificar se elas existem e decidir se são significativas (McCuen, 2003).

Em geral, é mais fácil identificar heterogeneidades em séries de valores médios ou totais anuais, do que em séries de valores extremos que são tomados em intervalos de tempos mais curtos (Naghetini e Pinto, 2007).

Nos itens a seguir são apresentados os métodos utilizados para a detecção de tendências temporais (4.5.1), mudanças em momentos (4.5.2) e mudanças na distribuição (4.5.3).

4.5.1. Detecção de tendências temporais

A detecção de tendências temporais, que eventualmente podem estar presentes em séries hidrológicas, pode ser realizada por meio da análise da correlação entre os valores amostrais e o índice de tempo. O teste de *Mann-Kendall* (1947) é frequentemente utilizado para este fim (Yue, Pilon e Cavadias, 2002) e por este motivo foi empregado nas análises deste trabalho.

Mann (1945) apresentou um teste não paramétrico para variáveis ao longo do tempo que constitui uma aplicação particular do teste de correlação de Kendall (Kendall, 1945) comumente conhecido como *Mann-Kendall* ou *Kendall t test*. Considerando $x_1, x_2, \dots, x_n$, como uma sequência de observações ao longo do tempo, Mann (1945) propôs testar a hipótese nula, H_0 , onde aceita-se que os dados vem de uma população onde as variáveis aleatórias são independentes e identicamente distribuídas. A hipótese alternativa, H_1 , é que os dados seguem uma tendência ao longo do tempo, podendo esta ser positiva ou negativa. Sob H_0 , o teste estatístico de Mann-Kendall é:

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{sgn}(x_j - x_k) \quad (7)$$

Onde:

$$z = \begin{cases} 1 & \text{se } \theta > 0 \\ 0 & \text{se } \theta = 0 \\ -1 & \text{se } \theta < 0 \end{cases}$$

Kendall (1975) mostrou que S é normalmente distribuído e forneceu a média e a variância de S para a situação onde pode estar empatado em valores x , como:

$$E[S] = 0$$

$$\text{Var}[S] = \{n(n-1)(2n+5) - \sum_{j=1}^p t_j(t_j-1)(2t_j+5)\}/18 \quad (8)$$

Ao aplicar a **eq.(7)**, um valor positivo de S indica que há uma tendência positiva na série onde os valores observados aumentam ao longo do tempo. Por outro lado, um valor negativo de S significa que há uma tendência negativa.

$$z = \begin{cases} \frac{(S - 1)}{\sqrt{Var[S]^{0,5}}} & \text{para } S > 0 \\ 0 & \text{para } S = 0 \\ \frac{(S + 1)}{\sqrt{Var[S]^{0,5}}} & \text{para } S < 0 \end{cases}$$

A estatística S na **eq.(7)** representa a contabilização do número de vezes em que x_j excede x_k , para $j > k$, mais vezes do que x_k excede x_j . O máximo valor possível para S ocorre quando $x_1 < x_2 < \dots < x_n$ e este valor é chamado de “D”. O *Kendall's tau* (τ) é uma estatística que está intimamente relacionada ao valor de S e é dada pela **eq.(9)**.

$$\tau = \frac{S}{D} \quad (9)$$

A verificação de tendências nas séries de precipitação estudadas foi realizada por meio do teste não paramétrico de *Mann-Kendall* que constitui uma aplicação particular do teste de correlação de Kendall (1975). Considerando $x_1, x_2, \dots, x_n$, como uma sequência de valores observados ao longo do tempo, Mann (1945) propôs testar as hipóteses:

- **H_0 (Hipótese nula):** Aceita que as precipitações totais anuais ou máximas diárias anuais (x_i) são uma amostra de n variáveis aleatórias independentes e identicamente distribuídas.
- **H_1 :** Aceita que as distribuições de x_j e x_k não são idênticas para todo k , ou seja, que existe uma tendência crescente (positiva) ou decrescente (negativa) na distribuição de x_j e x_k .

O teorema do teste de *Mann-Kendall* é definido pela estatística S (**eq.10**) que representa a contagem do número de vezes em que x_j excede o seu valor subsequente x_k , para $j > k$, mais vezes do que x_k excede x_j (Hipel e McLeod, 2005).

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{sgn}(x_j - x_k) \quad (10)$$

onde

$$\text{sgn}(x) = \begin{cases} +1 & \text{se } x > 0 \\ 0 & \text{se } x = 0 \\ -1 & \text{se } x < 0 \end{cases}$$

O máximo valor possível para S é chamado de D (eq.11) e ocorre quando $X_1 < X_2 < \dots < X_n$.

$$D = \left[\frac{1}{2}n(n-1) - \frac{1}{2}\sum_{j=1}^p t_j(t_j-1) \right]^{0,5} \left[\frac{1}{2}n(n-1) \right]^{0,5} \quad (11)$$

Então, a verificação do teste de *Mann-Kendall* é realizada pela estatística do *tau* de *Kendall*, definida pela eq.12.

$$\tau = \frac{S}{D} \quad (12)$$

Assim, após a obtenção do valor de τ e do *valor-p* bicaudal, número que representa a probabilidade estimada de rejeição de H_0 , rejeita-se H_0 quando τ é diferente de zero ($-0,05 \leq \sigma \leq 0,05$) considerando um nível de significância (α) de pelo menos 0,05, ou seja, quando o *valor-p* bicaudal é menor ou igual a 0,05.

4.5.2. Detecção de mudanças em momentos

O teste de Mann-Whitney (Mann e Whitney, 1947), também chamado de Mann-Whitney U ou Mann-Whitney Wilcoxon, é um teste não paramétrico para a identificação de diferenças na média ou a mediana entre duas amostras. Sob a hipótese nula (H_0), o teste indica que as médias de ambas as amostras são equivalentes. Na hipótese alternativa (H_1), confirma-se que as duas amostras não possuem médias equivalentes (Yue e Wang, 2002).

A estatística V do teste de Mann-Whitney é dada pelo menor valor entre as quantidades (Naghetini e Pinto, 2007):

$$V = \min\{V_1, V_2\} \quad (13)$$

$$V_1 = N_1 N_2 + \frac{N_1(N_1+1)}{2} - R_1 \quad (14)$$

$$V_2 = N_1 N_2 - V_1 \quad (15)$$

onde: N_1 e N_2 são os tamanhos das subamostras 1 e 2 respectivamente; R_1 denota a soma das ordens de classificação dos elementos da primeira subamostra.

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 igual a

$$E[V] = \frac{N_1 N_2}{2} \quad (16)$$

e variância dada por

$$Var[V] = \frac{N_1 N_2 (N_1 + N_2 + 1)}{12} \quad (17)$$

Portanto, se a hipótese nula é H_0 , a estatística do teste não paramétrico de Mann-Whitney pode ser formulada como:

$$T = \frac{V - E[V]}{\sqrt{Var[V]}} \quad (18)$$

a qual segue uma distribuição Normal padrão. Por tratar-se de um teste bilateral, a um nível de significância α , a decisão deve ser a de rejeitar a hipótese nula se

$$|T| > z_{1-\alpha/2} \quad (19)$$

4.5.3. Detecção de mudanças na distribuição

A análise de frequências é frequentemente aplicada em hidrologia, principalmente no estudo da precipitação e de vazões, onde busca-se estimar a probabilidade de excedência e a magnitude das suas variáveis. A princípio, este tipo de análise deve ser aplicado a um vetor de dados medido em um sistema homogêneo temporal e espacialmente. Havendo mudanças nos processos físicos que influenciam os dados, neste caso de precipitação, estes devem ser submetidos a testes estatísticos para decidir se a não estacionariedade é significativa e assim aprimorar a precisão do teste.

Se uma mudança possui um efeito significativo sobre os dados medidos, pode ser necessário ajustar os dados antes de submetê-los a uma análise de frequência. Por esta razão, a detecção de efeitos da mudança, a identificação da natureza dela e o ajuste apropriado dos dados são passos necessários antes da aplicação de um modelo de frequência.

A detecção de mudanças na distribuição das séries de precipitação foi realizada por meio da aplicação da distribuição Generalizada de Valores Extremos (*Generalized Extreme Value* – GEV) conforme descrito na sequência.

4.5.3.1. Distribuição Generalizada de Valores Extremos (GEV)

A distribuição Generalizada de Valores Extremos foi introduzida por Jenkinson (1955) e combina as três formas assintóticas de valores extremos em uma única expressão. A função de probabilidades acumuladas da distribuição GEV (G) é dada por

$$G(z; \mu, \sigma, \xi) = \exp \left\{ - \left[1 + \xi \left(\frac{z - \mu}{\sigma} \right) \right]^{-1/\xi} \right\} \quad (20)$$

onde: μ é o parâmetro de localização, σ é o parâmetro de escala, ξ é o parâmetro de forma e z é a variável.

O valor e o sinal de ξ determinam a forma assintótica de valores extremos entre as três distribuições a seguir:

Tipo I. Gumbel: $\xi = 0$

$$G(z) = \exp \left\{ -\exp \left[-\left(\frac{z - \mu}{\sigma} \right) \right] \right\}, -\infty < z < \infty$$

Tipo II. Fréchet: $\xi < 0$

$$G(z) = \begin{cases} 0 & , z \leq \mu \\ \exp \left\{ -\left(\frac{z - \mu}{\sigma} \right)^{-a} \right\} & , z > \mu \end{cases}$$

Tipo III. Weibull: $\xi > 0$

$$G(z) = \begin{cases} \exp \left\{ -\left[-\left(\frac{z - \mu}{\sigma} \right)^{-a} \right] \right\} & , z < \mu \\ 1 & , z \geq \mu \end{cases}$$

A abordagem ideal ao aplicar a distribuição GEV é aplicar um teste de hipótese inicialmente para determinar qual das três distribuições de extremos é a mais apropriada para então realizar o ajuste apenas para a distribuição escolhida.

A distribuição de valores extremos Tipo I ou Gumbel é a distribuição extrema mais usada na análise de frequência de variáveis hidrológicas, com inúmeras aplicações como na determinação de relações intensidade-duração-frequência de precipitações e estudos de vazões de enchentes.

Um dos maiores interesses ao aplicar uma distribuição de extremos é definir o tempo de retorno para um evento extremo. Sendo z_p um valor de precipitação máxima diária, p é a probabilidade para que z_p seja excedido em um determinado período expresso em anos, geralmente associado a um tempo de retorno. A probabilidade de ocorrência de z_p a cada ano será igual a $1/p$.

Para uma distribuição GEV, z_p pode ser determinado por:

$$z_p = \mu + \frac{\sigma}{\xi} \{ [-\ln(1-p)]^{-\xi} - 1 \}, \text{ para } \xi \neq 0 \quad (21)$$

4.5.3.2. *Estimação de parâmetros*

A estimação de parâmetros de modelos distributivos é realizada por meio de métodos da inferência estatística que fazem a associação entre a realidade física de um conjunto amostral e a concepção abstrata de um modelo probabilístico prescrito para uma variável aleatória (Naghetini e Pinto, 2007).

Durante a aplicação da distribuição GEV, os parâmetros foram estimados pelo Método do Momento-L (MML) e pelo Método da Máxima Verossimilhança (MVS)

O MML consiste em igualar os momentos-L populacionais aos momentos-L amostrais de forma a produzir estimativas dos parâmetros da distribuição de probabilidades em questão.

O MVS consiste em maximizar a função de verossimilhança dos parâmetros da distribuição onde o equacionamento para a condição de máximo resulta em um sistema de igual número de equações incógnitas, cujas soluções produzem os estimadores de máxima verossimilhança.

4.6. **Software para análise estatística – R Program**

As análises estatísticas foram realizadas com o auxílio do “R” que é uma linguagem e ambiente para computação de estatísticas e gráficos. O *software* possui uma variedade de técnicas estatísticas e gráficas para a análise de dados. Além disso, o *software* possui uma plataforma aberta proporcionando uma grande participação de pesquisadores e programadores no seu desenvolvimento e evolução. (R Development Core Team, 2011)

O *software* possui as seguintes funcionalidades:

- Eficiente manuseio e armazenamento de dados;
- Conjunto de operações para cálculo de matrizes;
- Coleção de ferramentas intermediárias para análise de dados extensa e coerente;
- Programação de linguagem bem desenvolvida, simples e efetiva chamada “S”.

O teste não paramétrico de *Mann-Kendall* empregado para a detecção de mudanças graduais ao longo do tempo foi aplicado por meio do pacote **Kendall** disponível no *software* R (McLeod, 2011).

O teste não paramétrico de *Mann-Whitney* utilizado para a identificação de mudanças em momentos foi aplicado com o auxílio do pacote **cpm** disponível no *software* R. O *Change Point Model* (CPM) é um método eficaz e computacionalmente eficiente para a detecção de múltiplos pontos de mudanças na média e na variância de sequências de variáveis aleatórias (Ross, 2013).

O *software extRemes*, também desenvolvido na linguagem R, permite ao usuário fornecer dados de séries temporais não apenas para estimar o seu tempo de retorno sob a não estacionariedade, mas também para determinar quando e como este nível pode ter mudado ao longo dos registros históricos (Gilleland e Katz, 2011; Gilleland, 2014).

4.7. Análise dos impactos da mudança da precipitação sobre projetos de drenagem urbana

Na última etapa deste trabalho, visando direcioná-lo à uma aplicação prática, avaliou-se o impacto do aumento da precipitação sobre o dimensionamento de sistemas de drenagem urbana assim como sobre os custos das obras.

A análise foi realizada sobre um projeto de microdrenagem e outro de macrodrenagem onde os sistemas foram dimensionados e orçados considerando dois cenários:

- Cenário 1: Chuva de projeto obtida pela equação de chuvas atual;
- Cenário 2: Chuva de projeto do Cenário 1 considerando o aumento da precipitação.

Na sequência estão descritos os projetos analisados, a metodologia de cálculo hidrológico e hidráulico, assim como a referência para elaboração dos orçamentos.

4.7.1. Análise de um projeto de microdrenagem

O sistema de microdrenagem foi projetado para uma área de drenagem de aproximadamente 0,158 km² utilizando o Método Racional. Esta área de drenagem é composta por vias com 10 metros de largura e quadras uniformes com 80 metros conforme o esquema mostrado na Figura 4.13. Todas as vias possuem uma declividade uniforme de 2,0% onde as vias adjacentes convergem para a via central.

Figura 4.13 - Esquema da área do projeto de microdrenagem

4.7.1.1. Método e parâmetros de cálculo hidrológico

O Método Racional é amplamente empregado para a determinação de vazões máximas de projeto para bacias pequenas ($A < 2 \text{ km}^2$), principalmente, em projetos de microdrenagem. A vazão máxima é estimada com base na intensidade da precipitação, no coeficiente de escoamento superficial e na área de drenagem conforme a **eq.(22)**:

$$Q_{\text{máx}} = \frac{C \cdot i \cdot A}{3,6} \quad (22)$$

onde: $Q_{\text{máx}}$ é a vazão máxima em m^3/s ; C é o coeficiente de escoamento superficial; i é a intensidade da precipitação em mm/h e A é a área da bacia em km^2 .

O coeficiente de escoamento superficial (C) é o valor que representa a parcela da precipitação que ao tocar o solo não se infiltra e escoar. Este coeficiente é estimado por meio do tipo de uso e ocupação do solo e também pode variar em função do tempo de retorno da chuva. No caso da bacia estudada, foram utilizados os valores de 0,60 e 0,70 para os tempos de recorrência de 5 e 10 anos respectivamente, e que representam uma área urbanizada.

O tempo de concentração em cada nó de cálculo foi estimado de forma simplificada pela **eq.(23)**.

$$t_c = t_e + t_p \quad (23)$$

onde: t_c é o tempo de concentração em minutos; t_e é o tempo de entrada em minutos e t_p é o tempo de percurso em minutos.

O tempo de entrada, que representa o tempo em que uma gota de água leva para percorrer o trajeto entre o lote e o sistema de microdrenagem (sarjetas e tubulações) foi adotado como sendo 10 minutos. O tempo de percurso foi calculado em função da distância percorrida e da velocidade de escoamento nas sarjetas e/ou galerias. Então, a partir do tempo de concentração, a intensidade da precipitação foi calculada utilizando a equação de chuvas para a cidade de São Paulo.

4.7.1.2. Dimensionamento do sistema de microdrenagem

O cálculo de capacidades e dimensionamento dos elementos do sistema de microdrenagem tais como sarjetas, bocas de lobo e tubulações foi realizado em concordância com as Diretrizes de Projeto de Hidráulica e Drenagem da Prefeitura do Município de São Paulo (PMSP, 1999).

A capacidade de escoamento em sarjetas é calculada pela fórmula de Izzard apresentada na **eq.(24)**.

$$Q = 0,375 \cdot y_o^{8/3} \cdot \left(\frac{z}{n}\right) \cdot \sqrt{I} \quad (24)$$

onde: Q é a vazão em m^3/s ; y_o é a lâmina d'água na sarjeta; z é a tangente do ângulo θ , n é o coeficiente de rugosidade e I é a declividade em m/m .

Neste projeto foi considerada uma sarjeta com seção composta cujo cálculo é realizado pela **eq.(25)**, como mostrado na Figura 4.14.

$$Q_o = Q_1 - Q_2 + Q_3 \quad (25)$$

Figura 4.14 - Cálculo de vazões para seções compostas.

A capacidade de esgotamento das bocas-de-lobo foi estimada com base no ábaco apresentado no Manual de Projeto de Drenagem Urbana (CETESB, 1986). No caso da boca-de-lobo padrão utilizada neste projeto, estimou-se que a sua capacidade é igual a 40 L/s.m.

A capacidade de escoamento nas tubulações foi calculada utilizando a equação de Manning considerando o escoamento à seção plena conforme a **eq.(26)**.

$$Q_p = \frac{\sqrt{I}}{n} A_p R_{hp}^{2/3} \quad (26)$$

onde: Q_p é a vazão para escoamento em seção plena em m^3/s ; I é a declividade em m/m ; n é o coeficiente de rugosidade de Manning; A_p é a área da seção plena em m^2 e R_{hp} é o raio hidráulico da seção plena em m .

4.7.2. Análise de um projeto de macrodrenagem

O projeto de canalização analisado possui aproximadamente 270 m de extensão e compõe uma série de outras intervenções no sistema de macrodrenagem de uma bacia completamente urbanizada, com aproximadamente $4,8 \text{ km}^2$, situada na região sul de São Paulo. Deve-se destacar que esta bacia serve como um exemplo para aplicação prática deste trabalho e os resultados não devem ser generalizados, uma vez que os mesmos irão variar de acordo com as características físicas de cada bacia e com os parâmetros de projeto adotados, como o tempo de concentração e o parâmetro de representação da capacidade de infiltração e geração de escoamento superficial do solo. A Figura 4.15 mostra a planta da bacia hidrográfica e a localização do trecho analisado.

O método de cálculo hidrológico e dimensionamento hidráulico são mostrados nos itens subsequentes.

Figura 4.15 - Planta de bacia hidrográfica e localização do trecho de canalização

Base cartográfica: Mapa Digital da Cidade (MDC, 2014)
Elaboração do mapa: Coelho (2014)

4.7.2.1. Chuva de Projeto

A definição da chuva de projeto foi realizada por meio da equação de chuvas de São Paulo onde considerou-se a duração da chuva crítica igual a 2 horas e os tempos de retorno para 10, 25, 50 e 100 anos. Estes valores foram adotados seguindo as recomendações do Plano Diretor de Macrodrenagem do Alto Tietê (PDMAT) (DAEE/SP, 2010) para a elaboração de projetos.

A discretização temporal da chuva de projeto foi realizada por meio da aplicação da distribuição de Huff (1967), 1 Quartil. Como apresentado por Huff (1990), este método foi elaborado após a análise do histórico de chuvas observadas

na região Centro-Leste do Estado do Illinois nos Estados Unidos onde os eventos foram divididos em quatro grupos em função do seu pico de intensidade e da sua variação ao longo do tempo. Dentre estes grupos, chamados quartis, o primeiro quartil representa as chuvas de menor duração e maior intensidade, sendo o padrão mais crítico e, por isso, é o mais recomendado para representar as chuvas em bacias urbanas (Canholi, 2005).

No PDMAT (DAEE/SP, 1998), os estudos hidrológicos foram realizados adotando esta metodologia e a análise da chuva observada na Região Metropolitana de São Paulo (RMSP) em 1983 mostrou-se ajustada à distribuição de Huff 1º quartil. Entretanto, deve-se ressaltar que há diferentes métodos de distribuição temporal, cabendo ao projetista tomar a decisão de qual escolher de acordo com os efeitos de cada uma sobre o parâmetro de projeto, julgando o que é mais importante, se o pico de vazão ou o volume, ou a combinação de ambos (Canholi, 2005).

No Anexo C são apresentados os coeficientes para aplicação da distribuição de Huff para os quatro quartis.

4.7.2.2. Parâmetros para simulação hidrológica

O método do *U. S. Soil Conservation Service* (SCS, 1986) foi utilizado para transformação da precipitação em escoamento superficial. Em resumo, este método permite que a precipitação total seja transformada em precipitação efetiva utilizando parâmetros que representam a infiltração e outras perdas como a retenção de água em depressões no terreno da área de drenagem. O método pode ser aplicado utilizando as seguintes equações:

$$P_e = \frac{(P - I_a)^2}{(P - I_a) + S} \quad (27)$$

$$I_a = 0,2 \cdot S \quad (28)$$

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (29)$$

onde: P_e é a precipitação efetiva em mm; P é a precipitação total em mm; I_a representa as perdas iniciais por retenção na bacia em mm; S é o máximo potencial de retenção da bacia após o início do escoamento superficial em mm e CN é o parâmetro “Curve Number”.

O CN é um parâmetro hidrológico que representa a capacidade de infiltração do solo de acordo com a sua morfologia e o tipo de ocupação. O CN varia de 0 a

100 e quanto maior é o seu valor, maior é o grau de impermeabilização do solo. Nesta simulação hidrológica foi utilizado um CN de 86 uniforme sobre toda a bacia estudada, tendo em vista que a mesma encontra-se completamente urbanizada e que este parâmetro tem sido utilizado para representar este tipo de ocupação nos estudos hidrológicos do Plano Diretor de Macrodrenagem da Bacia do Alto Tietê (PDMAT) (DAEE/SP, 2010).

O tempo de concentração das sub-bacias foi estimado por meio do Método Cinemático (SCS, 1986) representado pela **eq.(30)**.

$$t_c = \frac{L}{60.v} + t_d \quad (30)$$

onde: t_c é o tempo de concentração em minutos; L é o comprimento do talvegue em km; v é a velocidade de escoamento em m/s e t_d é o tempo difuso (tempo decorrido entre o início da chuva e a chegada do escoamento nos canais de drenagem em minutos).

4.7.2.3. Software para modelagem hidrológica – HEC-HMS®

A modelagem hidrológica da bacia foi realizada utilizando o software HEC-HMS®, um módulo da plataforma HEC (*Hydrologic Engineering Center*), desenvolvido pelo U. S. Army Corps of Engineers (USACE) para simular o processo de transformação chuva-vazão em sistemas de bacias e sub-bacias, por meio dos modelos tradicionalmente utilizados em hidrologia.

4.7.2.4. Dimensionamento da canalização

O dimensionamento hidráulico da canalização foi realizado por meio da equação de Manning (**eq.(31)**) seguindo as recomendações das Diretrizes de Projeto de Hidráulica e Drenagem da Prefeitura do Município de São Paulo (PMSP, 1999) listadas abaixo.

- Capacidade de canais: TR 100 anos;
- Velocidade de escoamento admissível:
 - Mínima: 0,6 m/s;
 - Máxima: 5,0 m/s (concreto);
- Coeficiente de rugosidade de Manning (n): 0,018 (concreto).

$$Q = A_H \cdot \frac{R_H^{2/3} \cdot I^{1/2}}{n} \quad (31)$$

onde: Q é a vazão em m^3/s ; A_H é a área hidráulica em m^2 ; R_H é o raio hidráulico em m; I é a declividade em m/m e n é o coeficiente de rugosidade de Manning.

4.7.3. Análise orçamentária

Os orçamentos dos projetos analisados foram elaborados com base na Tabela de Custos de Infraestrutura da Secretaria de Infraestrutura Urbana e Obras (SIURB) da Prefeitura Municipal de São Paulo (PMSP) com data-base de Setembro de 2013 (SIURB/PMSP, 2014).

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A apresentação dos resultados e discussão deste trabalho foi dividida em quatro partes: análise preliminar, análise da precipitação total anual, análise da precipitação máxima diária e análise dos impactos da não estacionariedade sobre os sistemas de drenagem urbana.

5.1. Análise preliminar

A análise preliminar mostra os resultados obtidos para a verificação da consistência dos dados e da existência de valores atípicos, e um resumo das estatísticas básicas das séries de dados estudadas.

5.1.1. Análise de consistência dos dados observados

A aplicação do Método da Dupla Massa mostrou que os dados de precipitação total anual não possuem inconsistências entre os postos estudados. As regressões lineares aplicadas sobre os alinhamentos entre cada posto e as médias regionais resultaram em ótimos valores ($> 0,999$) para o coeficiente de determinação (R^2) conforme resumido na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 - Valores obtidos para o coeficiente de determinação (R^2)

Posto	A	B	C	D	E	F
R^2	0,9999	0,9997	0,9999	0,9993	0,9999	0,9997

Como mostrado nos gráficos a seguir, os alinhamentos formaram retas bem definidas sem apresentar mudanças de declividade ou formação de retas paralelas, indicando que os dados estão consistidos.

Gráfico 5.1 - Dupla Massa - Posto "A"

Gráfico 5.2 - Dupla Massa - Posto "B"

Gráfico 5.3 - Dupla Massa - Posto "C"

Gráfico 5.4 - Dupla Massa - Posto "D"

Gráfico 5.5 - Dupla Massa - Posto "E"

Gráfico 5.6 - Dupla Massa - Posto "F"

5.1.2. Verificação da existência de valores atípicos ("outliers")

5.1.2.1. Precipitação total anual

A partir da aplicação do diagrama do *Box Plot* foram identificados valores atípicos em todas as séries como descrito a seguir e mostrado na Tabela 5.2 e no Gráfico 5.7.

- **Posto A:** foram identificados dois valores atípicos, acima de 1975,3 mm, 2228,5 mm (1983) e 2113,7 mm (2010);
- **Posto B:** foi identificado um valor atípico, acima de 2059,5 mm, 2270,9 mm (1983);
- **Posto C:** foram identificados quatro valores atípicos, acima de 1757,6 mm, 1798,8 mm (1976), 2170,8 mm (1983), 2182,2 mm (1991) e 1815,9 mm (1996);

- **Posto D:** foram identificados dois valores atípicos, acima de 2073,0 mm, 2187,1 mm (1983) e 2145,2 mm (1991);
- **Posto E:** foi identificado um valor atípico, acima de 1913,4 mm, 2076,5 mm (1983);
- **Posto F:** foram identificados dois valores atípicos, acima de 1879,9 mm, 2117,0 mm (1929) e 2158,4 mm (1983).

Tabela 5.2 - Resultados do *Box Plot* para a precipitação total anual

	Precipitação [mm]					
	Posto A	Posto B	Posto C	Posto D	Posto E	Posto F
Q1-1,5AIQ	777,3	629,9	799,3	693,3	746,3	759,1
Q3+1,5AIQ	1975,3	2270,9	1757,6	2073,0	2076,5	1879,9
1929	---	---	---	---	---	2117,0
1976	---	---	1798,8	---	---	---
1983	2228,5	2270,9	2170,8	2187,1	2076,5	2158,4
1991	---	---	2182,2	---	---	---
1996	---	---	1815,9	2145,2	---	---
2010	2113,7	---	---	---	---	---

Valores atípicos

Gráfico 5.7 - Diagrama *Box Plot* para as séries de precipitação total anual

A análise do diagrama *Box Plot* indica que o ano de 1983 foi mais chuvoso onde todos os postos registraram valores atípicos, reduzindo a possibilidade desses valores terem sido obtidos em consequência de algum tipo de erro.

No ano de 1996 também foram registrados valores atípicos nos postos C e D que estão próximos entre si, indicando a possibilidade de que ocorreram mais chuvas nesta região da cidade em relação aos valores médios desses postos.

Com o intuito de não prejudicar a análise proposta por este trabalho e verificar o impacto destes valores atípicos sobre os resultados, os testes estatísticos para análise da não estacionariedade da precipitação total anual foram aplicados às séries completas e às séries sem os valores identificados como *outliers*.

5.1.2.2. *Precipitação máxima diária anual*

A partir da aplicação do diagrama do *Box Plot* foram identificados valores atípicos em todas as séries como descrito a seguir e mostrado na Tabela 5.3 no Gráfico 5.8.

- **Posto A:** foi identificado um valor atípico, acima de 140,7 mm, 150,3 mm (1966);
- **Posto B:** foi identificado um valor atípico, acima de 142,4 mm, 146,8 mm (1962);
- **Posto C:** foram identificados dois valores atípicos, acima de 127,1 mm, 131,8 mm (1966) e 132,3 mm (1971);
- **Posto D:** foram identificados dois valores atípicos, acima de 121,6 mm, 133,7 mm (1960) e 130,5 mm (1983);
- **Posto E:** foram identificados três valores atípicos, acima de 122,2 mm, 132,0 mm (1966), 145,0 mm (1976) e 129,0 mm (1987);
- **Posto F:** foi identificado um valor atípico, acima de 122,5 mm, 136,4 mm (2005).

Tabela 5.3 - Resultados do *Box Plot* para a precipitação máxima diária anual

	Precipitação [mm]					
	Posto A	Posto B	Posto C	Posto D	Posto E	Posto F
Q1-1,5AIQ	10,8	11,8	12,7	22,6	16,4	20,9
Q3+1,5AIQ	140,7	142,4	127,1	121,6	122,2	122,5
Valores atípicos	1960	---	---	133,7	---	---
	1962	---	146,8	---	---	---
	1966	150,3	---	131,8	132,0	---
	1971	---	---	132,3	---	---
	1976	---	---	---	145,0	---
	1983	---	---	130,5	---	---
	1987	---	---	---	129,0	---
	2005	---	---	---	---	136,4

Gráfico 5.8 - Diagrama *Box Plot* para as séries de precipitação máxima diária anual

No ano de 1966 foram observados valores atípicos em três postos entre os dias 6 (Posto C e E) e 7 (Posto A) de março destacando a ocorrência de um evento extremo nestes dias. Da mesma forma, assim como com a precipitação total, os testes estatísticos para análise da não estacionariedade foram aplicados às séries completas e às séries sem os valores identificados como *outliers*.

5.2. Análise da não estacionariedade da precipitação total anual

5.2.1. Estatísticas descritivas

Antes de realizar a análise dos dados são apresentadas as estatísticas descritivas das séries de precipitação total anual. A Tabela 5.4 mostra esses dados onde há uma variação entre -4,0% e 3,9% da média em cada posto e a média de todos os postos. A média do Posto A (1415,7 mm) é a mais elevada enquanto o maior desvio padrão é observado na série do Posto D (287,3 mm). Os valores mais extremos foram registrados no Posto B, 803,6 mm (mínimo) e 2270,9 mm (máximo).

Tabela 5.4 - Estatísticas descritivas para as séries de precipitação total anual

Estatística	Precipitação Total Anual [mm]					
	Posto A	Posto B	Posto C	Posto D	Posto E	Posto F
Média	1415,7	1357,4	1307,4	1403,1	1342,9	1345,5
Desvio Padrão	267,7	275,0	261,6	287,3	229,9	253,7
Mínimo	887,0	803,6	859,2	877,6	829,8	834,6
Q ₁	1226,6	1166,0	1158,7	1210,7	1184,0	1179,4
Mediana	1372,9	1349,4	1291,0	1365,5	1326,3	1297,8
Q ₃	1526,05	1523,4	1398,225	1555,6	1475,75	1459,6
Máximo	2228,5	2270,9	2182,2	2187,1	2076,5	2158,4

5.2.2. Detecção de tendências temporais

A aplicação do teste de *Mann-Kendall* mostrou a existência de tendências indicando o aumento significativo da precipitação total anual nos Postos A, B e D. No Posto C, apesar de ter sido obtido um valor de *tau* (τ) acima de 0,05, o valor p bicaudal obtido de 0,167 (16,7%), confirma a hipótese nula. Nos postos E e F, a hipótese nula também foi confirmada com grande confiança na inexistência de tendência (<53,5%).

A Tabela 5.5 resume as estatísticas do teste e o Gráfico 5.9 mostra os valores da estatística de *Kendall* (τ) em função do valor p bicaudal onde a área amarela indica a região onde a hipótese 1 é válida.

Tabela 5.5 - Resultados do teste de *Mann-Kendall* para a precipitação total anual

Posto	N	Início	Final	τ	Valor p bicaudal	Nível de Confiança	Hipótese aceita	Tendência
A	80	1933	2012	0,291	0,0001	> 99,9%	H1	+
B	117	1888	2004	0,133	0,0332	96,7%	H1	+
C	58	1946	2003	0,125	0,1670	83,3%	H0	0
D	61	1943	2003	0,332	0,0002	> 99,9%	H1	+
E	88	1925	2012	0,010	0,8968	10,3%	H0	0
F	91	1922	2012	-0,052	0,4653	53,5%	H0	0

Gráfico 5.9 - Resultados do teste de *Mann-Kendall* para a precipitação total anual

A Tabela 5.6 mostra uma comparação entre os resultados obtidos para o teste de *Mann-Kendall* aplicado às séries completas e às séries sem os *outliers*.

Tabela 5.6 - Resultados do teste de *Mann-Kendall* para as séries com e sem *outliers* para a precipitação total anual

Posto	Série completa			Série sem <i>outliers</i>		
	τ	Valor p bicaudal	Nível de Confiança	τ	Valor p bicaudal	Nível de Confiança
A	0,291	0,0001	> 99,9%	0,274	0,0004	> 99,9%
B	0,133	0,0332	96,7%	0,125	0,0477	95,2%
C	0,125	0,1670	83,3%	0,076	0,4204	58,0%
D	0,332	0,0002	> 99,9%	0,323	0,0003	> 99,9%
E	0,010	0,8968	10,3%	0,002	0,9753	2,5%
F	-0,052	0,4653	53,5%	-0,044	0,5469	45,3%

Como pode ser esperado, a eliminação dos valores mais extremos das séries causou a diminuição do valor do *tau* (τ) e do nível de confiança dos resultados do

teste. Caso tivesse sido constatada alguma tendência negativa, provavelmente haveria um aumento no nível de confiança estatística para estas séries. Entretanto, como poucos valores foram suprimidos, as tendências observadas nos Postos A, B e D se mantiveram com nível de significância de 5% assim como a hipótese nula também foi confirmada nos demais postos. Na continuação dos estudos, foram utilizadas as séries de dados completas uma vez que a exclusão dos *outliers* não resultou em diferenças significativas.

O poder de detecção de tendências temporais do teste de Mann-Kendall depende do nível de significância adotado, da magnitude da tendência, do tamanho da amostra e da quantidade de variações junto com a série temporal (Yue, Pilon e Cavadias, 2002). Com o objetivo de compreender melhor a identificação de tendências temporais e o comportamento das séries estudadas, foi realizada uma análise de intervalos parciais das séries. A partir do início de cada série foram testados intervalos crescentes para verificar como os resultados variaram em função do comprimento das amostras.

No Gráfico 5.10 é mostrada a variação da estatística de Kendall em função da duração das séries de dados de precipitação total anual em cada posto estudado. Em cada série, os pontos apresentados indicam o final do período analisado e a hipótese aceita após a aplicação do teste. Os pontos sem preenchimento indicam que foi aceita a hipótese nula, enquanto os pontos preenchidos mostram que foi identificada alguma tendência, podendo esta ser negativa ($\sigma < 0,05$) ou positiva ($\sigma > 0,05$). A Tabela 5.7 lista os pontos apresentados no Gráfico 5.10 referentes ao Posto A e os respectivos resultados obtidos. As demais tabelas são mostradas no Apêndice B.

Gráfico 5.10 - Variação da estatística de Kendall em função da duração das séries de dados de precipitação total anual

Tabela 5.7 - Resultados do teste de *Mann-Kendall* para as séries parciais de precipitação total anual - Posto A

Início	Final	τ	p -value	Nível de Confiança	Hipótese aceita	Tendência
1933	1950	-0,020	0,940	6,0%	0	
	1955	-0,138	0,369	63,1%	0	
	1960	0,148	0,277	72,3%	0	
	1965	0,148	0,233	76,7%	0	
	1970	0,192	0,092	90,8%	0	
	1975	0,130	0,225	77,5%	0	
	1980	0,181	0,071	92,9%	0	
	1985	0,171	0,071	92,9%	0	
	1990	0,272	0,003	99,7%	1	+
	1995	0,272	0,002	99,8%	1	+
	2000	0,243	0,003	99,7%	1	+
	2005	0,223	0,005	99,5%	1	+
	2010	0,263	0,001	99,9%	1	+
	2012	0,291	<0,001	>99,9%	1	+

5.2.3. Detecção de mudanças em momentos

Após a análise de tendências graduais das séries de precipitação total anual completas foi realizada a verificação da existência de tendências abruptas nas séries por meio do teste não paramétrico de Mann-Whitney.

Nos gráficos a seguir são mostradas as séries de precipitação de cada posto (círculos / linha sólida), onde a linha sólida vertical indica o momento onde ocorre a mudança abrupta, a linha pontilhada constante indica a média de cada período e a linha pontilhada variável mostra a média móvel de 7 anos. A média móvel é mostrada nos gráficos com o intuito de facilitar a visualização da variação dos valores médios ao longo do tempo.

Na série do Posto A foi identificado um ponto de mudança no ano de 1956 quando houve um aumento de 16,8% da média e 38,3% do desvio padrão. A aplicação do teste de Mann-Kendall nos períodos distintos não identificou tendências temporais, confirmando que em ambos os períodos a série se mantém estacionária. Esta análise mostra que esta série apresenta características que indicam a sua não estacionariedade, onde a precipitação total anual possui uma tendência de aumento caracterizada pelo aumento da média. Destaca-se também o aumento significativo da variabilidade anual entre os dois períodos onde há uma tendência de ocorrência de anos chuvosos e secos mais extremos.

Tabela 5.8 - Estatística dos períodos entre a mudança abrupta identificados no Posto A

Período	N	Média [mm]	Desvio Padrão	τ	Valor p bicaudal	Nível de Confiança	Hipótese aceita	Tendência
1933 – 1955	23	1237,5	165,5	-0,138	0,3692	63,1%	H0	0
1956 – 2012	57	1487,5	268,4	0,114	0,2128	78,7%	H0	0

Gráfico 5.11 - Precipitação total anual no posto A, detecção de mudanças abruptas

A série do posto B apresenta um momento de mudança entre os anos de 1936 e 1943 quando a média sofre um aumento de 10,2% e o desvio padrão de 24,4%. O teste de Mann-Kendall aplicado aos períodos distintos confirmou a homogeneidade das amostras onde não há tendências significativas.

Tabela 5.9 - Estatística dos períodos entre a mudança abrupta identificados no Posto B

Período	N	Média [mm]	Desvio Padrão	τ	Valor p bicaudal	Nível de Confiança	Hipótese aceita	Tendência
1888 – 1936	49	1252,1	216,7	-0,073	0,4638	53,6%	H0	0
1937 – 1942	6	1832,3	146,3	0,333	0,4524	54,8%	H0	0
1943 – 2004	62	1394,7	269,5	0,042	0,6357	36,4%	H0	0

Gráfico 5.12 - Precipitação total anual no posto B, detecção de mudanças abruptas e médias

Assim como nos testes para a verificação de tendências temporais, não foram constatadas mudanças em momentos na série do Posto C, indicando que a série é estacionária. Entretanto, deve-se destacar que esta é a série de dados mais curta deste estudo, o que pode ter gerado alguma dificuldade na identificação da não estacionariedade.

Gráfico 5.13 - Precipitação total anual no posto C, detecção de mudanças abruptas e médias

No caso do posto D, que também possui uma série curta e que é o posto mais próximo do posto C, foi identificado um ponto de mudança no ano de 1964 quando houve um significativo aumento da média (19,6%) e do desvio padrão (29,6%). Assim como foi identificada a existência de uma tendência temporal positiva, este resultado fortalece a indicação de que esta série não é estacionária.

Tabela 5.10 - Estatística dos períodos entre a mudança abrupta identificados no Posto D

Período	N	Média [mm]	Desvio Padrão	τ	Valor p bicaudal	Nível de Confiança	Hipótese aceita	Tendência
1943 – 1964	22	1213,5	209,3	0,126	0,4298	57,0%	H0	0
1965 – 2003	39	1510,1	271,2	0,072	0,5993	40,1%	H0	0

Gráfico 5.14 - Precipitação total anual no posto D, detecção de mudanças abruptas e médias

Nos postos E e F as séries mostram comportamentos diferentes dos demais onde houve a redução da média entre os pontos de mudança. Nas duas séries não foram identificadas tendências temporais, porém foram identificados pontos de mudança dando indícios de não estacionariedade. Entretanto, ao observar os gráficos dos postos E e F entre 1930 e 1945 é possível observar um período de decréscimo das precipitações que pode estar relacionado a algum evento específico que causou a identificação deste ponto de mudança nas séries.

No posto E a mudança foi identificada no ano de 1938, separando dois períodos onde houve a redução da média de 6,0% e aumento do desvio padrão de 28,2%. Apesar de o teste de Mann-Kendall ter confirmado a hipótese nula nos dois períodos para o nível de significância $\alpha = 0,05$, há uma tendência temporal significativa entre 1939 e 2012 para um nível de significância $\alpha = 0,10$.

Tabela 5.11 - Estatística dos períodos entre a mudança abrupta identificados no Posto E

Período	N	Média [mm]	Desvio Padrão	τ	Valor p bicaudal	Nível de Confiança	Hipótese aceita	Tendência
1925 – 1938	14	1414,2	184,2	-0,099	0,6614	33,9%	H0	0
1939 – 2012	74	1329,5	236,2	0,145	0,0688	93,1%	H0	0

Gráfico 5.15 - Precipitação total anual no posto E, detecção de mudanças abruptas e médias

No posto F o ponto de mudança também foi identificado na década de 30, porém no ano de 1932. Neste caso, houve uma redução tanto na média (18,6%) quanto no desvio padrão (13,3%), e em ambos os períodos confirmou-se a hipótese nula no teste de Mann-Kendall.

Tabela 5.12 - Estatística dos períodos entre a mudança abrupta identificados no Posto F

Período	N	Média [mm]	Desvio Padrão	τ	Valor p bicaudal	Nível de Confiança	Hipótese aceita	Tendência
1922 – 1932	11	1609,0	266,3	0,127	0,6404	36,0%	H0	0
1933 – 2012	80	1309,3	231,0	0,109	0,1529	84,7%	H0	0

Gráfico 5.16 - Precipitação total anual no posto F, detecção de mudanças abruptas e médias

5.2.4. Detecção de mudanças na distribuição

A análise de frequência em hidrologia geralmente é aplicada a dados com períodos de registro inferiores a um ano, entretanto, visando apresentar uma análise completa dos dados, serão apresentados neste item os resultados da aplicação da distribuição GEV para a precipitação total anual.

5.2.4.1. Posto A

O Gráfico 5.17 mostra a aplicação da distribuição GEV à série observada no Posto A entre três períodos com durações diferentes, 1933 a 1970, 1933 a 1997 e 1933 a 2012, e que representam adequadamente a variação constatada.

Gráfico 5.17 - Precipitação total anual em função do tempo de retorno - Posto A

A Tabela 5.13 mostra os parâmetros estimados e a aceitação da aderência de ambas as séries apresentadas à distribuição de Gumbel com nível de significância α de 0,05.

Tabela 5.13 - Distribuição GEV da Precipitação Total Anual – Posto A

Distribuição GEV <i>Posto A</i>	Período		
	1933-1970	1933-1997	1933-2012
Parâmetros estimados pelo MMV:			
Localização (μ) / erro padrão:	1236,4 / 36,2	1280,6 / 29,9	1300,6 / 28,2
Escala (σ) / erro padrão:	197,0 / 26,2	217,5 / 21,1	225,7 / 19,9
Forma (ξ) / erro padrão:	-0,270 / 0,132	-0,081 / 0,081	-0,076 / 0,077
Verossimilhança negativa:	225,2	449,3	556,4
Verificação do ajuste Tipo I – Gumbel:			
Valor p:	0,056	0,345	0,347
Hipótese 0 – Aceita Gumbel ($\alpha=0,05$):	Aceita	Aceita	Aceita

O Gráfico 5.18 mostra a variação da precipitação total anual em função do tempo de retorno, onde as distribuições aplicadas até 1975 apresentaram resultados completamente diferentes das aplicações após 1985. Como mostrado na Tabela 5.14, a precipitação total anual apresentou um aumento entre 1,7% (TR = 2 anos) e 3,4% (TR = 1.000 anos) entre 1997 e 2012.

Gráfico 5.18 - Variação da precipitação total anual para diferentes tempos de retorno - Posto A

Tabela 5.14 - Variação da precipitação total anual entre 1997 e 2012 - Posto A

Período	Precipitação Total Anual (Intervalo de confiança de 95 %) [mm]										
	Tempo de Retorno [anos]										
	2	5	10	15	20	25	50	100	200	500	1.000
1933 – 1997	1297,4	1509,7	1634,3	1698,5	1740,9	1772,0	1860,1	1936,6	2002,9	2076,9	2123,9
	1359,1	1587,7	1727,9	1803,4	1854,6	1893,3	2008,0	2115,6	2216,9	2342,2	2430,8
1933 – 2012	1425,4	1509,7	1869,7	1983,2	2066,3	2129,0	2319,5	2517,6	2722,1	2999,8	3214,0
	1324,1	1546,7	1677,9	1745,5	1790,0	1822,6	1914,7	1994,0	2062,2	2137,7	2185,4
	1382,2	1620,6	1767,5	1846,8	1900,8	1941,6	2062,9	2177,0	2284,9	2418,8	2513,9
	1444,7	1546,7	1767,5	2014,4	2098,2	2164,5	2370,2	2577,4	2284,9	3083,0	3308,2
Diferença	1,7%	2,1%	2,3%	2,4%	2,5%	2,6%	2,7%	2,9%	3,1%	3,3%	3,4%

5.2.4.2. Posto B

O Gráfico 5.19 mostra a aplicação da distribuição GEV à série observada no Posto B entre três períodos com durações diferentes, 1888 a 1970, 1888 a 1997 e 1888 a 2004, porém os testes indicaram que o ajuste à distribuição de Gumbel não deve ser aceita como mostrado na Tabela 5.15.

Gráfico 5.19 - Precipitação total anual em função do tempo de retorno - Posto B

Tabela 5.15 - Distribuição GEV da Precipitação Total Anual - Posto B

Distribuição GEV	Período		
Posto A	1888-1970	1888-1997	1888-2004
Parâmetros estimados pelo MMV:			
Localização (μ) / erro padrão:	1227,3 / 31,3	1255,3 / 26,7	1245,6 / 25,6
Escala (σ) / erro padrão:	253,6 / 22,2	254,1 / 18,6	249,3 / 17,9
Forma (ξ) / erro padrão:	-0,196 / 0,081	-0,154 / 0,057	-0,141 / 0,058
Verossimilhança negativa:	581,5	772,7	813,7
Verificação do ajuste Tipo I – Gumbel:			
Valor p:	0,030	0,022	0,036
Hipótese 0 – Aceita Gumbel ($\alpha=0,05$):	Rejeita	Rejeita	Rejeita

Tendo em vista que foram detectados dois pontos de mudança na série, a distribuição GEV também foi aplicada ao período excluindo-se os dados anteriores a 1937. Nesta condição, o ajuste de Gumbel foi aceito apenas para o período entre 1937-2004. Ao considerar o período excluindo o intervalo anterior ao segundo ponto de mudança em 1943, o ajuste foi aceito para os intervalos 1943-1997 e 1943-2004 como mostrado no Gráfico 5.20 e na Tabela 5.16.

Gráfico 5.20 - Precipitação total anual em função do tempo de retorno, série reduzida - Posto B

Tabela 5.16 - Distribuição GEV da Precipitação Total Anual, série reduzida - Posto B

Distribuição GEV	Período		
Posto A	1943-1970	1943-1997	1943-2004
Parâmetros estimados pelo MMV:			
Localização (μ) / erro padrão:	1286,7 / 56,1	1312,0 / 36,8	1287,2 / 34,5
Escala (σ) / erro padrão:	266,1 / 41,5	250,2 / 25,1	245,0 / 23,8
Forma (ξ) / erro padrão:	-0,368 / 0,174	-0,160 / 0,070	-0,139 / 0,073
Verossimilhança negativa:	194,8	385,0	426,6
Verificação do ajuste Tipo I – Gumbel:			
Valor p:	0,028	0,058	0,104
Hipótese 0 – Aceita Gumbel ($\alpha=0,05$):	Rejeita	Aceita	Aceita

Como mostrado na Tabela 5.17, a precipitação total anual para a série reduzida apresentou uma variação não significativa entre -1,4% (TR = 2 anos) e 0,8% (TR = 1.000 anos) entre 1997 e 2004.

Tabela 5.17 - Variação da precipitação total anual entre 1997 e 2004 - Posto B

Período	Precipitação Total Anual (Intervalo de confiança de 95 %) [mm]										
	Tempo de Retorno [anos]										
	2	5	10	15	20	25	50	100	200	500	1.000
	1326,5	1558,4	1686,5	1750,7	1792,5	1822,9	1907,7	1979,8	2041,0	2107,5	2148,7
1943 – 1997	1401,0	1645,5	1784,7	1856,1	1903,3	1938,1	2037,9	2126,3	2205,2	2296,6	2357,4
	1479,5	1558,4	1924,2	2025,9	2098,0	2151,1	2299,3	2444,6	2586,3	2766,7	2897,2

Tabela 5.17 - Variação da precipitação total anual entre 1997 e 2004 - Posto B (continuação)

Período	Precipitação Total Anual (Intervalo de confiança de 95 %) [mm]										
	Tempo de Retorno [anos]										
	2	5	10	15	20	25	50	100	200	500	1.000
1943 – 2004	1304,4	1534,8	1664,4	1729,9	1772,6	1803,8	1891,2	1965,9	2029,6	2099,6	2143,2
	1374,7	1619,0	1760,8	1834,5	1883,6	1920,1	2025,4	2120,3	2206,1	2307,4	2375,8
	1448,9	1534,8	1899,0	2005,3	2081,4	2137,7	2299,3	2460,4	2620,0	2826,8	2979,0
Diferença	-1,4%	-1,1%	-0,8%	-0,7%	-0,6%	-0,5%	-0,2%	0,0%	0,3%	0,6%	0,8%

5.2.4.3. Posto C

O Gráfico 5.21 mostra a aplicação da distribuição GEV à série observada no Posto A entre três períodos com durações diferentes, 1945 a 1970, 1945 a 1997 e 1945 a 2003, onde constata-se que não há uma variação significativa entre as séries com final em 1997 e 2003.

Gráfico 5.21 - Precipitação total anual em função do tempo de retorno - Posto C

A Tabela 5.18 mostra os parâmetros estimados e a aceitação da aderência de ambas as séries apresentadas à distribuição de Gumbel com nível de significância α de 0,05.

Tabela 5.18 - Distribuição GEV da Precipitação Total Anual - Posto C

Distribuição GEV <i>Posto A</i>	Período		
	1945-1970	1945-1997	1945-2003
Parâmetros estimados pelo MMV:			
Localização (μ) / erro padrão:	1175,3 / 42,0	1196,5 / 32,9	1194,8 / 30,0
Escala (σ) / erro padrão:	190,0 / 29,5	214,8 / 23,1	207,6 / 21,0
Forma (ξ) / erro padrão:	-0,298 / 0,132	-0,028 / 0,085	-0,029 / 0,078
Verossimilhança negativa:	166,4	360,2	399,6
Verificação do ajuste Tipo I – Gumbel:			
Valor p:	0,055	0,750	0,716
Hipótese 0 – Aceita Gumbel ($\alpha=0,05$):	Aceita	Aceita	Aceita

O Gráfico 5.22 mostra a variação da precipitação total anual em função do tempo de retorno onde as distribuições aplicadas até 1980 apresentaram resultados completamente diferentes das aplicações após 1985, quando o tamanho da amostra foi suficiente para gerar resultados com maior confiança. Como mostrado na Tabela 5.19, a precipitação total anual apresentou uma redução entre -0,3% (TR = 2 anos) e -2,1% (TR = 1.000 anos) entre 1997 e 2003.

Gráfico 5.22 - Variação da precipitação total anual para diferentes tempos de retorno - Posto C

Tabela 5.19 - Variação da precipitação total anual entre 1997 e 2003 - Posto C

Período	Precipitação Total Anual (Intervalo de confiança de 95 %) [mm]										
	Tempo de Retorno [anos]										
	2	5	10	15	20	25	50	100	200	500	1.000
1945 – 1997	1206,3	1421,2	1552,1	1621,4	1667,9	1702,4	1802,5	1892,3	1972,8	2065,9	2127,3
	1274,8	1512,1	1665,2	1750,2	1809,1	1854,2	1991,2	2124,5	2254,9	2423,1	2547,4
	1349,5	1421,2	1848,3	1986,6	2081,8	2154,9	2394,3	2652,2	2928,9	3319,0	3633,6
1945 – 2003	1208,0	1381,8	1543,3	1610,6	1655,9	1689,6	1787,6	1876,0	1955,6	2048,5	2110,3
	1270,5	1499,5	1647,1	1728,9	1785,6	1828,9	1960,7	2088,8	2213,9	2375,2	2494,3
	1338,4	1381,8	1808,7	1935,8	2030,5	2100,4	2322,8	2560,9	2814,4	3171,9	3458,5
Diferença	-0,3%	-0,8%	-1,1%	-1,2%	-1,3%	-1,4%	-1,5%	-1,7%	-1,8%	-2,0%	-2,1%

5.2.4.4. Posto D

O Gráfico 5.23 mostra a aplicação da distribuição GEV à série observada no Posto D entre três períodos com durações diferentes, 1943 a 1970, 1943 a 1997 e 1943 a 2003, onde constata-se que há uma pequena variação entre as séries com final em 1997 e 2003.

Gráfico 5.23 - Precipitação total anual em função do tempo de retorno - Posto D

A Tabela 5.20 mostra os parâmetros estimados e a aceitação da aderência de ambas as séries apresentadas à distribuição de Gumbel com nível de significância α de 0,05.

Tabela 5.20 - Distribuição GEV da Precipitação Total Anual - Posto D

Distribuição GEV <i>Posto A</i>	Período		
	1943-1970	1943-1997	1943-2003
Parâmetros estimados pelo MMV:			
Localização (μ) / erro padrão:	1175,8 / 45,0	1271,2 / 38,9	1282,9 / 35,9
Escala (σ) / erro padrão:	208,0 / 32,7	254,4 / 37,9	250,1 / 25,4
Forma (ξ) / erro padrão:	-0,194 / 0,161	-0,086 / 0,105	-0,110 / 0,092
Verossimilhança negativa:	190,8	388,9	429,4
Verificação do ajuste Tipo I – Gumbel:			
Valor p:	0,271	0,433	0,265
Hipótese 0 – Aceita Gumbel ($\alpha=0,05$):	Aceita	Aceita	Aceita

O Gráfico 5.24 mostra a variação da precipitação total anual em função do tempo de retorno, como no caso do Posto C, as distribuições aplicadas até 1980 apresentaram resultados completamente diferentes das aplicações após 1985. Como mostrado na Tabela 5.21, a precipitação total anual apresentou uma variação entre -3,9% (TR = 1.000 anos) e 0,7% (TR = 2 anos) entre 1997 e 2003.

Gráfico 5.24 - Variação da precipitação total anual para diferentes tempos de retorno - Posto D

Tabela 5.21 - Variação da precipitação total anual entre 1997 e 2003 - Posto D

Período	Precipitação Total Anual (Intervalo de confiança de 95 %) [mm]										
	Tempo de Retorno [anos]										
	2	5	10	15	20	25	50	100	200	500	1.000
1943 – 1997	1282,8	1529,6	1673,7	1746,7	1794,3	1828,8	1924,4	2004,0	2070,0	2139,7	2181,6
	1363,0	1629,1	1791,4	1878,5	1937,6	1982,1	2113,7	2236,8	2352,2	2494,2	2594,2
	1449,5	1529,6	1986,3	2126,7	2221,1	2296,3	2540,5	2798,3	3066,9	3434,3	3719,1
1943 – 2003	1298,8	1538,7	1676,3	1745,8	1791,0	1823,8	1914,7	1990,7	2054,0	2121,2	2161,8
	1372,7	1628,7	1781,4	1862,2	1916,5	1957,2	2076,2	2185,6	2286,5	2408,4	2492,7
	1451,4	1538,7	1944,1	2070,7	2156,9	17692,0	2426,4	2638,2	2854,1	3142,8	3361,5
Diferença	0,7%	0,0%	-0,6%	-0,9%	-1,1%	-1,3%	-1,8%	-2,3%	-2,8%	-3,4%	-3,9%

5.2.4.5. Posto E

O Gráfico 5.25 mostra a aplicação da distribuição GEV à série observada no Posto E entre três períodos com durações diferentes, 1925 a 1970, 1925 a 1997 e 1925 a 2012, porém, assim como no Posto B, os testes indicaram que o ajuste à distribuição de Gumbel não deve ser aceita como mostrado na Tabela 5.22.

Gráfico 5.25 - Precipitação total anual em função do tempo de retorno - Posto E

Tabela 5.22 - Distribuição GEV da Precipitação Total Anual - Posto E

Distribuição GEV	Período		
Posto A	1925-1970	1925-1997	1925-2012
Parâmetros estimados pelo MMV:			
Localização (μ) / erro padrão:	1242,4 / 33,8	1253,4 / 27,6	1250,3 / 24,7
Escala (σ) / erro padrão:	207,6 / 23,9	215,0 / 19,0	211,4 / 17,0
Forma (ξ) / erro padrão:	-0,290 / 0,098	-0,158 / 0,066	-0,158 / 0,060
Verossimilhança negativa:	310,5	500,3	601,6
Verificação do ajuste Tipo I – Gumbel:			
Valor p:	0,011	0,042	0,026
Hipótese 0 – Aceita Gumbel ($\alpha=0,05$):	Rejeita	Rejeita	Rejeita

Com o objetivo de obter uma análise mais completa, a distribuição GEV também foi aplicada ao período excluindo-se os dados anteriores ao ponto de mudança identificado em 1939. Nesta condição, o ajuste de Gumbel foi aceito para os três períodos de interesse como mostrado no Gráfico 5.26 e na Tabela 5.23.

Gráfico 5.26 - Precipitação total anual em função do tempo de retorno, série reduzida - Posto E

Tabela 5.23 - Distribuição GEV da precipitação total anual, série reduzida - Posto E

Distribuição GEV <i>Posto A</i>	Período		
	1939-1970	1939-1997	1939-2012
Parâmetros estimados pelo MMV:			
Localização (μ) / erro padrão:	1292,6 / 38,1	1230,3 / 30,5	1231,7 / 26,7
Escala (σ) / erro padrão:	192,8 / 26,8	212,0 / 21,2	208,4 / 18,5
Forma (ξ) / erro padrão:	-0,206 / 0,128	-0,111 / 0,082	-0,119 / 0,072
Verossimilhança negativa:	215,2	405,3	506,7
Verificação do ajuste Tipo I – Gumbel:			
Valor p:	0,129	0,210	0,128
Hipótese 0 – Aceita Gumbel ($\alpha=0,05$):	Aceita	Aceita	Aceita

Como mostrado na Tabela 5.24, a precipitação total anual apresentou uma redução pouco significativa entre -0,3% (TR = 5 anos) e -1,8% (TR = 1.000 anos) entre 1997 e 2012.

Tabela 5.24 - Variação da precipitação total anual entre 1997 e 2012 - Posto E

Período	Precipitação Total Anual (Intervalo de confiança de 95 %) [mm]										
	Tempo de Retorno [anos]										
	2	5	10	15	20	25	50	100	200	500	1.000
1939 – 1997	1244,0	1446,7	1562,7	1621,6	1660,2	1688,4	1767,3	1834,6	1891,8	1954,3	1993,1
	1306,4	1523,1	1652,3	1720,5	1766,4	1800,8	1901,2	1993,4	2078,5	2181,0	2251,9
	1373,1	1446,7	1787,3	1890,1	1964,5	2018,2	2183,3	2352,0	2522,9	2749,9	2921,0
1939 – 2012	1251,8	1451,1	1564,8	1622,5	1660,2	1687,8	1764,9	1830,9	1887,0	1948,6	1987,0
	1306,5	1517,9	1642,9	1708,7	1752,8	1785,7	1881,7	1969,3	2049,6	2145,8	2211,9
	1364,4	1451,1	1754,1	1846,6	1912,8	1964,6	2120,0	2270,5	2421,3	2619,2	2766,7
Diferença	0,0%	-0,3%	-0,6%	-0,7%	-0,8%	-0,8%	-1,0%	-1,2%	-1,4%	-1,6%	-1,8%

5.2.4.6. Posto F

O Gráfico 5.27 mostra a aplicação da distribuição GEV à série observada no Posto F entre três períodos com durações diferentes, 1922 a 1970, 1922 a 1997 e 1922 a 2012, onde constata-se que as distribuições praticamente se sobrepõem mostram que não há uma variação significativa.

Gráfico 5.27 - Precipitação total anual em função do tempo de retorno - Posto F

A Tabela 5.25 mostra os parâmetros estimados e a aceitação da aderência de ambas as séries apresentadas à distribuição de Gumbel com nível de significância α de 0,05.

Tabela 5.25 - Distribuição GEV da Precipitação Total Anual - Posto F

Distribuição GEV <i>Posto A</i>	Período		
	1922-1970	1922-1997	1922-2012
Parâmetros estimados pelo MMV:			
Localização (μ) / erro padrão:	1238,9 / 35,6	1235,9 / 28,5	1237,6 / 25,0
Escala (σ) / erro padrão:	223,5 / 25,2	223,9 / 20,0	215,5 / 17,5
Forma (ξ) / erro padrão:	-0,112 / 0,098	-0,090 / 0,074	-0,081 / 0,067
Verossimilhança negativa:	339,3	527,1	628,1
Verificação do ajuste Tipo I – Gumbel:			
Valor p:	0,295	0,256	0,251
Hipótese 0 – Aceita Gumbel ($\alpha=0,05$):	Aceita	Aceita	Aceita

O Gráfico 5.28 mostra a variação da precipitação total anual em função do tempo de retorno onde as distribuições apresentam pouca variação, destacando-se o período após 1980, onde é observado um aumento das precipitações das distribuições. Como mostrado na Tabela 5.26, a precipitação total anual apresentou uma redução pouco significativa entre -0,1% (TR = 2 anos) e -0,7% (TR = 10 a 100 anos) entre 1997 e 2012.

Gráfico 5.28 - Variação da precipitação total anual para diferentes tempos de retorno - Posto F **Tabela 5.26 - Variação da precipitação total anual entre 1997 e 2012 - Posto F**

Período	Precipitação Total Anual (Intervalo de confiança de 95 %) [mm]										
	Tempo de Retorno [anos]										
	2	5	10	15	20	25	50	100	200	500	1.000
1922 – 1997	1257,8	1476,1	1603,5	1669,0	1712,1	1743,8	1833,2	1910,6	1977,3	2051,3	2098,2
	1316,7	1550,0	1691,9	1767,8	1819,3	1858,0	1972,3	2078,8	2178,5	2300,7	2386,6
1922 – 2012	1379,1	1476,1	1819,7	1928,6	2007,6	2069,9	2258,2	2446,1	2638,2	2896,4	3093,4
	1263,6	1475,9	1600,9	1665,5	1708,2	1739,7	1828,9	1906,8	1974,6	2050,9	2099,8
	1315,4	1541,9	1680,8	1755,5	1806,3	1844,6	1958,2	2064,7	2165,1	2289,0	2376,8
	1370,1	1475,9	1792,4	1895,1	1969,2	2027,5	2213,4	2398,5	2583,7	2833,0	3023,9
Diferença	-0,1%	-0,5%	-0,7%	-0,7%	-0,7%	-0,7%	-0,7%	-0,7%	-0,6%	-0,5%	-0,4%

A análise estatística realizada mostrou que a precipitação total anual apresenta um comportamento não estacionário em três dos seis postos pluviométricos estudados na cidade de São Paulo. Os resultados mostraram o aumento da média e do desvio padrão destas séries, indicando assim o aumento da variabilidade anual dos volumes totais precipitados.

Apesar de ter sido constatado o aumento da precipitação total anual ao longo do tempo, o aumento da variabilidade pode ser mais importante para o planejamento e gerenciamento dos sistemas de recursos hídricos. Com o aumento do risco de ocorrer uma maior diferença entre anos mais e menos chuvosos, passa a ser necessário reservar maiores volumes de água para atender a uma mesma demanda de abastecimento, irrigação ou produção de energia. Por outro lado, durante os

períodos chuvosos, os reservatórios que possuem volumes de espera para o controle de cheias em grandes bacias também precisarão ter as suas regras de operação analisadas para lidar com a não estacionariedade da precipitação.

5.3. Análise da não estacionariedade da precipitação máxima diária anual

5.3.1. Estatísticas descritivas

Antes de realizar a análise dos dados são apresentadas as estatísticas descritivas das séries de precipitação máxima diária anual (Tabela 5.27).

Tabela 5.27 - Estatísticas descritivas para as séries de precipitação máxima diária anual

Estatística	Precipitação Total Anual [mm]					
	Posto A	Posto B	Posto C	Posto D	Posto E	Posto F
Média	77,3	78,9	71,7	75,4	71,3	73,0
Desvio Padrão	23,4	23,0	21,5	20,7	20,4	19,9
Mínimo	45,6	43,9	39,5	40,5	30,0	32,2
Q ₁	59,5	60,8	55,6	59,8	56,1	59,0
Mediana	72,5	76,2	67,2	74,7	67,6	70,4
Q ₃	92	93,4	84,2	84,5	82,5	84,4
Máximo	150,3	146,8	132,3	133,7	145,0	136,4

As estatísticas descritivas mostram que há uma variação entre -4,4% e 5,7% da média em cada posto e a média de todos os postos. A média do Posto B (78,9 mm) é a mais elevada enquanto o maior desvio padrão é observado na série do Posto A (23,4 mm). O valor mínimo foi registrado no Posto E (30,0 mm) e o máximo no Posto A (150,3 mm).

5.3.2. Detecção de tendências temporais

A aplicação do teste de *Mann-Kendall* nas séries de precipitação máxima diária anual sugere que na região estudada não há uma relação direta entre o aumento da precipitação total e o aumento na ocorrência de eventos extremos. Nesta análise, apenas o Posto A mostrou uma tendência positiva de aumento na precipitação máxima enquanto os demais postos confirmaram a hipótese nula. Entretanto, além da dificuldade em detectar tendências em séries de máximos, a existência de falhas pode ter influenciado o resultado significativamente. O Posto A possui a única série de dados sem falhas durante o período observado e apresentou resultados similares, ou seja, em ambos os casos indicaram a existência de tendência positiva.

A Tabela 5.28 resume as estatísticas do teste onde ressalta-se que os tamanhos amostrais são menores em algumas séries porque não foi realizado o preenchimento de falhas da precipitação máxima diária. Assim como anteriormente, o Gráfico 5.29 mostra os valores da estatística de Kendall (τ) em função do valor p bicaudal onde a área amarela indica a região onde a hipótese 1 é válida.

Tabela 5.28 - Resultados do teste de Mann-Kendall para a precipitação máxima diária anual

Posto	N	Início	Final	τ	Valor p bicaudal	Nível de Confiança	Hipótese aceita	Tendência
A	80	1933	2012	0,263	0,0006	>99,9%	H1	+
B	114	1888	2004	-0,012	0,8504	15,0%	H0	0
C	59	1946	2003	0,116	0,1976	80,2%	H0	0
D	57	1943	2003	0,108	0,2391	76,1%	H0	0
E	88	1925	2012	0,005	0,9483	5,2%	H0	0
F	91	1922	2012	0,046	0,5192	48,1%	H0	0

Gráfico 5.29 - Resultados do teste de Mann-Kendall para a precipitação máxima diária anual

A Tabela 5.29 mostra uma comparação entre os resultados obtidos para o teste de *Mann-Kendall* aplicado às séries completas e às séries sem os *outliers*.

Tabela 5.29 - Resultados do teste de *Mann-Kendall* para as séries com e sem *outliers*

Posto	Série completa			Série sem <i>outliers</i>		
	τ	Valor p bicaudal	Nível de Confiança	τ	Valor p bicaudal	Nível de Confiança
A	0,263	0,0006	> 99,9%	0,274	0,0004	> 99,9%
B	-0,012	0,8504	15,0%	-0,018	0,7810	21,9%
C	0,116	0,1976	80,2%	0,137	0,1334	86,7%
D	0,108	0,2391	76,1%	0,121	0,1963	80,4%
E	0,005	0,9483	5,2%	-0,008	0,9214	7,9%
F	0,046	0,5192	48,1%	0,028	0,6963	30,4%

No caso da precipitação máxima anual, a eliminação dos *outliers* não alterou os resultados obtidos com as séries completas significativamente, sugerindo que as falhas existentes nas séries e a presença dos *outliers* identificados não afetaram os resultados do teste de *Mann-Kendall*. Então, assim como realizado anteriormente para a precipitação total anual, não serão excluídos valores das séries para a aplicação dos outros testes.

Assim como aplicado para a precipitação total anual, foi realizada uma análise de intervalos parciais das séries. A partir do início de cada série foram testados intervalos crescentes para verificar como os resultados variaram em função do comprimento das amostras.

No Gráfico 5.30 é mostrada a variação da estatística de Kendall em função da duração das séries de dados de precipitação máxima diária anual em cada posto estudado. Em cada série, os pontos apresentados indicam o final do período analisado e a hipótese aceita após a aplicação do teste. Os pontos sem preenchimento indicam quando aceita-se a hipótese nula enquanto os pontos preenchidos mostram quando identificou-se alguma tendência, podendo esta ser negativa ($\sigma < 0,05$) ou positiva ($\sigma > 0,05$). A Tabela 5.30 lista os pontos apresentados no Gráfico 5.30 referentes ao Posto A e os respectivos resultados obtidos. As demais tabelas são mostradas no Apêndice C.

Gráfico 5.30 - Variação da estatística de Kendall em função da duração das séries de dados para a precipitação máxima diária anual

Tabela 5.30 - Resultados do teste de *Mann-Kendall* para as séries parciais de precipitação máxima diária anual - Posto A

Início	Final	τ	p -value	Nível de Confiança	Hipótese aceita	Tendência
1933	1950	0,216	0,225	77,5%	0	
	1955	0,217	0,154	84,6%	0	
	1960	0,280	0,038	96,2%	1	+
	1965	0,161	0,193	80,7%	0	
	1970	0,330	0,004	99,6%	1	+
	1975	0,267	0,012	98,8%	1	+
	1980	0,268	0,007	99,3%	1	+
	1985	0,272	0,004	99,6%	1	+
	1990	0,250	0,006	99,4%	1	+
	1995	0,174	0,045	95,5%	1	+
	2000	0,155	0,062	93,8%	0	
	2005	0,189	0,018	98,2%	1	+
	2010	0,250	0,001	99,9%	1	+
	2012	0,263	0,001	99,9%	1	+

5.3.3. Detecção de mudanças em momentos

Nos gráficos a seguir são mostradas as séries de precipitação de cada posto (círculos / linha sólida), onde a linha sólida vertical indica o momento onde ocorre a mudança abrupta e a linha pontilhada constante indica a média de cada período.

Na série do Posto A foi possível identificar um ponto de mudança localizado no ano de 1966. Entre os períodos diferentes identificados houve um aumento de 30,3% da média e de 118% do desvio padrão. Ao aplicar o teste de *Mann-Kendall* nos períodos não foram identificadas tendências temporais. Esta análise mostra que esta série apresenta características que indicam a sua não estacionariedade causados por este ponto de mudança, onde a precipitação máxima apresenta um aumento na média e na variabilidade interanual.

Gráfico 5.31 - Precipitação máxima diária anual no posto A e detecção de mudanças abruptas

Tabela 5.31 - Estatística dos períodos entre a mudança abrupta identificados no Posto A

Período	N	Média [mm]	Desvio Padrão	τ	Valor p bicaudal	Nível de Confiança	Hipótese aceita	Tendência
1933 – 1965	33	65,6	11,9	0,161	0,1930	80,7%	H0	0
1966 – 2012	47	85,5	25,9	0,033	0,7482	25,2%	H0	0

No Posto B foram identificados diferentes pontos de mudança, porém não foram realizados testes de tendência devido ao pequeno tamanho dos intervalos obtidos.

Gráfico 5.32 - Precipitação máxima diária anual no posto B e detecção de mudanças abruptas **Tabela 5.32 - Estatística dos períodos entre a mudança abrupta identificados no Posto B**

Período	N	Média [mm]	Desvio Padrão
1888 – 1908	21	83,4	21,0
1909 – 1920	12	56,1	9,3
1921 – 1931	11	93,8	12,6
1932 – 1953	22	73,3	22,1
1954 – 1968	15	98,7	22,8
1969 – 2004	36	74,4	21,1

Nos demais postos não foram identificadas mudanças em momentos, possivelmente devido as dificuldades de detecção que o teste possui ao ser aplicado a séries de extremos. Entretanto, os gráficos a seguir mostram as séries de precipitação total anual para os Postos C, D, E e F.

Gráfico 5.33 - Precipitação máxima diária anual no posto C e detecção de mudanças abruptas

Gráfico 5.34 - Precipitação máxima diária anual no posto D e detecção de mudanças abruptas **Gráfico 5.35 - Precipitação máxima diária anual no posto E e detecção de mudanças abruptas** **Gráfico 5.36 - Precipitação máxima diária anual no posto F e detecção de mudanças abruptas**

5.3.4. Detecção de mudanças na distribuição

A detecção de mudanças na distribuição das precipitações máximas diárias anuais foi realizada por meio da aplicação da distribuição GEV as séries completas e parciais. Esta forma de aplicação tem o intuito de avaliar a existência de variações na distribuição de acordo com o aumento do período registrado e de quantificar tais mudanças.

Como apresentado no item 4.1.4, a equação de chuvas utilizada atualmente na cidade de São Paulo foi elaborada com base nos dados registrados entre 1933 e 1997 no Posto A. Tendo em vista que grande parte dos projetos e obras hidráulicas executadas na última década utilizou esta referência nos seus dimensionamentos, torna-se importante apresentar resultados comparativos entre as análises com os dados registrados até 1997 e após este ano.

A seguir são mostrados e discutidos os resultados obtidos contendo os parâmetros estimados, a verificação de aderência da distribuição extrema tipo I (Gumbel), a comparação entre as distribuições e a variação da precipitação máxima diária em função do tempo de retorno ao longo do tempo.

Na Tabela 5.33 são mostrados os resultados obtidos após a aplicação do teste para as séries considerando o período entre o início e 1997 e na Tabela 5.34 para as séries completas.

Tabela 5.33 - Precipitação máxima diária até 1997

Posto	Precipitação Máxima Diária [mm] / Tempo de Retorno [anos]										
	2	5	10	15	20	25	50	100	200	500	1.000
A	68,3	86,3	99,7	107,8	113,7	118,4	133,6	150,0	167,8	193,6	215,0
B	76,4	97,1	110,4	117,8	122,8	126,7	138,5	149,9	160,9	175,1	185,6
C	66,6	86,0	100,4	109,0	115,3	120,4	136,6	154,2	173,1	200,4	223,1
D	71,1	89,7	102,0	109,0	113,8	117,6	129,1	140,6	152,1	167,2	178,6
E	67,6	85,7	97,7	104,5	109,3	113,1	124,5	136,0	147,5	162,8	174,4
F	70,2	86,1	95,1	99,7	102,8	105,0	111,4	117,1	122,1	127,9	131,7

Tomando a precipitação máxima obtida pela equação de chuvas para o tempo de retorno de 100 anos, para uma duração de 1.440 minutos, equivalente a um dia, que corresponde a 152,1 mm, é possível observar rapidamente que:

- A precipitação máxima obtida para o tempo de retorno de 100 anos no Posto A, o mesmo da equação, possui uma diferença de apenas 1,4%, indicando que é possível realizar uma comparação com a equação de chuvas atual;

- b. Com exceção do posto C, todos os demais postos resultaram em valores para a precipitação máxima diária para o tempo de retorno de 100 anos inferiores ao valor obtido pela equação, indicando que há uma superestimação da precipitação de projeto quando a equação é aplicada às outras localidades.
- c. A adoção da série do posto A como base para a elaboração da equação de chuvas faz com que seja possível estimar a precipitação associada a um risco com maior margem de segurança na maior parte das regiões.

Seguindo com este mesmo exemplo, observa-se na Tabela 5.34 que ao analisar as séries completas, apenas o posto A resultou em valores superiores a 152,1 mm de precipitação máxima diária referente ao tempo de retorno de 100 anos.

Tabela 5.34 - Precipitação máxima diária para as séries completas

Posto	Precipitação Máxima Diária [mm] / Tempo de Retorno [anos]										
	2	5	10	15	20	25	50	100	200	500	1.000
A	72,1	92,9	108,1	117,3	123,9	129,1	146,1	164,3	183,7	211,7	234,6
B	73,6	94,2	107,2	114,2	119,1	122,7	133,7	144,2	154,2	166,9	176,0
C	67,1	86,0	99,7	107,8	113,6	118,2	133,1	148,8	165,5	189,1	208,3
D	72,4	90,7	102,5	109,0	113,5	116,9	127,3	137,4	147,2	159,8	169,0
E	67,6	85,6	97,8	104,6	109,5	113,2	124,8	136,5	148,1	163,7	175,6
F	70,0	87,6	98,2	103,8	107,5	110,4	118,7	126,3	133,4	142,0	147,9

5.3.4.1. Posto A

O Gráfico 5.37 mostra a aplicação da distribuição GEV à série observada no Posto A entre três períodos com durações diferentes, 1933 a 1970, 1933 a 1997 e 1933 a 2012, e que representam adequadamente a variação constatada.

Gráfico 5.37 - Precipitação máxima diária em função do tempo de retorno - Posto A.

A Tabela 5.35 mostra os parâmetros estimados e a aceitação da aderência de ambas as séries apresentadas à distribuição de Gumbel com nível de significância α de 0,05.

Tabela 5.35 - Distribuição GEV - Posto A

Distribuição GEV <i>Posto A</i>	Período		
	1933-1970	1933-1997	1933-2012
Parâmetros estimados pelo MMV:			
Localização (μ) / erro padrão:	61,865 / 2,369	62,913 / 2,084	68,892 / 2,211
Escala (σ) / erro padrão:	12,744 / 1,809	14,291 / 1,620	16,644 / 1,720
Forma (ξ) / erro padrão:	0,106 / 0,134	0,117 / 0,120	0,105 / 0,114
Verossimilhança negativa:	158,9	279,9	356,3
Verificação do ajuste Tipo I – Gumbel:			
Valor p:	0,365	0,283	0,328
Hipótese 0 – Aceita Gumbel ($\alpha=0,05$):	Aceita	Aceita	Aceita

O Gráfico 5.38 mostra a variação da precipitação em função do tempo de retorno onde as distribuições aplicadas até 1965 apresentaram resultados completamente diferentes das aplicações após 1970 devido ao tamanho das amostras até este ano. Observa-se que entre 1975 e 2000 não há grande variação

dos valores, porém após 2005 constata-se um novo aumento significativo. Como mostrado na Tabela 5.36, a precipitação máxima diária apresentou um aumento entre 5,6% (TR = 2 anos) e 9,5% (TR = 100 anos) entre 1997 e 2012.

Gráfico 5.38 - Variação da precipitação máxima para diferentes tempos de retorno - Posto A

Tabela 5.36 - Variação da precipitação máxima diária entre 1997 e 2012 - Posto A

Período	Precipitação Máxima Diária (Intervalo de confiança de 95%) [mm]										
	Tempo de Retorno [anos]										
	2	5	10	15	20	25	50	100	200	500	1.000
1933 – 1997	63,8	79,6	90,4	96,3	100,4	103,5	112,6	121,1	129,1	138,9	145,9
	68,3	86,3	99,7	107,8	113,7	118,4	133,6	150,0	167,8	193,6	215,0
	73,3	79,6	117,3	131,0	141,9	151,0	183,3	222,5	269,4	345,0	413,9
1933 – 2012	67,3	85,9	98,4	105,2	109,9	113,4	123,6	133,0	141,8	152,1	159,7
	72,1	92,9	108,1	117,3	123,9	129,1	146,1	164,3	183,7	211,7	234,6
	77,4	85,9	125,6	141,3	153,1	163,0	198,0	239,8	289,4	211,7	439,7
Diferença	5,6%	7,6%	8,4%	8,8%	9,0%	9,1%	9,4%	9,5%	9,5%	9,3%	9,1%

A confirmação da não estacionariedade das precipitações máximas diárias no posto A, que corresponde aos dados utilizados para elaboração da equação de chuvas de São Paulo, mostra a importância em revisar esta equação devido à provável redução no nível de proteção dos sistemas de drenagem atuais.

Os projetos de macrodrenagem em São Paulo, como canais e reservatórios de amortecimento de cheias, por exemplo, geralmente são dimensionados para atender o tempo de retorno de 100 anos. Os resultados mostram um aumento de 9,5% na

precipitação equivalente a um dia para esta recorrência, de forma que essa mudança deverá afetar o nível de proteção da obra. Para uma obra hidráulica dimensionada para o tempo de retorno de 100 anos pela equação atual, ao considerar os novos valores obtidos pela análise do período entre 1933 e 2012, essa passaria a atender ao tempo de retorno de apenas 50 anos.

Tendo em vista a importância desse resultado, no item 5.4 é realizada uma análise mais detalhada sobre o impacto desta mudança na elaboração de projetos de sistemas de drenagem urbana em São Paulo.

5.3.4.2. Posto B

Assim como nos testes anteriores, o Posto B não apresentou mudanças significativas na distribuição indicando que esta série de precipitações máximas diárias é estacionária. A aplicação da distribuição GEV para os períodos entre 1888-1970, 1888-1997 e 1888-2004, conforme apresentado no Gráfico 5.39, mostra a proximidade entre as curva onde a variação máxima entre os períodos é de 5,1%.

Gráfico 5.39 - Precipitação máxima diária em função do Tempo de Retorno - Posto B

A Tabela 5.37 mostra os parâmetros estimados e a aceitação da aderência de ambas as séries apresentadas à distribuição de Gumbel com nível de significância α de 0,05.

Tabela 5.37 - Distribuição GEV - Posto B

Distribuição GEV	Período		
Posto B	1888-1970	1888-1997	1888-2004
Parâmetros estimados pelo MMV:			
Localização (μ) / erro padrão:	70,356 / 2,515	69,488 / 2,109	68,238 / 1,991
Escala (σ) / erro padrão:	19,677 / 1,867	18,903 / 1,563	18,135 / 1,497
Forma (ξ) / erro padrão:	-0,062 / 0,100	-0,035 / 0,086	0,004 / 0,089
Verossimilhança negativa:	375,8	486,2	511,0
Verificação do ajuste Tipo I – Gumbel:			
Valor p:	0,557	0,693	0,966
Hipótese 0 – Aceita Gumbel ($\alpha=0,05$):	Aceita	Aceita	Aceita

O Gráfico 5.40 mostra a variação da precipitação em função do tempo de retorno. Devido à grande extensão da série e a existência de tendências não significativas, não é possível identificar grandes alterações na precipitação máxima diária ao longo do tempo. Entre 1970 e 1997 a maior variação foi de 2,6% (TR = 1.000 anos) e entre 1997 e 2004 foi de 5,1% (TR = 1.000 anos).

Gráfico 5.40 - Variação da precipitação máxima para diferentes tempos de retorno - Posto B

A Tabela 5.38 mostra a comparação entre as precipitações obtidas para as séries até 1997 e 2004.

Tabela 5.38 - Variação da precipitação máxima diária entre 1997 e 2004 - Posto B

Período	Precipitação Máxima Diária (Intervalo de confiança de 95%) [mm]										
	Tempo de Retorno [anos]										
	2	5	10	15	20	25	50	100	200	500	1.000
1888 – 1997	71,9	91,3	103,2	109,3	113,4	116,4	124,9	132,2	138,6	145,8	150,5
	76,4	97,1	110,4	117,8	122,8	126,7	138,5	149,9	160,9	175,1	185,6
	81,1	91,3	121,3	132,3	140,5	147,2	167,5	189,4	212,8	245,7	272,2
1888 – 2004	70,6	89,8	101,9	108,2	112,4	115,6	124,6	132,5	139,6	147,8	153,2
	74,9	95,5	109,2	117,0	122,4	126,6	139,5	152,4	165,2	182,2	195,1
	79,4	89,8	120,5	132,3	141,3	148,6	171,5	196,9	224,7	265,2	195,1
Diferença	-1,9%	-1,6%	-1,1%	-0,7%	-0,4%	-0,1%	0,7%	1,7%	2,7%	4,0%	5,1%

5.3.4.3. Posto C

O Gráfico 5.41 mostra a aplicação da distribuição GEV à série observada no Posto C entre três períodos com durações diferentes, 1945 a 1970, 1945 a 1997 e 1945 a 2003.

A série do Posto C mostra uma variação entre os diferentes intervalos, principalmente, nos valores referentes a tempos de retorno acima de 200 anos. A medida que a duração da série testada aumentou, houve uma diminuição nas precipitações máximas mais extremas. O período entre 1945 e 1970 é bastante curto, com duração de 25 anos, tornando difícil estimar valores para tempos de retorno mais elevados.

A aplicação da distribuição GEV concorda com os testes anteriores que indicam que a série é estacionária.

Gráfico 5.41 - Precipitação máxima diária em função do Tempo de Retorno - Posto C

A Tabela 5.39 mostra os parâmetros estimados e a aceitação da aderência de ambas as séries apresentadas à distribuição de Gumbel com nível de significância α de 0,05.

Tabela 5.39 - Distribuição GEV - Posto C

Distribuição GEV <i>Posto A</i>	Período		
	1945-1970	1945-1997	1945-2003
Parâmetros estimados pelo MMV:			
Localização (μ) / erro padrão:	58,310 / 2,626	60,831 / 2,457	61,416 / 2,309
Escala (σ) / erro padrão:	11,902 / 2,093	15,406 / 1,897	15,333 / 1,760
Forma (ξ) / erro padrão:	0,214 / 0,155	0,115 / 0,127	0,090 / 0,117
Verossimilhança negativa:	108,7	232,2	257,4
Verificação do ajuste Tipo I – Gumbel:			
Valor p:	0,115	0,342	0,423
Hipótese 0 – Aceita Gumbel ($\alpha=0,05$):	Aceita	Aceita	Aceita

O Gráfico 5.42 mostra a variação da precipitação em função do tempo de retorno. Os períodos analisados até 1990 mostram grande variação das precipitações máximas para tempos de retorno acima de 200 anos. Entretanto, para tempos de retorno inferiores, não é possível identificar grandes alterações na precipitação máxima diária ao longo do tempo. Entre 1997 e 2003, a maior redução foi de -6,6% (TR = 1.000 anos) e o maior aumento foi de 0,8% (TR = 5 anos).

Gráfico 5.42 - Variação da precipitação máxima para diferentes tempos de retorno - Posto C

A Tabela 5.40 mostra a comparação entre as precipitações obtidas para as séries até 1997 e 2003.

Tabela 5.40 - Variação da precipitação máxima diária entre 1997 e 2003 - Posto C

Período	Precipitação Máxima Diária (Intervalo de confiança de 95%) [mm]										
	Tempo de Retorno [anos]										
	2	5	10	15	20	25	50	100	200	500	1.000
1945 – 1997	61,3	78,1	89,5	95,7	99,9	103,1	112,5	121,0	128,8	138,1	134,0
	66,6	86,0	100,4	109,0	115,3	120,4	136,6	154,2	173,1	200,4	223,1
	72,6	78,1	121,3	136,4	148,4	158,5	194,3	237,7	289,6	373,2	449,3
1945 – 2003	62,2	78,8	89,8	95,8	99,9	102,9	111,9	120,0	127,4	136,1	142,1
	67,1	86,0	99,7	107,8	113,6	118,2	133,1	148,8	165,5	189,1	208,3
	72,7	78,8	117,9	131,8	142,5	151,3	182,4	219,3	262,6	330,7	391,5
Diferença	0,8%	0,0%	-0,7%	-1,2%	-1,5%	-1,7%	-2,6%	-3,5%	-4,4%	-5,7%	-6,6%

5.3.4.4. Posto D

O Gráfico 5.43 mostra a aplicação da distribuição GEV à série observada no Posto D entre três períodos, 1943 a 1970, 1943 a 1997 e 1943 a 2003. Essa análise apresenta uma redução da precipitação ao longo do tempo, possivelmente devido aos valores mais elevados registrados antes de 1990.

Gráfico 5.43 - Precipitação máxima diária em função do Tempo de Retorno - Posto D

A Tabela 5.41 mostra os parâmetros estimados e a aceitação da aderência de ambas as séries apresentadas à distribuição de Gumbel com nível de significância α de 0,05.

Tabela 5.41 - Distribuição GEV - Posto D

Distribuição GEV	Período		
Posto A	1943-1970	1943-1997	1943-2003
Parâmetros estimados pelo MMV:			
Localização (μ) / erro padrão:	64,756 / 4,223	65,057 / 2,588	66,287 / 2,491
Escala (σ) / erro padrão:	18,135 / 3,099	16,404 / 1,875	116,703 / 1,789
Forma (ξ) / erro padrão:	0,010 / 0,167	0,001 / 0,105	-0,034 / 0,098
Verossimilhança negativa:	107,6	223,2	249,4
Verificação do ajuste Tipo I – Gumbel:			
Valor p:	0,952	0,998	0,733
Hipótese 0 – Aceita Gumbel ($\alpha=0,05$):	Aceita	Aceita	Aceita

O Gráfico 5.44 mostra a variação da precipitação em função do tempo de retorno. Observa-se que há uma redução significativa nos valores de precipitação para os tempos de retorno acima de 100 anos. Entre 1997 e 2003 a maior redução e o maior aumento foram de -5,4% (TR = 1.000 anos) e 0,5% (TR = 10 anos), respectivamente.

Gráfico 5.44 - Variação da precipitação máxima para diferentes tempos de retorno - Posto D.

A Tabela 5.42 mostra a comparação entre as precipitações obtidas para as séries até 1997 e 2003.

Tabela 5.42 - Variação da precipitação máxima diária entre 1997 e 2003 - Posto D

Período	Precipitação Máxima Diária (Intervalo de confiança de 95%) [mm]										
	Tempo de Retorno [anos]										
	2	5	10	15	20	25	50	100	200	500	1.000
1943 – 1997	65,7	82,3	92,7	98,2	101,8	104,5	112,3	119,1	125,1	131,9	136,3
	71,1	89,7	102,0	109,0	113,8	117,6	129,1	140,6	152,1	167,2	178,6
	77,1	82,3	118,3	129,9	117,0	144,8	167,1	192,0	219,4	259,5	292,7
1943 – 2003	67,2	83,9	94,0	99,3	102,8	105,4	112,7	119,0	124,5	130,6	134,5
	72,4	90,7	102,5	109,0	113,5	116,9	127,3	137,4	147,2	159,8	169,0
	78,0	83,9	113,4	127,2	134,5	140,3	159,5	180,4	202,7	234,4	260,0
Diferença	1,8%	1,2%	0,5%	0,0%	-0,3%	-0,6%	-1,4%	-2,3%	-3,2%	-4,4%	-5,4%

5.3.4.5. Posto E

O Gráfico 5.45 mostra a aplicação da distribuição GEV à série observada no Posto E entre três períodos com durações diferentes, 1925 a 1970, 1925 a 1997 e 1925 a 2012. Nesse posto houve uma grande variação entre os períodos até 1970 e até 1997 indicando o aumento da precipitação máxima diária. Ao observar o valor p obtido para o ajuste das séries à distribuição de Gumbel, nota-se que os períodos até 1997 e até 2012 possuem um ajuste muito melhor do que o período até 1970. Apesar desta variação, entre 1997 e 2012 a variação foi praticamente nula, indicando que a série é estacionária.

Gráfico 5.45 - Precipitação máxima diária em função do Tempo de Retorno - Posto C

A Tabela 5.43 mostra os parâmetros estimados e a aceitação da aderência de ambas as séries apresentadas à distribuição de Gumbel com nível de significância α de 0,05.

Tabela 5.43 - Distribuição GEV - Posto E

Distribuição GEV	Período		
Posto A	1925-1970	1925-1997	1925-2012
Parâmetros estimados pelo MMV:			
Localização (μ) / erro padrão:	61,326 / 2,441	61,808 / 2,031	62,245 / 1,836
Escala (σ) / erro padrão:	15,212 / 1,660	15,790 / 1,443	15,622 / 1,309
Forma (ξ) / erro padrão:	-0,085 / 0,074	0,009 / 0,071	0,003 / 0,067
Verossimilhança negativa:	195,1	316,9	380,8
Verificação do ajuste Tipo I – Gumbel:			
Valor p:	0,296	0,897	0,968
Hipótese 0 – Aceita Gumbel ($\alpha=0,05$):	Aceita	Aceita	Aceita

O Gráfico 5.46 mostra a variação da precipitação em função do tempo de retorno. Os períodos analisados até 1990 mostram grande variação das precipitações máximas para tempos de retorno acima de 25 anos. Após este período os resultados demonstram maior estabilidade. Entre 1997 e 2012, a variação foi muito próxima de zero, entre -1,9% e 0,5%.

Gráfico 5.46 - Variação da precipitação máxima para diferentes tempos de retorno - Posto E

A Tabela 5.44 mostra a comparação entre as precipitações obtidas para as séries até 1997 e 2012.

Tabela 5.44 - Variação da precipitação máxima diária entre 1997 e 2012 - Posto E

Período	Precipitação Máxima Diária (Intervalo de confiança de 95%) [mm]										
	Tempo de Retorno [anos]										
	2	5	10	15	20	25	50	100	200	500	1.000
1925 – 1997	63,3	79,7	90,0	95,5	99,3	102,1	110,4	118,1	125,2	133,6	139,4
	67,6	85,7	97,7	104,5	109,3	113,1	124,5	136,0	147,5	162,8	174,4
	72,2	79,7	109,4	119,5	127,0	133,1	153,2	174,1	196,7	229,4	256,3
1925 – 2012	64,1	80,3	90,5	96,0	99,7	102,5	110,7	118,2	125,2	133,4	139,1
	68,0	85,7	97,5	104,2	108,8	112,4	123,5	134,5	145,6	160,1	171,1
	72,1	80,3	107,7	117,2	124,2	129,8	148,3	168,6	189,6	219,7	244,3
Diferença	0,5%	0,1%	-0,2%	-0,4%	-0,5%	-0,6%	-0,8%	-1,1%	-1,3%	-1,6%	-1,9%

5.3.4.6. Posto F

O Gráfico 5.47 mostra a aplicação da distribuição GEV à série observada no Posto F entre três períodos com durações diferentes, 1922 a 1970, 1922 a 1997 e 1922 a 2012. A série mostra uma variação entre os diferentes intervalos onde há fortes indícios de que esta série não é estacionária, com tendência de aumento ao longo do tempo.

Gráfico 5.47 - Precipitação máxima diária em função do Tempo de Retorno - Posto F

A Tabela 5.45 mostra os parâmetros estimados e a aceitação da aderência de ambas as séries apresentadas à distribuição de Gumbel com nível de significância α de 0,05.

Tabela 5.45 - Distribuição GEV - Posto F

Distribuição GEV <i>Posto A</i>	Período		
	1922-1970	1922-1997	1922-2012
Parâmetros estimados pelo MMV:			
Localização (μ) / erro padrão:	65,170 / 2,176	64,421 / 2,091	64,692 / 2,029
Escala (σ) / erro padrão:	13,301 / 1,588	16,356 / 1,472	17,409 / 1,425
Forma (ξ) / erro padrão:	-0,219 / 0,123	-0,166 / 0,078	-0,108 / 0,069
Verossimilhança negativa:	198,4	352,2	397,9
Verificação do ajuste Tipo I – Gumbel:			
Valor p:	0,104	0,058	0,150
Hipótese 0 – Aceita Gumbel ($\alpha=0,05$):	Aceita	Aceita	Aceita

O Gráfico 5.48 mostra a variação da precipitação em função do tempo de retorno. Entre 1997 e 2012 a maior e a menor variação foi de 13,4% (TR = 1.000 anos) e 1,0% (TR = 2 anos), respectivamente.

Gráfico 5.48 - Variação da precipitação máxima para diferentes tempos de retorno - Posto F

A Tabela 5.46 mostra a comparação entre as precipitações obtidas para as séries até 1997 e 2012.

Tabela 5.46 - Variação da precipitação máxima diária entre 1997 e 2012 - Posto F

Período	Precipitação Máxima Diária (Intervalo de confiança de 95%) [mm]										
	Tempo de Retorno [anos]										
	2	5	10	15	20	25	50	100	200	500	1.000
	66,0	81,2	89,6	93,7	96,4	98,3	103,6	107,8	111,3	114,9	117,1
1922 – 1997	70,2	86,1	95,1	99,7	102,8	105,0	111,4	117,1	122,1	127,9	131,7
	74,7	81,2	103,0	109,5	114,1	117,6	127,7	137,6	147,3	159,5	168,4
	66,8	83,6	93,3	98,3	101,5	103,9	110,6	116,2	121,1	126,4	129,8
1922 – 2012	70,9	88,8	99,5	105,1	108,9	111,7	120,1	127,7	134,8	143,4	149,3
	75,3	83,6	108,0	115,7	121,3	125,7	139,4	152,4	165,6	183,0	196,1
Diferença	1,0%	3,1%	4,5%	5,4%	5,9%	6,4%	7,8%	9,1%	10,4%	12,1%	13,4%

5.4. Impacto da não estacionariedade sobre os sistemas de drenagem

Apesar de não ter sido constatada a não estacionariedade em todos os postos pluviométricos estudados, optou-se por analisar o impacto das mudanças mais extremas, que foram observadas no Posto A no período entre 1997 e 2012. Neste período, observou-se um aumento entre 7,6% e 9,5% da precipitação para diferentes tempos de retorno entre 5 e 100 anos. Além disso, foi a partir dos registros deste posto que foi elaborada a equação de chuvas que é utilizada atualmente na elaboração de estudos hidrológicos na cidade de São Paulo.

A Tabela 5.47 mostra as precipitações obtidas aplicando-se a equação de chuvas elaborada por Martinez e Magni (1999) considerando uma duração de 1.440 minutos e os tempos de recorrência 5, 10, 25, 50 e 100 anos. A partir desses valores, foram calculados os novos valores da precipitação que poderiam ser obtidos com a atualização da equação de chuvas.

Tabela 5.47 - Estimativa do aumento da precipitação com duração de 1.440 min

Tempo de Retorno [anos]	P_{MARTINEZ-MAGNI, 1999} [mm]	Porcentagem de aumento	P_{ESTIMADA, 2012} [mm]
5	87,7	7,6%	94,4
10	103,3	8,4%	112,0
25	122,9	9,1%	134,1
50	137,6	9,4%	150,5
100	152,1	9,5%	166,5

Como exemplo, observa-se que uma altura de precipitação atualmente esperada para o tempo de retorno de 100 anos (152,1 mm), que possui a probabilidade de ocorrência de 1% ao ano, passaria a representar um tempo de retorno inferior a 50 anos quando a probabilidade de ocorrência é de 2% ao ano.

Destaca-se que a precipitação de um dia pode apresentar diferenças em relação à um evento com uma duração de 1.440 minutos, e que este trabalho visa analisar os impactos do aumento da precipitação em relação aos parâmetros existentes sem abordar esta questão.

Na sequência deste trabalho são apresentadas as análises dos projetos de um sistema de microdrenagem e outro de macrodrenagem onde poderão ser mensuradas as mudanças nas vazões estimadas, no dimensionamento dos elementos dos sistemas e nos custos das obras.

5.4.1. Análise do projeto de um sistema de microdrenagem

5.4.1.1. Precipitação de Projeto

No cálculo das vazões para os tempos de retorno de 5 e 10 anos pelo Método Racional foram calculadas as intensidades de precipitação em cada nó. No cenário 2, foram considerados os aumentos de 7,6% e 8,4% da precipitação para os tempos de retorno de 5 e 10 anos respectivamente, conforme quantificado nas análises estatísticas.

5.4.1.2. Parâmetros de projeto

A capacidade de escoamento da sarjeta foi estimada em $0,113 \text{ m}^3/\text{s}$ considerando os seguintes parâmetros:

- Uma faixa transitável com 3,00 m não inundada em cada sentido;
- $w_1 = w_2 = 24$;
- $w_3 = 50$;
- $n = 0,015$;
- $I = 0,0200 \text{ m/m} = 2,0\%$;
- Fator de Redução (FR) = 0,80.

A capacidade de escoamento de cada boca de lobo foi estimada em $0,040 \text{ m}^3/\text{s.m}$ ou 40 L/s.m .

As capacidades máximas de escoamento nas tubulações calculadas e as respectivas declividades consideradas são mostradas na Tabela 5.48.

Tabela 5.48 - Capacidade máxima de escoamento nas tubulações

D [m]	I [m/m]	Q_{máxima} [m ³ /s]
0,60	0,0100	0,47
0,80	0,0100	1,01
1,00	0,0100	1,83
1,20	0,0080	2,67
1,50	0,0080	4,83

5.4.1.3. Cálculo de vazões e dimensionamento hidráulico

A Tabela 5.49 mostra o dimensionamento do sistema de microdrenagem para o tempo de retorno de 5 anos para os dois cenários. No cenário 2 há um aumento no número de trechos com tubulações de 1,00 m e 1,20 m de diâmetro.

Tabela 5.49 - Dimensionamento hidráulico das tubulações para TR 5 anos

TRECHO		A [km ²]	Q ₁ [m ³ /s]	D ₁ [m]	Q ₂ [m ³ /s]	D ₂ [m]
1	A-B	0,012	0,245	0,80	0,264	0,80
2	B-C	0,024	0,469	0,80	0,505	0,80
3	C-D	0,036	0,674	0,80	0,726	0,80
4	D-E	0,049	0,864	0,80	0,929	0,80
5	E-F	0,061	1,039	0,80	1,117	1,00
6	F-G	0,073	1,201	1,00	1,292	1,00
7	G-H	0,085	1,352	1,00	1,455	1,00
8	H-I	0,097	1,493	1,00	1,606	1,00
9	I-J	0,109	1,625	1,00	1,748	1,00
10	J-K	0,134	1,748	1,00	1,881	1,20
11	K-L	0,146	1,865	1,20	2,006	1,20
12	L-M	0,158	1,974		2,124	

Na Tabela 5.50 é apresentado o dimensionamento do sistema de microdrenagem para o tempo de retorno de 10 anos para os dois cenários. Neste caso, no cenário 2 há um aumento ainda maior no número de trechos com diâmetros maiores.

Tabela 5.50 - Dimensionamento hidráulico das tubulações para TR 10 anos

TRECHO		A [km ²]	Q ₁ [m ³ /s]	D ₁ [m]	Q ₂ [m ³ /s]	D ₂ [m]
1	A-B	0,012	0,330	0,80	0,358	0,80
2	B-C	0,024	0,632	0,80	0,685	0,80
3	C-D	0,036	0,909	0,80	0,985	0,80
4	D-E	0,049	1,164	1,00	1,262	1,00
5	E-F	0,061	1,400	1,00	1,518	1,00
6	F-G	0,073	1,619	1,00	1,755	1,00
7	G-H	0,085	1,823	1,00	1,976	1,20
8	H-I	0,097	2,013	1,20	2,183	1,20
9	I-J	0,109	2,192	1,20	2,376	1,20
10	J-K	0,134	2,359	1,20	2,557	1,20
11	K-L	0,146	2,516	1,20	2,728	1,50
12	L-M	0,158	2,665		2,889	

O aumento no diâmetro das tubulações não gera apenas um aumento nos custos com os tubos, mas também com volumes de escavação, escoramento, reaterro e materiais para a fundação. Além disso, há também o aumento no número de captações como bocas-de-lobo e até mesmo das dimensões de poços de visita. Quanto maior for a área impermeável da bacia e maior o tempo de retorno, maior será a diferença entre o dimensionamento do projeto para os dois cenários.

5.4.1.4. Orçamento das obras

Ao elaborar o orçamento para execução das obras do projeto de microdrenagem para o tempo de retorno de 5 anos, constatou-se que ao elevar precipitação de projeto em 7,6%, houve um aumento de 6,1% nos custos da obra conforme mostrado na Tabela 5.51. No caso do projeto para o tempo de retorno de 10 anos, com o aumento de 8,4% da precipitação, a diferença do custo entre os dois cenários foi de 10,8% conforme mostrado na Tabela 5.52.

Tabela 5.51 - Resumo dos custos da obra de microdrenagem para TR 5 anos

Descrição	Cenário 1 [R\$]	Cenário 2 [R\$]
1. Movimento de Terra:	159.595,22	167.252,25
2. Estruturas:	931.988,04	990.378,43
Total da Obra:	1.091.583,27	1.157.630,68
3. Canteiro de Obras:	38.205,41	40.517,07
Total da Obra sem BDI:	1.129.788,68	1.198.147,75
BDI (37,3%):	421.411,18	446.909,11
Total da Obra com BDI:	1.551.199,86	1.645.056,86

Tabela 5.52 - Resumo dos custos da obra de microdrenagem para TR 10 anos

Descrição	Cenário 1 [R\$]	Cenário 2 [R\$]
1. Movimento de Terra:	178.561,52	190.410,72
2. Estruturas:	1.071.983,09	1.195.405,88
Total da Obra:	1.250.544,61	1.385.816,60
3. Canteiro de Obras:	43.769,06	48.503,58
Total da Obra sem BDI:	1.294.313,67	1.434.320,18
BDI (37,3%):	482.779,00	535.001,43
Total da Obra com BDI:	1.777.092,67	1.969.321,61

No Apêndice D são apresentadas as planilhas de orçamento completas elaboradas nesse estudo.

5.4.2. Análise do projeto de um sistema de macrodrenagem

5.4.2.1. Precipitação de Projeto

O Gráfico 5.49 e a Tabela 5.53 mostram os ietogramas obtidos para as chuvas simuladas utilizando a distribuição de Huff, 1º quartil. Em azul estão mostradas as precipitações obtidas pela equação de chuvas atual e em vermelho as precipitações acrescidas de um percentual de 9,5%.

Gráfico 5.49 - Ietogramas de projeto

Tabela 5.53 - Ietograma de projeto

Tempo [min]	Precipitação pela Equação de Chuvas [mm]				Precipitação estimada com 11,5% [mm]			
	10 anos	25 anos	50 anos	100 anos	10 anos	25 anos	50 anos	100 anos
10	9,55	11,24	12,50	13,74	11,45	13,48	14,98	16,48
20	19,79	23,30	25,90	28,49	23,73	27,94	31,06	34,16
30	15,02	17,68	19,66	21,62	18,01	21,20	23,57	25,92
40	8,39	9,87	10,98	12,07	10,06	11,84	13,16	14,47
50	5,13	6,04	6,72	7,39	6,15	7,24	8,05	8,86
60	3,83	4,51	5,01	5,51	4,59	5,41	6,01	6,61
70	3,32	3,91	4,35	4,78	3,98	4,69	5,21	5,73
80	2,02	2,38	2,64	2,91	2,42	2,85	3,17	3,48
90	1,74	2,04	2,27	2,50	2,08	2,45	2,72	3,00
100	1,74	2,04	2,27	2,50	2,08	2,45	2,72	3,00
110	1,17	1,38	1,53	1,68	1,40	1,65	1,84	2,02
120	0,57	0,67	0,74	0,81	0,68	0,80	0,89	0,98
Total	72,2	85,1	94,6	104,0	79,1	93,1	103,5	113,9

5.4.2.2. Parâmetros para simulação hidrológica

A bacia hidrográfica estudada foi subdividida em 17 sub-bacias tendo em vista a necessidade de determinar as vazões de projeto em diferentes pontos da bacia para verificação e dimensionamento do sistema de macrodrenagem. A Tabela 5.54 mostra os parâmetros hidrológicos utilizados na simulação.

Tabela 5.54 - Parâmetros para simulação hidrológica

Sub-bacia	Área [km ²]	CN	L _{talvegue} [m]	t _c [min]
1	0,407	86	950	17,9
2	0,407	86	1271	20,6
3	0,839	86	2198	28,3
4	0,152	86	900	17,5
5	0,203	86	979	18,2
6	0,367	86	797	16,6
7	0,019	86	188	11,6
8	0,104	86	734	16,1
9	0,119	86	628	15,2
10	0,251	86	934	17,8
11	0,374	86	1037	18,6
12	0,157	86	780	16,5
13	0,281	86	795	16,6
14	0,192	86	640	15,3
15	0,414	86	1221	20,2
16	0,350	86	974	18,1
17	0,080	86	431	13,6
A_{Total} =	4,716			

A Figura 5.1 mostra a topologia da bacia utilizada na simulação hidrológica contendo as suas subdivisões e os nós de cálculo de vazões. Destaca-se que o trecho do projeto analisado neste trabalho está localizado entre os nós 21 e 22.

Figura 5.1 - Planta de topologia da bacia hidrográfica para simulação hidrológica

Base cartográfica: Mapa Digital da Cidade (MDC, 2014)
Elaboração do mapa: Coelho (2014)

5.4.2.3. Resultados da simulação hidrológica

Os resultados das simulações hidrológicas mostraram que o aumento em 9,5% da precipitação de projeto acarretaram no aumento entre 27,5% e 36,8% das vazões simuladas.

Este aumento significativo se justifica devido ao método de transformação chuva-vazão que foi utilizado, o SCS. Como o método considera uma parcela de perdas por infiltração no início da simulação, o acréscimo de 9,5% na precipitação total representou um aumento entre 27,5% e 36,8% da precipitação efetiva. Os resultados também indicam que quanto menor é a bacia e tempo de retorno avaliado, maior é a influência do aumento da precipitação sobre as vazões resultantes.

Neste projeto de canalização a vazão de projeto utilizada no seu dimensionamento corresponde ao nó 22 onde foram obtidos os valores para os dois cenários simulados conforme mostrado na Tabela 5.55.

Tabela 5.55 - Vazões de pico no nó 22 para os cenários simulados e diferenças percentuais

Tempo de Retorno [anos]	Vazão de pico [m ³ /s]		
	Cenário1	Cenário2	Diferença
10	42,3	55,9	32,2%
25	54,4	70,9	30,3%
50	63,6	82,2	29,2%
100	72,9	93,6	28,4%

A Tabela 5.56 mostra todas as vazões de pico resultantes da simulação hidrológica assim como as diferenças percentuais entre os dois cenários.

Tabela 5.56 - Vazões de pico (m³/s) para os cenários simulados e diferenças percentuais

Nó de simulação	TR = 10 anos			TR = 25 anos			TR = 50 anos			TR = 100 anos		
	1	2	%	1	2	%	1	2	%	1	2	%
1	5,0	6,6	32,0%	6,5	8,4	29,2%	7,6	9,8	28,9%	8,7	11,2	28,7%
2	9,3	12,6	35,5%	12,2	16,2	32,8%	14,4	19,0	31,9%	16,7	21,7	29,9%
3	8,9	11,8	32,6%	11,4	15,2	33,3%	13,6	17,9	31,6%	15,7	20,6	31,2%
4	18,0	24,4	35,6%	23,6	31,5	33,5%	28,0	36,8	31,4%	32,4	42,3	30,6%
5	19,6	26,4	34,7%	25,6	34,1	33,2%	30,4	40,1	31,9%	35,2	46,0	30,7%
6	22,0	29,1	32,3%	28,3	37,6	32,9%	33,4	44,2	32,3%	38,8	50,8	30,9%
7	23,6	31,2	32,2%	30,3	39,6	30,7%	35,5	45,9	29,3%	40,7	52,3	28,5%
8	4,6	6,0	30,4%	5,9	7,6	28,8%	6,9	8,8	27,5%	7,8	10,1	29,5%
9	4,8	6,3	31,3%	6,2	8,0	29,0%	7,2	9,3	29,2%	8,2	10,7	30,5%

Tabela 5.56 - Vazões de pico (m^3/s) para os cenários simulados e diferenças percentuais (continuação)

Nó de simulação	TR = 10 anos			TR = 25 anos			TR = 50 anos			TR = 100 anos		
	1	2	%	1	2	%	1	2	%	1	2	%
10	27,3	36,1	32,2%	35,1	46,2	31,6%	41,1	54,2	31,9%	47,6	62,4	31,1%
11	28,8	38,4	33,3%	37,3	49,1	31,6%	43,9	57,1	30,1%	50,5	65,2	29,1%
12	3,1	4,1	32,3%	4,0	5,2	30,0%	4,7	6,0	27,7%	5,4	6,9	27,8%
13	31,3	41,7	33,2%	40,5	53,1	31,1%	47,5	61,8	30,1%	54,6	70,5	29,1%
14	32,9	43,4	31,9%	42,2	55,9	32,5%	49,8	65,5	31,5%	57,6	75,1	30,4%
15	1,9	2,6	36,8%	2,5	3,3	32,0%	2,9	3,8	31,0%	3,3	4,3	30,3%
16	34,0	45,4	33,5%	44,1	58,4	32,4%	52,1	68,3	31,1%	60,1	78,3	30,3%
17	36,7	48,5	32,2%	47,2	61,6	30,5%	55,2	71,4	29,3%	63,3	81,3	28,4%
18	38,1	50,6	32,8%	49,2	64,4	30,9%	57,7	74,9	29,8%	66,3	85,4	28,8%
19	39,5	52,1	31,9%	50,7	66,0	30,2%	59,2	76,8	29,7%	67,8	87,9	29,6%
20	4,3	5,7	32,6%	5,5	7,2	30,9%	6,5	8,4	29,2%	7,4	9,6	29,7%
21	41,6	54,7	31,5%	53,2	69,9	31,4%	62,5	81,5	30,4%	71,9	93,2	29,6%
22	42,3	55,9	32,2%	54,4	70,9	30,3%	63,6	82,2	29,2%	72,9	93,6	28,4%

5.4.2.4. Dimensionamento hidráulico

O trecho de canalização analisado foi dimensionado para atender as vazões de projeto obtidas no nó 22 para o tempo de retorno de 100 anos. Durante os dois dimensionamentos, buscou-se alterar apenas a largura do canal mantendo os outros parâmetros como altura, declividade e o coeficiente de rugosidade.

No projeto inicial, elaborado a partir da vazão obtida no cenário 1, o trecho de canalização foi concebido em concreto com geometria retangular, largura de 6,00 m, altura de 3,00 m e declividade de 0,0035 m/m. A Tabela 5.57 resume as características do canal e a Tabela 5.58 os resultados da verificação hidráulica.

Tabela 5.57 - Dimensionamento do canal para o cenário 1

Largura [m]	Altura [m]	n Manning	Declividade [m/m]	$Q_{\text{admissível}}$ [m^3/s]
6,00	3,00	0,018	0,0035	77,5

Tabela 5.58 - Verificação hidráulica do canal para o cenário 1

Tempo de Retorno [anos]	Q_{pico} [m ³ /s]	Nível d'Água [m]	Velocidade [m/s]	Área molhada [m ²]	Borda Livre [m]
10	42,3	1,93	3,7	11,6	1,07
25	54,4	2,31	3,9	13,9	0,69
50	63,6	2,59	4,1	15,5	0,41
100	72,9	2,87	4,2	17,2	0,13

No cenário 2, a largura do canal aumentou para 7,25 m ao manter a mesma borda livre em relação ao cenário 1 assim como as demais características como resumido na Tabela 5.59. A Tabela 5.60 mostra a verificação hidráulica do canal para o cenário 2.

Tabela 5.59 - Dimensionamento do canal para o cenário 2

Largura [m]	Altura [m]	n Manning	Declividade [m/m]	$Q_{\text{admissível}}$ [m ³ /s]
7,25	3,00	0,018	0,0035	103,9

Tabela 5.60 - Verificação hidráulica do canal para o cenário 2

Tempo de Retorno [anos]	Q_{pico} [m ³ /s]	Nível d'Água [m]	Velocidade [m/s]	Área molhada [m ²]	Borda Livre [m]
10	55,9	1,99	3,9	14,4	1,01
25	70,9	2,35	4,2	17,0	0,65
50	82,2	2,61	4,3	18,9	0,39
100	93,6	2,87	4,5	20,8	0,13

5.4.2.5. Estimativa de custos

A partir do dimensionamento hidráulico do canal juntamente com as características do projeto de geotecnia, fundações e estrutura conforme mostrado na Figura 5.2, foi elaborado o orçamento das obras com o intuito de avaliar a diferença nos custos. O orçamento foi elaborado considerando os trabalhos de limpeza do terreno, movimento de terra, materiais e canteiro de obras. Neste orçamento não foram considerados os custos com demolições e desapropriações que podem variar muito de acordo com o projeto e os custos com o Acompanhamento Técnico da Obra (A.T.O.) e elaboração do projeto executivo.

Figura 5.2 - Seção típica do projeto do canal

Os dois orçamentos elaborados mostraram uma diferença de aproximadamente 7,7% nos custos das obras conforme resumido na Tabela 5.61. As planilhas dos orçamentos completos são apresentadas no Apêndice E.

Tabela 5.61 - Resumo dos custos da canalização

Descrição	Cenário 1 [R\$]	Cenário 2 [R\$]
1. Serviços Preliminares:	15.666,35	17.675,28
2. Movimento de Terra:	383.364,23	424.373,91
3. Estruturas de Concreto, Fundações e Materiais:	1.422.615,79	1.520.866,09
Total da Obra:	1.822.146,37	1.962.915,27
4. Canteiro de Obras:	54.664,39	58.887,46
Total da Obra sem BDI:	1.876.810,76	2.021.802,73
BDI (37,3%):	700.050,41	754.132,42
Total da Obra com BDI:	2.576.861,17	2.775.935,15

A análise de custos realizada mostra o impacto do aumento entre 7,6% e 9,5% da precipitação de projeto sobre os custos de obras de infraestrutura de drenagem urbana, entre 6% e 11%, que são valores significativos para o orçamento de um município como São Paulo. Deve-se destacar que em uma metrópole como essa, ainda há diversas regiões que sofrem com a carência e/ou ausência de infraestrutura de drenagem, tornando difícil pensar em adaptar os sistemas existentes ao considerar o aumento das vazões de cheia e buscar a manutenção do nível de proteção do sistema atual. Entretanto, devido à proporção da influência das áreas urbanizadas sobre a hidrologia e ao potencial de danos que podem ser

causados pelas inundações, é justificável buscar métodos que representem as chuvas críticas com maior eficiência. Portanto, surge o desafio de conciliar a adaptação dos sistemas existentes, ao mesmo tempo em que se trabalha para alcançar a universalização dos serviços de drenagem urbana para a população.

6. CONCLUSÕES

A análise estatística realizada mostrou que a precipitação total anual possui um comportamento não estacionário em três dos seis postos pluviométricos estudados com a constatação do aumento da média e da variância ao longo do tempo. Do ponto de vista do gerenciamento de sistemas de recursos hídricos, tais como reservatórios para abastecimento e geração de energia, o aumento da variabilidade implicaria no aumento de ocorrência de valores mais extremos (mínimos e máximos) e poderia gerar a necessidade de reservar maiores volumes de água para o atendimento de uma mesma demanda. Por outro lado, durante os períodos chuvosos, os reservatórios que possuísem volumes de espera para o controle de cheias em grandes bacias também precisariam avaliar a necessidade de adaptações das regras de operação para lidar com a não estacionariedade da precipitação.

Ao analisar a precipitação máxima diária anual, dois postos apresentaram aumentos significativos entre os anos de 1997 e 2012. O aumento entre 7,6% e 9,5% da precipitação total pode acarretar no aumento entre 28% e 32% do escoamento superficial para tempos de retorno entre 10 e 100 anos. Além disso, o aumento do custo de obras de sistemas microdrenagem pode variar entre 6% e 11%, enquanto no caso de canais de macrodrenagem esta variação manteve-se em torno de 7,7%. Estes resultados demonstram os impactos da não estacionariedade sobre o escoamento superficial, dimensionamento de sistemas de drenagem e custos de obras que poderão servir como subsídio para o planejamento e tomada de decisões.

A partir dos resultados obtidos, embora tenham sido constatadas e quantificadas algumas tendências de aumento da precipitação, não é possível afirmar que esse fenômeno possui um comportamento não estacionário em toda a área de influência dos postos estudados tendo em vista que houve um maior número de casos em que as tendências não foram confirmadas.

Ao escolher uma curva idf existente ou uma série de precipitação para a elaboração de um projeto de engenharia, deve-se atentar para a origem dos dados tendo em vista a possibilidade da série possuir alguma tendência ou mudança que caracterize um comportamento não estacionário. Este tipo de comportamento pode variar em função da duração da série de dados e afetar significativamente os resultados obtidos. Portanto, recomenda-se a aplicação de análises para a

verificação da sua estacionariedade visando a redução dos riscos de falha da obra projetada.

Por fim, visando à continuidade do estudo dessa problemática e busca de novas soluções, sugere-se que seja realizada uma análise dos eventos chuvosos significativos registrados pela rede telemétrica existente com o objetivo de identificar padrões das precipitações para então obter distribuições temporais e espaciais mais adaptadas às diferentes regiões de São Paulo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGUILAR, E. *et al.* Changes in precipitation and temperature extremes in Central America and northern South America, 1961-2003. **Journal of geophysical Research**, v. 110, D23107, 2005.
- ALEXANDER, L. V. *et al.* Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation. **J. Geophys. Res.**, v. 111, D05109, 2006.
- ALLEN, M. R. e INGRAM, W. J. Constraints on future changes in climate and the hydrologic cycle. **Nature**, n. 419, p. 224-232, 2002.
- ANDREAE, M. O. Climatic effects of changing atmospheric aerosol levels. In: HENDERSONS-SELLERS, A. (Ed.). **Future climates of the world: a modeling perspective**. Amsterdam, Holanda: Elsevier, v. 16, p. 347-398, 1995.
- Bancos de Dados. Séries Estatísticas. Série: CD79 – População dos municípios das capitais (população presente e residente). Disponível em: <http://seriesestatisticas.ibge.gov.br/series.aspx?vcodigo=CD79&t=populacao-municipios-capitais-populacao-presente-residente>. Acesso em 8 de outubro de 2012.
- BELL, T. L.; ROSENFELD, D.; KIM, K. -M.; YOO, J. -M.; LEE, M. -I. e HAHNENBERGER, M. Midweek increase in U.S. summer rain and storm heights suggests air pollution invigorates rainstorms. **J. Geophys. Res.**, v. 113, D02209, 2008.
- BERTONI, J. C. e TUCCI, C. E. M. **Precipitação**. In: TUCCI, Carlos E. M. *et al.* **Hidrologia: ciência e aplicação**. Porto Alegre: UFRGS/ABRH, 4ª Ed., 2007.
- BORNSTEIN, R. D. e LIN, Q. Urban heat islands and summertime convective thunderstorms in Atlanta: Three case studies. **Atmos. Environ.**, v. 34, p. 507-516, 2000.
- BORNSTEIN, R. e LEROY, M. Urban barrier effects on convective and frontal thunderstorms. In: FOURTH CONFERENCE ON MESOSCALE PROCESSES, 25 a 29 de junho de 1990. Boulder, CO, E.U.A. **Resumo expandido**. Boulder: American Meteorological Society, 1990. p. 120-121.
- CANHOLI, A. P. **Drenagem urbana e controle de enchentes**. São Paulo: Oficina de Textos, 2005.
- CETESB. **Drenagem urbana: manual de projeto**. São Paulo: CETESB, 3ª Ed., 1986. 464 p.
- CHANGNON, S. **METROMEX: a review and summary**. Boston, MA, EUA: American Meteorological Society, v. 18, 1981. 181 p. (Meteor. Mono-graphics)
- CHEN, T. -C.; WANG, S. -Y. e YEN, M. -C. Enhancement of afternoon thunderstorm activity by urbanization in a valley: Taipei. **J. Appl. Meteor. Climatol.**, v. 46, p. 1324-1340, 2007.

- CHEVALLIER, P. **Aquisição e Processamento de Dados**. In: TUCCI, Carlos E. M. *et al.* **Hidrologia: ciência e aplicação**. Porto Alegre: UFRGS/ABRH, 4ª ed., 2007.
- CHOW, V. T.; MAIDMENT, D. R. e MAYS, L. W. **Applied Hydrology**. New York: McGraw Hill, 1988.
- DENMAN, K. L. *et al.* **Couplings between Changes in the Climate System and Biogeochemistry**. In: SOLOMON, S. *et al.* (Eds.). **Climate Change 2007: The Physical Science Basis**. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, Inglaterra e Nova Iorque, NY, EUA: Cambridge University Press, 2007.
- DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA DO ESTADO DE SÃO PAULO (DAEE/SP). **Revisão do Plano Diretor de Macrodrenagem da Bacia do Alto Tietê**. São Paulo: DAEE, Março de 2010. Relatório Síntese.
- DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA DO ESTADO DE SÃO PAULO (DAEE/SP). **Plano Diretor de Macrodrenagem da Bacia do Alto Tietê**. São Paulo: DAEE, Dezembro de 1998.
- DIAS, P. L. S. **Humid tropics characteristics and climate**. In: MAKSIMOVIC, C. e TUCCI, C. E. M. (Eds.). **Urban drainage in specific climates: Urban drainage in humid tropics**. Paris: UNESCO, n. 40, v. 1, 2001. 227 p.
- DIEM, J. E. e BROWN, D. P. Anthropogenic impacts on summer precipitation in central Arizona, U.S.A. **Professional Geogr.**, v. 55, p. 343-355, 2003.
- DIXON, P. G. e MOTE, T. L. Patterns and causes of Atlanta's urban heat island.-initiated precipitation. **J. Appl. Meteor.**, v. 42, p. 1273-1284, 2003.
- DONAT, M. G. *et al.* Changes in extreme temperature and precipitation in the Arab region: long-term trends and variability related to ENSO and NAO. **International Journal of Climatology**, 2013.
- DUFEK, A.S. e AMBRIZZI, T. Precipitation variability in Sao Paulo State, Brazil. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 93 (3-4), p. 167-178, 2008.
- FORSTER, P. *et al.* **Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing**. In: SOLOMON, S. *et al.* (Eds.). **Climate Change 2007: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Cambridge, Inglaterra e Nova Iorque, NY, EUA: Cambridge University Press, 2007.
- FOWLER, H.J. e KILSBY, C.G. A regional frequency analysis of United Kingdom extreme rainfall from 1961 to 2000. **International Journal of Climatology**, v. 23, n. 11, p. 1313-1334, 2003.
- GALLANT, A. J. E.; HENNESSY, K. J. e RISBEY, J. Trends in rainfall for six Australian regions: 1910-2005. **Australian Meteorological Magazine**, v. 56, n. 4, p. 223-239, 2007.

- GARCÍA, J., GALLEG0, M.C.; SERRANO, A. e VAQUERO, J. Trends in block-seasonal extreme rainfall over the Iberian Peninsula in the second half of the twentieth century. **Journal of Climate**, v. 20, n. 1, p. 113-130, 2007.
- GEOPORTAL. Disponível em: <<http://www.geoportal.com.br>>. Acesso em 27 de dezembro de 2013.
- GILLELAND, E. e KATZ, R. W. New Software to Analyze How Extremes Change Over Time. **EOS**, v. 92, n. 2, p. 13-20, 11 de janeiro de 2011.
- GILLELAND, E. *extRemes: Extreme Value Analysis*. Publicado em 3 de junho de 2014. Disponível em: <<http://cran.r-project.org/web/packages/extRemes/index.html>>. Acesso de 19 de junho de 2014.
- GIVATI, A. e ROSENFELD, D. Quantifying Precipitation Suppression Due to Air Pollution. **Journal of Applied Meteorology**, v. 43, p. 1038-1056, 2004.
- GRIMM, A. M. e TEDESCHI, R. G. ENSO and Extreme Rainfall Events in South America. **Journal of Climate**, v. 22, p. 1589-1609, 2009.
- GRIMM, A. M. Interannual climate variability in South America: impacts on seasonal precipitation, extreme events, and possible effects of climate change. **Stoch. Environ. Res. Risk Assess**, v. 25, p. 537-554, 2011.
- GRIMM, A. M.; BARROS, V. R. e DOYLE, M. E. Climate Variability in Southern South America Associated with El Niño and La Niña Events. **Journal of Climate**, v. 13, n. 1, p. 35-58, 2000.
- GROISMAN, P. Y.; KNIGHT, R. W.; KARL, T. R. Changes in Intense Precipitation over the Central United States. **Journal of Hydrometeorology**, v. 13, p. 43-66, 2012.
- GROISMAN, P. Y.; KNIGHT, R. W.; KARL, T. R.; EASTERLING, D. R. SUN, B. e LAWRIMORE, J. H. Contemporary Changes of the Hydrological Cycle over the Contiguous United States: Trends Derived from In Situ Observations. **Journal of Hydrometeorology**, v. 5, p. 64-84, 2004.
- HANLEY, D. E.; BOURASSA, M. A., O'BRIEN, J. J.; SMITH, S. R. e SPADE, E. R. A Quantitative Evaluation of ENSO Indices. **Journal of Climate**, v. 16, n. 8, p. 1249-1258, 2003.
- HAYLOCK *et al.* Trends in Total and Extreme South American Rainfall in 1960-2000 and Links with Sea Surface Temperature. **Journal of Climate**, v. 19, p. 1490-1512, 2006.
- HAYLOCK, M.R. e GOODESS, C.M. Interannual variability of European extreme winter rainfall and links with mean large-scale circulation. **International Journal of Climatology**, v. 24, n. 6, p. 759-776, 2004.
- HE, J. F.; LIU, J. Y.; ZHUANG, D. F.; ZHANG, W. e LIU, M. L. Assessing the effect of land use/land cover change on the change of urban heat island intensity. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 90, p. 217-226, 2007.

- HIPES, K. W. e MCLEOD, A. I. Time Series Modelling of Water Resources and Environmental Systems. 2005. Disponível em: <<http://www.stats.uwo.ca/faculty/aim/1994Book/>>. Acesso de 19 de junho de 2014.
- HUFF, F. A. Rainfall Frequency Atlas of the United States. **Water Resources Research**, v. 3, p. 1007-1019, 1967.
- HUFF, F. A. **Time Distributions of Heavy Rainstorms in Illinois**. Illinois: Department of Energy and Natural Resources, Circular 173, 1990.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. Bancos de Dados. Séries Estatísticas. Série: CD79 – População dos municípios das capitais (população presente e residente). Disponível em: <<http://seriesestatisticas.ibge.gov.br/series.aspx?vcodigo=CD79&t=populacao-municipios-capitais-populacao-presente-residente>>. Acesso em 8 de outubro de 2012.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. Geociências. Mapeamento das Unidades Territoriais. Produtos. Malha Municipal Digital 2007. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/default_prod.shtm#TERRIT>. Acesso em 21 de agosto de 2011.
- IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change. Organization. Disponível em: <<http://www.ipcc.ch>>. Acesso em 14 de janeiro de 2013a.
- IPCC. **Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. [HOUGHTON, J. T.; DING, Y.; GRIGGS, D. J.; NOGUER, M.; VAN DER LINDEN, P.J.; DAI, X.; MASKELL, K. e JOHNSON, C. A. (Eds.)]. Cambridge, United Kingdom e New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2001. 881p.
- IPCC. **Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. [SOLOMON, D.; QIN, D.; MANNING, D.; CHEN, Z.; MARQUIS, M.; AVERYT, K. B.; TIGNOR, M. e MILLER, H. L. (Eds.)]. Cambridge, Inglaterra e Nova Iorque, NY, E.U.A.: Cambridge University Press, 2007. 996 p.
- IPCC. **Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. [STOCKER, T. F.; QIN, D.; PLATTNER, G.-K.; TIGNOR, M.; ALLEN, S.K.; BOSCHUNG, J.; NAUELS, A.; XIA, Y.; BEX, V.; e MIDGLEY, P. M. (Eds.)]. Cambridge, Inglaterra e Nova Iorque, NY, EUA: Cambridge University Press, 2013b. 1535 pp.
- IPCC. **Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation**. A Special Report of Working Group I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change. FIELDS, C. B. *et al.* (Eds.). Cambridge, Inglaterra e Nova Iorque, NY, E.U.A.: Cambridge University Press, 2012. 582 p.

- JAIN, S. e LALL, U. Floods in a changing climate: Does the past represent the future? **Water Resources Research**, v. 37; n. 12; p. 3193-3205, 2001.
- JAUREGUI, E. e ROMALES, E. Urban effects on convective precipitation in Mexico City. **Atmospheric Environment**, v. 30, n. 20, p. 3383-3389, 1996.
- JENKINSON, A. F. The frequency distribution of the annual maximum (or minimum) values of meteorological elements. *Quartely Journal of the Royal Meteorological Society*, v. 81, n. 348, p. 158-171, 1955.
- JIRAK, I. L. e COTTON, W. R. Effect of Air Pollution on Precipitation along the Front Range of the Rocky Mountains. **Journal of Applied Meteorology and Climatology**, v. 45, p. 236-245, 2005.
- KAUFMAN, Y. J. e FRASER, R. S. The Effect of Smoke Particles on Clouds and Climate Forcing. **Science**, v. 277, n. 5332, p. 1636-1638, 1997.
- KENDALL, M. G. **Rank Correlation Methods**. Londres: Charles Griffin, 1975.
- KING, A. D.; ALEXANDER, L. V. e DONAT, M. G. The efficacy of using gridded data to examine extreme rainfall characteristics: a case study for Australia. **International Journal of Climatology**, v. 33, p. 2376-2387, 2013.
- KLEIN TANK, A.M.G. e KÖNNEN, G.P. Trends in indices of daily temperature and precipitation extremes in Europe, 1946-1999. **Journal of Climate**, v. 16, n. 22, p. 3665-3680, 2003.
- KRUGER, A. C. Observed trends in daily precipitation indices in South Africa: 1910 - 2004. **International Journal of Climatology**, v. 26, p. 2275-2285, 2006.
- LE TREUT, H. *et al.* **Historical Overview of Climate Change**. In: SOLOMON, S. *et al.* (Eds.). **Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Cambridge, UK e New York, NY: Cambridge University Press, p. 235-336, 2007.
- MANN, H.B. e WHITNEY, D. R. On a test of whether one of two random variables is stochastically larger than the other. **Ann. Math. Statist.**, v. 18, p. 50-60, 1947.
- MANN, H.B. Nonparametric tests against trend. **Econometrica**, v. 13, n. 3, p. 245-259, 1945.
- MAPA DIGITAL DA CIDADE (MDC). Disponível em: < http://www.prefeitura.sp.gov.br/cidade/secretarias/desenvolvimento_urbano/dados_estatisticos/>. Acesso em 16 de janeiro de 2014.
- MARAUN, D.; OSBORN, T. J. e GILLET, N.P. United Kingdom daily precipitation intensity: improved early data, error estimates and an update from 2000 to 2006. **International Journal of Climatology**, v. 28, n. 6, p. 833-842; 2008.
- MARCIOTTO, E. R. **Estudo da Influência de um Dossel Urbano sobre o Balanço de Energia na Superfície e Implicações na Estrutura Vertical da Camada**

Limite Atmosférica. São Paulo: Universidade de São Paulo, 2008. Tese de Doutorado.

MARENGO, J. A.; RUSTICUCCI, M.; PENALBA, O. e RENOM, M. An intercomparison of observed and simulated extreme rainfall and temperature events during the last half of the twentieth century: part 2: historical trends. **Climate Change**, v. 98, p. 509-529, 2010.

MARSH, W. M. **Earthscape: A Physical Geography.** New York: John Wiley and Sons, 1987.

MARTINEZ JR., F. e MAGNI, N. L. **Equações de Chuvas Intensas do Estado de São Paulo.** São Paulo: Convênio Departamento de Águas e Energia elétrica e Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Edição Revisada, Outubro de 1999.

MAYS, Larry W. **Water resources engineering.** Wiley, 2005.

MCCUEN, R. H. **Modeling hydrologic change: statistical methods.** New York: CRC Press, 2002. ISBN 1-56670-600-9

MCLEOD, A. I. **Kendall rank correlation and Mann-Kendall trend test.** Publicado em 18 de maio de 2011. Disponível em <<http://cran.r-project.org/web/packages/Kendall/index.html>>. Acesso em 19 de junho de 2014.

MCPHADEN, M. J. El Niño and La Niña: causes and global consequences. **Encyclopedia of Global Environmental Change.** Anonymous John Wiley and Sons, LTD, v. 1, p. 353-370, 2002.

MEEHL, G. A.; ARBLASTER, J. M. e TEBALDI, C. Understanding future patterns of increased precipitation intensity in climate model simulations. **Geophysical Research Letters**, v. 32, L18719, 2005.

MERO, F.; SALEMI FILHO, A.; MAGNI, N. L. G. e PAGNOCCHESCHI, B. **Análise das precipitações intensas na cidade de São Paulo.** São Paulo: Centro Tecnológico de Hidráulica, Comunicação Técnica, n. 7, 1979.98 p

MILLY, P. C. D.; BETANCOURT, J.; FALKENMARK, M.; HIRSCH, R. M.; KUNDZEWICZ, Z. W.; LETTENMAIER, D. P. e STOUFFER, R. J. Stationarity is Dead: Whither Water Management? **Science**, v. 319, 1º de fevereiro de 2008.

MINUZZI, R. B.; SEDIYAMA, G. C.; COSTA, J. M. N. e VIANELLO, R. L. Influência da La Niña na Estação Chuvosa da Região Sudeste do Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 22, n. 3, p. 345-353, 2007.

NAGHETTINI, M. e PINTO, E. J. de A. **Hidrologia estatística.** Belo Horizonte: CPRM, 2007. 552 p. ISBN 978-85-7499-023-1

NASA – EARTH OBSERVATORY. Global Maps. Disponível em: <<http://www.earthobservatory.nasa.gov/GlobalMaps/?eocn=topnav&eoci=globalmaps>>. Acesso em 14 de dezembro de 2012.

- NEW, M; HEWITSON, B.; STEPHESON, D. B. *et al.* Evidence of trends in daily climate extremes over southern and west Africa. **Journal of Geophysical Research**, v. 111, n. D14, D14102, 2006.
- OCCHIPINTI, A. G. e SANTOS, P. M. **Análise das máximas intensidades de chuvas na cidade de São Paulo**. São Paulo: Instituto Astronômico e Geofísico da Universidade de São Paulo, 1965. 40 p.
- OKE, T. R. **Initial Guidance to Obtain Representative Meteorological Observations at Urban Sites**. Genebra (Suíça): World Meteorological Organization, Instruments and Methods of Observation Program, IOM Report No. 81, WMO/TD-No. 1250, 2006.
- OKE, T. R. The energetic basis of the urban heat island. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 108, p. 1-24, 1982.
- OKE, T.R. 1997: **Urban environments**. In: OKE, T. R. e ROUSE, W. R. (Eds.). **Surface Climates of Canada**., Montreal: McGill-Queen's University Press, p. 303-327, 1997.
- OLIVEIRA, G. S. **O El Niño e Você – o fenômeno climático**. São José dos Campos: Editora Transtec, 2001.
- PACHAURI, R. K. e REISINGER, A. (Eds.). **Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Geneva, Suíça: IPCC, 2007. 104 p.
- PATTANAIK, D. R. e RAJEEVAN, M. Variability of extreme rainfall events over India during southwest monsoon season. **Meteorological Applications**, v. 17, p. 88-104, 2010.
- PENALBA, I. C. e ROBLEDO, F. A. Spatial and temporal variability of the frequency of extreme daily rainfall regime in the La Plata Basin during the 20th century. **Climate Change**, v. 98, p. 531-550, 2010.
- PENNER, J. E. *et al.* **Aerosols, their Direct and Indirect Effects**. In: HOUGHTON, F. T. *et al.* (Eds.). **Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Cambridge, Inglaterra e Nova Iorque, NY, E.U.A.: Cambridge University Press, 2001.
- PESSOA, M. L. **Hidrometeorologia com Radar**. In: TUCCI, Carlos E. M. *et al.* **Hidrologia: ciência e aplicação**. Porto Alegre: UFRGS/ABRH, 4ª ed., 2007.
- PFAFSTETTER, O. **Chuvas intensas no Brasil: relação entre precipitação, duração e frequência de chuvas, registradas com pluviógrafos, em 98 postos meteorológicos**. Rio de Janeiro: DNOS, 2ª edição, 1982. 426 p.
- PHILANDER, S. G. H. **El Niño, La Niña, and the Southern Oscillation**. San Diego, CA, EUA: Academic Press, 1990. 293 p.

- PIELKE, R. A. Influence of the spatial distribution of vegetation and soils on the prediction of cumulus convective rainfall. **Reviews of Geophysics**, v. 39. n. 2, p. 151-177, Maio 2001.
- PREFEITURA MUNICIPAL DE SÃO PAULO – PMSP. SECRETARIA DE OBRAS E INFRAESTRUTURA URBANA – SIURB. Tabelas de Custos. Disponível em: <http://www.prefeitura.sp.gov.br/cidade/secretarias/infraestrutura/tabelas_de_custos/index.php?p=160284#Tabela_de_custos>. Acesso em 1º de fevereiro de 2014.
- PREFEITURA MUNICIPAL DE SÃO PAULO - PMSP. SECRETARIA DE VIAS PÚBLICAS. **Diretrizes de Projeto de Hidráulica e Drenagem Urbana**. São Paulo: Volume 4, 1999. Documentação Técnica.
- PRYOR, S. C.; HOWE, J. A. e KUNKEL, K. E. How spatially coherent and statistically robust are temporal changes in extreme precipitation in the contiguous USA? **Int. J. Climate**, v. 29, p. 31-45, 2009.
- PSCHEIDT, I. e GRIMM, A. M. Frequency of extreme rainfall events in Southern Brazil modulated by interannual and interdecadal variability. **International Journal of Climatology**, v. 29, p. 1988-2011, 2009.
- R DEVELOPMENT CORE TEAM. **An Introduction to R – Notes on R: A Programming Environment for Data Analysis and Graphics**. 2011. Disponível em: <<http://www.r-project.org/>>. Acesso em 5 de maio de 2012.
- RAO, V. B. e HADA, K. Characteristics of Rainfall over Brazil: Annual Variations and Connections with the Southern Oscillation. **Theor. Appl. Climatol.**, v. 42, p. 81–90, 1990.
- RE, M. e BARROS, V. R. Extreme rainfalls in SE South America. **Climate Change**, v. 96, p. 119-136, 2009.
- RODRIGO, F.S. Changes in the probability of extreme daily precipitation observed from 1951 to 2002 in the Iberian Peninsula. **International Journal of Climatology**, v. 30, n. 10, p. 1512-1525, 2010.
- ROSENFELD, D. Aerosol-cloud interactions control of Earth radiation and latent heat release budgets. **Space Sci. Rev**, v. 125, p. 149-157, 2006.
- ROSENFELD, D. Suppression of Rain and Snow by Urban and Industrial Air Pollution. **Science**, v. 287, n. 5459, p. 1793-1796, 2000.
- ROSENFELD, D. TRMM Observed First Direct Evidence of Smoke from Forest Fires Inhibiting Rainfall. **Geophysical Research Letters**, v. 26, n. 20, p. 2105-310, 1999.
- ROSENFELD, D.; DAI, J.; YU, X.; YAO, Z; XU, X.; YANG, X. e DU, C. Amounts of Air Pollution and Orographic Precipitation. **Science**, v. 315, p. 1396-1398, 2007.

- ROSENFELD, D.; LOHMANN, U.; RAGA, G. B.; O'DOWD, C. D.; KULMALA, M.; FUZZI, S.; REISSELL, A. e ANDREA, M. O. Flood or Drought: How Do Aerosols Affect Precipitation? **Science**, v. 321, p. 1309-1313, 2008.
- ROSS, G. J. **Parametric and Nonparametric Sequential Change Detection in R: The cpm package**. Disponível em: <<http://cran.r-project.org/web/packages/cpm/vignettes/cpm.pdf>>. Acesso em 12 de janeiro de 2014.
- SANTOS, C. A. C. e BRITO, J. I. B. 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, C. A. C.; BRITO, J. I. B.; RAO, T. V. R. e 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.
- SÃO PAULO (cidade). SECRETARIA MUNICIPAL DE DESENVOLVIMENTO URBANO. **PDE 10 anos: Plano Diretor Estratégico da Cidade de São Paulo**. São Paulo: SMDU, 2012. 228 p.
- SASS, R. L. **It's not cool to be hot in Houston**. Disponível em: <www.ruf.eice.edu/~sass/UHI.html>. Acesso em 2 de janeiro de 2014.
- SEARCY, J. K. e HARDISON, C. H. **Double-Mass Curves**. In: LANGBEIN, W. B. **Manual of Hydrology: Part 1. General Surface-Water Techniques**. Washington, D.C.: Geological Survey Water-Supply Paper 1541-B, 1960.
- SELOVER, N. Precipitation patterns around an urban desert environment - topographic or urban influences? In: ASSOCIATION OF AMERICAN GEOGRAPHERS CONVENTION, 25-29 de maio de 1997, Fort Worth, TX, EUA.
- SHEPHERD, J. M. e BURIAN, S. J. Detection of Urban-Induced Rainfall Anomalies in a Major Coastal City. **Earth Interactions**, v. 7, n. 4, p. 1-17, 2003.
- SHEPHERD, J. M.; PIERCE, H. e NEGRI, A. J. Rainfall Modification by Major Urban Areas: Observations from Spaceborne Rain Radar on the TRMM Satellite. **Journal of Applied Meteorology**, v. 41, p. 689-701, 2002.
- SILVA, M. E. S. e SILVA, C. B. Variabilidade Climática – processos físicos e dinâmicos nos oceanos e atmosfera. **Revista do Departamento de Geografia – USP**. Volume Especial 30 anos, p. 372-406, 2012.
- SILVEIRA, A. L. L. da. **Ciclo Hidrológico e Bacia Hidrográfica**. In: TUCCI, Carlos E. M. *et al.* **Hidrologia: ciência e aplicação**. Porto Alegre: UFRGS/ABRH, 4ª ed., 2007.
- SKANSI, M. M.; BRUNET, M.; SIGRÓ, J.; AGUILAR, E.; GROENING, J. A. A.; BENTANCUR, O. J.; GEIER, Y. R. C.; AMAYA, R. L. C.; JÁCOME, H.; RAMOS, A. M.; ROJAS, C. O.; PASTEN, A. M.; MITRO, S. S.; KIMÉNEZ, C. V.; MARTINEZ, R.; ALEXANDER, L. V. e JONES, P. D. Warming and wetting signals emerging from analysis of changes in climate extreme indices over South America. **Global and Planetary Change**, v. 100, p. 295-307, 2013.

- SOIL CONSERVATION SERVICE – SCS. **Urban Hydrology for Small Watersheds**. Technical Release 55. USDA: Springfield, VA, EUA. 1986
- SQUIRES, P. The Microstructure and Colloidal Stability of Warm Clouds: Part I – The Relation between Structure and Stability. **Tellus**, v. 10, n. 2, p. 256-261, 1958.
- STULL, R. B. **Introduction to boundary layer meteorology**. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1988. 666 p.
- SUGAHARA, S., ROCHA, R. P. e SILVEIRA, R. Non-stationary frequency analysis of extreme daily rainfall in Sao Paulo, Brazil. **Int. J. Climatol.**, n. 29, p. 1339-1349, 2009.
- TAO, W. -K.; LI, X.; KHAIN, A.; MATSUI, T.; LANG, S. e SIMPSON, J. Role of atmospheric aerosol concentration on deep convective precipitation: Cloud-resolving model simulations. **Journal of Geophysical Research**, v. 112, D24S18, 2007.
- TARIFA, J. R. e ARMANI, G. **As Unidades Climáticas Urbanas da Cidade de São Paulo**. In: TARIFA, J. R. (Org.). **Atlas Ambiental do Município de São Paulo**. São Paulo, 2000.
- TEIXEIRA, M. S. e SATYAMURTY, P. Trends in the Frequency of Intense Precipitation Events in Southern and Southeastern Brazil during 196-2004. **Journal of Climate**, v. 24, p. 1913-1921, 2011.
- THIELEN, J.; WOBROCK, W.; GADIAN, A.; MESTAYER, P. G. e CREUTIN, J.-D. The possible influence of urban surfaces on rainfall development: a sensitivity study in 2D in the meso- γ -scale. **Atmospheric Research**, v. 54, p. 15-39, 2000.
- TOON, O. B. How Pollution Suppresses Rain. **Science**, v. 287, n. 5459, p. 1763-1765, 2000.
- TRENBERTH, K. E. *et al.* **Observations: Surface and Atmospheric Climate Change**. In: **Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. [SOLOMON, D.; QIN, D.; MANNING, D.; CHEN, Z.; MARQUIS, M.; AVERYT, K. B.; TIGNOR, M. e MILLER, H. L. (Eds.)]. Cambridge, Inglaterra e Nova Iorque, NY, E.U.A.: Cambridge University Press, 2007.
- TUCCI, Carlos E. M. *et al.* **Hidrologia: ciência e aplicação**. Porto Alegre: UFRGS/ABRH, 4ª Ed., 2007.
- TWOMEY, S. Aerosols, Clouds e Radiation. **Atmospheric Environment**, v. 25A, n. 11, p. 2435-2442, 1991.
- TWOMEY, S. Pollution and the planetary albedo. **Atmospheric Environment**, v. 8, n. 12, p. 1251-1256, 1967.
- U. S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY – EPA. **Reducing Urban Heat Islands: Compendium of Strategies – Urban Heat Island Basics**. 2008.

Disponível em: <<http://www.epa.gov/heatisland/resources/compendium.htm>>. Acesso em 20 de dezembro de 2013.

U.S. National Research Council, Committee on Opportunities in the Hydrologic Sciences, Water Science and Technology Board. **Opportunities in the Hydrologic Sciences**. Washington, DC: National Academy Press, 1991.

UNITED NATIONS FRAMEWORK ON CLIMATE CHANGE – UNFCCC. PROCESS. Essential Background. Disponível em: <http://unfccc.int/essential_background/items/6031.php>. Acesso em 15 de dezembro de 2013.

VOOGT, J. A. Urban Heat Islands: Hotter Cities. **American Institute of Biological Sciences**. 2004. Disponível em: <<http://www.actionbioscience.org/environment/voogt.html>>. Acesso em 20 de dezembro de 2013.

WANG, H.J.; SUN, J.Q.; CHEN, H. P.; ZHU, Y. L.; ZHANG, Y.; JIANG, D. B.; LANG, X. M.; FAN, K.; YU, E. T. e YANG, S. Extreme Climate in China: Facts, Simulation and Projection. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 21, n. 3, p. 279-304, 2012.

WARNER, J. A. Reduction in Rainfall Associated with Smoke from Sugar-Cane Fires – Na Inadvertent Weather Modification? **Journal of Applied Meteorology**, v. 7, p. 247-251, 1968.

WIKIPEDIA. Intertropical Convergence Zone. Disponível em: <http://en.wikipedia.org/wiki/File:ITCZ_january-july.png>. Acesso em 13 de dezembro de 2012.

WILKEN, P. S. **Engenharia de drenagem superficial**. São Paulo: CETESB, 1978. 478 p.

YUE, S. e WANG, C. Y. Power of the Mann-Whitney test for detecting a shift in median or mean of hydro-meteorological data. **Stochastic Environmental Research and Risk Assessment**, v. 16, p. 307-323, 2002.

YUE, S.; PILON, P. e CAVADIAS, G. Power of the Mann-Kendall and Spearman's rho tests for detecting monotonic trends in hydrological series. **Journal of Hydrology**, v. 259, p. 254-271, 2002.

ZOLINA, O.; SIMMER, C.; BELYAEV, K.; KAPALA, A. e GULEV, S. Improving estimates of heavy and extreme precipitation using daily records from European rain gauges. **Journal of Hydrometeorology**, v. 10, n. 3, p. 701-716, 2009.

APÊNDICE A – Falhas encontradas e preenchidas nas séries de precipitação

As tabelas a seguir mostram o número de dias no mês em que não há dados registrados nos anos em que foram constatadas falhas. Nos meses em que há indicação com “X”, não há registros para todo o período. Os meses e anos indicados em azul correspondem aos meses ou anos que foram preenchidos pelo Método da Ponderação Regional. Nos meses em que há poucas falhas, porém que não estão marcados em azul, optou-se por utilizar os dados registrados no período ao invés de realizar o preenchimento.

POSTO A												
Anos com falhas	Mês											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1945										X		

POSTO B												
Anos com falhas	Mês											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1936												X
1937	X	X	X	X								
1950	5											
1951							5				4	5
1955		3										
1956				6	6	5	5	5	7	4	5	4
1957	6	4	6	4	5	6	5	5	6	4	4	6
1969	1	6				2				3	5	4
1970	2	7	1	2		2	1	1	2	3	7	7
1971	5											
1978						X	18	X	X	X	X	X
1979	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	1	2
1980			1		19							
1982		1										
1984				2	1							
1985				2								
1997					1							
1999				11				8			2	5
2000		2	8		1							
2001	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
2002	X	X	X									
2004						X				X	X	X

POSTO C												
Anos com falhas	Mês											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1976	1									1		
1981				1		2	1		1		1	
1982						1						3
1983		1						5				
1985									1			
1989							4			3		
1990							4	4				
1991	1					2						
1992					1							
1993	2	1										
1994	2											
1995	3											
1996							X					X
2002					X		X					
2003				X					X		X	X

POSTO D												
Anos com falhas	Mês											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1953				X								
1962	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
1963	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
1964	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
1965	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
1966	X	X	X	X	X	X						
2003											X	X

POSTO E												
Anos com falhas	Mês											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1925	X	X										
1930		15										
1941							X					
1978							X	X	X	X	X	X
1979	X	X	X	X	X	X						

POSTO F												
Anos com falhas	Mês											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1978							X	X	X	X	X	X
1979	X	X	X	X	X	X						

APÊNDICE B – Resultados do teste de *Mann-Kendall* para as séries parciais de precipitação total anual

POSTO A						
Início	Final	τ	p -value	Nível de Confiança	Hipótese aceita	Tendência
1933	1950	-0,020	0,940	6,0%	0	
	1955	-0,138	0,369	63,1%	0	
	1960	0,148	0,277	72,3%	0	
	1965	0,148	0,233	76,7%	0	
	1970	0,192	0,092	90,8%	0	
	1975	0,130	0,225	77,5%	0	
	1980	0,181	0,071	92,9%	0	
	1985	0,171	0,071	92,9%	0	
	1990	0,272	0,003	99,7%	1	+
	1995	0,272	0,002	99,8%	1	+
	2000	0,243	0,003	99,7%	1	+
	2005	0,223	0,005	99,5%	1	+
	2010	0,263	0,001	99,9%	1	+
	2012	0,291	<0,001	>99,9%	1	+

POSTO B						
Início	Final	τ	p -value	Nível de Confiança	Hipótese aceita	Tendência
1888	1905	0,320	0,069	93,1%	0	
	1910	0,170	0,267	73,3%	0	
	1915	0,048	0,737	26,3%	0	
	1920	-0,068	0,588	41,2%	0	
	1925	-0,036	0,763	23,7%	0	
	1930	0,074	0,490	51,0%	0	
	1935	-0,004	0,729	27,1%	0	
	1940	0,077	0,421	57,9%	0	
	1945	0,109	0,227	77,3%	0	
	1950	0,126	0,145	85,5%	0	
	1955	0,086	0,302	69,8%	0	
	1960	0,156	0,051	94,9%	0	
	1965	0,160	0,039	96,1%	1	+
	1970	0,144	0,054	94,6%	0	
	1975	0,119	0,103	89,7%	0	

POSTO B (continuação)						
Início	Final	τ	p -value	Nível de Confiança	Hipótese aceita	Tendência
1888	1980	0,144	0,042	95,8%	1	+
	1985	0,137	0,045	95,5%	1	+
	1990	0,176	0,008	99,2%	1	+
	1995	0,201	0,002	99,8%	1	+
	2000	0,155	0,015	98,5%	1	+
	2004	0,133	0,033	96,7%	1	+

POSTO C						
Início	Final	τ	p -value	Nível de Confiança	Hipótese aceita	Tendência
1946	1960	0,257	0,198	80,2%	0	
	1965	0,126	0,456	54,4%	0	
	1970	0,067	0,657	34,3%	0	
	1975	-0,025	0,858	14,2%	0	
	1980	0,119	0,320	68,0%	0	
	1985	0,092	0,408	59,2%	0	
	1990	0,115	0,269	73,1%	0	
	1995	0,151	0,124	87,6%	0	
	2000	0,185	0,047	95,3%	1	+
	2003	0,125	0,167	83,3%	0	

POSTO D						
Início	Final	τ	p -value	Nível de Confiança	Hipótese aceita	Tendência
1943	1960	0,281	0,112	88,8%	0	
	1965	0,178	0,245	75,5%	0	
	1970	0,254	0,061	93,9%	0	
	1975	0,265	0,031	96,9%	1	+
	1980	0,334	0,003	99,7%	1	+
	1985	0,276	0,009	99,1%	1	+
	1990	0,344	0,001	99,9%	1	+
	1995	0,358	<0,001	>99,9%	1	+
	2000	0,368	<0,001	>99,9%	1	+
	2003	0,332	<0,001	>99,9%	1	+

POSTO E						
Início	Final	τ	p -value	Nível de Confiança	Hipótese aceita	Tendência
1925	1940	-0,267	0,163	83,7%	0	
	1945	-0,419	0,009	99,1%	1	-
	1950	-0,262	0,064	93,6%	0	
	1955	-0,346	0,007	99,3%	1	-
	1960	-0,180	0,127	87,3%	0	
	1965	-0,140	0,200	80,0%	0	
	1970	-0,095	0,358	64,2%	0	
	1975	-0,086	0,376	62,4%	0	
	1980	-0,055	0,553	44,7%	0	
	1985	-0,079	0,370	63,0%	0	
	1990	0,008	0,925	7,5%	0	
	1995	0,017	0,839	16,1%	0	
	2000	0,046	0,560	44,0%	0	
	2005	0,007	0,929	7,1%	0	
	2010	0,031	0,679	32,1%	0	
	2012	0,010	0,897	10,3%	0	

POSTO F						
Início	Final	τ	p -value	Nível de Confiança	Hipótese aceita	Tendência
1922	1935	-0,055	0,8267	17,3%	0	
	1940	-0,345	0,0424	95,8%	1	-
	1945	-0,457	0,0019	99,8%	1	-
	1950	-0,355	0,0073	99,3%	1	-
	1955	-0,383	0,0015	99,8%	1	-
	1960	-0,233	0,0375	96,3%	1	-
	1965	-0,252	0,0165	98,3%	1	-
	1970	-0,226	0,0224	97,8%	1	-
	1975	-0,242	0,0101	99,0%	1	-
	1980	-0,199	0,0266	97,3%	1	-
	1985	-0,201	0,0193	98,1%	1	-
	1990	-0,134	0,1039	89,6%	1	-
	1995	-0,102	0,1994	80,1%	0	
	2000	-0,087	0,2584	74,2%	0	
	2005	-0,102	0,1715	82,9%	0	
	2010	-0,055	0,4440	55,6%	0	
	2012	-0,052	0,4653	53,5%	0	

APÊNDICE C – Resultados do teste de *Mann-Kendall* para as séries parciais de precipitação máxima diária anual

POSTO A						
Início	Final	τ	p -value	Nível de Confiança	Hipótese aceita	Tendência
1933	1950	0,216	0,225	77,5%	0	
	1955	0,217	0,154	84,6%	0	
	1960	0,280	0,038	96,2%	1	+
	1965	0,161	0,193	80,7%	0	
	1970	0,330	0,004	99,6%	1	+
	1975	0,267	0,012	98,8%	1	+
	1980	0,268	0,007	99,3%	1	+
	1985	0,272	0,004	99,6%	1	+
	1990	0,250	0,006	99,4%	1	+
	1995	0,174	0,045	95,5%	1	+
	2000	0,155	0,062	93,8%	0	
	2005	0,189	0,018	98,2%	1	+
	2010	0,250	0,001	99,9%	1	+
	2012	0,263	0,001	99,9%	1	+

POSTO B						
Início	Final	τ	p -value	Nível de Confiança	Hipótese aceita	Tendência
1888	1905	-0,007	1,000	0,0%	0	
	1910	-0,060	0,711	28,9%	0	
	1915	-0,251	0,066	93,4%	0	
	1920	-0,303	0,014	98,6%	1	-
	1925	-0,159	0,166	83,4%	0	
	1930	0,006	0,967	3,3%	0	
	1935	-0,021	0,838	16,2%	0	
	1940	-0,059	0,539	46,1%	0	
	1945	-0,049	0,596	40,4%	0	
	1950	-0,016	0,859	14,1%	0	
	1955	-0,005	0,958	4,2%	0	
	1960	0,063	0,435	56,5%	0	
	1965	0,095	0,224	77,6%	0	
	1970	0,128	0,088	91,2%	0	
	1975	0,071	0,332	66,8%	0	

POSTO B (continuação)						
Início	Final	τ	p -value	Nível de Confiança	Hipótese aceita	Tendência
1888	1980	0,061	0,397	60,3%	0	
	1985	0,065	0,354	64,6%	0	
	1990	0,061	0,371	62,9%	0	
	1995	0,058	0,385	61,5%	0	
	2000	0,020	0,758	24,2%	0	
	2004	-0,012	0,850	15,0%	0	

POSTO C						
Início	Final	τ	p -value	Nível de Confiança	Hipótese aceita	Tendência
1946	1960	0,083	0,685	31,5%	0	
	1965	-0,038	0,833	16,7%	0	
	1970	0,138	0,332	66,8%	0	
	1975	0,110	0,395	60,5%	0	
	1980	0,143	0,225	77,5%	0	
	1985	0,094	0,393	60,7%	0	
	1990	0,201	0,050	95,0%	1	+
	1995	0,130	0,183	81,7%	0	
	2000	0,111	0,252	74,8%	0	
	2003	0,116	0,198	80,2%	0	

POSTO D						
Início	Final	τ	p -value	Nível de Confiança	Hipótese aceita	Tendência
1943	1960	0,111	0,544	45,6%	0	
	1965	0,076	0,675	32,5%	0	
	1970	0,087	0,568	43,2%	0	
	1975	-0,030	0,837	16,3%	0	
	1980	-0,059	0,635	36,5%	0	
	1985	0,015	0,904	9,6%	0	
	1990	0,019	0,863	13,7%	0	
	1995	0,060	0,546	45,4%	0	
	2000	0,106	0,260	74,0%	0	
	2003	0,108	0,239	76,1%	0	

POSTO E						
Início	Final	τ	p -value	Nível de Confiança	Hipótese aceita	Tendência
1925	1940	0,118	0,558	0,0%	0	
	1945	0,105	0,526	44,2%	0	-
	1950	0,003	1,000	47,4%	0	
	1955	-0,067	0,610	0,0%	0	-
	1960	-0,119	0,313	39,0%	0	
	1965	-0,163	0,138	68,7%	0	
	1970	-0,106	0,306	86,2%	0	
	1975	-0,015	0,884	69,4%	0	
	1980	0,004	0,972	11,6%	0	
	1985	0,010	0,911	2,8%	0	
	1990	-0,006	0,947	8,9%	0	
	1995	-0,045	0,582	5,3%	0	
	2000	-0,045	0,569	41,8%	0	
	2005	-0,027	0,723	27,7%	0	
	2010	-0,004	0,964	3,6%	0	
	2012	0,005	0,948	5,2%	0	

POSTO F						
Início	Final	τ	p -value	Nível de Confiança	Hipótese aceita	Tendência
1922	1935	0,099	0,6614	33,9%	0	
	1940	-0,053	0,7796	22,0%	0	
	1945	-0,091	0,5515	44,8%	0	
	1950	-0,104	0,4417	55,8%	0	
	1955	-0,173	0,1546	84,5%	0	
	1960	-0,158	0,1604	84,0%	0	
	1965	-0,234	0,0260	97,4%	1	-
	1970	-0,089	0,3745	62,6%	0	
	1975	-0,081	0,3908	60,9%	0	
	1980	-0,042	0,6424	35,8%	0	
	1985	-0,057	0,5089	49,1%	0	
	1990	-0,039	0,6373	36,3%	0	
	1995	0,014	0,8666	13,3%	0	
	2000	-0,013	0,8722	12,8%	0	
	2005	-0,008	0,9169	8,3%	0	
	2010	0,018	0,8068	19,3%	0	
	2012	0,046	0,5192	48,1%	0	

APÊNDICE D – Orçamento das obras dos sistemas de microdrenagem

ORÇAMENTO DO SISTEMA DE MICRODRENAGEM Cenário 1 para TR = 5 anos

ITEM	CÓDIGO	ESPECIFICAÇÃO	UN.	QUANT.	VALOR	
					UNITÁRIO	TOTAL
1		MOVIMENTO DE TERRA				
	04-04-00	Escavação mecânica para fundações e valas com profundidade menor ou igual à 4,0m	m³	8,082	7,05	56.975,65
	04-09-00	Reenchimento de vala com compactação, sem fornecimento de terra	m³	5,553	7,56	41.979,84
	04-15-00	Carga e remoção de terra até a distância média de 1km	m³	2,529	6,73	17.018,57
	04-60-00	Remoção de terra além do primeiro km (15 km)	m³xkm	37,931	1,15	43.621,16
					Subtotal =	159.595,22
2		MICRODRENAGEM				
	05-20-00	Fundação de rachão	m³	403	120,26	48.478,19
	06-03-00	Escoramento descontinuo de madeira para canaliz.de tubos	m²	7,776	30,75	239.123,67
	06-05-00	Lastro de brita e pó de pedra	m³	134	117,98	15.853,03
	06-06-00	Lastro de concreto fck=10MPa	m³	589	260,39	153.327,76
	06-10-01	Fornecimento e assentamento de tubos de concreto armado, Ø0,60m TIPO PA-2	m	184	120,62	22.194,08
	06-12-01	Fornecimento e assentamento de tubos de concreto armado, Ø0,80m TIPO PA-2	m	450	202,00	90.900,00
	06-14-01	Fornecimento e assentamento de tubos de concreto armado, Ø1,00m TIPO PA-2	m	540	284,91	153.851,40
	06-16-01	Fornecimento e assentamento de tubos de concreto armado, Ø1,20m TIPO PA-2	m	180	445,49	80.188,20
	06-18-01	Poço de visita tipo 1 - 1,40 x 1,40 x 1,40m	un	13	2.691,29	34.986,77
	06-19-00	Chaminé de poço de visita com alvenaria de um tijolo comum	m	13	569,88	7.408,44
	06-20-04	Instalação de tampão para galeria de águas pluviais - não articulado, exceto fornecimento de tampão	un	13	77,60	1.008,80
	06-20-22	Fornecimento de tampão de ferro fundido dúctil classe mínima 400 (40t) d=600mm - NBR 10160 não articulado - p/ gal. águas pluv.	un	13	391,10	5.084,30
	06-22-03	Boca de lobo simples	un	26	1.106,21	28.761,46
	06-22-04	Boca de lobo dupla	un	26	1.954,69	50.821,94
					Subtotal =	931.988,04
					Total da Obra =	1.091.583,27
3		CANTEIRO DE OBRAS				
		Instalação do Canteiro de Serviços (máximo 1% do valor dos serviços)	vb	1	10.915,83	10.915,83
		Manutenção do Canteiro de Obras (máximo 0,5% do valor dos serviços)	mês	4	5.457,92	21.831,67
		Desmobilização do Canteiro de Obras (máximo 0,5% do valor dos serviços)	vb	1	5.457,92	5.457,92
				Total do Canteiro de Obras =		38.205,41
					Total sem BDI	1.129.788,68
					BDI (37,3% do Valor Total da Obra) =	421.411,18
					TOTAL DA OBRA =	1.551.199,86

ORÇAMENTO DO SISTEMA DE MICRODRENAGEM
Cenário 2 para TR = 5 anos

ITEM	CÓDIGO	ESPECIFICAÇÃO	UN.	QUANT.	VALOR	
					UNITÁRIO	TOTAL
1		MOVIMENTO DE TERRA				
	04-04-00	Escavação mecânica para fundações e valas com profundidade menor ou igual à 4,0m	m³	8.432	7,05	59.443,69
	04-09-00	Reenchimento de vala com compactação, sem fornecimento de terra	m³	5.748	7,56	43.455,87
	04-15-00	Carga e remoção de terra até a distância média de 1km	m³	2.684	6,73	18.060,62
	04-60-00	Remoção de terra além do primeiro km (15 km)	m³xkm	40.254	1,15	46.292,08
					Subtotal =	167.252,25
2		MICRODRENAGEM				
	05-20-00	Fundação de rachão	m³	414	120,26	49.748,13
	06-03-00	Escoramento descontinuo de madeira para canaliz.de tubos	m²	7.842	30,75	241.152,18
	06-05-00	Lastro de brita e pó de pedra	m³	138	117,98	16.268,32
	06-06-00	Lastro de concreto fck=10MPa	m³	630	260,39	164.029,83
	06-10-01	Fornecimento e assentamento de tubos de concreto armado, Ø0,60m TIPO PA-2	m	184	120,62	22.194,08
	06-12-01	Fornecimento e assentamento de tubos de concreto armado, Ø0,80m TIPO PA-2	m	360	202,00	72.720,00
	06-14-01	Fornecimento e assentamento de tubos de concreto armado, Ø1,00m TIPO PA-2	m	540	284,91	153.851,40
	06-16-01	Fornecimento e assentamento de tubos de concreto armado, Ø1,20m TIPO PA-2	m	270	445,49	120.282,30
	06-18-01	Poço de visita tipo 1 - 1,40 x 1,40 x 1,40m	un	13	2.691,29	34.986,77
	06-19-00	Chaminé de poço de visita com alvenaria de um tijolo comum	m	13	569,88	7.408,44
	06-20-04	Instalação de tampão para galeria de águas pluviais - não articulado, exceto fornecimento de tampão	un	13	77,60	1.008,80
	06-20-22	Fornecimento de tampão de ferro fundido dúctil classe mínima 400 (40t) d=600mm - NBR 10160 não articulado - p/ gal. águas pluv.	un	13	391,10	5.084,30
	06-22-03	Boca de lobo simples	un		1.106,21	-
	06-22-04	Boca de lobo dupla	un	52	1.954,69	101.643,88
					Subtotal =	990.378,43
					Total da Obra =	1.157.630,68
3		CANTEIRO DE OBRAS				
		Instalação do Canteiro de Serviços (máximo 1% do valor dos serviços)	vb	1	11.576,31	11.576,31
		Manutenção do Canteiro de Obras (máximo 0,5% do valor dos serviços)	mês	4	5.788,15	23.152,61
		Desmobilização do Canteiro de Obras (máximo 0,5% do valor dos serviços)	vb	1	5.788,15	5.788,15
				Total do Canteiro de Obras =		40.517,07
					Total sem BDI	1.198.147,75
					BDI (37,3% do Valor Total da Obra) =	446.909,11
					TOTAL DA OBRA =	1.645.056,86

ORÇAMENTO DO SISTEMA DE MICRODRENAGEM
Cenário 1 para TR = 10 anos

ITEM	CÓDIGO	ESPECIFICAÇÃO	UN.	QUANT.	VALOR	
					UNITÁRIO	TOTAL
1		MOVIMENTO DE TERRA				
	04-04-00	Escavação mecânica para fundações e valas com profundidade menor ou igual à 4,0m	m³	9.024	7,05	63.619,11
	04-09-00	Reenchimento de vala com compactação, sem fornecimento de terra	m³	6.179	7,56	46.710,30
	04-15-00	Carga e remoção de terra até a distância média de 1km	m³	2.845	6,73	19.149,38
	04-60-00	Remoção de terra além do primeiro km (15 km)	m³xkm	42.681	1,15	49.082,74
					Subtotal =	178.561,52
2		MICRODRENAGEM				
	05-20-00	Fundação de rachão	m³	438	120,26	52.728,18
	06-03-00	Escoramento descontinuo de madeira para canaliz.de tubos	m²	7.960	30,75	244.770,85
	06-05-00	Lastro de brita e pó de pedra	m³	146	117,98	17.242,84
	06-06-00	Lastro de concreto fck=10MPa	m³	719	260,39	187.242,76
	06-10-01	Fornecimento e assentamento de tubos de concreto armado, ø0,60m TIPO PA-2	m	184	120,62	22.194,08
	06-12-01	Fornecimento e assentamento de tubos de concreto armado, ø0,80m TIPO PA-2	m	270	202,00	54.540,00
	06-14-01	Fornecimento e assentamento de tubos de concreto armado, ø1,00m TIPO PA-2	m	360	284,91	102.567,60
	06-16-01	Fornecimento e assentamento de tubos de concreto armado, ø1,20m TIPO PA-2	m	540	445,49	240.564,60
	06-17-01	Fornecimento e assentamento de tubos de concreto armado, ø1,50m TIPO PA-2	m	-	633,18	-
	06-18-01	Poço de visita tipo 1 - 1,40 x 1,40 x 1,40m	un	13	2.691,29	34.986,77
	06-18-02	Poço de visita tipo 2 - 1,60 x 1,60 x 1,60m	un	-	3.262,94	-
	06-19-00	Chaminé de poço de visita com alvenaria de um tijolo comum	m	13	569,88	7.408,44
	06-20-04	Instalação de tampão para galeria de águas pluviais - não articulado, exceto fornecimento de tampão	un	13	77,60	1.008,80
	06-20-22	Fornecimento de tampão de ferro fundido dúctil classe mínima 400 (40t) d=600mm - NBR 10160 não articulado - p/ gal. águas pluv.	un	13	391,10	5.084,30
	06-22-03	Boca de lobo simples	un	-	1.106,21	-
	06-22-04	Boca de lobo dupla	un	52	1.954,69	101.643,88
					Subtotal =	1.071.983,09
					Total da Obra =	1.250.544,61
3		CANTEIRO DE OBRAS				
		Instalação do Canteiro de Serviços (máximo 1% do valor dos serviços)	vb	1	12.505,45	12.505,45
		Manutenção do Canteiro de Obras (máximo 0,5% do valor dos serviços)	mês	4	6.252,72	25.010,89
		Desmobilização do Canteiro de Obras (máximo 0,5% do valor dos serviços)	vb	1	6.252,72	6.252,72
					Total do Canteiro de Obras =	43.769,06
					Total sem BDI	1.294.313,67
					BDI (37,3% do Valor Total da Obra) =	482.779,00
					TOTAL DA OBRA =	1.777.092,67

ORÇAMENTO DO SISTEMA DE MICRODRENAGEM

Cenário 2 para $TR = 10$ anos

ITEM	CÓDIGO	ESPECIFICAÇÃO	UN.	QUANT.	VALOR	
					UNITÁRIO	TOTAL
1		MOVIMENTO DE TERRA				
	04-04-00	Escavação mecânica para fundações e valas com profundidade menor ou igual à 4,0m	m³	9.561	7,05	67.403,62
	04-09-00	Reenchimento de vala com compactação, sem fornecimento de terra	m³	6.471	7,56	48.923,99
	04-15-00	Carga e remoção de terra até a distância média de 1km	m³	3.089	6,73	20.791,46
	04-60-00	Remoção de terra além do primeiro km (15 km)	m³xkm	46.341	1,15	53.291,64
					Subtotal =	190.410,72
2		MICRODRENAGEM				
	05-20-00	Fundação de rachão	m³	453	120,26	54.433,76
	06-03-00	Escoramento descontinuo de madeira para canaliz.de tubos	m²	8.117	30,75	249.588,99
	06-05-00	Lastro de brita e pó de pedra	m³	151	117,98	17.800,59
	06-06-00	Lastro de concreto fck=10MPa	m³	833	260,39	216.797,38
	06-10-01	Fornecimento e assentamento de tubos de concreto armado, ø0,60m TIPO PA-2	m	184	120,62	22.194,08
	06-12-01	Fornecimento e assentamento de tubos de concreto armado, ø0,80m TIPO PA-2	m	270	202,00	54.540,00
	06-14-01	Fornecimento e assentamento de tubos de concreto armado, ø1,00m TIPO PA-2	m	270	284,91	76.925,70
	06-16-01	Fornecimento e assentamento de tubos de concreto armado, ø1,20m TIPO PA-2	m	450	445,49	200.470,50
	06-17-01	Fornecimento e assentamento de tubos de concreto armado, ø1,50m TIPO PA-2	m	180	633,18	113.972,40
	06-18-01	Poço de visita tipo 1 - 1,40 x 1,40 x 1,40m	un	13	2.691,29	34.986,77
	06-18-02	Poço de visita tipo 2 - 1,60 x 1,60 x 1,60m	un	3	3.262,94	9.788,82
	06-19-00	Chaminé de poço de visita com alvenaria de um tijolo comum	m	13	569,88	7.408,44
	06-20-04	Instalação de tampão para galeria de águas pluviais - não articulado, exceto fornecimento de tampão	un	13	77,60	1.008,80
06-20-22	Fornecimento de tampão de ferro fundido dúctil classe mínima 400 (40t) d=600mm - NBR 10160 não articulado - p/ gal. águas pluv.	un	13	391,10	5.084,30	
06-22-03	Boca de lobo simples	un	26	1.106,21	28.761,46	
06-22-04	Boca de lobo dupla	un	52	1.954,69	101.643,88	
					Subtotal =	1.195.405,88
					Total da Obra =	1.385.816,60
3		CANTEIRO DE OBRAS				
		Instalação do Canteiro de Serviços (máximo 1% do valor dos serviços)	vb	1	13.858,17	13.858,17
		Manutenção do Canteiro de Obras (máximo 0,5% do valor dos serviços)	mês	4	6.929,08	27.716,33
		Desmobilização do Canteiro de Obras (máximo 0,5% do valor dos serviços)	vb	1	6.929,08	6.929,08
					Total do Canteiro de Obras =	48.503,58
					Total sem BDI	1.434.320,18
					BDI (37,3% do Valor Total da Obra) =	535.001,43
					TOTAL DA OBRA =	1.969.321,61

APÊNDICE E – Orçamento das obras de sistemas de macrodrenagem

ORÇAMENTO DO SISTEMA DE MACRODRENAGEM Cenário 1

ITEM	CÓDIGO	ESPECIFICAÇÃO	UN.	QUANT.	VALOR	
					UNITÁRIO	TOTAL
1		SERVIÇOS PRELIMINARES				
	04-33-00	Limpeza de terreno, inclusive camada vegetal até 30cm de profundidade, sem transporte	m²	2.680	0,67	1.795,80
	04-60-00	Remoção de terra além do primeiro km (15km) - limpeza	m³xkm	12.061	1,15	13.870,55
		subtotal				15.666,35
2		MOVIMENTO DE TERRA				
	04-07-00	Escavação mecânica de córrego	m³	1.395	4,30	5.997,86
	04-11-00	Escavação mecânica, carga e remoção de terra até a distância média de 1,0km	m³	6.265	12,31	77.124,61
	04-15-00	Carga e remoção de terra até a distância média de 1km (córrego)	m³	1.395	6,73	9.387,34
	04-60-00	Remoção de terra além do primeiro km (15 km)	m³xkm	93.978	1,15	108.074,70
	04-31-00	Fornecimento de terra, incluindo escavação, carga e transporte até a distância média de 1,0km, medido no aterro compactado	m³	4.710	12,31	57.984,41
	04-60-00	Remoção de terra além do primeiro km (20km) (jazida)	m³xkm	94.207	1,15	108.338,05
	04-32-00	Compactação de terra, medida no aterro	m³	4.710	3,60	16.957,26
		subtotal				383.864,23
3		ESTRUTURAS DE CONCRETO, FUNDAÇÃO E MATERIAIS				
	05-20-00	Fundação de rachão	m³	665	120,26	79.924,80
	05-45-00	Plantio de grama em placas	m²	1.969	9,79	19.278,47
	05-48-00	Base de brita graduada	m³	443	111,64	49.464,33
	06-06-00	Lastro de concreto fck= 10 mpa	m³	222	260,39	57.684,20
	08-14-02	Forma comum exclusive cimbramento	m²	3.419	38,61	131.997,94
	08-20-00	Fornecimento e aplicação de aço CA-50 - diâmetro menor que 1/2"	kg	125.331	5,59	700.602,36
	08-28-00	Fornecimento e aplicação de concreto usinado fck=30MPa - bombeado	m³	964	358,85	345.963,70
	07-35-00	Esgotamento d'água com bomba submersa	hp/h	26.000	0,61	15.860,00
	cpu	Tubo dreno Ø100mm" tipo PVC L=0,35m preenchido com brita envolta em nylon #40	un	819	18,00	14.742,00
	cpu	Tubo dreno Ø50mm" tipo PVC L=0,35m preenchido com brita envolta em nylon #100	un	546	13,00	7.098,00
		subtotal				1.422.615,79
		TOTAL DA OBRA				1.822.146,37
4		CANTEIRO DE OBRAS				
		Instalação do Canteiro de Serviços (máximo 1% do valor dos serviços)	vb	1	18.221,46	18.221,46
		Manutenção do Canteiro de Obras (máximo 0,5% do valor dos serviços)	mês	3	9.110,73	27.332,20
		Desmobilização do Canteiro de Obras (máximo 0,5% do valor dos serviços)	vb	1	9.110,73	9.110,73
		TOTAL DE CANTEIRO DE OBRAS				54.664,39
		TOTAL DA OBRA SEM BDI				1.876.810,76
		BDI (37,3% DO TOTAL DA OBRA)				700.050,41
		TOTAL DA OBRA COM BDI				2.576.861,17

ORÇAMENTO DO SISTEMA DE MACRODRENAGEM
Cenário 2

ITEM	CÓDIGO	ESPECIFICAÇÃO	UN.	QUANT.	VALOR	
					UNITÁRIO	TOTAL
1		SERVIÇOS PRELIMINARES				
	04-33-00	Limpeza de terreno, inclusive camada vegetal até 30cm de profundidade, sem transporte	m²	3,024	0,67	2.026,08
	04-60-00	Remoção de terra além do primeiro km (15km) - limpeza	m³xkm	13,608	1,15	15.649,20
		subtotal				17.675,28
2		MOVIMENTO DE TERRA				
	04-07-00	Escavação mecânica de córrego	m³	1,386	4,30	5.960,88
	04-11-00	Escavação mecânica, carga e remoção de terra até a distância média de 1,0km	m³	7,796	12,31	95.967,04
	04-15-00	Carga e remoção de terra até a distância média de 1km (córrego)	m³	1,386	6,73	9.329,46
	04-60-00	Remoção de terra além do primeiro km (15 km)	m³xkm	116,938	1,15	134.478,59
	04-31-00	Fornecimento de terra, incluindo escavação, carga e transporte até a distância média de 1,0km, medido no aterro compactado	m³	4,591	12,31	56.515,89
	04-60-00	Remoção de terra além do primeiro km (20km) (jazida)	m³xkm	91,821	1,15	105.594,27
	04-32-00	Compactação de terra, medida no aterro	m³	4,591	3,60	16.527,80
		subtotal				424.373,91
		ESTRUTURAS DE CONCRETO, FUNDAÇÃO E MATERIAIS				
3		Fundação de rachão	m³	681	120,26	81.897,06
	05-45-00	Plantio de grama em placas	m²	1,969	9,79	19.278,47
	05-48-00	Base de brita graduada	m³	455	111,64	50.796,20
	06-06-00	Lastro de concreto fck= 10 mpa	m³	228	260,39	59.368,92
	08-14-02	Forma comum exclusive cimbramento	m²	3,419	38,61	131.997,94
	08-20-00	Fornecimento e aplicação de aço CA-50 - diâmetro menor que 1/2"	kg	136,500	5,59	763.035,00
	08-28-00	Fornecimento e aplicação de concreto usinado fck=30MPa - bombeado	m³	1,050	358,85	376.792,50
	07-35-00	Esgotamento d'água com bomba submersa	hpxh	26,000	0,61	15.860,00
	cpu	Tubo dreno ø100mm" tipo PVC L=0,35m preenchido com brita envolta em nylon #40	un	819	18,00	14.742,00
	cpu	Tubo dreno ø50mm" tipo PVC L=0,35m preenchido com brita envolta em nylon #100	un	546	13,00	7.098,00
		subtotal				1.520.866,09
		TOTAL DA OBRA				1.962.915,27
4		CANTEIRO DE OBRAS				
		Instalação do Canteiro de Serviços (máximo 1% do valor dos serviços)	vb	1	19.629,15	19.629,15
		Manutenção do Canteiro de Obras (máximo 0,5% do valor dos serviços)	mês	3	9.814,58	29.443,73
		Desmobilização do Canteiro de Obras (máximo 0,5% do valor dos serviços)	vb	1	9.814,58	9.814,58
		TOTAL DE CANTEIRO DE OBRAS				58.887,46
		TOTAL DA OBRA SEM BDI				2.021.802,73
		BDI (37,3% DO TOTAL DA OBRA)				754.132,42
		TOTAL DA OBRA COM BDI				2.775.935,15

ANEXO A – Dados de Precipitação Total Anual

A seguir são mostrados os valores de precipitação total anual utilizados neste estudo, inclusive os valores preenchidos pelo Método da Ponderação Regional.

Precipitação Total Anual [mm]						
Ano	Posto A	Posto B	Posto C	Posto D	Posto E	Posto F
1888		1183,7				
1889		1143,0				
1890		1021,1				
1891		1394,6				
1892		1575,0				
1893		873,8				
1894		1176,0				
1895		1081,7				
1896		1465,5				
1897		1196,5				
1898		1394,3				
1899		1259,5				
1900		1404,8				
1888		1183,7				
1889		1143,0				
1890		1021,1				
1891		1394,6				
1892		1575,0				
1893		873,8				
1894		1176,0				
1895		1081,7				
1896		1465,5				
1897		1196,5				
1898		1394,3				
1899		1259,5				
1900		1404,8				
1901		1455,2				
1902		1369,2				
1903		1201,5				
1904		1356,4				
1905		1595,1				
1906		1419,7				
1907		1574,4				

Precipitação Total Anual [mm]						
Ano	Posto A	Posto B	Posto C	Posto D	Posto E	Posto F
1908		1103,1				
1909		1364,4				
1910		1054,6				
1911		1607,9				
1912		1219,3				
1913		905,8				
1914		1154,1				
1915		1180,0				
1916		1019,8				
1917		1309,5				
1918		1239,3				
1919		966,4				
1920		1195,3				
1921		1128,6				
1922		1336,3				1484,9
1923		1660,3				1744,7
1924		1114,6				1018,4
1925		1261,2			1335,8	1452,0
1926		1275,0			1439,0	1743,0
1927		1393,6			1460,0	1711,0
1928		1390,1			1330,0	1501,0
1929		1709,2			1773,0	2117,0
1930		1365,6			1631,9	1660,0
1931		1156,2			1513,0	1625,0
1932		1035,0			1484,0	1642,0
1933	925,8	803,6			950,0	972,0
1934	1252,1	1429,5			1341,0	1429,0
1935	1499,9	991,8			1473,0	1720,0
1936	1293,8	843,7			1363,0	1265,0
1937	1493,6	1607,9			1345,9	1400,6
1938	1434,1	1965,7			1359,4	1397,7
1939	1133,8	1724,3			1072,8	1141,0
1940	1132,7	1914,4			1181,9	1242,6
1941	1215,6	1973,4			1196,8	1186,2
1942	1161,3	1808,4			1090,7	1111,4
1943	1116,3	1175,8		1057,8	1047,5	1031,2
1944	1113,1	1052,5		975,7	1126,6	1076,8

Precipitação Total Anual [mm]						
Ano	Posto A	Posto B	Posto C	Posto D	Posto E	Posto F
1945	1309,1	1473,2		1170,1	1245,7	1294,2
1946	1083,2	1297,6	1138,7	968,6	1172,8	1085,4
1947	1636,0	1689,2	1624,2	1557,1	1725,0	1594,2
1948	1176,0	1236,5	1133,1	1120,9	1123,9	1181,6
1949	1292,6	1243,1	1193,4	1247,7	1348,2	1271,6
1950	1349,8	1434,7	1242,0	1273,0	1353,2	1456,2
1951	1163,9	1197,8	1248,1	1009,9	1310,8	1038,3
1952	1320,8	1328,4	1328,7	1365,1	1329,5	1176,8
1953	1197,3	1230,9	1254,8	1242,8	1196,4	1297,8
1954	1064,6	1310,7	859,2	1188,6	958,2	1095,8
1955	1098,2	1140,5	999,2	877,6	1038,6	1179,4
1956	1462,4	1317,4	1128,2	1224,5	1311,3	1305,6
1957	1709,4	1788,2	1334,6	1632,3	1649,6	1752,4
1958	1570,7	1648,2	1394,1	1555,6	1442,2	1461,8
1959	1320,5	1444,5	1294,7	1219,5	1141,3	1228,8
1960	1503,5	1689,6	1610,7	1350,0	1484,0	1427,2
1961	1361,9	1475,3	1400,5	1106,4	1401,9	1261,1
1962	1383,8	1523,4	1393,5	1441,6	1424,3	1356,8
1963	887,0	940,2	886,6	910,0	829,8	834,6
1964	1239,3	1308,9	1049,6	1201,8	1107,2	1128,3
1965	1701,1	1635,5	1314,0	1552,3	1624,8	1399,8
1966	1631,1	1645,3	1356,9	1548,1	1595,4	1390,0
1967	1485,7	1435,6	1240,2	1328,8	1267,8	1278,4
1968	1356,0	919,2	1078,7	1164,5	1216,3	1028,4
1969	1160,1	835,7	1075,5	1331,2	1208,4	1210,3
1970	1488,1	1861,0	1431,3	1758,6	1457,8	1547,5
1971	1485,6	1367,4	1399,6	1393,4	1334,6	1370,6
1972	1313,6	1323,0	1255,3	1419,6	1299,9	1212,6
1973	1347,9	1369,6	1199,3	1449,4	1378,2	1219,7
1974	1230,2	1144,2	1011,7	1249,2	1244,8	1182,4
1975	1108,1	1226,6	1020,9	1227,2	1322,5	1128,3
1976	1956,6	1992,1	1798,8	1946,4	1856,5	1838,1
1977	1296,1	1413,4	1304,2	1340,1	1132,4	1110,0
1978	1500,7	1581,9	1519,3	1746,7	1532,9	1481,0
1979	1295,8	1236,6	1196,9	1228,3	1198,3	1157,8
1980	1457,7	1364,7	1529,0	1583,0	1297,6	1254,1
1981	1332,5	1425,5	1247,4	1240,5	1126,3	1103,9

Precipitação Total Anual [mm]						
Ano	Posto A	Posto B	Posto C	Posto D	Posto E	Posto F
1982	1704,5	1499,9	1630,4	1851,8	1444,5	1527,2
1983	2228,5	2270,9	2170,8	2187,1	2076,5	2158,4
1984	1075,7	1051,3	903,4	1027,2	1044,8	924,8
1985	1175,8	1071,3	968,9	1111,7	907,5	865,4
1986	1558,3	1559,1	1357,0	1694,6	1572,8	1329,7
1987	1655,6	1676,9	1165,3	1762,6	1527,4	1417,1
1988	1714,0	1460,1	1290,0	1709,6	1551,9	1692,4
1989	1705,9	1483,8	1304,7	1516,2	1489,3	1428,9
1990	1515,3	1532,3	1427,0	1487,0	1315,8	1245,5
1991	1923,5	1770,0	2182,2	2145,2	1773,2	1698,2
1992	1442,7	1479,4	1288,5	1365,5	1285,9	1245,1
1993	1304,5	1392,6	1326,1	1423,5	1270,4	1336,5
1994	1285,8	1349,4	1200,3	1327,2	1114,8	1175,9
1995	1650,7	1789,1	1402,3	1897,4	1532,4	1433,8
1996	1924,1	1716,6	1815,9	1792,6	1818,4	1457,4
1997	1428,1	1263,2	1377,9	1451,8	1409,5	1381,1
1998	1386,9	1133,4	1348,6	1534,3	1309,5	1239,0
1999	1207,7	1011,8	1169,9	1374,1	1224,9	1235,8
2000	1252,4	1081,9	1489,9	1565,8	1493,1	1313,6
2001	1324,3	1253,8	1193,2	1419,4	1323,0	1297,7
2002	1453,1	1553,4	1291,9	1552,8	1396,1	1305,8
2003	1063,2	1128,7	1030,8	1188,6	917,4	1021,5
2004	1745,7	1216,6			1320,2	1183,6
2005	1452,7				1190,2	1369,6
2006	1492,4				1461,4	1524,8
2007	1427,8				1164,6	1221,0
2008	1452,9				1161,3	1154,9
2009	1885,5				1695,6	1860,7
2010	2113,7				1752,4	1757,0
2011	1678,7				1292,7	1355,3
2012	1974,2				1137,1	1273,0

ANEXO B – Dados de Precipitação Máxima Diária Anual

A seguir são mostrados os valores de precipitação máxima diária anual utilizados neste estudo juntamente com a data em que cada valor foi registrado.

Precipitação Máxima Diária Anual – Posto A					
Data	P [mm]	Data	P [mm]	Data	P [mm]
07/12/1933	45,6	19/12/1960	68,0	15/06/1987	93,6
18/02/1934	53,0	23/02/1961	73,5	21/12/1988	99,3
24/09/1935	60,1	30/12/1962	61,5	27/12/1989	68,3
03/12/1936	55,9	10/01/1963	54,6	23/01/1990	56,0
18/12/1937	73,1	20/02/1964	54,7	20/03/1991	98,0
01/04/1938	83,0	01/10/1965	71,7	20/03/1992	73,1
01/11/1939	51,2	07/03/1966	150,3	16/02/1993	47,3
07/01/1940	74,2	17/10/1967	97,9	22/12/1994	52,5
10/12/1941	59,3	28/03/1968	100,0	19/02/1995	60,6
20/04/1942	57,2	19/11/1969	90,6	04/01/1996	69,9
14/01/1943	65,0	08/05/1970	80,3	28/01/1997	45,8
13/03/1944	65,8	26/02/1971	129,6	06/02/1998	63,8
21/06/1945	71,9	23/01/1972	79,1	27/02/1999	82,6
13/03/1946	48,2	18/11/1973	59,6	13/01/2000	117,1
09/12/1947	70,5	20/01/1974	68,0	02/10/2001	108,7
11/03/1948	80,2	30/11/1975	55,8	25/03/2002	71,9
12/01/1949	73,9	29/01/1976	104,0	28/01/2003	52,3
20/03/1950	50,5	19/01/1977	91,8	28/11/2004	102,2
26/01/1951	54,4	04/11/1978	70,4	25/05/2005	136,3
25/02/1952	71,7	14/10/1979	51,3	09/02/2006	82,2
02/04/1953	82,3	20/02/1980	82,6	01/01/2007	90,6
17/02/1954	48,7	15/12/1981	65,6	22/02/2008	112,9
21/02/1955	92,6	07/02/1982	98,0	18/03/2009	139,4
27/04/1956	74,8	02/02/1983	119,2	05/02/2010	97,2
21/03/1957	62,5	04/04/1984	50,9	15/12/2011	109,5
10/12/1958	75,5	19/02/1985	96,3	20/12/2012	78,8
20/12/1959	80,7	09/01/1986	69,0	15/06/1987	93,6
07/12/1933	45,6	19/12/1960	68,0	21/12/1988	99,3
18/02/1934	53,0	23/02/1961	73,5		

Precipitação Máxima Diária Anual – Posto B					
Data	P [mm]	Data	P [mm]	Data	P [mm]
19/05/1888	50,7	12/01/1926	82,5	18/12/1960	142,0
02/01/1889	66,0	24/01/1927	88,9	01/01/1961	93,6
10/02/1890	94,0	07/04/1928	102,6	31/12/1962	146,8
11/01/1891	106,6	08/01/1929	118,2	12/01/1963	71,6
27/10/1892	121,9	22/11/1930	102,9	22/04/1964	72,4
11/02/1893	58,4	25/03/1931	106,6	25/09/1965	91,8
15/06/1894	48,3	06/11/1932	48,0	05/03/1966	117,0
04/03/1895	76,2	19/06/1933	55,9	22/01/1967	97,6
14/12/1896	104,1	17/03/1934	137,2	22/02/1968	100,0
14/08/1897	96,5	23/09/1935	43,9	26/02/1969	54,0
22/02/1898	91,4	06/03/1936	55,0	16/01/1970	97,0
14/01/1899	58,4	17/12/1937	76,2	06/03/1971	63,7
19/05/1900	76,2	25/01/1938	76,2	23/01/1972	76,1
21/12/1901	91,4	12/03/1939	55,9	20/12/1973	83,3
24/02/1902	104,1	02/02/1940	71,0	25/03/1974	44,5
28/12/1903	73,7	24/03/1941	61,0	05/02/1975	59,9
04/11/1904	55,9	08/02/1942	76,2	04/07/1976	76,2
13/12/1905	91,4	28/03/1943	66,0	19/01/1977	94,5
22/02/1907	88,9	24/02/1944	66,0	18/01/1980	52,6
15/12/1908	90,8	31/01/1945	94,0	08/03/1981	142,3
04/02/1909	58,5	13/01/1946	88,9	06/02/1982	66,0
09/01/1910	53,8	20/12/1947	73,1	02/02/1983	110,0
21/12/1911	48,5	10/03/1948	72,4	10/01/1984	62,4
25/02/1912	50,0	11/01/1949	124,0	05/02/1985	62,1
04/06/1913	47,5	27/12/1950	69,0	03/02/1986	66,0
07/01/1914	52,8	18/01/1951	73,5	15/06/1987	86,0
06/01/1915	80,5	25/02/1952	60,0	17/02/1988	110,3
27/12/1916	61,5	04/04/1953	69,0	12/02/1989	68,5
09/03/1917	53,3	12/01/1954	85,0	23/01/1990	67,1
10/01/1918	50,8	03/11/1955	99,0	05/03/1991	96,0
12/11/1919	50,8	28/04/1956	84,0	30/03/1992	81,0
23/09/1920	64,8	15/01/1957	85,4	21/01/1993	65,4
02/02/1921	92,8	03/03/1958	115,0	11/03/1994	83,6
09/01/1922	90,2	15/01/1957	85,4	10/03/1995	70,3
14/09/1923	74,4	03/03/1958	115,0	12/12/1996	94,3
25/12/1924	83,8	08/12/1959	79,2	21/09/1997	46,0
25/12/1925	88,9	18/12/1960	142,0	05/03/1998	72,5

Precipitação Máxima Diária Anual – Posto B (continuação)					
Data	P [mm]	Data	P [mm]	Data	P [mm]
05/07/1999	58,5	21/04/2002	50,7	23/02/2004	61,5
25/12/2000	57,9	23/06/2003	61,5		

Precipitação Máxima Diária Anual – Posto C					
Data	P [mm]	Data	P [mm]	Data	P [mm]
07/01/1946	55,6	06/03/1966	131,8	03/02/1986	88,5
11/12/1947	67,5	16/10/1967	67,2	15/06/1987	75,8
12/03/1948	74,3	07/03/1968	60,4	21/12/1988	103,6
12/01/1949	83,8	18/11/1969	67,6	28/07/1989	80,1
20/03/1950	51,0	15/02/1970	84,6	22/03/1990	92,8
26/01/1951	64,5	25/02/1971	132,3	25/04/1991	86,0
23/01/1952	63,8	04/10/1972	63,0	20/03/1992	69,6
02/04/1953	71,0	04/03/1973	72,1	17/02/1993	55,0
13/05/1954	42,7	12/03/1974	50,9	20/03/1994	48,7
28/10/1955	56,3	30/11/1975	61,2	03/02/1995	63,8
25/05/1956	61,5	30/01/1976	80,3	28/02/1996	103,2
03/09/1957	68,3	19/01/1977	85,8	21/01/1997	47,4
06/12/1958	64,7	09/03/1978	65,7	13/01/1998	52,8
05/01/1959	51,2	11/11/1979	39,5	27/02/1999	78,6
18/12/1960	118,4	18/02/1980	86,2	05/12/2000	72,0
28/02/1961	57,2	03/11/1981	63,0	02/10/2001	100,0
18/01/1962	54,6	07/02/1982	100,2	25/03/2002	73,1
04/02/1963	55,8	02/02/1983	110,4	01/01/2003	60,8
27/12/1964	46,9	21/09/1984	50,3		
19/01/1965	103,2	11/02/1985	44,7		

Precipitação Máxima Diária Anual – Posto D					
Data	P [mm]	Data	P [mm]	Data	P [mm]
14/01/1943	104,7	23/12/1966	55,3	19/02/1985	56,1
13/01/1944	67,0	06/02/1967	68,4	03/02/1986	74,7
27/12/1945	70,0	23/02/1968	77,8	15/06/1987	95,2
05/01/1946	40,5	19/11/1969	80,2	21/12/1988	76,2
20/12/1947	78,5	13/03/1970	75,2	28/07/1989	52,3
12/03/1948	53,9	26/02/1971	54,1	22/03/1990	69,2
03/12/1949	120,6	23/01/1972	110,0	17/04/1991	84,5
20/01/1950	44,0	17/12/1973	65,5	30/03/1992	75,6
26/01/1951	94,9	14/03/1974	60,6	24/03/1993	75,6
16/06/1952	113,2	05/02/1975	54,5	07/12/1994	63,9
10/09/1953	72,5	03/07/1976	76,8	03/02/1995	92,5
07/12/1954	47,6	19/01/1977	58,9	04/01/1996	80,5
28/10/1955	58,0	31/01/1978	69,7	04/03/1997	54,6
28/04/1956	65,1	03/01/1979	43,2	05/03/1998	87,3
12/10/1957	63,5	26/12/1980	77,1	01/01/1999	78,2
28/01/1958	70,8	17/03/1981	77,5	22/11/2000	104,0
09/12/1959	89,9	07/02/1982	94,2	02/10/2001	88,2
18/12/1960	133,7	02/02/1983	130,5	25/03/2002	80,5
19/01/1961	66,3	10/01/1984	68,1	02/01/2003	56,4

Precipitação Máxima Diária Anual – Posto E					
Data	P [mm]	Data	P [mm]	Data	P [mm]
12/03/1925	60,0	14/01/1955	58,0	22/01/1985	60,0
27/04/1926	61,0	24/02/1956	69,0	30/11/1986	70,0
14/09/1927	59,0	03/09/1957	54,4	14/06/1987	129,0
23/02/1928	82,0	25/01/1958	48,0	20/12/1988	66,2
12/02/1929	97,0	05/01/1959	60,2	28/01/1989	54,0
01/12/1930	79,0	17/12/1960	77,0	01/11/1990	52,5
05/02/1931	79,0	03/11/1961	80,0	04/03/1991	91,0
11/03/1932	54,0	07/01/1962	69,0	25/02/1992	68,1
19/06/1933	48,0	21/10/1963	57,0	21/09/1993	52,5
17/02/1934	89,0	19/02/1964	45,4	28/01/1994	56,0
23/09/1935	63,0	30/09/1965	56,0	29/12/1995	49,0
01/12/1936	56,0	06/03/1966	132,0	07/02/1996	94,8
15/04/1937	59,0	16/11/1967	52,0	27/01/1997	54,4
31/03/1938	86,0	20/01/1968	68,4	04/03/1998	49,5
16/01/1939	65,0	23/01/1969	79,0	10/02/1999	59,8
07/01/1940	101,8	15/01/1970	61,0	28/03/2000	90,0
16/11/1941	53,4	25/02/1971	98,1	01/10/2001	91,4
19/02/1942	69,2	22/01/1972	75,2	28/01/2002	71,1
06/03/1943	78,0	17/11/1973	90,4	27/01/2003	50,0
13/03/1944	87,0	26/01/1974	51,0	06/04/2004	54,4
20/06/1945	74,0	29/11/1975	88,5	11/01/2005	104,8
13/03/1946	66,0	28/01/1976	145,0	29/11/2006	74,6
27/01/1947	76,0	18/01/1977	64,2	19/12/2007	71,1
11/03/1948	72,6	08/06/1978	67,0	29/01/2008	62,8
27/12/1949	71,0	07/10/1979	47,0	07/12/2009	63,0
08/03/1950	46,0	19/02/1980	84,0	19/01/2010	91,2
25/01/1951	101,0	16/03/1981	56,2	10/01/2011	57,8
21/02/1952	64,0	22/01/1982	85,6	12/02/2012	97,0
02/04/1953	68,6	01/02/1983	116,0		
03/01/1954	30,0	03/04/1984	59,0		

Precipitação Máxima Diária Anual – Posto F					
Data	P [mm]	Data	P [mm]	Data	P [mm]
10/01/1922	72,0	18/10/1953	76,0	01/02/1983	100,0
23/01/1923	74,0	15/02/1954	68,8	19/09/1984	44,3
25/12/1924	70,0	27/10/1955	56,8	22/01/1985	60,0
30/12/1925	58,0	24/02/1956	69,0	11/02/1986	47,0
20/01/1926	80,0	03/09/1957	67,8	14/06/1987	112,5
01/02/1927	79,0	04/02/1958	64,0	20/12/1988	114,5
23/02/1928	90,0	31/03/1959	68,8	28/01/1989	43,5
12/02/1929	94,0	17/12/1960	72,2	01/11/1990	74,0
15/01/1930	99,0	18/01/1961	74,8	14/01/1991	86,8
05/02/1931	85,0	12/03/1962	59,0	29/03/1992	93,6
22/04/1932	73,0	21/10/1963	56,4	18/02/1993	80,1
19/06/1933	47,0	19/02/1964	57,0	27/11/1994	63,5
17/02/1934	66,0	21/11/1965	47,0	14/01/1995	81,0
08/02/1935	84,0	06/03/1966	100,0	06/02/1996	60,0
06/03/1936	52,0	17/02/1967	72,6	23/02/1997	58,4
09/12/1937	46,2	20/01/1968	66,0	08/02/1998	50,0
13/09/1938	76,1	18/11/1969	91,4	09/03/1999	69,0
16/01/1939	59,0	15/01/1970	87,4	28/02/2000	90,6
07/01/1940	96,4	25/02/1971	94,0	27/01/2001	111,4
31/12/1941	60,6	22/01/1972	71,8	24/03/2002	63,4
20/04/1942	46,6	17/11/1973	48,6	27/01/2003	59,0
07/03/1943	70,0	26/01/1974	49,0	22/02/2004	35,0
24/02/1944	88,0	29/11/1975	80,8	24/05/2005	136,4
20/06/1945	73,2	28/01/1976	119,6	02/01/2006	69,9
05/01/1946	56,4	18/01/1977	85,6	19/12/2007	62,8
27/01/1947	84,8	08/06/1978	82,6	24/12/2008	81,8
11/03/1948	80,0	11/12/1979	32,2	07/12/2009	70,4
02/12/1949	64,0	15/02/1980	65,5	21/12/2010	114,8
08/03/1950	61,4	16/03/1981	52,0	09/01/2011	81,4
06/03/1951	55,6	06/02/1982	81,5	12/02/2012	112,6
07/01/1952	60,2				

ANEXO C – Distribuições adimensionais de precipitação de Huff (1967)

Distribuições adimensionais de precipitação de Huff (1967)				
Duração [t/td]	1º Quartil [P/Pt]	2º Quartil [P/Pt]	3º Quartil [P/Pt]	4º Quartil [P/Pt]
0,00	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
0,05	0,0630	0,0150	0,0200	0,0200
0,10	0,1150	0,0160	0,0200	0,0200
0,15	0,1550	0,0390	0,0320	0,0150
0,20	0,1670	0,0550	0,0280	0,0150
0,25	0,1200	0,0830	0,0220	0,0150
0,30	0,0850	0,0970	0,0180	0,0150
0,35	0,0550	0,1150	0,0150	0,0150
0,40	0,0380	0,1050	0,0250	0,0200
0,45	0,0320	0,1050	0,0350	0,0200
0,50	0,0250	0,0950	0,0650	0,0300
0,55	0,0250	0,0800	0,1150	0,0300
0,60	0,0180	0,0550	0,1400	0,0300
0,65	0,0170	0,0400	0,1550	0,0450
0,70	0,0150	0,0300	0,1000	0,0600
0,75	0,0140	0,0180	0,0850	0,0850
0,80	0,0140	0,0140	0,0600	0,1100
0,85	0,0130	0,0120	0,0300	0,1950
0,90	0,0120	0,0110	0,0200	0,1800
0,95	0,0110	0,0080	0,0100	0,0550
1,00	0,0060	0,0070	0,0050	0,0250